

Onderzoek naar stikstofuitspoeling onder (Hybride) Sportvelden

Een kwantitatief en mechanistisch onderzoek naar het effect van hybridevelden op de hydrologie en stikstofdynamiek voor de BSNC

Zeist, oktober 2024



Branchevereniging
Sport en
Cultuurtechniek

Publicatie in opdracht van: Werkgroep Hybride sportvelden
Onderzoek door: Thomas Evers (MSc), Maurice Evers (MSc)
Lumbricus, Environmental Research and Cosultancy
Datum: Oktober 2024
Plaats: Zeist



Branchevereniging
Sport en
Cultuurtechniek

Managementsamenvatting

Opdracht

In 2022 heeft de werkgroep Hybride sportvelden opdracht gegeven voor onderzoek naar de stikstofuitspoeling onder hybride sportvelden. Dit onderzoek is in de periode 2023 – 2024 uitgevoerd door Lumbricus Environmental Research and Consultancy. In dit rapport worden de uitkomsten en conclusies gepresenteerd en aanbevelingen gedaan om zowel de uitspoeling van water en nutriënten te minimaliseren als het gras optimaal te laten groeien.

Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van kwantitatieve data over stikstofuitspoeling onder natuur- en hybride sportvelden, en het verkrijgen van mechanistische inzichten die leiden tot verklaringen van de stikstofdynamiek in de bodem. De focus ligt op het analyseren van verschillende bodemtexturen en bemestingsregimes (mineraal en organisch) om aanbevelingen te doen ter vermindering van stikstofuitspoeling.

Conclusies

1. Hydrologie en Uitspoeling:

- o De gemeten cumulatieve uitspoeling van stikstof over 6 weken tijd ligt tussen de 0.4 en 0.9 kg N ha⁻¹. Dit is een factor 100 lager dan de totaal toegevoegde stikstof (64 kg N ha⁻¹). Er is dus geen substantiële uitspoeling van stikstof waargenomen in dit onderzoek en er geen verschillen in uitspoeling zijn geconstateerd tussen natuurgras en hybride sportgras op verschillende bodemtextuur.
- o De hydrologische modellen komen overeen met gemeten data, wat een goed begrip van de water- en nutriëntenbalansprocessen in sportgras suggereert.
- o Maximale stikstofopname in bovengrondse biomassa over 6 weken was 40 kg N ha⁻¹.

2. Biomassaproductie en Stikstofopname:

- o Geen significant verschil in bovengrondse plantengroei of hydrologische eigenschappen tussen natuurgras en hybride velden.
- o Minerale bemesting resulteert in een hogere bovengrondse biomassaproductie dan organische bemesting, vanwege snellere beschikbaarheid van stikstof.
- o Grovere texturen verminderen de stikstofopname in de bovengrondse biomassa.

3. Bemestingstype en Bodemtextuur:

- o Minerale meststoffen: 28% van de stikstof blijft in korrel- of bodemvoorraad.
- o Organische meststoffen: 35% van de stikstof blijft in de bodem, onopgelost of niet gemineraliseerd.
- o Het type bemesting en de bodemtextuur verklaren samen 79% van de variantie in stikstofopname en uitspoeling.

Aanbevelingen

1. Optimalisatie van Bemestingsschema's:

- o **Timing en Dosering:** Cruciaal voor het minimaliseren van stikstofuitspoeling. Bereken de optimale timing en hoeveelheid van de nutriënttoediening op basis van plantopname en nutriëntenbeschikbaarheid.
- o **Potentiële Opname:** Bepaal de potentiële stikstofopname door de plant op basis van bodem- en klimaatcondities.
- o **Nutriëntenbeschikbaarheid:** Analyseer de beschikbaarheid van nutriënten, beïnvloed door product, bodem en klimaat.

2. **Specifieke Aanpak voor Producten:**

- o **Minerale Producten:** Onderzoek de oplosbaarheid in representatieve veldsituaties in plaats van laboratoriumomgevingen.
- o **Organische Producten:** Voer meer onderzoek uit naar mineralisatie, aangezien dit afhankelijk is van variabelen zoals temperatuur, pH en vochttoestand in de bodem.

3. **Modellering en Irrigatie:**

- o Gebruik gekalibreerde modellen om de timing en hoeveelheid van irrigatie te optimaliseren, om zo uitspoeling te verminderen en efficiënter watergebruik te bevorderen.

Praktische Implicaties Het onderzoek biedt robuuste data en modellen die kunnen worden toegepast in de praktijk om stikstofuitspoeling onder sportvelden te minimaliseren. De bevindingen benadrukken het belang van nauwkeurige bemestingsschema's en het potentieel voor verdere verfijning van irrigatiestrategieën om duurzame sportgrasonderhoud te bevorderen.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inleiding	6
1.1 Algemeen	6
1.2 Stikstofuitspoeling onder sportvelden	6
1.3 Modelleren van uitspoeling	8
1.4 Doelstellingen	8
Materialen en Methode	9
2.1 Experimenteel onderzoek	9
2.1.1 Opstelling	9
2.1.2 Behandelingen	9
2.1.3 Irrigatie	13
2.1.4 Metingen	13
2.1.5 Tijdslijn	13
2.2 Modelleren	15
2.2.1 Modelbeschrijving	16
2.2.2 Model input	17
2.2.3 Randvoorwaarde en initiële condities	18
2.3 Statistiek	18
Resultaten en Discussie	20
3.1 Plantontwikkeling en opname	20
3.2 Hydrologie en Uitspoeling	23
3.3 Modellen	26
3.4 Water- en nutriëntenbalans	28
Resultaten en Discussie	32
Referenties	34

Inleiding

1.1 Algemeen

In 2022 heeft de werkgroep Hybride sportvelden opdracht gegeven voor onderzoek naar de stikstofuitspoeling onder hybride sportvelden. Dit onderzoek is in de periode 2023 – 2024 uitgevoerd door Lumbricus Environmental Research and Consultancy. In dit rapport worden de uitkomsten en conclusies gepresenteerd en aanbevelingen gedaan om zowel de uitspoeling van water en nutriënten te minimaliseren als het gras optimaal te laten groeien.

Om de optimale groei en speelomstandigheden te verkrijgen in sportvelden is de input van stikstof (N) essentieel. Echter, bij een toediening van stikstof die hoger is dan de opname van de plant is er een toenemende kans op uitspoeling (Carey, et al., 2012). Deze uitspoeling van stikstof kan meerdere nadelige gevolgen hebben voor zowel de mens, waar hoge concentraties als onveilig worden beschouwd (European-Commission, 2021), als ook voor de natuur waar de uitspoeling van stikstof kan leiden tot eutrofiëring van grond- en oppervlaktewater wat vervolgens resulteert in een negatief effect op de biodiversiteit (Steffen, et al., 2015).

Om deze redenen is het van groot belang om ook de uitspoeling onder sportvelden in kaart te brengen en om hier eventuele oplossingen voor aan te dragen. Er is reeds in 2008 een onderzoek uitgevoerd namens de Branchevereniging Sport en Cultuurtechniek naar eventuele uitspoeling van stikstof met als doel om een scherpere richtlijn te ontwikkelen voor stikstofbemesting (Bussink & Draai, 2008). In dit onderzoek was op drie verschillende locaties de minerale N concentratie gemeten op twee verschillende dieptes i.e. 10-30 en 30-60 respectievelijk om zo de eventuele uitspoeling van stikstof te onderzoeken. Echter, buiten het feit dat de kleine omvang van herhalingen in het onderzoek van Bussink & Draai (2008) en de soorten toplaag opbouw meegenomen in het onderzoek niet representatief zijn voor toplagen met te verwachte uitspoeling (wat ook benadrukt wordt door de onderzoekers in het onderzoek), kunnen deze metingen niet worden gebruikt voor het mechanistische begrip van uitspoeling onder sportvelden wegens de beperkte data van de processen die hebben geleid tot deze respectievelijke concentraties.

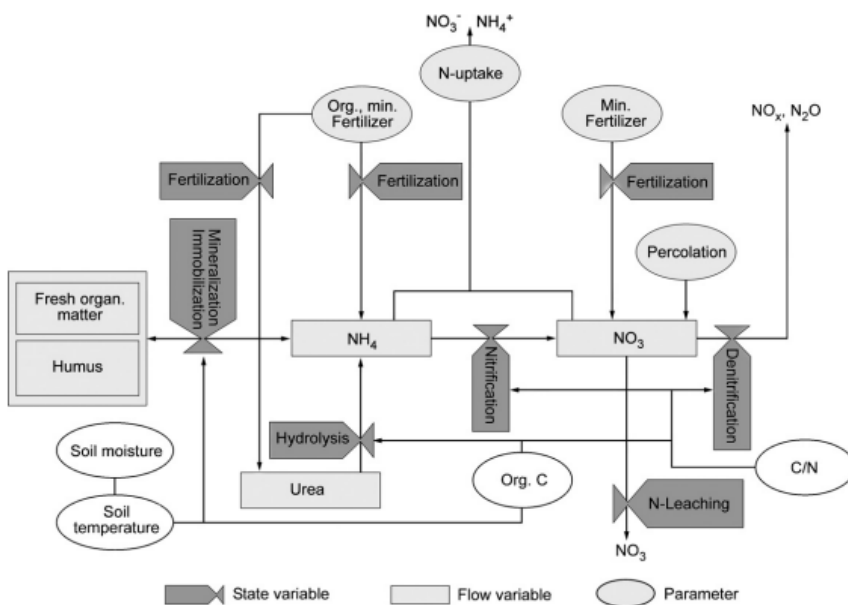
Tevens is er in het desbetreffende onderzoek destijds niet gekeken naar de effecten van hybridevelden op de uitspoeling van stikstof (Bussink & Draai, 2008). In de praktijk blijkt het namelijk dat er bij hybridevelden meer bemest moet worden om het gras gezond te houden, hetgeen impliceert dat een gedeelte van de stikstof sneller uitspoelt dan in natuurgrasvelden. Hybridevelden vormen desalniettemin een belangrijke groep velden als tussenvorm tussen kunstgrasvelden en 100% natuurgrasvelden voor wat betreft urenbelasting. In dit onderzoek zal er daarom worden gekeken naar zowel de kwantitatieve hoeveelheid van stikstof die uitspoelt in verschillende bodems, onder verschillende bemesting strategieën in hybridevelden met daarnaast als referentie natuurgrasvelden. Tevens worden de mechanisme in kaart gebracht die van invloed zijn op deze uitspoeling om zodoende een opschaling te kunnen maken en om generieke uitspraken te kunnen doen over stikstofuitspoeling op een nationaal niveau. De volgende secties zullen kort toelichten wat deze mechanisme zijn en hoe deze kunnen worden onderzocht.

1.2 Stikstofuitspoeling onder sportvelden

De uitspoeling van stikstof in bodems in het algemeen wordt bepaald door meerdere factoren. Belangrijkste factoren zijn de textuur van de bodem, het organischestofgehalte, de "cation exchange capacity" (CEC) van de bodem (Gaines & Gaines, 1994), de hoeveelheid en vorm van stikstofbemesting, de specifieke tijd wanneer dit wordt toegediend en het irrigatiebeleid (Barton & Colmer, 2006; Petrovic, 1990). De textuur heeft een grote invloed op de waterdoorlatendheid (k_{sat}) van de bodem, i.e. de snelheid waarmee water door een verzadigde bodem beweegt (Gaines & Gaines, 1994). En omdat stikstof in de vorm van nitraat (NO_3^-) maar matig bindt aan het bodemoppervlak zal deze niet veel worden geremd, in tegenstelling tot fosfaat (P_2O_5) wat een hoge retardatiefactor heeft door de sterkere binding met kleimineralen en oxides (Ma, et al., 2021). Naast de NO_3^- concentratie is ook de ammonium (NH_4^+) concentratie, een andere belangrijke vorm waarin stikstof in de bodem voorkomt en beschikbaar

is voor opname door planten. Echter, door nitrificatie wordt een groot deel van de NH_4^+ concentratie al snel omgezet in NO_3^- . Tevens zullen verschillende vormen van bemesting, i.e. mineraal of organische, een belangrijke rol spelen in de uitspoeling van de stikstof omdat de organische vorm onderhevig is aan mineralisatie. Deze mineralisatie kan resulteren in een piek van minerale stikstof op momenten dat de plant er niet om vraagt, maar het kan ook positief werken omdat de werking van het product door deze mineralisatie langer is dan minerale meststof (Herencia, et al., 2007). Het waargenomen effect in de praktijk, waarbij een hybride veld meer bemest moet worden, is waarschijnlijk het gevolg van een toplaag met een hogere waterdoorlaatbaarheid. Dit wijst eerder op het snellere verlies van gemineraliseerde stikstof en een kortere werking van meststoffen, dan op een langere werking met mogelijk minder verlies.

Om de vele variabelen welke bepalend zijn voor N-uitspoeling mee te nemen en om het transport van NO_3^- in kaart te brengen onder sportvelden moeten alle "sources" en "sinks" worden onderzocht. Deze sources en sinks worden in figuur 1 weergegeven in de vorm van de stikstofbalans van de bodem onder sportvelden. Elk van deze sources of sinks wordt voor een groot deel bepaald door de factoren zoals deze hierboven zijn benoemd. Echter, het in kaart brengen van deze sources en sinks is vaak lastig of niet te realiseren in de praktijk, zoals reeds eerder bleek uit voorgaand BSNC onderzoek. Daarbij komt nog dat de omvang van data vaak beperkt is wegens de hoge kosten voor de benodigde herhalingen om een representatief beeld te krijgen. Daarom wordt er tegenwoordig meer en meer gebruik gemaakt van een andere strategie in onderzoeken. In plaats van het meten van het resultaat op één specifieke locatie wordt eerst het mechanisme achter deze resultaten onderzocht in gecontroleerde experimenten, waarna verkregen data wordt gecombineerd met complexe hydrologische modellen om vervolgens de data te kunnen extrapoleren naar een hogere schaal (Doltra & Muñoz, 2010; Matteau, et al., 2019; Taffeh & Sepaskhah, 2012). Het voordeel van deze aanpak is dat er in de experimentele fase kwantitatieve data worden verzameld voor specifieke situaties zoals deze in de praktijk normaal ook worden waargenomen en dat deze data vervolgens gebruikt kunnen worden voor de validatie van de modellen om zodoende ook de mechanisme achter de meetresultaten te verkrijgen.



Figuur 1: Voorbeeld van de stikstofbalans met hierin de sources en sinks die effect hebben op de uitspoeling (leaching) van stikstof in bodems. Overgenomen van Klar et al. 2008.

1.3 Modelling van uitspoeling

Zoals reeds eerder vermeld resulteert modellering van systemen niet alleen de benodigde kwantitatieve data, maar ook in het mechanistische begrip achter de processen die hebben geleid tot de respectievelijke resultaten. Een van deze modellen om de hydrologie en het transport van stoffen in de bodem te modelleren is het programma Hydrus 3D (Šimůnek, Genuchten, & Šejna, 2012). Eerdere literatuur waarin onderzoek is gedaan naar de uitspoeling van stikstof onder sportvelden hebben met deze methode en met dit programma al goede resultaten laten zien die inzicht hebben gegeven in deze processen (Geza, et al., 2021). Een van de belangrijkste stappen voor de modellering is de parameterisatie die wordt gedaan in de experimenten onder gecontroleerde omstandigheden. Daarna kunnen meerdere denkbare scenario's worden gemodelleerd. Denk aan verschillende neerslagpatronen, droogte, hogere of lagere dosering, etc. Op deze manier kunnen er dus scenario's worden getest die doorgaans niet mogelijk zijn in de praktijk wegens de hoge kosten van de herhalingen en de onvoorspelbaarheid van het klimaat. Tevens zullen de resultaten van dit onderzoek gebruikt kunnen worden voor alle verdere onderzoeken naar de uitspoeling van stikstof in sportvelden. Door de initiële waarden van de bodem te meten zoals de waterverzadigde doorlatendheid en het organische stofgehalte kunnen deze bodem tevens gemodelleerd worden. Dit biedt dus een legio aan opties in de toekomst.

1.4 Doelstellingen

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van zowel kwantitatieve data van stikstofuitspoeling onder natuur- en hybridevelden, als ook het verkrijgen van mechanistische kennis die resulteert in deze kwantitatieve data. Tevens is het belangrijk dat dit in kaart wordt gebracht voor verschillende bodems en onder verschillende huidige bemestingsregimes (mineraal en organisch). Om dit te doen wordt er gekozen voor een gecontroleerde experimentele opstelling die overeenkomt met de praktijk wat betreft de bodemeigenschappen en de bemestingsregimes. Deze data zal al kwantitatieve robuuste data geven over eventuele verschillen tussen natuurgrasvelden en hybridevelden. Vervolgens zal deze data worden gebruikt om het Hydrus model te kalibreren om zo de resultaten te kunnen opschalen en de mechanisme achter de resultaten te bestuderen. Daarmee is het laatste doel om eventuele aanbevelingen aan te dragen om deze uitspoeling van stikstof onder hybridevelden te verminderen.

De onderzoeksvragen die hierbij worden beantwoord zijn de volgende:

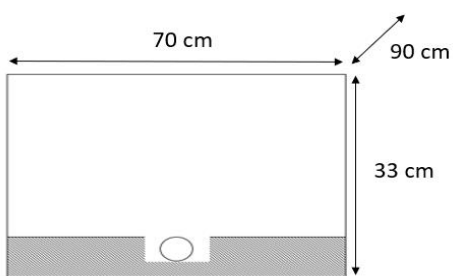
- 1) Wat is het effect van hybridevelden op de uitspoeling van water en stikstof onder de huidige bemestingsregimes?
 - Wat is het verschil tussen natuur- en hybridevelden wat betreft de stikstofuitspoeling?
 - Wat is het effect van textuur op de uitspoeling van stikstof?
 - Wat is het effect van verschillende bemesting strategieën (mineraal of organisch) op de uitspoeling van stikstof?
- 2) Welke mechanisme met betrekking tot de stikstofbalans spelen een significante rol in de uitspoeling van de stikstof zoals deze is waargenomen?
- 3) Wat zijn de eventuele aanbevelingen om stikstofuitspoeling te verminderen onder hybridevelden?

Materialen en Methode

2.1 Experimenteel onderzoek

2.1.1 Opstelling

Het experimentele onderzoek, praktische uitvoering in handen van UniFarm Wageningen, concentreerde zich op het onderzoek naar uitspoeling in hybridevelden. Om ervoor te zorgen dat het gecontroleerde onderzoek aansluit bij de praktijk, was het essentieel dat de bodemopbouw, het onderhoud en de bemesting zo goed mogelijk overeenkwamen met de praktijkomstandigheden. Speciale bakken werden daarom vervaardigd voor dit doel, met een ingebedde drainagesysteem zoals te zien is in Figuur 2. De bakken hadden een diepte van 33 cm en een oppervlakte van 70 bij 90 cm. Een drain werd onderin de bak geplaatst op een ondoorlatend zeil in een cunet. Dit ontwerp zorgde ervoor dat al het water dat door de bodem percoleerde kon worden opgevangen door de drain. De drain stak uit door de bak, waardoor het verzamelde drainwater gemakkelijk kon worden afgevoerd met behulp van kannen.



Figuur 2: Schematische weergave van de proefopstelling.

2.1.2 Behandelingen

Dit onderzoek onderzocht drie verschillende variabelen: bodemtextuur, grastype en bemestingstype. Deze opzet verzekert dat eventuele waargenomen verschillen tussen behandelingen specifiek toe te schrijven zijn aan een of meerdere van deze variabelen. Voor textuur werden twee varianten onderzocht die representatief zijn voor praktijksituaties. Amateurvelden vertonen doorgaans een gemiddelde textuur met een M50-cijfer van de zandfractie van 210 μm , terwijl voor de aanleg van hybridevelden en professionele sportvelden vaak grovere texturen met een M50 van ongeveer 300 μm worden gebruikt. Deze twee textuur varianten werden daarom ook in dit onderzoek toegepast. Om het vochtbufferende vermogen van deze schrale texturen te vergroten, werd turf gemengd in een verhouding van 80/20 zand-turf, zoals weergegeven in Figuur 3. Dit resulteerde in een uiteindelijk organisch stofgehalte van circa 1-2%. Er werd specifiek gekozen voor een vorm van turf die nauwelijks afbreekt (inert is) in de bodem en

daarmee geen factor is in de totale N-mineralisatie waardoor verschillen in mineralisatie tussen de bakken alleen de verschillen in bemesting konden zijn.

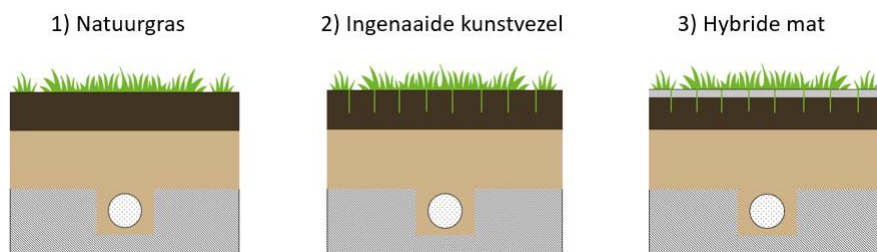
Figuur 3: Dit figuur toont de foto's van de twee verschillende texturen met 210 μ m links en 300 μ m rechts. Beide texturen zijn vermengd met 20 procent turf.



1) M50 210 μ (80/20 zand-turf)

2) M50 300 μ (80/20 zand-turf)

Voor het grastype zijn drie varianten onderzocht: natuurgras als controle, een ingenaaide kunstvezel van Fieldturf, een bedrijf van Tarkett sports BV, en een hybride mat van Hatko Hybridgrass, in Nederland vertegenwoordigd door de fa. Van Wijlen (Figuur 4). Deze vertegenwoordigen de drie meest voorkomende grastypes in voetbalvelden in Nederland en verschillen sterk in eigenschappen.



Figuur 4: Overzicht van de drie grastypes met van links naar rechts natuurgras, ingenaaide hybridevezel en een hybride mat.

Voor natuurgras werden de bakken gevuld met het eerder genoemde zandtype. Na het vullen kregen ze een startbemesting van 35 gram Vivifos per bak, dat werd gemengd in de bovenste 10 cm. Vervolgens werd er ingezaaid met 16 gram Engels raaigraszaad per bak. Voor de ingenaaide kunstvezel werden de bakken eveneens gevuld met zand en bemest volgens dezelfde methode als bij de natuurgrasbehandeling. Ook hier werd het graszaad ingezaaid, echter werd het innaaien van de kunstvezels pas uitgevoerd na voldoende kieming van het gras om de jonge planten zo min mogelijk te beschadigen. Het innaaien gebeurde volledig handmatig met behulp van speciaal gereedschap aangeleverd door Fieldturf (Figuur 5). Een speciale naald werd gebruikt om de kunstvezel tot een diepte van 15 cm in te naaien in een patroon van 2 x 2 cm.

Met opmerkingen [HA1]: 10/9 aangepast van 1x1 naar 2x2, op aangeven van André Wolbrink



Figuur 5: Links een foto van het innaaiproces met behulp van speciaal gereedschap en rechts het afknippen van de ingenaaide vezels op de juiste hoogte.

Voor de behandeling met de hybride mat werden de bakken gevuld tot 5 cm onder de rand. In de bovenste laag van ongeveer 7 cm werd 30 gram Vivifos per bak doorgemengd. Daarna werden de matten op maat geknipt en in de bakken geplaatst. De uitdaging was vervolgens om zand aan te vullen tot ca. 2 cm onder de rand, waarbij de kunstvezels boven het zand uitsteken. Hiervoor werd het zand handmatig ingewerkt in de mat (Figuur 6). Het gebruikte zand voor de afwerking bevatte tevens de overige 5 gram Vivifos bemesting. Na het aanleggen werden de bakken ingezaaid met 16 gram Engels raigras per bak.



Figuur 6: Foto van een bak met een hybride-mat na het instrooien van het zand.

De basisbemesting van 35 gram Vivifos per bak is uniform voor alle bakken en is afgestemd op een groeiperiode van 3 maanden na inzaaien. Het doel hiervan is om de planten eerst te laten vestigen voordat verdere behandelingen worden toegepast om een gelijke start te bevorderen, maar zonder zoveel te geven dat het de effecten van de latere behandelingen beïnvloedt.

Laatstens zijn er twee soorten bemesting getest in dit onderzoek: een minerale meststof (ICL Greenmaster pro lite 14-5-10) en een organische meststof (DCM Vital green 14-4-8). Beide meststoffen zijn toegediend op basis van 64 kg N/ha, wat overeenkomt met de praktijksituatie voor professionele voetbalvelden gedurende een groeiperiode van 8 weken.

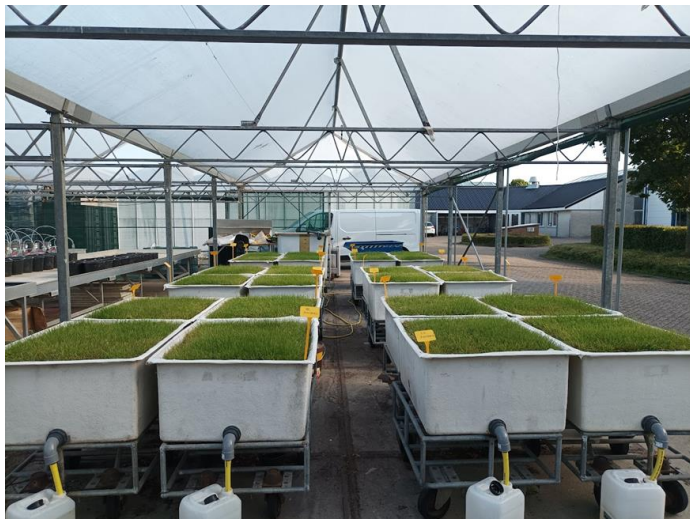
Deze hoeveelheid is aan de hoge kant voor amateurvoetbal, maar is bewust gekozen om uitspoeling te stimuleren en duidelijke resultaten te verkrijgen in het onderzoek. Voorafgaand aan het toedienen van de meststoffen zijn alle bakken doorgespoeld met 16 liter water per bak om eventueel resterende stikstof

van de startbemesting uit te spoelen en zo verschillen te voorkomen. In totaal zijn er dus 3 grastypen, 2 texturen en 2 typen bemesting getest, wat resulteert in 12 behandelingen zoals weergegeven in tabel 1 hieronder. Elk van deze behandelingen is uitgevoerd in duplo, wat neerkomt op in totaal 24 bakken.

Tabel 1: Overzicht van de behandelingen met grastype, textuur en bemestingstype.

Behandeling	Grastype	Textuur	Bemestingstype
1	Natuurgras	300	Mineraal
2	Natuurgras	300	Organisch
3	Natuurgras	210	Mineraal
4	Natuurgras	210	Organisch
5	Ingenaaide hybride	300	Mineraal
6	Ingenaaide hybride	300	Organisch
7	Ingenaaide hybride	210	Mineraal
8	Ingenaaide hybride	210	Organisch
9	Hybride mat	300	Mineraal
10	Hybride mat	300	Organisch
11	Hybride mat	210	Mineraal
12	Hybride mat	210	Organisch

Alle bakken waren geplaatst op het terrein van Unifarm Wageningen, beschermd onder een afdak om de invloed van neerslag en depositie te voorkomen (Figuur 7). Op deze manier werden alle variabelen nauwkeurig gecontroleerd, waardoor de experimentele omstandigheden consistent bleven. De bakken zijn volledig gerandomiseerd neergezet en voorzien van labels. Hiermee is eventuele invloed van schaduw geminimaliseerd. Voor de proef met de uiteindelijke behandelingen is ingezet zijn de bakken gecontroleerd op lekkages door alle bakken te irrigeren. De bakken die lekkages vertoonden zijn gekit op de desbetreffende locaties.



Figuur 7: Overzicht van de proefopstelling met de 24 bakken, de drains en de kannen.

2.1.3 Irrigatie

Een cruciale factor bij onderzoek naar uitspoeling is de hoeveelheid water die tijdens het experiment wordt toegediend. Als alleen verdamping wordt aangevuld, zal er geen water uitspoelen. Met andere woorden, als het vochtgehalte nooit de veldcapaciteit overschrijdt, zal er geen uitspoeling plaatsvinden. Echter, omdat dit onderzoek specifiek gericht is op uitspoeling, is het essentieel om meer water te geven dan alleen het aanvullen tot de veldcapaciteit. Evenmin moet er niet te veel water worden gegeven, omdat de kannen onder de drains (ongeveer 9 liter) dan niet in staat zijn om al het water op te vangen. Voorafgaand aan het onderzoek zijn verschillende hoeveelheden water aan de bakken toegediend in een reeks experimenten om de buffercapaciteit te bepalen en om te achterhalen hoeveel water nodig is om een balans te vinden tussen het aanvullen van verdamping en het controleren van uitspoeling. Op basis hiervan zijn de bakken geïrrigeerd met 4 of 8 liter water (respectievelijk 6.3 of 12.7 mm) om de 1 à 2 dagen. Het is belangrijk op te merken dat deze omstandigheden aan de extreme kant zijn wat betreft uitspoeling. Het irrigatiewater is afkomstig van een bassin op UniFarm dat gevuld is met regenwater. Watermonsters zijn genomen om te controleren of er geen stikstof aanwezig is in het irrigatiewater. Het water is aan de bakken toegediend met behulp van een sproeikop met een literteller (Gardena). Deze literteller is vooraf gekalibreerd door maatcilinders te vullen en te controleren of de waterteller daadwerkelijk de hoeveelheid geeft die is aangegeven. Het bleek dat deze waarden niet overeenkwamen, dus is er een correctie toegepast op de gemeten waarden om de exacte hoeveelheid te geven die nodig is.

2.1.4 Metingen

Vanaf het toedienen van de behandelingen zijn wekelijks gedurende 6 weken metingen verricht aan de bakken. Deze metingen omvatten eerstens het meten van het volume water dat van de bodem in de kannen is gedraineerd. Hiervoor zijn de kannen geleegd in maatcilinders om de exacte hoeveelheid af te kunnen lezen. Uit dit water zijn monsters genomen in analysebuisjes van 50 mL voor analyse van NO_3+NO_2 en NH_4 middels Segmented Flow Analysis (SFA) uitgevoerd door het Laboratorium voor Bodemscheikunde van de Wageningen universiteit (CBLB). Aangezien er uit de analyse-uitslagen van de 6 meetmomenten bleek dat de gemeten waarden bij nagenoeg alle bakken onder de detectielimiet lagen, is er onder aanname van effecten van algvorming (deels ook zichtbaar) in de kannen, aanvullend een N-totaal analyses uitgevoerd door CBLB middels een persulfaatdestructie. Dit was mogelijk omdat voor alle meetmomenten extra monsters waren opgeslagen. Bij een persulfaatdestructie worden organische bindingen kapot gemaakt waarna de totale hoeveelheid stikstof in oplossing wordt gemeten met SFA (Matzek & Carter, 2016).

Alle bakken zijn wekelijks geknipt en het maaisel is opgevangen per bak. Dit verse maaisel is gewogen alvorens het is gedroogd bij 70 graden Celsius voor 24 uur. Na het drogen is er wederom gewogen om de biomassa te verkrijgen. Een deel van het gedroogde gras per bak is geanalyseerd op stikstof- en koolstofconcentraties door middel van LECO analyse door het CBLB. Om het bodemvocht en zoutgehalte in de bakken bij te houden over de periode van het onderzoek is 3 tot 4 keer per week gemeten met een vocht en EC meter (Delta-T WET sensor).

2.1.5 Tijdslijn

Figuur 8 geeft een overzicht van de procedures die zijn uitgevoerd bij het opzetten van het onderzoek en de metingen die zijn uitgevoerd. Vanaf het moment van inzaaien kregen de planten bijna 3 maanden de tijd om een dichte en sterke mat te vormen. Na de 6 meetmomenten werd besloten om ongeveer 2 maanden later opnieuw het vochtgehalte en de elektrische geleidbaarheid (EC) in de bakken te meten om te controleren of de planten tekenen van stikstoffekort begonnen te vertonen en of er verschillen waren tussen de behandelingen. Daarnaast werd nauwlettend in de gaten gehouden of er nog meststoffen aanwezig waren in de bakken, aangezien tijdens het onderzoek opgemerkt was dat de korrels van zowel de minerale als de organische meststof nog niet volledig waren opgelost.

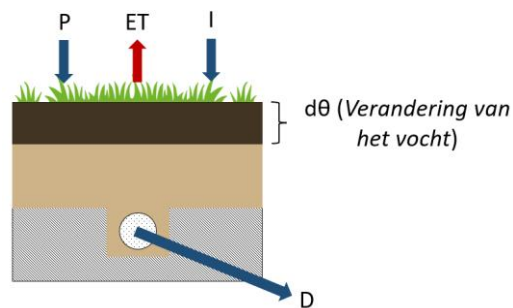


Figuur 8: **Tijlijn van het onderzoek met de uitgevoerde werkzaamheden.**

2.2 Modelling

De experimentele gegevens geven inzicht in mogelijke verschillen tussen behandelingen, maar onthullen niet de mechanismen achter deze verschillen. Om een dieper begrip te krijgen van de bodemprocessen, worden de experimentele gegevens gebruikt om hydrologische modellen te kalibreren. Deze gekalibreerde modellen kunnen vervolgens worden gebruikt om het experiment te simuleren. Wanneer de modellen de experimentele resultaten kunnen reproduceren, geeft dit aan dat we niet alleen succesvolle modellen hebben ontwikkeld voor toekomstige scenario's, maar ook dat we begrijpen hoe de mechanismen achter de verkregen resultaten werken. In deze modellen beschouwen we de bodem als een "black box", waar water binnenkomt (sources) of uitgaat (sinks). In dit geval hebben we als enige bron van water irrigatie (I). Omdat de bakken onder een afdak staan is de invloed van neerslag (P) afwezig. Verdamping van de bodem (evaporatie) en transpiratie van de planten fungeren als afvoermechanismen (ofwel evapotranspiratie, ET), samen met drainage (D). Een overzicht van deze termen wordt gegeven in figuur 9.

In de volgende secties worden de modelleringsaspecten van dit onderzoek behandeld, waarbij wordt



Figuur 9: Waterbalans met sources als neerslag (P) en irrigatie (I), en sinks als evapotranspiratie (ET) en drainage (D). De verhouding tussen deze termen geeft de verandering in het vochtgehalte in de bodem.

opgemerkt dat deze alleen betrekking hebben op het transport van water en niet op het transport van opgeloste stoffen zoals stikstof. Aanvankelijk was het de bedoeling om het stikstofftransport te modelleren, maar vanwege afwijkingen in de experimentele resultaten ten opzichte van de vermelde waarden van de producent voor mineralisatie en oplosbaarheid van meststoffen, bleek de input voor de modellen ontoereikend. Meer toelichting hierover wordt gegeven in de discussie van sectie 3.2 Hydrologie en Uitspoeling.

2.2.1 Modelbeschrijving

De modellering van de data is gedaan in het programma Hydrus 3D (Šimůnek, Genuchten, & Šejna, 2012). Dit programma bevat verschillende modellen voor onder andere transport van water, opgeloste stoffen en plantengroei. Voor het simuleren van water transport gebruikt Hydrus de Richards-vergelijking die de regelvergelijking voor waterstroming in een homogene en isotrope bodem oplost volgens:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad 1$$

waarbij θ de volumetrische waterinhoud (L3 L-3) voorstelt; h de drukhoogte van bodemwater (L); t de tijd (T); r de radiale ruimtecoördinaat (L); z de verticale ruimtecoördinaat (L); en K de hydraulische geleidbaarheid (L T-1). Verdere empirische relaties zijn vastgesteld tussen de variabelen in de Richards-vergelijking. Een van deze relaties is het van Genuchten-Mualem-model (Mualem, 1976; Genuchten, 1980), dat de onverzadigde hydraulische eigenschappen van de bodem definieert, waaronder functies voor waterretentie en hydraulische geleidbaarheid. Deze eigenschappen vormen essentiële onderdelen van de bovenstaande vergelijking en worden beschreven met:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad 2.$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m \right]^2, \quad 3.$$

$$\text{where } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

waarbij s de verzadigde waterinhoud (L3 L-3) voorstelt; r de resterende waterinhoud (L3 L-3); K_s de verzadigde hydraulische geleidbaarheid (L T-1); en α (L-1), n en l de vormparameters zijn. De opname van water door planten in Hydrus wordt gemodelleerd met behulp van het model van Feddes et al. (1978), dat de wateropname door planten $S(h)$ [L3 L-3 T-1] definieert als een functie van watertekort, de verdeling van wateropname en potentiële evapotranspiratie, zoals:

$$S(h) = a(h) b(x, z) L_t T_p \quad 4.$$

waarbij $a(h)$ een dimensieloze functie van watertekort of bodemzuiging is, $b(x, z)$ de genormaliseerde wateropnameverdeling afhankelijk van de wortelverdelingsfunctie [L-2], L_t de breedte van het bodemoppervlak is die verband houdt met het transpiratieproces, en T_p de potentiële transpiratie [L T-1] (Geza, et al., 2021). In deze studie werd de worteldiepte ingesteld op 20 cm. Parameters voor wortelwateropname voor sportgraszoden werden overgenomen uit de Hydrus-database voor standaard kortgrasvegetatie. Deze modellen gebruiken numerieke oplossingen van de gegeven functies om het transport van water van locatie x naar locatie y te berekenen, waarbij de uitkomst afhankelijk is van bodemeigenschappen en specifieke input. De nauwkeurigheid van de resultaten wordt sterk beïnvloed door de kwaliteit van de input die aan het model wordt gegeven.

2.2.2 Model input

Meteorologische gegevens voor Wageningen, Nederland, werden verzameld vanuit een weer-API (VisualCrossing) voor de specifieke groeiperiode van het onderzoek. De potentiële ET (PET) werd berekend met behulp van de standaard FAO-methode zoals vermeld in Allen et al. (1998). Echter, Hydrus vereist afzonderlijke invoergegevens voor potentiële transpiratie (PT) en potentiële verdamping (PE). Eerdere studies gebruikten empirische formules op basis van het bladoppervlakte-index (LAI) om PET te splitsen in PT en PE (Deb, et al., 2013). In dit onderzoek werd de Ritchie-Burnett-Ankeny-vergelijking gebruikt om PET te verdelen (Ritchie, 1972):

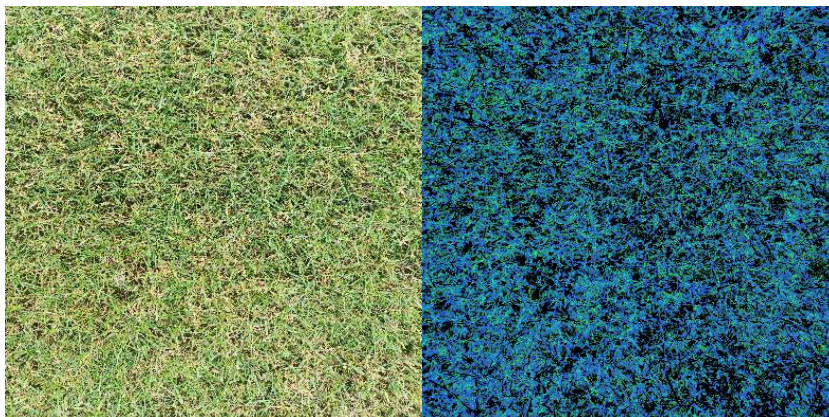
$$PT = 0.52 * PET * LAI^{0.5} \quad 5$$

$$PE = PET - PT \quad 6$$

De LAI is in dit onderzoek berekend op basis van de grasbedekking (GC) van de bakken. De empirische relatie voor de grasbedekking en de LAI werd eerder beschreven door Ramirez-Garcia et al. (2012) volgens:

$$LAI = 0.0299 * GC (\%) \quad 7$$

Om de grasbedekking te bepalen is gebruik gemaakt van digitale fotoanalyse met behulp van het "Lumbricus Grass Cover Model" (GCM 3.0). Dit programma berekend het percentage grasbedekking op basis van kleuranalyse gekalibreerd voor gras (Figuur 10). Hierbij is de gemiddelde grasbedekking van alle bakken gebruikt in de berekeningen omdat er geen significant verschil is gevonden in grasbedekking tussen behandelingen.



Figuur 10: Input (links) en output (rechts) van het "grass cover model". De berekende dichtheid op basis van de input is hier 67.7 %.

Naast de meteorologische input zijn ook de hydrologische eigenschappen van de bodem een belangrijke input voor de modellen. De hydrologische eigenschappen van de bodem worden beschreven door de Genuchten-Mualem parameters zoals eerder beschreven. Deze parameters zijn berekend met behulp van het ROSETTA 3 model (Zhang & Schaap, 2017). Dit model maakt gebruik van hiërarchische pedotransferfuncties (PTFs) om indirect de Genuchten-Mualem waterretentieparameters, de verzadigde hydraulische geleidbaarheid en de onverzadigde hydraulische doorlaatbaarheid van de bodem te schatten op basis van bodemtextuurgegevens en bulkdichtheid (Kandelous & Šimůnek, 2010; Twarakavi, et al., 2009). De percentages zand, silt en klei die zijn gebruikt in de berekeningen zijn afkomstig uit de databank van Lumbricus voor deze specifieke levering van zand van de fa. Heicom. De waterverzadigde doorlaatbaarheid is tevens gemeten voor 12 bakken met verschillende behandelingen

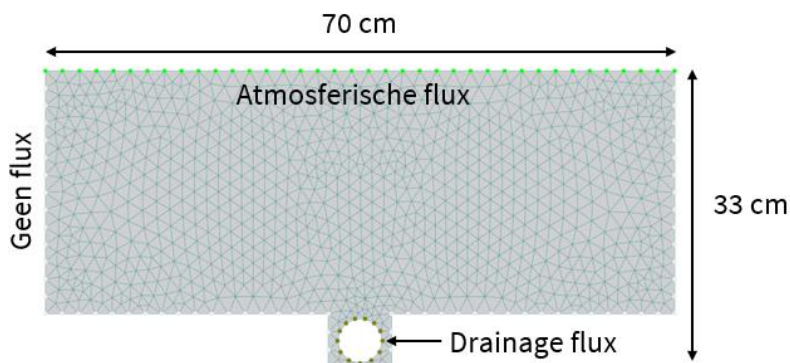
met behulp van ringen die zijn gestoken aan het einde van de onderzoeksperiode. De metingen zijn verricht volgens standaard protocol voor waterdoorlaatbaarheid en gecorrigeerd voor verschillen in stijghoogte en watertemperatuur. De berekende en gemeten bodemeigenschappen voor de twee texturen in dit onderzoek worden gegeven in tabel 2.

Tabel 2: *Overzicht van hydrologische eigenschappen voor de beide texturen uitgedrukt in de Genuchten-Mualem constante. θ_r (residuële waterinhoud, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s (verzadigde waterinhoud, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (vormparameter), n (vormparameter), l (vormparameter), en K_s (waterverzadigde doorlaatbaarheid, cm dag^{-1})*

Textuur	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α	n	l	K_s (cm dag^{-1})
M50 210	0.05	0.424	0.033	3.598	0.5	2000
M50 300	0.05	0.425	0.033	3.701	0.5	3000

2.2.3 Randvoorwaarde en initiële condities

In het model Hydrus 2D is de geometrie van de onderzoeksobjecten nagebootst zoals weergegeven in figuur 11 hieronder. De atmosferische flux is het oppervlak dat onderhevig is aan evapotranspiratie en irrigatie, waarbij beide als input zijn gegeven aan het model. De drainage is gemodelleerd door middel van een drainage flux (in Hydrus "seepage face"). Deze randvoorwaarde simuleert het gedrag van een drainagebuis onder een afschot waarbij verzadiging moet worden bereikt voordat water wordt getransporteerd door de buis. De initiële condities zijn gezet op een lineair verband met volumetrische vochtgehalte van 23% in de top tot verzadiging (42%) onderin. Deze initiële condities komen overeen met de gemeten waardes bij aanvang van het onderzoek.



Figuur 11: Schematische weergave van het onderzoeksobject in Hydrus 2D met randvoorwaarde en afmeting.

2.3 Statistiek

Dit onderzoek onderzoekt het effect van textuur, grastype en bemestingstype op verschillende variabelen, zoals biomassa, stikstofgehalte in de plant en uitspoeling. Om deze verbanden te testen, werd gebruikgemaakt van multivariabele lineaire regressie volgens de vergelijking:

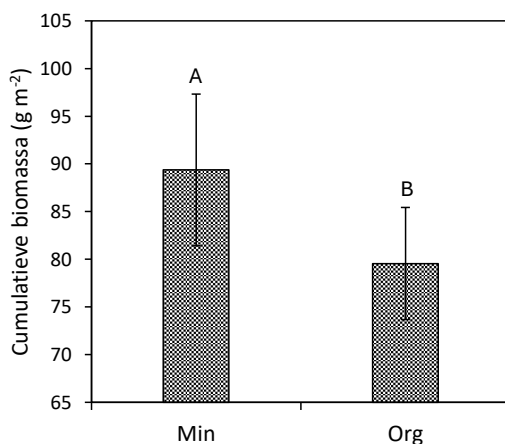
$$y = \alpha + \beta_1 \text{Textuur} + \beta_2 \text{Grastype} + \beta_3 \text{Bemestingstype} + \epsilon \quad 8.$$

waarbij y de voorspelde uitkomst is, a het snijpunt, β_i de hellingconstanten en ε de fout van het model. Alleen significante termen werden meegenomen in de uiteindelijke modellen, getest op een significantieniveau van 0.05. Subgroepen met significante variabelen werden gemaakt met behulp van een Tukey-test op een significantieniveau van 0.05. Voor overige "goodness of fit"-testen werden eenvoudige lineaire regressiemodellen gebruikt, waarbij de significantie werd getest met ANOVA en de verklaarde variantie werd aangegeven met R^2 , variërend van 0 tot 1, waarbij 0 geen variantie verklaarde en 1 alle variantie verklaarde. Het testen van verschillen tussen groepen, zoals gemeten waarden voor waterdoorlaatbaarheid, omvatte het controleren op normaliteit met een Shapiro-Wilk-test. Voor normaal verdeelde variabelen werden t-tests gebruikt, terwijl voor niet-normaal verdeelde variabelen non-parametrische tests werden toegepast.

Resultaten en Discussie

3.1 Plantontwikkeling en opname

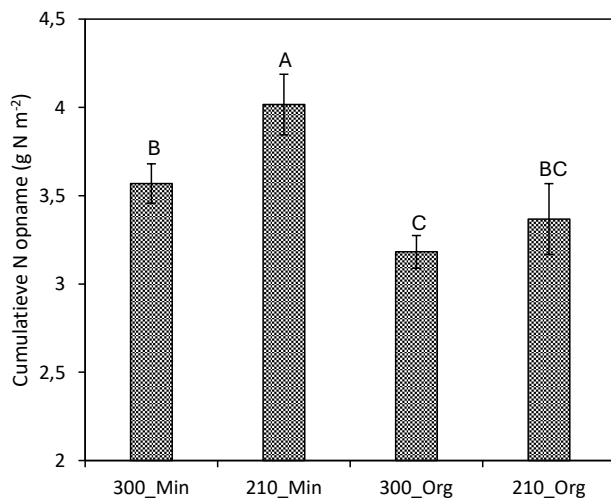
Gedurende het onderzoek zijn alle behandelingen wekelijks geknipt en gedroogd. De verkregen bovengrondse biomassa weerspiegelt de groeisnelheid van de planten: een hogere biomassa productie duidt op een hogere groeisnelheid. Wanneer de verschillende variabelen binnen dit onderzoek, zoals bodemtextuur, grastypen en bemestingstypen, worden gerelateerd aan de biomassa productie, blijkt dat alleen het bemestingstype een significante relatie heeft, $F(1,9) = 5.91$, $p = 0.035$. Dit impliceert dat de bodemtextuur en de hybride grastypen geen significant effect hebben op de biomassa productie van het gras. Binnen de bemestingstypen blijkt dat de biomassa productie bij organische meststoffen significant lager is dan bij minerale meststoffen (Figuur 12). De biomassa is ongeveer 12% hoger bij minerale meststoffen dan bij organische meststoffen. Dit is te verklaren middels de door de producenten vermelde oplosbaarheid en mineralisatie van de gebruikte producten: stikstof uit de minerale meststof komt binnen zes weken vrij, terwijl stikstof uit de organische meststof over zes maanden vrijkomt. Aangezien alle behandelingen dezelfde totale concentratie stikstof ontvingen, leidt de vertraagde mineralisatie van de organische meststof tot verschillen in beschikbare stikstof en uiteindelijk in biomassa productie. Deze bevindingen benadrukken het belang van nauwkeurige kennis over de oplosbaarheidscurves van beschikbare meststoffen op de markt. Als bekend is hoeveel een product afgeeft over een bepaalde periode, kan beter worden gecompenseerd voor de verschillen tussen minerale en organische meststoffen.



Figuur 12: Cumulatieve biomassa voor de twee verschillende meststofftypes. Significante verschillen zijn aangegeven met letters.

Naast de biomassa productie is ook de cumulatieve stikstofopname in de biomassa onderzocht. Interessant genoeg blijkt dat de stikstofconcentratie in de bovengrondse biomassa, naast verschillen in bemestingstypen, ook significant beïnvloed wordt door de textuur van de bodem, $F(2,9) = 21.38$, $p < 0.001$. Er is een interactie zichtbaar tussen textuur en bemestingstypen, zoals weergegeven in Figuur 13.

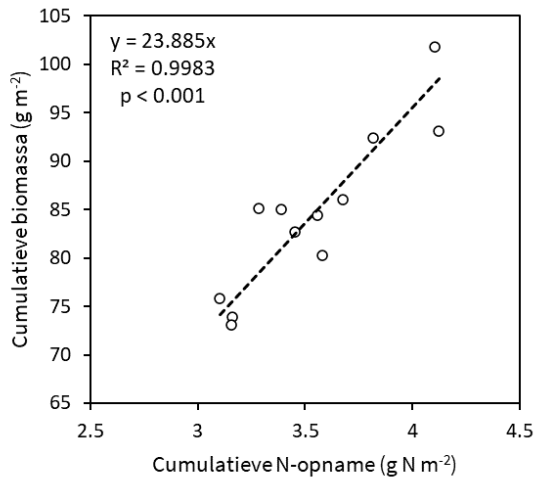
Het verloop van stikstofconcentraties voor de verschillende behandelingen volgt het patroon: 210_Min > 300_Min > 210_Org > 300_Org. Hierbij staan 210 en 300 voor de M50 van de textuur, en Min en Org respectievelijk voor mineraal en organisch. Dit patroon laat hetzelfde mineralisatie-effect zien als bij de biomassaproductie: minerale meststof resulteert in een hogere stikstofopname van het blad. Dit effect wordt versterkt door de textuur, waarbij een fijnere textuur leidt tot een hogere cumulatieve stikstofopname voor de respectieve bemestingstypen. Zoals te zien is in Tabel 2, zijn de verschillen tussen texturen voornamelijk te vinden in de waterverzadigde doorlaatbaarheid (Ks). Deze verschillen kunnen het opnamepatroon van stikstof in bovengrondse biomassa verklaren, aangezien stikstof in fijnere texturen waarschijnlijk langer in de toplaag blijft en daardoor meer kans heeft om door de plant opgenomen te worden. Echter, later in dit onderzoek zal blijken dat er nagenoeg geen stikstof is uitgespoeld, wat deze hypothese minder aannemelijk maakt, omdat bij een kortere verblijftijd meer stikstof uitgespoeld zou moeten zijn. Een andere mogelijke verklaring is dat de toplaag langer vochtig blijft bij een fijnere textuur. Hierdoor is er meer kans voor de meststof om op te lossen en dus meer stikstof af te geven. Deze hypothese wordt ondersteund door het gemeten vochtgehalte, dat bij de grovere textuur gemiddeld significant 3% lager ligt dan bij de fijnere textuur, $t(186) = 12.98$, $p < 0.001$. Aan het einde van de groeiperiode hebben de planten cumulatief tussen de 35 en 41 kg N per hectare opgenomen. Dit komt neer op een nutriëntefficiëntie van 55% voor organische meststof en 64% voor minerale meststof. Deze cijfers komen overeen met eerder onderzoek door Lumbricus, dat liet zien dat de nutriëntefficiëntie van minerale meststoffen hoger is dan die van organische meststoffen wanneer niet wordt gecorrigeerd voor mineralisatie (Evers & Evers, 2023). Een belangrijke kanttekening is dat deze verschillen niet significant zijn wanneer wel wordt gecorrigeerd voor de mineralisatie van de organische producten.



Figuur 13: Cumulatieve N-opname voor de verschillende texturen en bemestingstype. Significante verschillen zijn aangegeven met letters.

Een andere maat voor de stikstofopname door de bovengrondse biomassa, tevens een indicatie voor de gezondheid van het gras, is het stikstofgehalte in de biomassa. In dit onderzoek is er een sterke significante relatie gevonden tussen de cumulatieve biomassa en de cumulatieve stikstofopname (Figuur 14), waarbij het percentage stikstof in de biomassa 4,2% bedraagt (afgelezen als 1/23,885 uit de grafiek).

In de literatuur worden waarden voor Engels raaigras vermeld tussen de 2% en 5% (Boer et al., 2016; Gislum & Griffith, 2005). Dit impliceert dat het gras in dit onderzoek aan de bovenkant van het opnamebereik zit, wat aangeeft dat het optimaal heeft kunnen groeien gedurende de onderzoeksperiode.

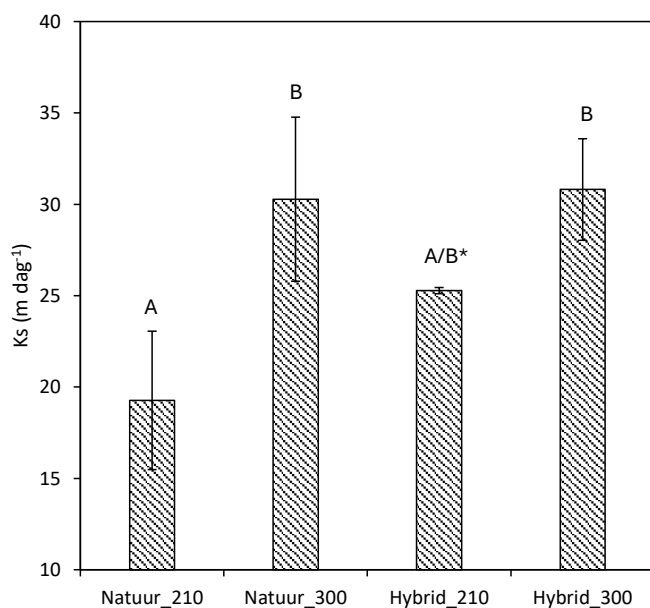


Figuur 14: Cumulatieve biomassa tegen de cumulatieve N-opname. De ANOVA analyse van de regressie staat vermeld in de grafiek met de hellingsconstante R^2 en significantie.

Wat de analyses van zowel de biomassa als de stikstofopname laten zien is dat het grastype, ofwel hybride, geen significant effect geeft op de waarnemingen. Bij de stikstofopname verklaarde de textuur en bemestingstype samen 79 % van de variantie in de data. Het toevoegen van het grastypen resulteerde enkel in een toename van 1 % in de verklaarde variantie. De verschillen in grasgroei tussen natuurgras en hybride die in de praktijk worden waargenomen kunnen in alle waarschijnlijkheid dus eerder worden verklaard door de textuur en de bemestingstypen.

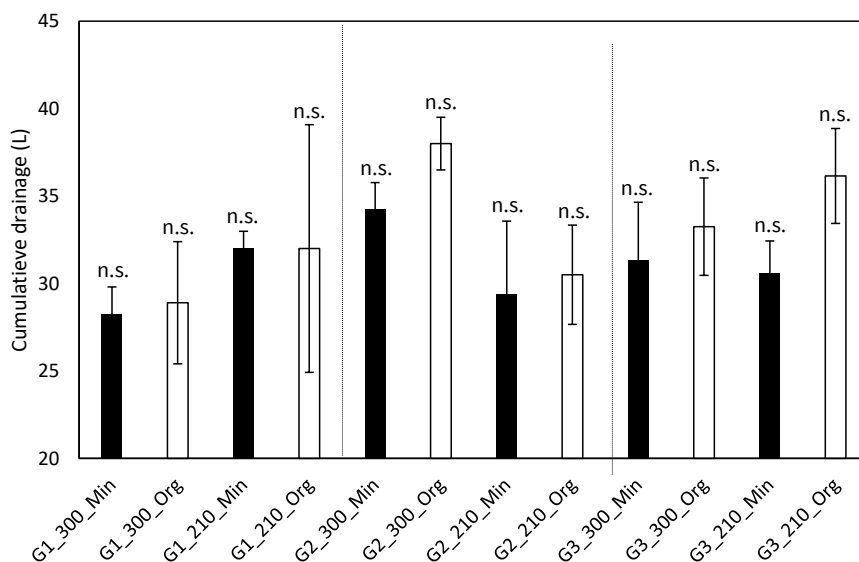
3.2 Hydrologie en Uitspoeling

Een van de belangrijkste parameters in de hydrologie is de waterverzadigde doorlaatbaarheid (K_s). Deze waarde geeft de snelheid aan waarmee water door de bodem stroomt onder verzadigde omstandigheden. Doorgaans neemt deze snelheid af naarmate de textuur fijner wordt, omdat het porievolume afneemt en de wrijving toeneemt. Deze algemene theorie is ook van toepassing op dit onderzoek, waar de K_s significant lager is bij een textuur met een $M50$ van $210 \mu\text{m}$ in vergelijking met $300 \mu\text{m}$ (Figuur 15). Daarnaast is onderzocht of de hybride vezels van de ingenaaide mat invloed hebben op de snelheid waarmee water door de bodem beweegt. De hypothese was dat water langs de vezels versneld zou kunnen afstromen. De data uit dit onderzoek laten echter zien dat er geen significant verschil in K_s is tussen natuurgras en hybride vezels (Figuur 15). De doorlaatbaarheid van een hybride Hatko mat kon niet worden meegenomen omdat er geen ringen uit een hybride Hatko mat konden worden gestoken. Het verschil in K_s tussen texturen kan een effect hebben op de uitspoeling, omdat water sneller door de bodem beweegt bij een hogere K_s . Op basis van het afwezige verschil tussen hybride vezels en natuurgras wordt geen verschil in uitspoeling door textuur verwacht tussen de constructies. Het feit dat textuur een effect heeft op de stroomsnelheid bevestigt ook de hypothese dat de hogere stikstofopname bij fijnere texturen kan worden veroorzaakt door een langere verblijftijd van stikstof in de bodem bij fijnere texturen.



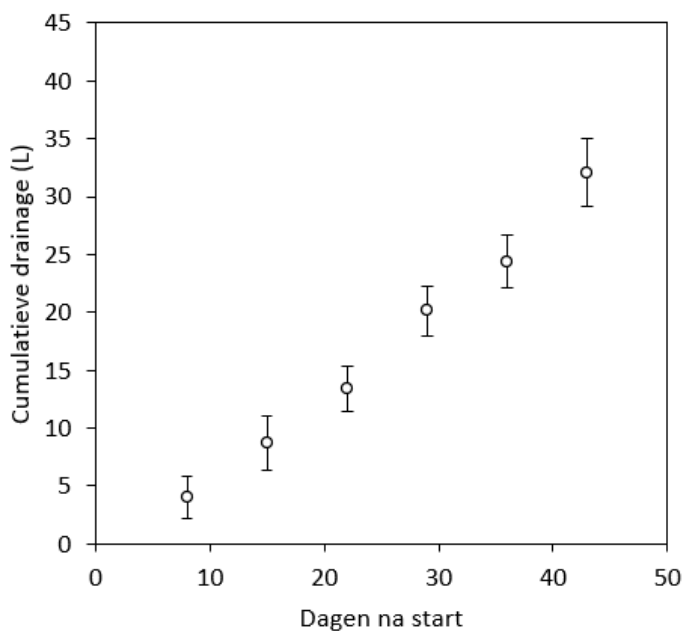
Figuur 15: Grafiek van de waterverzadigde doorlaatbaarheid (K_s) voor de verschillende grasstype en texturen. Significantie is aangegeven met letter. * is gebaseerd op twee waarnemingen.

De resultaten van de plantontwikkeling laten zien dat de planten in dit onderzoek optimaal hebben kunnen groeien. Dit zegt echter nog niets over de uitspoeling van water. Om dit te onderzoeken, zijn de hoeveelheden uitgespoeld water weergegeven in figuur 16. Uit de analyse blijkt dat er geen significante verschillen (n.s.) zijn tussen de behandelingen. Met andere woorden, textuur, grastype en bemestingstypen hebben geen significant effect op de cumulatief uitgespoelde hoeveelheid water. Dit betekent dat alle planten gedurende het onderzoek nagenoeg dezelfde hoeveelheid water hebben benut. Hoewel op basis van de Ks-waarden geen verschil in uitspoeling werd verwacht tussen hybride en natuurgras, omdat de verschillen in Ks niet significant waren, was er op basis van de Ks wel een verschil verwacht tussen de verschillende texturen. Aangezien water sneller door de grovere textuur stroomt, zou een verschil in uitspoeling verwacht zijn. Dit verschil is echter niet waargenomen. De reden hiervoor heeft te maken met de eigenschappen van de bodem, onafhankelijk van de Ks. De Ks geeft aan hoe snel water door de bodem stroomt, maar niet hoeveel water er in de bodem achterblijft. De hydrologische eigenschappen, zoals het vochtgehalte bij verzadiging, zijn hetzelfde voor beide texturen (tabel 2). Dit betekent dat het volume beschikbaar voor wateropslag (veldcapaciteit) nagenoeg hetzelfde is voor beide texturen. Wanneer water wordt gegeven, stroomt het sneller door de grove dan door de fijne textuur, maar de hoeveelheid die uitstroomt, is hetzelfde.



Figuur 16: Cumulatieve drainage voor de verschillende behandelingen. De letters n.s. staan voor "niet-significant". Hierin is "G" het grastypen, "210 of 300" de textuur en "Min en Org" minerale of organische meststof.

Dat er geen significante verschillen zijn tussen de behandelingen betekent dat we de gemiddelden kunnen gebruiken om een beeld te krijgen van de kwantitatieve waarden van de uitspoeling. Het verloop van de uitspoeling is weergegeven in Figuur 17 hieronder. Hierin is te zien dat de cumulatieve drainage constant toeneemt in een lineair verband. Dit is het resultaat van nauwkeurige irrigatie, waarbij het doel was om meer water te geven dan de verdamping, maar niet te veel, zodat het water in de opvangkannen zou passen. Het sterke lineaire verband toont aan dat dit is geslaagd en dat de uitspoeling gecontroleerd heeft plaatsgevonden. In totaal is er gemiddeld 31 liter water uitgespoeld onder de bakken gedurende de onderzoeksperiode, met een wekelijks gemiddelde van ongeveer 5 liter.

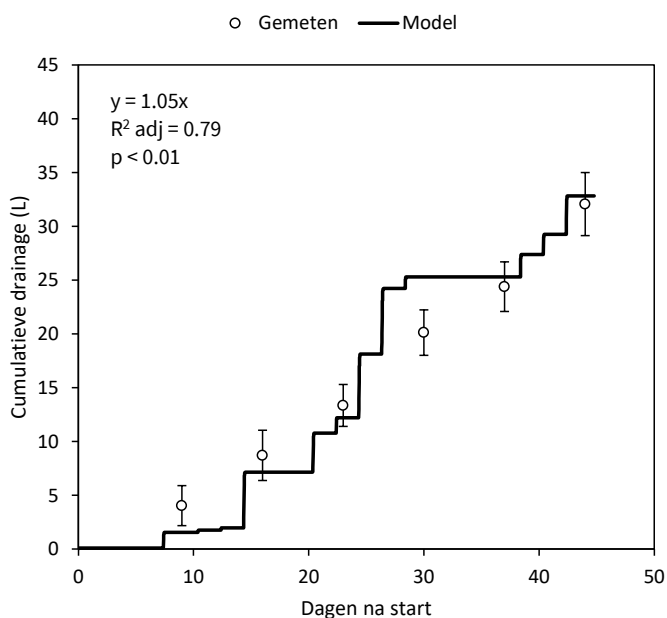


Figuur 17: Cumulatieve drainage over de onderzoeksperiode. Hierbij zijn de meetpunten de gemiddelde waarden van de behandelingen met de bijbehorende standaarddeviatie.

Naast de uitspoeling van water is ook de uitspoeling van stikstof onderzocht. Hiervoor is het uitgespoelde water geanalyseerd op NO_3^- en NH_4^+ concentraties. Uit de analyse bleek echter dat de gemeten waarden onder de detectielimiet lagen. Aangezien het onderzoek was opgezet om uitspoeling te bevorderen, werd verondersteld dat er een andere verklaring zou kunnen zijn voor de waarneming dat er geen stikstof was uitgespoeld. Een mogelijke hypothese was dat algen zich in de opvangbakken hadden ontwikkeld, waardoor stikstof werd vastgelegd. Daarom werd een persulfaatdestructie uitgevoerd, een methode die totale elementaire stikstof kan meten na de destructie van organische verbindingen. Uit deze analyse bleek dat cumulatief tussen de 0,04 en 0,09 g N m^{-2} was uitgespoeld. Dit is ongeveer een factor 100 lager dan de totale hoeveelheid toegevoegde stikstof, namelijk 6,4 g m^{-2} . Onder de omstandigheden van dit onderzoek is er dus nagenoeg geen stikstofuitspoeling waargenomen. Een uitgebreide analyse van de mogelijke oorzaken hiervan wordt gegeven in sectie 3.4.

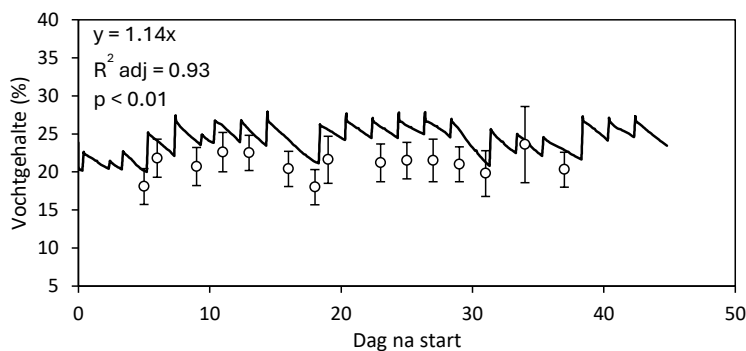
3.3 Modellen

Met de gegevens die in dit onderzoek zijn verzameld, was het mogelijk om het hydrologische model Hydrus 2D te parameteriseren en te gebruiken voor het modelleren van de uitspoeling van water. De eerste stap in het modelleren was het simuleren van de uitspoeling van water. De gemeten en gemodelleerde waarden voor de cumulatieve drainage worden weergegeven in figuur 18. Hierbij is gerekend met de gemiddelde waarden voor de twee texturen, aangezien er geen significante verschillen in uitspoeling zijn waargenomen. Het model laat zien dat het goed in staat is om de observaties te volgen. Een uitgebreide analyse toont aan dat het model 79% van de variantie verklaart. Enkel op dag 7 onderschat het model de werkelijke waarde en op dag 24 wordt deze overschat. Deze overschatting is waarschijnlijk het gevolg van een mindere kwaliteit van de inputdata. Dit is namelijk het punt waarop de waterteller op de sproeikop stopte met werken en er handmatig water is gegeven. De hoeveelheid water die toen is gegeven, was waarschijnlijk lager dan werd verwacht. Desondanks is het model in staat om de totale cumulatieve hoeveelheid water te schatten op 32 liter, wat niet significant afwijkt van de gemeten waarden.



Figuur 18: Gemodelleerde (lijn) en gemeten (punten) waarden voor de cumulatieve drainage over de onderzoeksperiode. De ANOVA analyse van de regressie tussen gemeten en gemodelleerd staat vermeld in de grafiek met de hellingsconstante R^2 en significantie.

Naast de uitspoeling is ook de vochtdynamiek in de toplaag van de bodem onderzocht (Figuur 19). Hierbij is het gemeten vochtgehalte in de bovenste 5 cm vergeleken met de gemodelleerde waarden op dezelfde diepte. De resultaten laten zien dat er een sterke relatie is tussen de gemeten en gemodelleerde waarden, waarbij 93% van de variantie door het model wordt verklaard. Opvallend is echter dat de gemeten waarden significant lager zijn dan de gemodelleerde waarden. De analyse toont aan dat de gemodelleerde waarden gemiddeld 14% hoger liggen dan de gemeten waarden. Deze discrepantie impliceert dat het model een hoge precisie heeft, maar een lagere accuratie, oftewel, het model volgt de trend van de metingen uitstekend, maar met een constante afwijking. Een mogelijke oorzaak hiervan is de kalibratie van de vochtsensor, die is afgesteld op zand, maar zand is een ruim begrip. Kleine variaties in textuur kunnen relatief grote afwijkingen veroorzaken in de gemeten waarden gebaseerd op een kalibratielijijn (Bittelli, 2011; Bogena et al., 2017). Aangezien de output van het model, zoals de uitspoeling, goed overeenkomt met de gemeten waarden, is het onwaarschijnlijk dat het model zelf onjuiste schattingen maakt. Dit betekent dat zowel de sources als de sinks in het model correct zijn, wat impliceert dat het berekende vochtgehalte ook juist moet zijn voor deze specifieke bodems. Een andere verklaring voor de onderschatting van het gemeten vochtgehalte is dat deze metingen steeds aan het begin van de dag zijn uitgevoerd, voordat er werd geïrrigeerd. Hierdoor wordt telkens het laagst mogelijke vochtgehalte gemeten. Voor toekomstig onderzoek zou een continue meting een beter beeld geven, maar dit brengt hogere kosten met zich mee. Wat zowel de gemeten als gemodelleerde waarden laten zien, is dat het vochtgehalte gedurende het onderzoek relatief hoog en stabiel is. Deze constatering is gebaseerd op de veldcapaciteit van zand, die doorgaans tussen de 7 en 17% ligt (Allen et al., 1998). Aangezien dit een schrale en relatief grove zandgrond is, zou de veldcapaciteit eerder aan de onderkant van deze waarden liggen. Het hoge vochtgehalte in dit onderzoek is het gevolg van de frequentie en hoeveelheid van de irrigatie. Er is namelijk significant meer water gegeven¹ dan in de praktijk om uitspoeling te bevorderen.



Figuur 19: Gemodelleerde (lijn) en gemeten (punten) vochtgehaltes tijdens de onderzoeksperiode. Hierbij zijn de punten gemiddeld over de behandelingen met de bijbehorende standaarddeviatie.

¹ Doorgaans wordt er in de praktijk aangevuld tot maximaal veldcapaciteit. In dit onderzoek is er altijd meer gegeven dan veldcapaciteit om zeker te zijn van uitspoeling.

Hoewel er een afwijking is in de absolute waarden van het volumetrische vochtgehalte, zijn deze afwijkingen verklaarbaar. Het model is in staat om de dynamiek in de bodem goed te beschrijven, wat betekent dat we een betrouwbaar beeld hebben van de hydrologie in de bodem.

De gekalibreerde modellen resulterend van dit onderzoek kunnen in de toekomst worden gebruikt om te voorspellen hoeveel en wanneer er geïrrigeerd moet worden om uitspoeling te verminderen. Tevens kunnen deze modellen worden gebruikt om dezelfde dynamiek na te bootsen op verschillende texturen en onder verschillende klimaatomstandigheden. Zo kunnen ze helpen bij het optimaliseren van irrigatiestrategieën en het bevorderen van efficiënter watergebruik, wat bijdraagt aan een duurzamer onderhoud.

3.4 Water- en nutriëntenbalans

Een van de belangrijkste validaties voor de kwaliteit van dit onderzoek en de betrouwbaarheid van de data is het opstellen van de water- en nutriëntenbalans. Dit is mogelijk in dit onderzoek gezien er is gewerkt met een gesloten systeem en alle sources zijn gecontroleerd en alle sinks zijn gemeten. Een overzicht van de waterbalans is gegeven in tabel 3. In totaal is er 173 mm water gegeven. Hiervan is 100 mm opgenomen door de plant, 33 mm is verdampt en 48 mm is uitgespoeld. Om de balans kloppend te maken is er enkel nog een restterm van 8 mm. Deze restterm kan bestaan uit meetfouten of uit de bodemvoorraad. Als het een meetfout is kan dit te maken hebben met water dat niet goed is opgevangen in de kannen bijvoorbeeld omdat er water is weggelekt, of er is minder water gegeven dan de bedoeling was. Echter, 8 mm is maar een fout van 5% op de hele balans wat doorgaans als erg goed wordt beschouwd. De vertaling van dit gecontroleerde onderzoek naar de praktijk is relatief eenvoudig gezien er als source enkel neerslag bij zou komen. Gezien neerslag zowel goed te meten als te voorspellen is, kan dit gekalibreerde model ook in de praktijk gebruikt worden.

Tabel 3: Waterbalans voor de verschillende sources en sinks in dit onderzoek aan het einde van de onderzoeksperiode.

Balansterm	Cumulatieve hoeveelheid (mm)
Irrigatie	+173
Plantopname	-100
Evaporatie	-33
Drainage	-48
Rest/bodemvoorraad	-8

Voor de stikstof is het ook mogelijk om een balans op te stellen. Er is namelijk als source een bemesting van 6.4 g N m^{-2} en als sinks zijn er plantenopname van 3.3 tot 4.0 g N m^{-2} in de bovengrondse biomassa en uitspoeling van 0.04 tot 0.09 g N m^{-2} . De N opslag in de wortelbiomassa is niet gemeten maar uitgaande van een wortel-blad ratio voor biomassa van 0.5 voor Engels raaigras Gales, 1979) en wortel-blad ratio voor N gehalte in de droge stof van 0.4 (Evers et al., 2020), betekent dit een cumulatieve N opname van in de wortel van 0.7 g N m^{-2} tot 0.8 g N m^{-2} , wanneer verschillen in effecten van textuur en bemesting op wortelbiomassa en N-gehalte in de wortel biomassa niet worden meegenomen. Er zou een onderschatting kunnen zijn van de wortelbiomassa. Echter, zelfs als deze schatting een factor 2 zou afwijken is de opname nog niet genoeg om alle sinks te verklaren. Zoals al eerder werd opgemerkt is de uitspoeling bijzonder laag, tegen de verwachtingen in. Gezien er geen andere sinks zijn in dit onderzoek dan plantopname en kan het niet anders dat de restterm de bodemvoorraad omschrijft waarbij de bemesting nog aanwezig is in niet opgeloste. Voor de organische meststof ligt dit nog binnen de verwachtingen gezien de stikstof volgens de producent vrijkomt over 6 maanden. Eerder onderzoek liet zien dat het vrijkomen van organische stikstof niet een lineair, maar een logaritmisch verband geeft

waarbij de meeste stikstof vrijkomen in een relatief korte periode (Evers & Evers, 2023; Geisseler, et al., 2021). Hoe deze exacte curve loopt is niet vermeld door de producent en daarom is het lastig om bijvoorbeeld de stikstofdynamiek te modelleren gezien dit een input is van het model. Dat echter maar de helft van het organische product vrijkomt gedurende het onderzoek ligt wel binnen de verwachtingen van dergelijke producten.

Tabel 4: Nutriëntenbalans voor de verschillende sources en sinks in dit onderzoek aan het einde van de onderzoeksperiode. Hierin is onderscheid gemaakt op basis van textuur (300 of 210) en bemestingstype (mineraal of organisch).

Balansterm	Cumulatieve hoeveelheid (g N m ⁻²) 300_min	Cumulatieve hoeveelheid (g N m ⁻²) 210_min	Cumulatieve hoeveelheid (g N m ⁻²) 300_org	Cumulatieve hoeveelheid (g N m ⁻²) 210_org
Bemesting	+6.4	+6.4	+6.4	+6.4
Plantopname in blad (gemeten)	-3.6	-4.0	-3.3	-3.4
Plantopname in wortel (berekend)	-0,7 - -0,8	-0,7 - -0,8	-0,7 - -0,8	-0,7 - -0,8
Uitspoeling	-0.04 - -0.09	-0.04 - -0.09	-0.04 - -0.09	-0.04 - -0.09
Rest/bodemvoorraad	2.0	1.6	2.3	2.2

Echter, voor het minerale product is een vergelijkbaar patroon zichtbaar. Voor het minerale product is ca. 35 % niet opgenomen of uitgespoeld gedurende het onderzoek terwijl door de producent is vermeld dat het product oplost in 6 weken tijd. Wat de hypothese bevestigt dat de producten nog niet volledig zijn opgelost, zijn waarnemingen van onopgeloste korrels in de bakken aan het einde van de onderzoeksperiode in november (Figuur 20). Dit betekent dat er zelfs na 3 maanden voor zowel de organische als de minerale producten nog stikstof aanwezig is in de bodemvoorraad.



Figuur 20: Foto van onopgeloste minerale meststofkorrel 3 maanden na toediening.

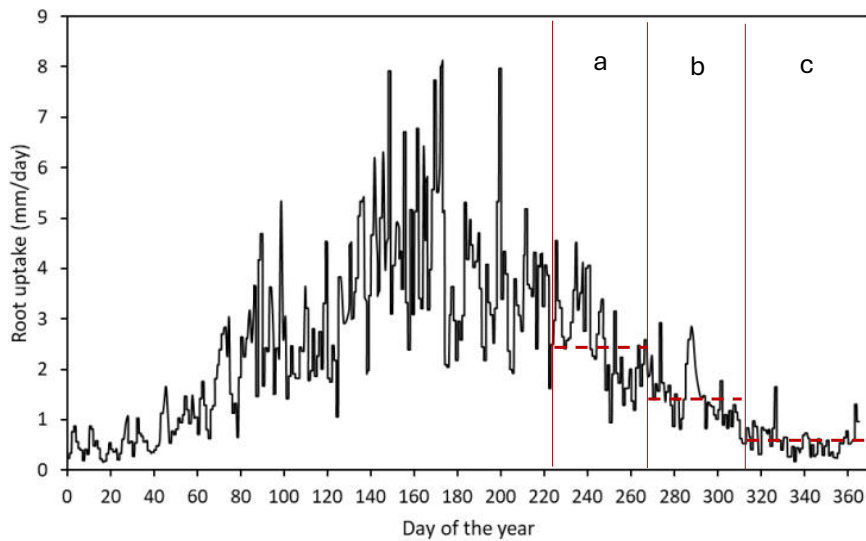
Tijdens de laatste observatie van het onderzoek, in november, begon het gras in de bakken langzaam geleer te worden (Figuur 21). Gezien er nog meststoffen aanwezig waren is dit met name het gevolg van een dalende temperatuur aan het einde van het groeiseizoen en er is geen water meer gegeven. In dit onderzoek is de stikstof dat vrij is gekomen opgenomen door de planten, waardoor er nagenoeg geen



Figuur 21: Foto van de onderzoeksobjecten 3 maanden na start van het onderzoek. Op deze foto is te zien dat het gras geel begint te worden aan de toppen van het blad.

uitspoeling is waargenomen. Echter, nu de plantopname lager wordt aan het einde van het seizoen komt er een nieuwe vraag naar voren, namelijk: wat gebeurt er met de stikstof dat nog aanwezig is in de bodem?

Om dit onderzoek in perspectief te plaatsen, kunnen we kijken naar de opnamepatronen van water door grasplanten. Figuur 22 toont het opnamepatroon van gras uit een eerder onderzoek door Lumbricus met data uit 2017 voor Enschede (Evers & Evers, 2023). Hoewel dit een ander jaar en een andere locatie betreft, blijft dit patroon relevant voor dit onderzoek, omdat het afhankelijk is van de zonne-intensiteit gedurende het jaar. In periode "a" van het figuur zijn de metingen uitgevoerd, een groeizame periode waarin de planten vrijwel alle stikstof hebben opgenomen die vrijkwam. Aan het einde van periode "b" werden er nog korrels aangetroffen in de bakken, wat aangeeft dat er nog stikstof aanwezig was. Zoals te zien in het figuur, is de opname in periode "c" laag. Als er in deze periode stikstof vrijkomt, is dit gevoelig voor uitspoeling. Om de kans op uitspoeling in kaart te brengen, is verder onderzoek naar het gedrag van meststoffen noodzakelijk. Voor minerale producten moet de oplosbaarheid worden onderzocht in representatieve veldsituaties in plaats van in laboratoriumomgevingen. Voor organische producten is al veel onderzoek gaande, maar deze zijn complexer omdat mineralisatie afhankelijk is van variabelen zoals temperatuur, pH en vochttoestand in de bodem. Wanneer de eigenschappen van deze producten beter in kaart zijn gebracht, kunnen ze worden gecombineerd met het model dat in dit onderzoek is ontwikkeld. Hiermee kunnen specifieke berekeningen worden gemaakt voor verschillende texturen en gebruikssituaties. Op deze manier kan een bemestingsadvies worden ontwikkeld dat uitspoeling voorkomt.



Figuur 22: Wateropname (root uptake) van grasplanten over de dagen van het jaar voor 2017 Enschede zoals overgenomen uit Evers & Evers (2023). De letters geven de periodes weer voor a) onderzoeksperiode met metingen, b) laatste observaties en c) periode na het onderzoek. De gestippelde lijnen geven de gemiddelde opname over de periodes.

Resultaten en Discussie

In dit onderzoek is er gekeken naar uitspoeling van stikstof bij verschillende texturen, grastype en bemestingstype. Hieronder volgen de conclusies van dit onderzoek op basis van de onderzoeksresultaten:

- De gemeten cumulatieve uitspoeling van stikstof over 6 weken tijd ligt tussen de 0.4 en 0.9 kg N ha⁻¹. Dit is een factor 100 lager dan de totaal toegevoegde stikstof (64 kg N ha⁻¹). Er is dus **geen substantiële uitspoeling van stikstof** waargenomen in dit onderzoek en er **geen verschillen in uitspoeling** zijn geconstateerd **tussen natuurgras en hybride sportgras** op verschillende bodemtextuur.
- Er is **geen significant verschil** aangetoond in bovengrondse plantengroei of hydrologische eigenschappen tussen **natuurgras en hybridevelden**.
- Bij een gelijke stikstofdosering **resulteert minerale bemesting** in meer bovengrondse biomassa productie vergeleken met **organische bemesting** door verschillen in mineralisatie (snelheid van N-beschikbaarheid voor opname).
- Voor N-opname speelt naast het effect van **bemestingstype** ook de **textuur** een rol, waarbij grovere texturen een negatief effect hebben op de N-opname (N-allocatie in bovengrondse biomassa).
- Data van **hydrologische modellen** zijn in overeenkomst met de **gemeten data**. Dit betekent dat we een **goed mechanistisch begrip** hebben van de processen die water en opgeloste stoffen beïnvloeden in sportgras.
- De **maximale opname van stikstof in bovengrondse biomassa over 6 weken groei was 40 kg N ha⁻¹**.
- De uitspoeling is zo laag omdat de **planten alle beschikbare stikstof hebben opgenomen** en de **rest van de stikstof nog vast zit** in onopgeloste of niet gemineraliseerde vorm.
- Voor **minerale meststoffen zat 28 %** van de stikstof nog vast in de korrel of bodemvoorraad en voor **organische meststof was dit 35 %**.
- Er is **niet bekend** wat het lot is van de **achtergebleven stikstof** in de bodem.
- **Bestaande verschillen** in drainage en graskwaliteit tussen natuurgras en hybridevelden worden **niet veroorzaakt door het hybride gras**. Dit onderzoek laat zien dat **bemestingstype en textuur** de belangrijkste verklarende factoren zijn die samen 79 % van de variantie verklaren.

Op basis van de bevindingen in dit onderzoek kunnen diverse aanbevelingen worden gedaan om zowel de uitspoeling van water en nutriënten te minimaliseren als het gras optimaal te laten groeien. Bij het berekenen van bemestingsschema's om uitspoeling te voorkomen, spelen de timing en dosering van de toediening een cruciale rol. Voor een optimaal bemestingsschema wordt aanbevolen de volgende drie aspecten in acht te nemen voor de optimalisatie van timing en dosering:

1. **Bepaal potentiële opname door de plant:** bepaald door de bodem- en klimaatcondities.
2. **Bepaal beschikbaarheid van nutriënten:** beïnvloed door het product, de bodem en het klimaat.
3. **Koppeling van opname en beschikbaarheid:** berekend met gekalibreerde modellen.

Allereerst wordt aanbevolen om de opnamepatronen van grasplanten voor specifieke veldomstandigheden in kaart te brengen. Dit kan worden bereikt door metingen van de hydrologische eigenschappen van de bodem en het opstellen van een waterbalans op basis van de klimatologische omstandigheden. Samen geven deze factoren de potentiële opnamecapaciteit van de grasplant weer. Tevens geeft deze waterbalans inzicht in de irrigatiebehoefte van de grasplant. Om uitspoeling te voorkomen is het tevens belangrijk om optimaal te irrigeren. Als er te veel water wordt gegeven is er meer kans op uitspoeling, maar als er te weinig water wordt gegeven raakt de plant in de stress en neemt deze minder stikstof op. Als er vervolgens neerslag komt is de stikstof onderhevig aan uitspoeling. Met name te weinig water zal een probleem zijn gezien dit onderzoek heeft aangetoond dat de opname van de plant een belangrijke rol speelt in de nutriëntenbalans.

Vervolgens is het essentieel om een product toe te dienen dat aan de berekende behoeften van de plant voldoet. Dit onderzoek heeft aangetoond dat de nutriëntbeschikbaarheid uit zowel minerale als organische producten niet volledig bekend is. Daarom wordt aanbevolen om meer onderzoek te verrichten naar de specifieke eigenschappen van deze producten, met betrekking tot oplosbaarheid en mineralisatie in veldomstandigheden.

Door de gegevens over opname en beschikbaarheid te koppelen in gekalibreerde modellen, zoals in dit onderzoek ontwikkeld, kan nauwkeurig worden berekend wat de optimale timing en hoeveelheid nutriënten is om uitspoeling te voorkomen. Tevens kan deze koppeling worden gebruikt om te achterhalen wat er met de stikstof gebeurt dat in de bodem is achtergebleven. Wanneer de gegevens van de producten, i.e. de oplosbaarheid en mineralisatie, beter in kaart zijn gebracht, kan het model uit dit onderzoek worden gebruikt om te kijken naar de mechanismes die het lot van de achtergebleven stikstof bepalen. Omdat deze achtergebleven stikstof een belangrijke rol kan spelen voor uitspoeling wordt dan ook aanbevolen om meer onderzoek uit te voeren naar het lot van achtergebleven stikstof in de bodem.

Referenties

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Barton, L., & Colmer, T. (2006). Irrigation and fertiliser strategies for minimising nitrogen leaching from turfgrass. *Agricultural Water Management*, 80, 160-175.
- Bittelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content: A Review. *HortTechnology hortte*, 21 (3), 293-300.
- Boer, H. d., Hoekstra, J. D., & Eekeren, N. v. (2016). Strategic timing of nitrogen fertilization to increase root biomass and nitrogen-use efficiency of *Lolium perenne* L. *Plant Soil*.
- Bogena, H. R., Huisman, J. A., Schilling, B., Weuthen, A., & Vereecken, H. (2017). Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors*, 17(1), 208.
- Bussink, D., & Draai, H. v. (2008). *Naar een richtlijn voor de N- en P-bemesting van sportvelden met minimale uitspoeling*. Rijen: Branchevereniging Sport en Cultuurtechniek.
- Carey, R. O., Hochmuth, G. J., Martinez, C. J., Boyer, T. H., Nair, V. D., Dukes, M. D., . . . Sartain, J. B. (2012). A Review of Turfgrass Fertilizer Management Practices: Implications for Urban Water Quality. *HortTechnology*, 22(3), 280-291.
- Deb, S. K., Shukla, M. K., Šimůnek, J., & Mexal, J. G. (2013). Evaluation of spatial and temporal root water uptake patterns of a flood-irrigated pecan tree using the HYDRUS (2D/3D) model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 599–611.
- Doltra, J., & Muñoz, P. (2010). Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 97(2), 277-285.
- European-Commission. (2021). *REPORT FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT*. Brussels: European Commission.
- Evers, M., Kroon, H. d., Visser, E., & Caluwe, H. d. (2020). Carbon accumulation of cool season sports turfgrass species in distinctive soil layers. *Agronomy Journal*, 112(5), 3435-3449.
- Evers, T., & Evers, M. (2023). *Mechanistic understanding of soil nitrogen leaching for different organic fertilizers*. Herveld: Lumbricus in opdracht van Culterra .
- Feddes, R. A., Kowalik, P., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield (Simulation monographs). Pudoc.
- Gaines, T., & Gaines, S. (1994). Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(13-14), 2561-2570.
- Gales, K. (1979). Effects of Water Supply on Partitioning of Dry Matter Between Roots and Shoots in *Lolium perenne*. *Journal of Applied Ecology*, 16(3), 863-877.
- Geisseler, D., Smith, R., Cahn, M., & Muramoto, J. (2021). Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts: Literature survey and model fitting. *Journal of Environmental Quality*, 50(6), 1325-1338.
- Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Geza, M., Deb, S. K., Leinauer, B., Stanek, S., Sevostianova, E., & Serena, M. (2021). Modeling NO₃-N leaching during establishment of turfgrasses irrigated with tailored reclaimed water. *Vadose Zone Journal*, 20(3).
- Gislum, R., & Griffith, S. M. (2005). Tiller Production and Development in Perennial Ryegrass in Relation to Nitrogen Use. *Journal of Plant Nutrition*, 2135-2148.

- Herencia, J. F., Ruiz-Porras, J. C., Melero, S., Garcia-Galavis, P. A., Morillo, E., & Maqueda, C. (2007). Comparison between Organic and Mineral Fertilization for Soil Fertility Levels, Crop Macronutrient Concentrations, and Yield. *Fertilizer Management*, 99(4), 973-983.
- Klar, C., Fiener, P., Neuhaus, P., Lenz-Wiedemann, V., & Schneider, K. (2008). Modelling of soil nitrogen dynamics within the decision support system DANUBIA. *Ecological Modelling*, 217, 181-196.
- Ma, J., Ma, Y., Wei, R., Chen, Y., Weng, L., Ouyang, X., & Li, Y. (2021). Phosphorus transport in different soil types and the contribution of control factors to phosphorus retardation. *Chemosphere*, 276, 130012.
- Matteaua, J. -P., Gumiere, S. J., Gallichand, J., Létourneau, G., Khiari, L., Gasser, M. -O., & Michaud, A. (2019). Coupling of a nitrate production model with HYDRUS to predict nitrate leaching. *Agricultural Water Management*, 213, 616-626.
- Matzek, L. W., & Carter, K. E. (2016). Activated persulfate for organic chemical degradation: A review. *Chemosphere*, 151, 178-188.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Petrovic, A. (1990). The fate of nitrogenous fertilizers applied to turf grass. *Journal of Environmental Quality*, 19, 1-14.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8, 1204-1213.
- Šimůnek, J., Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2012). *The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. PC-Progress.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., . . . Persson, L. M. (2015). Planetary boundaries: Guiding. *Science*, 347(6223), 1259855-1259855.
- Tafteh, A., & Sepaskhah, A. R. (2012). Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management*, 113, 19-29.

colofon

© 2023, BSNC

Foto's: Lumbricus Environmental Research and Consultancy

Met dank aan de leden van de werkgroep Hybride sportvelden voor hun vrijwillige bijdrage;

Pleun Lok (voorzitter),
Paul van Berkel (Van Kessel),
Martin Brummel (GrasMeesters),
Bert Jan Emons (Aannemersbedrijf Van Wijlen),
Jacco Meijerhof (Hofmeijer),
Jan ter Steege (PLANN.ing),
Jaap Verhagen (gemeente Zutphen),
André Wolbrink (Greenfields).



Branchevereniging
Sport en
Cultuurtechniek



Woudenbergseweg 56-58
Gebouw #11
3707 HX Zeist
T 06 2252 8523
E info@bsnc.nl
I www.bsnc.nl