

Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer

Lumbricus Bewuste Bodem



Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer
Lumbricus Bewuste Bodem

Auteur(s)

Vince Kaandorp
Perry de Louw
Nick van Eekeren
Carmen Versteeg

Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer

Lumbricus Bewuste Bodem




Opdrachtgever	-
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	19-01-2021
Projectnummer	1220765-013
Document ID	1220765-013-BGS-0002
Pagina's	38
Status	definitief

Auteur(s)

Deltares	Vince Kaandorp	
	Perry de Louw	
Louis Bolk Instituut	Nick van Eekeren	
	Carmen Versteeg	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	 Vince Kaandorp	 Dimmie Hendriks	 B.A. Otto de Keizer	
	Perry de Louw			

Management Samenvatting

Samenvatting

In een veldproef is het effect van verschillende maatregelen op maaiveld afvoer onderzocht. Deze maatregelen zijn 1) de vertidrain, 2) (geboorde) wormengangen en 3) de graslandwoeler. Na uitvoer van de maatregelen op proefvlakken is voor een zomer- en een wintersituatie neerslag nagebootst met beregening. Hierbij zijn metingen uitgevoerd aan grondwaterstanden, bodemvocht en infiltratie. Resultaten laten een duidelijk effect zien van het bodemvochtgehalte op de infiltratiecapaciteit. In een natte situatie komt plasvorming en maaiveldafvoer sneller voor doordat minder water in de bodem kan worden geborgen. Geboorde wormengangen leken het meest effectief in het vergroten van de infiltratie en tegengaan van plasvorming en maaiveldafvoer. Daadwerkelijke conclusies over het effect van de verschillende maatregelen zijn echter door de beperkte opzet bij deze proef niet te trekken. De praktische ervaringen van deze veldproef zijn zeer waardevol voor vervolgonderzoek en de proef heeft tot verschillende aanbevelingen hiervoor geleid.

Belang

Hoewel bekend is dat maaiveldafvoer en plasvorming op grote schaal in Nederland voorkomen, is in vergelijking met andere hydrologische routes nog weinig bekend over de precieze bijdrage aan de afvoer van water en stoffen. Om modelconcepten te verbeteren is meer kennis nodig over waar en wanneer maaiveldafvoer voorkomt. Ook het effect van maatregelen om maaiveldafvoer tegen te gaan is nog weinig bestudeerd, terwijl dit een belangrijke bijdrage kan leveren aan het verbeteren van de waterkwaliteit.

Aanpak

Na een korte literatuurstudie is een veldproef opgezet op een perceel in Stegeren (provincie Overijssel). Het perceel is omgeven door sloten, heeft een zandige bodem en bestaat uit permanent grasland. Voor de veldproef zijn 4 proefvlakken uitgezet en uitgerust met een peilbuis en zijn de drie verschillende maatregelen uitgevoerd (1) de vertidrain, 2) geboorde wormengangen en 3) de graslandwoeler), het vierde proefvlak fungeerde als referentie. Wormengangen zijn hierbij nagebootst door gaten met een diameter van 6 mm tot een diepte van 40 cm handmatig te boren. Grondwaterstanden in de peilbuizen zijn gedurende langere tijd gemonitord. Vervolgens is een beregeningsproef uitgevoerd in de zomer en in de winter. Zowel voor als na deze proeven zijn metingen verricht aan de infiltratiecapaciteit en monsters genomen om de hoeveelheid bodemvocht te bepalen. Tijdens de proeven is gemeten aan grondwaterstanden en beregening ('neerslag') en is plasvorming en maaiveldafvoer gekarteerd.

Resultaten

De infiltratiemetingen voorafgaand aan de zomer- en winterproef laten een duidelijk effect zien van het vochtgehalte op de infiltratiecapaciteit: deze was veel lager in de winter, wanneer het vochtgehalte in de onverzadigde zone hoger is. De lagere infiltratiecapaciteit wordt veroorzaakt door de lagere sorptiviteit bij een nattere bodem, wanneer de bodem dus minder water kan absorberen in de poriën. Ook laten de metingen zien dat grondwaterstanden in een natte situatie sneller reageren op neerslag.

Tijdens de beregeningsproeven is plasvorming vooral geobserveerd bij de inrit van het perceel en in rijsporen, waar de grond is verdicht. Bij de winterproef werd ook oppervlakkige afstroming geobserveerd aan de randen van het perceel, waarbij plassen leidden richting de sloot. Dit

gebeurde onder andere via muizengangen, die een verbinding leggen tussen plassen op het perceel en de slootkant.

De maatregel wormengangen leek tijdens de proeven de infiltratie het meest te vergroten en daarmee plasvorming te voorkomen. Een positief effect van de vertidrain werd echter alleen gevonden bij de eerste nulmeting, wat zou kunnen betekenen dat het effect op de infiltratiecapaciteit van de bodem minder dan 9 maanden stand houdt. Voor het woelen geldt dat de infiltratie 4 maanden na de toepassing hoger is dan het referentievlak, maar lager na 10 maanden bij de winterproef. Waarschijnlijk hebben beide maatregelen dus gedurende beperkte tijd effect en moeten zij regelmatig herhaald worden. De effectiviteit van deze landbewerkingen neemt dus met de tijd af. Er mag worden verwacht dat het effect van wormengaten het hele jaar aanwezig is, afhankelijk van de activiteit van de wormen.

Er dient te worden opgemerkt dat het een veldproef van beperkte omvang betrof waarin mogelijke maatregelen werden gedemonstreerd. Daadwerkelijke conclusies over het effect van de verschillende maatregelen zijn door de beperkte opzet bij deze proef niet te trekken.

Implementatie

De maatregelen die in de proef zijn getest lijken over het algemeen toepasbaar voor het vergroten van de infiltratiecapaciteit en het tegengaan van maaiveldafvoer. Aanbevolen wordt om verder onderzoek uit te voeren om de effecten te kwantificeren. De in deze studie gebruikte proefopzet kan, na verbeteringen, hiervoor worden toegepast.

Toepassingsmogelijkheden

Aanvullende proeven kunnen de effectiviteit van maatregelen onderbouwen. Verschillende (praktische) aanbevelingen zijn gedaan om dergelijk vervolgonderzoek op te zetten. Zo zijn meerdere herhalingen van proefvlakken nodig om de heterogeniteit op een perceel beter mee te nemen. Daarnaast wordt aanbevolen om de berekening zo in te richten dat deze homogener over de proefvlakken is verdeeld en gedurende langere tijd kan plaatsvinden.

De metingen van infiltratie, oppervlakkige afvoer en grondwaterstand kunnen daarnaast gebruikt worden om nieuwe modelconcepten te valideren dan wel kalibreren. Door de WUR zijn de resultaten van deze velddemonstratie gebruikt in combinatie met modellen zoals SWAP. Dit is opgenomen in een aparte rapportage (Heinen et al., 2020).

Inhoud

	Management Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Achtergrond / literatuur	8
3	Methode	11
3.1	Studie locatie	11
3.2	Proefopzet	14
3.2.1	Maatregel 1: Vertidrain	15
3.2.2	Maatregel 2: Wormengangen	15
3.2.3	Maatregel 3: Woelen	15
3.3	Metingen	16
4	Resultaten	19
4.1	Berekening, observaties en karteren	19
4.1.1	Zomerproef	19
4.1.2	Winterproef	21
4.2	Grondwaterstanden	24
4.2.1	Grondwaterstanden proefperceel	24
4.2.2	Zomerproef	24
4.2.3	Winterproef	25
4.3	Infiltratie	27
4.3.1	Nulmeting	27
4.3.2	Zomer- en winterproef	28
4.4	Bodemvocht	31
5	Conclusies	33
5.1	Conclusies	33
5.2	Aanbevelingen veldproef maaiveldafvoer	34
6	Literatuur	36

1 Inleiding

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven maakt onderdeel uit van het thema Bewuste Bodem van het onderzoeksprogramma Lumbricus (looptijd 2016-2020). Lumbricus is een samenwerkingsprogramma met onderzoeksinstituten en regionale partijen, waarin doelstellingen met betrekking tot waterkwaliteit, zoetwatervoorziening, bodembeheer, klimaatadaptatie en waterveiligheid samenkomen. Kern van het programma Lumbricus is het ontwikkelen en implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van innovatieve maatregelen op het gebied van bodem, ondergrond en water. Het Lumbricus-thema Bewuste Bodem richt zich op de bodem als sleutel in vocht- en nutriëntenvoorziening voor landbouw en natuur en op een duurzaam bodem- en waterbeheer voor een gezonde bodem in relatie tot gebruiksfuncties. Het thema richt zich met name op de effectiviteit van hydrologische en bodemmaatregelen op perceelsniveau en de verbetering van modellen om de effectiviteit te kunnen beoordelen.

Binnen de proeftuin Oost is onderzoek gedaan naar verschillende bodemmaatregelen om de waterhuishouding op lokale schaal te verbeteren. In het gebied is de bodemstructuur in de bovengrond van landbouwpercelen niet goed ontwikkeld, wat vaak leidt tot slechte waterinfiltratie en oppervlakkige afvoer. Dit heeft een negatief effect op een perceel, doordat voedingstoffen en bodem wegspoelen, wat zorgt voor een slechte waterkwaliteit in het ontvangende oppervlaktewater. Binnen het project was de vraag of de bodemstructuur kan worden verbeterd door middel van maatregelen, om zo oppervlakkige afstroming te reduceren.

In dit rapport wordt één van de veldproeven beschreven waarbij een drietal maatregelen is gedemonstreerd gericht op het vergroten van de infiltratie en tegengaan van maaiveldafvoer. Andere veldproeven waren gericht op organische stof, het introduceren van wormen en het vergroten van de beworteling. De maatregelen toegepast in de hier beschreven veldproef waren 1) vertidrain, 2) wormengangen en 3) woelen. Bij maatregel 1, de vertidrain, zijn verticale gaten mechanisch aangebracht die, net als wormengangen, de bodeminfiltratie kunnen bevorderen. Bij maatregel 2 zijn wormengangen gesimuleerd door handmatig verticale gaten te boren. De algemene hypothese was dat het voorkomen van bodemleven, en specifiek van pendelende wormen, de infiltratie bevordert en daardoor oppervlakkige afvoer wordt verminderd. Daarnaast is de techniek 'woelen' toegepast als maatregel 3. Deze maatregel wordt reeds door agrariërs gebruikt als oplossing bij een verdichte bovenlaag.

Er dient te worden opgemerkt dat het een veldproef van beperkte omvang betrof waarin mogelijke maatregelen werden gedemonstreerd. Het betreft nadrukkelijk geen veldonderzoek waarbij gegevens worden verzameld op basis waarvan conclusies kunnen worden getrokken over de werking van maatregelen.

In hoofdstuk 2 wordt kort een weergave gegeven van de beschikbare literatuur. In hoofdstuk 3 wordt de veldproef en methode beschreven. In hoofdstuk 4 volgen de resultaten van de veldproef waarna in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen worden gegeven.

2 Achtergrond / literatuur

Neerslag dat in Nederland op het maaiveld valt kan twee kanten op: in eerste instantie zal het de bodem in willen zakken richting het grondwater, in tweede instantie zal het op het maaiveld blijven staan waar het plassen vormt of tot afstroom komt. Dit gebeurt in twee situaties:

- 1) De grondwaterstand stijgt tot aan het maaiveld. Deze zogenaamde 'Dunniaanse' maaiveldafvoer vindt vooral plaats bij langdurige neerslag in de winter.
- 2) De intensiteit van de neerslag is hoger dan de infiltratiecapaciteit van de bodem. Deze zogenaamde 'Hortoniaanse' maaiveldafvoer vindt vooral plaats bij hevige piekbuien in de zomer.

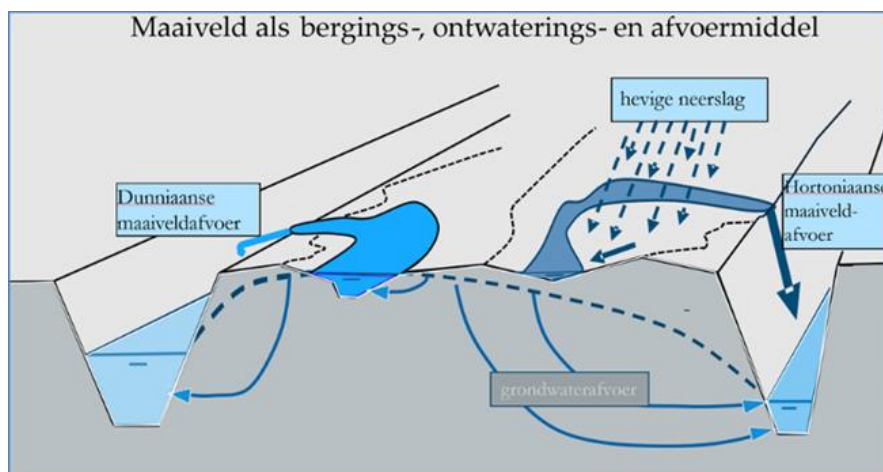


Figure 2.1 Schematische voorstelling van Dunniaanse en Hortoniaanse maaiveldafvoer (uit: Van Bakel et al., 2018).

In Nederland vindt maaiveldafvoer en plasvorming bij bijna alle grondsoorten plaats bij intense buien met een herhalingsstijd van 25 jaar (Stolte et al., 2000). Ook bij buien met een herhalingsstijd van 1 jaar is er op veel locaties risico op maaiveldafvoer. Verder komt maaiveldafvoer op veel plekken voor bij aanhoudende natte condities in de winter, smeltende sneeuw of een bevroren ondergrond.

Een deel van het water dat niet infiltreert zal op het maaiveld worden geborgen in laagtes, microreliëf en de strooisellaag. De berging door microreliëf en strooisellaag heeft de capaciteit om 0 tot 30 mm water te bergen, afhankelijk van het landgebruik (Massop et al., 2017). Voor landbouwpercelen is de inschatting van deze berging 5 (akkerbouw/mais) tot 7 mm (grasland).

De snelheid waarmee water de bodem in kan zakken wordt bepaald door de doorlatendheid en infiltratie karakteristieken van de bodem. Een van de beschikbare infiltratievergelijkingen is de vergelijking van Philip (Philip, 1957; Ward, 1975; Appels, 2013):

$$f = \frac{S}{2\sqrt{t}} + k_v$$

waarbij f de infiltratiesnelheid is [m/d], t de tijd [d], S de sorptivity [m/ \sqrt{t}] en k_v de verzadigde verticale doorlatendheid [m/d].

De sorptivity is een maat voor de hoeveelheid water die de bodem kan absorberen in de poriën, wat vooral belangrijk is bij aanvang van een bui en bij een droge bodem. Naarmate de bodem tijdens een bui natter wordt zal de infiltratiesnelheid langzaam verminderen en de verticale doorlatendheid naderen. Op basis van metingen van De Louw et al. (2015) is door Massop et al

(2017) een relatie afgeleid tussen de cumulatieve infiltratie over de eerste 30 minuten (mm) en de bodeminfiltratiecapaciteit (BI; mm/uur):

$$I(30min) = (-0.83 * \log(BI) + 2.31) * BI$$

Met de resultaten van deze relatie zijn waarden voor de sorptiviteit bepaald tussen de 0.3 en 23.6 mm/uur.

De doorlatendheid beschrijft de capaciteit waarmee water door de bodem kan stromen en hangt naast de totale porositeit ook af van de grootte, onderlinge verbinding en de verdeling van de poriën. Door processen als luchtinsluiting en verslemping is de werkelijke infiltratiesnelheid meestal kleiner dan de verticale doorlatendheid (Jarvis en Messing, 1995). De infiltratiecapaciteit varieert ruimtelijk sterk en wordt voor een groot deel bepaald door bodemgebruik (Fonck, 1968; Huinink, 1986). Waarden voor de verzadigde verticale doorlatendheid recentelijk gemeten in het gebied van waterschap Vechtstromen liggen grofweg tussen 3 en 156 mm/dag (De Louw et al., 2015), en 2.7 en 455 mm/dag (Massop et al., 2017).

Verdichting van de bodem kan leiden tot een verlaging van de infiltratie capaciteit van meer dan 80% (bijv. Chyba et al., 2014). Deze verdichting van de bodem ontstaat bijvoorbeeld door het gebruik van zware machines. Het is een bekend verschijnsel dat bij (hevige) neerslag water blijft staan op kopakkers en in rijsporen op percelen. Ook het vertrappen van de bodem door vee zorgt voor verdichting. Onder bepaalde omstandigheden, zoals droogte, kan de bodem verschijnselen van waterafstotendheid vertonen, waardoor de infiltratie wordt verkleind (Ritsema en Dekker, 2000).

Het voorkomen van zeer grote poriën (macroporiën) zoals scheuren in kleigrond onder droge omstandigheden, muizengangen, wortels en wormengangen kan de infiltratie compleet bepalen en zorgen voor hoge infiltratiesnelheden. Macroporiën worden beïnvloed door biotische processen, in de literatuur worden macroporiën die gevormd zijn door biotische processen 'biopores' genoemd. Hoewel plantenwortels voor biopores kunnen zorgen, kan het groeien van wortels er ook zorgen dat poriën verstopt raken en de infiltratie wordt verminderd (Fischer et al., 2014). Hierdoor kan de infiltratiecapaciteit variëren gedurende het (groei)seizoen.

Verschillende veld en lab studies concluderen dat wormen kunnen zorgen voor een significante stijging van de infiltratie (e.g. Zaller et al., 2011; Shipitalo en Gibbs, 2000). Door het graven van gangen neemt de porositeit toe en doordat regenwormen druk uitoefenen op de omliggende grond en de zijkanten van de gangen met slijm of klei verstevigen kunnen stabiele macroporiën ontstaan (Six et al., 2004). Wormengangen kunnen zelfs een directe verbinding leggen met buisdrainage (Figuur 2.1; Urbánek en Doležal, 1992; Shipitalo en Gibbs, 2000). Het effect van wormen op de infiltratie hangt af van de wormensoort, bijvoorbeeld door verschillen in hun grootte of manier van graven. De regenworm *Lumbricus terrestris* kan door zijn grote diameter en graafdiepte tot enkele meters zorgen voor veel infiltratie via macroporiën. Door niet te ploegen kunnen macroporiën voor langere tijd aanwezig blijven.



Figuur 2.1. Een wormengang kan een verbinding vormen tussen het maaiveld en buisdrainage. Metingen van de infiltratie via deze gang geven een gemiddelde infiltratie van 236 mL per minuut. Uit: Shipitalo en Gibbs, 2000.

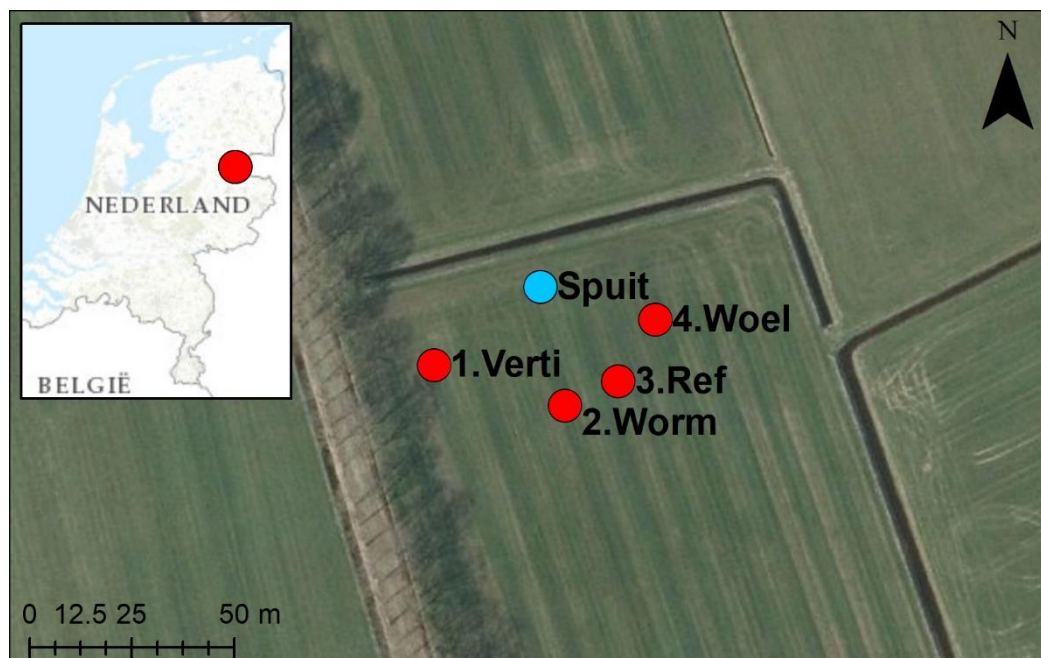
3 Methode

3.1 Studie locatie

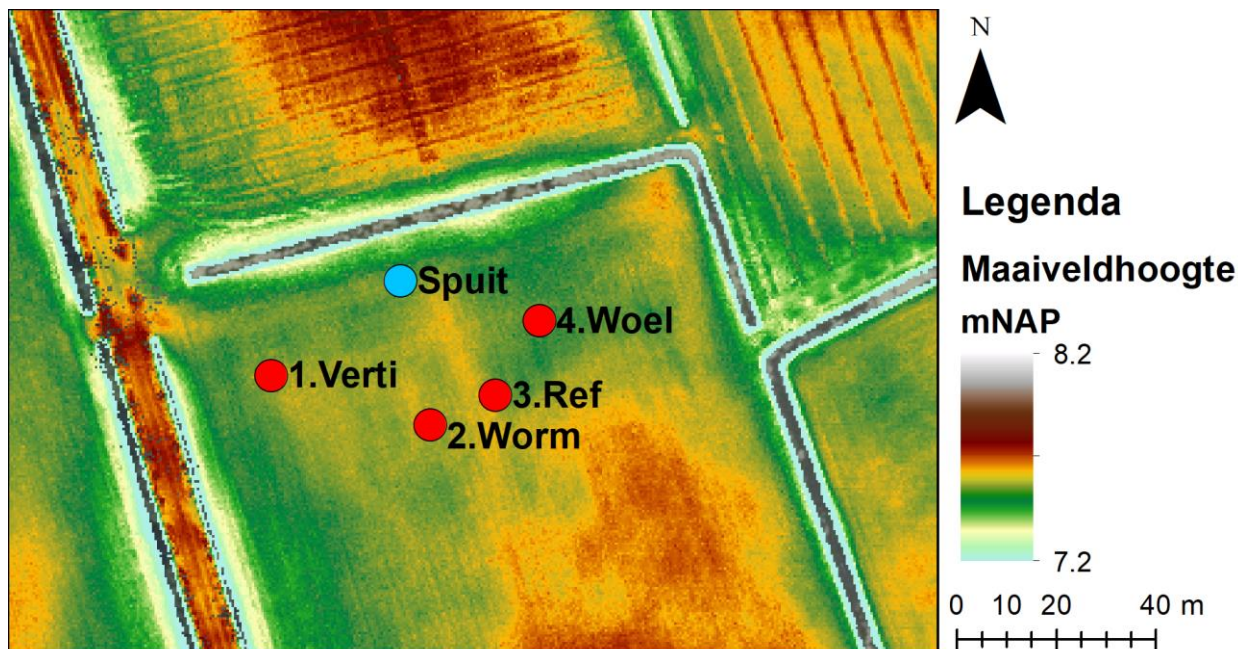
Het proefperceel is gelegen in Stegeren in Overijssel. De veldproef vindt plaats aan de noordkant van het perceel (Figuur 3.1). Het ongedraineerde perceel bestaat uit permanent grasland en is in de afgelopen ongeveer 10 jaar niet geploegd. Het onderhoud bestaat hoofdzakelijk uit maaien en irrigeren. Op het perceel zijn 4 proefvlakken uitgezet:

1. Verti (vertidrain)
2. Worm (wormengangen)
3. Ref (referentie)
4. Woel (graslandwoeler)

Het perceel is omgrensd door sloten (Figuur 3.1), de afstand tot de sloten is ongeveer 22, 40, 37 en 24 meter voor respectievelijk proefvlakken 1, 2, 3 en 4. De maaiveldhoogte van het perceel is 8 m+NAP aan de zuidkant en loopt wat af richting de sloten, bijvoorbeeld tot 7.5 m+NAP aan de noordzijde. Het perceel heeft een microreliëf waarbij de maaiveldhoogte enkele centimeters varieert over kleine afstand (Figuur 3.2). Proefvlak 4 ligt iets lager dan de andere proefvlakken. Op het perceel zijn rijsporen en enkele muizengangen geobserveerd.



Figuur 3.1. Locatie van het proefperceel.



Figuur 3.2. Variatie in maaiveldhoogte op het proefperceel.

Van het perceel is bekend dat er bij hevige of langdurige neerslag plasvorming plaats vindt. Dit is bijvoorbeeld geobserveerd op 15 maart 2019 (Figuur 3.3). Door het geringe hoogteverschil en het microreliëf vind hierbij geen echte afstroming plaats.



Figuur 3.3. Plassen op het perceel op 15 maart 2019.

De bodem van het perceel is onderzocht middels een bodemkartering, waarbij voor de 4 proefvlakken een bodemprofiel is beschreven tot een diepte van circa 1.5 m onder maaiveld. Tijdens de bodemkartering zijn ook de GHG, GLG, bewortelingsdiepte en grondwatertrap bepaald (Tabel 3.1). De GHG ligt op 40 tot 45 cm onder maaiveld en de GLG ongeveer 110 cm onder maaiveld. Over het algemeen is er weinig verschil tussen de proefvlakken. Het organische stofgehalte is hoger in de bovenste lagen (2 – 8 %) dan in de C-horizont (0.3 – 1%) (Tabel 3.2). Leemgehalten liggen tussen de 12 en 22, de zandgrofheid (M50) is 120 tot 160 μm en het siltgehalte varieert tussen de 14 en 28. Het perceel heeft een A-horizont tot een diepte van 25 tot 35 cm op proefvlakken 1 t/m 3. Proefvlak 4 wijkt af van de andere proefvlakken: de A-horizont rijkt hier tot 90 cm diepte. Deze dikke A-horizont zou kunnen betekenen dat dit een oude sloot betreft.

Tabel 3.3 geeft de vertaling naar Staringreeks bouwstenen op basis van textuur, en de vervolgvordering naar een bijbehorend BOFEK2012 profiel. Vergelijking met de BOFEK2012 codes die volgens de landelijke BOFEK2012 kaart voor de betreffende locaties gelden laat zien dat volgens de landelijke BOFEK2012 kaart er een 205 – zanddek op moerige tussenlaag op zandondergrond – zou liggen; echter, volgens de lokale veldkartering wordt er geen moerige tussenlaag aangetroffen (heel soms houtresten op grotere diepte), waardoor lokaal er een zandcode (304; zwak lemige (podzol-) gronden) wordt afgeleid. Mogelijk dat de moerige tussenlaag door natuurlijke afbraak is verdwenen en nu als minerale laag wordt aangemerkt.

Tabel 3.1. Duiding GHG, GLG en bewortelingsdiepte, inclusief actuele grondwaterstand. De Gt klasse is afgeleid uit gerapporteerde GHG en GLG.

OBJECTID	GHG (cm)	GLG (cm)	Beworteling (cm)	Opmerking	Opname datum	Gt
1	40	110	130	gws 79cm	23-05-2019	III/IV
2	45	110	40		23-05-2019	IV
3	45	110	35	gws 85cm	23-05-2019	IV
4	45	110	60	gwst 75 oude sloot evt	23-05-2019	IV

Tabel 3.2. Beschrijving bodemprofielen.

OBJECTID	LaagID	Laag	Boven (cm)	Onder (cm)	Hor. code	Meng verh.	OS (%)	Lutum	Leem	M50	GEO	Opmerking	Silt
1	1147	1	0	15	1Ap	0	5	1	14	145	411		16
	1148	2	15	25	1A/B	0	2	1	14	145	411	verwerkt	16
	1149	3	25	35	1BC	0	0.5	1	18	120	411		20
	1150	4	35	45	1Cg	0	0.3	1	22	120	411		24
	1151	5	45	110	1Ce	0	0.3	1	14	145	411		16
	1152	6	110	130	1Cer	0	0.3	1	12	145	411		14
	1153	7	130	160	1Cr	0	0.3	1	12	155	411		14
2	1154	1	0	28	1Ap	0	6	1	14	145	411		16
	1155	2	28	35	1A/B	0	3	1	14	145	411		16
	1156	3	35	60	1BC1	0	0.5	1	14	145	411	dicht	16
	1157	4	60	110	1BC2	0	0.5	1	12	155	411		14
	1158	5	110	120	1Cer	0	0.2	1	12	155	411	houtresten	14
	1159	6	120	160	1Cr	0	0.2	1	12	155	411		14
3	1160	1	0	30	1Ap	0	5	1	14	145	411		16
	1161	2	30	35	1A/C	0	2.5	1	18	145	411		20
	1162	3	35	55	1Ce	0	0.5	1	22	140	411		24
	1163	4	55	100	1BC	0	0.5	1	14	160	411		16
	1164	5	100	130	1Cer	0	1	1	14	160	411	houtresten	16
	1165	6	130	160	1Cr	0	1	1	14	160	411	houtresten	16
4	1166	1	0	25	1Ap	0	3	1	12	145	411		14
	1167	2	25	90	1Ah/	50	8	1	16	145	411		18
	1168	3	25	90	1Cg/	50	0.5	1	14	145	411		16
	1169	4	90	110	1Cg	0	0.5	1	14	155	411		16
	1170	5	110	150	1Cr	0	0.5	1	12	155	411		14

Tabel 3.3. Toekenning Staringreeks bouwsteen codes per bodemlaag uit Tabel 3.1, en de hieruit afgeleide lokale BOFEK2012 eenheid; ter vergelijking is de BOFEK2012 eenheid volgens de landelijke BOFEK2012 kaart ook gegeven.

OBJECTID	LaagID	Laag	Boven (cm)	Onder (cm)	Staringreeks bouwsteen	BOFEK2012, lokaal	BOFEK2012, landelijk
1	1147	1	0	15	B2	304 (zonder O3)	205
	1148	2	15	25	B2/O2		
	1149	3	25	35	O2/O3		
	1150	4	35	45	O3		
	1151	5	45	110	O2		
	1152	6	110	130	O2		
	1153	7	130	160	O2		
2	1154	1	0	28	B2	304	205
	1155	2	28	35	B2/O2		
	1156	3	35	60	O2		
	1157	4	60	110	O2		
	1158	5	110	120	O2		
	1159	6	120	160	O2		
3	1160	1	0	30	B2	304 (zonder O3)	205
	1161	2	30	35	B2/O2		
	1162	3	35	55	O3		
	1163	4	55	100	O2		
	1164	5	100	130	O2		
	1165	6	130	160	O2		
4	1166	1	0	25	B2	304 311, indien dik cultuurdek	205
	1167	2	25	90	B2		
	1168	3	25	90	O2		
	1169	4	90	110	O2		
	1170	5	110	150	O2		

3.2 Proefopzet

Om het effect van verschillende maatregelen op de infiltratiecapaciteit te bestuderen zijn op het proefperceel vier proefvlakken (4 bij 6 m) uitgezet waarop drie verschillende maatregelen worden bestudeerd (Figuur 3.1), dit zijn:

- 1 Vertidrain (proefvlak 1)
- 2 Wormengangen (proefvlak 2)
- 3 Referentie (proefvlak 3)
- 4 Woelen (proefvlak 4)

Door middel van irrigatie via een beregeningsinstallatie wordt neerslag gesimuleerd. Vervolgens worden binnen de proefvlakken verschillende metingen verricht om het effect van de maatregelen op de infiltratie te bepalen. Voor de berekening zijn een pompinstallatie en sproeier aan de noordkant van het perceel nabij de sloot geplaatst. De sproeier heeft een bereik van ongeveer 50-60 meter en wordt zo geplaatst dat een halve cirkel op het perceel wordt beregend. De proefvlakken bevinden zich op ongeveer 30 meter afstand van de sproeier, en vallen daarmee ongeveer in het midden van het gebied wat wordt beregend. De capaciteit van de pomp is grofweg 50 tot 60 kuub per uur, bij het irrigeren in een halve cirkel met een straal van 60 meter staat dat gelijk aan neerslag met een intensiteit van 10 mm/uur. Bij berekening in de zomer gedurende 2 uur (cumulatief 20 mm) is dit vergelijkbaar met een T=1 bui, bij berekening gedurende 1 uur (cumulatief 10 mm) in de winter is dit vergelijkbaar met een T=5 bui (Beersma et

al., 2019). Tijdens de proef wordt de neerslag (uit beregeningsinstallatie) gemonitord met regenmeters.

3.2.1 Maatregel 1: Vertidrain

Proefvlak 1 is in het najaar van 2018 bewerkt met de 'Verti Drain'. Dit apparaat steekt pennen tot een diepte van 30 tot 40 centimeter in de grond met een wikkende beweging en breekt zo de toplaag open (Figuur 3.4). Er dient te worden opgemerkt dat de gaten meer dan 8 maanden vóór uitvoeren van de zomerproef en 15 maanden vóór de winterproef met de vertidrain zijn aangebracht. Het is onbekend hoe lang de gaten open blijven en hoe lang ze dus effectief zijn.



Figuur 3.4. De Verti Drain. Bron: twitter.com/vertidrain

3.2.2 Maatregel 2: Wormengangen

Op proefvlak 2 zijn wormengangen van pendelende wormen nagebootst. Hiervoor zijn met gangbare universele boren met een diameter van 6 mm gaten tot een diepte van 40 cm gemaakt. Het proefvlak is opgedeeld in twee delen van 4x6m welke een verschillende dichtheid van geboorde gangen kregen. Een deel een dichtheid van 50 gaten per vierkante meter (2a) en het andere deel een dichtheid van 100 gaten per vierkante meter (2b). Bij de zomerproef had het westelijke deel 100 gaten/m², bij de winterproef was dit omgekeerd en had het oostelijke deel 100 gaten/m². Zowel voor de zomerproef als voor de winterproef zijn de wormengaten geboord. Tussen het boren van de wormengangen en de proeven zat 1 week voor de zomer proef, en 1 dag voor de winterproef (Tabel 3.4).

3.2.3 Maatregel 3: Woelen

Bodemverdichting kan ook worden voorkomen door het woelen van de bodem met een graslandwoeler (Figuur 3.5). Woelen wordt vooral toegepast op de kop van akkers waar verdichting optreedt door het keren met landbouwvoertuigen. Deze machine tilt de grasmat op en laat deze weer neer, waardoor verdichte stukken worden opengebroken. Uit recent onderzoek blijkt dat het woelen van grasland zorgt voor een verbetering van de bodemstructuur gedurende minimaal 10 tot 12 maanden (De Boer et al., 2018). Deze techniek is in het voorjaar van 2019 toegepast op proefvlak 4, ongeveer 3 maanden vóór uitvoeren van de zomerproef en 10 maanden vóór de winterproef.



Figuur 3.5. De graslandwoeler tilt de grasmat op en maakt zo de bodem los. Foto uit: De Boer et al., 2016.

De maatregelen en metingen zijn uitgevoerd op de volgende momenten zoals weergegeven in Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Data waarop maatregelen zijn toegepast en metingen zijn gedaan.

Periode	Maatregel	Metingen
17 oktober 2018	Toepassen vertidrain proefvlak 1	Nulmeting infiltratie
5 maart 2019		
15 maart 2019	Plaatsen peilbuizen	
Maart/april 2019	Toepassen woelen proefvlak 4	
15/16 juli 2019	Boren wormengangen proefvlak 2	Zomerproef
22/23 juli 2019		
5 februari 2020	Boren wormengangen proefvlak 2	Winterproef
6 februari 2020		

3.3 Metingen

Per proefvlak is de *bodemopbouw* bepaald door middel van boringen en bodembeschrijvingen.

Een nulmeting is uitgevoerd van de *infiltratiecapaciteit*. Omdat ten tijde van deze nulmeting een deel van het perceel al bewerkt was met de vertidrain gelden deze infiltratiemetingen voor de maatregel vertidrain niet als nulmeting. Daarnaast is de infiltratiecapaciteit zowel vóór als direct na afloop van zowel de zomer als de winterproef bepaald. De infiltratie is gemeten met dubbele ring infiltrometers. Hierbij worden twee metalen ringen in de bodem geslagen en vervolgens met water gevuld (Figuur 3.6). De buitenste ring zorgt ervoor dat de infiltratie die in de middelste ring wordt gemeten alleen verticaal gericht is. In de middelste ring wordt een vlotter met peilschaal geplaatst en het waterpeil continue gelogd. Uit de daling van het waterpeil met de tijd kan de infiltratie worden bepaald.



Figuur 3.6. Een dubbele ring infiltrometer.

Grondwaterstanden zijn bemeaten in vier freatische peilbuizen, welke binnen de vier proefvlakken tot een diepte van ongeveer 2 meter onder maaiveld zijn geplaatst. Deze waren uitgerust met druksensoren die de grondwaterstand vanaf juni 2019 iedere 6 uur vastleggen. Tijdens de veldproeven is de meetfrequentie verhoogd naar 1x per minuut.

Vóór en na de zomer en winterproef zijn in ieder proefvlak *bodemmonsters* genomen. Per proefvlak zijn vier monsters genomen, op dieptes van 10, 20, 40 en 60 cm. Deze monsters zijn in het lab gewogen, op 105°C gedroogd en daarna nogmaals gewogen. Het percentage aan vocht is vervolgens bepaald door omrekening met de door Heinen et al. (2020) bepaalde bulkdichtheden (Tabel 3.5).

Tabel 3.5. In duplo gemeten bulkdichtheden op verschillende dieptes in het proefperceel. Uit: Heinen et al. (2020).

Diepte [cm]	Bulkdichtheid
0 - 25	1.3584
0 - 25	1.2819
30 - 40	1.7498
30 - 40	1.7270
55 - 65	1.7779
55 - 65	1.7747

Naast deze metingen is er gezocht naar een manier om oppervlakkige afstroming te meten. Tijdens de proeven is plasvorming en eventuele afstroming handmatig gekarteerd. Verder zijn tijdens de zomersituatie gootjes in het perceel ingegraven die eventuele afstroming konden opvangen en naar een verzamelbak leiden waar het gemeten kon worden (Figuur 3.7). Helaas bleek deze methode niet goed te werken doordat het perceel (te) vlak is en veel microreliëf kent.



Figuur 3.7. Proefopstelling tijdens de zomerproef. Rood omcirkeld links een regenmeter en rechts een peilbuis (afgewerkt onder maaiveld). Tijdens de zomerproef zijn gootjes en een verzamelbak ingegraven in een poging om oppervlakkige afstroming op te vangen.

Tabel 3.6. Overzicht van de metingen.

	Bodemopbouw	Infiltratie	Grondwaterstanden	Bodemvocht	Karteren Plasvorming	Berekening
Nulmeting	Ja	Ja, plus infiltratie vertidrain				
Continue			4x per dag			
Zomerproef	Voor	Ja	1x per minuut	Ja		
	Tijdens		1x per minuut		Ja	Ja
	Na	Ja	1x per minuut	Ja		
Winterproef	Voor	Ja	1x per minuut	Ja		
	Tijdens		1x per minuut		Ja	Ja
	Na	Ja	1x per minuut	Ja		

4 Resultaten

4.1 Berekening, observaties en karteren

4.1.1 Zomerproef

De zomerproef vond op 22 en 23 juli 2019 plaats op een hete (ca. 35 graden Celsius) zonnige dag met matige wind. Voorafgaand aan de proef werd geobserveerd dat de bodem droog en vrij hard was. Gedurende de eerste 3 uur van de zomerproef heeft de berekening plaats gevonden over alle vier de proefvlakken. Vanwege kleine verschillen in afstand tot de beregeningsinstallatie en het effect van de wind varieerde de gemeten 'neerslag' op de proefvlakken gedurende deze periode tussen de 14.3 en 18.1 mm/uur (Tabel 4.1). Observaties gedurende de berekening zijn:

Proefvlak 1 (Vertidrain)

- Na ongeveer 60 minuten (14 mm) begint proefvlak 1 (vertidrain) drassig te worden.
- Na 76 minuten begint plasvorming in rijsporen buiten de proefvlakken. Na 120 minuten ontstaan steeds meer plassen bij de ingang van het perceel.
- Na 138 minuten (31.5 mm) is er op proefvlak 1 water te zien als druk op de bodem wordt gezet (met laars).
- Na 144 minuten (~32-33 mm): de proefvlakken worden steeds drassiger.
- Na 180 minuten (~40-50 mm): alle proefvlakken zijn drassig. In volgorde van drassig naar droger: proefvlak 1 – 3 – 4 – 2.
- Na 180 minuten wordt de intensiteit van de berekening verhoogd en wordt proefvlak 1 voor 2 minuten besproeid met 18 mm water. Dit zorgt direct voor plassen op het land.

Proefvlak 2 (geboorde wormengangen)

- Na 76 minuten begint plasvorming in rijsporen buiten de proefvlakken. Na 120 minuten ontstaan steeds meer plassen bij de ingang van het perceel.
- Na 144 minuten (~32-33 mm): de proefvlakken worden steeds drassiger, proefvlak 2 (wormgaten) blijft duidelijk droger/steviger dan de andere proefvlakken.
- Na 180 minuten (~40-50 mm): alle proefvlakken zijn drassig. In volgorde van drassig naar droger: proefvlak 1 – 3 – 4 – 2.
- Hierna wordt de berekening gedurende 10 minuten gestart op proefvlakken 2 t/m 4 (intensiteit gemiddeld 59.7 mm/uur) en hierna wordt de intensiteit weer verhoogd door alleen proefvlakken 2 en 3 te beregenen (intensiteit gemiddeld 60.6 mm/uur) (Tabel 4.1).
- Het proefvlak blijft minder drassig is binnen het proefvlak (waar wormengaten zijn geboord) dan direct buiten het proefvlak. Er is eerst nog geen duidelijk verschil tussen proefvlakken 2a (50 gaten / m²) en 2b (100 gaten / m²).
- Na ca. 10 minuten met hoge intensiteit berekening wordt geobserveerd dat proefvlak 2a (met minder gaten) iets droger is dan 2b.
- Na 222 minuten (totaal 71.5 mm) zijn er enkele plassen te zien op proefvlak 2a (50/m²) (vooral in wat lijkt op een rijspoor) en veel plassen op proefvlak 2b (100/m²). Op proefvlak 3 hebben de plassen inmiddels een diepte van meer dan 1 cm.

Proefvlak 3 (referentie)

- Na ongeveer 55 minuten (12-15.5 mm) beginnen proefvlakken 3 (referentie) en 4 (woelen) drassig te worden.
- Na 76 minuten begint plasvorming in rijsporen buiten de proefvlakken. Na 120 minuten ontstaan steeds meer plassen bij de ingang van het perceel.
- Na 144 minuten (~32-33 mm): de proefvlakken worden steeds drassiger.

- Na 180 minuten (~40-50 mm): alle proefvlakken zijn drassig. In volgorde van drassig naar droger: proefvlak 1 – 3 – 4 – 2.
- Hierna wordt de beregening gedurende 10 minuten gestart op proefvlakken 2 t/m 4 (intensiteit gemiddeld 59.7 mm/uur) en hierna wordt de intensiteit weer verhoogd door alleen proefvlakken 2 en 3 te beregenen (intensiteit gemiddeld 60.6 mm/uur) (Tabel 4.1).
- Proefvlak 3 (referentie) is hierbij drassiger dan proefvlak 2 en er ontstaan plassen na beregening van in totaal 56 mm in 3.5 uur.
- Na 222 minuten (totaal 71.5 mm) hebben de plassen een diepte van meer dan 1 cm.

Proefvlak 4 (woelen)

- Na ongeveer 55 minuten (12-15.5 mm) beginnen proefvlakken 3 (referentie) en 4 (woelen) drassig te worden.
- Na 76 minuten begint plasvorming in rijsporen buiten de proefvlakken. Na 120 minuten ontstaan steeds meer plassen bij de ingang van het perceel.
- Na 144 minuten (~32-33 mm): de proefvlakken worden steeds drassiger.
- Na 180 minuten (~40-50 mm): alle proefvlakken zijn drassig. In volgorde van drassig naar droger: proefvlak 1 – 3 – 4 – 2.
- Hierna wordt de beregening gedurende 10 minuten gestart op proefvlakken 2 t/m 4 (intensiteit gemiddeld 59.7 mm/uur) en hierna worden alleen proefvlakken 2 en 3 beregend (Tabel 4.1).
- Als laatste wordt de sproeier gericht op proefvlak 4 (woelen). Hier ontstaan al snel kleine plasjes die snel groeien. Bij het beëindigen van de proef zijn er hier plassen tot 10 cm diep ontstaan na in totaal 106 mm beregening.

Gedurende de zomerproef is er geen oppervlakkige afstroming waargenomen.

Tabel 4.1. Beregeningsintensiteit op de proefvlakken tijdens de zomerproef.

Proefvlak	Tijd	Intensiteit [mm/uur]
1	13:08 - 16:10	15.1
1	16:10 - 16:12	480*
2	13:08 - 16:10	14.3
2	16:18 - 16:29	70.9
2	16:29 - 17:11	63.4
3	13:08 - 16:10	14.4
3	16:18 - 16:29	52.5
3	16:29 - 17:11	57.7
4	13:08 - 16:10	18.1
4	16:18 - 16:29	55.8
4	17:15 - 17:48	112.5

*De beregening was op dit moment zeer hoog doordat de sproeier enkele minuten op 1 locatie was gericht.



Figuur 4.1. Beregening tijdens de zomerproef.

4.1.2 Winterproef

De winterproef vindt plaats op 6 februari 2020, een bewolkte dag met weinig wind. In de week voor de proef is circa 10 mm neerslag gevallen. Voorafgaand aan de proef zijn observaties op ieder proefvlak gedaan. Proefvlakken 1 t/m 3 zijn vrij droog en stevig. Proefvlak 4 is drassig en zacht, maar er zijn geen plassen te zien. Gedurende de winterproef heeft de beregening continue plaats gevonden over alle vier de proefvlakken. Vanwege kleine verschillen in de afstand tot de beregeningsinstallatie varieerde de gemeten 'neerslag' op de proefvlakken gedurende deze periode tussen de 13.2 en 23.0 mm/uur (Tabel 4.2).

Tabel 4.2. Beregeningsintensiteit op de proefvlakken tijdens de winterproef.

Proefvlak	Tijd	Intensiteit [mm/uur]
1	13:11 - 14:45	15.1
2	13:11 - 14:45	23.0
3	13:11 - 14:45	21.5
4	13:11 - 14:45	13.2

Observaties gedurende de beregening zijn:

Proefvlak 1 (Vertidrain)

- Na ongeveer 15 minuten (1.5 mm) is proefvlak 1 vochtig en wat drassig.
- Na 27 minuten (3 mm) zijn er op proefvlak 1 beginnende plassen te zien maar is de bodem nog wel stevig. Na 31 minuten (5.5 mm) zijn deze plassen uitgegroeid en overal te zien.
- Na 35 minuten (7.5 mm) zijn er in proefvlak 1 overal plassen te zien, tot enkele cm diep, vooral in rijsporen welke duidelijk te zien zijn op het perceel. De bodem is nog wel stevig.

Proefvlak 2 (geboorde wormengangen)

Proefvlak 2a (wormgaten, 50/m²) en proefvlak 2b (wormgaten, 100/m²) zijn omgedraaid ten opzichte van de zomerproef.

- Na 18 minuten (7.5 mm) begint in proefvlak 2b (wormgaten, 100/m²) een plas in een rijspoor. Proefvlak 2a (wormgaten, 50/m²) is dan licht drassig, maar lijkt droger/steviger dan 2b.
- Na 23 minuten (10 mm) zijn er op proefvlak 2b meer plassen te zien dan op 2a.
- Na 32 minuten (12.5 mm) zijn er op proefvlak 2b meer plassen te zien dan op 2a. Vooral in rijsporen. Proefvlak 3 is op dat moment natter dan proefvlak 2.
- Na 37 minuten (15 mm) zijn er grote plassen te zien op proefvlak 2b en begint de bodem drassig te worden. Op proefvlak 2a beginnen ook plassen te vormen, maar dit proefvlak is droger dan 2b.
- Na 45 minuten (17-18 mm) is proefvlak 3 natter dan proefvlak 2a welke natter is dan 2b. Je hoort het perceel 'bubbelen'.
- Na 65 minuten (25 mm) groeien de plassen op proefvlak 2. Op proefvlak 2b zijn de hoogste delen nog droog, maar staat op 2a overal water. Dit geldt ook voor proefvlak 3.

Proefvlak 3 (referentie)

- Na 19 minuten (7 mm) is proefvlak 3 drassig en ontstaat er een plas in een rijspoor.
- Na 45 minuten (17-18 mm) is proefvlak 3 natter dan proefvlak 2. Je hoort het perceel 'bubbelen'.
- Na 65 minuten (25 mm) staat op proefvlak 3 overal water.

Proefvlak 4 (woelen)

- Na 21 minuten (4.5 mm) zijn er veel plassen op proefvlak 4 te zien, en in het gebied direct eromheen.
- Na 48 minuten (11.5 mm) zijn er op proefvlak 4 overal grote plassen te zien. Na 54 minuten (12.5 mm) is dit ook het geval op proefvlak 1.
- Na 70 minuten (16 mm) staat proefvlak 4 alom onder water. Bij de slootrand is oppervlakkige afstroming te zien vanaf dit proefvlak. Deels stroomt het water vanuit de plassen over hogere delen heen naar de sloot, maar deels gaat het water ook via een muizengang naar de slootkant.

Bij het einde van de proef zijn alle proefvlakken veranderd in een drassig moeras met grote plassen. Alleen de hoogste plekken staan nog droog, maar ook hier is water te zien als druk op de bodem wordt gezet. Er is geen duidelijk verschil meer te zien tussen proefvlakken 2 en 3. Na 45 minuten na beëindiging van de proef wordt opgemerkt dat op proefvlak 3 het meeste water lijkt te zijn geïnfiltreerd ten opzichte van de andere proefvlakken.

2 uur na beëindiging van de proef worden de proefvlakken nogmaals geïnspecteerd:

- Proefvlak 1 (vertidrain) bestaat vooral nog uit plassen, de drogere delen zijn zeer drassig.
- Proefvlak 2a (wormgaten, 50/m²) heeft veel plassen, een klein deel van het vlak is zeer drassig. Dit proefvlak is op dit moment natter dan 2b.
- Proefvlak 2b (wormgaten, 100/m²) heeft plassen in oude rijsporen. Het grootste deel van het vlak is zeer drassig, enkele hogere delen flink vochtig.
- Proefvlak 3 (referentie) lijkt het meeste opgedroogd van de proefvlakken. Het meeste water is geïnfiltreerd en nog enkele plassen zijn zichtbaar. De rest van het proefvlak is vochtig of licht drassig.
- Proefvlak 4 (woelen) is het natst van de proefvlakken en overal zijn plassen te zien. Opvallend bij het nemen van de bodemonsters was dat het boorgat eerst vrij droog was, maar bij het dieper boren (op enkele decimeters diepte) opeens volliep met water tot ca. 10 cm onder maaiveld. Mogelijk is een muizengang of iets dergelijks aangeboord.



14:03



14:20



14:31



14:52 (7 minuten na stop berekening)

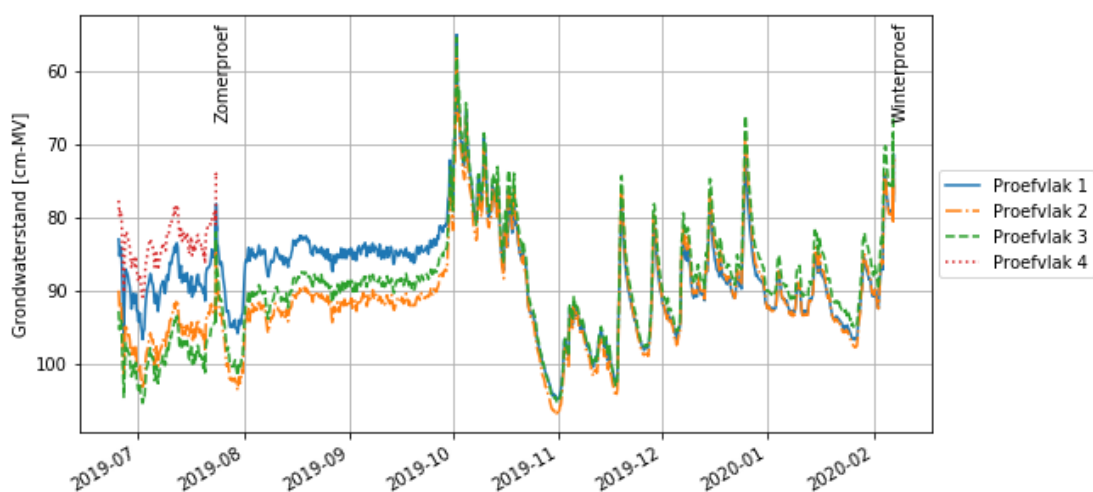
Figuur 4.2. Foto's van proefvlak 2 tijdens de winterproef. Links van de paaltjes proefvlak 2b (100/m²), rechts proefvlak 2a (50/m²).

4.2 Grondwaterstanden

4.2.1 Grondwaterstanden proefperceel

Vanaf de zomer 2019 tot en met de winterproef in februari 2020 zijn de grondwaterstanden 4x per dag gemeten in de 4 peilbuizen van de proefvlakken. Te zien is dat in de zomer periode de grondwaterstand vrij stabiel is en fluctueert tussen grofweg 80 en 100 cm onder maaiveld. Er is enkele centimeters verschil tussen de grondwaterstand in de verschillende peilbuizen en weinig reactie op neerslag te zien. Opvallend is het verschil met de winterperiode: vanaf oktober lijken de grondwaterstanden in alle peilbuizen nagenoeg gelijk en duidelijk te reageren op neerslag. Het grondwaterpeil stijgt zelfs tot ongeveer 55 cm onder maaiveld in oktober 2019, om vervolgens te dalen tot 105 cm onder maaiveld.

Mogelijk is het verschil tussen de zomer en winter in de reactie van de grondwaterstand op neerslag veroorzaakt door het effect van het zomer- en winterpeil in de nabijgelegen sloot. Proefvlakken 1 en 4 liggen het dichtst bij deze sloot (respectievelijk 22 en 24 m afstand) en hebben in de zomerperiode een grondwaterstand dicht bij het maaiveld dan de andere peilbuizen (op afstand 40 en 37 m). Dit zou kunnen duiden op een infiltratiesetting vanuit de sloot in de zomer, waarbij het grondwaterpeil licht afneemt met afstand van de sloot. In het geval van het winterpeil is vervolgens geen verschil tussen de verschillende peilbuizen te zien.



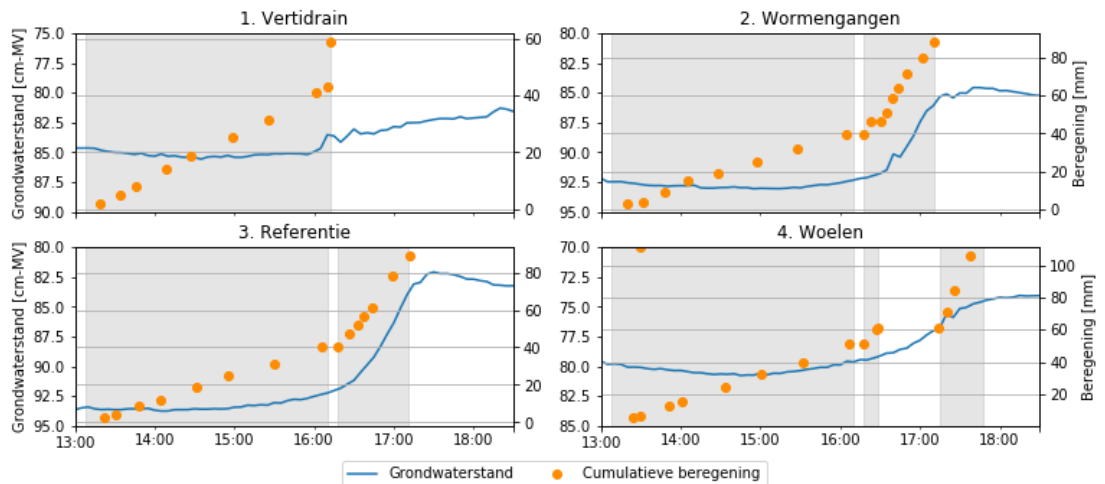
Figuur 4.3. Grondwaterstanden in het proefperceel. Metingen op proefvlak 4 lopen tot en met de zomerproef in juli 2019.

4.2.2 Zomerproef

Tijdens de zomerproef zijn de grondwaterstanden iedere minuut gemeten.

- Gedurende de eerste uren van beregening met een intensiteit van 14.3-18.1 mm/uur is er weinig verandering in de grondwaterstand te zien.
- Na ongeveer 2 uur lijken proefvlakken 2, 3 en 4 een lichte stijgende lijn te vertonen terwijl proefvlak 1 niet stijgt.
- Als na 3 uur de beregeningsintensiteit op proefvlak 1 gedurende enkele minuten wordt verhoogt lijkt de grondwaterstand een sprong van 1 tot 2 cm te maken en na het stoppen van de beregening blijft de grondwaterstand langzaam stijgen. De grondwaterstand is het minst gestegen van alle proefvlakken, slechts 3 cm (bij een cumulatieve beregening van 59 mm) .
- Op proefvlak 2 stijgt de grondwaterstand na 3 uur ongeveer 7.5 cm als wordt beregend met een intensiteit van 63.4-70.9 mm/uur. Na het stoppen van de beregening loopt deze stijging nog ongeveer een half uur door en hierna zakt de grondwaterstand weer. De maximale stijging was ongeveer 8 cm (cumulatieve beregening van 88.5 mm).

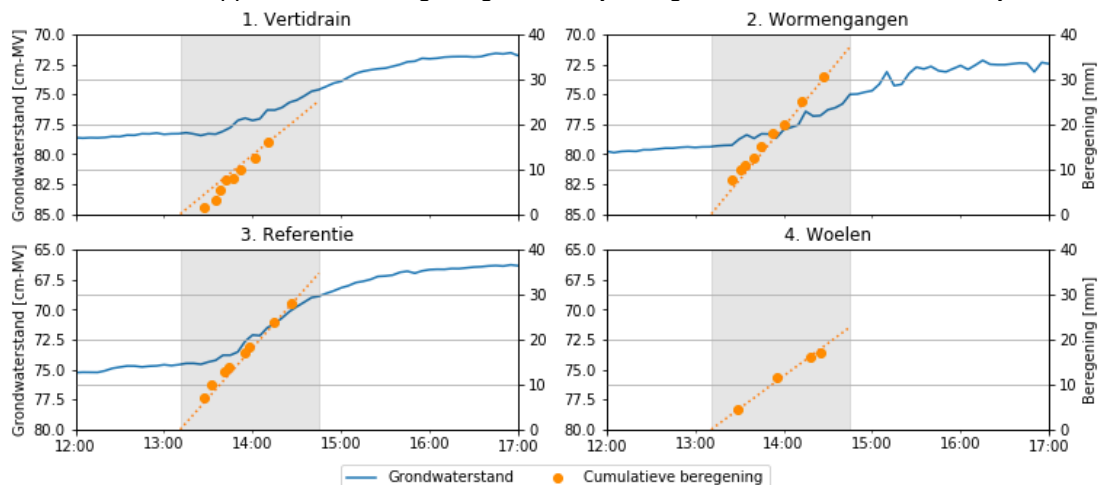
- Ditzelfde patroon is te zien bij proefvlak 3, waar de grondwaterstand ongeveer 10 cm stijgt door de hoge intensiteitsberegening (cumulatieve beregening van 89 mm).
- Op proefvlak 4 is een meer gelijkmatige stijging te zien van in totaal ongeveer 5 cm, mogelijk doordat er een pauze van ongeveer 45 minuten in de beregening op dit proefvlak was. Cumulatieve beregening was 106 mm.



Figuur 4.4. Grondwaterstanden tijdens de zomerproef. Het grijs gearceerde gebied geeft de momenten van beregening van het proefvlak aan.

4.2.3 Winterproef

Tijdens de winterproef kon de grondwaterstand niet worden gemeten op proefvlak 4 omdat de peilbuis niet werd teruggevonden. De beregening was gedurende de hele winterproef vergelijkbaar tussen de proefvlakken (Tabel 4.2). Ook de reactie in de grondwaterstand is ongeveer hetzelfde: in de eerste 30 tot 45 minuten van de proef is er geen reactie in de grondwaterstand te zien. Daarna stijgt de grondwaterstand in alle proefvlakken grofweg 7.5 cm, na ongeveer 25 tot 35 mm beregend te hebben. Deel van deze stijging vindt plaats tot ongeveer 1 a 1.5 uur na het stoppen van de beregening. Hierna lijkt de grondwaterstand stabiel te blijven.



Figuur 4.5. Grondwaterstanden tijdens de winterproef. Het grijs gearceerde gebied geeft de periode met beregening aan.

De grondwaterstand reageert dus anders bij de zomerproef (stijging na beregening van >40 mm in enkele uren) dan bij de winterproef (stijging na beregening van ~10 mm binnen een uur). Dit kan worden verklaard door de bergingscoëfficiënt: in de zomer is de bodem droger en kan meer water als bodemvocht worden geborgen. Pas als die berging wordt overschreden vindt significante

grondwateraanvulling plaats. In de winter is er door het al natte bodemprofiel weinig ruimte in de onverzadigde zone om water te bergen en zal het grondwater eerder beginnen te stijgen.

4.3 Infiltratie

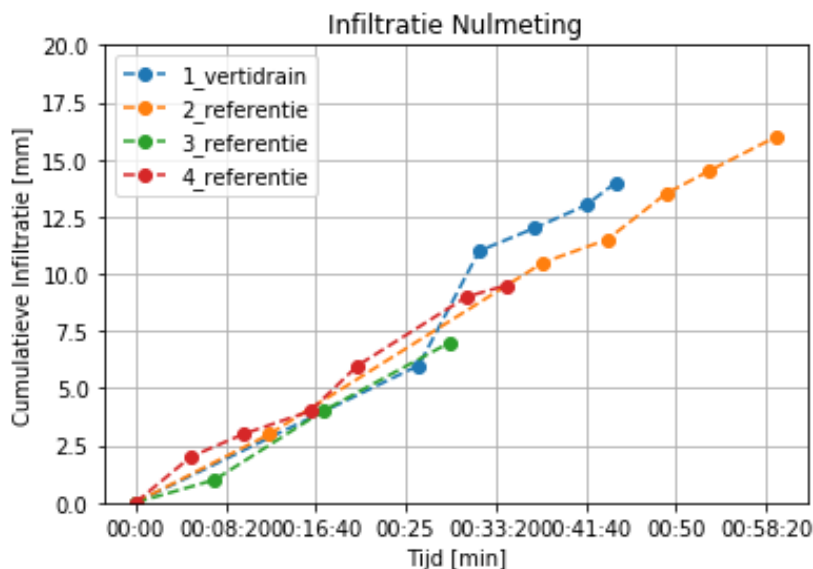
Bij het meten van de infiltratiesnelheid worden doorgaans hogere infiltratiesnelheden gemeten bij aanvang van de meting als gevolg van de sorptiviteit. Na enige tijd stabiliseert de infiltratiesnelheid en benadert deze de verzadigde verticale doorlatendheid. Om deze reden zal bij het vergelijken van de metingen worden gefocust op de laagste gemeten waarde voor de infiltratiesnelheid, welke doorgaans tegen het einde van de meting is gemeten.

4.3.1 Nulmeting

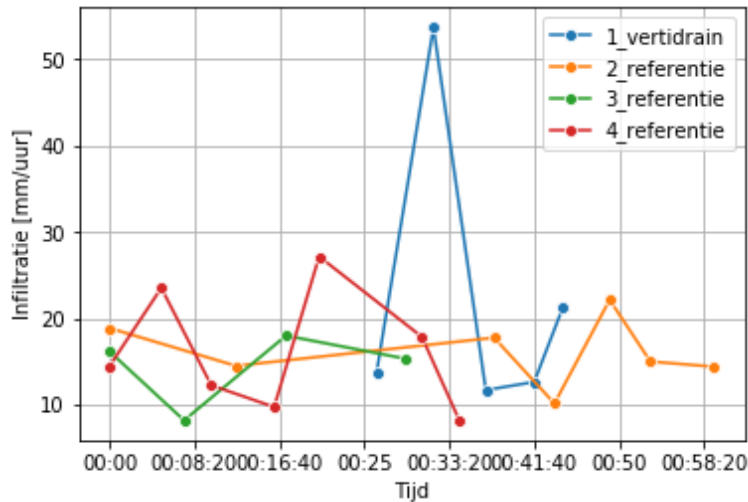
In maart 2019 is een nulmeting van de infiltratie verricht met ringinfiltrometers. De maatregel Vertidrain was toen al 4,5 maanden eerder toegepast, de overige maatregelen nog niet (Tabel 3.1). Deze nulmeting op de referentieproefvlakken voor een wintersituatie gemeten in maart 2019 geeft een minimale infiltratie van tussen de 8,2 en 10,1 mm/uur (Tabel 4.3). De nulmetingen van het proefvlak Vertidrain geven een minimale infiltratie van 11,7 mm/uur. Dit is grofweg 14 tot 30% hoger dan op de nog onbewerkte delen van het perceel.

Tabel 4.3. Resultaat van de infiltratiemetingen bij de nulmeting in maart 2019.

Periode	Proefvlak	Type	Infiltratie [mm/uur]		
			Max.	Min.	Gemiddeld
Nulmeting	1	Vertidrain	53.7	11.7	18.9
	2	Referentie (wormen)	22.2	10.1	16.2
	3	Referentie	18.0	8.2	14.4
	4	Referentie (woelen)	27.2	8.2	16.6



Figuur 4.6. Resultaten van de infiltratiemetingen per proefvlak tijdens de nulmeting (winter 2019). Op het moment van deze meting is alleen op proefvlak 1 de maatregel al toegepast, de rest van de proefvlakken geven op dat moment een referentiewaarde.



Figuur 4.7. Verloop van de infiltratiesnelheid tijdens de nulmeting.

4.3.2 Zomer- en winterproef

Zomer

Voorafgaand aan de zomermetingen (Figuur 4.8, boven) laat het proefvlak met de vertidrain een lagere infiltratie zien in vergelijking met de referentie, alhoewel de infiltratiesnelheid wel hoger is bij start van de meting. Het proefvlak waar is gewoeld laat een grofweg 50% hogere infiltratie zien dan het referentievlak. De proefvlakken waar wormengangen zijn geboord laten de hoogste minimale infiltratie zien: 82.0 en 120.0 mm/uur waar respectievelijk 50 en 100 wormengaten per vierkante meter zijn geboord. Dit lijkt erop te duiden dat het boren van de wormengangen in de zomersituatie een groot effect op de infiltratie hebben.

Na het uitvoeren van de beregeningsproef is de infiltratie in de proefvlakken opnieuw bepaald (Tabel 4.4). Na de zomerproef is de infiltratiesnelheid in drie proefvlakken afgenomen (vertidrain en wormengangen) en in twee proefvlakken toegenomen (referentie en woelen). Dit verschil kan mogelijk worden verklaard door het moment van de meting. Doordat er maar 3 ringinfiltrometers beschikbaar waren, is direct na het stoppen van de beregening eerst op proefvlakken 1 t/m 2b gemeten. Pas enige tijd later is op proefvlakken 3 en 4 gemeten. Mogelijk is de sorptiviteit op proefvlakken 3 en 4 in de tussentijd weer beschikbaar gekomen door een daling van het vochtgehalte. De infiltratie op proefvlak 1 Vertidrain is na de proef zeer laag en vergelijkbaar met waarden gemeten in de winter. Bij de wormengangen vindt nog wel infiltratie plaats, opvallend genoeg is de infiltratie na de proef hoger op het deel met 50 wormengangen per vierkante meter (68 mm/uur) dan het deel met 100 wormengangen per vierkante meter (55 mm/uur).

Tabel 4.4. Resultaat van de infiltratiemetingen voor en na de zomerproef. Voor ieder proefvlak is 1 meting gedaan vóór en 1 meting na de proef, op ongeveer dezelfde locatie. Maximale, minimale en gemiddelde infiltratie zijn dus voor 1 meting, waarbij maximaal over het algemeen is gemeten aan het begin en minimaal tegen het einde van de meting.

Periode	Proefvlak	Type	Infiltratie [mm/uur]		
			Max.	Min.	Gemiddeld
Voor beregening	1	Vertidrain	200.0	26.7	56.3
	2A	Wormengangen 50/m ²	300.0	82.0	155.3
	2B	Wormengangen 100/m ²	450.0	120.0	285.9
	3	Referentie	169.4	52.5	88.2
	4	Woelen	240.0	72.0	130.9
Na beregening	1	Vertidrain	17.1	7.8	9.6

2A	Wormengangen 50/m ²	223.4	68.4	140.1
2B	Wormengangen 100/m ²	113.7	55.4	81.0
3	Referentie	756.0*	331.6*	420.0*
4	Woelen	500.9*	225.0*	374.7*

*Start meting ca. anderhalf uur na stop beregenen en korte meting (<15 minuten).

Winter

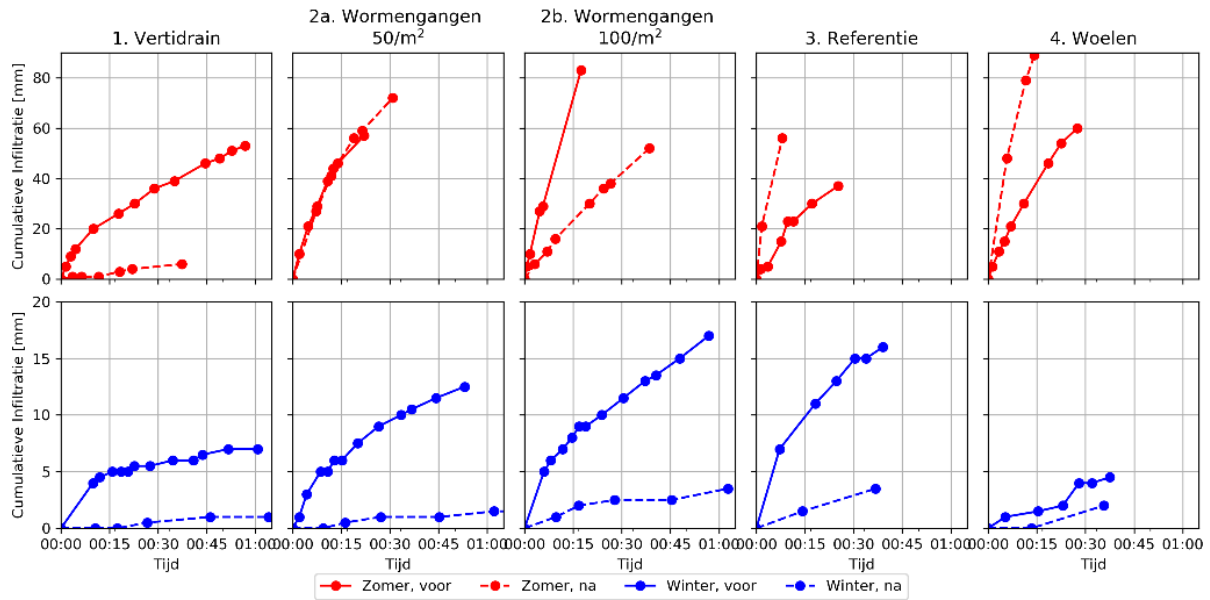
Vergeleken met de zomer metingen is de infiltratie in de initiële winterconditie (februari 2020) veel lager, veroorzaakt door een nattere bodem en daardoor een lagere sorptiviteit. Zo laat het referentieveld in de winter een minimale infiltratie zien van 11.6 mm/uur, versus de 52.5 in de wintersituatie. Op proefvlak 4 Vertidrain meten we in de winterconditie een minimale infiltratie van 3.7 mm/uur. In tegenstelling dan tijdens de nulmeting is er dan dus geen verhogend effect van de vertidrain op de infiltratiesnelheid meer te zien, waarschijnlijk omdat de maatregel op dat moment al meer dan een jaar eerder is toegepast (najaar 2018). Proefvlak 4 laat voor de wintersituatie in vergelijking met de nulmeting een lagere infiltratie zien: 8.2 mm/uur bij de nulmeting versus 3.0 mm/uur voorafgaand aan de winterproef. Op het moment van meten in februari 2020 is het woelen echter al bijna 1 jaar eerder gedaan. Verder is opvallend dat de infiltratie voor alle proefvlakken in de winter vrij gelijkmatig verloopt (Figuur 4.8, onder).

Bij de winterproef zorgde de beregening ervoor dat de infiltratiecapaciteit op alle proefvlakken sterk werd gereduceerd en vrijwel stil valt. Ook bij deze proef is eerst gemeten bij proefvlak 1 t/m 2b. Als we deze proefvlakken vergelijken is na de beregening de infiltratie aanvankelijk nog het hoogst bij proefvlak 2 en laagst bij proefvlak 1.

Tabel 4.5. Resultaat van de infiltratiemetingen voor en na de winterproef. Voor ieder proefvlak is 1 meting gedaan vóór en 1 meting na de proef, op ongeveer dezelfde locatie. Maximale, minimale en gemiddelde infiltratie zijn dus voor 1 meting, waarbij maximaal over het algemeen is gemeten aan het begin en minimaal tegen het einde van de meting.

Periode	Proefvlak	Type	Infiltratie [mm/uur]		
			Max.	Min.	Gemiddeld
Voor beregening	1	Vertidrain	24.2	3.7	6.9
	2A	Wormengangen 50/m ²	52.2	6.8	14.2
	2B	Wormengangen 100/m ²	50.1	9.0	18.0
	3	Referentie	58.6	11.6	24.6
	4	Woelen	24.0	3.0	7.2
Na beregening	1	Vertidrain	3.2	->0	0.9
	2A	Wormengangen 50/m ²	4.4	->0	1.3
	2B	Wormengangen 100/m ²	8.5	->0	3.3
	3	Referentie	6.3*	5.3*	5.7*
	4	Woelen	5.4*	5.4*	3.4*

*Start meting ca. anderhalf uur na stop beregenen.



Figuur 4.8. Verloop van de infiltratie voor en na de zomer- en winterproef.

4.4 Bodemvocht

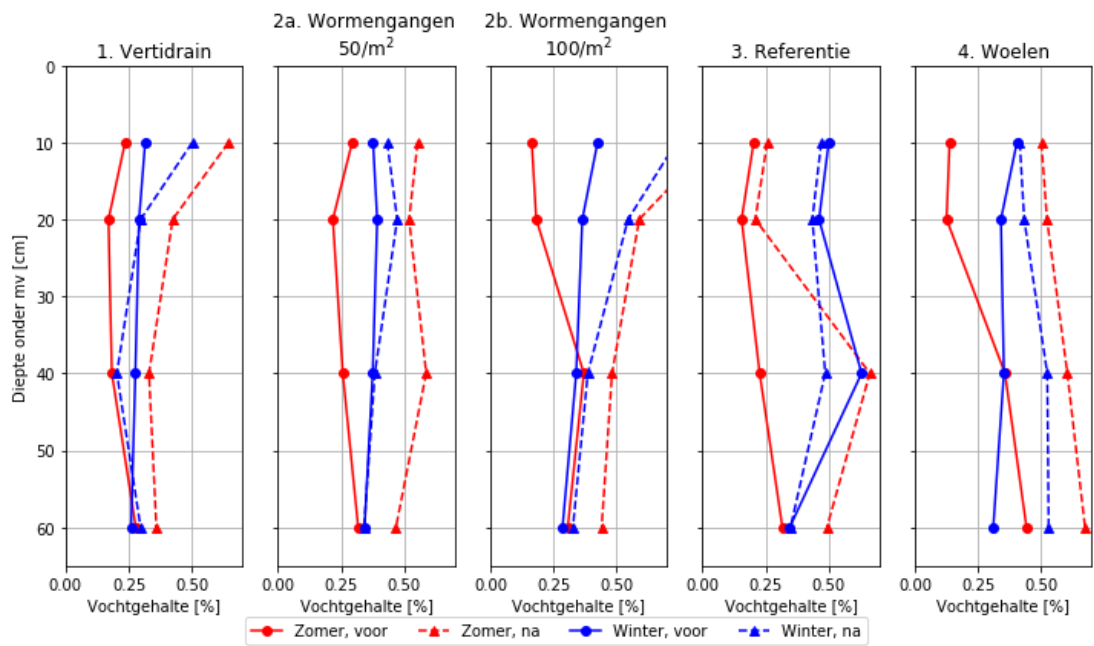
Zowel voor als na de zomer- en winterproef zijn bodemmonsters genomen en geanalyseerd op het vochtgehalte. Voorafgaand aan de zomerproef lag het vochtgehalte tussen 12 en 44%, met een gemiddelde van 25% (Figuur 4.10). Er zijn geen grote verschillen tussen de verschillende proefvlakken. Na de zomerproef lag het vochtgehalte tussen 20 en 88 % met een gemiddelde van 51%. De waarden hoger dan 50% lijken echter niet realistisch, en zijn waarschijnlijk veroorzaakt door bemoeilijking van de monsternamen na de beregeningsproef door plassen op het maaiveld. Wel is duidelijk dat op alle proefvlakken het vochtgehalte over de hele diepte toenam (Figuur 4.10) en het meest in de bovenste lagen. Opvallend was dat op het referentieveld de monsters op 10 en 20 cm diepte weinig in vochtgehalte zijn toegenomen.

Voorafgaand aan de winterproef lag het vochtgehalte tussen 26 en 63 %, met een gemiddelde van 37% (Figuur 4.10). Grofweg komt dit overeen met de door Heinen et al. (2020) bepaalde verzadigde vochtgehalten van 46% bovenin het bodemprofiel tot ongeveer 30% op diepte groter dan 30 cm. Zoals te verwachten is in de winterperiode een hoger vochtgehalte aangetroffen dan in de zomer. Na de winterproef lag het vochtgehalte tussen 20 en 74 % met een gemiddelde van 43%. Ook hier waren er moeilijkheden in bemonstering na de proef, wat vermoedelijk de reden is voor de zeer hoge waarden op 10 en 20 cm diepte in proefvlak 2b. In vergelijking met de zomerproef is er op de verschillende proefvlakken maar een kleine toename in het vochtprofiel te zien. Opvallend is dat op proefvlak 4 het vochtgehalte vooral bij de diepere monsters lijkt te zijn toegenomen.

In de winter bevatte de bodem voorafgaand aan de proef meer vocht dan in de zomer, vooral in de bovenste lagen. Na de proef in de zomer lijkt de bodem over het algemeen meer vocht te bevatten dan na de winterproef.



Figuur 4.9. Impressie van de bodemmonsters na drogen.



Figuur 4.10. Bodemvochtgehalten voor en na de zomer- en winterproef.

5 Conclusies

5.1 Conclusies

De infiltratiemetingen voorafgaand aan de zomer- en winterproef laten een duidelijk effect zien van het vochtgehalte op de infiltratiecapaciteit: deze was veel lager in de winter, wanneer het vochtgehalte in de onverzadigde zone hoger is. Dit wordt veroorzaakt door de lagere sorptiviteit bij een nattere bodem, wanneer de bodem dus minder water kan absorberen in de poriën. Dit effect was ook te zien in de metingen na de beregeningsproeven: op de proefvlakken die direct na de proef werden gemeten was de infiltratiesnelheid lager dan de proefvlakken waar pas na anderhalf tot 2 uur met een meting werd gestart. Dit duidt erop dat de sorptiviteit in de tussentijd deels is hersteld. Dit effect is ook te zien in de grondwaterstanden tijdens de proeven: in de zomer duurt het enkele uren vanaf de start van beregening voordat een reactie in de grondwaterstand te zien is, terwijl in de winter al bijna direct een stijging te zien is.

Tijdens de beregeningsproeven is plasvorming vooral geobserveerd bij de inrit van het perceel en in rijsporen, waar de grond is verdicht. Bij de winterproef werd ook oppervlakkige afstroming geobserveerd, waarbij plassen leidden richting de sloot. Dit gebeurde onder andere via muizengangen, die een verbinding leggen tussen plassen op het perceel en de slootkant.

In dit onderzoek zijn 3 verschillende maatregelen ter voorkoming van maaiveldafvoer gedemonstreerd: de vertidrain, graslandwoeler en wormengangen.

Ca. 4.5 maanden na het toepassen van de vertidrain wordt bij de nulmeting een hogere infiltratie gemeten, maar voorafgaand aan de zomer- en winterproeven wordt geen hogere infiltratie meer gemeten. Tijdens de infiltratieproeven is geen hogere infiltratie geobserveerd op het proefvlak waar de vertidrain is toegepast. Bij de visuele observaties tijdens de proef lijkt het proefvlak zelfs iets natter dan het referentieproefvlak. Tijdens de zomerproef laat het grondwaterpeil daarnaast weinig reactie zien op de beregening. Bij de winterproef reageert de grondwaterstand op eenzelfde manier als op de andere proefvlakken. De vertidrain lijkt op het moment van de zomer- en winterproef dus geen gunstig effect te hebben op de infiltratie. Zeer waarschijnlijk neemt de effectiviteit van de aangebrachte gaten door de vertidrain sterk met de tijd af.

Op het proefvlak waar de graslandwoeler is toegepast wordt voorafgaand aan de zomermeting een hogere infiltratiesnelheid gemeten dan op het referentieproefvlak en het vertidrain proefvlak. Ook het proefvlak woelen bleef bij de zomerproef lange tijd relatief droger dan de andere proefvlakken. Voorafgaand aan de winterproef heeft dit proefvlak echter een lagere infiltratiesnelheid dan de referentie, en ontstaan bij de beregeningsproef als eerste grote plassen. Ook hier speelt het tijdsaspect na het toepassen van de maatregel en de afnemende effectiviteit een grote rol.

Op de proefvlakken met geboorde wormengangen zijn bij de infiltratiemetingen voorafgaand aan de beregeningsproeven de hoogste infiltratiesnelheden gemeten. Bij de zomerproef werd vervolgens geobserveerd dat het proefvlak met geboorde wormengangen het langst droog bleef. Opvallend genoeg leek hierbij het proefvlak met 50 gaten/m² droger dan het proefvlak met 100 gaten/m². Het proefvlak met de geboorde wormengangen bleef ook bij de winterproef het langste droog, maar ditmaal blijft het proefvlak met meer wormengaten (100/m²) droger dan het deel met minder wormengangen (50/m²). Omdat de proefvlakken 50/m² en 100/m² ten opzichte van de zomerproef zijn omgewisseld bestaat echter het vermoeden dat het verschil tussen de proefvlakken met geboorde wormengangen voornamelijk wordt bepaald door de bodem. Infiltratie is waarschijnlijk gemakkelijker in de bodem van het oostelijke deel van het proefvlak (zomerproef

50/m², winterproef 100/m²) dan in het westelijke deel. Een groot verschil met de proefstrook vertidrain en woeler, is dat de wormgaten zeer kort (< 1 week) voor de maaiveldafvoerproef zijn aangebracht wat de effectiviteit sterk vergroot.

Belangrijk is wel de vraag hoe representatief de metingen bij de demonstratie voor de verschillende maatregelen waren. Terwijl de wormengangen vlak voor zowel bij de zomer- als winterproef zijn geboord, zijn de vertidrain en graslandwoeler slechts 1 maal toegepast: respectievelijk ongeveer 9 en 4 maanden voordat de zomerproef plaatsvond. De winterproef vond vervolgens nog ruim 6 maanden later plaats. Een gunstig effect van de vertidrain is alleen gemeten bij de nulmeting ca. 4.5 maanden na het toepassen van de vertidrain, wat zou kunnen betekenen dat het toepassen van de vertidrain minder dan 9 maanden effect heeft op de infiltratie. Voor het woelen geldt dat de infiltratie 4 maanden na de toepassing hoger is dan het referentievlak, maar lager na 10 maanden bij de winterproef.

Het verschil in moment tussen het aanbrengen van de wormengaten (vlak vóór de proef) en landbewerkingen met de vertidrain en woeler (een flinke tijd vóór uitvoeren van de proef) zou model kunnen staan voor de werkelijkheid. Omdat wormen altijd aanwezig zijn en kunnen zorgen voor een permanente doorlatende bodem terwijl mechanische bewerking incidenteel wordt toegepast en de effectiviteit daarvan afhankelijk is.

Kwantitatieve conclusies over het effect van de verschillende maatregelen zijn bij deze velddemonstratie dus niet te trekken. Het meest duidelijk was het effect van de geboorde wormengangen ten opzichte van de andere proefvlakken. Zowel de metingen van de infiltratie als de observaties tijdens de proeven lijken aan te geven dat deze maatregel de infiltratie kan vergroten en plasvorming verminderd.

De metingen van infiltratie, oppervlakkige afvoer en grondwaterstand kunnen gebruikt worden om nieuwe modelconcepten te valideren dan wel kalibreren. Door de WUR zijn de resultaten van deze velddemonstratie gebruikt in combinatie met modellen zoals SWAP. Dit is opgenomen in een aparte rapportage (Heinen et al., 2020).

5.2 Aanbevelingen veldproef maaiveldafvoer

Deze velddemonstratie heeft nuttige informatie opgeleverd voor een vervolg.

Wat betreft proefopzet wordt aanbevolen:

- Leg proefvlakken in herhalingen aan, bij voorkeur minimaal vier.
- Het is in ieder geval aanbevolen om een behandeling met wormengaten mee te nemen en één van de behandelingen vertidrain of woelen.
- Automatische bodemvochtsensoren zouden kunnen worden ingezet om op verschillende dieptes de stijging van het bodemvochtgehalte gedurende een proef te monitoren.
- Extra aandacht voor het moment van toepassen van de maatregel en uitvoering van maaiveldproeven. Bepaal de verandering van de effectiviteit in de tijd na uitvoering.

Doordat er nog weinig ervaring is met proeven rondom maaiveldafvoer, liepen we tegen verschillende praktische uitdagingen aan waaruit belangrijke lessen getrokken kunnen worden.

- Het boren van wormengangen is een uitdaging. In eerste instantie is geboord met verlengde boren om de diepte van werkelijke wormengangen goed na te bootsen. Echter bleek in het veld dat deze boren gemakkelijk in stukken breken. Uiteindelijk is het boren gelukt door ondieper te boren met boorkoppen uit 1 stuk.
- Voor een beregeningsproef is veel water nodig: dit kan een probleem zijn voor een winterproef doordat beregening op sommige locaties alleen plaats kan vinden met een zomerpeil. Voor deze demonstratie was het voor de winterproef nodig om in overleg met gebiedsbeheerder het peil tijdelijk op zomerniveau te zetten.

- Met een beregeningskanon is het moeilijk om de hoeveelheid beregening op verschillende proefvlakken gelijk te laten lopen. Mogelijk is een ander soort sproeier hiervoor beter geschikt.
- De infiltratiecapaciteit is in de zomersituatie lastig te overschrijden met een beregeningsinstallatie doordat de bodem veel vocht kan opnemen. In de wintersituatie ging dit wel erg makkelijk.
- Bij een relatief vlak perceel is het lastig om oppervlakkige afstroming goed te meten. Tijdens de zomerproef zijn meetgoten geïnstalleerd, maar deze slaagde er niet goed in om water op te vangen. Deze meetmethode is kansrijker bij een perceel met meer maaiveldhelling (bijv. De Louw et al., 2015) en bij voorkeur langs de perceelrand (afvangen oppervlakkige afstroming naar oppervlakte water).
- Plasvorming is goed te karteren. Ook metingen van grondwaterstanden, bodemvocht en ringinfiltrometers zijn goed toe te passen.
- Met een penetrometer kan de ruimtelijke variatie van de verdichting van de bodem in beeld worden gebracht (die bijvoorbeeld sterker is op rij- en keerpaden). Bij de selectie van de proefpercelen kan hier dan rekening mee worden gehouden. Daarnaast kan het bepalen van het effect van een verdichte bodem als onderzoeksdoelstelling worden meegenomen in een maaiveldafvoerproef.
- Voor het meten van infiltratie direct na een proef op verschillende proefvlakken is een groot aantal ringinfiltrometers nodig, aangezien de bodem zich anders in de tussentijd kan herstellen.
- Het is lastig om de heterogeniteit binnen een perceel en tussen proefvlakken goed mee te nemen in de resultaten. Dit geldt ook voor de ringinfiltrometers: is er gemeten op precies dezelfde plek? Of is dat juist niet handig omdat bij een eerdere meting de bodem verstoord wordt?

6 Literatuur

- Appels, W.M. (2013), Water redistribution at the soil surface, ponding and surface runoff in flat fields; Thesis, Wageningen University. ISBN 9789461735065 – 154.
- Beersma, J., H. Hakvoort, R. Jiderda, R., A. Overeem en R. Versteeg, 2019. Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019. STOWA rapport no. 19
- Chyba, J., Kroulík, M., Křištof, K., Misiewicz, P. A. and Chaney, K.: Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland, *Agron. Res.*, 12(1), 59–64, 2014.
- De Boer, H. C., Deru, J. G. C. and Eekeren, N. Van: Sward lifting in compacted grassland: effects on soil structure , grass rooting and productivity, *Soil Tillage Res.*, 184(July), 317–325, doi:10.1016/j.still.2018.07.013, 2018.
- De Boer, H., J. Deru, N. van Eekeren, 2016. Woelen van blijvend grasland op een zandgrond: effecten op bodemstructuur, beworteling en grasopbrengst; Wageningen, Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, Livestock Research Rapport 947
- De Louw, P.G.B., M. Kuijper, R. Drost, D. Hendriks, J. Rozemeijer en L. Stuyt (2015) Veldonderzoek oppervlakkige afstroming en regelbare drainage in het kader van DROP. Opzet meetnet en eerste resultaten. Deltares-rapport 1208453-000.
- Fischer, C., Roscher, C., Jensen, B., Eisenhauer, N., Baade, J., Attinger, S., Scheu, S., Weisser, W. W., Schumacher, J. and Hildebrandt, A.: How Do Earthworms , Soil Texture and Plant Composition Affect Infiltration along an Experimental Plant Diversity Gradient in Grassland?, *PLoS One*, 9(6), doi:10.1371/journal.pone.0098987, 2014.
- Fonck, H., 1968. Een onderzoek naar de infiltratiecapaciteit van gronden in de Gelderse Achterhoek. ICW-nota 455.
- Heinen et al. (2020). Aanpassing en toepassing SWAP gericht op bodem en hydrologische maatregelen. Deelrapport thema Bewuste Bodem in onderzoeksprogramma Lumbricus (voorlopige titel).
- Huinink, J.T.M., 1986. Grasland: rond of vlak? *De Buffer* 1986 (32) nr 1.
- Jarvis, N.J. and I. Messing (1995) Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture as measured by tension infiltrometers *Soil Sci. Soc. Am. J.* (59): 27-34.
- Massop, H.Th.L., P.J.T. van Bakel en P.G.B. de Louw (2017) Maatgevende afvoer en maaiveldafvoer in waterschap Vechtstromen. Beschouwing over de bruikbaarheid van afvoernormen voor bepaling van de maatgevende afvoer, als gevolg van veranderingen in de waterhuishouding en het optreden van maaiveldafvoer. WUR/De Bakelse Stroom/Deltares. WENR-rapport 2839.
- Philip, J.R., 1957. The Theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science* 84: 257-264.

Ritsema, C.J. and L.W. Dekker, editors (2000) Special issue: Water repellency in soils. *Journal of Hydrology*, vol 231-232, 434 pag.

Shipitalo, M. J. and Gibbs, F.: Potential of Earthworm Burrows to Transmit Injected Animal Wastes to Tile Drains, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2103–2109, doi:10.2136/sssaj2000.6462103x, 2000.

Six, Johan, Bossuyt, Heleen, Degryze, S., and Deneff, Karolien, 2004, A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics: *Soil and Tillage Research*, v. 79, p. 7–3

Stolte, J. C, Ritsema en H. Wösten, 2000. Oppervlakte-afvoer: een combinatie van helling, bodem en gewas. In: *Stromingen 6* (2000), nr. 4.

Van Bakel, J., De Louw, P., Massop, H., Worm, B. (2018). Maaiveldafvoer in beeld. *Stromingen 32* (2018), Nummer 2.

Ward, R.C. (1975) *Principles of Hydrology*. Second Edition. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited. Great Britain.

Zaller, J. G., Heigl, F., Grabmaier, A., Lichtenegger, C., Piller, K., Allabashi, R., Frank, T., &

Drapela, T. (2011). Earthworm-mycorrhiza interactions can affect the diversity, structure and functioning of establishing model grassland communities. *PloS one*, 6(12), e29293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029293>

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