



DEPARTEMENT
LANDBOUW
& VISSERIJ

ILVO Mededeling D/2023/05

Maart 2023

PEILIMPACT EINDRAPPORT

ILVO

Instituut voor Landbouw-,
Visserij- en Voedingsonderzoek

www.ilvo.vlaanderen.be

PEILIMPACT eindrapport [NL]

Maart 2023

ILVO Mededeling D/2023/05

March 2023

ISSN: 1784-3197

Wettelijk Depot: D/2023/10.970/05

Auteurs

Diana Estrella ¹

Tom De Swaef ¹

Sarah Garré ¹

¹ Vlaams Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek (ILVO)

Partners

The logo for ILVO, consisting of the letters 'ILVO' in a bold, green, sans-serif font.The logo for KWR, consisting of the letters 'KWR' in a bold, dark blue, sans-serif font, with a light blue brushstroke under the 'R'.

Met steun van



DEPARTEMENT
LANDBOUW
& VISSERIJ

Inhoudsopgave

-DEEL I- Project informatie

| | | |
|---|----------------------------------|---|
| 1 | Context en onderzoeksvraag | 6 |
| 2 | Methodologie | 6 |
| 3 | Relevantie | 7 |

-DEEL II- Samenvatting

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Probleemstelling | 8 |
| 2 | Resultaten simulaties met het PEILIMPACT modelkader | 9 |
| | 2.1 Regionaal | 9 |
| | 2.2 Plausibiliteitscontrole | 9 |
| | 2.3 Case-study | 9 |
| 3 | Hoofdpunten literatuurstudie | 10 |
| | 3.1 Teeltfactoren | 10 |
| | 3.2 Mobiliteit van nutriënten | 10 |
| | 3.3 Natte landbouw en paludicultuur | 10 |
| 4 | Conclusies en aanbevelingen | 10 |

-DEEL III- Algemene inleiding

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Context | 12 |
| | 1.1 Doelstellingen | 13 |
| | 1.2 Referenties | 13 |
| 2 | Effect van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren | 14 |
| | 2.1 Inleiding | 15 |
| | 2.2 Directe gevolgen | 16 |
| | 2.2.1 Verband tussen grondwater en opbrengst | 17 |
| | 2.2.2 Effect op verschillende soorten gewassen | 19 |
| | 2.3 Indirecte effecten | 25 |
| | 2.3.1 Beperkte draagkracht: begaanbaarheid, bewerkbaarheid en vertrapping ... | 26 |
| | 2.3.2 Vertraging bij het zaaien of oogsten | 28 |
| | 2.3.3 Bodemkwaliteit, tekorten aan voedingsstoffen en toxiciteit | 28 |
| | 2.3.4 Onkruid | 29 |
| | 2.3.5 Plagen en ziekten | 30 |
| | 2.3.6 Gewasschade en oogstkwaliteit | 30 |
| | 2.4 Referenties | 31 |

-DEEL IV- Modelkader

| | | |
|---|---|----|
| 1 | GIS analyse identificatie focusgewassen | 36 |
| | 1.1 Inleiding | 36 |
| | 1.2 Methodologie | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.2.1 | Digitale bodemkaart van het Vlaamse Gewest | 36 |
| 1.2.2 | Percelen voor agrarisch gebruik | 37 |
| 1.2.3 | Dominante bodem- en gewastypes in slecht gedraineerde bodems | 37 |
| 1.3 | Resultaten | 39 |
| 1.4 | Conclusie | 41 |
| 1.5 | Referenties | 42 |
| 2 | Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren | 42 |
| 2.1 | Inleiding | 42 |
| 2.2 | Het SWAP-WOFOST-model | 43 |
| 2.2.1 | Transport van bodemwater | 43 |
| 2.2.2 | Gewasgroei | 45 |
| 2.2.3 | Directe en indirecte effecten | 46 |
| 2.2.4 | Opbrengstvermindering | 51 |
| 2.3 | Model Input | 52 |
| 2.3.1 | Meteorologische gegevens | 52 |
| 2.3.2 | Gewasgegevens | 54 |
| 2.3.3 | Gegevens over de bodem | 55 |
| 2.3.4 | Freatische grondwaterniveaus | 57 |
| 2.4 | Opzet en werking van het model | 60 |
| 2.5 | Referenties | 62 |
| 3 | Gebruik van het modelkader | 64 |

-DEEL V-
Resultaten

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Regionale analyse en validatie | 67 |
| 1.1 | Aanpak | 67 |
| 1.2 | Resultaten regionale analyse | 67 |
| 1.2.1 | Variabiliteit in de tijd | 67 |
| 1.2.2 | Heterogeniteit | 70 |
| 1.2.3 | Effect van grondwaterstand en bodemtextuur op gewasopbrengst | 72 |
| 1.3 | Plausibiliteitscontrole | 74 |
| 1.3.1 | Een eerste stap naar een Vlaamse opbrengstdatabank | 75 |
| 1.3.2 | Modelopzet voor plausibiliteitscheck | 75 |
| 1.3.3 | Resultaten modelvalidatie | 76 |
| 1.4 | Conclusies | 78 |
| 1.5 | Referenties | 79 |
| 2 | Case-study: landbouwgebied De Zegge | 80 |
| 2.1 | Achtergrond | 80 |
| 2.2 | Methodologie | 81 |
| 2.2.1 | Studiegebied | 81 |
| 2.2.2 | Modelkader | 86 |
| 2.3 | Resultaten en discussie - huidige toestand | 86 |
| 2.3.1 | Meteorologische omstandigheden | 88 |
| 2.3.2 | Opbrengst, opbrengstreductie en type stress | 88 |
| 2.3.3 | Relatie tussen opbrengstvermindering en grondwatertafel | 89 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.4 | Volgende stappen: impact van vernattingsscenario's | 92 |
| 2.4 | Conclusies | 92 |
| 2.5 | Referenties | 92 |

–DEEL VI–

Aanvullende beschouwingen mbt vernatting in landbouwgebied

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | Effect van grondwaterstand op de mobiliteit van nutriënten | 94 |
| 1.1 | Inleiding | 94 |
| 1.2 | Chemie van verzadigde bodems onder anaerobe omstandigheden | 95 |
| 1.2.1 | Sequentiële reductie | 96 |
| 1.2.2 | Zuurstof en andere gassen | 97 |
| 1.2.3 | pH | 97 |
| 1.2.4 | Temperatuur | 98 |
| 1.3 | Transformatie van fosfor | 98 |
| 1.3.1 | De rol van het kleigehalte en de bodemmineralogie | 98 |
| 1.3.2 | Mineralisatie- en transportprocessen | 99 |
| 1.4 | Transformatie van stikstof | 100 |
| 1.4.1 | Accumulatie van ammonium | 100 |
| 1.4.2 | Denitrificatie en stikstoffixatie | 101 |
| 1.5 | Andere transformaties | 101 |
| 1.5.1 | Omzetting van koolstof | 101 |
| 1.5.2 | Sulfaat transformatie | 101 |
| 1.6 | Effecten op waterkwaliteit en biodiversiteit | 101 |
| 1.6.1 | Referenties | 102 |
| 2 | Potentieel van paludicultuurgewassen in Vlaanderen | 105 |
| 2.1 | Inleiding | 106 |
| 2.2 | Overzicht paludicultuurgewassen | 107 |
| 2.2.1 | Voordelen en nadelen | 108 |
| 2.2.2 | Potentiële toepassingen | 108 |
| 2.3 | Verkenning van paludicultuur in Vlaanderen | 113 |
| 2.4 | Paludicultuurgewassen met teelpotentieel in Vlaanderen | 115 |
| 2.4.1 | Lisdodde (<i>Typha</i> sp.) | 117 |
| 2.4.2 | Olifantengras (<i>Miscanthus giganteus</i>) | 119 |
| 2.4.3 | Veenmos (<i>Sphagnum</i> sp.) | 121 |
| 2.4.4 | Riet (<i>Phragmites australis</i>) | 123 |
| 2.4.5 | Wilg (<i>Salix</i> sp.) | 126 |
| 2.5 | Verdienmodellen | 127 |
| 2.6 | Onderzoeksperspectieven | 127 |
| 2.7 | Bibliografie | 129 |

–DEEL VII–

Conclusies

–DEEL VIII–

Aanbevelingen

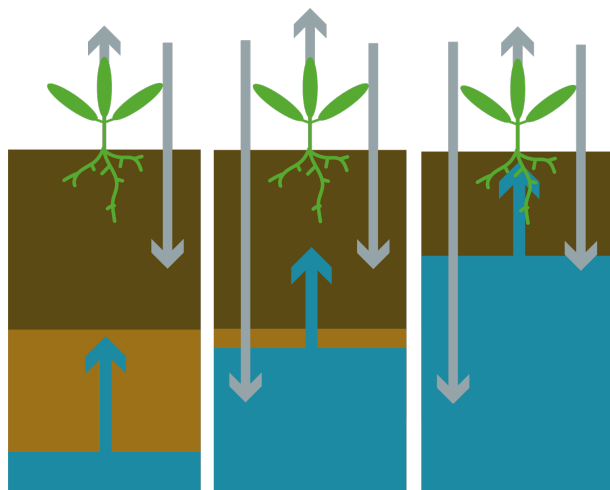
–DEEL IX–

Metingen fosformobilisatie

| | | |
|---|--|-----|
| 1 | Achtergrond | 138 |
| 2 | Methodologie | 139 |
| | 2.1 Experimentele site | 139 |
| | 2.2 Weersomstandigheden en grondwaterstanden | 140 |
| | 2.3 Bemonstering en analyse van bodem en water | 141 |
| | 2.3.1 Bodemstalen | 141 |
| | 2.3.2 Waterstalen | 142 |
| 3 | Resultaten: Fosformetingen | 142 |
| | 3.1 Referenties | 143 |

–DEEL I–

Project informatie



1 Context en onderzoeksvraag

Stel dat we op bepaalde plaatsen het grondwaterpeil verhogen, waardoor het vochtgehalte van de bodem toeneemt. Welke impact zou dat hebben op de opbrengst van conventionele landbouwgewassen in Vlaanderen? Deze onderzoeksvraag wordt behandeld in het project PEILIMPACT. Met het zicht op de klimaatverandering, legt het Vlaams regeerakkoord 2019-2024 sterk de nadruk op een grotere weerbaarheid tegen droogte, onder meer door de actieve inzet van een veerkrachtige ruimte met (extra) natuur. Naburige landbouwactiviteiten kunnen positieve effecten ondervinden doordat het water in het landschap wordt gebufferd. Toch zijn er ook negatieve effecten mogelijk: als het waterpeil te hoog wordt, kan dit de mogelijkheid om het land te bewerken in gevaar brengen, de groei van gewassen negatief beïnvloeden, de beschikbaarheid en uitspoeling van nutriënten naar oppervlakte- en grondwater wijzigen en de ziektedruk op gewassen verhogen.

2 Methodologie

Via gerichte dialoogmomenten met Vlaamse landbouwers verwerven we ervaringskennis over het effect van te hoge of te lage grondwaterstanden op bepaalde gewassen. We detecteren mogelijke belemmeringen voor hun landbouwactiviteit en belangrijke effecten op de opbrengst, zowel positief als negatief, en hun oorzaken. Dit gebruiken we om een modelinstrumentarium te kiezen en aan te passen aan de Vlaamse context. Het model moet, gegeven een aantal parameters, waterstanden kunnen berekenen die "voldoende gunstig" zijn voor de landbouw. Eenvoudige richtwaarden zijn te generalistisch, omdat de voor de landbouw aanvaardbare waterstanden afhangen van de grondsoort, het gewas en de diepte van de wortels, de tijd van het jaar, enz. Om haalbare waterpeilverhogingen voor een specifieke situatie te bepalen,

maken wij daarom modelberekeningen voor een reeks verschillende weersscenario's en voor de gewassen die op een specifieke locatie worden geteeld.

3 Relevantie

Een evaluatiekader kan worden gebruikt om het effect van beslissingen inzake grondwaterbeheer op conventionele landbouwteelten te voorspellen en deze in de toekomst te koppelen aan compensatie voor getroffen grondgebruikers, alsook om duurzame oplossingen te bespreken voor waterbeheer met landbouwers en natuurbeheerders op een bepaalde locatie. Het kader kan landbouwers ook helpen bij de keuze van gewassen op een bepaald perceel met zijn specifieke bodemeigenschappen en meteorologische context.

Dit project werd uitgevoerd door het Vlaams Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek (ILVO) [Diana Estrella, Sarah Garré, Tom Deswaef] ism KWR Water Research Institute [Ruud Bartholomeus] en Wageningen University & Research (WUR) [Martin Mulder, Mirjam Hack-ten Broeke].

ILVO



KWR



DEPARTEMENT
LANDBOUW
& VISSERIJ

Dit is een project gefinancierd door de Vlaamse overheid, Departement Landbouw en Visserij van 1 februari 2022 tot en met 31 januari 2023.

–DEEL II–

Samenvatting

1 Probleemstelling

Klimaatverandering veroorzaakt langere perioden van droogte, afgewisseld met hevige regenval. Dit heeft een belangrijke impact op de landbouw en de negatieve effecten ervan werden reeds waargenomen in de landbouwsector in W-Europa tijdens de droge zomers van 2017, 2018, 2019, 2020 en 2022, en dit zal hoogstwaarschijnlijk zo blijven in de toekomst. Het Vlaams regeerakkoord 2019-2024 focust op proactieve maatregelen om de gevolgen van de klimaatverandering op te vangen. Het legt sterk de nadruk op het verhogen van onze weerbaarheid tegen droogte door de aanleg van extra natte natuur of herstel/sanering van drooggelegde wetlands om infiltratie en waterberging te bevorderen. **Dit betekent dat landbouwers en beleidsmakers zich niet alleen moeten aanpassen aan een toename van het aantal droogtes, maar waarschijnlijk ook aan de gevolgen van overmatig bodemwater (te natte omstandigheden) in landbouwgebieden in de buurt van herstelde wetlands.** Er is echter weinig informatie beschikbaar om de gevolgen van hoge grondwaterstanden voor de landbouw als gevolg van de uitvoering van de vernattingsmaatregelen in te schatten.

In deze studie hebben we een **modelkader ontwikkeld om het effect van grondwaterstanden op de opbrengst van conventionele gewassen in Vlaanderen** in te schatten. Het gezamenlijke model SWAP-WOFOST, achter het Nederlandse initiatief Waterwijzer Landbouw, werd gebruikt om op basis van historische gegevens de opbrengst en opbrengstvermindering als gevolg van droogte (te droog) en zuurstofstress (te nat) te simuleren voor **vijf belangrijke gewassen in Vlaanderen: gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet**. Met dit model kunnen we ook het effect van beperkingen in normale landbouwpraktijken als gevolg van te natte of te koude omstandigheden opnemen, de zogenaamde indirecte effecten. Te natte omstandigheden in de wortelzone beginnen wanneer gewassen zuurstofstress gaan ervaren, dat wil zeggen wanneer de zuurstofbeschikbaarheid lager is dan de zuurstofbehoefte van plantenwortels.

Er werden vrij beschikbare (online of on-demand) datasets en kaarten voor heel Vlaanderen gebruikt, verkregen van Vlaamse instellingen of eerdere projecten. We hebben een databank met experimentele opbrengstwaarnemingen in Vlaanderen samengesteld en gebruikt om de prestaties van het model onder Vlaamse omstandigheden te evalueren. We schreven ook drie literatuuronderzoekshoofdstukken over de effecten van grondwater op landbouwpraktijken, het effect van ondiepe grondwaterstanden en vernatting op de mobiliteit van nutriënten, en het potentieel van paludicultuur in Vlaanderen. Tenslotte werd het model toegepast op het landbouwgebied rond De Zegge-Mosselgoren, nabij Geel.

Important

Het model zelf kan gedownload worden op: <https://github.com/ILVO-PEILIMPACT/>.

Let op: er nog een aantal verbeterpunten (zie details in dit rapport). Gebruikers van de huidige versie moeten zich bewust zijn van de onzekerheden van de onderliggende datalagen en de oogstsimulaties.

2 Resultaten simulaties met het PEILIMPACT modelkader

2.1 Regionaal

Op regionaal niveau wordt de **opbrengstvariabiliteit sterk beïnvloed door de combinatie van regionale weersvariabiliteit, de heterogeniteit van de bodem en het grondwaterpeil**. Gemiddeld gezien hebben droogtes hebben een grotere invloed op de opbrengst van voedermaïs, aardappelen en suikerbieten in Vlaanderen dan natte omstandigheden. Gebieden met zandleem- en leembodems hebben doorgaans hogere opbrengsten dan kleigronden, aangezien deze gunstiger zijn voor wortelgroei dan andere bodems. **Ondiepe grondwaterpieken hebben een negatief effect op de opbrengst in natte jaren, maar in droge jaren kunnen gewassen ervan profiteren**. Net zoals de opbrengst afneemt bij diepere grondwaterstanden, neemt hij ook af bij te ondiepe grondwaterstanden. Diepere grondwaterstanden resulteren in hogere opbrengsten in natte jaren, aangezien meer neerslag de lage grondwaterbijdrage aan de wortelopname van het gewas compenseert. De omvang van dit effect hangt af van de bodemtextuur en het bewortelingspatroon van het gewas.

2.2 Plausibiliteitscontrole

De resultaten van de plausibiliteitscontrole van het model toonden aan dat **het huidige model de algemene meerjarige trends in de gemiddelde gewasopbrengst kan beschrijven**, ondanks vele beperkingen in de invoergegevens en modelvereenvoudigingen. **Absolute waarden worden soms onderschat, vooral bij suikerbieten**. Een verbeterde opbrengstdata-bank en/of gerichte veldexperimenten zijn nodig om het model te kalibreren en te valideren en nauwkeurigere resultaten te bekomen.

2.3 Case-study

In de case-study De Zegge-Mosselgoren zijn ondiepe grondwaterstanden gunstig voor de gewasproductie in droge jaren, maar veroorzaken ze zuurstofstress in natte jaren. De totale opbrengstvermindering door te droge of te natte omstandigheden en door indirecte effecten bedraagt voor gras en snijmaïs doorgaans minder dan 30%. In de huidige situatie zijn het veldbeheer en met name de beheersing van het grondwaterpeil in het gebied in droge jaren bijna optimaal voor landbouwactiviteiten, maar veroorzaken zij reeds beperkingen in natte jaren. In het algemeen is zuurstofstress de belangrijkste oorzaak van opbrengstvermindering in dit gebied. **Gedetailleerde conclusies over het effect van stijgende grondwaterstanden als gevolg van vernattingsstrategieën op de landbouw kunnen nog niet worden gegeven, aangezien er aan het eind van de looptijd van het project geen grondwaterscenario's**

beschikbaar waren.

3 Hoofdpunten literatuurstudie

3.1 Teeltfactoren

Tijdens periodes van droogte komt een ondiepe grondwatertafel de gewassen ten goede, doordat het bodemvocht in de wortelzone door capillaire opstijging wordt aangevuld. Bij een te hoge grondwaterstand treden er echter negatieve effecten op de gewasproductie op, omdat de meeste akkerbouwgewassen gevoelig zijn voor zuurstofstress. Natte omstandigheden kunnen ook leiden tot een makkelijkere verspreiding van ziekten en plagen. Er zijn ook gevolgen voor het beheer met machines, omdat natte bodems minder draagkracht hebben. De bodemtextuur is hier bepalend omdat de waterretentiekenmerken van de bodem de waterstroom door de wortelzone reguleren.

3.2 Mobiliteit van nutriënten

Een oppervlakkige grondwatertafel leidt tot onvoldoende zuurstof in de bodem, waardoor de fysische en elektrochemische eigenschappen ervan drastisch veranderen. In deze nieuwe omstandigheden zijn geadsorbeerde fosfor en organische koolstofverbindingen mobieler, en kunnen zij naar het oppervlaktewater migreren. Dit hangt af van de beschikbaarheid van fosfor in de bodem. De uitspoeling van oplosbare stikstof is doorgaans lager en gaat meestal verloren in de vorm van gas bij hoge grondwaterstanden, omdat er minder van beschikbaar is in de bodem.

3.3 Natte landbouw en paludicultuur

Paludicultuur wordt vaak voorgesteld als alternatief voor conventionele landbouw in gebieden waar vernatting nodig is. Deze teelten kunnen instaan voor de productie van biomassa voor verschillende industrietakken en daarnaast overgang vormen tussen cultuurland en natte natuur, mee instaan voor waterzuivering en zorgen voor waterbuffering.

Kennis van teeltpraktijken en aangepaste machines, robuuste verdienmodellen en stabiele markten zijn cruciaal om landbouwers aan te moedigen om over te schakelen op deze gewassen en hen een rendabele bedrijfsvoering te garanderen. In Vlaanderen is natte landbouw niet goed bekend en er zijn meer onderzoek/proefprojecten nodig om te bepalen welke gewassen meer geschikt zijn voor de Vlaamse omstandigheden en marktmogelijkheden vooraleer het een reële optie is voor landbouwers.

De relatief kleine percelen in Vlaanderen kunnen een beperkende factor zijn om paludicultuur op industrieel niveau rendabel te maken; verwerking en gebruik op lokale schaal kunnen in dat geval meer geschikt zijn.

4 Conclusies en aanbevelingen

Het grondwaterpeil heeft een belangrijk indirect effect op de gewasopbrengst en veroorzaakt zuurstofstress wanneer het te ondiep is. De "optimale" waterniveaus veranderen echter drastisch door de variabiliteit die wordt veroorzaakt door gewassen, bodem, grondwaterdynamiek en het weer. Met het in deze studie ontwikkelde modelkader kunnen deze drempels contextspecifiek worden beoordeeld. Er is echter ruimte voor verbetering. Verdere werkzaamheden door de onderzoeksgemeenschap aan dit kader zouden het model in staat stellen realistischere en robuustere resultaten te geven. Tot de verbeteringen behoren het actualiseren van gewas- en bodemparameters en het gebruik van de dynamiek van het grondwaterpeil wanneer relevante informatie beschikbaar komt, en het verzamelen van aanvullende opbrengstgegevens van landbouvvelden of gerichte veldexperimenten, voor de kalibratie en validatie van het model. In de studiecasse De Zegge moet het effect van specifieke toekomstige vernattingsscenario's in de natuurgebieden en aangrenzende landbouwgebieden op de landbouwactiviteiten worden beoordeeld zodra deze scenario's beschikbaar zijn.

Het vereiste modelkader is beschikbaar op Github:

https://github.com/ILVO-PEILIMPACT/model_users_growing_season.

–DEEL III–

Algemene inleiding

1 Context

Neerslag en temperatuur hebben een belangrijke impact op de land- en tuinbouw. De gecombineerde effecten van meer extreme gebeurtenissen, hogere temperaturen en hogere atmosferische CO₂ concentraties, hebben een grote invloed op de gewasopbrengst (Europees Milieuagentschap, 2019). Uit klimaatscenario's blijkt dat de omstandigheden in sommige regio's van Noord-Europa gunstiger zullen worden voor de landbouw, maar dat de gewasproductiviteit in Zuid-Europa tegen 2050 zal halveren, vooral voor gewassen zoals tarwe, maïs en suikerbieten als ze niet geïrrigeerd worden (De Ridder et al., 2020). De droge omstandigheden in Noord-Europa in 2018 veroorzaakten ernstige verminderingen van de gewasopbrengst (tot 50%), terwijl overvloedige regenval in Zuid-Europa tot 34% meer opbrengst opleverde dan het vorige vijfjarige gemiddelde (Toreti et al., 2019). Volgens Statbels' Land- En Tuinbouwbedrijven in België leidde de droogte in de lente/zomer van 2018 tot hoge opbrengstdalingen in belangrijke gewassen ten opzichte van het voorgaande jaar: -31 % in aardappelen, -34 % in korrelmaïs en -13 % in suikerbieten. Het natte jaar 2021 leidde dan weer tot opbrengstdalingen in wintertarwe (-12,5 %), spelt (-10,8 %) en triticale (-20,7 %). Aangezien de scenario's voor klimaatverandering wijzen op een toename van neerslag- en temperatuurextremen, is er dringend behoefte aan adaptatiestrategieën in landbouwpraktijken en aangepast waterbeheer op landschapsschaal (Toretti et al., 2019).

In het Europees landbouwbeleid 2021-2027 (Europees Milieuagentschap, 2019) worden verschillende aanpassingsmaatregelen voorgesteld op nationaal, regionaal en bedrijfsniveau om de gevolgen van de klimaatverandering op te vangen. Overstromings- en droogtebeheersingsmaatregelen staan niet op zichzelf en moeten dus worden geïntegreerd op landschapsschaal (Bressers et al., 2016). Verschillende daarvan leiden tot tijdelijke of permanente verhoging van het waterpeil, in en nabij land dat momenteel door de landbouw wordt gebruikt. De strategieën omvatten het herstel van natuurlijke overstromingsgebieden of het voorzien van waterretentiegebieden. Andere strategieën omvatten herstel en duurzaam beheer van voormalige veengebieden door het extensiveren of stopzetten van landbouwactiviteiten, het stopzetten turfwinning en drainage (De La Haye et al., 2021). Drainage van wetlands voor steden en landbouwactiviteiten hebben geleid tot een belangrijke toename van de voedselproductie, maar ook tot nieuwe milieuproblemen. Zo worden door oxidatie en inklinking van veengronden de drooggelegde veengebieden omgezet in grote kooldioxide-uitstoters en overstromingsgevoelige gebieden (Verhoeven & Setter, 2010). Sinds het decennium van 1970 werd beleid voor het behoud van wetlands opgenomen in de Ramsar Conventie van 1971 (Europese Commissie, 2007), en momenteel bestaan er grote herstelprogramma's voor wetlands in Nederland, het Verenigd Koninkrijk, Denemarken, Duitsland, België en andere Europese landen (Verhoeven, 2014). De programma's Care-Peat, Carbon Connects en Life Peat Restore zijn enkele Europese voorbeelden (De La Haye et al., 2021).

Het vernatten en herstellen van wetlands levert vele diensten zoals waterzuivering, drinkwatervoorziening, CO₂-opslag, en biodiversiteit (Verhoeven, 2014; Commissie, 2007). Voordelen voor de naburige landbouw zijn de stabiliteit van het grondwaterpeil en watervoorziening en het vasthouden van nutriënten, en het vergroten van de buffercapaciteit tegen overstromingen en droogte. Er kunnen ook nadelen voor de landbouw ontstaan en de gewasopbrengst verminderen door een teveel aan bodemvocht of wateroverlast (directe effecten), teeltproblemen veroorzaken en de ziektedruk beïnvloeden (indirecte effecten).

Het Vlaams regeerakkoord 2019-2024 focust op preventieve en adaptieve maatregelen en legt sterk de nadruk op het verhogen van onze weerbaarheid tegen droogte, inclusief het actief inzetten van een veerkrachtige ruimte met (extra) natuur om de effecten van de klimaatverandering te verzachten. Het Blue Deal-plan wil in Vlaanderen extra natte natuur creëren of gedraineerde wetlands herstellen/saneren om infiltratie en waterberging te bevorderen. Dit betekent dat landbouwers en beleidsmakers zich niet alleen moeten aanpassen aan een toename van droogte, maar waarschijnlijk ook aan de gevolgen van een teveel aan bodemwater. Er is echter weinig informatie beschikbaar om de impact van ondiepe grondwaterstanden op de landbouw als gevolg van de uitvoering van deze aanpassingsmaatregelen in te schatten.

1.1 Doelstellingen

Het hoofddoel van deze studie is het bepalen van de impact van de grondwaterstand op de opbrengst van conventionele gewassen in Vlaanderen.

Specifieke doelstellingen omvatten:

1. Een systematisch literatuuronderzoek verrichten naar de effecten van vernatting in de landbouw, naar de impact op de mobiliteit van nutriënten in de bodem, en naar nieuwe gewassen die aan natte omstandigheden zijn aangepast.
2. Een modelkader ontwikkelen aangepast aan de Vlaamse omstandigheden, om het effect van het grondwaterpeil op de meest voorkomende gewassen in Vlaanderen kwantitatief te evalueren.
3. Het modelkader toepassen in het gebied rond "De Zegge-Mosselgoren".
4. Een plausibiliteitscontrole van het model uitvoeren om na te gaan of het aanvaardbare resultaten oplevert in de Vlaamse context.
5. Het model vrij beschikbaar maken en documenteren.

1.2 Referenties

Commissie, E. (2007). Directoraat-generaal Milieu. Publicatiebureau.

De La Haye, A., Devereux, C., & Herk, S. (2021). Peatlands across Europe: Innovation and Inspiration | [Techreport]. Bax & Company.

De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmetz, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., & Wouters, H. (2020). Evaluatie van de socio-economische impact van klimaat-

verandering in België - Eindrapport (p. 253) [Techreport].

Europese Commissie. (2007). LIFE en de wetlands van Europa: herstel van een vitaal ecosysteem. Publicatiebureau.

Europees Milieuagentschap. (2019). Aanpassing aan klimaatverandering in de landbouwsector in Europa. Publicatiebureau.

Toreti, A., Belward, A., Perez-Dominguez, I., Naumann, G., Luterbacher, J., Cronie, O., Seguni, L., Manfron, G., Lopez-Lozano, R., Baruth, B., Berg, M., Dentener, F., Ceglar, A., Chatzopoulos, T., & Zampieri, M. (2019). The Exceptional 2018 European Water Seesaw Calls for Action on Adaptation. *Earth's Future*, 7(6), 652-663. 10.1029/2019EF001170

Verhoeven, J. T. A. (2014). Wetlands in Europa: Perspectieven voor herstel van een verloren paradijs. *Ecological Engineering*, 66, 6-9. 10.1016/j.ecoleng.2013.03.006

Verhoeven, J. T. A., & Setter, T. L. (2010). Agrarisch gebruik van wetlands: Kansen en beperkingen. *Annals of Botany*, 105(1), 155-163. 10.1093/aob/mcp172

2 Effect van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren

Hoofdpunten

Tijdens periodes van droogte komt een ondiepe grondwatertafel de gewassen ten goede, doordat het bodemvocht in de wortelzone door capillaire opstijging wordt aangevuld. Bij een te hoge grondwaterstand treden er echter negatieve effecten op de gewasproductie op, omdat de meeste akkerbouwgewassen gevoelig zijn voor zuurstofstress. Natte omstandigheden kunnen ook leiden tot een makkelijkere verspreiding van ziekten en plagen. Er zijn ook gevolgen voor het beheer met machines, omdat natte bodems minder draagkracht hebben. De bodemtextuur is hier bepalend omdat de waterretentiekenmerken van de bodem de waterstroom door de wortelzone reguleren.

Wereldwijd wordt in veel gebieden gekeken naar het vernatten van natuurgebieden, met gevolgen voor de omliggende landbouwgrond. Hoge grondwaterstanden leiden soms permanent of tijdelijk tot overtollig water in de wortelzone. Directe negatieve effecten van teveel bodemvocht zijn onder meer vermindering van de wortelrespiratie en beschadiging van de wortels door zuurstofstress, met als gevolg afname van de opbrengst. Sommige grassen verdragen verzadigde omstandigheden beter dan akkerbouwgewassen dankzij aerenchymvorming (wortelporositeit die zuurstoftransport mogelijk maakt) of door ondiep te wortelen. Wintertarwe kan fysiologische aanpassingen ontwikkelen tijdens tijdelijke waterverzadiging, terwijl aardappelen en maïs het gevoeligst zijn voor zowel te droge als te natte omstandigheden. Naar schatting gaat wereldwijd ongeveer 30 % van de opbrengst van akkerbouwgewassen verloren door een te natte ondergrond. Zelfs als de opbrengst niet significant afneemt, kan de kwaliteit van het oogstproduct sterk in het gedrang komen.

Een teveel aan bodemvocht heeft ook indirecte ongunstige gevolgen voor de landbouwprak-

tijken. De afname van de bewerkbaarheid en de berijdbaarheid van de bodem zijn de belangrijkste punten van bezorgdheid voor de Vlaamse landbouwers, aangezien beide essentieel zijn voor optimale plant-, ploeg- en oogstactiviteiten. Natte bodems zakken gemakkelijk in en de bodemstructuur is kwetsbaarder voor schade bij bewerking met machines of aanwezigheid van vee. Dit kan onomkeerbare gevolgen hebben voor de bodemkwaliteit. Een ander belangrijk probleem is vertraging bij het zaaien en oogsten. Lagere temperaturen in natte bodems leiden tot een vertraging van het kiemproces, en oogsten is niet mogelijk in bodems met een lage draagkracht. Oogstvertraging vermindert de kwaliteit van het gras als veevoeder, aangezien het eiwitgehalte daalt en het vezelgehalte toeneemt. Andere indirecte effecten treden op in de wortelzone, waar anaërobe omstandigheden het chemisch evenwicht van de bodemelementen wijzigen, en bodemmicro-organismen met de plantenwortels concurreren om de beschikbare zuurstof en de opname van bepaalde voedingsstoffen beperken. Onkruid en bacteriële en schimmelziekten kunnen een probleem vormen bij overvloedige regenval.

2.1 Inleiding

Het vernatten van natuurgebieden heeft gevolgen voor de omliggende landbouwgronden. Tijdens droogteperiodes profiteren gewassen van een ondiep grondwaterpeil (Zipper et al. , 2015). Grondwater functioneert als een buffer die bodemvocht aanvult via capillaire stijging, wat in sommige omstandigheden tot 50 % van de totale evapotranspiratie kan bedragen (Liu et al. , 2016; Wu et al. , 2015). Gewassen met diepe wortels hebben toegang tot water diep in de bodem. Dat kan droogtestress verlichten, hoewel dit de verminderde wateropname in de oppervlakkige bodem en de vaak hoge transpiratiebehoefte niet volledig compenseert (Rasmussen et al. , 2020). Ondiep grondwater kan droogtestress dus verlichten, maar waarschijnlijk niet volledig compenseren. Té natte omstandigheden verminderen de gewasopbrengst dan weer door een gebrek aan zuurstof in de wortelzone, waardoor de gewastranspiratie afneemt (Bartholomeus et al. , 2008). Een teveel aan bodemvocht belemmert ook de toegankelijkheid van het veld voor bewerkingen zoals ploegen, spuiten, oogsten en de ziektedruk kan ook toenemen (Bakel & Hoving, 2017). Het gebrek aan zuurstof in een (bijna) verzadigde bodem beïnvloedt tevens de nutriëntencycli en de bodembiologie, wat weer gevolgen kan hebben voor de beschikbaarheid en uitspoeling van nutriënten (Irmak & Rathje, 2008). Zuurstofstress veroorzaakt ernstigere schade in de gewasfysiologie dan droogtestress, en de finale opbrengst vermindert drastisch bij langdurige wateroverlast, en het herstel verloopt minder voorspoedig (Sojka et al. , 2005).

Note

"Te natte" omstandigheden in de wortelzone starten wanneer gewassen zuurstofstress gaan ondervinden, dat wil zeggen wanneer de beschikbaarheid van zuurstof lager is dan de zuurstofbehoefte van plantenwortels (Bartholomeus et al. , 2008; Broeke et al. , 2016). Kritische drempels voor zuurstof- (en water)stress zijn moeilijk vast te leggen, omdat er meerdere factoren samen een rol spelen. De drempelwaarde voor bodemporositeit waarbij zuurstofstress optreedt, is afhankelijk van bodemtype, bodemtemperatuur, gewassenmerken en ontwikkelingsstadium, en diepte onder het bodemoppervlak (Bartholomeus et al. , 2008). Wesseling et al. (1957) introduceerde een kritische waarde van 10 %, die nog steeds vaak gebruikt wordt. Wesseling (1957) presenteert enkele bandbreedtes voor de mi-

Tabel 1: Minimale gasgevulde porositeit in de wortelzone voor enkele gewassen (Wesseling, 1957)

| Gewas | Porositeit |
|--------------|-------------------|
| Gras | 0.06-0.10 |
| Tarwe/haver | 0.10-0.15 |
| Gerst | 0.15-0.20 |
| Suikerbiet | 0.15-0.20 |

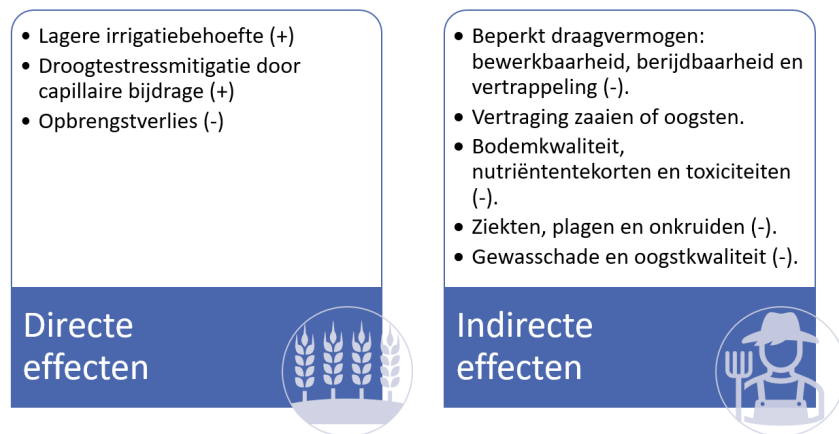
Tabel 2: Gasgevulde porositeit bij veldcapaciteit (pF 2,7) van verschillende grondsoorten (Wesseling, 1957)

| Bodemtextuur | Porositeit |
|---------------------|----------------------------|
| Sibleem | 0.13-0.15 / 0.10 |
| Clay | 0.12 - 0.15 / 0.18 / 0.115 |
| Leem | 0.11 |
| Zandige kleileem | 0.09-0.13 |

nimale luchtgevulde porositeit in de wortelzone voor een aantal gewassen (Table 1) en een benadering van de luchtgevulde porositeit bij veldcapaciteit (Table 2). Hieruit blijkt dat voor de meeste gewassen zuurstofstress optreedt bij een gasgevulde porositeit van meer dan 10%. Noteer dat bij deze waarden geen rekening is gehouden met bijvoorbeeld temperatuureffecten. Bartholomeus et al. (2008) stelden dat voor grasland 10 % te hoog is voor kleiachtige bodems en lage bodemtemperaturen, en in het algemeen een overschatting is van de minimale gasgevulde porositeit, aangezien Wesseling et al. (1957) deze hebben toegepast aan de onderkant van de wortelzone, waar deze kritische waarde hoger is dan in het bovenste deel. Voor andere gewassenmerken verschillende de kritische grenzen wellicht.

Wanneer het bodemvocht in de wortelzone voortdurend toeneemt, raken bodems verzadigd. In verzadigde bodems zijn alle poriën gevuld met water en bedraagt de opgeloste zuurstof in het water doorgaans ongeveer 5% (Moore et al. , 1998). In de aanwezigheid van microbiologische activiteit en een aanhoudend wateroverschot is de resterende zuurstof snel uitgeput, waardoor wateroverlast ontstaat. "Te natte" omstandigheden verwijzen daarom naar de toestand waarin zuurstofstress optreedt, tot meer extreme omstandigheden zoals waterverzadiging of overstroming.

Effecten van te natte omstandigheden in gewassen, kunnen worden ingedeeld in directe en indirecte effecten volgens de methodiek opgenomen in WaterVisie Landbouw (Bakel & Hoving, 2017; Broeke et al. , 2019; Broeke et al. , 2016). Directe effecten zijn gerelateerd aan verminderde gewasgroei door onvoldoende zuurstof voor de ademhaling van planten en treden op binnen het groeiseizoen. Indirecte effecten, eveneens opbrengstverlagend, treden binnen en buiten het groeiseizoen op en zijn gerelateerd aan andere aspecten zoals bewerkbaarheid, zaaivertraging, vermindering van de gewaskwaliteit en kwetsbaarheid voor plagen. Figuur 1 geeft een overzicht van deze effecten. Dit hoofdstuk beschrijft daarom de directe en indirecte effecten van te natte omstandigheden als gevolg van ondiepe grondwaterstanden op de gewasopbrengst en de landbouwpraktijken.



Figuur 1: Directe en indirecte effecten van hoge grondwaterstanden op landbouwproductie en beheer (Broeke et al. , 2019; Broeke et al. , 2016).

2.2 Directe gevolgen

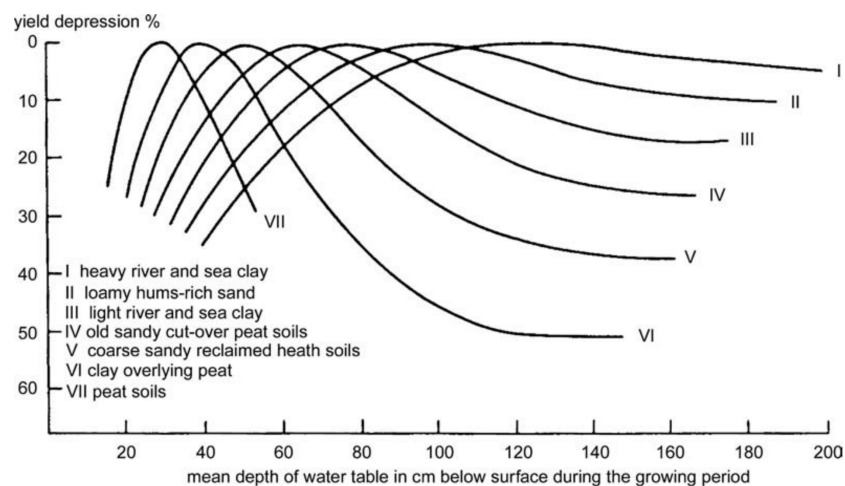
De beschikbaarheid van zuurstof in de wortelzone hangt af van de fysische eigenschappen van de bodem en de microbiële activiteit, die op haar beurt afhangt van de temperatuur, het water en de voedingsstoffen. De vraag naar zuurstof varieert volgens de fysiologie van de plant, namelijk het gewastype, het ontwikkelingsstadium en de wortelverdeling (Gliński & Stepniewski, 1985). Onder geschikte omstandigheden halen plantenwortels voldoende zuurstof voor hun ademhaling rechtstreeks uit de met lucht gevulde poriën in de bodem. Wanneer de bodem echter natter wordt, wordt de lucht in de bodemporiën in toenemende mate vervangen door water en vermindert de energievoorziening voor het metabolisme van de plant. Zuurstoftekort in de bodem beïnvloedt de plantengroei door de wortelademhaling te beperken (Bartholomeus et al. , 2008). De wortelontwikkeling kan in dergelijke omstandigheden worden beperkt of eerder stoppen, waardoor het transport van water en voedingsstoffen naar de bovenste plantenorganen wordt beperkt, wat leidt tot een afname van de biomassa en dus een lagere opbrengst (Kahlown et al. , 2005; Irmak & Rathje, 2008). De reactie van de scheuten omvat vermindering van het chlorofylgehalte van de bladeren en sluiting van de huidmondjes, waardoor de transpiratie en het transport van CO₂ worden beperkt (Manik et al. , 2019; Sojka et al. , 2005).

2.2.1 Verband tussen grondwater en opbrengst

Opbrengstvermindering bij ondiepe grondwaterstanden is te wijten aan zuurstofgebrek in de wortelzone, terwijl bij lagere grondwaterstanden de opbrengstvermindering wordt veroorzaakt door watergebrek. De wisselwerking tussen grondwater en gewasopbrengst wordt voornamelijk bepaald door de bodemtextuur en de weersomstandigheden (Feddes, 1971). De waterretentiekenmerken van de bodem regelen de infiltratie door de wortelzone en de capillaire opstijging (Zipper et al. , 2015), terwijl jaarlijkse variaties in de weersomstandigheden de relatie tussen grondwater en opbrengst veranderen (Feddes, 1971). In verschillende experimenten die vanaf het midden van de twintigste eeuw in Nederland zijn uitgevoerd, is getracht de invloed van de grondwaterstand op de gewasopbrengst te onderzoeken voor verschillende

bodemtexturen en gewassen.

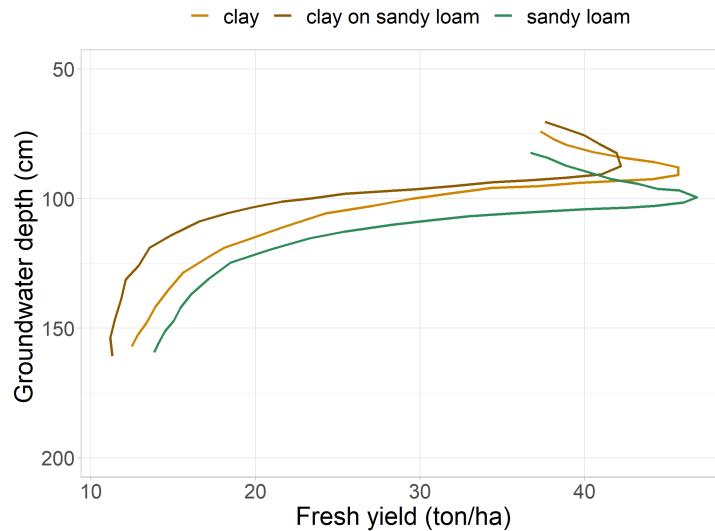
Visser (1959) ontwikkelde opbrengstafnamecurven als functie van de gemiddelde grondwaterstand voor de belangrijkste grondsoorten in Nederland (figuur 2). De afname van de opbrengst bij een bepaalde grondwaterstand hangt sterk samen met het watervasthoudend vermogen van de bodem. Bij ondiepe grondwaterstanden vertonen bodems met een goed watervasthoudend vermogen (bv. kleigronden) een grotere opbrengstvermindering omdat er meer zuurstofstress optreedt, terwijl bij diepe grondwaterstanden de droogtestress kleiner is door de capillaire bijdrage. Het omgekeerde doet zich voor bij grovere bodemtexturen zoals zandgronden. Veengronden zijn uitzonderlijk vanwege hun hoge organische stofgehalte, hun fysische en hydraulische eigenschappen worden aanzienlijk gewijzigd door bodemafbraak bij drainage (Liu & Lennartz, 2018). In figuur 2 vertonen ze een drastische opbrengstafname bij kleine veranderingen in de grondwaterstand. De vorm van de curven kan echter aanzienlijk variëren met het type gewas en discontinuïteiten in het bodemprofiel.



Figuur 2: Opbrengstdaling als functie van de gemiddelde diepte van de grondwaterspiegel tijdens het groeiseizoen voor verschillende bodemtypes (naar Visser (1958))

Feddes (1971) formuleerde opbrengstcurven in functie van de grondwaterstandsdiepte, voor vijf overschrijdingskansen in klei, zandleem en klei op zandleem, voor rodekool, aardappel en sla. Figuur 3 geeft een aangepaste versie van het verband tussen opbrengst en grondwaterdiepte voor aardappelen bij een overschrijdingskans van 90 % (elk jaar). De optimale grondwaterstand, d.w.z. de diepte die de maximale opbrengst mogelijk maakt, is ongeveer 90 cm voor klei en klei op zandige leem, en 100 cm voor zandige leem. Bij deze grondwaterstanden kan jaarlijks een verse opbrengst van ongeveer 45 ton ha⁻¹ of meer worden gehaald. Een lager waterpeil zou leiden tot zuurstofstress en dus tot een lagere opbrengst. Deze curven verschillen sterk van die in figuur 2, vooral in het droge gedeelte van de curve, omdat geen rekening is gehouden met neerslag, zodat het bodemwater alleen door capillaire opstijging wordt geleverd.

Ook Valk & Schoneveld (1963) evalueerden de invloed van grondwater op vijf gewassen, waaronder bloemkool, uien, gladiolen, kool en bieten, geteeld op drie grondsoorten, namelijk zware klei op kleverige klei en op lichte fijne zandige klei, en lichte fijne zandige klei. Op de kleiachtige bovengrond brachten grondwaterstanden boven 60 cm de gewasopbrengst voor de



Figuur 3: Afhankelijkheid van de verse aardappelopbrengst van de grondwaterstand gedurende het groeiseizoen, voor klei, zandleem en klei op zandleem, bij 90 % kans op overschrijding van de opbrengst. Overgenomen van Feddes (1971).

meeste gewassen in gevaar, behalve voor gladiolen. In de lichte fijne zandige klei zorgden grondwaterstanden hoger dan 120 cm al voor een daling van de opbrengst.

Tijdens natte groeiseizoenen zijn gebieden met een ondiepe grondwaterstand gevoeliger voor gevolgen voor de gewasopbrengst dan gebieden met een lagere grondwaterstand, vooral in fijnkorrelige bodems. Feddes (1971) maakt een overzicht van de resultaten van eerdere experimenten, waaruit blijkt dat de optimale grondwaterstand in kleiachtige bodems en tuinbouwgewassen in droge jaren varieert van 60 tot 80 cm, terwijl het optimum in natte jaren ongeveer 100 cm bedraagt. Voor zandleembodems varieert de optimale waarde tussen 100 cm en 120 cm. Daarentegen vonden Zipper et al. (2015) dat ondiepe watertafels minder vaak opbrengstverlies veroorzaakten door zuurstofstress in maïs dan wat een diepere watertafel zou kunnen veroorzaken door waterstress, vooral in grofkorrelige bodems. Dit kwam vooral doordat overvloedige regenval in het natte jaar zeer vroeg in de vegetatieve periode plaatsvond, waardoor de meeste planten zich konden herstellen. In het algemeen is er een wisselwerking tussen droogtebestendigheid en zuurstofarmheid, vooral in fijnkorrelige bodems.

Door het grondwater op een optimaal niveau te houden en daarmee de beschikbaarheid van zuurstof in de wortelzone, kunnen hoge en stabiele opbrengsten worden bereikt. Het grondwaterpeil heeft slechts een indirect effect op de groei van het gewas; het bodemvocht en dus de zuurstofvoorziening in de wortelzone hebben een directe invloed op de opbrengst. Statische (bodemtextuur) en dynamische factoren (grondwaterstand en weer), en het soort gewas en het fenologische stadium waarin het zich bevindt, moeten tegelijkertijd in aanmerking worden genomen bij de besluitvorming. Daarom zijn de beheersbeslissingen volledig gewas- en veldlocatiespecifiek (Zipper et al. , 2015; Bartholomeus et al. , 2008).

2.2.2 Effect op verschillende soorten gewassen

Verscheidende studies bij granen, waaronder maïs en tarwe, hebben aangetoond dat de piek van de opbrengst wordt verkregen bij een waterdiepte van gemiddeld 1,5 m (Cavazza & Pisa, 1988; Kahlown et al. , 2005). Deze waarde kan echter niet algemeen worden toegepast op alle klimaatomstandigheden, aangezien het "optimale" grondwaterpeil varieert naar gelang van de weersomstandigheden (Feddes, 1971). De opbrengst van maïs kan sterk worden beïnvloed door de diepte van het grondwaterpeil omdat het gevoeliger is voor waterverzadiging, terwijl zonnebloemen en tarwe grotere schommelingen in het waterpeil kunnen verdragen zonder grote variaties in de opbrengst. Hoewel sommige gewassen zoals rijst overlevingsstrategieën kunnen ontwikkelen zoals oppervlakkige beworteling of de ontwikkeling van wortelporositeit (d.w.z. aerenchyma) (Armstrong et al. , 1991), zijn de meeste conventionele akkerbouwgewassen gevoelig voor zeer natte omstandigheden en kan de opbrengst sterk verminderen, zelfs in zeer korte bevochtigingsperiodes. Tian et al. (2021) schatten dat wateroverlast in het algemeen een opbrengstverlies van ongeveer 30 % kan veroorzaken door vermindering van het graangewicht, de biomassa en de bladoppervlakte-index. De opbrengstvermindering varieerde echter tussen de gewassen, de duur van de wateroverlast en het ontwikkelingsstadium. In deze meta-analyse daalde de tarweopbrengst gemiddeld met 25 % vergeleken met 60 % bij katoen als gevolg van de hogere gevoeligheid voor zuurstofstress, en in het algemeen was het voortplantingsstadium gevoeliger dan het vegetatieve stadium.

Aardappelen en maïs zijn zeer gevoelig voor weersomstandigheden. In de VS werd geschat dat de maïsoopbrengst tot 34 % kan dalen bij overvloedige regenval, wat verergert bij slecht gedraineerde bodems (Li et al. , 2019). Daarnaast verergeren de negatieve effecten van de beperkte beschikbaarheid van zuurstof als gevolg van wateroverlast tijdens de zomermaanden, omdat hogere temperaturen leiden tot hogere ademhalingsnelheden en daarmee een hogere zuurstofbehoefte.

Table 3 toont de gemiddelde verse opbrengst van belangrijke akkerbouwgewassen in België in 2020 (STATBEL, 2022). Volgens de analyse van het grondgebruik in Vlaanderen (zie GIS-analyse voor de identificatie van kerngewassen) zijn grasland en maïs de dominante gewassen op slecht gedraineerde bodems, die respectievelijk ongeveer 50 % en 23 % van de landbouwgrond uitmaken. Andere gewassen zoals aardappelen, wintertarwe en suikerbieten komen ook in zeer kleine percentages voor. De Belgische landbouw is sterk gericht op vlees- en zuivelproductie. In 2017 waren er 35900 landbouwbedrijven in België, waarvan ongeveer 75 % permanent grasland had en 50 % voedergewassen voor vee verbouwde (Dasselaar et al. , 2019). Hieronder volgt een meer gedetailleerde beschrijving van de effecten van te natte omstandigheden op de opbrengst in deze vijf gewassen.

2.2.2.1 Grasland Er zijn twee soorten grasland voor landbouw in Vlaanderen: blijvend en tijdelijk. Louter teelttechnisch betekent de term 'blijvend grasland' dat een perceel meerdere jaren na elkaar onder grasland blijft. De benaming blijvend en tijdelijk grasland wordt echter ook gebruikt in de verzamelaanvraag in het kader van het gemeenschappelijk landbouwbeleid (GLB). Meer informatie hierover kan je vinden op de website van het Dpt L&V. Blijvend grasland is de tegenpool van tijdelijk grasland dat één tot een paar jaar in productie werd gehouden

Tabel 3: Gemiddelde opbrengst van de belangrijkste gewassen in België in 2020 (STATBEL, 2022)

| Gewassen | Gemiddelde opbrengst (ton ha ⁻¹) |
|--------------------|--|
| vroege aardappelen | 38.3 |
| bewaaraardappelen | 43.7 |
| korrelmaïs | 10.8 |
| voedermaïs | 42.2 |
| wintertarwe | 8.7 |
| suikerbieten | 84.1 |

Tabel 4: Permanente en tijdelijke grassoorten aangeplant in België volgens ILVO (2022).

| Blijvend grasland | Droge stof opbrengst (ton ha ⁻¹ jr ⁻¹) |
|--|---|
| Engels raaigras (<i>Lolium perenne</i>) | 10-15 |
| Timothee (<i>Phleum pratense</i>) | 11-16 |
| Beemdlangbloem (<i>Festuca pratensis</i>) | 10-15 |
| Rietzwenkgras (<i>Festuca arundinacea</i>) | 13-17 |
| Tijdelijk grasland | |
| Festulolium (<i>Lolium</i> + <i>Festuca</i>) | - |
| Hybride raaigras (<i>Lolium x boucheanum</i> Kunth) | 10-16 |
| Italiaans raaigras (<i>Lolium multiflorum</i>) | 12-17 |
| Westerwolds raaigras (<i>Lolium multiflorum</i> westerwoldicum) | 2 (slechts één snede per jaar) |

alvorens de grasmaten te vernietigen en al dan niet opnieuw in te zaaien met gras of een andere teelt. Bij tijdelijk grasland vormt Italiaans raaigras (*Lolium multiflorum*) de belangrijkste soort. Permanente en tijdelijke graslanden zijn typisch een mengsel van verschillende grassoorten, voornamelijk overblijvend raaigras (*Lolium perenne*), en soms peulvruchtensoorten zoals rode en witte klaver (*Trifolium pratense*, *trifolium repens*) (Dasselaar et al., 2019).

In Vlaanderen vormen tijdelijk grasland en voedermaïs de belangrijkste voederproductie, terwijl in Wallonië blijvend grasland het meest dominant is. De gemiddelde jaarlijkse droge stof opbrengst van permanente graslanden schommelt tussen 8-12 ton ha⁻¹ jr⁻¹ terwijl voor tijdelijke graslanden de opbrengst varieert tussen 12-16 ton ha⁻¹ jr⁻¹ (Dasselaar et al., 2019).

De Belgische rassenlijst bevat vier soorten die voorkomen als blijvend grasland en vier die eerder gebruikt worden voor tijdelijk grasland, aangepast aan de Belgische omstandigheden en meer geschikt om te maaien ILVO (2022). Gematigde meerjarige grassen verdragen verzadigde omstandigheden beter dan akkerbouwgewassen, hoewel ze goed gedraineerde bodems nodig hebben voor een duurzame productiviteit (Moore et al., 1998). Meerjarig raaigras is de meest dominante soort in Vlaanderen. Timothee en beemdlangbloem zijn minder belangrijk en worden meestal toegevoegd aan grasmengsels. Rietzwenkgras en Italiaans raaigras zijn de meest productieve grassen (tot 17 ton ha⁻¹ jr⁻¹), ook is Rietzwenkgras zeer tolerant voor droge en natte omstandigheden en minder gevoelig voor ziekten, terwijl Timothee goed gedraineerde omstandigheden vereist ILVO (2022).

Di Bella et al. (2022) toonden aan dat bij sommige grassoorten zoals Koronivagrass (*Urochloa humidicola*), Dallisgras (*Paspalum dilatatum*), Rietzwenkgras (*Festuca arundinacea*) en Engels

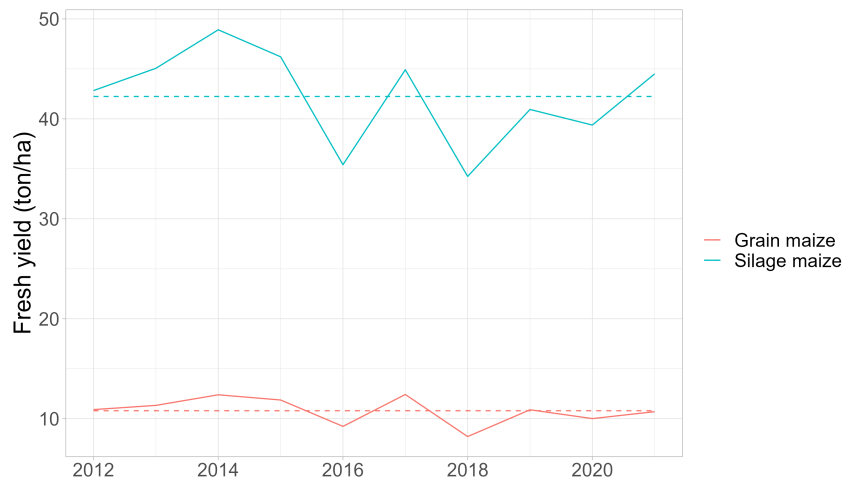
raaigras (*Lolium perenne*) de afname van de wortel- en scheutbiomassa gering was onder omstandigheden van 18 tot 21 dagen wateroverlast. Dankzij de toename van de wortelporositeit of het aerenchym (tot 40 %) was de afname van de biomassa soms verwaarloosbaar. Ploschuk et al. (2017) evalueerden ook het herstelvermogen van voedergrassen. Kogelgras en Rietzwenkgras herwonnen volledig de normale scheut- en wortelgroei na 15 dagen wateroverlast, terwijl andere grassoorten een progressieve daling in stomatale geleiding en netto fotosynthese hadden tijdens de stressperiode, met minimale wortel- en scheutgroei.

2.2.2.2 Maïs In België is kuilmaïs na gras het belangrijkste voeder voor vee. Het kuilmaïsareaal nam toe van 20000 ha in 1970 tot ongeveer 183159 ha in 2021, terwijl het graanmaïsareaal in 2021 48180 ha bereikte (ILVO, 2022; STATBEL, 2022). De landbouwopbrengsten kunnen oplopen tot 14 ton ha⁻¹ graan onder niet-limitatieve omstandigheden (volledige irrigatie en nutriënten), maar kunnen veel lager liggen (1-2 ton ha⁻¹) in minder ontwikkelde landen (Steduto et al. , 2012). In België is de gemiddelde graanopbrengst, gebaseerd op 15 rassen die in 2022 in de Belgische rassenlijst zijn opgenomen, 13 ton ha⁻¹, terwijl de kuilopbrengst 21,4 ton ha⁻¹ bedraagt (gebaseerd op bijna 40 rassen) (ILVO, 2022).

Maïs wordt beschouwd als het meest gevoelige gewas voor waterstress ten opzichte van tarwe of sorghum (Steduto et al. , 2012), vanwege verschillen in hun groeiseizoen (zo komt droogte vaker voor tijdens de bloeiperiode van maïs (zomer) dan van tarwe (winter)). De meest gevoelige periode voor natte omstandigheden en wateroverlast bij maïs is de kiemfase (Guoping et al. , 1988). Ren et al. (2014) rapporteerden dat de graanopbrengst onder 6 dagen wateroverlast tijdens deze fase met meer dan 30 % afnam. In overstromde omstandigheden kan de afname groter zijn, tot 50 % opbrengstverlies onder 2 dagen overstrooming (Guoping et al. , 1988). Hoewel de weerstand van het gewas tegen wateroverlast tijdens de andere ontwikkelingsstadia toeneemt, versterkt de duur van de wateroverlast de nadelige effecten ervan, waardoor de opbrengst onder 9 dagen wateroverlast tot 80 % kan dalen (Tian et al. , 2021).

Regenval kan een positieve of negatieve invloed hebben op de gewasopbrengst, afhankelijk van de temperatuur, de intensiteit, de omstandigheden van de bodemdrainage, het grondwaterniveau en het ontwikkelingsstadium van het gewas. Overmatige regenval die leidt tot langdurige hoge bodemvochtigheid in de wortelzone kan leiden tot verschillende negatieve effecten op de plantenmorfologie, de wortelactiviteit en de ademhaling, de hoeveelheid graan per kolf en de uiteindelijke kuil- of graanopbrengst (Li et al. , 2019). Het jaar 2018 was ongewoon droog, terwijl de zomer van 2021 de natste ooit in België was. 2016 kende uitzonderlijk zware regens in mei en juni, gevolgd door droge maanden in juli en augustus. De impact op de opbrengst in deze jaren is te zien in onderstaande figuur. In 2016 lag de opbrengst van snijmaïs aanzienlijk lager dan het gemiddelde voor de periode 2012-2021, terwijl de opbrengst in 2021 met 5,4 % steeg, terwijl de maïsopbrengst in beide jaren dicht bij het gemiddelde bleef. Op basis van het agrometeorologisch bulletin was de opbrengstverlaging in 2016 vooral te wijten aan verstikking van het wortelstelsel en verzuring van de bodem tijdens de regenmaanden aan het begin van het seizoen, waardoor het gewas in de volgende maanden kwetsbaarder werd voor droogte. De schijnbare algemene opbrengststijging in 2021 kan gedeeltelijk worden verklaard door het feit dat de extreme regenval vooral in het zuidoosten van België plaatsvond, terwijl het noorden normale weersomstandigheden kende. In

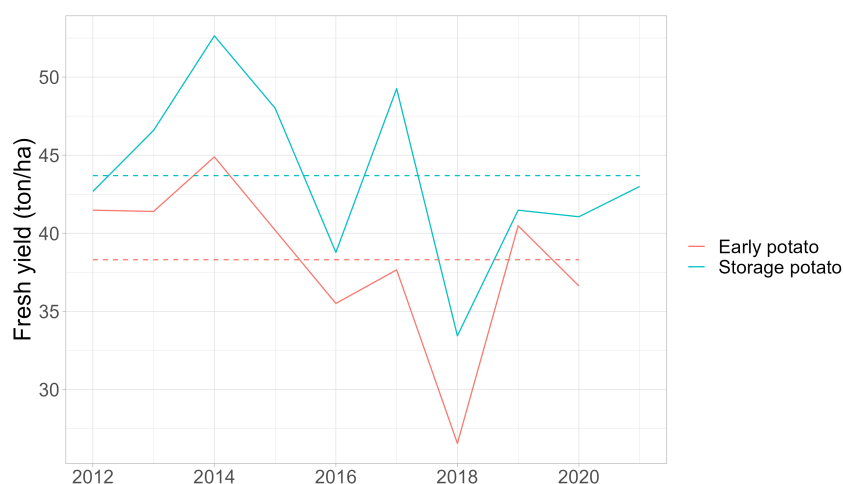
de regio's met overvloedige regenval en vooral op slecht gedraineerde gronden was de maïs geel en klein. Sommige plaatsen vertoonden ook schimmelziekten en logies.



Figuur 4: Verse opbrengstvariatie voor korrelmaïs en snijmaïs van 2012 tot 2021 volgens STATBEL. De gemiddelde opbrengst voor die periode is weergegeven in stippellijnen.

2.2.2.3 Aardappel De opbrengst aan verse knollen van geïrrigeerde velden varieert van 40 tot 50 ton ha⁻¹, maar kan lager zijn in vochtige gebieden vanwege een hoger risico op ziekten (Steduto et al. , 2012). In België beslaan aardappelen slechts 5 % van de totale landbouwgrond, maar het is een belangrijk gewas van het land, met een gemiddelde opbrengst van ongeveer 43 ton ha⁻¹ (STATBEL, 2022). Daarom zijn er veel inspanningen geleverd om de aardappelproductie in het land te verhogen. Een voorbeeld is WatchITgrow, wat een geo-informatieplatform is dat helpt bij het bepalen en verbeteren van aardappelopbrengsten op een duurzame manier (Swayer et al. , 2019).

Aardappelen zijn even gevoelig voor te natte of te droge omstandigheden vanwege hun ondiepe wortelsysteem, en kunnen niet meer dan 24 uur ondergelopen omstandigheden verdragen (Swayer et al. , 2019) omdat de knollen in direct contact staan met de grond en vatbaarder zijn voor rotting. Droogte en hittestress tijdens de knolvorming waren de dominante factoren in 79 % van de laagproductieve jaren binnen de periode 1947 - 2012 in België (Gobin, 2018). Niettemin speelden wateroverlastomstandigheden een belangrijke rol in 49 % van de laagproductieve jaren. De natte zomer in 2021 had in België geen grote invloed op het groeiseizoen van aardappel, wat blijkt uit een opbrengst die volgens STATBEL (2022) iets in de buurt komt van het gemiddelde van 2012-2021. Het Agrometeorologisch Bulletin en Deronde (2021) meldden echter dat de kwaliteit lager was als gevolg van ernstige ziektestress door meeldauw, de onmogelijkheid om fytosanitaire behandelingen toe te passen vanwege de geringe handelbaarheid, en groeischeuren in de knollen in aanwezigheid van een hoge stikstofconcentratie. In 2016 belemmerden de aanhoudende natte omstandigheden in het voorjaar de goede wortelontwikkeling van het gewas met een verhoogd risico op waterstress tijdens de volgende droge maanden. Deze radicale verschillen in weersomstandigheden veroorzaakten oogstproblemen in aanwezigheid van harde stengels. Vochtige omstandigheden veroorzaakten ook een vroege bloei en rotting in tijdelijk overstroomde gebieden.



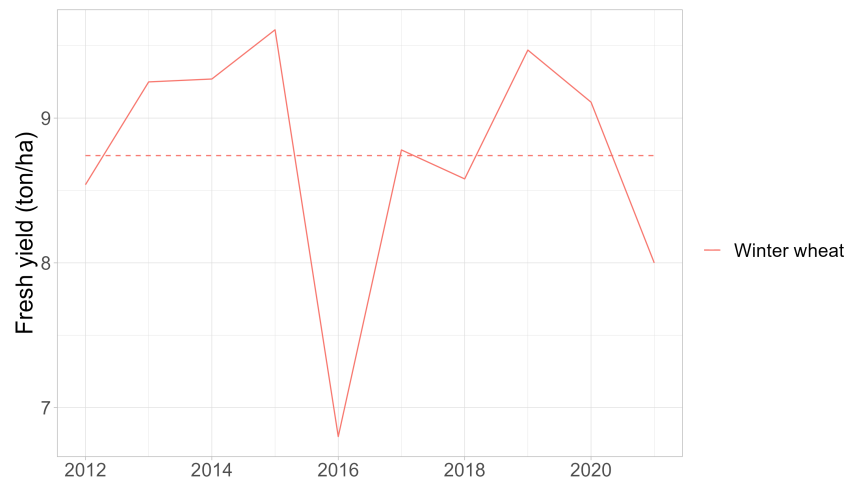
Figuur 5: Variatie in de verse aardappelopbrengst van 2012 tot 2021 volgens STATBEL. De gemiddelde opbrengst voor die periode is weergegeven in stippellijnen.

2.2.2.4 Wintertarwe De graanopbrengst in een regenachtig gematigd klimaat kan variëren van 4 tot 10 ton ha⁻¹, en kan oplopen tot 15 ton ha⁻¹ in koele omgevingen met een hoge zonnestraling (Steduto et al. , 2012). In België bedraagt de gemiddelde opbrengst ongeveer 9 ton ha⁻¹ (STATBEL, 2022). Volgens de weerrisicoanalyse van Gobin (2018) van de periode 1947 tot 2012 in België traden perioden van wateroverlast vooral op in het voorjaar, wat samen met lage temperaturen tijdens het groeiseizoen zorgde voor lage opbrengsten in deze jaren. Op basis van Gobin (2010) wordt verwacht dat het opbrengstverlies als gevolg van wateroverlast ongeveer 5 % zal bedragen.

Wateroverlast tijdens de vegetatieve periode kan bij wintertarwe een aanzienlijke opbrengstvermindering veroorzaken. Zuurstofstress gedurende slechts drie dagen kan de wortels al beschadigen, wat leidt tot verplaatsing van de stengels (lodging) en vermindering van de capaciteit voor de opname van voedingsstoffen, waardoor het aantal kiemplanten afneemt (Steduto et al. , 2012). Vergeleken met andere wintergranen heeft wintertarwe het vermogen om fysiologische aanpassingen te ontwikkelen tijdens voorbijgaande wateroverlast. Ploschuk et al. (2018) rapporteerden dat wintertarwe tijdens 14 dagen waterlogging adventieve wortels met 20 % aerenchym produceerde, zonder de fotosynthetische activiteit te verminderen. De duur en het tijdstip waarop wateroverlast optreedt, beïnvloeden echter het herstelvermogen van de plant. Wintertarwe bleek zich volgens San Celedonio et al. (2017) bijna volledig te herstellen onder een waterverzadiging van maximaal 20 dagen in het vroege stadium (vóór de bloei), terwijl het opbrengstverlies varieerde van 34 % tot 92 % als het plaatsvond in het bloeistadium (Romina et al., 2014). Bij langdurige wateroverlast kunnen de wortels ernstig beschadigd raken en kan het gewas zich niet herstellen, zelfs niet als de wateromstandigheden verbeteren (Steduto et al. , 2012).

In tegenstelling tot lentegewassen zoals maïs en aardappelen is de opbrengst van wintertarwe in België in de natte zomer van 2021 met 8,5 % gedaald ten opzichte van het gemiddelde, en in 2016 met 22 % (STATBEL, 2022). Volgens de rapporten in het Agrometeorologisch Bulletin was de opbrengstdaling in 2021 vooral te wijten aan het logeren als gevolg van de sterke wind tijdens de extreme regenval, de vertraging bij het oogsten en het ontkiemen van de korrels.

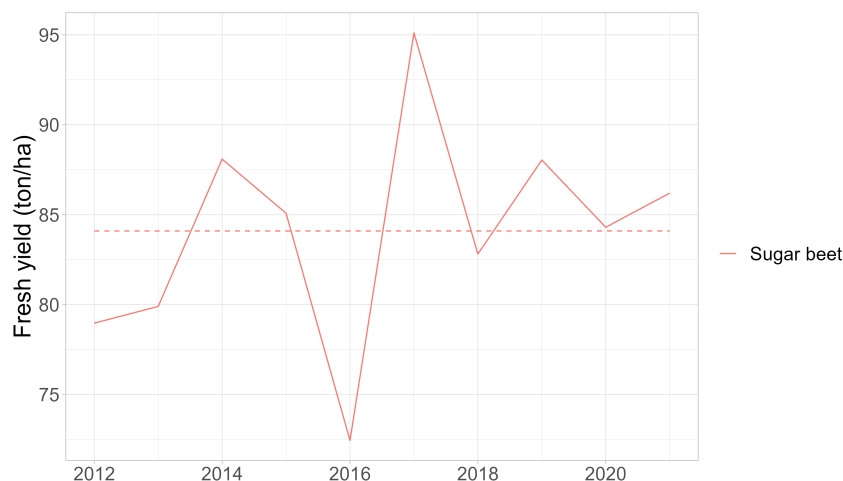
Hetzelfde gebeurde in 2016, toen vertragingen bij de oogst als gevolg van natte omstandigheden leidden tot plaggen.



Figuur 6: Variatie in de verse opbrengst van wintertarwe van 2012 tot 2021 volgens STATBEL. De gemiddelde opbrengst voor die periode is weergegeven in de stippellijn.

2.2.2.5 Suikerbiet De verse opbrengst varieert gewoonlijk van 40 tot 60 ton ha⁻¹, maar kan oplopen tot 100 ton ha⁻¹ onder optimale water- en voedingsomstandigheden (Steduto et al. , 2012). In België bedraagt de gemiddelde opbrengst ongeveer 85 ton ha⁻¹ (STATBEL, 2022). Suikerbieten zijn zeer gevoelig voor watertekort in de eerste groeistadia. Zijn grootste waterbehoefte doet zich voor aan het einde van de vegetatieperiode, wanneer de maximale bedekking van het bladerdek is bereikt. Vroege overbewatering kan de bladontwikkeling remmen en voortijdige bloei en vroege zaadproductie bevorderen. Een teveel aan water (bv. overbewatering) in de buurt van de oogst verhoogt de opbrengst aan verse wortels, maar de suikerconcentratie in de wortels kan afnemen (Steduto et al. , 2012).

In België verklaarden periodes van herhaalde wateroverlast 86 % van de lage suikerbietenopbrengsten in de periode 1947-2012 (Gobin, 2018). De verwachte opbrengstverliezen werden daarentegen geschat op ongeveer 12 % tot 27 % als gevolg van droogte (Gobin, 2010). Suikerbieten zijn een van de weinige gewassen die zich door hun diepe wortels gedeeltelijk kunnen herstellen van droogte en hitte. Dit is bijvoorbeeld te zien in het droge jaar 2018, waar de opbrengst vergelijkbaar was met het gemiddelde in tegenstelling tot andere voorjaarsgewassen (STATBEL, 2022). In de natte zomer van 2021 presteerden suikerbieten ook veel beter dan andere gewassen, het Agrometeorologisch Bulletin meldde dat ondanks enkele ziekten zoals *Pseudomonas*, de bladontwikkeling zeer overvloedig was en tot de hoogste van het laatste decennium behoorde. De zware regens en het gebrek aan zuurstof in de bodem leidden tot een bleekheid van het loof, maar die herstelde zich geleidelijk aan aan het einde van de zomer. De drastische weersveranderingen in 2016 leken echter meer invloed te hebben op het groeiseizoen van de suikerbiet, waarschijnlijk door de ziektedruk in de natte maanden en de daaropvolgende grotere kwetsbaarheid voor droogte.



Figuur 7: Variatie van de verse opbrengst van suikerbieten van 2012 tot 2021 volgens STATBEL. De gemiddelde opbrengst voor die periode is weergegeven in de stippellijn

2.3 Indirecte effecten

Indirecte gewasschade als gevolg van te natte omstandigheden houdt verband met verminderde verhandelbaarheid en bewerkbaarheid, bodemaantasting, vertraging bij het zaaien en vertraagde gewasgroei, ongedierte en onkruid. Deze factoren leiden uiteindelijk tot een vermindering van de gewasopbrengst. In België werd 79 % van de lage opbrengsten bij maïs in de periode 1947-2012 veroorzaakt door te laat planten en vertraagde gewasontwikkeling als gevolg van een koud en nat voorjaar, terwijl wateroverlast tijdens de oogst 29 % van de lage opbrengsten verklaarde. In het geval van aardappelen werd 43 % van de lage opbrengsten veroorzaakt door wateroverlast, die leidde tot vertragingen bij het planten, knolschade of moeilijke oogstwerkzaamheden (Gobin, 2018).

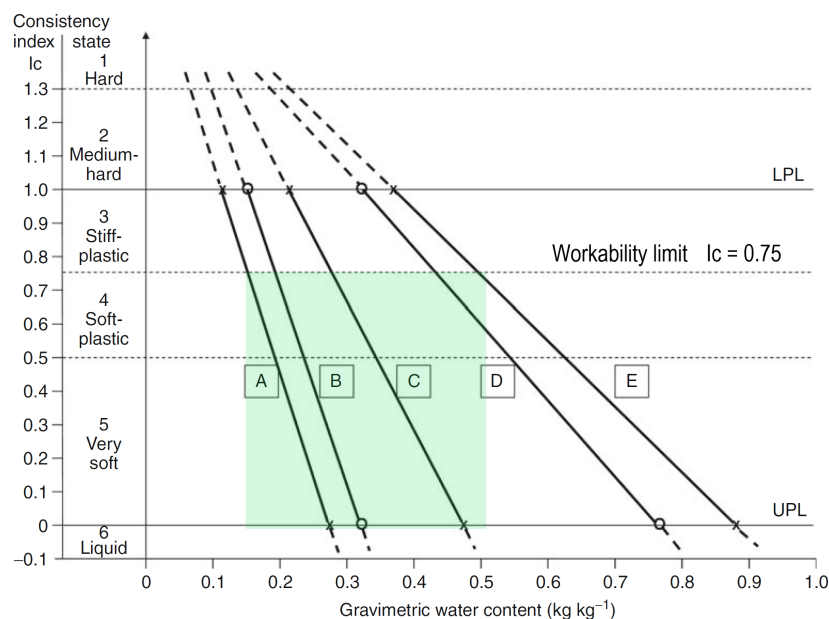
2.3.1 Beperkte draagkracht: begaanbaarheid, bewerkbaarheid en vertrapping

Verplaatsbaarheid en bewerkbaarheid hebben betrekking op het vermogen van de bodem om landbouwactiviteiten waarbij machines betrokken zijn, te ondersteunen zonder structurele schade te veroorzaken (Müller et al. , 2011). Beide eigenschappen zijn essentieel voor optimale plant-, ploeg- en oogstactiviteiten, en worden grotendeels beperkt door de vochtigheid van de bodem. Waterarme bodems kunnen gemakkelijk instorten door vertrapping door verspreiding van kleideeltjes, vooral wanneer de concentratie natrium hoog is. De bodemstructuur kan gemakkelijk worden beschadigd door de aanwezigheid van machines of vee (McDonald, 2021). In graslanden kunnen koeien de bodemstructuur beschadigen en de bodemverdichting vergroten (vertrappingsverlies), wat leidt tot een verminderde infiltratiecapaciteit of capillaire stijging, minder beschikbare zuurstof en wortelgroei beperkingen (Bakel & Hoving, 2017). De omvang van de schade is afhankelijk van de draagkracht van de bodem en kan worden beperkt door gebruik te maken van gecontroleerde verkeerslandbouwsystemen.

Kennis van het type gewas kan helpen om de vereiste bewerkbaarheid en berijdbaarheid te bepalen, aangezien dit het gewicht bepaalt van de machines die worden gebruikt voor het

planten/zaaien en oogsten. In Nederland worden doorgaans zwaardere machines gebruikt voor het planten van maïs en aardappelen, terwijl lichtere machines worden ingezet voor wintertarwe of suikerbieten (Bakel & Hoving, 2017). Machines die worden gebruikt voor het oogsten zijn veel zwaarder dan de machines die worden gebruikt bij het planten of zaaien, wat resulteert in meer bodemverdichting in natte omstandigheden. Te natte omstandigheden tijdens de oogstperiode zijn ernstiger omdat niet het hele veld geoogst kan worden of het volgende gewas niet gezaaid kan worden.

Anderzijds maakt kennis van het bodemtype het mogelijk het mechanische gedrag van de bodem te bepalen bij veranderingen in het bodemvochtgehalte. De sterkte van de bodem is sterk afhankelijk van het watergehalte en de dichtheid van de bodem, en dit bepaalt weer de draagkracht van de bodem en de energie die nodig is voor grondbewerking (Müller et al., 2011). In cohesieve bodems kan de bodemsterkte als functie van het watergehalte worden beschreven door de consistentie-index I_c , gebaseerd op de bovenste plastische grens (UPL) en onderste plastische grens (LPL). Een waarde van 0,75 wordt gewoonlijk beschouwd als een grens voor bewerkbaarheid, maar dit is niet noodzakelijk een drempel voor verhandelbaarheid. Lagere waarden geven aan dat de grond te nat en gemakkelijk vervormbaar is (niet goed voor de berijdbaarheid), terwijl hogere waarden aangeven dat de grond te droog is en vatbaar voor scheuren en afbrokkeling (goed voor de berijdbaarheid) (Müller et al., 2011). In onderstaande figuur varieert het gravimetrische watergehalte van $0,15 \text{ kg kg}^{-1}$ tot $0,50 \text{ kg kg}^{-1}$ voor $I_c = 0,75$. Gronden met een lager kleigehalte veranderen hun mechanisch gedrag sneller bij variaties in het watergehalte.



Figuur 8: Consistentiediagram op basis van de onderste plastische grens (LPL) en de bovenste plastische grens (UPL) voor vijf typische bovengrondse substraten in Noordoost-Duitsland. De bodems A, B, C, D en E hebben respectievelijk 15%, 20%, 30%, 40% en 50% klei. Aangepast van Müller et al. (2011)

Aangezien de sterkte van de bodem verandert met het watergehalte, bepaalt de grondwaterstand de berijdbaarheid en bewerkbaarheid van een veld. De optimale grondwaterstand varieert op zijn beurt met het bodemtype en de klimatologische omstandigheden. Een grondwaterstand van minder dan 75 cm kan in het voorjaar voldoende zijn op zware moeras-

gronden. In veengebieden zijn de grondwaterstanden vaak hoog en is de draagkracht van de bodem onder standaard landbouwmachines gering. De keuze van lichtere machines kan de bereikbaarheid en bewerkbaarheid van deze bodems mogelijk maken (Müller et al. , 2011).

2.3.2 Vertraging bij het zaaien of oogsten

Bodemtemperatuur en vochtgehalte zijn de belangrijkste omgevingsfactoren die de kieming van gewassen bepalen. Gewassen hebben een bepaalde bodemtemperatuur nodig om te ontkiemen, die sterk varieert tussen soorten en zelfs binnen cultivars. Voor maïs bijvoorbeeld is ten minste 10 °C nodig, wat normaliter in de laatste week van april gebeurt, terwijl wintertarwe kan ontkiemen bij lagere temperaturen van ongeveer 5 °C (Singh & Dhaliwal, 1972). Natte bodems warmen in het voorjaar langzamer op dan droge bodems, en hebben door de grote warmtecapaciteit van het water langer nodig om af te koelen in het najaar (Bakel & Hoving, 2017).

Alle gewassen zijn in het algemeen gevoeliger voor natte omstandigheden tijdens de kiemperiode en de periode vóór de oogst (Moore et al. , 1998). Hoe groter de kans op natte omstandigheden in het najaar, hoe groter de kans dat vroege rassen worden gekozen die minder opbrengen. Ook wordt bij wateroverlast in het voorjaar de zaaidatum uitgesteld en het groeiseizoen korter (Van Oort et al. , 2012). Daarom is het bodemvochtgehalte, dat zowel de bodemtemperatuur als de draagkracht beïnvloedt, een van de factoren die het begin van het groeiseizoen bepalen. Anderzijds leidt oogstvertraging als gevolg van beperkte draagkracht ertoe dat de volgende aanplant van gewassen wordt uitgesteld of zelfs geannuleerd.

In Nederland werden de grootste negatieve opbrengstanomalieën bij aardappelen in de periode 1951 - 2010 verklaard door een nat begin van het groeiseizoen of een nat einde van het groeiseizoen. De meeste lage opbrengsten waren te wijten aan te laat planten, vooral wanneer de datum 30 april overschreed (Van Oort et al. , 2012).

2.3.3 Bodemkwaliteit, tekorten aan voedingsstoffen en toxiciteit

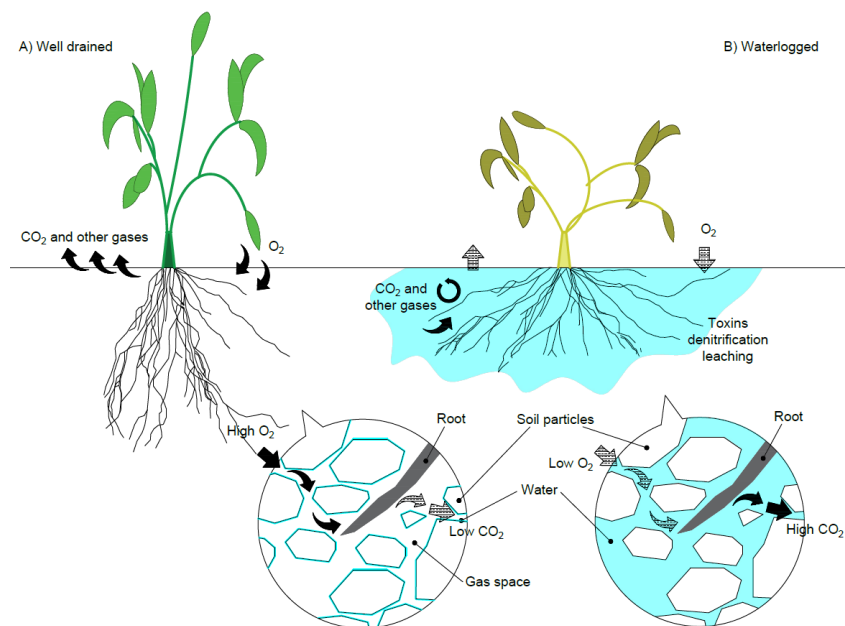
De snelheid van zuurstofdepletie hangt voornamelijk af van de bodemtemperatuur, maar ook van organisch materiaal, zoutgehalte en pH, en plantenfactoren zoals groeistadium, voedingsstoffen en aanpassingsvermogen (Moore et al. , 1998). Bij zuurstofgebrek kunnen micro-organismen in de bodem met plantenwortels concurreren om de beschikbare zuurstof of de beschikbaarheid en opname van bepaalde voedingsstoffen belemmeren. Bijgevolg is microbiële activiteit een van de factoren die zuurstofstress voor plantenwortels bepalen (Bartholomeus et al. , 2008).

Stikstof kan op verschillende manieren uit de bodem verdwijnen, via uitspoeling of via chemische processen. Zuurstoftekort in de bodem bevordert de afbraak van nitraat (denitrificatie), waardoor mogelijk minder stikstof beschikbaar komt. Wateroverlast verhoogt meestal de stikstofuitspoeling buiten de wortelzone, wat ook kan bijdragen tot stikstoftekorten (Irmak & Rathje, 2008). Veranderingen in het redoxpotentieel, de pH van de bodem en de bodemtemperatuur zijn uiteindelijk van invloed op de omzetting en beschikbaarheid van stikstof (Kaur

et al. , 2020). Het kan nodig zijn stikstof in de bodem toe te voegen om deze verliezen te compenseren. Ernstig beschadigde gewassen kunnen zich echter niet meer herstellen en de toevoeging van stikstof is niet rendabel.

Anderzijds verandert de afname van zuurstof de fysisch-chemische eigenschappen van de bodem (figuur 10). Het reductiepotentieel van de bodem neemt onder waterige omstandigheden toe en verandert het chemisch evenwicht van elementen, die in hun ionische vorm in de bodem-wateroplossing terechtkomen. Dit is het geval voor ijzer- en mangaanverbindingen, die onder anoxische omstandigheden tot toxische niveaus kunnen stijgen (McDonald, 2021). Toxines kunnen zich ophopen in de bodem en anaerobe ademhaling kan potentieel schadelijke eindproducten zoals ethanol produceren. De pH van de bodem wordt ook verlaagd door de accumulatie van vluchtige organische zuren en de hoge concentratie CO_2 . Deze processen veroorzaken een beperkte wortelgroei, omdat de wortels minder goed in staat zijn voedingsstoffen uit de bodem te halen en dicht bij het oppervlak blijven waar meer zuurstof is (Moore et al. , 1998). De algehele groei van het gewas komt in het gedrang door verminderde kiemkracht, en vroegtijdige bladveroudering en steriele bloempjes (Manik et al. , 2019).

Meer gedetailleerde informatie over de chemie in verzadigde of erg natte bodems wordt toegelicht in het volgende hoofdstuk Effect van grondwaterstand op de mobiliteit van nutriënten.



Figuur 9: Verspreiding van gassen in goed gedraineerde bodems en erg natte bodems. Aangepast van Moore et al. (1998).

2.3.4 Onkruid

Onkruid is een ongewenste plant die zeer goed bestand is tegen abiotische stress en die gewassen en veeteelt verstoort. Zij ontstaan en ontwikkelen zich spontaan wanneer zij een geschikte omgeving vinden. Landbouwonkruiden concurreren om middelen (licht, voedingsstoffen en bodemvocht), kunnen de groei van gewassen fysiek belemmeren en afremmen, fungeren als gastheer voor ongedierte en bevorderen ziekten (Schonbeck, 2022). Onkruid kan meer gewas-

verliezen veroorzaken dan andere biotische factoren (dierlijke plagen en ziekteverwekkers); schattingen van de potentiële verliezen wereldwijd waren gemiddeld 33 %, met het hoogste potentiële verlies bij maïs (40 %) (OERKE, 2005). Recentere schattingen van opbrengstverliezen bedroegen ongeveer 28% (Vilà et al. , 2021).

Natte omstandigheden kunnen leiden tot een toename van ziekten en plagen, en kunnen de groei van onkruid stimuleren. Andere plantensoorten, die beter zijn aangepast aan natte omstandigheden en doorgaans minder worden gewaardeerd, kunnen de overhand nemen en de gewasproductie verminderen. De aanwezigheid van planten als paddenbies (*Juncus bufoniosus*), dobben (*Rumex* spp.) en sedges (*Carex*) komt vaak voor in waterige omstandigheden (Moore et al. , 1998). Veel grassoorten zoals *Lolium*, *Brachiaria* en *Phalaris*, die in akkerbouwgewassen als onkruid worden beschouwd, kunnen tijdelijke wateroverlast beter verdragen dan landbouwgewassen omdat ze genen bezitten die gewoonlijk in waterplanten voorkomen (Krämer, 2016). Door deze eigenschap kunnen grassen wortelaanpassingen ontwikkelen die hen in staat stellen te overleven onder natte omstandigheden. Onkruiden kunnen gedijen rond gestreste gewassen omdat ze minder hoeven concurreren om voedingsstoffen en ruimte.

2.3.5 Plagen en ziekten

Tot de dierlijke plagen behoren insecten, mijten, slakken, vogels en zoogdieren. Ziekten omvatten schimmels, chromista, bacteriën en virussen (OERKE, 2005). Natte omstandigheden en hoge temperaturen bevorderen de ontwikkeling van ziekten op gewassen veroorzaakt door schimmelachtige organismen. Ziekten veroorzaakt door *Phytium*, *Phytophthora* en *Alternaria* komen vaak voor bij nat weer. Deze ziekteverwekkers zijn gewoonlijk aanwezig in veel bodems, maar worden schadelijk in extreem natte omstandigheden (IPM, 2017). Bepaalde insecten zoals de Europese langpootmug (*Tipula paludosa*) en de vliegenplaag schimmelmuggen (*Bradysia* en *Lycoriella* spp.) worden aangetrokken door vochtige omstandigheden (Weiland, 2012). Het is bekend dat dierlijke plagen en ziekten een potentieel gewasverlies veroorzaken van respectievelijk ongeveer 19 % en 13 % (OERKE, 2005).

Wortels en zaden zijn gevoeliger voor ziekten. Aangetaste planten vertonen een ondiep wortelstelsel, wortelrot, verdamping en een geelachtig of paars uiterlijk van de plant (Folnović, 2014). *Pythium*- en *Phytophthora*-soorten produceren sporen die zich in verzadigde grond gemakkelijk door water verplaatsen om nieuwe planten te infecteren. Van de *Pythium*-schimmel is bekend dat hij wortelrot veroorzaakt in wintertarwe wanneer er sprake is van overmatige bodemvochtigheid, omdat de plant kwetsbaarder is in de eerste weken na opkomst. Een andere ziekte in overstroomde omstandigheden is *Peronospora sparsa* *(valse meeldauw), die ondergedompelde tarwebladeren kan aantasten (Byamukama & Ali, 2022).

Deronde (2021) rapporteerde dat de permanente hoge vochtigheid en gematigde temperaturen in de zomer van 2021 leiden tot ernstige ziektestress in aardappelen in Vlaanderen, *Phytophthora* en *Alternaria* werden op grote schaal waargenomen in aardappelvelden. Het Agrometeorologisch Bulletin registreerde ook verschillende bacteriële en schimmelziekten in gewassen zoals *Pseudomonas*, *Cercospora beticola*, *Rhizoctonia solani* en *Erwinia*.

2.3.6 Gewasschade en oogstkwaliteit

Een teveel aan water veroorzaakt rotting van oogstbare producten, vooral bij akkerbouwgewassen zoals aardappelen, waarbij de knollen in direct contact staan met de bodem. In het geval van gras beperkt het begrazing voor een bepaalde periode (Bakel & Hoving, 2017)

Volgens een krantenartikel uit augustus 2021 Times is de kwaliteit van de oogst van verschillende vruchten, granen en groenten verminderd als gevolg van een vochtig voorjaar en constante regenval in de zomer van 2021. De natte omstandigheden leidden tot indirecte effecten zoals een slechte bestuiving van de bloemen, vooral bij peren, of schurftvorming bij appels, waardoor het moeilijk is om aan de kwaliteitsnormen te voldoen. Bovendien bevorderen lange natte perioden gevolgd door droge perioden de vorming van secundaire knollen naast de hoofdknol, die de grootte en de vorm van de aardappelen wijzigen en er voor de klanten minder aantrekkelijk uitzien. Deronde (2021) wees erop dat de grote hoeveelheid neerslag, vaak in combinatie met een hoog stikstofgehalte in 2021 een onevenredige knolgroei veroorzaakte met als gevolg groeischeuren en holtes, vooral bij de cultivar Fontane. Sommige Fontaneparcels vertoonden ook nieuwe bloei en knolgroei die leidde tot groene knollen tijdens de oogst.

Bij grassen zijn het eiwit- en vezelgehalte bepalend voor de kwaliteit. Het gehalte aan ruw eiwit, dat efficiënter wordt opgenomen voor de vlees- en melkproductie, moet ten minste 7% bedragen om aan de behoeften van de dieren te voldoen. Het vezelgehalte, hoewel fundamenteel voor het stimuleren van de pensfunctie, moet lager zijn dan 35 % voor zure detergenten vezels (ADF) en kleiner dan 50 % voor neutrale detergenten vezels (NDF), om een goede verteerbaarheid te hebben (Oregon State University, 2018). Met de rijpheid neemt het eiwit af en de vezel toe. Bijgevolg hangt het optimale oogsttijdstip af van de gewenste kwaliteit en hoeveelheid. Vroeg geoogst gras zal eiwitrijker zijn dan een laat geoogst gras, maar met een lager biomassavolume. De oogsttijd wordt beïnvloed door het weer en de bodemgesteldheid: de bodem moet droog genoeg zijn voor de machines om het veld te betreden of voor het vee om te grazen (Oregon State University, 2018). Daarom zal een oogstvertraging als gevolg van hoge bodemvochtigheid de kwaliteit van het gras en de mogelijkheid om het op te slaan in gevaar brengen.

2.4 Referenties

Armstrong, W., Justin, S. H. F. W., Beckett, P. M., & Lythe, S. (1991). Root adaptation to soil waterlogging. *Aquatic Botany*, 39(1-2), 57-73. 10.1016/0304-3770(91)90022-w

Bakel, J., & Hoving, I. (2017). Kennis over indirecte nat- en droogteschade bij gras en maïs voor Waterwijzer Landbouw [STOWA].

Bartholomeus, R. P., Witte, J.-P. M., van Bodegom, P. M., van Dam, J. C., & Aerts, R. (2008). Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 147-165. 10.1016/j.jhydrol.2008.07.029

Byamukama, E., & Ali, S. (2022). Implications of Excessive Soil Moisture for Disease Development

in Winter Wheat.

Cavazza, L., & Pisa, P. R. (1988). Effect van watertafel diepte en wateroverlast op gewasopbrengst. *Agricultural Water Management*, 14(1), 29-34. 10.1016/0378-3774(88)90057-1

Deronde, B. (2021). De impact van extreem weer op de aardappelteelt.

Di Bella, C. E., Grimoldi, A. A., & Striker, G. G. (2022). A quantitative revision of the waterlogging tolerance of perennial forage grasses. *Crop and Pasture Science*. 10.1071/cp21707

Feddes, R. A. (1971). Water, warmte en gewasgroei [Phdthesis].

Folnović, T. (2014). Hoge vochtigheid verhoogt risico op gewasziekten.

Gliński, J., & Stępniewski, W. (1985). Beluchting van de bodem en de rol daarvan voor planten. CRC Press.

Gobin, A. (2010). Modelling van klimaateffecten op gewasopbrengsten in België. *Klimaatonderzoek*, 44(1), 55-68. 10.3354/cr00925

Gobin, A. (2018). Weersgerelateerde risico's in de Belgische akkerbouw. *Landbouwsystemen*, 159, 225-236. 10.1016/j.agry.2017.06.009

Guoping, C., Shixiao, Z., & Hongyou, Y. (1988). Studies over wateroverlast bij maïs en beschermende maatregelen I. Effects of waterlogging at bud bursting stage on the emergence and early growth of seedlings of corn. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica (China)*. ;author=Chen+Guoping%5C&publication

Hack-ten Broeke, M. J. D., Kroes, J. G., Bartholomeus, R. P., van Dam, J. C., de Wit, A. J. W., Supit, I., Walvoort, D. J. J., van Bakel, P. J. T., & Ruijtenberg, R. (2016). Kwantificering van de impact van hydrologie op landbouwproductie als gevolg van te droge, te natte of te zoute omstandigheden. *BODEM*, 2(3), 391-402. 10.5194/soil-2-391-2016

Hack-ten Broeke, M. J. D., Mulder, H. M., Bartholomeus, R. P., van Dam, J. C., Holshof, G., Hoving, I. E., Walvoort, D. J. J., Heinen, M., Kroes, J. G., van Bakel, P. J. T., Supit, I., de Wit, A. J. W., & Ruijtenberg, R. (2019). Kwantitatieve grondevaluatie geïmplementeerd in het Nederlandse waterbeheer. *Geoderma*, 338, 536-545. 10.1016/j.geoderma.2018.11.002

ILVO. (2022). Grassen - Rassenlijst.

ILVO. (2022). Rassenlijst voor voedergewassen en groenbedekkers.

ILVO. (2022). Vergelijkende tabel van kenmerken van grassoorten - Rassenlijst.

IPM, U. (2017). Hoe ongedierte te beheren: Ongedierte in tuinen en landschappen: Waterbeheer en plaagdierproblemen.

Irmak, S., & Rathje, W. R. (2008). Plant Growth and Yield as Affected by Wet Soil Conditions Due to Flooding or Over-Irrigation.

- Kahlow, M. A., Ashraf, M., & Zia-Haq. (2005). Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. *Agricultural Water Management*, 76(1), 24-35. 10.1016/j.agwat.2005.01.005
- Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orlowski, J. M., & Golden, B. R. (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: Een overzicht. *Agronomy Journal*, 112(3), 1475-1501. 10.1002/agj2.20093
- Krähmer, H. (2016). Aanpassing van terrestrische onkruiden aan waterstress: Wateroverlast en tijdelijke hypoxie. In *Atlas of Weed Mapping* (pp. 391-395). John Wiley & Sons, Ltd. 10.1002/9781118720691.ch34
- Li, Y., Guan, K., Schnitkey, G. D., DeLucia, E., & Peng, B. (2019). Excessieve regenval leidt tot maïs opbrengstverlies van een vergelijkbare omvang als extreme droogte in de Verenigde Staten. *Global Change Biology*, 25(7), 2325-2337. 10.1111/gcb.14628
- Liu, H., & Lennartz, B. (2018). Hydraulische eigenschappen van veenbodems langs een bulkdichtheidsgradiënt - Een metastudie. *Hydrologische Processen*, 33(1), 101-114. 10.1002/hyp.13314
- Liu, Z., Chen, H., Huo, Z., Wang, F., & Shock, C. C. (2016). Analyse van de bijdrage van grondwater aan de evapotranspiratie in een aride irrigatiedistrict met ondiepe grondwaterspiegel. *Agricultural Water Management*, 171, 131-141. 10.1016/j.agwat.2016.04.002
- Manik, S. M. N., Pengilley, G., Dean, G., Field, B., Shabala, S., & Zhou, M. (2019). Soil and Crop Management Practices to Minimize the Impact of Waterlogging on Crop Productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10.
- McDonald, G. (2021). Wateroverlast - de wetenschap [Tekst].
- Moore, G. A., Agriculture Western Australia, & National Landcare Program (W.A.). (1998). *Soilguide: a handbook for understanding and managing agricultural soils*. Landbouw West-Australië.
- Müller, L., Lipiec, J., Kornecki, T. S., & Gebhardt, S. (2011). Verplaatsbaarheid en bewerkbaarheid van bodems. In *Encyclopedia of Agrophysics* (pp. 912-924). Springer Nederland. 10.1007/978-90-481-3585-1_176
- OERKE, E.-C. (2005). Gewasverliezen door plagen. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43. 10.1017/s0021859605005708
- Oregon State University, E. W. (2018). Hoe dieren met een volle maag uit te hongeren. *Ag - Small Farms/Commercial Ag*.
- Ploschuk, R. A., Grimoldi, A. A., Ploschuk, E. L., & Striker, G. G. (2017). Groei tijdens herstel bewijst de wateroverlasttolerantie van voedergrassen. *Crop and Pasture Science*, 68(6), 574. 10.1071/cp17137
- Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., Colmer, T. D., Ploschuk, E. L., & Striker, G. G. (2018). Wateroverlast van wintergewassen in vroege en late stadia: Impacts on Leaf Physiology, Growth and Yield. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1863. 10.3389/fpls.2018.01863
- Rasmussen, C. R., Thorup-Kristensen, K., & Dresbøll, D. B. (2020). Opname van water onder de

grond onder de 2 m verlicht de droogterespons niet bij diepgewortelde cichorei (*Cichorium intybus* L.). *Plant en Bodem*, 446(1), 275-290. 10.1007/s11104-019-04349-7

Ren, B., Zhang, J., Li, X., Fan, X., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2014). Effecten van wateroverlast op de opbrengst en groei van zomermaïs onder veldomstandigheden. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(1), 23-31. 10.4141/cjps2013-175

San Celedonio, R. P., Abeledo, L. G., Mantese, A. I., & Miralles, D. J. (2017). Differential root and shoot biomass recovery in wheat and barley with transient waterlogging during preflowering. *Plant en Bodem*, 417(1), 481-498. 10.1007/s11104-017-3274-1

Schonbeck, M. (2022). Een ecologisch begrip van onkruid. eOrganic.

Singh, N. T., & Dhaliwal, G. S. (1972). Effect van de bodemtemperatuur op de opkomst van zaailingen in verschillende gewassen. *Plant and Soil*, 37(2), 441-444.

Sojka, R. E., Oosterhuis, D. M., & Scott, H. D. (2005). Root Oxygen Deprivation and the Reduction of Leaf Stomatal Aperture and Gas Exchange. In *Handbook of Photosynthesis* (2e editie) (p. 17).

STATBEL. (2022). Land- en tuinbouwbedrijven.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. Voedsel- en Landbouworganisatie van de Verenigde Naties.

Swayer, G., Oligschläger, C., Khabarov, N., & Tassa, A. (2019). Aardappelen telen in België (p. 71).

Tian, L., Zhang, Y., Chen, P., Zhang, F., Li, J., Yan, F., Dong, Y., & Feng, B. (2021). How Does the Waterlogging Regime Affect Crop Yield? Een wereldwijde meta-analyse. *Frontiers in Plant Science*, 12, 634898. 10.3389/fpls.2021.634898

Times, T. B. (2021). Slechte weersomstandigheden eisen tol van de Belgische productie van voedingsgewassen.

Valk, van der G. G. M., & Schoneveld, J. A. (1963). *Invloed van grondwaterstand op de productie van enkele gewassen op klei- en zavelgronden [*Techreport].

van den Pol-van Dasselaar, A., Bastiaansen-Aantjes, L., Bogue, F., O'Donovan, M., & Huyghe, C. (2019). *Grassland Use in Europe A Syllabus for Young Farmers*. Quae.

Van Oort, P. A. J., Timmermans, B. G. H., Meinke, H., & Van Ittersum, M. K. (2012). Key weather extremes affecting potato production in The Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 37(1), 11-22. 10.1016/j.eja.2011.09.002

Vilà, M., Beaury, E. M., Blumenthal, D. M., Bradley, B. A., Early, R., Laginhas, B. B., Trillo, A., Dukes, J. S., Sorte, C. J. B., & Ibáñez, I. (2021). Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034043. 10.1088/1748-9326/abe14b

Visser, W. C. (1958). *De Landbouwwaterhuishouding in Nederland*. Comm. Onderz. Landb. Wa-

terhuishouding. Ned. TNO, 1, 231 ..

Visser, W. C. (1959). Gewasgroei en beschikbaarheid van vocht. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10(1), 1-11. 10.1002/jsfa.2740100101

Weiland, J. E. (2012). Relaties tussen bodem en plaag.

Wesseling, J. (1957). Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden. Staatsdrukkerij Uitgeverijbedrijf.

Wesseling, J., Wijk, W. R., Fireman, M., Woudt, B. D., & Hagan, R. M. (1957). Land Drainage in Relatie tot Bodems en Gewassen. In *Drainage of Agricultural Lands* (pp. 461-578). John Wiley & Sons, Ltd. 10.2134/agronmonogr7.c5

Wu, Y., Liu, T., Paredes, P., Duan, L., & Pereira, L. S. (2015). Watergebruik door een grondwaterafhankelijke maïs in een semi-aride regio van Binnen-Mongolië: Evapotranspiratie partitionering en capillaire stijging. *Agricultural Water Management*, 152, 222-232. 10.1016/j.agwat.2015.01.016

Zipper, S. C., Soylu, M. E., Booth, E. G., & Loheide II, S. P. (2015). Untangling the effects of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability. *Water Resources Research*, 51(8), 6338-6358. 10.1002/2015WR017522

–DEEL IV–

Modelkader

1 GIS analyse identificatie focusgewassen

1.1 Inleiding

Een GIS-analyse op basis van de beschikbare bodem- en gewaskaarten van Vlaanderen werd uitgevoerd om de interessante gebieden te identificeren. De locaties waar het waterpeil van nature hoog is, zouden door hun slechte drainage normaal gezien meer last hebben van een hoog grondwaterpeil. **Slecht gedraineerde bodems werden gedefinieerd volgens de drainageklassen in de Belgische Bodemkaart.** De dominante bodemtypes en bodembedekingsvormen in deze gebieden maken het mogelijk de meest relevante gewassen en bodemtypes te selecteren voor de modellering. De identificatie van deze gebieden maakt het ook mogelijk om landbouwers te identificeren en contacteren zodat ze hun waardevolle feedback konden geven op de aanpak van dit project.

De dominante gewassen in slecht gedraineerde bodems werden als volgt geïdentificeerd:

1. Groeperen van bodemtypes in een categorie “slecht gedraineerde bodems” op basis van de drainageklassen gegeven in de Belgische Bodemkaart.
2. Extraheren van de gebieden met bodems die voldoen aan deze definitie van slecht gedraineerde bodems.
3. Landgebruik in die slecht gedraineerde gebieden nagaan via landgebruikskaart.
4. Resulterende gecombineerde kaart analyseren binnen elke Vlaamse provincie om het areaal gewassen per provincie in slecht gedraineerde gronden te bekomen.

1.2 Methodologie

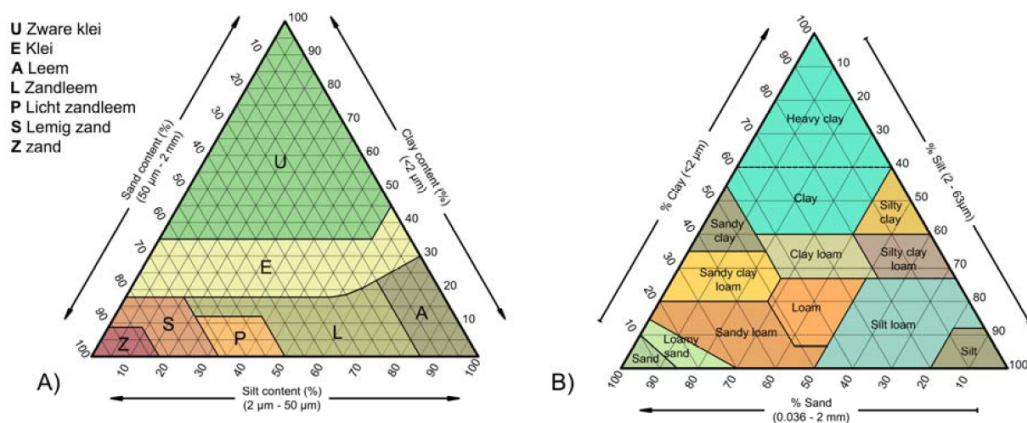
De analyse gebeurde aan de hand van bodem- en landgebruikskaarten van Geopunt Vlaanderen met de software QGIS 3.22. De Digitale Bodemkaart van het Vlaamse Gewest (VPO, 2017), schaal 1:20000, bevat de bodemtextuur volgens de Belgische textuurklassen, de drainageklasse en de profielontwikkeling van de bodem. De Landbouwgebruikspercelenkaart (LV, 2016) bevat het overzicht van de percelen met landbouwgebruik, beboste gebieden en landbouwinfrastructuur. We gebruikten de landbouwgebruikskaarten van 2018, 2019, 2020 en 2021 om de gemiddelde gewasoppervlakte te schatten van de teelten die voorkomen in natte bodems. Al deze informatie wordt beheerd door de Databank Ondergronden Vlaanderen (DOV) en kunnen ook daar geconsulteerd worden.

Daarnaast vroegen we de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) om de locatie van gebieden waar vernatting op de agenda staat in het kader van de Blue deal door te geven. Ze bezorgden ons vier Blue Deal vlaggenschip-projecten: Duinencomplex, Zwarte beek, Kleine Nete en Rivierherstel Leie.

1.2.1 Digitale bodemkaart van het Vlaamse Gewest

De bodemkaart van België is gedefinieerd volgens de bodemtextuur, de drainageklasse en de profielontwikkeling. De bodemreeksen en hun notatie worden vastgesteld op basis van de combinatie van deze klassen. De textuurklassen zijn gebaseerd op de relatieve klei-, slib- en zandfracties. De drainageklassen werden bepaald door de diepte waarop redox-vlekken en/of reductiekleuren voorkomen tijdens de opmaak van de bodemkaarten. De bodemprofielontwikkelingsklassen zijn gebaseerd op de visuele identificatie van bodemhorizonten. De Vlaamse regio telt meer dan 4000 verschillende bodemtypes (Dondeyne et al. , 2014).

De zeven Belgische textuurklassen zijn ruimer dan die welke in het standaard bodemtaxonomiesysteem van het USDA zijn gedefinieerd. Er zijn ook verschillen in het bereik van de deeltjesgrootte voor de categorieën silt en zand. Naast de zeven hoofdklassen zijn drie extra klassen gedefinieerd voor speciale gevallen, namelijk **G** voor grind, **V** voor verzadigde veengronden door grondwater en **W** voor verzadigde veengronden door regenwater.



Figuur 10: Textuurklassen volgens de Belgische textuurklassen (A) en USDA textuurklassen (B). Aangepast van Dondeyne et al. (2014).

Er zijn zes drainageklassen met diep grondwater en drie klassen met ondiep grondwater (Table 5). Onderscheid in diepte van voorkomen van redoxvlekken (mottling) en reductiekleuren wordt gemaakt tussen de lemige en kleiige texturen en de zandige texturen. Tenslotte zijn er elf categorieën van bodemprofielontwikkeling. Zo verwijst een bodemtype **Pca** naar een lichte zandige leem (**P**), matig goed gedraineerd (**c**) en een profielontwikkeling die overeenkomt met een B-horizont (**a**).

1.2.2 Percelen voor agrarisch gebruik

De kaart met landbouwpercelen bevat dertien hoofdcategorieën, waarvan er acht overeenkomen met akkerbouwgewassen (Table 6). Elke categorie omvat verscheidene meer gedetailleerde subcategorieën van gewassen.

Tabel 5: Drainageklassen en symbolen volgens de legenda van de bodemkaart van België (Dondeyne et al., 2014)

| Symbool | Definitie | Diepte van voorkomen (cm) | | | |
|---|-------------------------|---------------------------|-----------------|------------------------|--------|
| | | Zand en klei (A, L, E, U) | | Zandtexturen (A, S, P) | |
| Redoxvlekken | Reductiekleuren | Redoxvlekken | Reductiekleuren | | |
| Geen grondwater binnen 125 cm van het bodemoppervlak | | | | | |
| a | Overmatig gedraineerd | - | - | >120 | - |
| b | Goed gedraineerd | - | - | 90-120 | - |
| c | Matig goed gedraineerd | >80 | - | 60-90 | - |
| d | Onvolmaakt gedraineerd | 50-80 | - | 40-60 | - |
| h | Slecht gedraineerd | 20-50 | - | 20-40 | - |
| i | Zeer slecht gedraineerd | 0-20 | - | - | - |
| Grondwater aanwezig binnen 125 cm van het bodemoppervlak | | | | | |
| e | Slecht gedraineerd | 20-50 | >80 | 20-40 | >100 |
| f | Zeer slecht gedraineerd | 0-20 | 40-80 | 0-20 | 50-100 |
| g | Zeer slecht gedraineerd | 0 | <40 | 0 | <50 |

Tabel 6: Gewascategorieën op de kaart van de percelen met agrarisch gebruik.

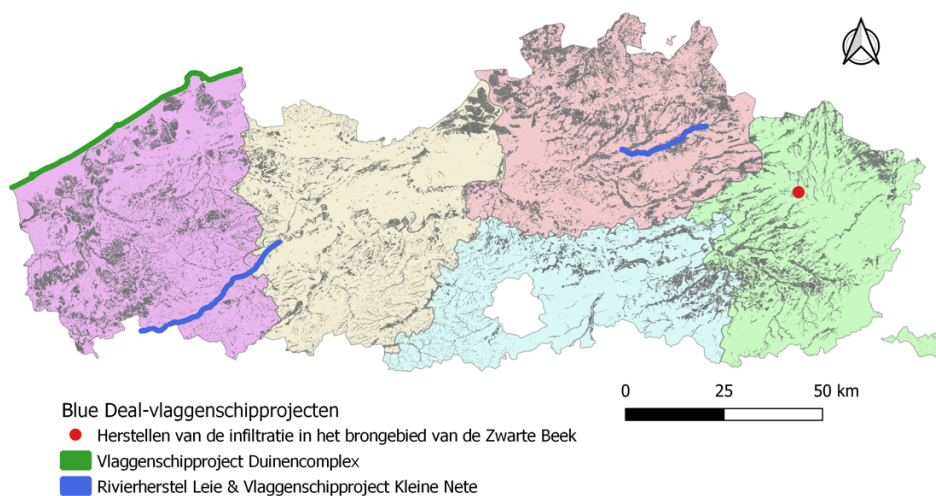
| Categorie | Gewas |
|----------------------------------|---|
| Aardappelen | Vroege aardappelen, bewaaraardappelen en pootaardappelen |
| Fruit en noten | Peer, appel, aardbeien... |
| Granen, zaden en peulvruchten | Wintertarwe, zomertarwe, wintergerst, ... |
| Grasland | Grasland, natuurlijk grasland, graszoden, ... |
| Groenten, kruiden en sierplanten | Witlofwortel, uien, bloemkool, spruitjes, spinazie, wortel, slasoorten, ... |
| Houtige gewassen | Loofbomen, populieren, bos- en randplanten, ... |
| Landbouwinfrastructuur | Stallen en loodsen |
| Maïs | Kuilmaïs en korrelmaïs |
| Andere gewassen | Gesneden rogge, bloemenmix, tabak... |
| Suikerbiet | |
| Vlas en hennep | |
| Voer | Grasklaver, grasluzerne, luzerne, voederbieten, ... |
| Water | |

1.2.3 Dominante bodem- en gewastypes in slecht gedraineerde bodems

Alle gebieden met een slechte tot zeer slechte drainage (klassen h, i, e, f, g) en combinaties van deze klassen werden beschouwd als slecht gedraineerde gebieden. De landgebruikskaart voor elk jaar (2018-2020) werd doorsneden met deze laag van slecht gedraineerde bodems.

1.3 Resultaten

Onderstaande figuur toont de gebieden met slechte drainage in Vlaanderen in het grijs, samen met de locatie van de vier Blue Deal-vlaggenschipprojecten zoals aangeleverd door VMM. De meeste gronden met een lage drainagecapaciteit of waar de grondwaterstand ondiep is, bevinden zich in de provincie Antwerpen en sommige delen van West-Vlaanderen en Limburg.

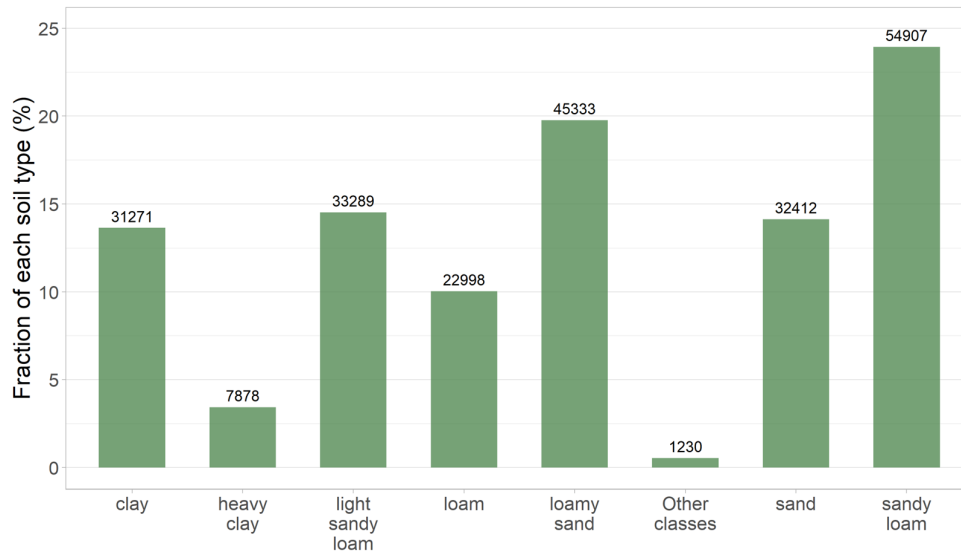


De dominante bodemtexturen in deze bodemtypes zijn zandige leem (24 %) en lemig zand (20 %). Lichte zandleem, zand en klei beslaan elk ongeveer 14 % van het gebied. Andere textuurklassen komen in minder dan 3 % van het gebied voor.

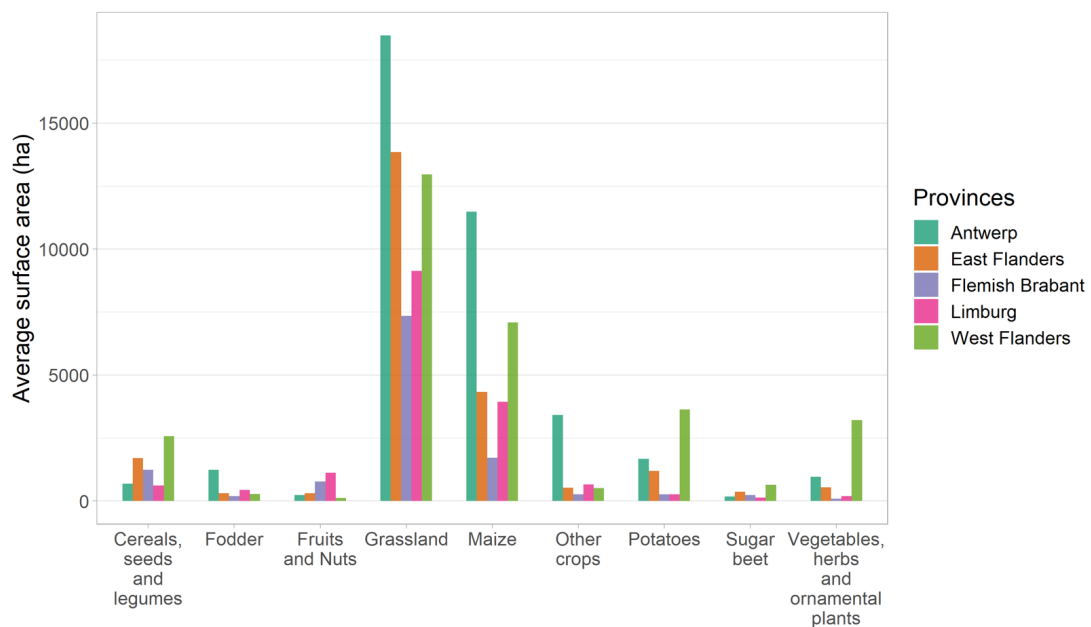
De volgende figuur toont het 4-jaarlijkse (2018 - 2021) gemiddelde areaal van elk gewas per provincie, volgens de in Table 6 opgenomen gewascategorieën. Het totale teeltareaal op slecht gedraineerde gronden bedraagt ongeveer 123970 ha. De dominante gewascategorieën in alle provincies zijn grasland, maïs en aardappelen. Antwerpen heeft de grootste oppervlakte grasland en maïs in Vlaanderen, terwijl aardappelen vooral in West-Vlaanderen voorkomen op natte gronden. Ook groenten en granen worden vooral in West-Vlaanderen geteeld.

Uit het vierjaarlijkse gemiddelde van het areaal, blijkt ook dat van het totale bebouwde areaal op slecht doorlatende gronden, grasland en natuurlijk grasland bijna de helft beslaan. Kuilmaïs is het tweede gewas dat in deze gebieden wordt geteeld (18 %), terwijl industrie-aardappelen, korrelmaïs, klaver en wintertarwe een vergelijkbaar percentage (4-5 %) delen. Suikerbieten en peren komen eerder weinig voor op natte gronden.

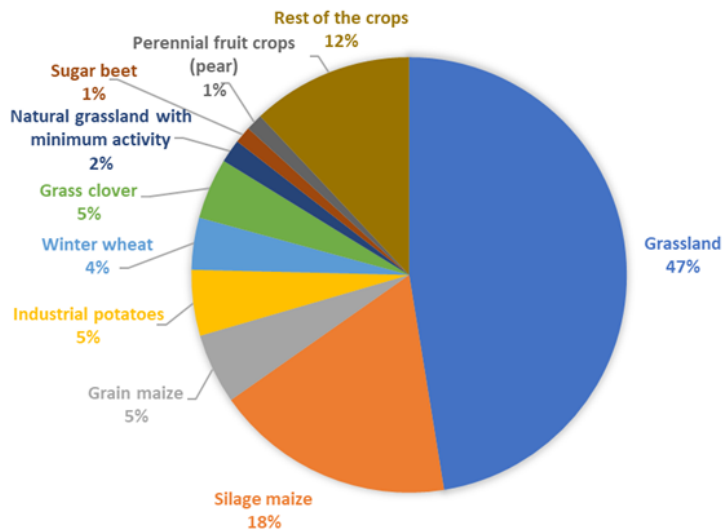
In totaal, is 72 % van het areaal slecht gedraineerde bodems bedekt met natuurlijk of gecultiveerd gras en voedergewassen, waaruit blijkt dat de belangrijkste economische activiteit in deze gebieden de veehouderij is. Dit is logisch aangezien akkerbouwgewassen niet goed



Figuur 11: Dominante bodemtextuurklassen in slecht gedraineerde bodems in Vlaanderen. De waarde bovenaan elke staaf vertegenwoordigt de oppervlakte in hectare.

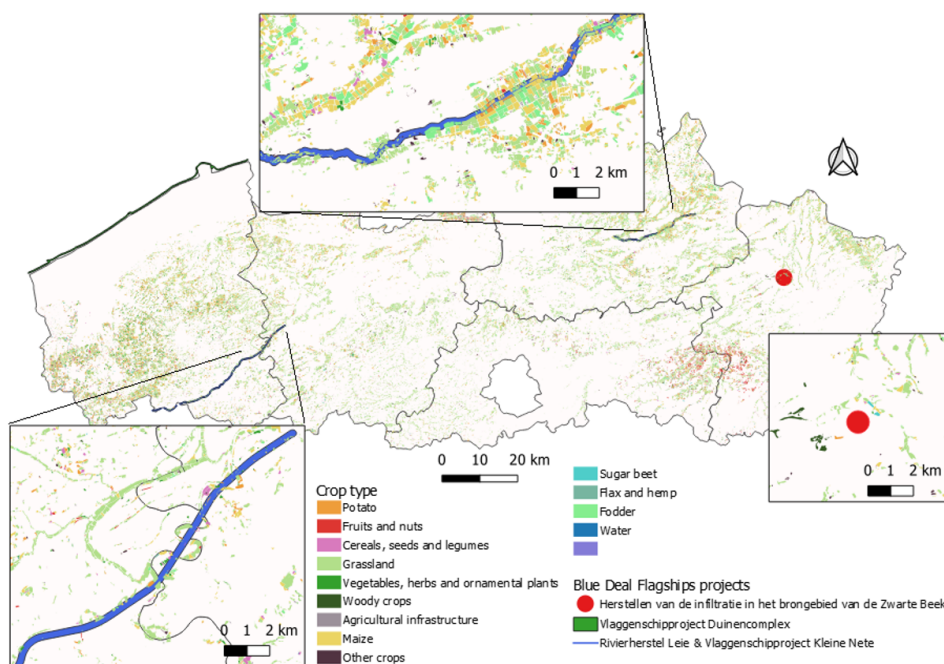


Figuur 12: 4-jaarlijkse (2018 -2021) gemiddelde oppervlakte van gewassen geteeld in slecht gedraineerde gebieden over Vlaanderen per provincie.



Figuur 13: Dominante gewassen op slecht gedraineerde bodems in Vlaanderen op basis van een 4-jarig gemiddelde voor alle provincies samen.

groeien op slecht gedraineerde gronden, waar bodemverzadiging of waterverzadiging kan optreden (Effect van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren). Als we kijken naar de locatie van de Flagships-projecten, zijn grasland en maïs (meestal kuilmaïs) de belangrijkste gewassen, wat ook verband houdt met veehouders.



Figuur 14: Landbouwgebruik in slecht gedraineerde bodems ter plaatse van de Blue Deal Flagships projecten.

1.4 Conclusie

De GIS-analyse op basis van de beschikbare bodem- en grondgebruikskaarten gaf een eerste idee van de dominante gewassen en bodemtypes in slecht gedraineerde gebieden. De meest dominante gewassen waren grasland, maïs, aardappelen, wintertarwe. We nemen ook een minder voorkomend gewas mee, nl. suikerbieten. De dominante bodemtexturen waren zandleem, lemig zand en zand. Aangezien ongeveer 72 % van het gebied bedekt is met gras en voedergrassen, is de belangrijkste economische activiteit in deze gebieden de veehouderij. Deze resultaten geven een goed overzicht van de bodemkenmerken en de landbouw op slecht gedraineerde bodems, voor modelleringsdoeleinden en om geïnteresseerde partijen aan te spreken.

1.5 Referenties

Dondeyne, S., Vanierschot, L., Langohr, R., Ranst, E. V., & Deckers, J. (2014). De bodemkaart van het Vlaamse Gewest omgezet naar de 3e editie van de World Reference Base for soil resources. 10.13140/2.1.4381.4089

LV, D. (2016). Landbouwgebruikspcelen.

VPO. (2017). Digitale bodemkaart van het Vlaams Gewest: bodemtypes

2 Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren

2.1 Inleiding

De belangrijkste doelstelling van dit project is het bepalen van de impact van de grondwaterstanden op conventionele landbouwgewassen in Vlaanderen. We gebruiken daarvoor dezelfde modelinstrumenten als de Nederlandse Waterwijzer Landbouw: het bodemwatertransportmodel SWAP, gekoppeld aan het gewasmodel WOFOST. Het gekoppelde instrument houdt niet alleen rekening met droogtestress op planten, maar ook met zuurstofstress onder te natte omstandigheden. Bovendien kunnen indirecte effecten op zaai-, maai- of oogsttijden worden gekwantificeerd.

SWAP-WOFOST is de afgelopen decennia uitgebreid geverifieerd. De numerieke oplossingen van SWAP werden ook vergeleken met analytische oplossingen. Een overzicht van enkele validatie- en gevoeligheidsanalyses is te vinden in Heinen et al. (2021). Sinds de start van de 'Waterwijzer Landbouw'-tool in 2015 werden de modelinstrumenten voortdurend verder ontwikkeld en verbeterd. Een recente validatie op regionale en lokale schaal voor gras en voedermaïs vergeleek de gesimuleerde gewasontwikkeling en transpiratiereductie met succes met NDVI-waarden gemeten met satellieten (Mulder et al. , 2021).

Aangezien het model uitgebreid is getest in vergelijkbare Nederlandse omstandigheden die representatief zijn voor tenminste een deel van Vlaanderen, hebben we ons gericht op het

aanpassen van de invoergegevens aan de Vlaamse omstandigheden (weer, bodem en grondwaterstand) en op het valideren van de gesimuleerde opbrengsten met historische, lokale opbrengstgegevens van verschillende wetenschappelijke proeven. Gewasparameters werden daarbij niet gewijzigd.

2.2 Het SWAP-WOFOST-model

SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) is een 1-D model dat het verticale transport van water, vaste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone simuleert, in interactie met de gewasgroei (Kroes et al. , 2017; Dam et al. , 2008). SWAP maakt het mogelijk om waterfluxen van en naar omgeving te beschouwen, zoals afvoer naar sloten, drains en andere oppervlaktewateren. De gewasgroeimodule WOFOST (World Food Studies; De Wit et al. (2020)) is in SWAP geïntegreerd om de fenologische ontwikkeling, groei en opbrengst van akkerbouwgewassen te beschrijven.

De belangrijkste invoer bestaat uit weergegevens, grondwaterstanden en bodem- en gewasmerken. De output van het model bestaat uit tijdreeksen van water- (en oplosbaarheids-) balansen en de droge stofontwikkeling van het gewas. Daarnaast wordt het optreden van verschillende stresstypes gedurende het groeiseizoen gekwantificeerd.

SWAP-WOFOST is in Nederland ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Research en is vrij beschikbaar op <https://www.swap.alterra.nl>. De modelversie voor dit project is verstrekt door Wageningen Universiteit en Research uit de tool Waterwijzer Landbouw.

Important

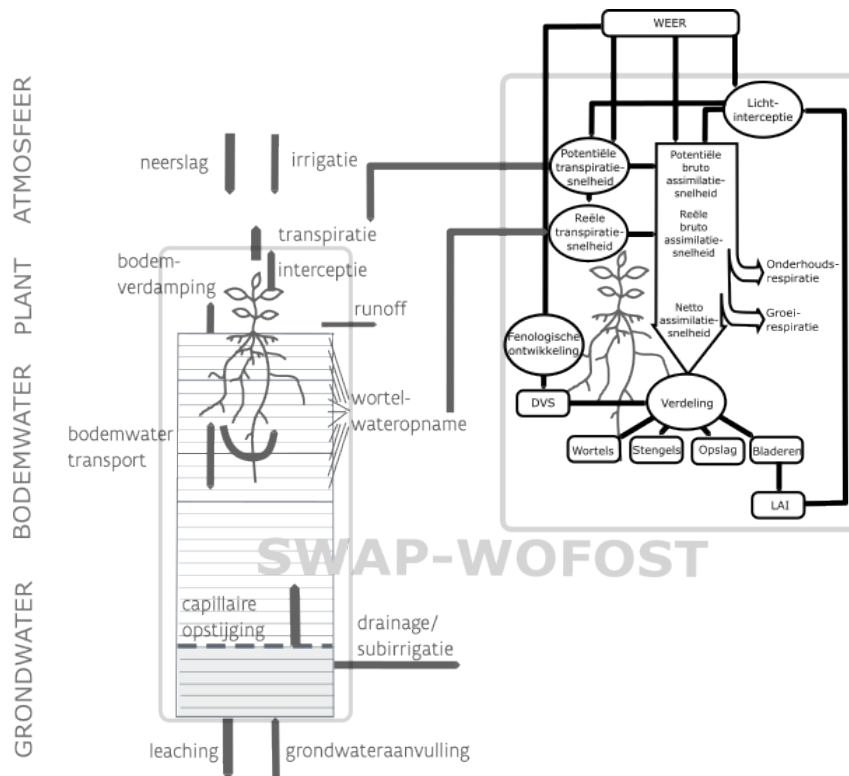
De inhoud van dit hoofdstuk is grotendeels ontleend aan het rapport Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018) en de SWAP 4 handleiding (Kroes et al. , 2017).

2.2.1 Transport van bodemwater

SWAP (Kroes et al. , 2017) berekent het transport van water, vaste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone met behulp van de Richardsvergelijking, inclusief wortelwateropname, om de bodemvochtdynamiek in de bodem te simuleren. Het SWAP-modeldomein start net boven het bladerdek van het gewas tot een gedefinieerd vlak in het freatisch grondwater. In dit domein verlopen de transportprocessen overwegend verticaal. In de verzadigde zone kan het model ook een inschatting maken van laterale drainagefluxen. Deze optie werd in dit project echter niet geactiveerd. SWAP kan de afvoer naar sloten, riolen en andere oppervlaktewateren simuleren door middel van drainage- en infiltratievergelijkingen die in het 1-D model als bron ('source') of afvoer ('sink') fungeren en zo de verticale waterbalans vervolledigen.

De bovenste randvoorwaarden van het systeem bestaat uit een gekende waterflux in of uit het systeem of een gekende drukhoogte aan het oppervlak van de bodem. De onderste rand-

voorwaarde beschrijft de interactie tussen verzadigde ondiepe bodemlagen en het regionale grondwater, terwijl de laterale grens de interactie met oppervlaktewatersystemen verklaart.



Figuur 15: Schematische voorstelling van werking van het gekoppelde SWAP-WOFOST model (1-D) dat gebruikt werd voor deze studie.

De belangrijkste concepten en aannames van SWAP-WOFOST die in deze studie worden gebruikt, zijn (Heinen et al., 2021):

- De verdampingsbehoefte van de atmosfeer wordt berekend met de Penman-Monteith-vergelijking (Monteith, 1965).
- De waterbeweging is verticaal (1D model) en wordt beschreven door de vergelijking van Richards.
- De waterretentiekarakteristieken van elke bodemlaag worden beschreven met Mualem-Van Genuchten-functies.
- Het poreuze medium wordt verondersteld niet samendrukbaar, isotroop en isotherm te zijn.
- Bodems kunnen variabel verzadigd en heterogeen zijn.
- De bodemrandvoorwaarden kunnen worden gespecificeerd als flux of drukhoogte, en kunnen afhangen van het freatisch grondwater, of de hydraulische opvoerhoogte in de diepere watervoerende laag en de weerstand van het systeem.
- Vermindering van de transpiratie kan worden veroorzaakt door zeer droge omstandigheden (waterstress) of zeer natte omstandigheden (zuurstofstress). Met zoutstress is in deze studie geen rekening gehouden.
- Er ontstaat plasvorming wanneer de infiltratiecapaciteit van de bodem wordt overschreden, en er vindt pas oppervlakteafvoer plaats wanneer een drempelwaarde voor plasvorming wordt overschreden (i.e. 0.2 cm).

- De bodemtemperatuur wordt gesimuleerd als een diffusieproces.
- Irrigatie kan worden beschouwd en geoptimaliseerd met SWAP, maar in deze studie is irrigatie buiten beschouwing gelaten.

De Richards-vergelijking (1) wordt in SWAP numerisch opgelost voor elk bodemcompartiment, met behulp van gespecificeerde randvoorwaarden en relaties tussen θ , h en K , gegeven door de Mualem-Van Genuchten functies:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(h) - S_d(h) - S_m(h) \quad (\text{IV.1})$$

In (1) is θ het volumetrisch watergehalte ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t de tijd (d), $K(h)$ de hydraulische geleidbaarheid (cm d^{-1}), h de waterdrukhoogte van de bodem (cm), z de verticale coördinaat (cm) positief naar boven. $S_a(h)$ de wateropname door wortels ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$), $S_d(h)$ de drainagesnelheid ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$) en $S_m(h)$ de uitwisselingsnelheid met macroporiën ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$).

In deze studie wordt alleen rekening gehouden met de wateropname door wortels (S_a).

2.2.1.1 Randvoorwaarden bodem De ondergrens bevindt zich in de onverzadigde zone of in het bovenste deel van de grondwaterspiegel. De bodemvoorwaarde kan worden bepaald door een opgelegde drukhoogte (bv. grondwaterstand), een opgelegde waterflux (bv. kwel) of een combinatie van beide (bv. q-H relatie), afhankelijk van de toepassing en de ruimtelijke schaal. In totaal biedt SWAP acht opties om de bodemrandvoorwaarde voor te schrijven. In deze studie is gekozen voor optie 5 "Voorgescreven bodemwaterdrukhoogte van het bodemcompartiment".

Voor de gekozen bodemrandvoorwaarde moeten de drukhoogte op de bodem van het bodemprofiel (bodemcompartiment) en de datum worden opgegeven. Tussen de inputdata interpoleert SWAP lineair.

2.2.2 Gewasgroei

Het dynamische gewasgroeimodel WOFOST (De Wit et al. , 2020), geïntegreerd in SWAP, beschrijft de fenologische ontwikkeling, groei en opbrengstvorming van belangrijke akkerbouwgewassen. De potentiële transpiratie en opbrengst worden bepaald door de inkomende straling, kooldioxideconcentratie, luchttemperatuur en gewassenmerken. De werkelijke transpiratie en opbrengst worden berekend op basis van de door SWAP berekende verminderde wateropname van het gewas als gevolg van droogte en/of zuurstofgebrek.

WOFOST berekent hoeveel licht en CO_2 wordt onderschept en potentieel door fotosynthese wordt omgezet. De werkelijke fotosynthese wordt vervolgens berekend door de potentiële fotosynthese te verminderen voor beperkte beschikbaarheid van vocht voor verdamping of zuurstoftekort. Een deel van de tijdens de fotosynthese geproduceerde energie wordt gebruikt voor de onderhoudsademhaling, en een ander deel wordt omgezet in droge stof. Tijdens deze omzetting gaat een deel van de energie verloren als groeiademhaling. De geproduceerde droge stof wordt verdeeld over de verschillende delen van het gewas: wortels, stengels, bladeren en

opslagorganen, afhankelijk van de temperatuur en het ontwikkelingsstadium van het gewas. Sommige gesimuleerde groeiprocessen van het gewas, zoals de maximale fotosynthese en de onderhoudsademhaling, worden beïnvloed door de temperatuur. Andere processen zoals de verdeling van assimilaten of de veroudering van gewasweefsel worden gestuurd door het fenologische stadium van het gewas. Het fenologische ontwikkelingsstadium is ook afhankelijk van de temperatuur.

Een dynamisch grasgroeimodel "GRASS", afgeleid van WOFOST, is specifiek ontwikkeld voor de simulatie van grasland (Kroes & Supit, 2011), om rekening te houden met de verschillen in groeistadia en teeltpraktijken tussen gras en akkerbouwgewassen. Gras is meerjarig en blijft gedurende het grootste deel van het groeiseizoen in de vegetatieve periode. Bovendien wordt het vaak gemaaid of begraaasd. Maaien en begrazen vinden in het model plaats wanneer de bovengrondse droge stof een bepaalde drempelwaarde overschrijdt. Gras wordt gesimuleerd als permanent grasland, en er zijn vijf combinaties van maa- en begrazingsbeheersscenario's beschikbaar. In de praktijk zal het tijdstip van maaien/begrazen afhangen van het bedrijfsbeheer en de interactie tussen verschillende velden. Deze grasmodule is experimenteel en gekalibreerd voor Nederlandse omstandigheden, maar verschillende studies hebben de robuustheid ervan aangetoond (Mulder et al., 2021).

Important

Voor meer informatie over de benodigde gewasparameters en waarden die in deze studie zijn gebruikt, kan de lezer de gewasbestanden raadplegen die in de PEILIMPACT github repository zijn gepubliceerd.

2.2.3 Directe en indirecte effecten

Bij opbrengstvermindering als gevolg van veranderingen in de hydrologische omstandigheden wordt onderscheid gemaakt tussen directe en indirecte effecten. Directe effecten houden verband met water- en zuurstofstress (en zoutstress), terwijl indirecte effecten verband houden met de wijze waarop de heersende hydrologische omstandigheden het zaaien en oogsten beïnvloeden.

2.2.3.1 Rechtstreekse effecten op de opbrengst Suboptimale bodemvochtomstandigheden (te nat of te droog) hebben een directe invloed op de opbrengst van landbouwgewassen. Onder deze omstandigheden vermindert de transpiratie van het gewas door het sluiten van de huidmondjes. Dit vermindert ook de opname van CO₂, wat leidt tot minder fotosynthese en minder groei.

Om de wateropname door plantenwortels te bepalen, berekent SWAP eerst de potentiële transpiratie (d.w.z. de transpiratie bij optimale bodemvochtomstandigheden). Deze wordt berekend op basis van weersvariabelen (zonnestraling, luchttemperatuur, vochtigheid en windsnelheid) en plantkenmerken (gewashoogte, reflectiecoëfficiënt, bladoppervlakte-index en minimale huidmondjesweerstand). De potentiële transpiratie wordt verdeeld over de wortelzone, evenredig met de worteldichtheid, om de potentiële wateropname door de wortels te bepalen.

Vervolgens wordt op basis van de bodemvochtigheid op verschillende diepten in de wortelzone de omvang van de 'stress' door droge of natte omstandigheden bepaald. SWAP gebruikt stressfactoren (0 - 1) voor elke suboptimale conditie, in elk bodemcompartiment, om de werkelijke wateropname door de plantenwortel te berekenen.

$$S_a(z) = \alpha_{rd} * \alpha_{rw} * S_p(z) \quad (IV.2)$$

$$T_{act} = \int_{-D_{root}}^0 S_a(z) dz \quad (IV.3)$$

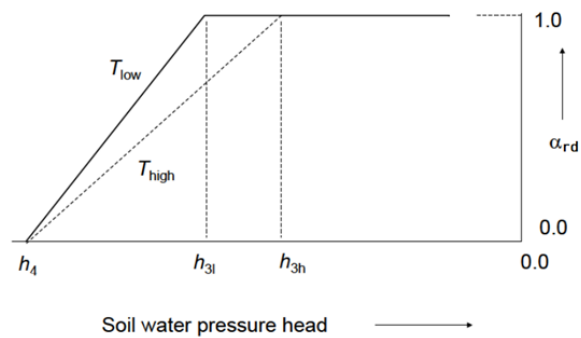
α_{rd} en α_{rw} zijn de stressfactoren voor respectievelijk te droge en te natte omstandigheden. $S_p(z)$ de potentiële wateropname, $S_a(z)$ de werkelijke wateropname in elk bodemcompartiment, en T_{act} de werkelijke transpiratie over de gehele wortelzone, ofwel de som van individuele wortelwateropnames vermenigvuldigd met de compartimentdikte. De transpiratiereductie als gevolg van elk stresstype wordt berekend door de totale reductie in gewaswateropname te vermenigvuldigen met het aandeel van de logaritmische waarde van de corresponderende stressfactor.

$$T_{red,j} = [S_p(z) - S_a(z)] * \frac{\log \alpha_j}{\sum_{i=1} \log \alpha_i} \quad (IV.4)$$

Aangenomen wordt dat de relatieve verdeling in transpiratiereductie gelijk is aan het relatieve opbrengstverlies.

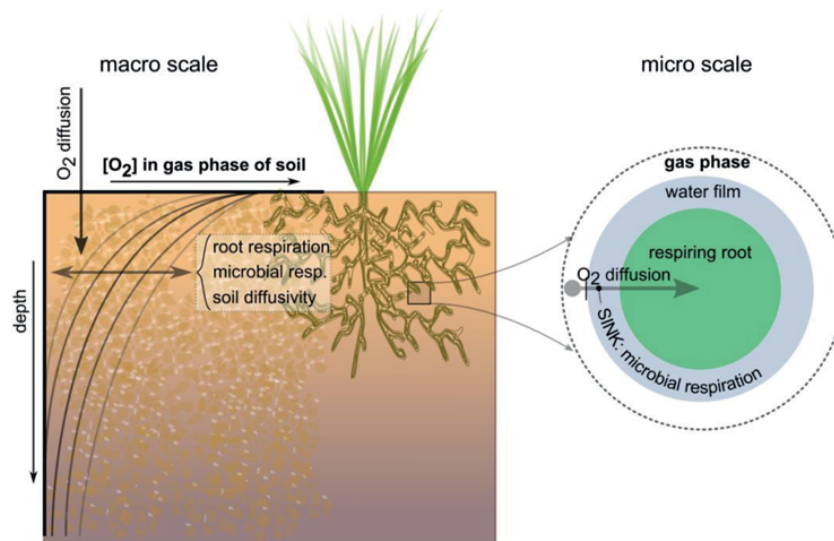
2.2.3.2 Droogtestress De droogtestress wordt berekend aan de hand van de functie van Feddes et al. (1978). Boven h_3 is de wortelwateropname optimaal en treedt er geen droogtestress op. Beneden h_3 neemt de wortelwateropname lineair af tot nul bij het verwelkingspunt h_4 . In het algemeen worden vaste waarden voor h_3 en h_4 gebruikt. De droogtestressdrempel h_3 is echter afhankelijk van het gewasstype, de bodemtextuur, de worteldichtheid en de atmosferische vraag, en de lineaire afname kan afwijken van de werkelijkheid. Daarom is in SWAP een gedetailleerde, microscopische wortelwateropnamemodule voor droogte toegevoegd (de Jong van Lier et al. , 2013) en kan als een meer dynamisch alternatief voor Feddes et al. (1978) worden gekozen.

2.2.3.3 Zuurstofstress Zuurstofstress treedt op wanneer de zuurstofvoorziening van de plantenwortels in het gedrang komt. Onder te natte omstandigheden wordt de lucht in de bodemporiën vervangen door water en wordt de beschikbaarheid van zuurstof beperkend voor de wortelademhaling. Die wordt dan weer bepaald door het zuurstoftransport in de bodem en de vraag van de wortels. Aangezien het gastransport in met water gevulde poriën ongeveer 1000 keer lager is dan in met lucht gevulde poriën, wordt de beschikbaarheid van zuurstof bepaald door het luchtgehalte op een specifieke diepte in de bodem. Naast de wortelrespiratie wordt de beschikbare zuurstof gebruikt micro-organismen. De koppeling met



Figuur 16: Reductiefactor voor de wortelwateropname, α_{rd} als functie van de bodemwaterdrukhoogte (h) en de potentiële transpiratiesnelheid (T_p) (Feddes et al. , 1978)

het gewasgroei-model WOFOST maakt het mogelijk de zuurstofbehoefte van plantenwortels gedetailleerd te beschrijven.



Figuur 17: Schematische weergave van de zuurstofmodule voor de bepaling van de dagelijkse respiratie en transpiratiereductie. De module combineert fysiologische processen, wortel- en microbiële ademhaling, en fysische transportprocessen, diffusie op zowel macro- als microschaal. Figuur uit Bartholomeus et al. (2011).

Het zuurstoftransport wordt in SWAP berekend aan de hand van het door Bartholomeus et al. (2008) voorgestelde model. In dit model is de kritische gasgevulde porositeit voor zuurstofstress afhankelijk van verschillende abiotische (bodemfysische eigenschappen, vochtgehalte, temperatuur) en biotische factoren (plantkenmerken). Daarom wordt het model van Bartholomeus et al. (2008) toegepast voor elke bodemlaag.

2.2.3.4 Indirecte effecten op de opbrengst In SWAP verwijzen indirecte effecten naar beperkingen in normale landbouwpraktijken door te natte of te koude omstandigheden, waardoor het groeiseizoen uiteindelijk wordt verkort. Het gaat hierbij om beperkte draagkracht voor grondbewerking, zaaien/planten of oogsten, vertraagde kieming en gewasschade (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018). Andere indirecte effecten zoals veranderingen in kwaliteit van

de oogst, bodemkwaliteit, plagen of ziekten blijven buiten beschouwing in dit model. Meer context over verschillende indirecte effecten is te vinden in het hoofdstuk Impact van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren. Indirecte effecten zoals plagen en ziekten en een tekort aan voedingsstoffen worden verrekend in één enkele beheersfactor "RELMF", die varieert per gewastype. Deze factoren zijn verkregen uit verschillende experimenten onder Nederlandse omstandigheden en expertkennis. Nutriëntentekort tijdens de groeiperiode is niet geïmplementeerd in deze versie van het model, maar er is wel een stikstofmodule beschikbaar (Groenendijk et al. , 2016).

Voor akkerbouwgewassen worden verschillende machines gebruikt voor voorbereidende werkzaamheden (d.w.z. grondbewerking), zaaien of planten en oogsten. De start van elk van deze fasen moet worden uitgesteld als de bodem te nat is voor de machines om het veld te betreden, of te koud om het zaad te laten ontkiemen. In het model wordt dit bepaald op basis van een zuigspanningscriterium dat is afgeleid van Beuving (1982), en een temperatuurcriterium in geval van kieming (temperatuursom die nodig is voor de opkomst van het gewas). Op 15 cm diepte moet worden voldaan aan een bepaalde zuigspanning voordat met voorbereidende werkzaamheden, zaaien of oogsten kan worden begonnen, hetgeen afhankelijk is van bodem- en gewaseigenschappen. Waterwijzer Landbouw onderscheidt twee categorieën voor het criterium: lichtgewicht en zwaargewicht. Dit is een gewichtscategorie die afhankelijk is van het moment van grondbewerking en het gewicht van de meest gangbare machine voor het specifieke gewas (tabel 4.1, 4.2 en 4.4 van Werkgroep Waterwijzer Landbouw (2018)). Ploegen valt altijd onder de zware categorie. Voor het zaaien vallen maïs en aardappelen in de zware categorie, terwijl wintertarwe en suikerbieten in de lichte categorie vallen. Voor de oogst vallen alle vijf de gewassen in de zware categorie.

Bij gras houden indirecte effecten verband met onvoldoende draagkracht voor maaien of begrazen. Wanneer in dit geval een bepaalde zuigspanning op 15 cm diepte voor maaien of op 10 cm diepte voor begrazing, wordt overschreden, neemt de oogst met een bepaald percentage af, afhankelijk van de mate van overschrijding. In deze studie is alleen rekening gehouden met maaien, aangezien dit in Vlaanderen het belangrijkste grasbeheer is.

Om de zuigspanningsgrenswaarden voor de Vlaamse bodems te bepalen, werd de eerste bodemlaag van elk bodemprofiel eerst vertaald naar de Nederlandse bodemclassificatie "De Staringreeks" (Heinen et al. , 2020) op basis van de bodemtextuur en het organisch materiaal. Vervolgens werd aan elk bodemprofiel en gewas de juiste zuigspanningsgrenswaarde toegekend voor beide categorieën. Table 7 bevat de verschillende drukhoogtes die voor de Vlaamse bodemtypes zijn gebruikt, volgens de categorieën licht en zwaar. Dit is een vrij eenvoudige methode, maar zij maakt het mogelijk benaderde drukhoogtewaarden in het model op te nemen en indirecte effecten te berekenen.

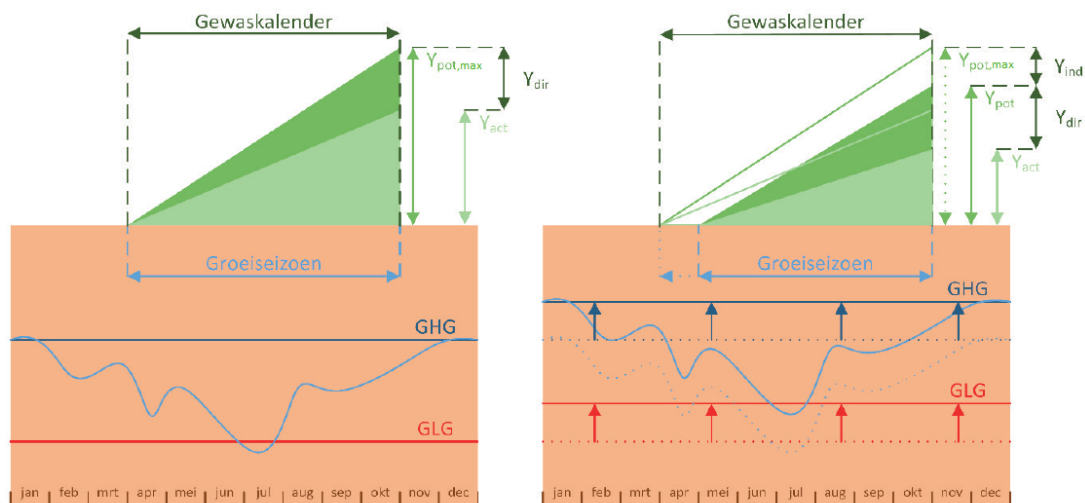
Door rekening te houden met de mogelijkheid dat het groeiseizoen wordt verschoven of ingekort, introduceert het model in feite een "tweede" berekende potentiële gewasopbrengst voor een suboptimaal groeiseizoen. Onderstaande figuur illustreert hoe indirecte effecten in het model worden berekend. Zonder indirecte effecten zou de situatie vergelijkbaar zijn met de figuur links (referentiesituatie), waarin alleen rekening wordt gehouden met water- en zuurstofstress en de potentiële opbrengst ($Y_{pot,max}$) het maximaal haalbare is onder de heersende weersomstandigheden. Bij vernatting kan de situatie gaan lijken op de figuur rechts,

Tabel 7: Drukopvoeringscriterium op 15 cm diepte volgens lichte en zware categorie, voor verschillende grondsoorten in Vlaanderen. Waarden zijn overgenomen uit tabel 4.1 van Werkgroep Waterwijzer Landbouw (2018).

| Staring bouw-steen | Beschrijving | Belgische bodem-classificatie | Vorbereidende werkzaamheden | Drukhoogte op 15 cm diepte (cm) Lichte categorie | Drukhoogte op 15 cm diepte (cm) Zware categorie |
|---------------------------|--|---|------------------------------------|---|--|
| B01- B04 | Zwakke leem tot zeer sterke leem met zeer fijn tot matig fijn zand | zand (Z) lemig zand (S) lichte zandige leem (P) zandige leem (L) | lente | -50 | -60 |
| B07 | Zeer licht slib | lichte zandige leem (P) lemig zand (S) zandige leem (L) leem (A) | herfst | -60 | -60 |
| B08 | Matig lichte leem | zandige leem (L) leem (A) | herfst | -60 | -90 |
| B09 | Zwaar slib | leem (A) klei (E) | herfst | -60 | -90 |
| B10-B12 | Lichte tot zeer zware klei | klei (E) zware klei (U) | herfst | -70 | -100 |
| B13 | Zandige leem | zandige leem (L) leem (A) | herfst | -70 | -100 |
| B17 | Veenachtige klei | leem (A) | lente | -60 | -80 |

waarin indirecte effecten nu een rol spelen en het groeiseizoen wordt verkort. In deze situatie omvatten de "tweede" potentiële opbrengst (Y_{pot}) en de werkelijke opbrengst impliciet de vermindering als gevolg van indirecte effecten. In dit geval, om de maximale potentiële gewasopbrengst $Y_{pot,max}$ te bepalen (dus zonder indirecte effecten), gaat het model uit van een diepe grondwaterstand van 5 m. Zo worden indirecte effecten van te natte omstandigheden als gevolg van ondiepe grondwaterstanden te minimaliseren. Het verschil tussen deze potentiële opbrengsten vertegenwoordigt de opbrengstvermindering als gevolg van indirecte effecten.

$$RED_{ind}(\%) = \frac{(Y_{pot,max} - Y_{pot})}{Y_{pot,max}} * 100 \quad (IV.5)$$



Figuur 18: Voorbeeld van de berekening van de potentiële en de werkelijke opbrengst wanneer rekening wordt gehouden met directe en indirecte effecten. Links is de referentiesituatie weergegeven en rechts de situatie na een bevochtigingsmaatregel. Het donkergroene vlak geeft de potentiële gewasopbrengst weer en het lichtgroene vlak de werkelijke gewasopbrengst. Figuur ontleend aan Werkgroep Waterwijzer Landbouw (2018).

2.2.4 Opbrengstvermindering

De potentiële gewasopbrengst wordt berekend met behulp van het dynamische gewasmodel als functie van het CO_2 -gehalte, de zonnestraling, de temperatuur, de gewassenmerken en op basis van het zuigspanningscriterium en het temperatuurcriterium aan het begin en het einde van het groeiseizoen. De transpiratiereductie als gevolg van directe effecten (te droge en te natte omstandigheden) wordt gebruikt om de werkelijke gewasopbrengst te berekenen. De totale opbrengstvermindering (RED_{TOT}) is het relatieve verschil tussen de maximale potentiële opbrengst ($Y_{pot,max}$) en de werkelijke opbrengst (Y_{act}). De opbrengstvermindering door directe effecten is het verschil tussen RED_{TOT} en RED_{ind} .

$$RED_{TOT}(\%) = \frac{(Y_{pot,max} - Y_{act})}{Y_{pot,max}} * 100 \quad (IV.6)$$

$$RED_{dir}(\%) = RED_{TOT}(\%) - RED_{ind}(\%) \quad (IV.7)$$

De opbrengstvermindering als gevolg van elk stresstype wordt berekend door RED_{dir} te vermenvuldigen met het aandeel van elke transpiratievermindering, $T_{red,j}$ uit vergelijking 4.

$$RED_j = RED_{dir} * \frac{T_{red,j}}{T_{pot} - T_{act}} \quad (IV.8)$$

De potentiële en werkelijke gewasopbrengst en de opbrengstvermindering is de belangrijkste modeloutput in deze studie.

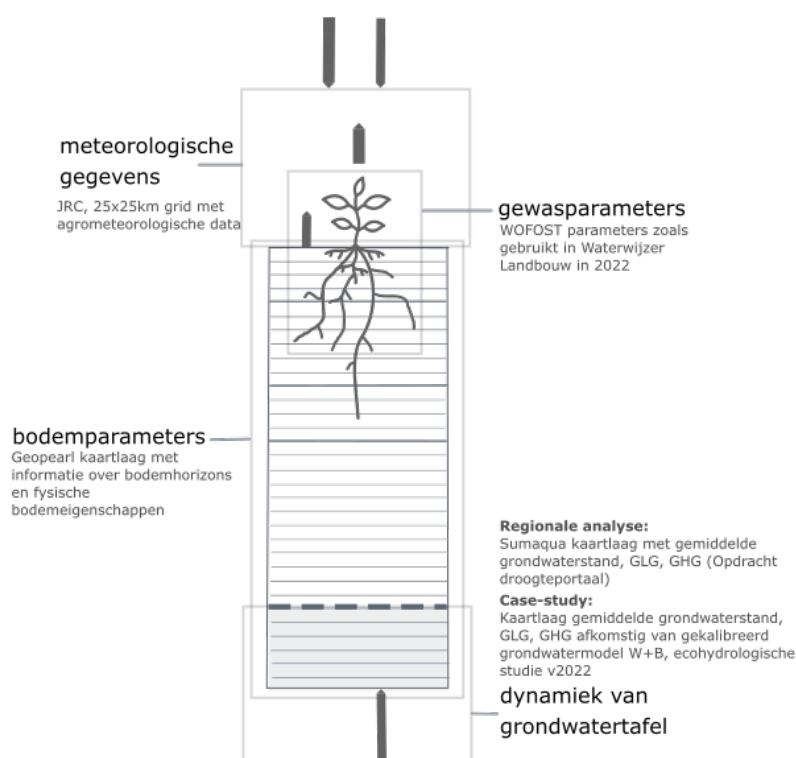
2.3 Model Input

Om realistische modelresultaten te verkrijgen, is een goede schatting van de randvoorwaarden en bodemeigenschappen van fundamenteel belang. In deze regionale versie voor Vlaanderen is gebruik gemaakt van vrij beschikbare datasets en kaarten voor heel Vlaanderen (online of op aanvraag), verkregen van Vlaamse instellingen of uit eerdere projecten (Table 8). Ondanks de inherente beperkingen van dergelijke generieke en grootschalige gegevens, is de informatie geschikt om het model op regionale schaal toe te passen. Meer gedetailleerde informatie over de verschillende inputdatalagen volgt hier.

Opmerking: Voor de case-study De Zegge-Mosselgoren (Case-study: landbouwgebied De Zegge) werd deze inputdata (weersgegevens en bodeminformatie) gecombineerd met de grondwaterstanden uit een lokaal gekalibreerd grondwatermodel (voorlopige resultaten) uit de "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurreserveaat De Zegge" (Witteveen+Bos) in plaats van met de algemene kaart van gemiddelde grondwaterstanden die voor de regionale analyse van Vlaanderen wordt gebruikt. Jammer genoeg liep deze studie erg achter op de planning, waardoor we niet kon werken met finale resultaten van de ecohydrologische studie en ook geen toekomstige scenario's konden doorrekenen om de effecten op landbouw te becijferen.

Extra kaartlagen (bv. provincies, grote rivieren) werden gedownload uit de Atlas van België, voor grafische doeleinden.

Om de invoergegevens te koppelen aan de overeenkomstige locatie (d.w.z. coördinaten) in Vlaanderen werden ASCII-kaarten gebruikt. Deze kaarten werden gegenereerd in QGIS 3.22, met het Belgische Lambert 72 (EPSG: 31370) projectiesysteem. Voor de regionale analyse werden de kaarten gehomogeniseerd tot een resolutie van 500 m met behulp van een eenvoudig opschalingscriterium, "gemiddelde waarde" of "meerderheid" in de Resampling tool. Voor de case-study werd de oorspronkelijke resolutie behouden.



Figuur 19: Schematisch overzicht van welke informatie/data gebruikt werd om de modelparameters en nodige inputvariabelen vorm te geven in het modelkader van PEILIMPACT. Indien een gebruiker over meer nauwkeurigere data beschikt voor een of meerdere van deze componenten, kunnen die de hier toegepaste datalagen vervangen.

Tabel 8: Overzicht van de in SWAP-WOFOST gebruikte invoergegevens.

| Invoergegevens | Beschrijving | Bron |
|--|---|--|
| Meteorologische gegevens | Dagelijks geïnterpoleerde meteorologische variabelen van 01/01/1990 tot 31/12/2021, resolutie 25 x 25 km. | Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (GCO) |
| Gewasgegevens | Plant- en oogstdata | ILVO en de Nederlandse oogstkalender |
| Gegevens over de bodem | Bodemtextuur, bodemhydraulische parameters en verticale discretisatie van 536 bodemprofielen over Vlaanderen. | Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek (VITO), van het GeoPearl model (Joris et al., 2017). |
| Grondwaterniveaus (GWL) kaarten (Regionale schaal) | Gemiddelde GWL, gemiddelde hoogste GWL (GHG) en gemiddelde laagste GWL (GLG) kaarten, resolutie 100 m. | Effecten van Klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden (Sumaqua) (Franken & Wolfs, 2022) |
| Grondwaterniveaus (GWL) kaarten (Case-study) | Gemiddelde GWL, gemiddelde hoogste GWL (GHG) en gemiddelde laagste GWL (GLG) kaarten, resolutie 10 m. | "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurgebied De Zegge" (Witteveen + Bos) (lopende studie) |

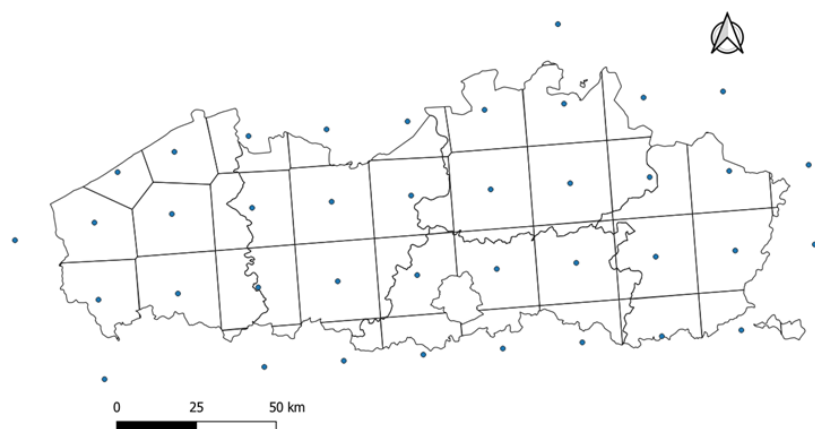
Tabel 9: Meteorologische variabelen en hun eenheden zoals vermeld door het JRC.

| Variabele | Eenheden |
|--|------------------------------------|
| Maximale luchttemperatuur | °C |
| Minimum luchttemperatuur | °C |
| Gemiddelde dagelijkse windsnelheid op 10 m | m s ⁻¹ |
| Dampdruk | hPa |
| Neerslagsom | mm d ⁻¹ |
| Totale globale straling | kJ m ⁻² d ⁻¹ |

2.3.1 Meteorologische gegevens

Het Joint Research Center (JRC) beheert dagelijks geïnterpoleerde agrometeorologische gegevens voor Europa en de buurlanden, met een resolutie van 25 km, van 1979 tot het laatste afgesloten kalenderjaar. We gebruikten gegevens van 01/01/1979 tot 31/12/2021 in dit project. Table 9 bevat de meteorologische informatie van het JRC die in het model is gebruikt. De eenheden werden omgezet en geformatteerd voordat ze in het model werden gebruikt.

De meteorologische rasterkaart werd opgebouwd op basis van de coördinaten (blauwe punten) van de meteorologische rasters zoals gegeven door JRC en met toepassing van voronoi polygons in QGis. Op deze manier kon het overeenkomstige gebied voor elk punt worden bepaald, wat vergelijkbaar is met een raster met een resolutie van 25 km x 25 km. Ten slotte werd de kaart geëxporteerd naar een resolutie van 500 m.



Figuur 20: Rasterkaart met de locatie van de meteorologische roosters van het GCO.

2.3.2 Gewasgegevens

Typische plant- en oogstdata in Vlaanderen werden bepaald met de hulp van ILVO-deskundigen. Deze data zijn vergelijkbaar met die van Waterwijzer Landbouw. Table 10 toont het groeiseizoen voor de 5 gewassen die in deze studie zijn gemodelleerd, samen met hun plant-, oogst- en maaiperiode (in het geval van gras) in Vlaanderen. De data in de tabel geven de in het model gebruikte plant- en oogstdata aan.

Tabel 10: Gewaskalender van de 5 met SWAP-WOFOST gesimuleerde gewassen. De gekleurde cellen staan voor de tijdspanne voor het planten, oogsten en maaien (in het geval van gras) in Vlaanderen, terwijl de specifieke data de in het model gebruikte plant- en oogstdata zijn.

| Gewas | Jan | Feb | Maa | Apr | Mei | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dec |
|-------------|-------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-------|-------|-------|
| Aardappel | | | | 15/04 | | | | | | 01/10 | | |
| Kuilmaïs | | | | 25/04 | | | | | | 01/10 | | |
| Wintertarwe | | | | | | | | 20/08 | | 10/10 | | |
| Suikerbiet | | | 16/03 | | | | | | | | 15/11 | |
| Gras | 01/01 | | | | | | | | | | | 31/12 |

| |
|----------------|
| Groeiseizoen |
| Zaaien/Planten |
| Oogsten |
| Maaien |

2.3.3 Gegevens over de bodem

Bodemtextuur, bodemhydraulische parameters en karakterisering van de bodemprofielen over Vlaanderen werden aangeleverd door het Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek (VI-TO), uit het GeoPearl model (Joris et al. , 2017). Er zijn in totaal 536 dominante bodemeenheden gedefinieerd over Vlaanderen. Bodemtextuur, organische koolstof en pH voor elke bodemhorizon werden geëxtraheerd uit de Aardewerk database 2010 (VPO, 2011) en de Belgische bodemkaart (VPO & IWT, 2014). De hydraulische eigenschappen van de bodem werden berekend aan de hand van de geëxtraheerde bodemeigenschappen en de pedotransferfuncties van Wösten et al. (1999). Vervolgens waren bodemprofielen gedefinieerd tot een diepte van 3 m en onderverdeeld in 5 tot 7 horizonten. In deze studie is de diepte van de bodemprofielen uitgebreid tot 6 m met de eigenschappen van de onderste horizon.

We schatten de bulkdichtheid (BD) volgens de formule van Vereecken (1988), weergegeven in (5), die afhangt van het percentage organische koolstof (C_{org}). Deze formule geldt voor de texturen zand (Z), lemig zand (S) en licht zandig leem (P). Voor andere textuurklassen wordt de bulkdichtheid verondersteld gelijk te zijn aan $1,48 \text{ g cm}^{-3}$. Dit is uiteraard een vereenvoudiging van de realiteit. De bulkdensiteit heeft in SWAP vooral belang voor het bepalen van de maximale worteldiepte van de gewassen.

$$BD = 1.634 - 0.0948 * C_{org} \quad (IV.9)$$

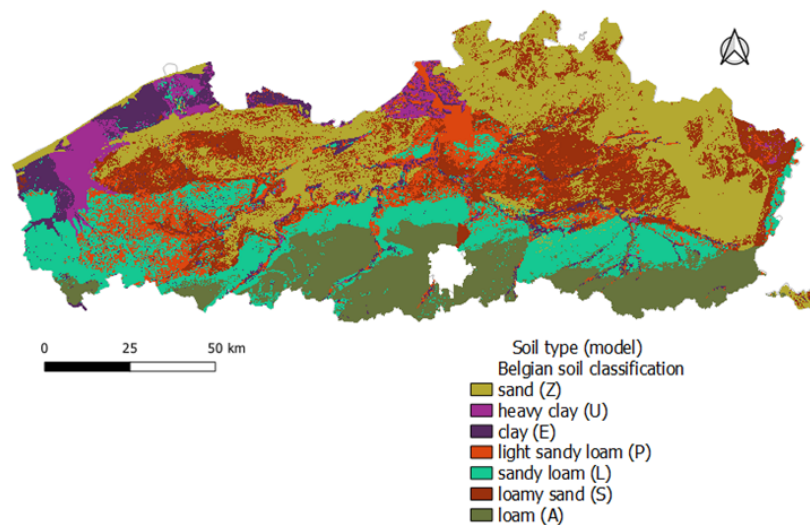
$$BD = 1.48 \quad (IV.10)$$

2.3.3.1 Bodemtextuur volgens de Belgische bodemclassificatie Voor data-analyse en -interpretatie groepeerden we deze bodemprofielen volgens bodemtextuur in de bovenste bodemlaag. De bodemtextuurklasse volgens het Belgische bodemclassificatiesysteem (Dondeyne et al. , 2014;

Tabel 11: Maximale bewortelingsdiepte naar gelang van de in het model aangenomen gewassenmerken.

| Gewas | Maximale bewortelingsdiepte (cm) |
|-------------|----------------------------------|
| Aardappel | 50 |
| Kuilmaïs | 100 |
| Wintertarwe | 125 |
| Suikerbiet | 120 |
| Gras | 40 |

Van De Vreken et al. , 2009) werd voor elk van de 536 bodemeenheden bepaald op basis van het klei- en zandgehalte van de eerste bovenste bodemlaag.



Figuur 21: Bodemtextuur volgens het Soil Belgian Classification System, gebaseerd op de in het model gebruikte textuurinformatie.

Deze kaart is minder gedetailleerd dan de Belgische bodemkaart omdat de classificatie enkel gebaseerd is op het klei- en zandgehalte en dit van de eerste laag en dient vooral om trends tussen gewasopbrengst, grondwater en bodemtypes te visualiseren.

2.3.3.2 Maximale bewortelingsdiepte De maximale bewortelingsdiepte is afhankelijk van plant- en bodemkenmerken. Ranges van maximale bewortelingsdieptes voor verschillende gewassen zijn te vinden in de FAO-richtlijnen (Allen et al. , 1998). Wij hebben voor elk gewas de maximale bewortelingsdiepte behouden zoals gedefinieerd binnen Waterwijzer Landbouw (Table 11), die enigszins afwijkt van de door de FAO verstrekte waarden. Normale wortelgroei kan echter worden beperkt door de aanwezigheid van harde bodemlagen, verdichting en grenzen in de bodem (bv. rotsen) (Moore et al. , 1998). Daarom werd rekening gehouden met wortelgroei-beperkingen wanneer:

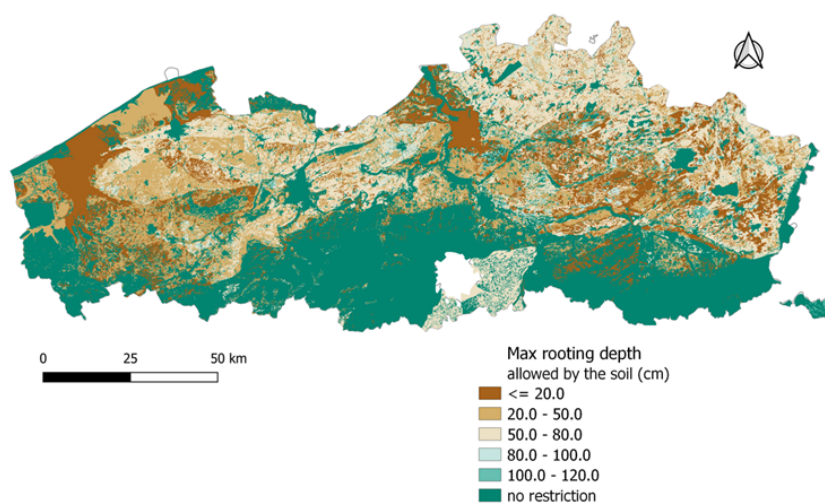
- pH <4,0
- BD >BD berekend door lineaire interpolatie voor het respectieve kleigehalte, tussen de punten: BD = 1,6 g/cm³ en klei = 20 %, en BD = 1,2 g/cm³ en klei = 65 %.

Warning

De maximale bewortelingsdiepte correct inschatten is wel degelijk belangrijk voor het kwantificeren van zowel droogte- als zuurstofstress. Hoe dieper de wortels water kunnen opnemen, hoe meer toegang ze krijgen tot water in het diepere deel van de bodem. Dat zal tijdens droogte minder (snel) stress opleveren. Anderzijds zullen diepwortelende gewassen ook eerder te kampen krijgen met zuurstofstress bij hoge grondwaterstanden. Indien er lokale informatie beschikbaar is over worteldieptes, is het dus raadzaam te kijken of de aannames hierboven al dan niet moeten worden aangepast.

Ter vergelijking: voor de berekeningen van wateropname in het Vlaams Reactief Afwegingskader Waterschaarste ging de Bodemkundige Dienst van België uit van de volgende worteldieptes: Aardappel - 45 cm, Kuilmaïs - 60 cm, Suikerbiet - 60 cm, Grasland - 60 cm.

De SWAP routine gaat voor elke bodemlaag de BD na en wanneer de BD overschreden wordt of PH lager dan 4 is, kunnen wortels niet dieper groeien, ook al is dat theoretisch nog mogelijk. De minimale bewortelingsdiepte is 10 cm voor gras en 20 cm voor de andere gewassen. Indien de bodem geen beperkingen zou opleggen, is de maximale bewortelingsdiepte diegene zoals weergegeven in Tabel 5.



Figuur 22: Ruimtelijke variatie van de maximale bewortelingsdiepte die de bodem volgens het model toelaat.

2.3.3.3 Discretisering van de bodem Om realistische simulaties van de waterinfiltratie in de bodemmatrix te krijgen, vooral aan het bodemoppervlak, moeten de gridcellen of bodemlaagjes van het verticale bodemprofiel voor de numerieke oplossing van de Richards-vergelijking klein genoeg zijn. De SWAP-handleiding (Kroes et al. , 2017) geeft enkele richtlijnen om de dikte van de laagjes te bepalen, die zijn weergegeven in Tabel 6. De initiële discretisatie uit de GeoPearl bodeminvoer is daarom aangepast om aan deze richtlijnen te voldoen.

Tabel 12: Verticale discretisatie van het bodemprofiel voor de numerieke oplossing van de vergelijking van Richard.

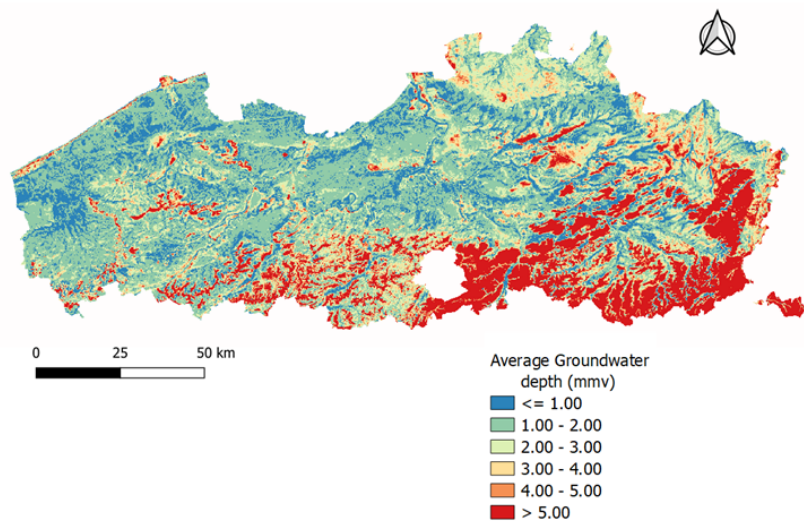
| Diepte van het bodemprofiel (cm) | Dikte van het compartiment (cm) |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 0 - 50 | 1 |
| 50 - 80 | 2 |
| 80 - 140 | 5 |
| 140 - 200 | 10 |
| 200 - 300 | 20 |
| 300 - 600 | 25 |

2.3.4 Freatische grondwaterniveaus

Sumaqua leverde kaarten aan van gemiddelde grondwaterstanden, en gemiddelde hoogste (GHG) en laagste grondwaterstanden (GLG) kaarten, met 100 m resolutie, opgemaakt in het kader van het project "Actualiseren grondwaterstandsindicator en berekening effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden" (Franken & Wolfs, 2022). De gemiddelde grondwaterstanden voor alle pixels werden verkregen uit Machine Learning (ML) getraind met een groot aantal waarnemingen in Vlaanderen (5673 locaties). De GHG en GLG kaarten werden benaderd met ML op basis van de resultaten van 217 lange termijn SWAP simulaties, voor punten waar correlatie tussen neerslag en grondwater werd waargenomen. De GHG- en GLG-kaarten bevatten geen informatie over locaties dicht bij waterlopen, waar die correlatie over het algemeen niet bestaat. Merk op dat de gegenereerde kaarten voorspellingen zijn en niet noodzakelijk geldig zijn op locaties waar drainage of grondwateronttrekkingen aanwezig zijn zonder een peilput in de buurt om het algoritme te trainen.

Verschillende natuurlijke factoren zijn betrokken bij de schommelingen van de grondwaterstand (GWL) en de reactietijd van het grondwatersysteem op een bepaalde neerslaggebeurtenis (time lag). Eén factor is het cumulatieve neerslagtekort (neerslag - referentie-evapotranspiratie, $P-ET_{ref}$). De tijdsrespons van het systeem kan echter variëren van minder dan een maand tot zelfs jaren. Deze tijdsvertraging wordt voornamelijk beïnvloed door de diepte van het grondwater (Wossenyeh et al., 2020; Londot & Huysmans, 2021), die ook bepaalt hoe sterk de seizoensgebonden effecten van de neerslag in het grondwater zijn. Ondiepe grondwaterstanden hebben normaal gesproken meer correlatie met $P-ET_{ref}$ dan diepe. Wossenyeh et al. (2020) vonden dat bij relatief ondiepe grondwatertafels (<10 m) de vertraging varieert tussen 0-2 maanden. Op plaatsen dicht bij rivieren, sloten of afwateringen zullen de grondwaterfluctuaties echter meer beïnvloed worden door de oppervlaktewaterstanden in plaats van door de $P-ET_{ref}$. Een andere factor is de bodemtextuur, die de opslagcapaciteit van de bodem bepaalt. Naast deze natuurlijke factoren zijn er ook antropogene omstandigheden, zoals onbekende grondwateronttrekkingen en rioleringen, die de grondwatertafelschommelingen eveneens beïnvloeden.

2.3.4.1 Beschrijving van de freatische grondwaterdynamiek De seizoensgebonden schommelingen van het grondwater zijn van cruciaal belang om het effect ervan op de groei van akkerbouwgewassen te voorspellen. Toch beschrijft de beschikbare informatie in Vlaanderen deze dynamiek niet voor alle locaties op de kaart. In deze studie werden de grondwaterfluc-

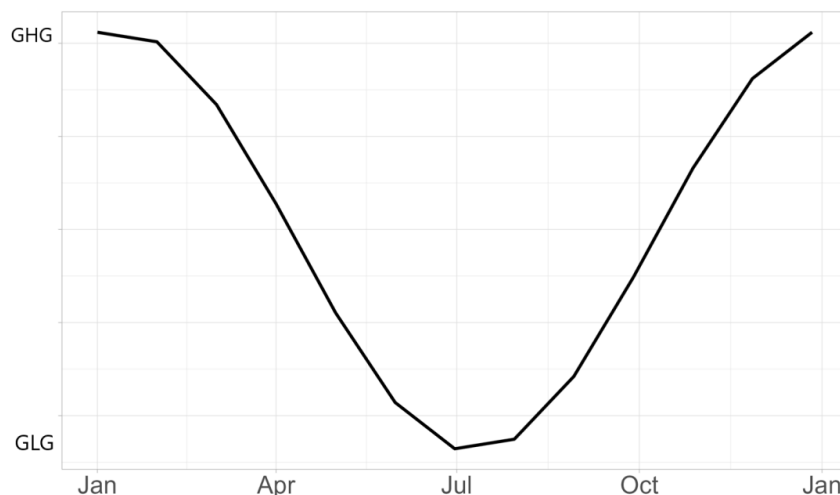


Figuur 23: Ruimtelijke variatie van de grondwaterstanden in Vlaanderen (Franken en Wolfs, 2022)

tuaties benaderd door een sinusfunctie met een amplitude bepaald door de GLG en GHG op die locatie. Deze sinuscurve werd op elke locatie berekend en varieert met de gemiddelde hoogste (GHG) en laagste grondwaterstand (GLG), maar blijft constant door de jaren heen. De vorm van de curve is gebaseerd op de maandelijkse $P-ET_{ref}$ over Vlaanderen voor de periode 1979-2021.

$$GWL = GHG - Amp + \sin\left(\left(days + 80\right) * \frac{\pi}{180}\right) * Amp \quad (IV.11)$$

$$Amp = \text{abs}(GLG - GHG)/2 \quad (IV.12)$$

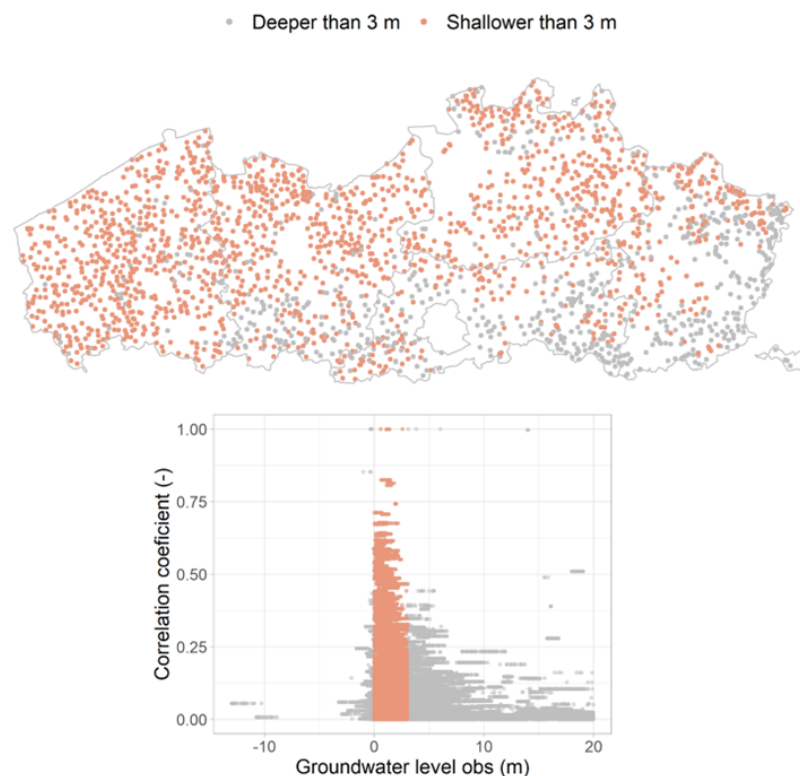


Figuur 24: Gemiddeld grondwaterregime benaderd met de sinusfunctie op basis van de GHG en GLG.

Aangezien de GHG- en GLG-kaarten zijn ontwikkeld uitgaande van een zekere correlatie tussen neerslag, evapotranspiratie en grondwaterstanden, is het voor een adequaat gebruik van de beschikbare informatie ook van belang de locaties te bepalen waar deze correlatie optreedt.

Gebieden die enige correlatie vertonen, zouden kunnen worden gemodelleerd met de sinusfunctie op basis van GHG en GLG, terwijl gebieden zonder correlatie eenvoudigweg zouden kunnen worden gemodelleerd met de gemiddelde grondwaterstanden.

Daarom is een correlatieanalyse uitgevoerd om deze gebieden te identificeren. Daartoe zijn met behulp van het pythonpakket pydov grondwaterstandwaarnemingen (2732) gedownload van het DOV. Deze waarnemingen zijn vergeleken met het maandelijkse neerslagtekort ($P-ET_0$), volgens hun specifieke locatie. De resultaten van de correlatieanalyse en de locatie van deze waarnemingen in Vlaanderen zijn weergegeven in figuur 10. Locaties met enige correlatie ($>0,25$) hebben een GWL die meestal ondieper is dan 3 m (oranje). Daarom werd de sinusfunctie alleen gebruikt op deze locaties, waar het gemiddelde GWL ondieper was dan 3 m.



Figuur 25: Correlatie tussen neerslagtekort en grondwaterstanden. GWL ondieper dan 3 m zijn in oranje weergegeven. Positieve grondwaterstanden liggen onder het bodemoppervlak.

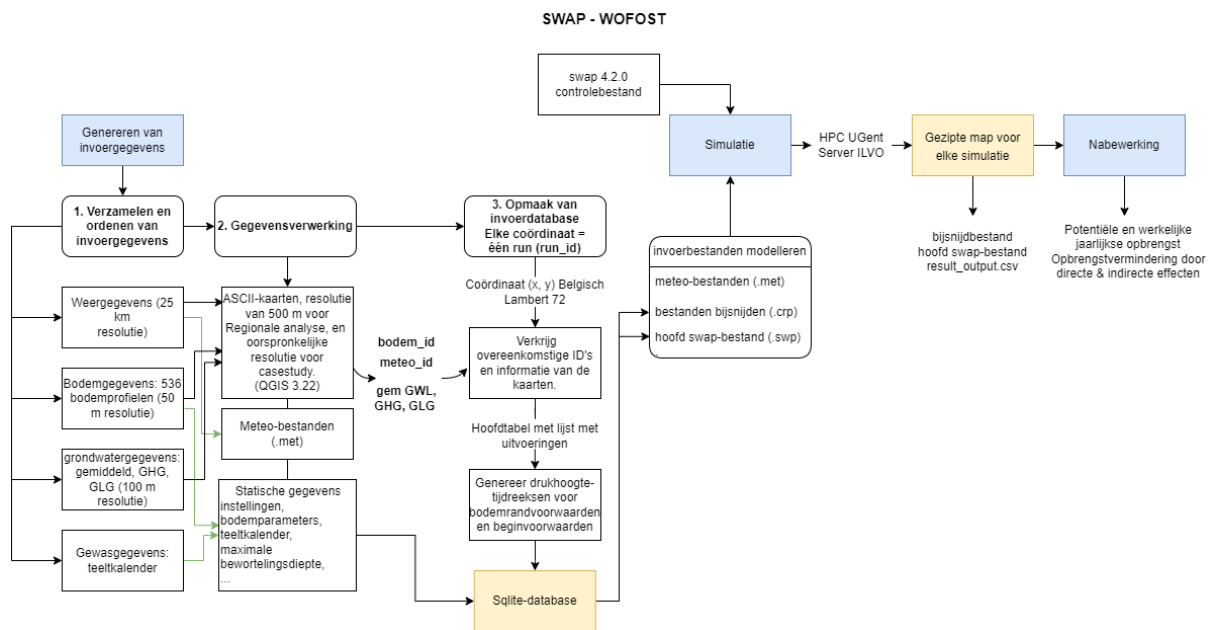
De grondwaterstanden (GWL) dienden als onderste randvoorwaarde in het model. De GWL werden omgezet in drukhoogten om optie 5 in SWAP te kunnen gebruiken. Drukhoogtes werden verkregen op basis van de referentie op 600 cm diepte, de omvang van het bodemprofiel.

2.4 Opzet en werking van het model

Het uitvoeren en analyseren van modelsimulaties omvatte drie belangrijke stappen:

1. Genereren van invoergegevens
2. Modelrun
3. Postprocessing

Het model heeft drie belangrijke invoerbestanden nodig: meteobestanden (.met), gewasbestanden (.crp) en het hoofdwisselbestand (.swp). Deze bestanden worden voorzien van informatie uit de Sqlite-databank. Het model draait met behulp van de model executable en deze invoerbestanden. Het bestand "result_output.csv" is de belangrijkste output van het model, dat outputvariabelen bevat zoals de dagelijkse gewastranspiratie en biomassa, die eerder in de sqlite-databank zijn gedefinieerd. Tijdens de nabewerking worden de potentiële en werkelijke droge stof opbrengst voor elk jaar en de opbrengstvermindering door waterstress en/of indirecte effecten berekend.



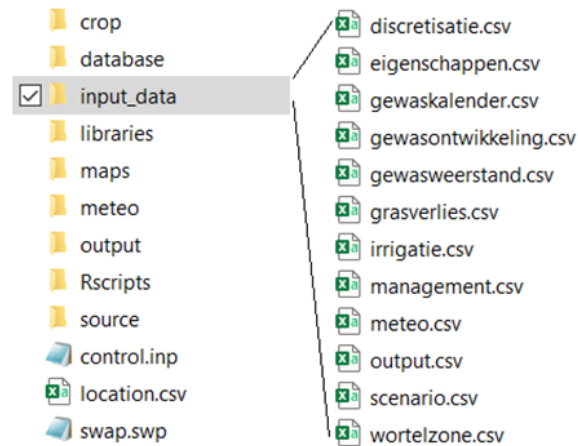
Figuur 26: Flowchart van het genereren van invoergegevens, het uitvoeren van het model en het verwerken van de modelresultaten met behulp van SWAP-WOFOST.

De eerste stap om het model uit te voeren is het genereren van invoergegevens. De structuur van de mappen met invoergegevens is weergegeven in bovenstaande figuur. De gewasmap bevat de gewasbestanden (.crp), waarin gedetailleerde gewasparameters voor de simulatie van gewasgroei en biomassa-assimilatie worden gespecificeerd. Het bestand **location.csv** bevat de coördinaten (in Belgische Lambert 72) van elke locatie waar het model zal worden uitgevoerd. De map **input_data** bevat de meeste inputgegevens voor elke run, zoals bodemparameters, gewasmanagementparameters en andere inputvariabelen, die worden opgeslagen in de Sqlite-databank. De map **maps** bevat de rasterkaarten voor meteo- en bodem-ID's, en gemiddelde GWL-, GHG- en GLG-waarden. Deze informatie wordt ook opgenomen in de database. Sqlite-databases worden vervolgens opgeslagen in de map **database**. Voor elk gewasstype zijn vijf Sqlites-databases gemaakt, ervan uitgaande dat elk gewas het hele gebied bestrijkt.

De map **meteo bevat** de weerkundige tijdreeksen voor elk raster van 25 x 25 m, in het juiste formaat (.met), en de CO₂-emissies (.co2) tot 2021. De map **source** bevat het uitvoerbare model, versie 4.2.0. De mappen **libraries** en **R-scripts** bevatten de R-bibliotheken en R-scripts voor het genereren van de databases en het uitvoeren van het model.

Het ****swap.**swp**-bestand is het hoofdwisselbestand, dat algemene informatie bevat over si-

mulatie, meteorologie, gewasrotatie, irrigatie, bodemwaterstroming, warmtestroming en transport van opgeloste stoffen. Het hoofdwisselbestand haalt de benodigde informatie uit de sqlite database. Het controlebestand **control.inp** bevat mappen en paden van de invoergegevensbestanden.



Figuur 27: Organisatie van de mappen met invoergegevens voor het uitvoeren van SWAP-WOFOST.

De volgende stap is het uitvoeren van het model. Dit kan rechtstreeks in R-studio of via een batchbestand. Voor de regionale analyse werden de simulaties uitgevoerd in de supercomputer van de UGent en/of de ILVO-server. In de regionale analyse komt elke simulatie overeen met een gridcel met een resolutie van 500 m. In de casestudy komt elke simulatie overeen met het centrum van een landbouwperceel.

De uitvoer van het model is beschikbaar in een gecomprimeerde map met het gewasbestand, het hoofd-SWAP-bestand en het bestand result_output.csv. Het bestand result_output.csv bevat de dagelijks gesimuleerde potentiële en werkelijke transpiratie, transpiratiereductie door droge en natte omstandigheden, potentiële en werkelijke opbrengst en grondwaterstanden.

De laatste stap is de nabewerking van de modelresultaten, waarbij de jaarlijkse opbrengsten en de totale opbrengstreductie als gevolg van directe (d.w.z. waterstress) en indirecte effecten, en de gemiddelde GHG en GLG worden bepaald.

De modelinstrumenten en algemene gegevenslagen voor Vlaanderen kunnen gratis worden gedownload van de PEILIMPACT github repository.

2.5 Referenties

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) (Vol. 56). FAO - Voeding.

Bartholomeus, R. P., Witte, J.-P. M., van Bodegom, P. M., van Dam, J. C., & Aerts, R. (2008). Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 147-165. 10.1016/j.jhydrol.2008.07.029

Bartholomeus, R. P., Witte, J.-P. M., van Bodegom, P. M., van Dam, J. C., de Becker, P., & Aerts, R. (2011). Process-based proxy of oxygen stress surfers indirect ones in predicting vegetation characteristics. *Ecohydrology*, 5(6), 746-758. 10.1002/eco.261

Beuving, J. (1982). Onderzoek naar bodem- en waterhuishoudkundige gegevens voor invoer en verificatie van een model voor berekening van de effecten van de waterhuishouding. ICW-nota 1378, Wageningen.

de Jong van Lier, Q., van Dam, J. C., Durigon, A., dos Santos, M. A., & Metselaar, K. (2013). Modeling Water Potentials and Flows in the Soil-Plant System Comparing Hydraulic Resistances and Transpiration Reduction Functions. *Vadose Zone Journal*, 12(3), vzt2013.02.0039. 10.2136/vzt2013.02.0039

De Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., Supit, I., & Van Den Berg, M. (2020). Systeembeschrijving van het WOFOST 7.2, cropping systems model.

Dondeyne, S., Vanierschot, L., Langohr, R., Ranst, E. V., & Deckers, J. (2014). De bodemkaart van het Vlaamse Gewest omgezet naar de 3e editie van de World Reference Base for soil resources. 10.13140/2.1.4381.4089

Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Centrum voor Landbouwpublicaties.

Franken, T., & Wolfs, V. (2022). Effecten van Klimaatverandering op de Freatische Grondwaterstanden (p. 95) [Techreport]. Sumaqua.

Groenendijk, P., Boogaard, H., Heinen, M., Kroes, J. G., Supit, I., & de Wit, A. (2016). Simulatie stikstofgelimiteerde gewasgroei met SWAP/WOFOST : procesbeschrijvingen en gebruikershandleiding [Techreport]. Wageningen Environmental Research. 10.18174/400458

Heinen, M., Bakker, G., & Wösten, J. H. M. (2020). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks : Update 2018 [Techreport]. Wageningen Environmental Research. 10.18174/512761

Heinen, M., Mulder, M., & Kroes, J. (2021). SWAP 4 : technisch addendum bij de SWAP-documentatie [Techreport]. Wageningen Environmental Research. 10.18174/540451

Joris, I., Dams, J., Vanden Boer, D., & Vos, J. (2017). Kartering van de kwetsbaarheid van het grondwater voor verontreiniging met pesticiden: Eindrapport (p. 142) [Techreport]. VITO.

Kroes, J. G., & Supit, I. (2011). Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 370-381. 10.1016/j.agee.2011.09.008

Kroes, J. G., Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., Mulder, H. M., Supit, I., & Van Walsum, P. E. V. (2017). Swap versie 4: Theoriebeschrijving en gebruikershandleiding (p. 248) [Techreport]. Wageningen Environmental Research.

Londot, L., & Huysmans, M. (2021). Het ruimtelijk effect van droogte op grondwaterstanden in Vlaanderen [Bachelorproef]. KULeuven.

Monteith, J. (1965). Verdamping en milieu. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.

Moore, G. A., Agriculture Western Australia, & National Landcare Program (W.A.). (1998). *Soilguide: a handbook for understanding and managing agricultural soils*. Landbouw West-Australië.

Mulder, M., Meijninger, W., & Broeke, M. (2021). Validatie waterwijzer landbouw: vergelijking modelresultaten Groenmonitor, Gram en Help. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).

van Dam, J. C., Groenendijk, P., Hendriks, R. F. A., & Kroes, J. G. (2008). Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 640-653. 10.2136/vzj2007.0060.

Van De Vreken, P., Van Holm, L., Diels, J., & Van Orshoven, J. (2009). Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting. Eindrapport van een verkennende studie [Techreport]. Afdeling Ruimtelijke toepassingen K.U. Leuven.

Vereecken, H. (1988). *Pedotransferfuncties voor het genereren van hydraulische eigenschappen voor Belgische bodems [*Ph.D. diss.]. Katholieke Universiteit Leuven.

VPO, & IWT. (2014). Bodemkaart van Vlaanderen | Datasets | Catalogus | Geopunt Vlaanderen.

VPO. (2011). Aardewerk-Vlaanderen-2010 | Datasets | Catalogus | Geopunt Vlaanderen.

Werkgroep Waterwijzer Landbouw. (2018). *Waterwijzer Landbouw: Instrumentarium voor het kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie* (P. van & W. W. Landbouw, Eds.).

Wossenyeleh, B. K., Verbeiren, B., Diels, J., & Huysmans, M. (2020). Vadose Zone Lag Time Effect on Groundwater Drought in a Temperate Climate. *Water*, 12(8), 2123. 10.3390/w12082123

Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3-4), 169-185. 10.1016/s0016-7061(98)00132-3

3 Gebruik van het modelkader

Het huidige modelkader kan ingezet worden om verschillende types vraagstellingen te beantwoorden. Het is belangrijk om verschillende manieren om het modelkader te gebruiken duidelijk van elkaar te onderscheiden, zodat voor deze inherent verschillende toepassingen ook het meest geëigende niveau van detail en nauwkeurigheid gebruikt/gerespecteerd wordt. Hieronder schetsen we (niet-exhaustief) een aantal mogelijke types van gebruik van het kader en beschrijven kort op welke manier het modelkader in die gevallen toegepast kan worden.

3.0.0.1 Analyse van geschiktheid en trends over heel Vlaanderen De impact van grondwaterstanden op opbrengst is een complexe interactie van klimaat, bodem, grondwaterdynamiek en gewas. Het is dan ook interessant om op schaal van Vlaanderen te kijken of er bepaalde trends of ruimtelijke patronen terug te vinden zijn. Zo'n regionale analyse voor heel Vlaanderen geeft dan in grote lijnen de geschiktheid weer van bepaalde regio's/gebieden voor bepaalde teelten, stelt ons in staat types stress te identificeren en kwantificeren en grote trends naar voor te brengen in de ruimte en/of in de tijd.

Hiervoor zijn de basis-datalagen zoals weergegeven in Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren geschikt. Deze datalagen, die Vlaanderen-dekkend zijn, kunnen natuurlijk altijd verbeterd worden, maar het niveau van detail is voldoende voor een regionale analyse.

Opgepast!: vermits voor gewassen de timing van droogte in het groeiseizoen bepalend kan zijn, pasten we op locaties waar grondwaterdynamiek gecorreleerd is met regenval een sinusfunctie toe, gebaseerd op de gemiddelde hoogste (GHG) en gemiddelde laagste (GLG) grondwaterstand. Waar dit niet het geval is, werken we wel met een gemiddelde grondwaterstand die constant blijft doorheen het jaar.

3.0.0.2 Verkennende analyse van contrasterende grondwaterstanden op een bepaalde locatie De laatste jaren zijn er in Vlaanderen ook steeds meer kleinschalige acties die een impact kunnen hebben op de grondwatertafel: peilgestuurde drainage, stuwen, vernatten van een stuk beekvallei, ...Ook daar wil men graag kunnen inschatten hoe die ingrepen één of meerdere landbouwpercelen zullen beïnvloeden. Men zoekt dan naar een ruwe, verkennende simulatie van oogsten op een bepaalde locatie waar nog geen extra informatie beschikbaar is (i.e. lokale grondwatermetingen/modellen, lokale weersdata, nauwkeurige bodemdata)

Ook hiervoor zijn de de basis-datalagen beschreven in het hoofdstuk Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren geschikt. Gebruikers moeten zich ervan bewust zijn dat dit een ruwe benadering is van de realiteit, maar kan wel dienen om contrasterende situaties al eens met elkaar te vergelijken. Indien het mogelijk is een peilbuis te installeren om de huidige grondwaterstand en de dynamiek ervan te controleren of indien er al peilbuismetingen beschikbaar zijn op <https://www.dov.vlaanderen.be/>, is het raadzaam deze te gebruiken of minstens na te kijken of gemeten de grondwaterstanden gemiddeld overeenkomen met de basis kaartlaag ivm grondwater.

3.0.0.3 Gedetailleerde gebiedsanalyse bij grootschalige vernattingsprojecten Tenslotte zijn er in sommige gebieden grootschalige vernattingsprojecten gepland die voor een groter gebied substantiële veranderingen in grondwaterstanden zullen teweegbrengen. Bij dit soort projecten worden er meestal ook ecohydrologische studies uitgevoerd. Ook hier is het belangrijk de impact van de vernatting op landbouwactiviteiten in te schatten om te evalueren of de plannen haalbaar zijn en wat flankerend beleid kan zijn voor de getroffen landbouwers indien er inderdaad negatieve impact verwacht wordt.

Voor dit soort maatwerk kan het model gebruikt worden om voor alle percelen in het getrof-

fen gebied een de impact van huidige en toekomstige grondwaterstanden door te rekenen. In dit geval moeten de input data voor het model gedetailleerder zijn dan de algemene Vlaamse datalagen, zeker wat betreft grondwaterstanden. Dit kan komen van lokale grondwatermetingen of van heuse grondwatermodellen voor dat gebied die gekalibreerd zijn met lokale data. Zo'n modellen zijn dan vaak beschikbaar, net doordat ook een ecohydrologische studie opgezet wordt.

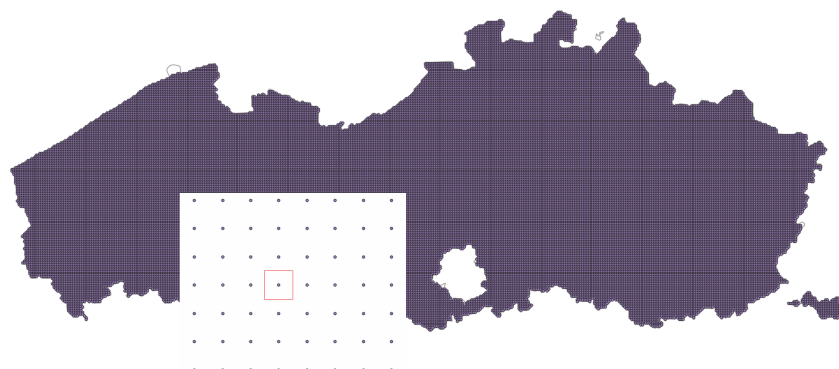
–DEEL V–

Resultaten

1 Regionale analyse en validatie

1.1 Aanpak

Om een algemeen beeld te krijgen van de opbrengstvariabiliteit als gevolg van natte of droge omstandigheden in heel Vlaanderen, voerden we een regionale analyse uit. We definiëerden een raster met een resolutie van 500 m dat het hele Vlaamse grondgebied bestrijkt. Dit resulteerde in meer dan 54000 individuele SWAP-WOFOST simulaties. We deden dit voor vijf conventionele teelten: gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet over het hele Vlaamse grondgebied. Pixels die geen landbouwgrond waren werden nadien uit de analyse verwijderd. In werkelijkheid zijn er uiteraard rotaties en meer mogelijke teelten. De resulterende kaarten stellen niet de reële situatie in een welbepaald jaar voor, maar dienen om potentieel problematische gebieden voor verschillende gewastypen te identificeren op regionale schaal (te natte of te droge omstandigheden).



Figuur 28: Raster met 500 m resolutie van het regionale model in Vlaanderen. Het rode vierkant illustreert één rastercel met 500 m resolutie en elke stip staat voor één simulatie.

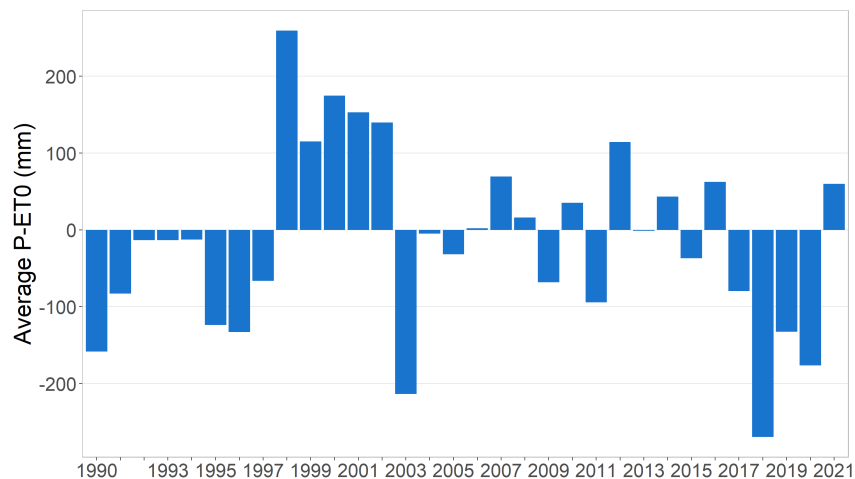
De simulatieperiode liep van 01/01/1990 tot 31/12/2021 (31 jaar), om rekening te houden met de variabiliteit van de weersomstandigheden. Zoutconcentratie in de bodem, drainage en irrigatie werden niet in het model opgenomen, maar kunnen worden geactiveerd voor specifieke studies indien gewenst.

1.2 Resultaten regionale analyse

De volgende resultaten illustreren de effecten van de temporele en/of ruimtelijke variatie van de weersomstandigheden, de bodem, de planten en de grondwaterstand op de gewasopbrengst. Al deze variabelen zijn nauw met elkaar verbonden en bepalen samen de finale gewasopbrengst in een bepaald jaar en op een bepaalde plaats.

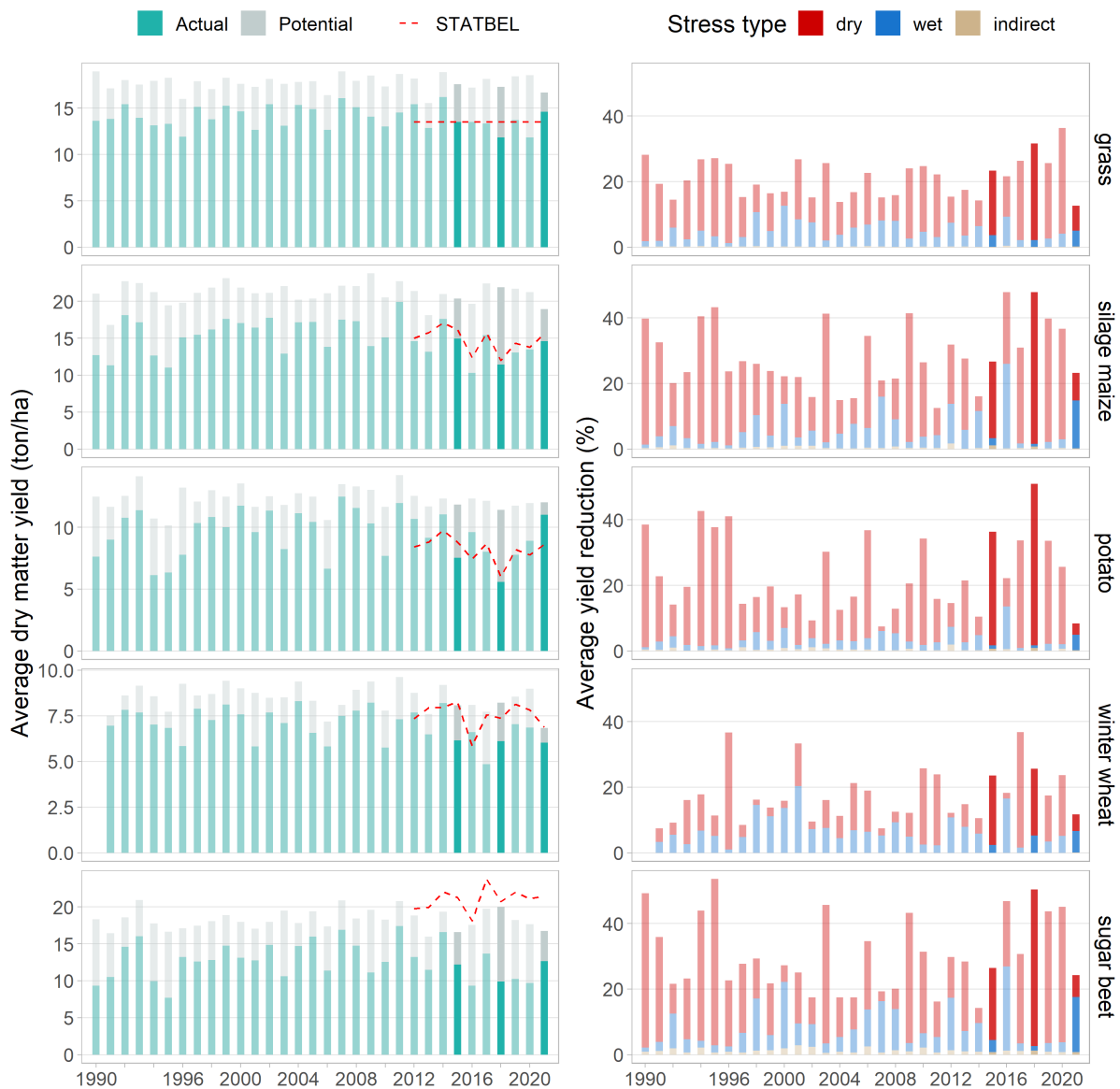
1.2.1 Variabiliteit in de tijd

Het neerslagtekort (neerslag - referentieverpotranspiratie, $P-ET_0$) is een algemeen gebruikte indicator om meteorologische droogte te beoordelen. Het geeft aan of er sinds het begin van het hydrologische seizoen voldoende neerslag is gevallen om aan de verdampingsvraag van de atmosfeer te voldoen. Positieve waarden betekenen dat er te veel of voldoende water beschikbaar is via neerslag, en negatieve waarden wijzen op onvoldoende neerslag. Jaren met weinig neerslag en meestal hogere temperaturen hebben een groter neerslagtekort, uitgedrukt als een negatieve waarde van $P-ET_0$. Onderstaande figuur toont de variabiliteit van de gemiddelde $P-ET_0$ in de laatste ~30 jaar in Vlaanderen, gecumuleerd van januari tot januari (Het neerslagtekort kan ook worden berekend van april tot april, dat als het hydrologische jaar wordt beschouwd.). De weersomstandigheden verschillen aanzienlijk van jaar tot jaar, en er kunnen verschillende droge en natte perioden worden onderscheiden. Zo was de periode 1998 - 2002 vrij nat, terwijl de periode 2017-2020 zeer droog was. Naast het algemene neerslagtekort is ook de timing van lange, droge perioden van cruciaal belang om het effect ervan op specifieke gewassen correct in te schatten.



Figuur 29: Gemiddeld neerslagtekort ($P-ET_0$) van 1990 tot 2021 in Vlaanderen. Het gecumuleerd neerslagtekort is hier berekend van januari tot januari.

Onderstaande figuur toont de variabiliteit van de gemiddelde opbrengst van landbouwpercelen in Vlaanderen voor de vijf gewassen (links), en de gemiddelde opbrengstvermindering door water- en zuurstofstress, en indirecte effecten (rechts). De jaren 2015, 2018 en 2021 zijn gemarkeerd, omdat die respectievelijk als "normale", "droge" en "natte" jaren worden beschouwd en verder in dit hoofdstuk gebruikt worden om resultaten te vergelijken. De potentiële opbrengst (maximale potentiële opbrengst), weergegeven in het grijs, is de opbrengst die onder optimale omstandigheden van water en nutriënten bereikt zou worden en als de gewassen volledig beschermd zijn tegen onkruid, plagen en ziekten. De werkelijke opbrengst (groen) geeft dan de geschatte opbrengst weer onder de reële meteorologische omstandigheden van dat jaar, ervan uitgaande dat voedingsstoffen en andere beperkende factoren geen probleem vormden, zodat we de effecten van waterstress (te veel of te weinig) kunnen isoleren. De rode stippellijn vertegenwoordigt telkens de gemiddelde opbrengst van 2012 tot 2021 voor dat gewas in België, op basis van de Belgische statistieken "STATBEL" of de Belgische rassenlijst voor gras.



Figuur 30: Gemiddelde gesimuleerde opbrengst en opbrengstvermindering van gras, voedermaïs, aardappel, suikerbiet en wintertarwe op landbouwpercelen in Vlaanderen van 1990 tot 2021. De grafieken links tonen de gemiddelde potentiële (Y_{pot}) en werkelijke (Y_{act}) opbrengst in ton ha⁻¹ van alle simulaties. Y_{pot} vertegenwoordigt de maximale potentiële opbrengst (zie paragraaf 2.3.2 van het modelleerkader). De gemiddelde gemeten opbrengst op basis van de Belgische statistieken "STATBEL" en de Belgische grasrassenlijst is weergegeven in de rode stippellijn. In de rechtse grafieken zien we de relatieve opbrengstvermindering ($RED_{TOT} = RED_{dir} + RED_{ind} = (Y_{pot} - Y_{act}) / Y_{pot} * 100 + RED_{ind}$) uitgedrukt in %. De kleuren stellen het relatieve aandeel van de verschillende stresstypes in de opbrengstvermindering voor. Daarvoor gaan we ervan uit dat de opbrengstvermindering evenredig is met de vermindering van de transpiratie (T). De opbrengstvermindering uitgedrukt in % voor elk stresstype is dan $(T_{dry} / (T_{pot} - T_{act})) * RED_{dir}$ (droogtestress, rood), en $(T_{wet} / (T_{pot} - T_{act})) * RED_{dir}$ (zuurstofstress, blauw).

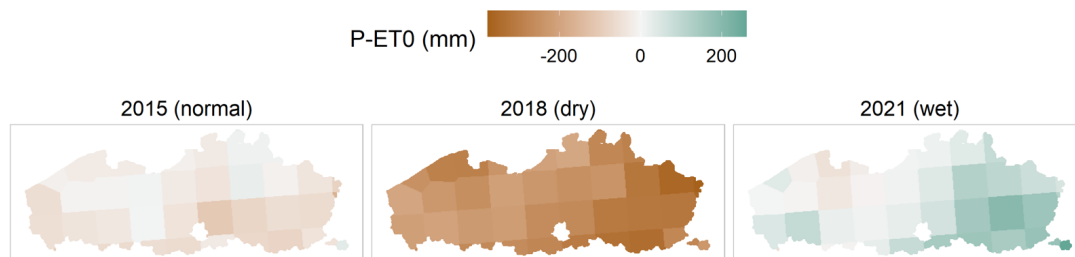
De variabiliteit van de meteorologische omstandigheden bepaalt de verschillen in opbrengst over verschillende jaren van de gewassen. De opbrengstdaling is groter in jaren met een groot neerslagtekort (bv. 2018, 2003, 2020) dan in natte jaren (bv. 1998, 2021). Sommige gewassen zijn gevoeliger voor droge of natte omstandigheden. Aardappel, snijmaïs en suikerbiet worden bijna in gelijke mate getroffen door droge of natte omstandigheden, maar **aardappel vertoont meer opbrengstvermindering in droge jaren**, waarschijnlijk vanwege zijn ondieper wortelstelsel. In vergelijking met de akkerbouwgewassen is de **opbrengst van gras door de jaren heen stabiel**. Van meerjarig grasland is bekend dat het in vergelijking met akkerbouwgewassen beter bestand is tegen zuurstofstress, zoals besproken in het hoofdstuk Effect van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren. **Over het algemeen leidt droogtestress tot een hogere opbrengstvermindering dan zuurstofstress, voor alle gewassen behalve wintertarwe**. Wintertarwe verschilt van de andere gewassen door zijn groeiseizoen, dat ook de winter en het vroege voorjaar omvat. Bovendien rijpt wintertarwe vrij vroeg in de zomer en wordt het daarom minder getroffen door zomerdroogte. Natte omstandigheden of zuurstofstress zijn dus de voornaamste oorzaak van opbrengstvermindering bij dit gewas. De indirecte effecten zijn gemiddeld zeer gering in Vlaanderen en veroorzaken geen grote opbrengstverliezen.

De simulaties van meeste gewassen volgen relatief goed de trend van de gemiddelde opbrengstvariabiliteit in België (rode stippellijn). Bij **suikerbieten worden de opbrengsten echter systematisch onderschat**, hoewel de relatieve trends wel overeenkomen. Onderschattingen kunnen het gevolg zijn van het gebruik van verouderde gewasparameters in het model (van cultivars uit de jaren '90) of van specifieke veldbeheerspraktijken die niet in het model zijn opgenomen, zoals irrigatie in droge jaren. Overschattingen zoals in 2016 en 2021 voor aardappelen, of 2016 voor wintertarwe, kunnen ook worden toegeschreven aan de aanwezigheid van plagen en ziekten die zich in natte omstandigheden makkelijker verspreiden, of aan andere processen, zoals het rotten van de aardappelknollen of het omvallen van wintertarwe, waarmee in het model geen rekening is gehouden. Zo waren deze indirecte effecten volgens het Agrometeorologisch Bulletin voornamelijk de oorzaak van de opbrengstvermindering in 2021, en niet noodzakelijkerwijs de zuurstofstress. Meer details over de verschillende factoren die elk van de vijf gewassen beïnvloeden, zijn beschreven in het hoofdstuk Effect van grondwaterstanden en wateroverlast op teeltfactoren.

1.2.2 Heterogeniteit

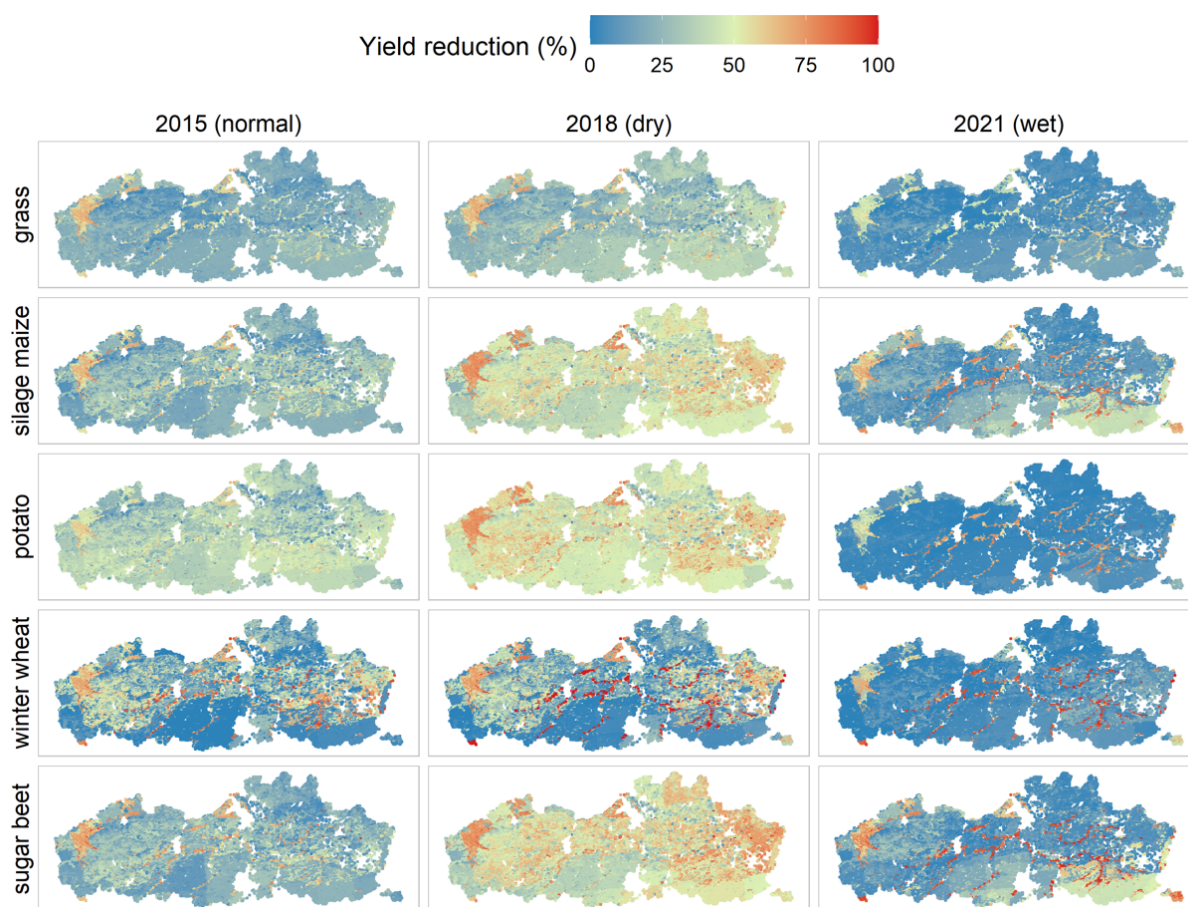
De neerslag in Vlaanderen varieert in ruimte en tijd. Bijgevolg heeft een jaar dat als gemiddeld nat of droog wordt beschouwd, niet overal dezelfde effecten. Zo was de provincie Limburg in 2018 droger en in 2021 natter dan de rest van Vlaanderen, waardoor de opbrengst in deze regio in beide jaren sterker daalt.

Onderstaande figuur toont de ruimtelijke variabiliteit van de opbrengst, uitgedrukt als percentage opbrengstvermindering, in landbouwgebieden voor de vijf gewassen en voor de kenmerkende jaren 2015, 2018 en 2021. De kaarten tonen het gecombineerd effect van de heterogene weersomstandigheden, de bodem en de gemiddelde grondwatertafel. Droge omstandigheden leiden tot meer oogstverlies bij voedermaïs, aardappel en suikerbiet voor de landbouw



Figuur 31: Ruimtelijke variabiliteit van het neerslagtekort gedurende 2015 (normaal jaar), 2018 (droog jaar) en 2021 (nat jaar). Het neerslagtekort is berekend van januari tot januari.

in Vlaanderen dan natte omstandigheden. Vooral in valleigebieden is zuurstofstress wel een oorzaak van belangrijk oogstverlies, zeker in natte jaren.



Figuur 32: Geschiktheidskaarten in landbouwgebieden voor gras, snijmaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet, gedurende 2015 (normaal jaar), 2018 (droog jaar) en 2021 (nat jaar), op basis van het regionale model.

Bodemtype is een andere belangrijke factor die de opbrengst in het model beïnvloedt, omdat de hydraulische eigenschappen van de bodem de waterretentie, de infiltratiesnelheid en de wortelgroei bepalen, en dus ook de wateropname door de plant. Het model houdt rekening met wortelgroei beperkingen op basis van het kleigehalte, de bulkdichtheid en de pH. De bulkdichtheid werd benaderd met de pedotranferfunctie van Vereecken (1988), aangezien deze informatie op regionale schaal niet beschikbaar was. Deze functie gaat uit van een

bulkdichtheid van $1,48 \text{ g cm}^{-3}$ voor kleigronden, zandleemgronden en leembodems. In werkelijkheid kan de bulkdichtheid aanzienlijk afwijken van deze waarde. Vanwege het verband tussen bulkdichtheid en maximale bewortelingsdiepte in SWAP-WOFOST wordt de maximale bewortelingsdiepte in klei- en zware kleigronden hierdoor soms beperkt tot 10 cm of 20 cm, afhankelijk van het gewas (de minimale bewortelingsdiepte die in het model kan worden aangenomen). In het algemeen beperken zandleem- en leembodems de wortelgroei niet in het model, en is de maximale bewortelingsdiepte afhankelijk van het gewas.

De gepresenteerde kaarten met opbrengstreducties hangen nauw samen met deze veronderstellingen. Zo leiden de kleiachtige bodems van de polders systematisch tot lagere opbrengsten, omdat werd uitgegaan van een geringe bewortelingsdiepte. Dit is waarschijnlijk niet wat er in werkelijkheid overal in de polders gebeurt. Bodemverdichting die door de mens werd veroorzaakt is een ander kenmerk dat niet wordt weergegeven met een benadering op basis van publiek beschikbare datalagen. Het is dus belangrijk de beperkingen van de modellen en de datalagen waarmee zij werken te kennen, om verkeerde interpretaties van de resultaten te voorkomen. Voor gerichte studies over kleigronden bijvoorbeeld zou het verband tussen bulkdichtheid en bewortelingsdiepte kunnen worden verfijnd.

Gronden bij beken en rivieren, waar het grondwater van nature ondiep is, vertonen praktisch altijd suboptimale opbrengsten (roodachtige kleuren). Dit verergert nog in natte jaren. In werkelijkheid worden deze gebieden voornamelijk gebruikt voor grasproductie of begrazing, waarbij in de huidige landbouwpraktijken vaak al rekening wordt gehouden met deze ondiepe grondwaterstanden, aangezien gras doorgaans beter bestand is tegen natte omstandigheden dan andere conventionele gewassen.

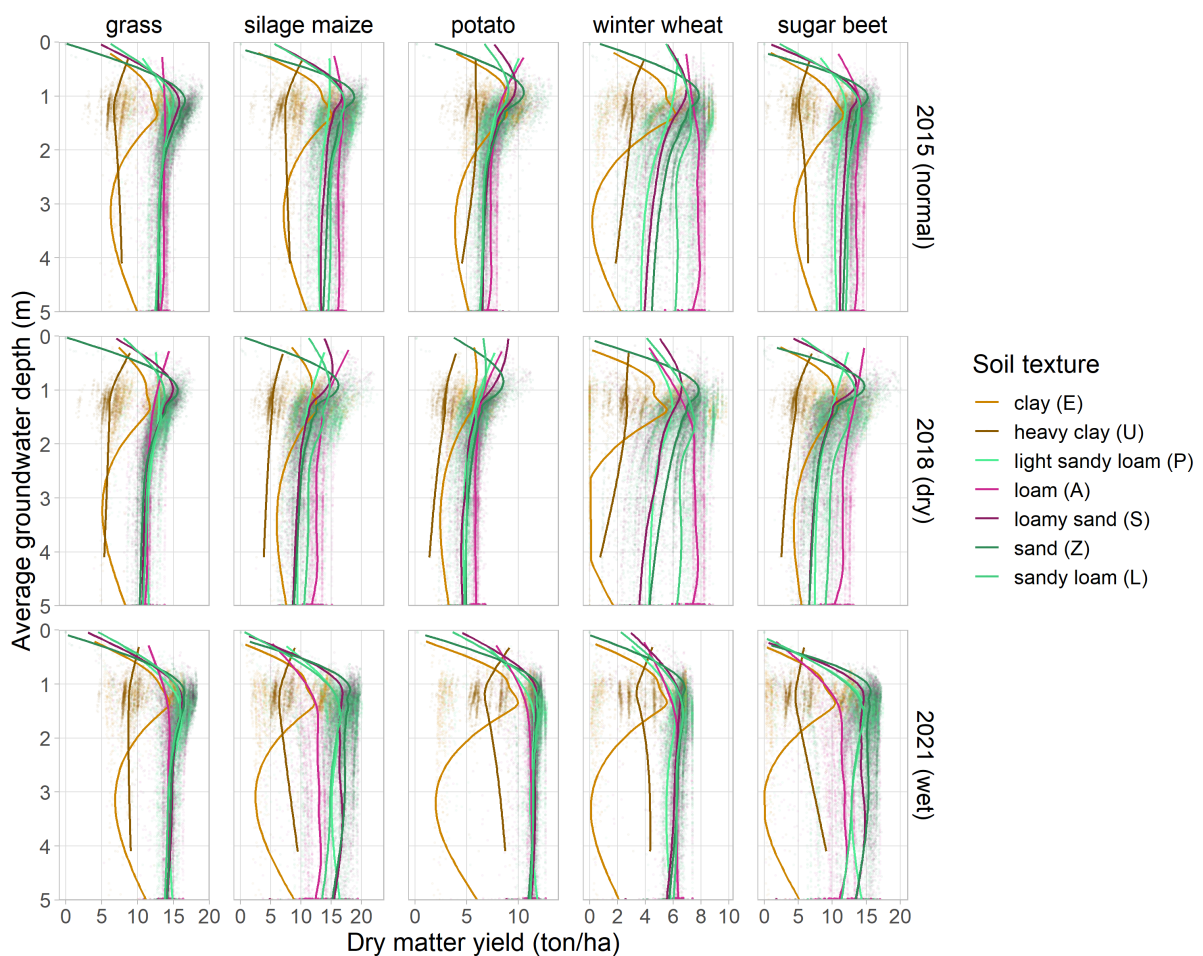
Franken & Wolfs (2022) bestudeerden het potentiële effect van de toegenomen voorkomen van droogte als gevolg van de klimaatverandering op de grondwaterstanden in Vlaanderen. Volgens hun voorspellingen zal de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) licht stijgen door meer neerslag in de wintermaanden, op locaties met een diepe grondwaterstand en een dik aquifer (hogere buffercapaciteit). De gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) zal echter sterk dalen door minder neerslag in de zomermaanden (minder water beschikbaar) en hogere temperaturen (meer watervraag), vooral op locaties met een dun aquifer, een ondiepe grondwaterstand en een beperkte laterale stroming (lagere buffercapaciteit). Volgens hun voorspellingen zal de GLG in 2050 in ongeveer de helft van de landbouwgronden (58 %) en grondwaterafhankelijke natuurgebieden meer dan 25 cm dalen. In de winter daarentegen zal de gemiddelde GLG in 78 % van de landbouwgebieden met maximaal 10 cm toenemen. De studie van Franken & Wolfs is hoofdzakelijk gebaseerd op gegevens van freatische watervoerende lagen met een duidelijke correlatie met meteorologische variabelen, maar geeft een goede indicatie van de effecten van de klimaatverandering op de grondwaterregimes die we kunnen verwachten. Verhoging van het grondwaterbuffervermogen is dan ook een prioriteit voor de overheid en de maatschappij.

1.2.3 Effect van grondwaterstand en bodemtextuur op gewasopbrengst

Onderstaande figuur illustreert het verband tussen gemiddelde grondwaterstanden en opbrengst in heel Vlaanderen voor de verschillende bodemtexturen en voor een normaal (2015),

droog (2018) en nat jaar (2021). De meteorologische omstandigheden en het bodemtype hebben een belangrijke, gecombineerde invloed op de gewasopbrengst voor een bepaald gemiddeld grondwaterpeil. Dat zie je aan de spreiding van de puntenwolk in een bepaald jaar en hoe die wijzigt over de jaren heen. In de regionale analyse gebruiken we voor elk jaar hetzelfde gemiddelde grondwaterpeil of grondwaterdynamiek (sinusfunctie) als onderste randvoorwaarde in het model (dus geen fluctuerend grondwaterpeil door de jaren heen).

Gebieden met zeer ondiepe grondwaterstanden (minder dan 1m onder het bodemoppervlak) worden in natte jaren negatief beïnvloed, maar profiteren in droge jaren. Het omgekeerde doet zich voor bij diepere grondwaterstanden, waar meer neerslag de lage grondwaterbijdrage kan compenseren. Maar hoe groot dit positief effect is, hangt ook af van de bodemtextuur en hoe die watertransport en wortelgroei beïnvloedt.



Figuur 33: Effect van grondwater, bodemtype en weersomstandigheden op de opbrengst, voor de vijf gewassen. Op de achtergrond bevatten de scatterplots alle simulaties van het regionale model, en de curven ervoor vertegenwoordigen een trendlijn voor elk bodemtype.

De optimale grondwaterstand is grof genomen ongeveer 1 m in normale en droge jaren en 1,5 m in natte jaren. Er is duidelijk wel een grote spreiding rond deze richtwaarden te zien, waaruit blijkt dat het zinvol is niet met zulke eenvoudige vuistregels te werken, maar rekening te houden met de variabiliteit die wordt veroorzaakt door gewassen, bodem, grondwaterdynamiek en het weer. Ondiepe grondwaterstanden veroorzaken zuurstofstress, terwijl diepe grond-

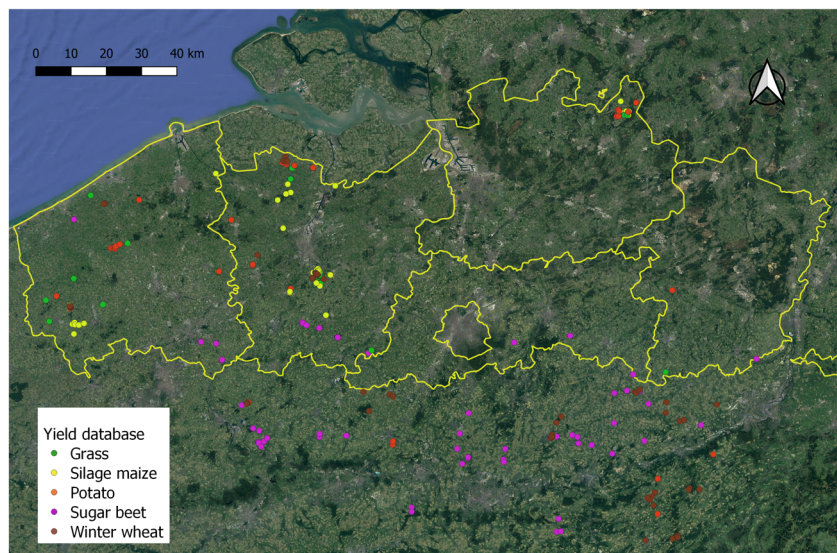
waterstanden leiden tot droogtestress in perioden zonder neerslag. Deze drempels zijn het resultaat van de fysische principes die zijn opgenomen in de droogte- en zuurstofstressfuncties in het model.

1.3 Plausibiliteitscontrole

SWAP-WOFOST is reeds uitgebreid getoetst in het kader van de Waterwijzer Landbouw tool in Nederland, en in andere projecten (Heinen et al., 2021; Mulder et al., 2021; Bertram et al., 2017). Een plausibiliteitscontrole in Vlaanderen is echter belangrijk, om te testen of dit model realistische resultaten genereert voor de Vlaamse context. Een echte modelvalidatie is niet altijd mogelijk omdat vaak de nodige gegevens ontbreken om het model helemaal aan de experimentele omstandigheden aan te passen. Dat is zeker het geval voor modellen als SWAP-WOFOST, die een grote verscheidenheid aan processen en bijbehorende parameters bevatten (Heinen et al., 2021). In Vlaanderen zijn jaarlijkse en ruimtelijk expliciete opbrengstgegevens voor modelvalidatie of -controle niet vrij beschikbaar. Daarom verzamelden we opbrengstgegevens van verschillende proefinstellingen in heel Vlaanderen en gebruikten de publiek beschikbare datalagen voor de locatie van de overeenkomstige experimenten om het model te parameteriseren.

Naast modelvalidatie of "plausibiliteitscontrole" kan de opbrengstdatabank dienen als:

1. Een open dataset voor kalibratie of validatie van gewasmodellen met inachtneming van de eventuele vertrouwelijkheidsstatus van de datasets die kan dienen om performantie van verschillende modellen of nieuwe versies van modellen te testen (= 'benchmarking').
2. Gebruiksvriendelijke tool om opbrengstinformatie van verschillende proeven in Vlaanderen te blijven verzamelen en vergelijken tov historische evoluties. Dit zou bijvoorbeeld kunnen dienen voor het Landbouweffectenrapport (LER) van de Vlaamse overheid.



Figuur 34: Locaties van de in de databank opgenomen opbrengstmetingen. De informatie buiten Vlaanderen is niet gebruikt bij de plausibiliteitscontrole.

De opbrengstdatabank is toegankelijk in de zenodo repository. Helaas bevinden de mees-

te gegevens zich momenteel in West- en Oost-Vlaanderen. De databank is vrij beschikbaar en kan groeien met nieuwe input van onderzoekers en professionals die opbrengstgegevens verzamelen.

Warning

Contacteer ons gerust als je data beschikbaar hebt die kan bijdragen tot een betere dekking in Vlaanderen.

1.3.1 Een eerste stap naar een Vlaamse opbrengstdatabank

De opbrengstdatabank bevat jaarlijkse opbrengstgegevens op veldniveau voor verschillende akkerbouwgewassen in Vlaanderen geteeld met "conventionele" landbouwpraktijken, samen met de coördinaten daarvan. Indien beschikbaar, bevat ze ook de plant-/zaai- en oogstdatum. Momenteel zijn alleen de opbrengsten van de vijf gewassen in dit onderzoek in de databank opgenomen, namelijk gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet. De gegevens werden verzameld bij verschillende onderzoeksafdelingen van ILVO en andere Vlaamse overheids- en privé-instellingen zoals CRA-W en IRBAB KBIVB. De meeste gegevens zijn het resultaat van rassenproeven, zonder irrigatie en onder standaard plaagbestrijding en bemesting volgens de behoeften van het gewas. Een klein aantal aardappelwaarnemingen zijn afkomstig van proefvelden met irrigatie of van rassenproeven op landbouwvelden met irrigatie. De opbrengstdatabank is belangrijk om de reële ruimtelijke en temporele variabiliteit van de opbrengst in Vlaanderen te kennen.

1.3.2 Modelopzet voor plausibiliteitscheck

Het vorige hoofdstuk (Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren) beschreef de invoergegevens en procedures die we hebben gevolgd om de simulaties voor de modelcontrole te genereren. Er is hier één verschil: voor de modelcheck zijn locatiespecifieke plant-/zaai- en oogstdata opgegeven in plaats van een generieke zaai- en oogstdatum. In dit deel zijn geen indirecte effecten berekend.

Note

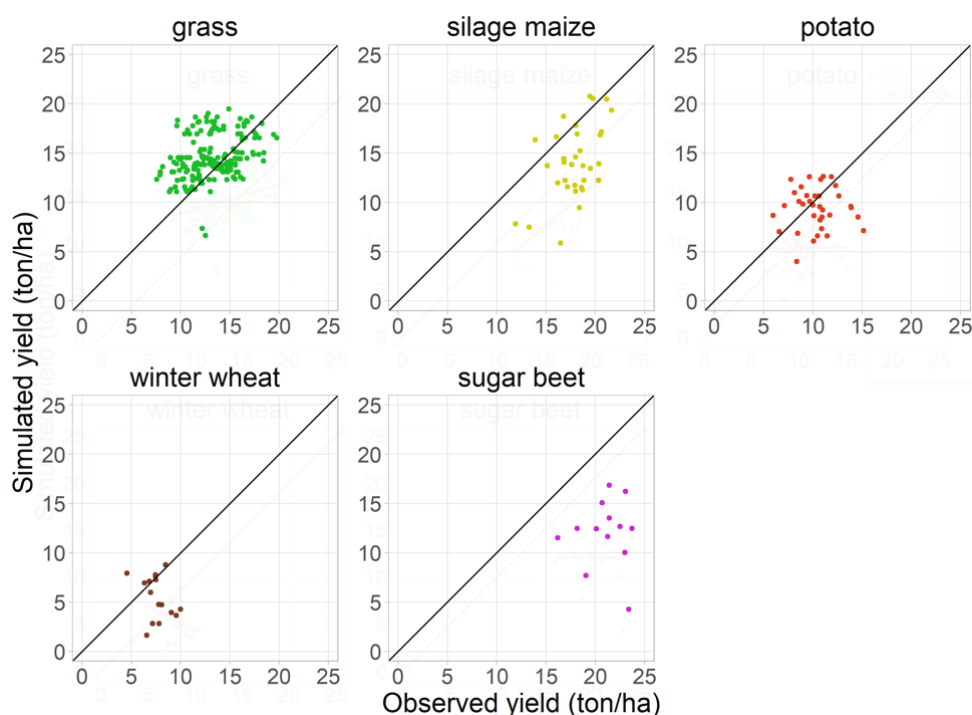
Aangezien de waargenomen opbrengsten soms uitsluitend als verse opbrengst werden verstrekt, werd voor elk gewas een drogestofgehalte geschat op basis van in de literatuur gepubliceerde relaties: 20 % voor gras (Dasselaar et al., 2019; Eurostat, 2020) en aardappel (Van Oort et al., 2012), 86 % voor wintertarwe (Eurostat, 2020), 35 % voor snijmaïs (ILVO-rassenlijst 2022) , en 25 % voor suikerbieten ((FAO, 2009), rassenproeven in de opbrengstdatabank). Op die manier konden de waargenomen en de gemodelleerde opbrengsten voor alle gewassen op dezelfde manier worden vergeleken.

Note

Wij hebben de waargenomen opbrengst van rassenproeven en experimentele velden met

15% verminderd alvorens deze met de modelresultaten te vergelijken. Het is algemeen bekend dat de resultaten van wetenschappelijke veldproeven in plots voor onderzoeksdoeleinden hoger zijn dan de opbrengst van volledige akkers van landbouwers. Deze proeven hebben immers kleinere plots, randeffecten worden verwijderd, er wordt gewerkt met eerder homogene percelen van goede kwaliteit, enz. Deze reductiewaarde is uiteraard een benadering en gebaseerd op advies van deskundigen.

1.3.3 Resultaten modelvalidatie



Figuur 35: Waargenomen opbrengst (drogestofopbrengst) vs. gesimuleerde opbrengst voor de vijf gewassen. De zwarte lijn is de 1:1 lijn of bissectrice lijn die een perfecte pasvorm aangeeft, en de rode lijn is een eenvoudige regressielijn.

De bovenstaande figuur toont het verband tussen gemeten en gesimuleerde opbrengst voor gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet. De zwarte lijn stelt de 1:1 lijn voor tussen de waargenomen en de gesimuleerde opbrengst. In het geval van een perfect model zouden de punten de bissectrice volgen. Voor gras en voedermaïs zijn meer waarnemingen beschikbaar, terwijl voor de andere gewassen, met name wintertarwe en suikerbieten, de gegevens vrij beperkt zijn. In het algemeen onderschat het model de gewasopbrengst, behalve voor gras, zelfs na de vermindering met 15% van de experimentele opbrengsten. De ergste onderschatting doet zich voor bij suikerbieten, wat overeenkomt met de regionale vergelijking voor suikerbieten.

Eén reden kan zijn dat de in het model gebruikte gewasparameters zijn afgeleid van cultivars uit de jaren '90, en dat de opbrengst van moderne cultivars aanzienlijk is verbeterd. Allard de Wit, een van de ontwikkelaars van WOFOST, wees erop dat de gewasparameters zullen moeten

Tabel 13: Indicatoren modelvalidatie: root mean square error (RMSE), relative root mean square error (RRMSE) en determinatiecoëfficiënt (R^2)

| | RMSE (t.ha ⁻¹) | RRMSE (-) | R ² (-) |
|-------------|----------------------------|-----------|--------------------|
| gras | 3.07 | 0.23 | 0.12 |
| kuilmaïs | 4.98 | 0.28 | 0.26 |
| aardappel | 3.07 | 0.30 | ~0 |
| wintertarwe | 3.43 | 0.45 | 0.095 |
| suikerbiet | 9.36 | 0.43 | ~0 |

worden aangepast aan recente experimentele gegevens.

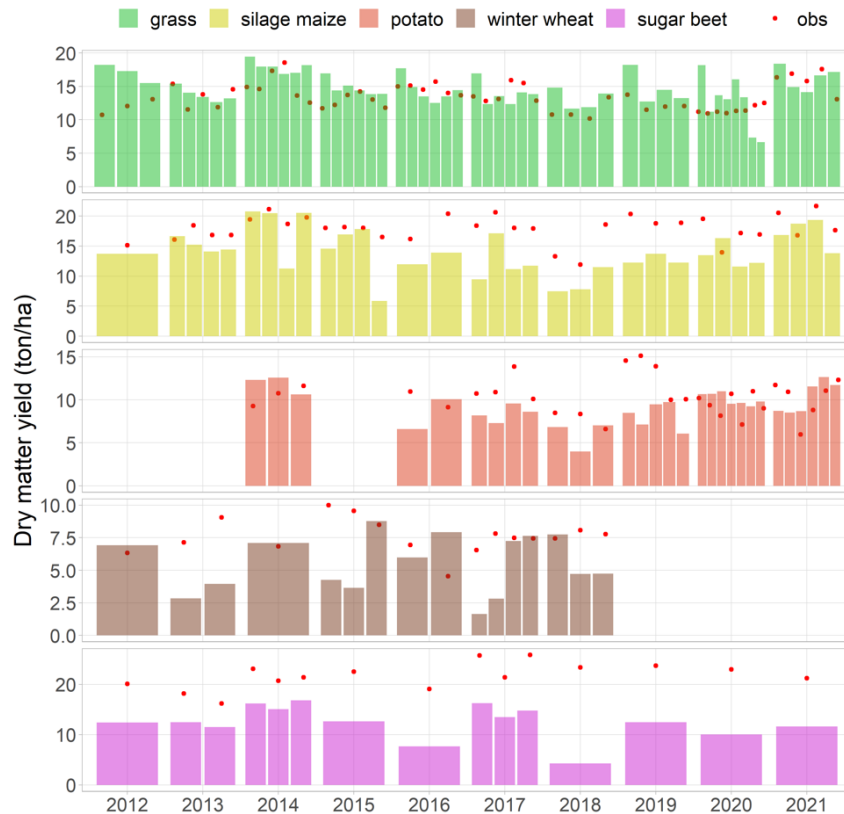
Een andere reden kan de voorbereiding van de gegevens vóór de vergelijking van de modellen zijn om rekening te houden met hogere oogsten in experimentele plots voor onderzoek. De oogstvermindering is momenteel gebaseerd op expertenadvies en ook voor alle gewassen op dezelfde manier toegepast. Dit zou geverifieerd moeten worden door onderzoeksdata met data van landbouwers te vergelijken voor dezelfde teelten.

Een derde reden kan zijn de simulaties momenteel geen rekening houden met alle beheerspraktijken (zoals bvb irrigatie) op een veld; gedetailleerde kennis van die praktijken is dus belangrijk voor een betere simulatie en interpretatie van de modelresultaten.

Table 13 toont enkele statistische indicatoren voor de overeenkomst tussen simulaties en observaties zoals de Root Mean Square Error (RMSE in t.ha⁻¹), de relatieve root mean square error (RRMSE) en de determinatiecoëfficiënt (R^2). De RMSE is een maat voor de gemiddelde afwijking van de simulaties van de observaties in de oorspronkelijke eenheden. Door de RMSE te delen door de gemiddelde waargenomen opbrengst voor elk gewas, kan een genormaliseerde RRMSE worden verkregen, die dimensieloos is en voor alle gewassen vergelijkbaar. De R^2 meet hoe goed de variatie van de waargenomen waarden ten opzichte van de gemiddelde waarde wordt verklaard door een lineaire regressiemodel. Deze indices geven een schatting van hoe goed het model met de algemene huidige parameters en aannames (SWAP-WOFOST) in staat is de doelwaarde, in dit geval de gewasopbrengst, te simuleren. Deze waarden geven aan dat het model de opbrengstvariabiliteit van gras en voedermaïs redelijk goed kan simuleren, maar niet alle opbrengstvariabiliteit van aardappelen, wintertarwe en suikerbieten. Het is te verwachten dat wanneer lokale informatie over bodem, weersdata, grondwaterstand en teeltpraktijken beschikbaar zouden zijn en gebruikt zouden worden in het model, de resultaten nog een stuk zouden verbeteren. Voor een echte validatie, moet er dus gewerkt worden aan een (gedetailleerde) oogstdatabank met een goede spreiding over Vlaanderen.

De jaarlijkse variatie van de waargenomen en gesimuleerde opbrengst is hieronder weergegeven. Er is een grote variabiliteit tussen jaren, en binnen hetzelfde jaar tussen locaties. Zo varieert de waargenomen grasopbrengst in 2014 tussen 11 ton.ha⁻¹ en 19 ton.ha⁻¹ en de aardappelopbrengst in 2019 tussen 10 ton.ha⁻¹ en 15 ton.ha⁻¹.

De grote verschillen tussen gesimuleerde en waargenomen opbrengst in aardappel in 2019 kunnen gedeeltelijk verklaard worden door irrigatie op de proefvelden, die niet gesimuleerd werd. Bij suikerbieten onderschat het model de opbrengst in alle jaren sterk, vooral in het droge jaar 2018, op basis van deze kleine set waarnemingen. In dit geval is een calibratie van



Figuur 36: Jaarlijkse variatie van de waargenomen (rode stippen) en gesimuleerde opbrengst (balken) van 2012 tot 2021, voor de vijf gewassen.

de gewasparameters ten opzichte van wat in Waterwijzer Landbouw werd gebruikt vereist. Ook is een controle van de omrekening van verse naar droge opbrengst en een beoordeling van de relatie tussen experimentele opbrengst en opbrengst van landbouwpercelen nodig om de modelresultaten te verbeteren. Ondanks alle gewasopbrengstvariabiliteit kan het model de meeste van deze dynamieken beschrijven, hoewel de absolute waarden momenteel soms sterk worden onderschat, zoals bij suikerbieten.

In het algemeen mag men niet vergeten dat voor de simulatie van de opbrengsten van de proeflocaties geen gebruik is gemaakt van locatiespecifieke informatie om te testen of de bestaande gegevenslagen aanvaardbare resultaten opleverden. Afgezien van een betere kalibratie van het model, kunnen aanzienlijke verbeteringen worden verwacht als men kan werken met nauwkeurige gegevens over bodemhorizonten en hydraulische eigenschappen en lokale weergegevens.

1.4 Conclusies

We hebben het model SWAP-WOFOST op regionale schaal toegepast om de variabiliteit van de gewasopbrengst als gevolg van natte of droge omstandigheden in Vlaanderen te beschrijven. We gebruikten historische weergegevens van 1990 tot 2021 en geschatte gemiddelde grondwaterstanden om de opbrengst van vijf conventionele gewassen te simuleren, namelijk gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet.

De weersvariabiliteit tussen de jaren veroorzaakt variabiliteit in de jaarlijkse gewasopbrengsten. De gesimuleerde opbrengst is in droge jaren gemiddeld lager dan in natte jaren. Aardappel, voedermaïs en suikerbieten zijn gevoeliger voor waterstress dan gras en wintertarwe. Gras geeft over de jaren heen een stabielere opbrengst dan de akkerbouwgewassen. Wintertarwe heeft meer last van natte omstandigheden, omdat een groot deel van het groeiseizoen in de regenmaanden valt. Ruimtelijk gezien wordt de opbrengstvariabiliteit sterk beïnvloed door de regionale weersvariabiliteit, de heterogeniteit van de bodem en het grondwaterpeil. In het algemeen heeft droogte meer invloed op de opbrengst van voedermaïs, aardappelen en suikerbieten dan natte omstandigheden. Gebieden met zandleem- en leembodems hebben doorgaans hogere opbrengsten dan kleigronden volgens het model, omdat de bodem de wortelgroei minder beperkt.

In het algemeen hebben ondiepe grondwaterstanden (minder dan 1 m onder het oppervlak) een negatief effect op de opbrengst in natte jaren, maar een voordeel in droge jaren. Net zoals de opbrengst afneemt bij diepere grondwaterstanden, neemt deze ook af bij te ondiepe grondwaterstanden. Diepere grondwaterstanden resulteren in hogere opbrengsten in natte jaren, aangezien meer neerslag de lage grondwaterbijdrage aan de wortelopname van het gewas compenseert. De omvang van dit effect hangt af van de bodemtextuur en het bewortelingspatroon van het gewas.

Op basis van een beperkte dataset met experimentele opbrengstwaarnemingen in Vlaanderen hebben wij de prestaties van het model aan een eerste, ruwe test onderworpen. Het model zoals het momenteel is geïmplementeerd was in staat om algemene meerjarige trends in de gemiddelde gewasopbrengst te beschrijven, ondanks vele beperkingen in de invoergegevens en modelvereenvoudigingen. Vermits absolute waarden bij suikerbiet serieus worden onderschat, is kalibratie van de gewasparameters nodig om nauwkeurigere resultaten te krijgen voor dit gewas. De databank dekt momenteel nog onvoldoende alle landbouwregio's in Vlaanderen. Het is dus ook noodzakelijk om deze op termijn uit te breiden.

Dit modelkader is vrij beschikbaar voor de onderzoeksgemeenschap en zodat deze de prestaties ervan in de toekomst verder kan verbeteren.

1.5 Referenties

Vereecken, H. (1988). Pedotransfer functions for the generation of hydraulic properties for Belgian soils [Ph.D. diss.]. Katholieke Universiteit Leuven.

Franken, T., & Wolfs, V. (2022). Effecten van Klimaatverandering op de Freatische Grondwaterstanden (p. 95) [Techreport]. Sumaqua.

Heinen, M., Mulder, M., & Kroes, J. (2021). SWAP 4 : technical addendum to the SWAP documentation. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/540451>

van den Pol-van Dasselaar, A., Bastiaansen-Aantjes, L., Bogue, F., O'Donovan, M., & Huyghe, C. (2019). Grassland Use in Europe A Syllabus for Young Farmers. Quae. <http://public.eblib.com/choice/PublicFull>

Van Oort, P. A. J., Timmermans, B. G. H., Meinke, H., & Van Ittersum, M. K. (2012). Key weather extremes affecting potato production in The Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 37(1), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.09.002>

2 Case-study: landbouwgebied De Zegge

2.1 Achtergrond

Het natuurgebied De Zegge is een overblijfsel van het laagveen "Geels Gebroekt" in de vallei van de Kleine Nete. In de jaren '60 werd dit gebied grotendeels ontwaterd met een netwerk van sloten om het geschikt te maken voor landbouw. De Kleine Nete werd rechtgetrokken en de Roerdompstraat werd aangelegd als barrière tussen De Zegge en de landbouwgronden. Sindsdien wordt water uit de landbouwgronden gepompt, zodat het grondwaterpeil dieper ligt dan het waterpeil van de Kleine Nete (De Becker, INBO, 2019). In De Zegge en het nabijgelegen natuurgebied Mosselgoren moet het waterpeil echter zo hoog mogelijk worden gehouden. Daarom is er een vijzelpomp geplaatst om het water uit de landbouwgebieden naar een randvaart naar De Zegge te pompen (Van Diggelen & Grootjans, UA, 2019), waar het water op een vrijwel constant niveau wordt gehouden. In de loop der jaren raakten de natuurgebieden hydrologisch geïsoleerd van de rest van de vallei van de Kleine Nete. Die werd gekenmerkt door dikke veenlagen die sinds de middeleeuwen geleidelijk werden ontgonnen (De Becker, 2019) als energiebron, die geleidelijk werd vervangen door steenkool en petroleum (Vanierschot, 2014). Na landontwatering in de jaren '60 is het begon het resterende veen af te breken door contact met zuurstof in de lucht (Van Diggelen & Grootjans, 2019).

De natuurgebieden De Zegge en Mosselgoren maken deel uit van het Habitatrictlijngebied "Valleigebied van de Kleine Nete met brongebieden, moerassen en heiden" (BE2100026) en het Vogelrichtlijngebied "De Zegge" (BE21000424) (De Becker, 2019). De Zegge is 115 ha groot en is grotendeels eigendom van en volledig beheerd door de Koninklijke Maatschappij voor Dierkunde van Antwerpen (KMDA) (Van Diggelen & Grootjans, 2019). De Vlaamse overheid heeft een aantal natuurbeschermingsdoelstellingen en -prioriteiten vastgelegd voor deze gebieden. Recent werd echter de bezorgdheid geuit dat de natuurgebieden geleidelijk degraderen. De klimaatverandering zorgt voor een toename van het aantal droogtes, waardoor de soorten die afhankelijk zijn van natte omstandigheden verder onder druk komen te staan. Van Diggelen en Grootjans en De Becker wijzen ook naar de pompen en grachten van de watering, al vraagt Wyseure (2022) om een gedegen geohydrologische studie om een aantal veronderstellingen te staven.

Zo'n studie werd eerder reeds besteld door het Agentschap Natuur en Bos en werd toegekend aan het studiebureau Witteveen+Bos ("Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurreservaat De Zegge"). Deze studie ontwikkelt eerst een numerisch geohydrologisch grondwatermodel om zo oa de freatische grondwaterstanden te simuleren. Dat model wordt gekalibreerd met metingen in peilbuizen in het gebied. Wanneer deze kalibratie afgerond is, kan aangenomen worden dat zo'n model de beste schatting is van de huidige grondwaterstromingen en stand in het hele gebied, zoals het actueel beheerd wordt, met de onzekerheden die daar steeds bijhoren. Vervolgens kan dit numerisch model ook gebruikt worden om te

voorspellen wat de gevolgen zouden zijn van het wijzigen van een of meerdere waterbeheersmaatregelen in het gebied: het uitschakelen van pompen of het plaatsen of wegnemen van stuwen. Op die manier kan men dus voorspellingen maken van de impact van bepaalde maatregelen op grondwaterstanden in

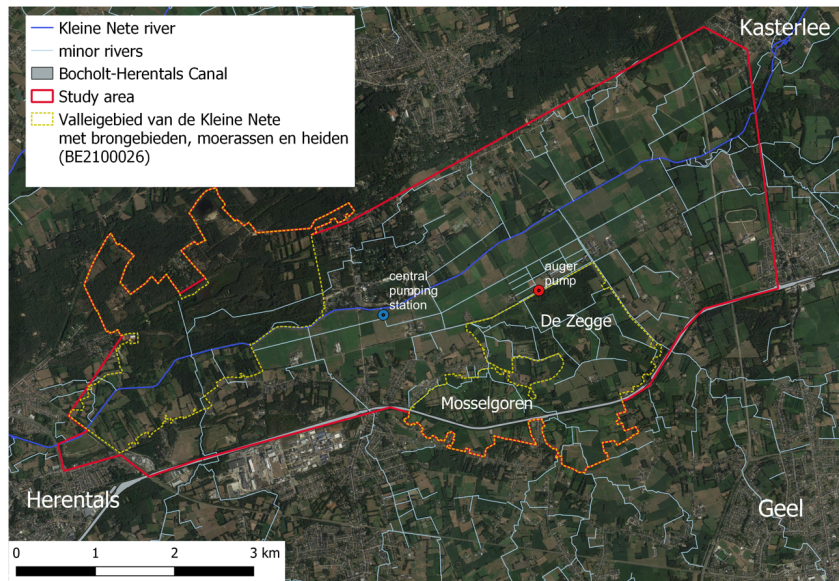
Volledige hydrologische isolatie van de natuurgebieden van de activiteiten in de landbouwgebieden is in de praktijk niet mogelijk, vermits grondwater via de ondergrond verbonden blijft tussen de twee gebieden. Een hydrologische isolatie zou een peperduur project zijn met ondergrondse hydrologische schermen of andere zeer verregaande ingenieurstechnische maatregelen, wat praktisch en financieel niet wenselijk is. Om de natuurgebieden te herstellen heeft De Becker (INBO, 2019) voorgesteld om het landbouwgebied ten het noorden van De Zegge en de Mosselgoren opnieuw te vernatten door de gemiddelde grondwaterstand te verhogen met 60 cm. Van Diggelen & Grootjans (UA, 2019) adviseerden om het pompen in de watering/het landbouwgebied ten noorden van De Zegge te stoppen en de grondwaterstanden te verhogen naar het maaiveld. Beide studies concludeerden dat landbouw bij deze saneringsstrategieën niet meer mogelijk zou zijn.

Daarom bestelde het Departement Landbouw en Visserij van de Vlaamse overheid in 2022 deze studie om een modelkader te ontwikkelen dat het effect van de grondwaterstanden op de landbouwactiviteiten in het gebied rond De Zegge-Mosselgoren te beoordelen. Helaas was een analyse van verschillende toekomstige grondwaterscenario's uiteindelijk niet mogelijk binnen de voorziene tijd wegens sterke vertragingen in de "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurreservaat De Zegge" uitgevoerd door het studiebureau Witteveen+Bos, in opdracht van het Agentschap Natuur en Bos. Wij hebben echter slechts de preliminaire resultaten van hun gekalibreerde grondwatermodel (versie december 2022) voor de huidige situatie gebruikt om te laten zien hoe het modelkader in dit gebied kan worden gebruikt.

2.2 Methodologie

2.2.1 Studiegebied

Het studiegebied beslaat ongeveer 2802 ha en ligt in het noordoosten van de provincie Antwerpen, in de omgeving van Geel. Het valt samen met het studiegebied van de "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurreservaat De Zegge" uitgevoerd door het studiebureau Witteveen+Bos. Hydrologisch gezien ligt het gebied in de vallei van de Kleine Nete, met in het zuiden het kanaal Bocholt-Herentals. Het studiegebied omvat het Habitatrictlijngebied "Valleigebied van de Kleine Nete met brongebieden, moerassen en heiden" (BE2100026), waarin de natuurgebieden De Zegge en Mosselgoren zijn gelegen. Deze gebieden worden omringd door landbouwgrond. Een centraal gemaal gelegen aan de noordgrens van De Zegge (51° 11' 52.62" N, 4° 54' 26.98" E) maakt de ontwatering van de landbouwgronden mogelijk, en een vijzel (51° 12' 2.06" N, 4° 56' 8.53" E) pompt het water uit de landbouwsloten terug naar het natuurgebied De Zegge. De gemiddelde maandelijkse neerslag varieert van 30 mm in april tot 78 mm in augustus, en de gemiddelde temperatuur varieert van 19 °C in juli tot 4 °C in januari (Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (GCO), 2010-2021).

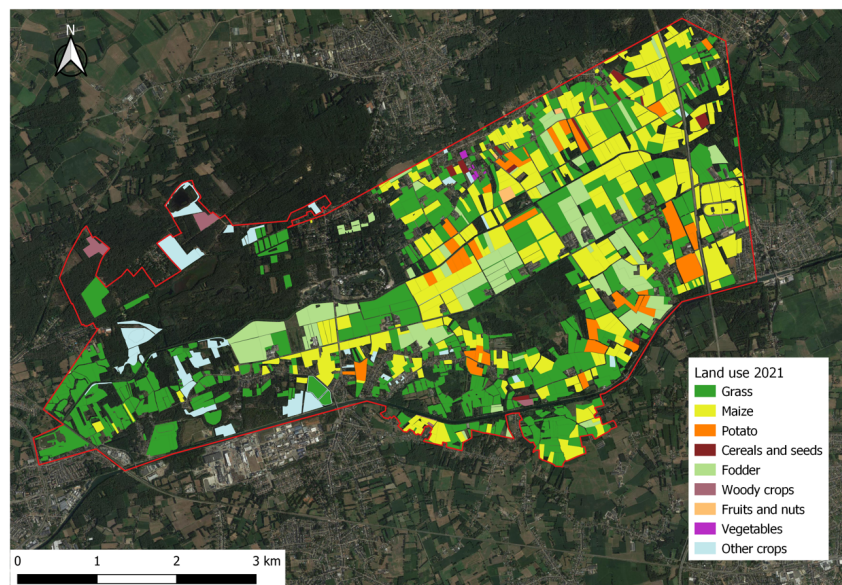


Figuur 37: Ligging van het studiegebied, waaronder het Habitatrichtlijngebied “Valleigebied van de Kleine Nete met brongebieden, moerassen en heiden” (BE2100026), kanalen, rivieren en ligging centraal pompstation en vijzelpomp.



Figuur 38: Overzichtsbeelden van landbouwland, centraal pomphuis, vijzelpomp en waterpeilmeting aan de vijzelpomp.

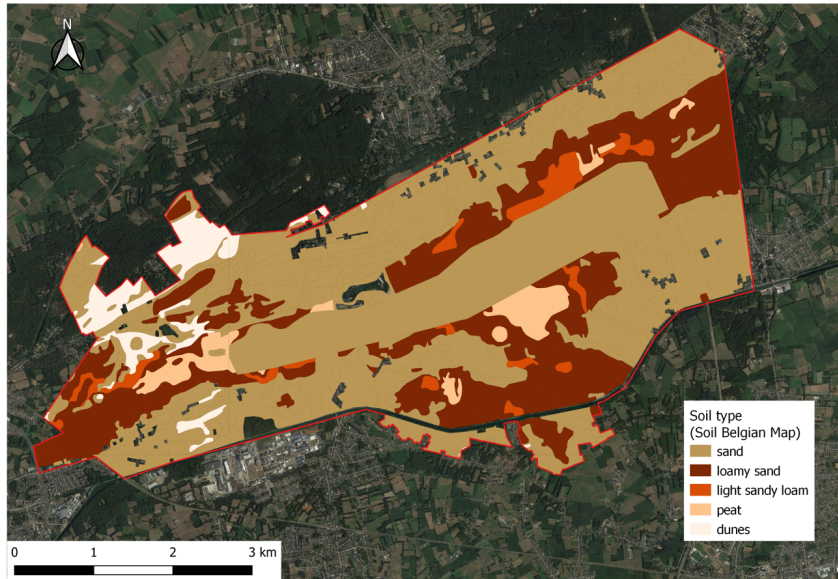
2.2.1.1 Landbouw Volgens de "landbouwgebruikskaart" van 2021 (dept. L&V, 2021) worden in het studiegebied vooral gras (41%), voedermaïs (24%), klaver (11%), korrelmaïs (7%) en aardappel (6%) verbouwd.



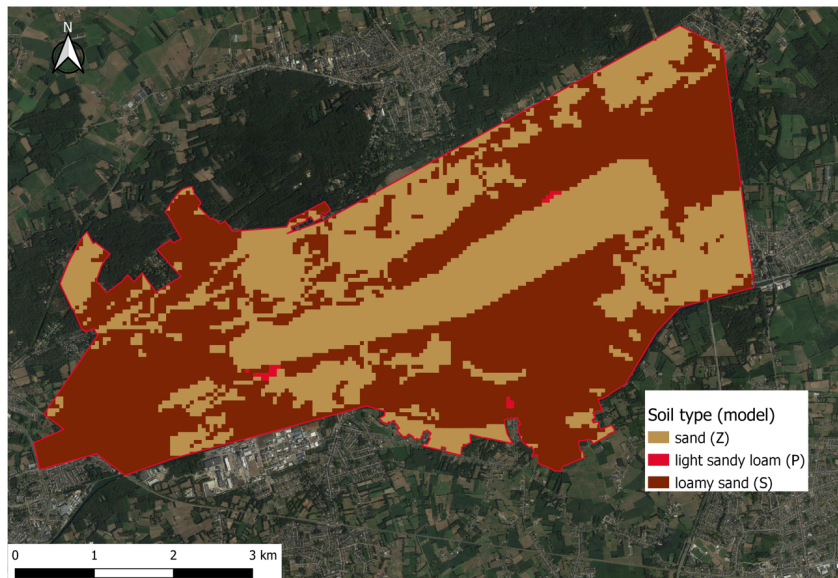
Figuur 39: Landbouwgebruik in 2021 in het studiegebied.

2.2.1.2 Bodemtextuur De bodem in het studiegebied is dominant zand en lemig zand volgens de Digitale Bodemkaart van het Vlaamse Gewest (VPO, 2017). Voor de ontwatering van het gebied in 1960 was de bodem voornamelijk zand/veen of veen (Van Diggelen & Grootjans, UA, 2019). Na ontwatering van het land is een groot deel van het resterende veen afgebroken. In het natuurgebied De Zegge komen nog veengronden voor volgens de bodemkaart. Voor een gedetailleerde kartering van de locatie en dikte van veenlagen, zouden radiometrische data samen met optische satellietdata gecombineerd kunnen worden, zoals in O'Leary et al. (2023). De voor modellering beschikbare bodemprofielen, gepresenteerd in het hoofdstuk Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren paragraaf 3.3.1, zijn minder gedetailleerd en bevatten geen informatie over veen in dit gebied.

2.2.1.3 Grondwater De onderstaande kaart toont de gemiddelde grondwaterstand in het studiegebied (voorlopige resultaten van de ecohydrologische studie van Witteveen+Bos, December 2022). Daaruit wordt duidelijk dat in de huidige toestand, de gemiddelde grondwaterstanden in de natuurgebieden ondieper zijn dan 50 cm (donkergroen). In het landbouwgebied ten noorden van de Zegge overwegend tussen 50 cm en 100 cm diep (lichtgroen) en in het hoger gelegen landbouwgebied ook dieper dan 100 cm (licht oranje). Dit komt overeen met de vaststellingen uit een eerdere studie van Backx et al. (2012) in de periode 2005-2010, waar de gemeten gemiddelde grondwaterstanden in de landbouwgebieden tussen 90 cm en 150 cm lagen, en minder dan 30 cm in het natuurgebied De Zegge. In het hele studiegebied van de ecohydrologische studie gaan de gemiddelde grondwaterstanden nergens dieper dan 300 cm, en schommelen ze gemiddeld tussen 50 cm in de winter en 110 cm in de zomer gebaseerd op de kaarten van het gemiddeld hoogste grondwaterstanden (GHG) en gemiddeld laagste

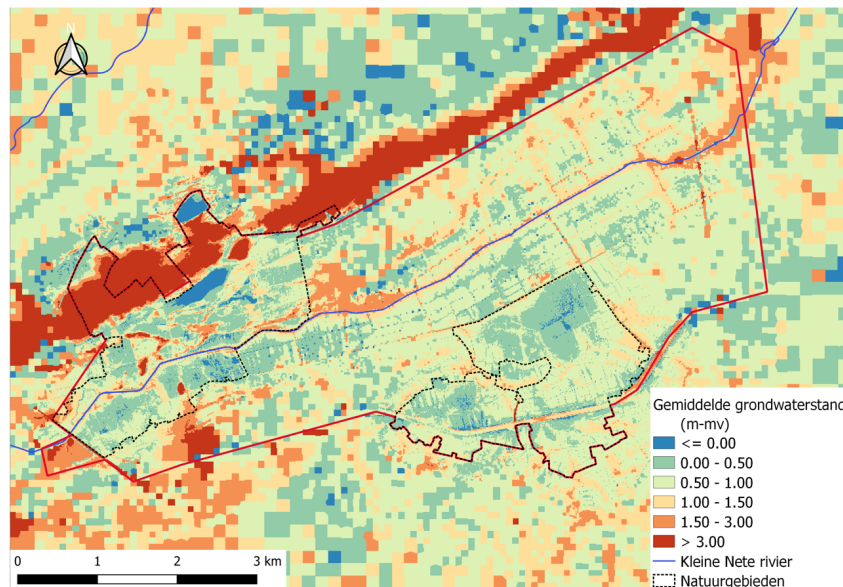


Figuur 40: Bodemtextuur in het studiegebied volgens de Digitale Bodemkaart van het Vlaamse Gewest.

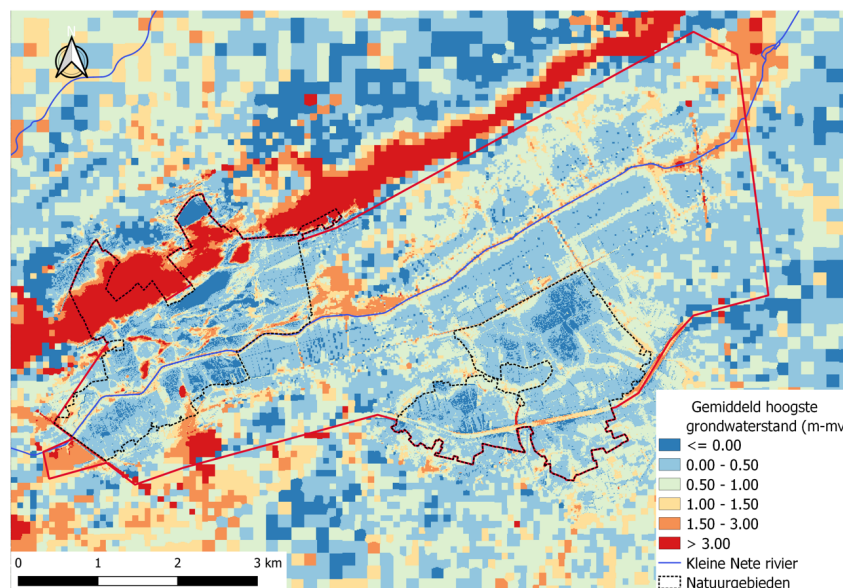


Figuur 41: Bodemtextuur in het studiegebied volgens de bodemeigenschappen gebruikt in het model.

grondwaterstanden (GLG).

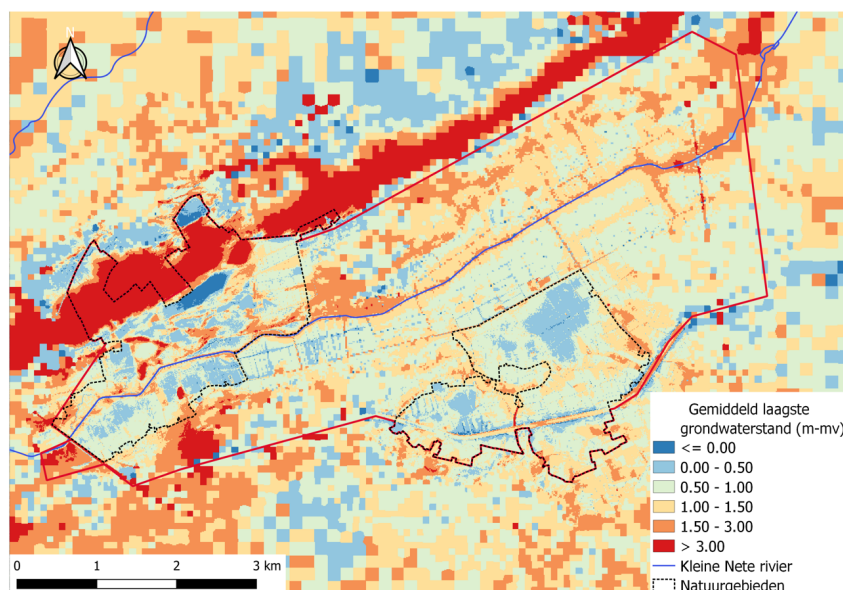


Figuur 42: Gemiddelde grondwaterstanden in het studiegebied op basis van de voorlopige resultaten van "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurgebied De Zegge" (Witteveen+Bos). Er zij op gewezen dat dit geen definitieve resultaten zijn en dat het rapport van deze studie moet worden geraadpleegd voor verder gebruik.



Figuur 43: Gemiddeld hoogste grondwaterstanden (GHG) in het studiegebied op basis van de voorlopige resultaten van "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurgebied De Zegge" (Witteveen+Bos). Er zij op gewezen dat dit geen definitieve resultaten zijn en dat het rapport van deze studie moet worden geraadpleegd voor verder gebruik.

De gedetailleerde vernattingsscenario's waren nog niet beschikbaar bij het beëindigen van deze studie. Het is duidelijk dat indien een grondwaterverhoging van 60 cm wordt gerealiseerd over het hele landbouwgebied ten noorden van de Zegge (zoals voorgesteld in De Becker (INBO, 2019)), dit zou resulteren in een grondwatertafel net onder of zelfs boven het bodemoppervlak. In het westelijke deel van het landbouwgebied rond de Roerdompstraat zou dat lokaal zelfs resulteren in water dat meer dan een halve meter boven het bodemoppervlak. Het is dus nodig



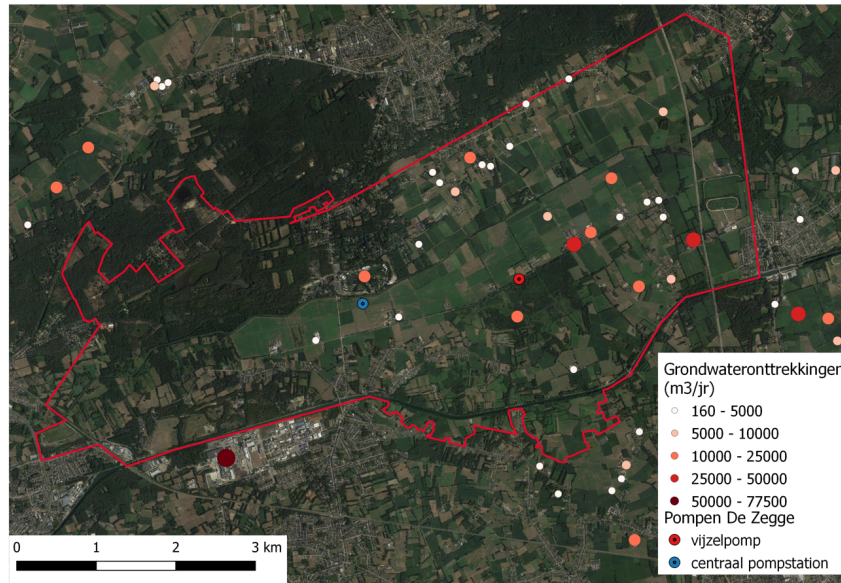
Figuur 44: Gemiddeld laagste grondwaterstanden (GLG) in het studiegebied op basis van de voorlopige resultaten van "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor Natuurgebied De Zegge" (Witteveen+Bos). Er zij op gewezen dat dit geen definitieve resultaten zijn en dat het rapport van deze studie moet worden geraadpleegd voor verder gebruik.

om meer realistische en gedetailleerde scenario's te bekommen voor het gebied om vervolgens de impact op landbouw in te kunnen schatten.

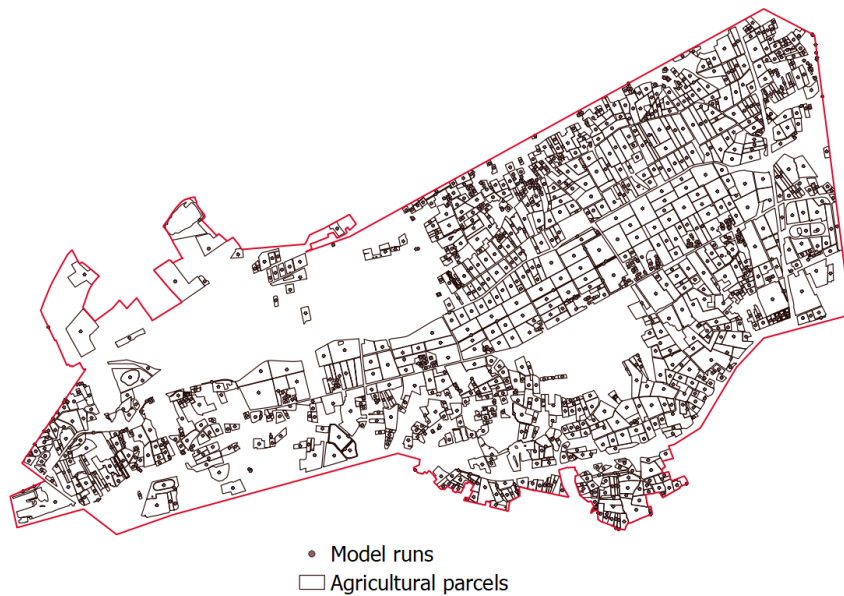
Van Diggelen & Grootjans (2019) rapporteerden 20 grondwateronttrekkingen in de nabijheid van De Zegge. De meeste van deze onttrekkingen zijn klein, in de orde van $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, en enkele zijn groter dan $25000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. Volgens de op het webportaal van de DOV beschikbare informatie over de verleende vergunningen voor het onttrekken van grondwater zijn er momenteel 27 actieve vergunde grondwateronttrekkingen binnen het studiegebied, meestal kleiner dan $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. Meer informatie hierover zal wellicht beschikbaar zijn in de ecohydrologische studie.

2.2.2 Modelkader

Het model SWAP-WOFOST is toegepast op perceelsniveau, volgens de eerder beschreven methodiek en datalagen (Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren). We konden geen modelkalibratie en -validatie uitvoeren voor dit gebied, aangezien er geen historische gegevensreeksen over de opbrengst publiek beschikbaar zijn. In totaal zijn 1282 simulaties uitgevoerd, elk corresponderend met elk landbouwperceel. Deze simulaties werden uitgevoerd voor gras en voedermaïs, de dominante gewassen in het gebied (65% van het landbouwareaal). De outputvariabelen van het model waren de potentiële en actuele gewasopbrengst en informatie over welk type stress voor welk aandeel van de opbrengstvermindering instond (droogtestress, zuurstofstress of indirecte effecten) in elk jaar.



Figuur 45: Huidige vergunde grondwateronttrekkingen in het studiegebied. Bron: DOV



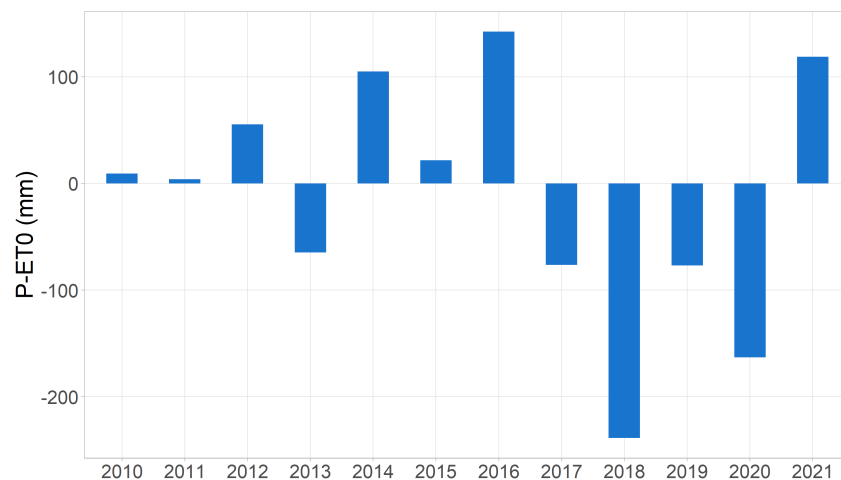
Figuur 46: Locatie van de SWAP-WOFOST simulaties. Elke stip stelt één modelrun voor.

2.3 Resultaten en discussie - huidige toestand

De volgende resultaten omvatten de analyse van de huidige gemiddelde situatie, gebaseerd op historische weersomstandigheden en bodeminformatie zoals in de regionale analyse, maar met grondwaterstanden gesimuleerd met een lokaal gekalibreerd grondwatermodel (Ecohydrologische studie Witteveen+Bos), voor de periode 2010 - 2021 (opnieuw gebruikt als sinusfuncties met GLG/GHG als amplitude, zoals uitgelegd in Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren, 3.4.1). Meer details over hoe de huidige grondwaterstanden werden bekomen zijn te vinden in de ecohydrologische studie van Witteveen+Bos. In principe stelt deze de huidige situatie toestand voor inclusief de werking van de pompen, grachten en centraal gemaal in het landbouwgebied ten noorden van De Zegge tot aan de Kleine Nete.

2.3.1 Meteorologische omstandigheden

Het neerslagtekort ($P-ET_0$) in het studiegebied van 2010 tot 2021 is weergegeven in onderstaande figuur. Positieve waarden betekenen meer neerslag dan verdamping door het referentiegewas, en negatieve waarden wijzen op een grotere nood aan water dan wat er aan neerslag is gevallen. In het algemeen valt er in dit gebied meer neerslag dan gemiddeld in Vlaanderen. 2016 en 2021 zijn natter, en de periode 2018-2020 is droog, maar minder droog dan de mediaan van Vlaanderen.



Figuur 47: Jaarlijks neerslagtekort ($P-ET_0$) in het studiegebied, voor de periode 2010 - 2021.

2.3.2 Opbrengst, opbrengstreductie en type stress

Volgende figuur toont de gemiddelde gesimuleerde droge stof opbrengst voor gras en voedermaïs, voor de periode 2010 - 2021, samen met de standaarddeviatie van de actuele opbrengst (Yact) weergegeven met de zwarte foutbalken, en de opbrengstvermindering als gevolg van waterstress en indirecte effecten. De gesimuleerde potentiële opbrengst (grijs) stelt de opbrengst voor in dat jaar bij de geldende weersomstandigheden, maar ideale vochtomstandigheden in de bodem (geen stress). De gesimuleerde actuele opbrengst (groen) stelt de

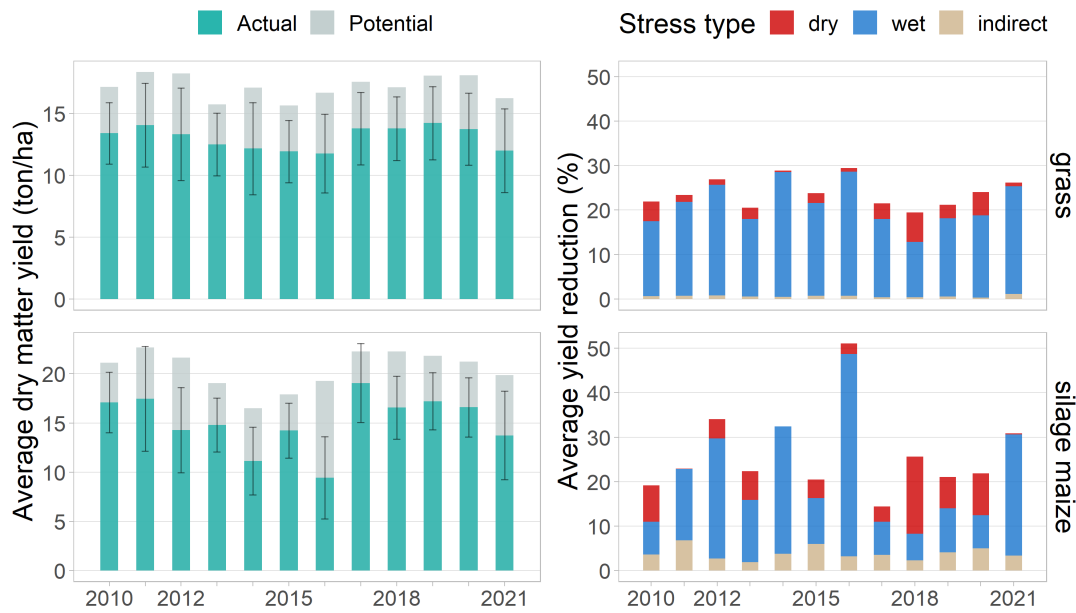
oogst voor met de geldende grondwaterstand op een bepaald perceel (hier dus de huidige toestand zoals bekomen met het gekalibreerd grondwatermodel van de ecohydrologische studie). Rechts zien we de relatieve opbrengstvermindering ($RED_{TOT} = RED_{dir} + RED_{ind} = (\frac{Y_{pot} - Y_{act}}{Y_{pot}}) * 100 + RED_{ind}$) uitgedrukt in %. De kleuren stellen het relatieve aandeel van de verschillende stresstypes (T) in de opbrengstvermindering van een specifiek jaar voor. Daarvoor gaan we ervan uit dat de opbrengstvermindering evenredig is met de vermindering van de transpiratie (T). De opbrengstvermindering uitgedrukt in % voor elk stresstype is dan $\frac{T_{dry}}{(T_{pot} - T_{act})} * RED_{dir}$ (droogtestress, rood), en $\frac{T_{wet}}{(T_{pot} - T_{act})} * RED_{dir}$ (zuurstofstress, blauw). Zo waren in 2015 voor voedermaïs de maximale potentiële opbrengst en actuele opbrengst respectievelijk 17,9 ton ha⁻¹ en 14,2 ton ha⁻¹. Dat is een verschil van 20,5 %, waarvan 4,1 % veroorzaakt werd door droge-droogtestress, 10,4 % door zuurstofstress en 6,0 % door indirecte effecten.

De simulaties laten een hoge opbrengstvariabiliteit door de jaren heen zien, vooral in 2011-2012, 2014-2016 en 2021. Voor de jaren 2015 (normaal), 2018 (droog) en 2021 (nat), dus voor de huidige situatie en niet voor de situatie bij vernattingsscenario's, de gesimuleerde drogestofopbrengst (groene balk in de figuur) van gras in het studiegebied gemiddeld respectievelijk 11,9 ton.ha⁻¹, 13,8 ton.ha⁻¹, en 12 ton.ha⁻¹, en de gesimuleerde voedermaïsoopbrengst respectievelijk 14,2 ton.ha⁻¹, 16,6 ton.ha⁻¹ en 13,7 ton.ha⁻¹. De gemiddelde drogestofopbrengst in België, alle grondsoorten gemengd, bedraagt ongeveer 13,5 ton.ha⁻¹ voor gras (ILVO, 2022), en 14,8 ton.ha⁻¹ voor voedermaïs (bij een drogestofopbrengst van 65%) (STATBEL, 2022).

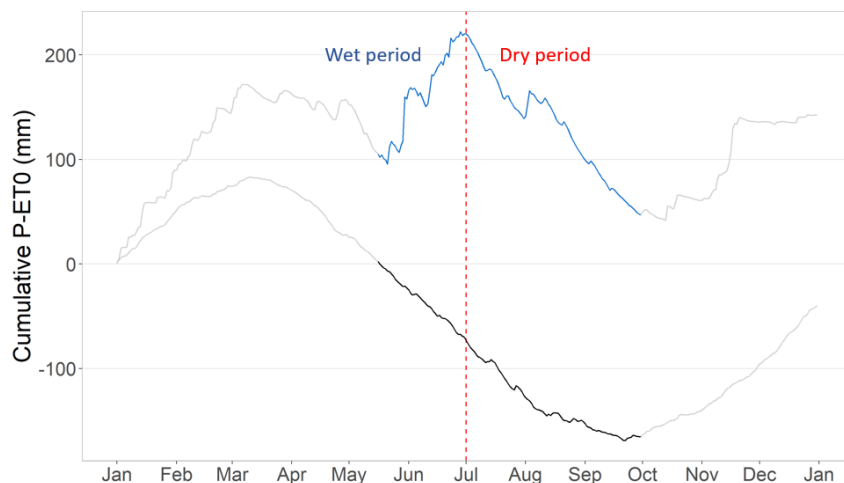
De opbrengst varieert substantieel in de tijd voor een grondwatertafel, vooral bij voedermaïs. Dit is vooral te verklaren door de weersomstandigheden in de regio (en in Vlaanderen). De uiteindelijke gesimuleerde opbrengst (groen) is vrij hoog in vergelijking met de potentiële opbrengst (lichtgrijs) in de meeste jaren, en de totale opbrengst is hoger in droge dan in natte jaren. Hieruit blijkt dat het agrarisch waterbeheer in de meeste situaties optimale omstandigheden biedt voor de landbouw, wat overeenstemt met wat de plaatselijke landbouwers ervaren. Het is echter een delicaat evenwicht. De oogstvermindering in natte perioden hangt samen met de ondiepe grondwaterspiegel in het studiegebied, die bij overvloedige regenval zuurstofstress (blauwe kleur in de figuur) in de gewassen veroorzaakt. Bij gras is de gemiddelde opbrengstvermindering altijd minder dan 30 % en wordt grotendeels veroorzaakt door zuurstofstress (te natte omstandigheden). In voedermaïs lopen de opbrengstverliezen op tot 50 % in 2016, en ongeveer 30 % in 2021, en ook hoofdzakelijk door zuurstofstress. Het groeiseizoen in 2016 werd gekenmerkt door te natte omstandigheden in het voorjaar en droge omstandigheden in de volgende maanden. Dit maakte het gewas kwetsbaarder voor droogte in de volgende maanden. Indirecte effecten (bruin) zijn bij voedermaïs belangrijker dan bij gras, hoewel zij niet meer dan 7% opbrengstvermindering veroorzaken.

2.3.3 Relatie tussen opbrengstvermindering en grondwatertafel

Waar bovenstaande figuur een gemiddeld gedrag voor het hele studiegebied weergeeft, toont de figuur hieronder de relatie tussen de totale opbrengstvermindering van gras en voedermaïs op in 2015, 2018 en 2021 en de gemiddelde grondwaterstanden in elk individueel perceel (zoals gesimuleerd door het gekalibreerde grondwatermodel van de ecohydrologische studie voor

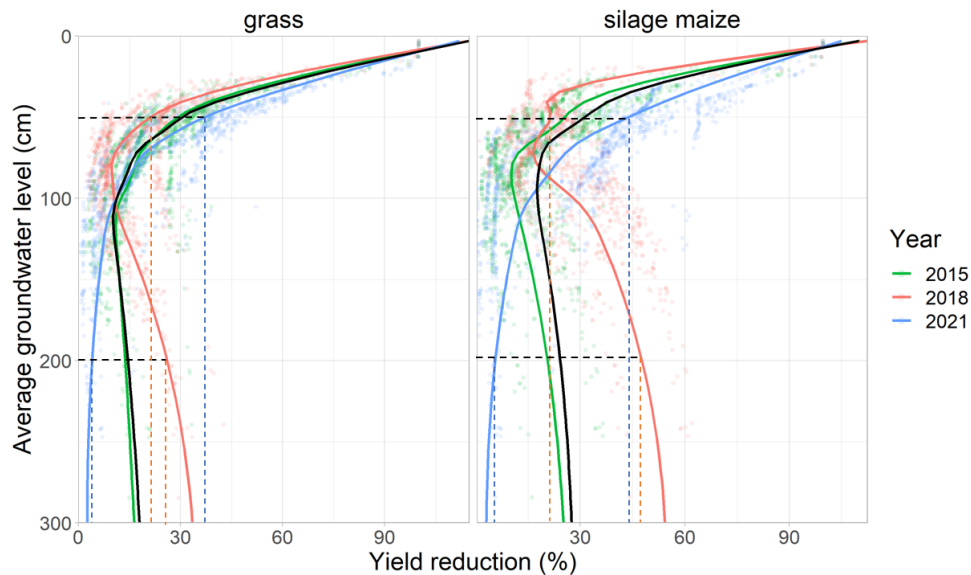


Figuur 48: Variatie van gesimuleerde jaarlijkse opbrengst en opbrengstreducties voor gras en voedermaïs zoals gesimuleerd door SWAP-WOFOST in het gebied. De linkse grafieken tonen de potentiële (Y_{pot}) en actuele (Y_{act}) opbrengst in $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ van alle percelen van het studiegebied. Y_{pot} vertegenwoordigt de maximale potentiële opbrengst (zie paragraaf 2.3.2 van het modelleerkader). De zwarte balkjes geven de standaarddeviatie van deze opbrengst weer tussen de verschillende percelen. In de rechte grafieken zien we de relatieve totale opbrengstvermindering ($RED_{TOT} = RED_{dir} + RED_{ind} = (Y_{pot} - Y_{act} / Y_{pot}) * 100 + RED_{ind}$) uitgedrukt in %. De kleuren stellen het relatieve aandeel van de verschillende stresstypes in de opbrengstvermindering voor. Voor het berekenen van de opbrengstvermindering door directe effecten gaan we ervan uit dat de opbrengstvermindering evenredig is met de vermindering van de transpiratie (T). De opbrengstvermindering uitgedrukt in % voor elk stresstype is dan $(T_{dry} / (T_{pot} - T_{act})) * RED_{dir}$ (droogtestress, rood), en $(T_{wet} / (T_{pot} - T_{act})) * RED_{dir}$ (zuurstofstress, blauw).



Figuur 49: Cumulatief neerslagtekort ($P - ET_0$) gedurende 2016. In de grafiek is de periode mei - oktober gemarkeerd. De blauwe lijn geeft de cumulatieve $P - ET_0$ in het studiegebied weer terwijl de zwarte lijn de gemiddelde cumulatieve $P - ET_0$ in Vlaanderen weergeeft van alle jaren samen (2010-2021).

het huidige waterbeheer). De stippen geven de simulaties voor de drie jaren in alle percelen van het studiegebied weer. De lijnen beschrijven de gemiddelde trend van de simulaties van de drie voorbeeldjaren (2015-groen/normaal, 2018-rood/droog, 2021-blauw/nat). Zo wordt duidelijk dat de optimale grondwaterstand niet enkel bepaald wordt door bodem en teelt, maar ook door het weer. In het natte jaar 2021 komt de maximale opbrengst bijvoorbeeld voor bij een lagere grondwaterstand dan in het droge jaar 2018. De opbrengst neemt in alle jaren sterk af bij grondwaterstanden boven de 80 cm.



Figuur 50: Relatie tussen gemiddelde grondwaterstanden en opbrengstreducties, in 2015, 2018 en 2021, voor gras en snijmaïs. De stippen achteraan geven de simulatieresultaten van alle percelen voor de drie jaren weer, en de gekleurde lijnen geven het gemiddeld gedrag weer op basis van de simulaties van elk jaar. De zwarte lijn vertegenwoordigt de gemiddelde relatie van alle gesimuleerde jaren (2010 tot 2021) gecombineerd.

De snijpunten tussen de gekleurde lijn van elk jaar en de horizontale zwarte stippellijnen illustreert het effect op de opbrengstvermindering in droge en natte jaren, voor de situaties van ondiep grondwater (50 cm) en dieper grondwater (200 cm). Bij een ondiep grondwaterpeil van 50 cm is de opbrengstvermindering in een droog jaar lager en in een nat jaar hoger. Het omgekeerde doet zich voor bij een diepere grondwaterstand van 200 cm, waar de opbrengstvermindering in een nat jaar veel lager is. Op veel plaatsen waar het grondwaterpeil ondieper is dan 50 cm, is er nog steeds gewasopbrengst, maar met een lage rentabiliteit doordat er belangrijke opbrengstreducties gaan optreden. Bij kleine stijgingen van het grondwaterpeil neemt de opbrengst drastisch af tot een niveau waarop de teelt niet meer rendabel is. Deze relaties variëren bij verschillende weersomstandigheden (cfr de gekleurde lijnen van verschillende jaren zijn niet identiek), maar zijn ook afhankelijk van de specifieke eigenschappen van de verschillende gewasvariëteiten. In deze studie maakten we geen onderscheid tussen variëteiten binnen een soort gewas en vergeleken we enkel gewassen onderling.

In de huidige situatie, gebaseerd op de resultaten van een ~10-jarige periode, is het grondwaterpeilbeheer in het gebied optimaal voor de huidige landbouwactiviteiten (gras en voedermaïs), vooral in droge jaren en resulteert ook nu al bij natte jaren al in beperkingen. Dit blijkt uit de simulaties, maar ook uit gesprekken met de landbouwers zelf tijdens workshops in 2022.

Mocht de grondwaterstand stijgen door vernattingsmaatregelen zoals voorgesteld in eerdere studies (Van Diggelen & Grootjans, UA, 2019; De Becker, INBO, 2019), dan zal dit zeker gevolgen hebben voor de rendabiliteit van de huidige teelten op de landbouwgronden ten noorden van de Zegge. Uit bovenstaande figuur blijkt immers duidelijk dat bij grondwaterstanden boven de 50 cm, de oogst drastisch afneemt.

2.3.4 Volgende stappen: impact van vernattingsscenario's

In de toekomst kan het in deze studie ontwikkelde modelkader worden gebruikt om de impact van verschillende grondwaterstandsscenario's op de conventionele landbouwteelten te beoordelen. Concreet zal de zullen die scenario's gegenereerd worden met het gekalibreerde grondwatermodel uit de ecohydrologische studie. Met dat model kan immers de impact van het stilleggen van pompen of andere maatregelen doorgerekend worden en kan een simulatie gemaakt worden van hoe dat in het hele gebied de grondwaterstanden zal beïnvloeden. Die gesimuleerde grondwaterstanden voor verschillende scenario's kunnen dan weer gebruikt worden om met dit modelkader de impact op landbouwteelten te berekenen.

2.4 Conclusies

Het model SWAP-WOFOST werd toegepast op perceelsniveau in het studiegebied rond De Zegge-Mosselgoren om de opbrengstvariabiliteit van gras en voedermaïs te evalueren. Dit gebeurde mbv de huidige grondwaterstanden zoals bekomen met het gekalibreerde grondwatermodel van de ecohydrologische studie, en verder met dezelfde modelinput als beschreven in het hoofdstuk Modelkader om het effect van de grondwaterstand op de landbouwpraktijk te evalueren.

Verschillen in meteorologische condities tussen de jaren veroorzaakt een grote opbrengstvariabiliteit over de jaren heen, vooral voor voedermaïs. Ondiepe grondwaterniveaus in het studiegebied veroorzaken zuurstofstress in gewassen in natte jaren, maar zijn gunstig voor de gewasproductie in droge jaren. In het algemeen is zuurstofstress de belangrijkste oorzaak van opbrengstvermindering in dit gebied. De totale opbrengstvermindering door te droge of te natte omstandigheden en door indirecte effecten (kortere groeiseizoenen) bedraagt voor beide gewassen tot 30% bij de huidige grondwaterstanden en het huidige klimaat, behalve voor voedermaïs in 2016 waar er tot 50% opbrengstreductie was, vooral door zuurstofstress.

In de huidige situatie is het agrarisch waterbeheer in het gebied optimaal voor landbouwactiviteiten in droge jaren, maar veroorzaken zij soms al beperkingen in natte jaren. Dit komt overeen met de praktijkervaringen van de betrokken landbouwers in het gebied. Gedetailleerde conclusies over het effect van stijgende grondwaterstanden als gevolg van vernattingsstrategieën op de landbouw in het studiegebied kunnen uit deze studie nog niet worden getrokken, aangezien de scenario's nog niet klaar waren. Dit kan in de toekomst verder worden geëvalueerd aan de hand van de grondwaterstandsscenario's uit de "Ecohydrologische studie: basis voor herstelmaatregelen voor natuurgebied De Zegge" met het hier uitgewerkte modelkader. Daartoe is het voor de Vlaamse omstandigheden aangepaste model SWAP-WOFOST met bijbehorende documentatie vrij beschikbaar in de github repository van PEILIMPACT.

2.5 Referenties

Backx, H., Meire P., Van Diggelen, R. (2011). Ecohydrologie van De Zegge. Een beschrijving over de tijdsperiode 2005-2010. Rapport Universiteit Antwerpen, Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer, ECOBE 012-R156

De Becker, P. (2019). Ecologisch onderbouwde scenario's voor moerasontwikkeling en hydrologisch herstel in De Zegge en Mosselgoren [Techreport]. Instituut Natuur- en Bosonderzoek (INBO). URL studie INBO

Vanierschot, L. (2014). Soil organic carbon in the landscape: relation with natural and anthropogenic gradients in the Campine region. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3085.7446>

VPO. (2017). Digitale bodemkaart van het Vlaams Gewest: bodemtypes. Geopunt bodemkaart

O'Leary, D., Brown, C., Healy, M. G., Regan, S., & Daly, E. (2023). Observations of intra-peatland variability using multiple spatially coincident remotely sensed data sources and machine learning. *Geoderma*, 430, 116348. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116348>

ILVO. (2022). Vergelijkende tabel van kenmerken van grassoorten - Rassenlijst. <https://rassenlijst.ilvo.vlaanderen.be/en/comparison-of-grass-variety-characteristics>

STATBEL. (2022). Land- en tuinbouwbedrijven. <https://statbel.fgov.be/nl/themas/landbouw-visserij/land-en-tuinbouwbedrijven>

Van Diggelen, R., & Grootjans, A. P. (2019). Bedreigingen en herstel mogelijkheden van het KMDA reservaat "De Zegge", Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer, ECOBE 019-R233 [Techreport]. https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/80198493/Experteninschatting_Ecohydrologie_Zegge_1_.pdf

Wyseure, G. (2022). Beschouwingen over de Zegge. Juni 2022.

–DEEL VI–

Aanvullende beschouwingen mbt vernatting in landbouwgebied

1 Effect van grondwaterstand op de mobiliteit van nutriënten

Hoofdpunten

Een oppervlakkige grondwatertafel leidt tot onvoldoende zuurstof in de bodem, waardoor de fysische en elektrochemische eigenschappen ervan drastisch veranderen. In deze nieuwe omstandigheden zijn geadsorbeerde fosfor en organische koolstofverbindingen mobieler, en kunnen zij naar het oppervlaktewater migreren. Dit hangt af van de beschikbaarheid van fosfor in de bodem. De uitspoeling van oplosbare stikstof is doorgaans lager en gaat meestal verloren in de vorm van gas bij hoge grondwaterstanden, omdat er minder van beschikbaar is in de bodem.

Een van de belangrijkste punten van zorg in met water verzadigde wetlands is de toename van de nutriëntenconcentratie in het grondwater en de mogelijke verontreiniging van aangrenzende aquatische ecosystemen (d.w.z. eutrofiëring). De toename van de oplosbaarheid van fosfor (mobilisatie) en de diffusie zijn inderdaad de belangrijkste veranderingen van het stijgende grondwaterpeil. Maar ook de toename van verontreinigende gassen zoals methaan, die de mitigatie van de klimaatverandering in de weg kan staan.

Bij een stijging van het grondwaterpeil, en dus van de bodemvochtigheid, gaan bodems door het gebrek aan zuurstof over op anaërobe omstandigheden. In deze omstandigheden overheersen gespecialiseerde bodembacteriën die het organische materiaal langzaam afbreken. De afbraak van het organisch materiaal (mineralisatie) tot voornamelijk methaan en kooldioxide, en de opname van voedingsstoffen (assimilatie) zijn dan ook zeer trage processen, die leiden tot accumulatie van plantenresten. Tegelijkertijd wijzigen veranderingen in de pH de hoeveelheid oplosbare nutriënten en chemicaliën in de bodem. Anorganisch fosfor is meestal gebonden aan kleideeltjes, ijzer, aluminium en calcium. De gewijzigde pH in anaërobe omstandigheden verhoogt de oplosbaarheid van deze elementen, en de geadsorbeerde fosfor en organische koolstofverbindingen komen vrij in de bodemoplossing. Stikstof daarentegen gaat meestal als stikstofgas uit de bodem verloren. Door dit stikstofverlies is er minder oplosbare stikstof beschikbaar voor planten.

1.1 Inleiding

Stijgende grondwaterstanden veroorzaken drastische veranderingen in het ecosysteem en in de fysische en elektrochemische eigenschappen van de bodem (Harpenslager et al. , 2015). Afhankelijk van de intensiteit van de vernatting is conventionele landbouw soms niet lan-

ger mogelijk. De toename van de mobilisatie van nutriënten in bodems die voorheen in de landbouw werden gebruikt, kan leiden tot verontreiniging van het oppervlaktewater, met ongewenste effecten in aquatische milieus (d.w.z. eutrofiëring) (Zak & Gelbrecht, 2007; Johnston et al. , 2005). Het opnieuw bevochtigen van drooggelegde veengebieden in de landbouw is bijzonder kritisch vanwege de grote hoeveelheid nutriënten en organisch materiaal (Zak & Gelbrecht, 2007). Talrijke studies wijzen op het vermogen van wetlandvegetaties zoals kattenstaart (*Thypha* sp.) om overtollige stikstof en fosfor uit het oppervlakte- en poriewater te verwijderen. Als zodanig voorkomen zij accumulatie en transport van nutriënten en verminderen zij de uitstoot van methaan (CH_4), waarvan bekend is dat deze toeneemt in overstromde omstandigheden (Vroom et al. , 2018; Belle, 2021; Geurts et al. , 2020).

De omvang en de duur van de verzadigde bodem en de aanwezigheid van microbiologische activiteit bepalen of er wateroverlast (anaërobe omstandigheden) kan optreden (Moore et al. , 1998). Deze omstandigheden doen zich voor in vernatte wetlands, waar het waterpeil boven of iets onder het bodemoppervlak wordt gehouden. De zuurstof uit de onderliggende waterkolom kan een klein deel van het bodemoppervlak bereiken voordat het uitgeput raakt, waardoor een dunne aërobe laag ontstaat bovenop een dikkere anaërobe laag. De diepte van deze aërobe laag hangt af van de zuurstofvoorziening en de verbruikssnelheid in de bodem, en is zelfs onbestaande in bodems met veel afbreekbaar organisch materiaal aan het bodemoppervlak (Buresh et al. , 2008). Daarom zijn de chemische processen in de anaërobe laag in dit hoofdstuk het belangrijkste.

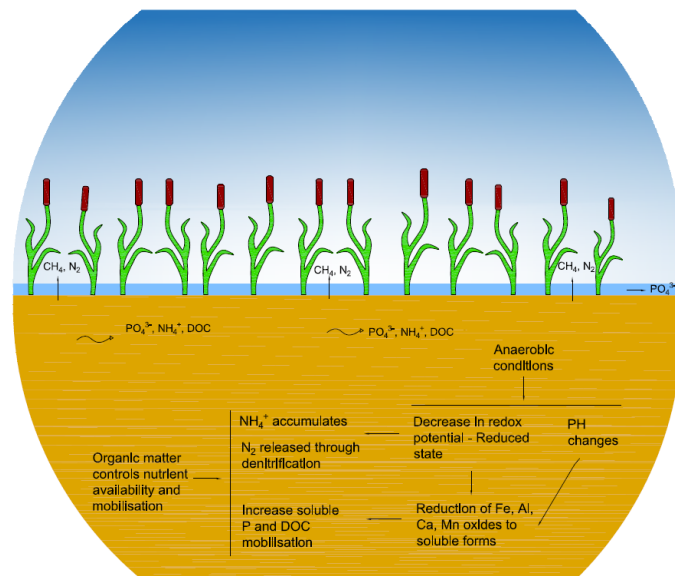
In Vlaanderen is de beschikbaarheid van zowel fosfor (P) als stikstof (N) in de bodem hoog, mede als gevolg van de intensieve veehouderij en landbouw. In de loop der jaren zijn op de Vlaamse landbouwgronden aanzienlijke P-reserves aangelegd, en de stikstofemissies (voornamelijk ammoniak) ten gevolge van landbouwactiviteiten zijn alarmerend gebleven, en vormen het aandachtspunt van de mestwetgeving (Bomans et al. , 2005; Departement Omgeving, 2022). Fosfor is gewoonlijk zeer sterk gebonden aan bodemdeeltjes, en erosie en afspoeling zijn de belangrijkste mechanismen voor het transport van P-deeltjes naar het oppervlaktewater (Bomans et al. , 2005). Onder anaërobe omstandigheden komt een deel van het gebonden fosfor in de bodemoplossing terecht en kan het via de oppervlakteafvoer en ook als oplosbaar of opgelost P worden getransporteerd (Ponnamperuma, 1972), met een ernstig risico van eutrofiëring in nabijgelegen wateren. Evenzo veroorzaken overmatige stikstofemissies en latere depositie in de bodem eutrofiëring en bodemverzuring (Departement Omgeving, 2022). Het is daarom belangrijk de mogelijke effecten van vernatting op de mobilisatie van nutriënten, gasemissies en beschikbaarheid te onderzoeken.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste chemische en fysische transformaties van nutriënten en andere verbonden elementen in waterige bodems (anaerobe omstandigheden) beschreven, met de nadruk op fosfor, en de mogelijke effecten daarvan op het ecosysteem.

1.2 Chemie van verzadigde bodems onder anaerobe omstandigheden

Een stijgend waterpeil veroorzaakt een snelle verschuiving van aerobe naar anaerobe bodemprocessen (Harpenslager et al. , 2015). Onder anaerobe omstandigheden bevinden bodems zich in een gereduceerde toestand in plaats van een geoxideerde toestand, wat verschillende

elektrochemische veranderingen veroorzaakt zoals afname van het redoxpotentiaal, veranderingen in de pH, drastische verschuivingen in minerale evenwichten en sorptie en desorptie van ionen (Ponnamperuma, 1972). Reductie is de opname van elektronen door een oxiderende stof of acceptor, terwijl oxidatie het verlies van elektronen door een reducerende stof of donor is. Redoxpotentiaal geeft aan hoe gemakkelijk elektronen worden overgedragen van of naar chemische componenten in een oplossing. Onder anaërobe omstandigheden gebruiken facultatieve en obligate anaerobe micro-organismen organische materiaal in de bodem als substraat of donor, en geoxideerde bodemcomponenten zoals nitraat (NO_3^-) of mangaandioxide (MnO_2) als elektronenacceptoren in hun ademhaling. De gereduceerde componenten tijdens de anaerobe ademhaling zijn gewoonlijk koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4), ammonium (NH_4^+), ammoniak (NH_3), waterstofsulfide (H_2S), ethyleen (C_2H_4), etc. (Ponnamperuma, 1972). Onder anaerobe omstandigheden heeft de bodem een lage redoxpotentiaal, omdat anaerobe bacteriën werken bij een laag energieniveau als gevolg van de onvolledige afbraak van koolhydraten (Zak & Gelbrecht, 2007; Ponnamperuma, 1972; Buresh et al., 2008). Daarom zijn decompositie en assimilatie zeer trage processen en hopen plantenresten zich op in waterhoudende of slecht gedraineerde bodems (bv. veengebieden).



Figuur 51: Belangrijkste elektrochemische transformaties in de bodem onder water.

1.2.1 Sequentiële reductie

Tijdens de overgang van aerobe naar anaerobe omstandigheden raakt de zuurstof snel uitgeput en worden andere bodemverbindingen gebruikt als elektronenacceptoren voor anaerobe bacteriën. De keuze van deze elektronenacceptoren gebeurt ruwweg in de volgorde zoals weergegeven in tabel 1, volgens de redoxpotentiaal of elektronenactiviteit (pe) (Ponnamperuma, 1972; Amery, 2012). Hoe negatiever pe is, hoe sterker het reductiepotentiaal.

Na zuurstofdepletie worden eerst MnO_2 (Mn^{4+}) of NO_3^- gereduceerd tot respectievelijk Mn^{2+} en N_2 . De reductie van NO_3^- begint pas nadat de zuurstofconcentratie tot een zeer lage waarde is gedaald, en hun aanwezigheid vertraagt de reductie van de volgende oxiden in de reeks.

Tabel 14: Opeenvolging van halve reductiereacties in ondergedompelde bodems met pe-waarden voorspeld voor gelijke concentraties van de gereduceerde en geoxideerde soorten in oplossing (Amery, 2012)

| | pH 5 | pe* | pH 7 |
|----|---|------|------|
| 1) | $1/4O_2 + e^- + H^+ = 1/2H_2O$ | 15.6 | 13.6 |
| 2) | $1/2MnO_2 + e^- + 2H^+ = 1/2Mn^{2+} + H_2O$ | 12.8 | 8.8 |
| 3) | $1/2NO_3^- + e^- + H^+ = 1/2NO_2^- + 1/2H_2O$ | 9.3 | 7.3 |
| 4) | $Fe(OH)_3 + e^- + 3H^+ = Fe^{2+} + 3H_2O$ | 4.8 | -1.2 |
| 5) | $1/8SO_4^{2-} + e^- + 5/4H^+ = 1/8H_2S + 1/2H_2O$ | -1.0 | -3.5 |
| 6) | $1/8CO_2 + e^- + H^+ = 1/8CH_4 + 1/4H_2O$ | -2.1 | -4.1 |
| 7) | $H^+ + e^- = 1/2H_2$ | -5.0 | -7.0 |
| 8) | $1/4CO_2 + e^- + H^+ = 1/4CH_2O + 1/4H_2O$ | -6.1 | -8.1 |

* voor vaste fase/oplossingsevenwichten: concentraties van opgeloste stoffen van 10^{-4} M. Atmosferische gassamenstelling aangenomen: partiële druk van O_2 van 0,21 bar, N_2 van 0,778 bar, en CO_2 van $3,2 \cdot 10^{-4}$ bar.

MnO_2 heeft minder invloed dan NO_3^- omdat het onoplosbaar is in water en slechts door enkele specifieke bacteriën als elektronenacceptor wordt gebruikt. De volgende in de reeks is ijzer(III)hydroxide $Fe(OH)_3$ (Fe^{3+}), dat wordt gereduceerd tot Fe^{2+} . Onder sterk gereduceerde omstandigheden worden sulfaat (SO_4^{2-}), CO_2 en H^+ gebruikt als elektronenacceptor voor de bacteriële ademhaling (Ponnamperuma, 1972; Boyd, 1995).

1.2.2 Zuurstof en andere gassen

In verzadigde omstandigheden kunnen zuurstof en andere gassen zich alleen door de bodem verplaatsen door moleculaire diffusie in het poriewater. Dit proces is veel trager dan diffusie door met gas gevulde poriën (ongeveer 10000 keer trager), en daarom neemt de zuurstofdiffusiesnelheid sterk af wanneer de bodem verzadigd raakt. Binnen enkele uren na verzadiging is alle beschikbare moleculaire zuurstof in het water of in de bodem uitgeput door micro-organismen. In deze anaerobe omstandigheden worden tijdens de ademhaling en alcoholische gisting behalve kooldioxide (CO_2) ook andere tussengassen geproduceerd, zoals methaan (CH_4) en ethyleen (C_2H_4), die zich in de bodem ophopen en uiteindelijk ook in de atmosfeer terechtkomen (Moore et al., 1998).

1.2.3 pH

De pH van de bodem is een maat voor de concentratie waterstofionen in de bodemoplossing. De waarde varieert van 0 tot 14, waarbij 5,5 tot 8,0 als ideaal voor plantengroei wordt beschouwd. Bodems met een lage pH-waarde (<5,5) worden als zuur beschouwd, terwijl bodems met een hoge pH-waarde (>8,0) als alkalisch worden geclassificeerd (Rengasamy, 2022). De pH stijgt in verzadigde zure bodems en daalt in verzadigde alkalische bodems, totdat beide een relatief stabiele waarde van ongeveer 7 bereiken (Ponnamperuma, 1972). Dit is te zien in verschillende experimenten die uitgevoerd zijn bij vernattingsprojecten (Zak & Gelbrecht, 2007;

Riet et al. , 2013). De stijging van de pH in zure bodems heeft te maken met bodemreductieprocessen, terwijl de daling ervan in alkalische bodems het gevolg is van CO₂ accumulatie. Dit fenomeen kan echter veranderen afhankelijk van het organische stof- en ijzergehalte. Organische stof en ijzer versterken de daling van de pH in basische of alkalische bodems, terwijl ze de stijging van de pH in zure bodems beperken (Ponnamperuma, 1972).

De pH beïnvloedt in hoge mate de hydroxide-, carbonaat-, sulfide-, fosfaat- en silicaat-evenwichten in overstroomde bodems. Deze evenwichten regelen hun chemische en fysische omzettingen, waaronder neerslag en oplossing van vaste stoffen, sorptie en desorptie van ionen (Ponnamperuma, 1972); en uiteindelijk hun beschikbaarheid in de bodemoplossing en voor de planten.

1.2.4 Temperatuur

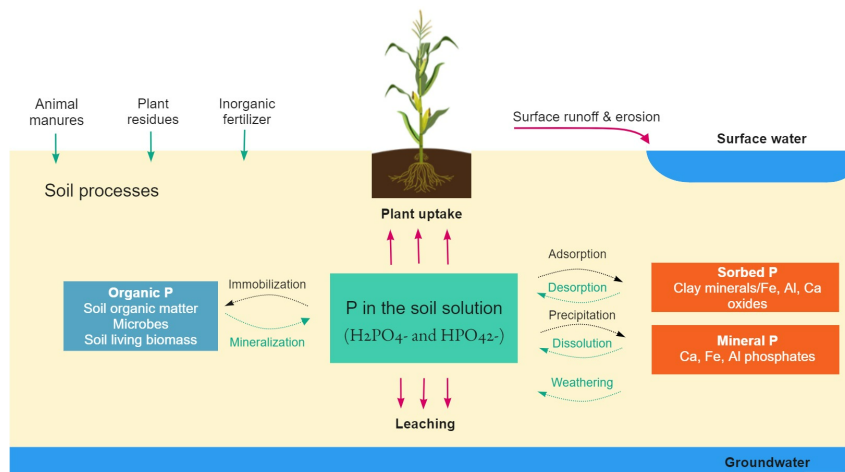
De bodemtemperatuur bepaalt hoofdzakelijk de zuurstofdepletiesnelheid in overstroomde bodems. Bij lage temperatuur is de biologische activiteit van planten en bodemmicro-organismen laag en dus ook de zuurstofbehoefte. De zuurstofbehoefte neemt echter exponentieel toe met de temperatuur. Bij een hogere temperatuur groeien planten sneller en neemt de microbiologische activiteit toe, waardoor de zuurstofbehoefte in warme omstandigheden snel afneemt (Moore et al. , 1998). De temperatuur heeft dus een sterk effect op de bodemreductieprocessen in overstroomde bodems (Ponnamperuma, 1972).

1.3 Transformatie van fosfor

In de bodem is fosfor (P) aanwezig aan bodemdeeltjes, als mineralen zoals Fe-Al oxiden en Ca-carbonaten, als onderdeel van organisch materiaal en een zeer klein percentage opgelost in de bodemoplossing (Bomans et al. , 2005). Fosfor (P) is een beperkende voedingsstof voor de groei van gewassen, vooral tijdens de vegetatieve fase. In Vlaanderen variëren de kritische P-waarden voor optimale plantengroei van 59 mg P/kg droge grond in wintertarwe tot 164 mg P/kg droge grond in maïs (Stijn Martens et al. , 2020). Oplosbare vormen van P zoals orthofosfaat-ionen (H₂PO₄⁻ en HPO₄²⁻) worden door planten geabsorbeerd en aan de vruchten en zaden toegewezen tijdens de voortplantingsfase (Bomans et al. , 2005). Overtollig oplosbaar P gaat verloren door afspoeling en uitspoeling. De belangrijkste transformaties van fosfor in de bodem zijn hieronder geïllustreerd.

1.3.1 De rol van het kleigehalte en de bodemmineralogie

Anorganisch P heeft een hoge affiniteit met kleideeltjes, ijzer (Fe), aluminium (Al) en calcium (Ca) oxiden in de bodem (Prasad & Chakraborty, 2019; Zak & Gelbrecht, 2007). IJzer- en aluminiumfosfaten overheersen in zure bodems en sedimenten, terwijl calciumfosfaten aanwezig zijn in alkalische bodems (Ponnamperuma, 1972). In anaerobe omstandigheden, als gevolg van de stijging van de pH in zure bodems en de daling in alkalische bodems, worden onoplosbare ijzer-, aluminium- of calciumoxiden gereduceerd tot oplosbare vormen (Fe²⁺ , Al²⁺ , Ca⁺), die zich gemakkelijk in de bodemoplossing kunnen verplaatsen (Ponnamperuma, 1972). Geabsorbeerd fosfor komt dan vrij en wordt deel van de bodemoplossing. Kleiachtige bodems of



Figuur 52: Fosforroutes en transformaties in de bodem. Aangepast van Prasad & Chakraborty (2019).

bodems met hoge concentraties Fe, Al of Ca oxiden, hebben een grotere P adsorptiecapaciteit en daarom zal de beschikbaarheid van P groter zijn wanneer een groter deel van de bodem verzadigd raakt (Prasad & Chakraborty, 2019). Riet et al. (2013) vonden dat P-waarden in opnieuw vernatte veengronden en met klei bedekte veengronden tot 11,7 mg P-PO₄/l bedroegen, waarbij dit in verzadigt veen hoger was vanwege een grotere beschikbaarheid van ijzergebonden fosfor in die omgevingen. Onder verzadigde omstandigheden wordt ook mangaandioxide (MnO₂, Mn⁴⁺) gereduceerd tot oplosbare mangaanionen (Mn²⁺). Hoge concentraties Fe²⁺ en Mn²⁺ ionen kunnen giftig zijn voor planten (Ponnamperuma, 1972).

1.3.2 Mineralisatie- en transportprocessen

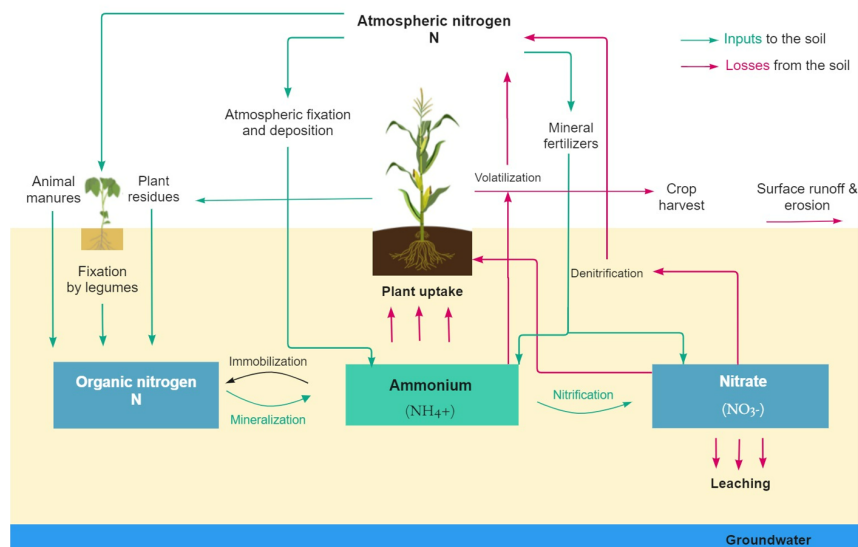
Mineralisatie is het proces waarbij in organisch materiaal aanwezige nutriënten (C, P, N, K) worden omgezet in anorganische verbindingen die gemakkelijk beschikbaar zijn voor planten. Dit proces wordt versterkt bij een hoger bodemvochtgehalte, omdat bodemmicro-organismen de voorkeur geven aan een natter milieu (Whalen et al., 2001). Het vertraagt onder anaerobe omstandigheden, omdat anaerobe bacteriën langzamer werken. Het is duidelijk dat bij een hoger gehalte aan organisch materiaal (d.w.z. veengebieden) meer beschikbare vormen van P in de bodem kunnen vrijkomen (Prasad & Chakraborty, 2019). Verder kunnen organische moleculen zoals humuszuren sorptie- en neerslagprocessen van fosfaat belemmeren, wat leidt tot meer beschikbaarheid van oplosbaar P in de bodem (Amery & Vandecasteele, 2015; Prasad & Chakraborty, 2019). Zak & Gelbrecht (2007) vonden dat de hoogste oplosbare P-concentratie in poriewater (143 M) werd gemeten in sterk afgebroken veen, terwijl verwaarloosbare toenames werden gevonden in licht afgebroken veen.

Oppervlakteafvoer is de belangrijkste hydrologische route van fosforverlies van de bodem naar het oppervlaktewater (Prasad & Chakraborty, 2019), vooral in landbouw- en veeteeltgebieden. Afvloeiend water transporteert deeltjes P binnen geërodeerde bodemdeeltjes, en opgelost P. Diffusie van het oplosbare P hangt sterk af van het bodemvochtgehalte. Opgelost P verplaatst zich door de bodemporiën met het water en kan dus gemakkelijker worden getransporteerd en verloren gaan door afstroming bij hoge grondwaterstanden (Amery & Vandecasteele, 2015). De oppervlakteafvoer tijdens regenval is hoger in verzadigde bodems, en het risico van P-

verliezen neemt toe in gebieden met een hoog P-overschot zoals het geval is in Vlaanderen.

1.4 Transformatie van stikstof

Net als fosfor is stikstof een essentiële voedingsstof voor de groei, ontwikkeling en voortplanting van gewassen (Moore et al. , 1998). Het is in bodems en sedimenten vooral aanwezig als ammonium (NH_4^+), moleculaire stikstof (N_2), nitriet (NO_2^-), nitraat (NO_3^-) en complexe organische stoffen (die niet gemakkelijk beschikbaar zijn voor opname door planten) (Ponnamperuma, 1972). De omzettingen zijn grotendeels afhankelijk van microbiële activiteit die wordt gestuurd door fysische en chemische kenmerken van de bodem, zoals organisch materiaal, temperatuur, bodemvocht en pH. Ammonium en nitraat zijn oplosbare vormen van stikstof, die makkelijk beschikbaar zijn voor planten. In anaerobe bodems zijn de belangrijkste transformaties de accumulatie van NH_4^+ , denitrificatie en stikstoffixatie (Ponnamperuma, 1972). De meeste stikstof gaat uit de bodem verloren in de vorm van stikstofgas (N_2); door dit stikstofverlies is er minder opgelost stikstof beschikbaar voor planten.



Figuur 53: Stikstofroutes en -transformaties. Aangepast van ESN (2020).

1.4.1 Accumulatie van ammonium

Nadat het grondwaterpeil is gestegen tot er volledige bodemverzadiging optreedt, putten micro-organismen de resterende zuurstof snel uit. Bij gebrek aan zuurstof kan de chemische omzetting van organische stikstof (mineralisatie) niet verder gaan in de omzetting in NO_3^- , en bijgevolg hoopt NH_4^+ zich op in de bodem (Buresh et al. , 2008). Ook het feit dat anaerobe bacteriën een lage stikstofbehoefte hebben, draagt bij aan een snellere ammoniumafgifte en -accumulatie (Tusneem, 1971). Riet et al. (2013) rapporteerden dat een hoge ammoniumafgifte (4,8 mg N- NH_4^+ /l) werd waargenomen in vernatte veengebieden. Ook Zak & Gelbrecht (2007) zagen dat de bovenste sterk ontbonden veenlaag vooral verantwoordelijk was voor de hoge mobilisatie van ammonium na vernatting, vanwege de beschikbaarheid van afbreekbaar organisch materiaal. Vervluchtiging van ammoniak is een andere route van stikstofverlies uit

overstroomde en bemeste bodems. Een hoge pH (7,5 tot 10) en temperatuur bevorderen het verlies van toegevoegde meststoffen door ammoniakvervluchtiging (Buresh et al., 2008).

1.4.2 Denitrificatie en stikstoffixatie

Denitrificerende bacteriën gebruiken NO_3^- in plaats van zuurstof als oxidatiemiddel om stikstof om te zetten in stikstofgas (N_2), dat uiteindelijk ontsnapt naar de atmosfeer (Ponnamperuma, 1972). In aanwezigheid van een hoge beschikbaarheid van nitraat (d.w.z. door bemesting, plantenresten) kan onvolledige denitrificatie door een tekort aan zuurstof leiden tot lachgasemissies (N_2O) (Vroom et al. , 2018; IPV, 2022). Vastgesteld is dat lachgas verwaarloosbaar is in wetlands die vernat werden (Vroom et al. , 2018). In overstroomde bodems kan ammonium in de dunne bovenste aerobe laag worden omgezet in nitraat en diffunderen naar de anaerobe zone, waar het wordt gedenitrificeerd (Tusneem, 1971).

Het zuurstofgebrek en de grote hoeveelheid opgeloste organische koolstof bevorderen ook de biologische stikstofbinding door cyanobacteriën. Dit proces doet zich typisch voor in rijst 'paddies' (Buresh et al. , 2008).

1.5 Andere transformaties

1.5.1 Omzetting van koolstof

De belangrijkste omzetting van koolstof onder natte omstandigheden is de afbraak van het organische materiaal (bijv. koolhydraten) door bodemmicro-organismen tijdens de respiratie (Ponnamperuma, 1972). Deze omzetting verloopt veel trager dan in aerobe omstandigheden, omdat bij deze omzettingen veel minder energie vrijkomt. Methaan (CH_4) is het typische eindproduct van de anaërobe afbraak van organisch materiaal, gewoonlijk vergezeld van kleinere hoeveelheden koolstofdioxide (CO_2), organische zuren en waterstof (Ponnamperuma, 1972). De uitstoot van CH_4 is een van de belangrijkste problemen in vernatte veengebieden omdat het een zeer verontreinigend gas is. In bodems die rijk zijn aan organisch materiaal kan CO_2 zich ophopen in het poriewater en carbonaten oplossen (Zak & Gelbrecht, 2007).

Naast P zijn ijzeroxiden ook gebonden aan organische koolstofstofverbindingen. Bij de reductie van deze oxiden onder anaerobe omstandigheden komt opgeloste organische koolstof (DOC) vrij in de bodemoplossing (Zak & Gelbrecht, 2007; Harpenslager et al. , 2015; Maranguit et al. , 2017).

1.5.2 Sulfaat transformatie

In zeer slecht gedraineerde bodems wordt sulfaat (SO_4^{2-}) gereduceerd tot sulfide (S_2^-) en soms tot waterstofsulfide (H_2S) (Moore et al. , 1998). H_2S kan met zware metalen reageren tot onoplosbare sulfiden, of waterstof leveren aan fotosynthetische zwavelbacteriën (Ponnamperuma, 1972). Zak & Gelbrecht (2007) stelden vast dat de sulfaatconcentratie sterk toenam na vernatting, maar ook weer snel afnam in de bovenste, sterk vergane veenhorizont.

1.6 Effecten op waterkwaliteit en biodiversiteit

Een toename van de beschikbaarheid van nutriënten in de bodemoplossing, met name fosfor (P), kan leiden tot verontreiniging van plaatselijke semi-aquatische ecosystemen. Deze toename is agronomisch gezien onbeduidend omdat fosfor en stikstof beperkende nutriënten zijn voor de gewasgroei, maar kleine concentraties in het water ($20 \mu\text{g/l}$) kunnen aquatische ecosystemen al aantasten en de waterkwaliteit verminderen (Bomans et al. , 2005). De hoeveelheid P die in het water vrijkomt is afhankelijk van de beschikbaarheid ervan in verschillende vormen in de bodem, hetzij in het organische materiaal, gehecht aan ijzer (Fe), aluminium (Al) en calcium (Ca) deeltjes, hetzij als fosfaatmineralen. Ook de Fe/P-verhouding bepaalt de uitvoer van P uit eutrofe wetlands naar nabijgelegen waterlichamen (Zak et al. , 2004). Stikstofverontreiniging van de bodem door atmosferische depositie van stikstof is minder waarschijnlijk onder waterige omstandigheden omdat de uitstoot van verontreinigende gassen zoals ammoniak en stikstofoxiden zeer gering is.

In het geval van vernatting van veengebieden wordt de artificiële verwijdering van de sterk vergane toplaag beschouwd als een mechanisme om koolstofverliezen, P- en N-mobilisatie en uiteindelijk eutrofiëringsproblemen te verminderen (Zak & Gelbrecht, 2007; Harpenslager et al. , 2015). Verwijdering van bovengrond kan ook voorkomen dat snelgroeiende planten in voedselrijk water (bijv. lisdodde, riet) de overhand nemen en de biodiversiteit van het wetland verminderen (Harpenslager et al. , 2015). Deze methode is echter duur (Klimkowska et al. , 2010). Een alternatieve oplossing is het gebruik van paludicultuurgewassen in een eerste fase om overtollige nutriënten te absorberen en de verspreiding en accumulatie van nutriënten te voorkomen (Vroom et al. , 2018; Geurts et al. , 2020). Paludicultuur wordt in het volgende hoofdstuk nader toegelicht.

1.6.1 Referenties

Amery, F. (2012). Milieuchemie - Soil & water Lecture notes 2012-2013.

Amery, F., & Vandecasteele, B. (2015). Wat weten we over fosfor en landbouw? Deel 1: Beschikbaarheid van fosfor in bodem en bemesting (p. 98). Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek.

Belle, J. (2021). Natte teelt voor waterkwaliteit Verkenning van de bijdrage van paludicultuur aan waterkwaliteitsverbetering in een Friese polder [Techreport]. Hogeschool Van Hall Larenstein.

Bomans, E., Fransen, K., Gobin, A., Mertens, J., Michiels, P., Vandendriessche, H., & Vogels, N. (2005). Aanpak van fosforgerelateerde problemen in de landbouwpraktijk Eindrapport aan de Europese Commissie (p. 283) [Techreport]. Bodemdienst van België.

Boyd, C. E. (1995). Soil Organic Matter, Anaerobic Respiration, and Oxidation-Reduction. In Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture (blz. 194-218). Springer US. 10.1007/978-1-4615-1785-6_6

Buresh, R. J., Reddy, K. R., & Kessel, C. (2008). Nitrogen Transformations in Submerged Soils (p.

36) [Techreport].

Departement Omgeving. (2022). Programmatische aanpak stikstof [Techreport].

ESN. (2020). De stikstofcyclus, uitgelegd.

Geurts, J. J. M., Oehmke, C., Lambertini, C., Eller, F., Sorrell, B. K., Mandiola, S. R., Grootjans, A. P., Brix, H., Wichtmann, W., Lamers, L. P. M., & Fritz, C. (2020). Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soil. *Science of The Total Environment*, 747, 141102. 10.1016/j.scitotenv.2020.141102

Harpenslager, S. F., van den Elzen, E., Kox, M. A. R., Smolders, A. J. P., Ettwig, K. F., & Lamers, L. P. M. (2015). Herbevochtiging van voormalige agrarische veengebieden: Topsoil removal as a prerequisite to avoid strong nutrient and greenhouse gas emissions. *Ecological Engineering*, 84, 159-168. 10.1016/j.ecoleng.2015.08.002

IPV. (2022). Samen 5 jaar zoeken naar duurzaam landgebruik in het veenweidegebied Eindrapportage Innovatie Programma Veen 2017-2022 (p. 64) [Techreport].

Johnston, A. E., Dawson, C. J., & Agricultural Industries Confederation. (2005). Fosfor in de landbouw en in relatie tot de waterkwaliteit. Agricultural Industries Confederation.

Klimkowska, A., Dzierża, P., Brzezińska, K., Kotowski, W., & Mędrzycki, P. (2010). Kunnen we de hoge kosten van natuurherstel afwegen tegen de methode van bovengrondse verwijdering? Gevalsstudie uit Polen. *Tijdschrift voor Natuurbehoud*, 18(3), 202-205. 10.1016/j.jnc.2009.09.003

Maranguit, D., Guillaume, T., & Kuzyakov, Y. (2017). Effecten van overstroming op de mobilisatie van fosfor en ijzer in sterk verweerde bodems onder verschillende landgebruikstypen: Kortetermijneffecten en mechanismen. *CATENA*, 158, 161-170. 10.1016/j.catena.2017.06.023

Moore, G. A., Agriculture Western Australia, & National Landcare Program (W.A.). (1998). Soilguide: a handbook for understanding and managing agricultural soils. Landbouw West-Australië.

Ponnamperuma, F. N. (1972). The Chemistry of Submerged Soils. In *Advances in Agronomy* (Vol. 24, pp. 29-96). Elsevier. 10.1016/S0065-2113(08)60633-1

Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019). Fosfor Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil. Alabama A&M University.

Rengasamy, P. (2022). Fact Sheets Soil pH - SA.

Stijn Martens, Wendy Odeurs, Annemie Elsen, Sophie Nawara, Fien Amery, & Hilde Vandendriessche. (2020). Critical Soil Phosphorus Values for Yield Reduction in Intensive Agricultural Systems. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 10(2). 10.17265/2161-6264/2020.02.001

Tusneem, M. (1971). Stikstoftransformaties in waterhoudende grond. *LSU Agricultural Experiment Station Reports*, 657.

van de Riet, B. P., Hefting, M. M., & Verhoeven, J. T. A. (2013). Herbevochtiging van gedraineerde

veenweiden: Risks and Benefits in Terms of Nutrient Release and Greenhouse Gas Exchange. *Water, Lucht, & Bodemverontreiniging*, 224(4). 10.1007/s11270-013-1440-5

Vroom, R. J. E., Xie, F., Geurts, J. J. M., Chojnowska, A., Smolders, A. J. P., Lamers, L. P. M., & Fritz, C. (2018). *Typha latifolia* paludicultuur verbetert effectief de waterkwaliteit en vermindert de uitstoot van broeikasgassen in opnieuw bevochtigde veengebieden. *Ecological Engineering*, 124, 88-98. 10.1016/j.ecoleng.2018.09.008

Whalen, J., Chang, C., & Olson, B. (2001). Nitrogen and phosphorus mineralization potentials of soils receiving repeated annual cattle manure applications. *Biologie en vruchtbaarheid van de bodem*, 34(5), 334-341. 10.1007/s003740100416

Zak, D., & Gelbrecht, J. (2007). De mobilisatie van fosfor, organische koolstof en ammonium in de beginfase van veenvernieuwing (een casestudy uit Noord-Duitsland). *Biogeochemie*, 85(2), 141-151. 10.1007/s10533-007-9122-2

Zak, D., Gelbrecht, J., & Steinberg, C. E. W. (2004). Phosphorus Retention at the Redox Interface of Peatlands Adjacent to Surface Waters in Northeast Germany. *Biogeochemistry*, 70(3), 357-368. 10.1007/s10533-003-0895-7

2 Potentieel van paludicultuurgewassen in Vlaanderen

Hoofdpunten

Paludicultuur wordt vaak voorgesteld als alternatief voor conventionele landbouw in gebieden waar vernatting nodig is. Deze teelten kunnen instaan voor de productie van biomassa voor verschillende industrietakken en daarnaast overgang vormen tussen cultuurland en natte natuur, mee instaan voor waterzuivering en zorgen voor waterbuffering.

Kennis van teeltpraktijken en aangepaste machines, robuuste verdienmodellen en stabiele markten zijn cruciaal om landbouwers aan te moedigen om over te schakelen op deze gewassen en hen een rendabele bedrijfsvoering te garanderen. In Vlaanderen is natte landbouw niet goed bekend en er zijn meer onderzoek/proefprojecten nodig om te bepalen welke gewassen meer geschikt zijn voor de Vlaamse omstandigheden en marktmogelijkheden vooraleer het een reële optie is voor landbouwers.

De relatief kleine percelen in Vlaanderen kunnen een beperkende factor zijn om paludicultuur op industrieel niveau rendabel te maken; verwerking en gebruik op lokale schaal kunnen in dat geval meer geschikt zijn.

Paludicultuur of 'natte landbouw' is het productieve gebruik van moerasland zodat natte habitats opnieuw meer geïntroduceerd kunnen worden in de open ruimte, maar dan op een economisch aantrekkelijke manier waar nu conventionele landbouw gevestigd is. Paludicultuurgewassen kunnen verschillende productieve toepassingen en ecosysteemdiensten leveren. Hun biomassa kan worden gebruikt voor bouwmaterialen, diervoeder, landbouwsubstraten en de productie van biobrandstoffen. Paludicultuur herstelt een waardevolle habitat voor bedreigde diersoorten, terwijl het tegelijkertijd mogelijkheden biedt voor de veeteelt en voor de farmaceutische industrie. Tot de ecosysteemdiensten behoren waterzuivering en -retentie, koolstofsequestratie en vermindering van broeikasgasemissies.

Landen als Nederland en Duitsland hebben veel ervaring met paludicultuur. Lisdodde, riet en veenmos zijn de meest veelbelovende gewassen omdat ze meerdere toepassingen hebben en dus verschillende marktmogelijkheden bieden. In Vlaanderen is paludicultuur weinig bekend en is het meeste onderzoek gericht op *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*) als bulkmateriaal voor duurzame groeimedia of voor de productie van biobrandstoffen. *Miscanthus* lijkt onder Vlaamse omstandigheden productiever en duurzamer te zijn dan andere paludicultuur gewassen, hoewel de vermeerdering relatief duur is. Wilg (*Salix* sp.) heeft in Vlaanderen ook zijn potentieel bewezen binnen agroforestrytoepassingen. Het biedt een schaduw- en schuilplek voor dieren en wordt ook uitgetest als natuurlijke afsluiting.

Hoewel deze "nieuwe" teelten potentieel hebben, zijn ze weinig bekend bij de Vlaamse landbouwers en hun afnemers. Het ontbreekt dus nog aan kennis en bewustzijn bij overheden, boeren en afnemers over de voordelen, teelttechnieken en toepassingen ervan. De meeste beperkingen houden verband met teeltmethoden en aangepaste machines, marktkansen, regelgeving en stimulansen. Niettemin is er een groeiend bewustzijn ten aanzien van duurzaam beheer van de open ruimte, duurzame landbouw en biogebaseerde alternatieven voor de in-

dustrie. De EU Missions (Horizon Europe) hebben ook ambitieuze doelstellingen om de netto broeikasgasemissies van veengebieden te verminderen door hun drooglegging terug te draaien. Dit biedt zeker kansen om met natte landbouw aan de slag te gaan in de toekomst.

De in de buurlanden opgedane ervaring kan in Vlaanderen worden gebruikt als basis voor verder onderzoek en het creëren van verdienmodellen op maat van de Vlaamse context. In Vlaanderen kan de versnippering van het landbouwareaal en hoge grondprijs een beperkende factor zijn om paludicultuur rendabel te maken voor industriële toepassingen. In dat geval zou in Vlaanderen de focus kunnen liggen op lokale verwerking en gebruik en circulaire landbouwmodellen.

2.1 Inleiding

Paludicultuur (Latijn "palus" = moeras) is het productieve gebruik van moerasland zodat natte habitats opnieuw meer geïntroduceerd kunnen worden in de open ruimte, maar dan op een economisch aantrekkelijke manier waar nu conventionele landbouw gevestigd is. Veengebieden zijn een speciaal type moerasland dat gekenmerkt wordt door een natuurlijk geaccumuleerde veengrondlaag aan de oppervlakte, gevormd door de langzame ontbinding van planten in de loop der jaren onder waterige omstandigheden (De La Haye et al. , 2021). De veengrond is daarom een enorme koolstofopslagplaats, die jaarlijks ongeveer 1,9 gigaton CO₂ aan de atmosfeer afgeeft als die in contact komt met zuurstof en begint af te breken (IUCN, 2021). In plaats van veengebieden te draineren om plaats te maken voor conventionele landbouw, of veengrond te winnen voor substraat in tuinbouw of tuingebruik, is paludicultuur optie om de productieve functie van het veengebied te behouden (De La Haye et al. , 2021). Dit wordt bereikt door gewassen te telen die kunnen gedijen in tijdelijk of permanent natte of zelfs overstromde omstandigheden, en zo de ecosysteemdiensten van wetlands te behouden (Wichtmann et al. , 2016).

Planten kunnen zich op verschillende manieren aanpassen aan natte omstandigheden (waarbij zuurstofstress optreedt); door aerenchyma te ontwikkelen om te zorgen voor gasuitwisseling tussen aerobe scheuten en anaerobe wortels, door stengelvergroting (hypertrofie), door een radiale wortelzuurstofbarrière te produceren of door adventieve wortelvorming (Kaur et al. , 2020). De meeste akkerbouwgewassen zijn gevoelig aan natte omstandigheden (zie vorig hoofdstuk) omdat ze dat soort aanpassingen niet kunnen aanmaken. Meerjarige grassen en weidepeulvruchten zijn toleranter voor tijdelijke waterverzadiging dan akkerbouwgewassen, maar ze zijn niet bestand tegen permanente bodemverzadiging of overstromde omstandigheden (Moore et al. , 1998). De teelt van paludicultuurgewassen, voor de productie van biomassa en geassocieerde nieuwe marktkansen, is in Europa grotendeels onderzocht, voornamelijk in het kader van maatregelen om klimaatverandering tegen te gaan (mitigatiemaatregelen) (De La Haye et al. , 2021; Duursen et al. , 2016).

Natte gewassen kunnen een breed scala aan productieve en milieudiensten leveren. In vernatte wetlands is de uitstoot van broeikasgassen afhankelijk van de beschikbaarheid van zuurstof en voedingsstoffen in de bodem (Collins et al. , 2019). Onder aerobe omstandigheden (grondwatertafel onder het bodemoppervlak) worden koolstofdioxide (CO₂) en lachgas (N₂O) uitgestoten, als gevolg van de afbraak van het organisch materiaal. In anoxische omstandigheden

(waterniveaus boven het bodemoppervlak) wordt de uitstoot van CO₂ en N₂O aanzienlijk verminderd, maar wordt een deel van de organische stof afgebroken tot methaan (CH₄) door methaanproducerende bacteriën (Emsens et al. , 2019; Wilson et al. , 2016). Ondanks dat de uitstoot van CH₄ laag is in vergelijking met CO₂, is dit gas ongeveer 25 keer krachtiger dan CO₂ (Emsens et al. , 2019). Sommige paludicultuurgewassen zoals lisdodde (*Typha sp.*) en riet (*Phragmites*) kunnen onder verzadigde omstandigheden zuurstof vrijmaken in de bodem, wat de vorming van CH₄ vermindert. Andere gewassen zoals veenmos (*Sphagnum sp.*) kunnen CO₂ vastleggen en zo zelfs negatieve broeikasgasemissies realiseren (Collins et al. , 2019). Lisdodde en riet hebben ook een hoge beschikbaarheid van voedingsstoffen nodig en daarom kunnen ze fungeren als waterzuiveraars (Collins et al. , 2019; Vroom et al. , 2018). De biomassa van de meeste paludicultuurgewassen kan voor verschillende doeleinden worden gebruikt: o.a. bouwmaterialen, isolatie, voeder, groeisubstraten, grondstof voor papierproductie, compostering en biobrandstof (Collins et al. , 2019).

Paludicultuur kent echter een aantal beperkingen met betrekking tot teeltmethoden, marktkansen en regelgeving. Er werden reeds verschillende verdienmodellen voorgesteld, waaronder de productie van tuinbouwsubstraten, aangepaste melkveehouderij in combinatie met paludicultuur, en koolstofkredietregelingen (Collins et al. , 2019). Deze nieuwe vorm van landbouw is echter nog nieuw en wordt nog onderzocht. Er is momenteel een gebrek aan zekerheid over marktkansen en regelgeving, wat de aantrekkelijkheid voor landbouwers verlaagt (Collins et al. , 2019; De La Haye et al. , 2021). Dit zal waarschijnlijk verbeteren naarmate het systeem zich ontwikkelt en meer spelers de pioniers volgen of wanneer de overheid substantiële tegemoetkomingen voor dit soort landbouw voorziet.

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van paludicultuurgewassen met potentieel in Vlaanderen. We starten met een algemeen overzicht van lopend onderzoek, en zoomen vervolgens in op de meest beloftevolle gewassen voor de Vlaamse context. We eindigen met een discussie over de kennislacunes voor een succesvolle invoer van paludicultuur in Vlaanderen.

2.2 Overzicht paludicultuurgewassen

In de 'Database of Potential Paludiculture Plants' (DPPP) (Abel et al. , 2013) staan meer dan 1100 planten die geschikt zijn voor paludicultuur, waarvan er 469 als "goed" worden beschouwd omdat ze economisch waardevol kunnen zijn. De meeste gewassen zijn meerjarig en groeien in bodems met een grondwaterstand van ongeveer 20 cm onder het bodemoppervlak. Voorbeelden van deze gewassen zijn veenmos (*Sphagnum sp.*), lisdodde (*Typha sp.*), riet (*Phragmites*) en wilg (*Salix sp.*). Collins et al. (2019) presenteert een mooi overzicht van potentiële paludicultuurgewassen, hun producten en kansen voor koolstofcredits en blauwe credits, gebaseerd op een uitgebreide literatuurstudie (Tabel 1), in het kader van het Carbon Connects project.

Zoals uit Table 15 blijkt, vereist elk gewas een specifiek grondwaterregime om maximale groei en milieuvoordelen te verkrijgen. Voor de meeste gewassen is een waterpeil dat rond -20 cm schommelt (of zelfs hoger, uit het oogpunt van CO₂-emissie) efficiënter. Het optimale waterpeil kan voor veenmos of reuzenriet ongeveer 40 cm onder het bodemoppervlak liggen, terwijl het voor kattenstaart en riet tot 1 m boven het bodemoppervlak kan liggen. Andere gewassen zoals veenbes en wilg doen het goed in een breed g van waterniveaus en kunnen

bodemwaterfluctuaties verdragen (Bestman et al. , 2019).

2.2.1 Voordelen en nadelen

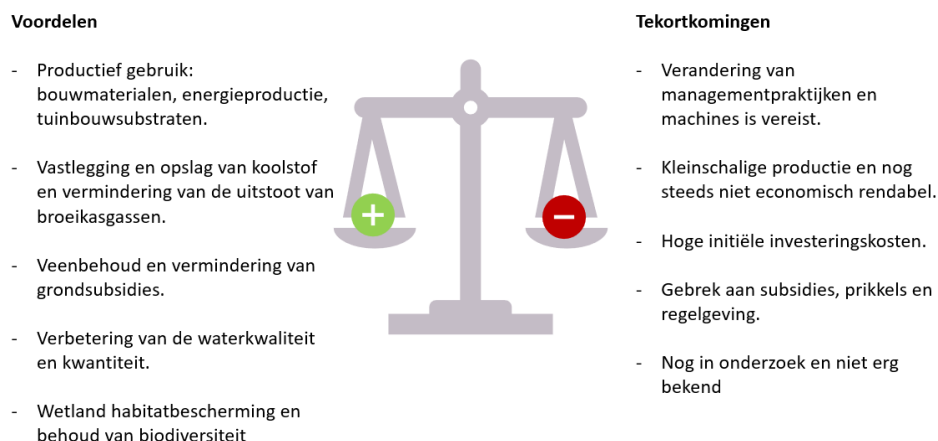
In Europa lopen verschillende projecten gericht op veenherstel en paludicultuur als innovatief en productief alternatief voor natuurlijke vegetatie bij het vernatten van historische wetlands, zoals Carbon Connects, Care- Peat, DESIRE, LIFE Peat Restore en CANAPE (De La Haye et al. , 2021). Dit sluit aan bij de Europese Green Deal, die tot doel heeft de netto broeikasgasemissies tegen 2030 met minstens 55 % te verminderen. Het meest veelbelovende gewas is lisdodde (*Thypha sp.*) voor bouwmaterialen, biobrandstoffen, diervoeder (De La Haye et al. , 2021; de Jong et al. , 2021) en veenvervanging in tuinbouwsubstraten (Leiber-Sauheitl et al. , 2021; Hartung en Meinken, 2021; , EDR). Vanuit mitigatieoogpunt heeft de teelt van lisdodde het potentieel om de CO₂-uitstoot te verminderen door het behoud van veengebieden (de Jong et al. , 2021). Het gewas levert extra ecosysteemdiensten in vergelijking met andere bio-based materialen, omdat het kan worden gebruikt om verontreinigende stoffen te absorberen en water te zuiveren (Belle, 2021), en heeft daarom meer voorkeur in de markt. De uitstoot van CH₄ kan bij lisdodde echter hoog zijn omdat het waterniveau boven het maaiveld (0-20 cm) moet worden gehouden voor een optimale opbrengst (IPV, 2022). Een ander gewas dat wordt onderzocht voor waterzuivering is kroosvaren (*Azolla sp.*) in het project Innovatie Programma Veen (Duursen et al., 2016) in Noord-Holland. Nutriënten die uit het water worden gehaald en worden omgezet in gewasbiomassa kunnen worden gebruikt als compost of veevoer (Belle, 2021). Veenmos is ook onderzocht als alternatief voor veesubstraat in het project MOOSzucht in Duitsland, en voor het vergroten van de koolstofopslagcapaciteit van het veen (De La Haye et al. , 2021), ook als decoratiemateriaal door Duursen en al. (2016) en bekleding voor exotische dierenterraria in het project CANAPE.

Ziegler et al. (2021) stelden dat paludicultuur een opkomende en wetenschappelijk gestuurde innovatie is in de wereld en vooral in Europa. Dit heeft te maken met verschillende beperkingen wat betreft economische levensvatbaarheid, kennis, subsidies en regelgeving. Hoewel er veel onderzoek is verricht om het potentieel van paludicultuur te maximaliseren met het oog op een duurzamere landbouw en een bijdrage aan een biogebaseerde economie, zijn overheden, landbouwers en afnemers zich nog steeds niet volledig bewust van deze nieuwe materialen en technieken en de milieuvordelen ervan (Collins et al. , 2019). De markt is nog nieuw en in ontwikkeling. Aangepaste machines ontbreken en daarom is de meeste productie op kleine schaal of binnen onderzoek/proefprojecten. Paludicultuur concurreert niet met de traditionele drooggelegde landbouw en subsidies en stimulansen zijn fundamenteel om deze markt rendabel te maken (Ziegler et al. , 2021). Het gebrek aan regelgeving en het duidelijke perspectief van paludicultuur ontmoedigen landbouwers om deze alternatieve vorm van landbouw toe te passen en bedrijven om de gewassen als grondstof te gebruiken (Collins et al. , 2019; De La Haye et al. , 2021).

De onderstaande figuur geeft een samenvatting van de belangrijkste voor- en nadelen van paludicultuur die in verschillende proefprojecten en studies in heel Europa zijn aangetroffen (Collins et al. , 2019; Ziegler et al. , 2021; Duursen et al. , 2016; Geurts en Fritz, 2018).

Tabel 15: Overzicht van belangrijke paludicultuurgewassen, producten en potentieel voor C-kredieten en blauwe kredieten. Het potentieel aan C-kredieten is gebaseerd op schattingen van broeikasgasemis-siereducties: ++ zeer groot potentieel, + groot potentieel, 0 weinig potentieel, - geen potentieel. Het potentieel voor blauwe kredieten is gebaseerd op waterzuivering en -opslag /ref.

| Gewas | Water- (cm) | tafel | Producten | 'koolstof- dits' | cre- | 'blauwe credits' |
|--|----------------|-------|--|---------------------|------|-----------------------------|
| Els (Alnus sp.) | -40 to +5 | | Hout | ++ | | Retentie:++ |
| Lisdodde (Typha sp.) | 0 to +20 | | Voeder Isolatie- en bouw- materialen Potgrond Voeder voor roof- mijten Voedsel | + | | Zuivering:+ Retentie: ++ |
| Reuzenriet (Arundo donax) | -40 to 0 | | Bouwmaterialen Verbranding/biogas | 0/+ | | Zuivering:++ Retentie:++ |
| Veenmos (Sphagnum sp.) | -15 to -5 | | Substraat tuin- bouw | ++ | | Zuivering:+ Retentie:+/0 |
| Riet (Phragmites) | -20 to +20 | | Dakmateriaal Verbranding/biogas | ++ | | Zuivering:++ Retentie:++ |
| Kanariegras (Phalaris arundi- nacea) | -30 to +10 | | Verbranding/biogas + | | | Zuivering:+/0 Retentie:+ |
| Zegge (Carex sp.) | -40 to +20 | | Verbranding/biogas ++ | | | Zuivering:+ Retentie:+ |
| Zonnedauw (Drosera sp.) | -20 to 0 | | Pharmaceutica | ++ | | Zuivering:0 Retentie:0/+ |
| Kalmoes (Acorus calamus) | -30 to +10 | | Pharmaceutica | + | | Zuivering:+ Retentie:+ |
| Kroosvaren (Azolla sp.) | >+5 | | Voeder Eiwitten | 0 | | Zuivering:+ Retentie:++ |
| Wilde rijst (Zizania sp.) | 0 to +20 | | Voedsel | + | | Zuivering:++ Retentie:+ |
| Wilg (Salix sp.) | -40 to +20 | | Hout | 0/+ | | Zuivering:+ Retentie:++ |
| Gele iris (Iris pseudacorus) | -40 to +10 | | Bloemen | + | | Zuivering:++ Retentie:+ |



Figuur 54: Voordelen en nadelen van paludicultuur.

2.2.2 Potentiële toepassingen

Paludicultuurgewassen kunnen verschillende productieve toepassingen en milieudiensten leveren die ook een economische meerwaarde kunnen bieden. Hun biomassa kan worden gebruikt voor bouwmaterialen, isolatie, diervoeder, groeisubstraten en compostering, en de productie van biobrandstoffen. Milieudiensten omvatten waterzuivering, koolstofsequestratie en verhoging van de waterretentiecapaciteit in het moerasland (Wichtmann et al., 2016). Paludicultuur herschept ook een waardevolle habitat voor bedreigde soorten (Greifswald Mire Center, 2015). Paludicultuur biedt de mogelijkheid om te worden gecombineerd met andere sectoren en industrietakken, zoals vlees met waterbuffels, of farmaceutische producten met medicinale planten (Greifswald Mire Center, 2015). Hoewel deze potentiële diensten al in de literatuur zijn geïdentificeerd, hangt de levensvatbaarheid van de gewassen voor boeren af van de beschikbare markten en hun stabiliteit en van de investeringen die nodig zijn om die gewassen te verbouwen en te oogsten.



Figuur 55: Belangrijkste productie- en milieudiensten van paludicultuur gewassen.

2.2.2.1 Productieve toepassingen Bouw- en isolatiematerialen Paludicultuurgewassen kunnen worden gebruikt als grondstof voor bouw- en isolatiematerialen. De belangrijkste vereisten voor biogebaseerde constructies en isolatiematerialen zijn licht gewicht, brandvertraging, weerstand tegen biotische factoren zoals schimmel en zwammen, en het niet uitstoten van schadelijke stoffen (Bestman et al. , 2019). Er kunnen verschillende producten worden geproduceerd op basis van gewasvezels, zoals vezelplaten, isolatiepanelen voor muren, vloeren en daken, en papier (Collins et al. , 2019). Gewassen als lisdodde, miscanthus en riet hebben goede isolerende eigenschappen door luchtholtes in de bladeren en takken, hoge duurzaamheid en sterkte. Het tijdstip van oogsten is belangrijk voor de kwaliteit van de biomassa, voor bouwmaterialen gebeurt dit normaal gesproken in de winter of het vroege voorjaar, wanneer het vochtgehalte laag is (Bestman et al. , 2019).



Figuur 56: Isolatieplaat van kattenstaart. Bron: NAPORO

Tuinbouwsubstraten Paludicultuurgewassen kunnen dienen als veenalternatieven in duurzame groeimedia in de tuinbouw. Momenteel is er een grote vraag naar nieuwe en meer duurzame alternatieven voor veen in de tuinbouw vanwege de overmatige CO₂-uitstoot uit gedraineerde veengebieden (Duursen et al. , 2016). Veenmos is het meest geschikt dankzij de vergelijkbare chemische en fysische eigenschappen met veen. Miscanthus, riet en zachte bies kunnen ook geschikt zijn na enkele optimalisatiebehandelingen (Vandecasteele et al., 2018, 2021).



Figuur 57: Proeven met tuinbouwsubstraten met miscanthus en andere vezels in het project I-Love-T. Bron: Miscanthus als biomassagewas

Diervoeder en strooisel Natte gewassen kunnen een goede bron van voedingsstoffen zijn voor diervoeder. Bij oogst vóór de bloeiperiode bevatten de groene bladeren voldoende eiwitten en zijn ze goed verteerbaar. Normaal gesproken kunnen lisdodde en wilg worden gebruikt als aanvullend of aanvullend voedsel voor herkauwers (Bestman et al. , 2019). Droge strohalmen van sommige paludicultuurgewassen (bvb. lisdodde miscanthus) die in de winter of het vroege voorjaar worden geoogst, zijn ook zeer geschikt als strooisel voor dieren. Ze hebben een goed waterabsorptievermogen en bevorderen geen bacteriegroei en huidlaesies, belangrijk voor het algemene comfort van de dieren (Bestman et al. , 2019; Van Weyenberg et al. , 2016).



Figuur 58: Droog riet gebruikt voor stalstrooisel (Bestman et al. , 2019)

Energieproductie Bio-energie voor de productie van warmte en elektriciteit wordt beschouwd als een van de meest rendabele toepassingen voor sommige paludicultuurgewassen zoals miscanthus en riet. Momenteel is de beperkt beschikbare fossiele brandstof erg duur, en er is een trend om over te schakelen op meer klimaatvriendelijke alternatieven (Waegebaert en Mey, 2019; Köbbing et al. , 2013). Hiervoor wordt wintergeoogste biomassa gebruikt, omdat het vochtgehalte laag is en de bladeren al gevallen zijn. Bladeren bevatten kalium en chloride, die de apparatuur aantasten, en bij de verbranding meer as produceren (Bestman et al. , 2019; Köbbing et al. , 2013).



Figuur 59: Miscanthuspellets voor biobrandstof (Waegebaert en Mey, 2019).

2.2.2.2 Milieudiensten Waterzuivering en wateropslag Paludicultuurgewassen halen overtollige voedingsstoffen uit landbouwgronden of voedselrijk slootwater. Voedingsstoffen zoals stikstof en fosfaten worden door de wortels opgenomen en gebruikt voor de productie van

biomassa. In de zomer worden deze nutriënten grotendeels opgeslagen in de bovengrondse biomassa, terwijl ze in de winter in de wortels terechtkomen. Gewassen zoals lisdodde en riet kunnen grote hoeveelheden stikstof, fosfor en kalium opnemen, wat leidt tot een hoge nutriëntenbiomassa. Paludicultuurgewassen kunnen het overtollige water tijdens neerslaggebeurtenissen opslaan (bv. lisdodde). Voor de mogelijkheden van wateropslag is de keuze van geschikte gewassen cruciaal, aangezien niet alle paludicultuurgewassen bestand zijn tegen overstroomde omstandigheden (Bestman et al. , 2019).

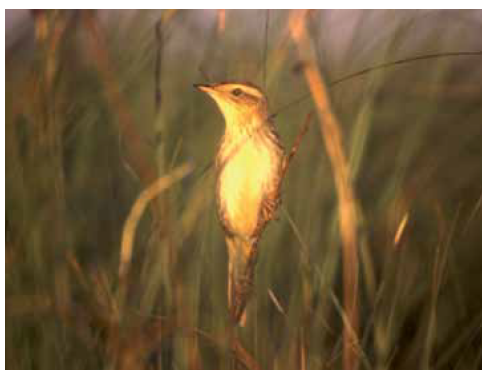


Figuur 60: Kattestaart in slootkanten in een melkveebedrijf om de nutriëntenrijke run-off te absorberen (Bestman et al. , 2019)

Koolstofvastlegging en veenbehoud Een van de belangrijkste doelen van paludicultuurgewassen is de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen voor drooggelegde veengebieden door ze te vernatten, anaerobe omstandigheden te creëren en zo de uitstoot van CO₂ en N₂O te verminderen. CH₄emissies kunnen toenemen onder natte omstandigheden, maar paludicultuurgewassen zorgen er in sommige gevallen ook voor dat de methaanemissies ook lager blijven (zie hoger). Paludicultuurgewassen zijn in staat koolstof vast te leggen en op te slaan in de wortels en biomassa. In bouwmaterialen blijft de koolstof gedurende de levensduur van het materiaal gefixeerd, terwijl bij toepassingen als voeder een deel terug de atmosfeer zal ingaan na vertering. Sommige gewassen zoals riet en veenmos kunnen helpen om ook de veenlaag te vergroten (Collins et al. , 2019; Bestman et al. , 2019).

Natuurbehoud en biodiversiteit Het vaststellen van de optimale watertafels zorgt voor een verschuiving van een terrestrisch ecosysteem naar een aquatisch ecosysteem. Door natte plantensoorten de kans te geven zich spontaan te ontwikkelen, wordt een verscheidenheid aan habitats voor bedreigde soorten zoals de waterrietzanger en de grote zeearend hersteld (Greifswald Mire Center, 2015). In beschermde gebieden moeten bepaalde voorschriften voor natuurbehoud worden nageleefd, om een conflict tussen biomassaproductie, waterzuivering en natuurbehoud te voorkomen. Een zeer dichte vegetatie is gewenst voor een maximale opname van voedingsstoffen, maar dit kan de mobiliteit van waterdieren belemmeren. Bovendien moet er buiten het broedseizoen worden gemaaid (Belle, 2021).

Volgens LIFE Multi Peat kunnen natte teelten ook dienen als buffer tussen landbouwgebieden en natuurgebieden. Op die manier hebben hoge waterstanden uit natte gebieden minder invloed op landbouwgronden, en wordt de natuur beter beschermd tegen de negatieve effecten van nabijgelegen landbouw (bijvoorbeeld uitspoeling).



Figuur 61: De wereldwijd bedreigde waterrietzanger broedt in de bodem van waterrijke weiden (Greifswald Mire Center, 2015).

2.3 Verkenning van paludicultuur in Vlaanderen

Onderstaande tabel geeft een overzicht van enkele projecten met betrekking tot paludicultuur in Vlaanderen en hun belangrijkste resultaten. In Vlaanderen is het meeste onderzoek gericht op *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*) en hun potentieel als bulkmateriaal voor duurzame groeimedia (Vandecasteele et al. , 2018). Zachte bies (*Juncus effusus*) is ook bestudeerd als alternatief tuinbouwsubstraat (Vandecasteele et al. , 2021). Andere onderzochte mogelijkheden voor *miscanthus* omvatten hun gebruik als grondstof voor biobrandstof, papierproductie, verpakking of als natuurlijke onkruidverdelger, en er bestaat een volledige gids voor de teelt ervan (Waegebaert en Mey, 2019). Aanvullende bestudeerde toepassingen zijn alternatieven voor strooiselmateriaal voor melkkoeien (Van Weyenberg et al. (2016)), en duurzame biomassa voor energieproductie (Hulle et al. , 2012).

In vergelijking met andere meerjarige gewassen zoals rietgras (*Phalaris arundinacea*), vingergras (*Panicum virgatum*) en wilg lijkt *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*) onder Vlaamse omstandigheden productiever en duurzamer te zijn (Hulle et al. , 2012), hoewel het energiegebruik efficiëntie lager is door de wortelstokbereiding (Muylle et al. , 2015). Om dit probleem op te lossen en andere hoogproductieve en stressbestendige variëteiten van *Miscanthus* te vinden, werden ongeveer 100 *miscanthus*genotypes getest onder abiotische stress (koude, droogte en zoutgehalte) om de biomassa te optimaliseren (Lewandowski et al. , 2016). Er werden verschillende nieuwe genotypes geïdentificeerd die zich kunnen aanpassen aan specifieke omstandigheden, maar het huidige commerciële genotype *Miscanthus x giganteus* is nog steeds een haalbare optie voor veel locaties en omstandigheden.

In andere projecten werd de optie van paludicultuur kort geanalyseerd, maar het bleef slechts bij mogelijkheden of was het niet geschikt. In het vernattingsproject in de vallei van de Zwarte Beek in Limburg, het grootste veencomplex in Vlaanderen, gaven de resultaten aan dat onder ijzer- en fosforrijke natte bodems de overheersende vegetatie bestond uit verschillende soorten pitrus, en veenmos op de zuurdere plaatsen (Emsens et al. , 2019). Hoewel paludicultuur hier niet werd geëvalueerd, heeft zegge (*Carex* sp.) een hoog potentieel voor biobrandstofproductie en mogelijkheden voor koolstofkredieten. In het lopende project LIFE Multi Peat, in het dal van de Grote Beek eveneens in Limburg, is paludicultuur met wilgen bedoeld als maatregel voor veenherstel. Het is de bedoeling dat wilgen worden gebruikt als buffer tussen natte

natuur en landbouwgronden, en wellicht ook voor biomassa, veevoer, stalstrooisel of isolatie. Ten slotte maakten riet, lisdodde en eendenkroos deel uit van de voorgestelde bedrijfsmodellen om de waterproblemen in de veehouderij Hoeve De Waterkant aan te pakken, binnen de Proefprojecten voor Productieve Landschappen. Paludicultuur leek in dit geval echter ongepast vanwege grote investeringskosten voor de boer, het ontbreken van compensatie voor blauwe diensten en het ontbreken van voldoende marktkansen

2.4 Paludicultuurgewassen met teeltpotentieel in Vlaanderen

Paludicultuur is weinig bekend in België en het onderzoek staat nog in de kinderschoenen. Andere landen zoals Nederland en Duitsland hebben intensief onderzoek gedaan naar nieuwe duurzame en rendabele landbouwactiviteiten in de veengebieden die bodemdaling minimaliseren, broeikasgasemissies uit veengebieden verminderen en de waterkwaliteit in de gebieden nabij landbouwpolders verbeteren (Bestman et al. , 2019; Duursen et al. , 2016; IPV, 2022; Wichmann, 2018). Lisdodde, kroosvaren en veenmos lijken de meest kansrijke gewassen omdat ze meerdere toepassingen hebben en meerdere marktkansen bieden (Duursen et al., 2016). Lisdodde en riet zijn volgens Bestman et al. (2019) de meest interessante gewassen in de melkveehouderij, omdat ze de capaciteit hebben om een aanzienlijke hoeveelheid voedingsstoffen op te nemen, zodat ze voedingsrijke gewassen kunnen worden voor veevoer. Bij gebruik als diervoeder wordt de vastgelegde koolstof wel weer omgezet in CO₂ en CH₄ (IPV, 2022). Daarom hebben andere toepassingen zoals bouw- en isolatiematerialen de voorkeur vanuit het oogpunt van klimaatverandering. Miscanthus heeft potentieel voor gebruik in tuinbouwsubstraten en bio-energie, en er is al enige ervaring mee in Vlaanderen (Waegebaert en Mey, 2019). Wilg is in Vlaanderen ook onderzocht binnen Agroforestry (Bracke et al. , 2020) en wordt net onderzocht in het project LIFE Multi Peat gericht op milieudiensten.

Aan de andere kant wijzen de eindconclusies van proefprojecten erop dat er nog een lange weg te gaan is in de paludicultuur als gevolg van onvoldoende en wisselende gewasproductie om aan de vraag te voldoen, gebrek aan teeltkennis en inconsistenties tussen de regelgeving en de uitvoering van de natte teelt in het Europese landbouwsysteem (IPV, 2022). De markt voor paludicultuur is nog klein en het is onduidelijk welke verdienmodellen meer effectief zijn, vooral in Vlaanderen waar geen studies beschikbaar zijn. Winstgevendheid zou mogelijk zijn als verschillende vormen van gebruik worden gecombineerd en als paludicultuur in aanmerking komt voor 'blue credits' of beheersovereenkomsten of iets dergelijks binnen het gemeenschappelijk landbouwbeleid (GLB) (IPV, 2022). Niettemin is er een groeiende interesse in duurzame praktijken en biogebaseerde alternatieven, in de sectoren bouw, bio-energie en veeteelt. De EU-missies hebben ambitieuze doelstellingen om de netto broeikasgasemissies tegen 2030 met 55 % te verminderen; daarom maakt het behoud van de organische koolstofvoorraden in de bodem, onder meer door herstel van veengebieden en paludicultuur, deel uit van de innovatieve acties om dit doel te bereiken. Tegelijkertijd zullen de nodige beleidsmaatregelen, regelgeving en promotie worden ontwikkeld om de maatschappelijke toepassing van de nieuwe oplossingen en benaderingen te vergemakkelijken en aan te moedigen. Dit biedt zeker grote kansen voor paludicultuurgewassen in de toekomst.

Hoewel er zeker potentieel zit in deze "nieuwe" teelten, is er momenteel onvoldoende onder-

Tabel 16: Overzicht van de belangrijkste paludicultuurprojecten in Vlaanderen en de resultaten ervan.

| Project | Doelstelling | Gewassen | Resultaten |
|---|--|--|--|
| Carbon Connects (CCONNECTS) | De hoge koolstofvoetafdruk van veengronden in Noordwest-Europa verminderen door de invoering van nieuwe biogebaseerde bedrijfsmodellen die zijn ontwikkeld voor duurzame landbeheerpraktijken. Twee proefprojecten in West-Vlaanderen. | Wilg Pitrus Riet | De beoogde toepassingen van paludicultuur omvatten het gebruik van biomassa voor compostering op het landbouwbedrijf en het daaropvolgende gebruik ervan in akkerland, en stalstrooisel. |
| I-LOVE-T | Een innovatieve turfvervanger produceren met ziekte- en/of plaagonderdrukkende eigenschappen, op basis van plaatselijk beschikbare plantenvezels. | Miscanthus Riet | +++ Gedefibrilleerde plantenvezels vertoonden een lage N-fixatie en werden gemakkelijk gekoloniseerd door schimmels voor biocontrole. |
| Bi-optimal@work | Maximaliseer het potentieel van residuen van heidebeheer en/of hun micro-organismen in de productie van bioactieve substraten en ziektebestrijdende additieven voor volle grond, bosgroen en zuurminnende gewassen. | Pitrus | ++ Na verzuring was gehakte zachte bies stabiel (d.w.z. lage zuurstofopnamesnelheid, CO ₂ -flux en wateruitstoot C), hetgeen wijst op hun grote potentieel voor substraatmengsels. |
| Growing a Green Future | Bijdragen aan een biogebaseerde economie door het verbouwen van grondstoffen die ook op een landere manier tot een eindproduct kunnen worden verwerkt. | Miscanthus | +++ Miscanthus werd aantrekkelijk omdat het verschillende gebruiksmogelijkheden heeft (biobrandstof, bouwmaterialen), een hoge biomassa-opbrengst en lage investeringskosten. |
| Yield and energy balance of annual and perennial lignocellulosic crops for bio-refinery use | Vergelijk opbrengstpotentieel en energiebalans voor bioraffinage | Miscanthus Riet Riet kanariegras Wilg | ++ Miscanthus heeft een hoog rendement, maar wilgen zijn meer energie-efficiënt. |
| OPTIMISTIC | De productie en het gebruik van Miscanthus biomassa optimaliseren en nieuwe hoogwaardige toepassingen | Miscanthus | ++ Andere rassen zoals M. sinensis × M. sacchariflorus hybriden bleken op bepaalde locaties beter te presteren dan de commercieel bekende variëteit Miscanthus × giganteus. Hoewel dit ras gemiddeld zeer geschikt is voor alle locaties. |

zoek naar het Vlaamse marktpotentieel, de waardeketen en de robuustheid ervan. Ervaringen opgedaan in buurlanden kunnen worden gebruikt als inspiratie voor verder onderzoek en het creëren van marktkansen in Vlaanderen. Sommige gebieden kunnen vergelijkbare omstandigheden hebben als de veenweidegebieden in Nederland, maar de versnippering van het landbouwareaal kan een beperkende factor zijn om industriële toepassingen rendabel te maken. Volgens een open discussie in het Vlaamse Parlement (Talpe en Crevits, 2021), kunnen verdienmodellen gebaseerd op lokale teelt en verwerking meer geschikt zijn in de Vlaamse context.

Hieronder worden de belangrijkste kenmerken, potentiële toepassingen en beperkingen gepresenteerd voor lisdodde, miscanthus, veenmos, riet en wilg.

2.4.1 Lisdodde (*Typha* sp.)



Figuur 62: Lisdodde met zijn typische 'sigaar' (Duursen et al., 2016)

Lisdodde (*Typha* spp.) is een overblijvend gewas uit de bulrush familie (Typhaceae) dat van nature groeit in wetlands, voedselrijke oevers, op veengronden en ondiepe poelen, van 1,5 tot 3 meter hoog (Duursen et al. , 2016). De meest voorkomende soort is *typha latifolia* of grote lijsterbes. Lisdodde vermenigvuldigt zich door zaad en wortelstok en kan onder gunstige omstandigheden een dichte vegetatie vormen (Morton, 1975). Deze plant heeft een kenmerkende "sigaar" of bloem die de zaden bevat; zodra ze rijp zijn, valt de "sigaar" uiteen om de zaden te verspreiden. De bladeren zijn plat en lijken op gras (Morton, 1975; Duursen en al. , 2016). De plant gedijt beter bij hoge waterstanden (+20 cm), de biomassa is in de winter kleiner dan in de zomer door verdroging en droogvallend blad. De drogestofopbrengst varieert van 4 tot 20 ton ha⁻¹, die door toevoeging van stikstof kan worden verhoogd (Bestman et al. , 2019). Het oogsten hangt af van de voorziene toepassing, het gebeurt in het voorjaar voor de bloei indien gebruikt als ruwvoer, of na de bloei voor gestructureerd voer, stuifmeelproductie of isolatiemateriaal. Voor bouwmaterialen of strooisel wordt in de winter geogst (Bestman et

al. , 2019).

Potentiële toepassingen

Lisdodde heeft enkele kenmerken die het uitstekend geschikt maken voor isolatie en bouwmaterialen en het is tegenwoordig het meest interessante gebruik. Het heeft een lange scheurbestendige vezel en ongeveer 85 % sponsachtige vezel, de isolatiecapaciteit is even goed als typische isolatiematerialen door de lage warmtegeleidingscoëfficiënt. De plant is ook brandwerend en licht van gewicht, wat een voordeel is bij de bouw van plafonds en daken. Het hoge gehalte aan polyfenolen in krulstaart beschermt de materialen tegen schimmels en insecten, zodat er weinig additieven in de bouwmaterialen nodig zijn. Het koolstofgehalte in de plant blijft vast in het hele productieproces en in de bouwmaterialen, belangrijk vanuit de koolstofvoetafdruk en voor het vermijden van emissies van schadelijke stoffen zoals bij sommige synthetische materialen Duursen en al. (2016).

Lisdodde kan worden gebruikt als aanvullend diervoeder, zowel vers als in kuilvoer. Bij gebruik als ruwvoer kan door oogst tijdens het groeiseizoen en vóór de bloeiperiode het gehalte aan voedingsstoffen van de plant maximaal worden behouden en zijn het eiwitgehalte en het vezelgehalte aanvaardbaar. De verteerbaarheid van het organisch materiaal bedraagt ongeveer 70 % en het eiwitgehalte $120 \text{ g kg}^{-1} \text{ DM}$, tegenover 79 % en $183 \text{ g kg}^{-1} \text{ DM}$ in vers gras (Bestman et al. , 2019). Enkele nutritionele voordelen zijn een hoog seleniumgehalte, dat normaal gesproken laag is in gewoon gras, en een hoog mangaangehalte. Lisdodde is echter arm aan fosfor, magnesium en zink (Bestman et al. , 2019). Bij gebruik als veevoer wordt koolstof via de spijsvertering weer omgezet in CO_2 en CH_4 (IPV, 2022). De plant kan ook worden gebruikt als stalstrooisel, aangezien het een relatief hoge wateropname heeft van ongeveer $3,2 \text{ ml g}^{-1}$ stalstrooisel, vergeleken met $4\text{-}4,5 \text{ ml g}^{-1}$ in gebruikelijke stalstrooiselmaterialen (Bestman et al. , 2019).

Lisdodde is zeer productief en kan aanzienlijke hoeveelheden koolstof, stikstof, fosfor en kalium opnemen en bij de oogst afvoeren (Belle, 2021). De teelt voor een hoge biomassa productie in combinatie met andere milieudiensten zoals waterzuivering en -opslag, nutriëntenverwijdering en veenbehoud is mogelijk en kan winstgevend zijn (Geurts et al. , 2020). Volgens Geurts et al. (2020) varieert de koolstofvastlegging tussen 4 en 14 ton C ha^{-1} voor een biomassa productie van ten minste $10 \text{ ton DM ha}^{-1}$, en de verwijdering van nutriënten tussen $100\text{-}500 \text{ kg N ha}^{-1}$, $20\text{-}80 \text{ Kg P ha}^{-1}$ en $100\text{-}450 \text{ kg K ha}^{-1}$. Aangezien lisdodde de voorkeur geeft aan overstromde omstandigheden, kan de methaanuitstoot toenemen, waardoor het potentieel voor het tegengaan van klimaatverandering afneemt (IPV, 2022). Vroom et al. (2018) vonden echter dat lisdodde de CH_4 -emissies in vernalte veengebieden sterk verminderde in vergelijking met omstandigheden zonder vegetatie. De vermindering van CO_2 -emissies in herbevochtigde veengebieden ($-21,6 \text{ ton CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$) compenseert normaal gesproken de CH_4 -emissies en maakt de teelt van lisdodde (en andere palucultuurgewassen) nog steeds zeer aantrekkelijk (de Jong et al. , 2021).

Andere mogelijke toepassingen, minder onderzocht maar met hoogwaardige toepassingen, zijn de productie van stuifmeel voor roofmijten (Samaras et al. , 2019) of voor medicinale doeleinden, en de teelt van lisdodde voor bio-energie (Bestman et al. , 2019).

Beperkingen

De teelt van lisdodde is nog steeds moeilijk door gebrek aan kennis en ervaring; plagen kunnen bijvoorbeeld de verwachte opbrengst soms aanzienlijk verminderen (IPV, 2022). Momenteel is de vraag groter dan de beschikbare productie, waardoor de markt niet kan groeien. Dit komt vooral door de hoge investeringskosten, de lage verdienmodellen en het gebrek aan koolstofkredieten, waardoor lisdodde ook niet kan concurreren met de melkveehouderij (de Jong et al., 2021). Potentiële toepassingen kunnen soms niet worden gecombineerd; zo kan de productie van biomassa voor bouwmaterialen niet samen met diervoeding of stuifmeelproductie worden gebruikt, waardoor de rentabiliteit afneemt. Ook is er een wisselwerking tussen opbrengst en methaanemissies. Bij lagere waterstanden kan de CH₄-emissie aanzienlijk dalen ten koste van een kleinere opbrengst. Ten slotte worden de huidige markten voor stuifmeelextracten gedomineerd door Chinese bedrijven, met lage prijzen hoewel de kwaliteit slecht is. Westerse bedrijven kunnen niet concurreren met deze prijzen en er is nog verder onderzoek nodig. De productie van stuifmeel voor medicinale toepassingen is ook niet haalbaar omdat het in Europa niet is geregistreerd als medicijn (Duursen et al., 2016).

Voorbeelden

- **Naporo** Klima Dämmstoff GmbH (Oostenrijk): gebruikt lisdodde voor de productie van ecologische klimaatactieve isolatiematerialen (Duursen et al., 2016).
- **EcoScala** (Nederland): bouwmaterialen gemaakt met lisdodde.
- **Typha** Technik (Duitsland): isolatiemateriaal met lisdodde (Duursen et al., 2016)

2.4.2 Olifantengras (Miscanthus giganteus)



Figuur 63: Miscanthus. Bron: Universiteit Gent

Miscanthus (algemeen bekend als olifantsgras) is een hoogproductief overblijvend gewas dat meer dan 3 meter hoog wordt. Een dicht en uitgebreid wortelstelsel wordt gevormd gedurende de eerste 2-3 jaar na het planten; in deze periode is de opbrengst vrij laag en wordt er dus niet geoogst. De vermeerdering van miscanthus gebeurt voornamelijk via wortelstokken

(ondergrondse stengels waaruit wortels en scheuten komen) die in de eerste 25 cm van de bovengrond groeien (Waegebaert en Mey, 2019). Het planten gebeurt in het voorjaar met 1 of twee wortelstokken/ m². Het planten is een gevoelige periode en daarom zijn grondbewerking, vochtgehalte en onkruidbestrijding belangrijk in deze fase (Waegebaert en Mey, 2019). Na drie jaar vestiging kan eenmaal per jaar in het najaar of voorjaar worden geoogst. De opbrengst varieert van 20 tot 50 ton ha⁻¹ jr⁻¹ voor de vroege oogst, en van 10 tot 30 ton ha⁻¹ jr⁻¹ voor de late oogst (Ben Fradj et al. , 2020). In Vlaanderen is de verwachte opbrengst 20 ton DM ha⁻¹ (Waegebaert en Mey, 2019).

Miscanthus heeft weinig behoefte aan voedingsstoffen en bestrijdingsmiddelen, en kan worden geteeld op marginale gronden (Waegebaert en Mey, 2019; Lewandowski et al. , 2000), maar het is gevoelig voor verdichte bodems en overstromingen. Het gewas presteert beter bij water-niveaus lager dan 20 cm onder het bodemoppervlak (Bestman et al. , 2019). In het algemeen maken de snelle groei en hoge biomassaopbrengst na vestiging, het lage onderhoud en het teeltgemak van Miscanthus het een goede keuze als biobrandstof, waarbij het beter presteert dan maïs en andere bio-energiegewassen (Waegebaert en Mey, 2019; SEIL, 2012).

Potentiële toepassingen

Momenteel is de meest rendabele toepassing voor miscanthus het gebruik ervan als biobrandstof voor de productie van warmte en elektriciteit. De beperkte beschikbaarheid van fossiele brandstoffen en de hoge energieprijzen openen nieuwe mogelijkheden voor energiegewassen zoals miscanthus (Waegebaert en Mey, 2019; Muylle et al. , 2015; Ben Fradj et al. , 2020). Onder Vlaamse omstandigheden kan miscanthus productiever zijn dan andere natte gewassen zoals riet en wilg, voor de productie van bio-ethanol (Hulle et al. , 2012). Miscanthus heeft een hoge energiebalans in vergelijking met andere gewassen zoals suikerbiet of koolzaad. De dikke stengels kunnen worden omgezet in houtachtig materiaal en worden gebruikt voor verbranding. 1 ton kan 500 l stookolie opleveren, met een lage CO₂-uitstoot. Na verbranding kan de as dienen als meststof voor de bodem (Waegebaert en Mey, 2019). Daartoe worden de dikke stengels in de winter of het vroege voorjaar geoogst, wanneer de hoeveelheid kalium en chloride aanwezig in de bladeren laag is en het vochtgehalte tussen 15 en 20 % ligt, zodat verdere droogstappen vermeden worden (Waegebaert en Mey, 2019). Momenteel krijgen boeren in Vlaanderen het advies om miscanthus te planten wanneer dat mogelijk is op zeer natte of arme gronden, waar andere akkerbouwgewassen zoals maïs niet geschikt zijn. Een voorbeeld is het bedrijf Hog Ter Vrijlegem in Vlaams-Brabant, dat ongeveer 1,2 ha miscanthus heeft voor warmteproductie en later gebruik in het bedrijf. Productie van energie, zelfs op lokale schaal, kan voordelig zijn gezien het feit dat alle olie- en aardgasvoorziening in België wordt geïmporteerd en dat in België sterk de nadruk wordt gelegd op het versnellen van de schone energietransitie (IEA, 2022).

Een ander potentieel gebruik is bouw materiaal voor isolatiedoeleinden, vezelplaten, papier en karton, vanwege de vezelsterkte en isolerende eigenschappen (Waegebaert en Mey, 2019). Kalkmiscanthusmengsels kunnen worden gebruikt in de bouw van muren, vloeren en daken voor verwarmingsdoeleinden. Miscanthuschips kunnen ook worden gebruikt in plaats van zand en grind in nieuwe materialen van het type poreus beton (bv. "xiriton"). Dit nieuwe materiaal profiteert van de lichtheid van de vezels en de temperatuur- en geluidsisolerende eigenschappen (Waegebaert en Mey, 2019).

De dikke en droge stengels (chips) van miscanthus zijn goed te gebruiken in mulching, kippenstallen of beddingmateriaal voor melkkoeien of pluimvee. Miscanthuschips hebben een hoog absorptievermogen, ze drogen snel en plakken niet aan elkaar, ook kunnen ze stikstof opnemen waardoor slechte geuren van ammoniak worden verminderd (Waegebaert en Mey, 2019). Vergeleken met stro hebben miscanthuschips geen verschillen met betrekking tot bacteriegroei of diercomfort (Van Weyenberg et al. , 2016). In het geval van mulchen zijn miscanthuschips ook een goede optie, voor het beheersen van onkruidgroei en het absorberen van overtollig vocht.

Er is een groeiende belangstelling voor meer duurzame tuinbouwsubstraten (b.v. Horti-BlueC), waarbij turf kan worden geëlimineerd of ten minste vervangen. Miscanthusvezels kunnen worden gebruikt om turf in groeimedia gedeeltelijk te vervangen na verschillende fysische en chemische behandelingen. Verwerkte plantenzvezels vertonen een lage stikstoffixatie en worden gemakkelijk gekoloniseerd door schimmel-biocontrole-stammen, die de behoefte aan chemische gewasbescherming verminderen (Vandecasteele et al. , 2018).

Miscanthus kan ook milieudiensten leveren zoals koolstofvastlegging en lage broeikasgasemissies (Waegebaert en Mey, 2019; Ben Fradj et al. , 2020). Aangezien het gewas waterniveaus onder de bodemoppervlakte vereist, is er geen risico op methaanemissies zoals bij de teelt van lisdodde. Wanneer het gewas als bouw materiaal wordt gebruikt, blijft de koolstof tijdens de levensduur van het materiaal gefixeerd, wat mogelijkheden biedt voor koolstofvastlegging (Bestman et al. , 2019). Tot slot heeft miscanthus een efficiënte nutriëntenopname door het meerjarige wortelstokstelsel, dat de meeste plantenvoedingsstoffen bevat, en heeft het over het algemeen geen stikstofbemesting nodig (Waegebaert en Mey, 2019).

Beperkingen

Er wordt in de EU slechts 20000 ha Miscanthus geteeld voor commerciële doeleinden, waarvan de helft in het Verenigd Koninkrijk (Lewandowski et al. , 2016). In België was er in 2018 ongeveer 268 ha aangegeven (Waegebaert en Mey, 2019). De hoge investeringseisen en het gebrek aan beschikbare markten maken boeren huiverig om dit gewas te telen en alleen lokaal gebruik is mogelijk. In vergelijking met andere gangbare gewassen is miscanthus zeer arbeidsintensief, en ook de verwerking van biomassa voor energieproductie

Voorbeelden

- **Promis ©Belux** (België): levert miscanthus wortelstokken en biedt volledige begeleiding bij de teelt en aankoop van productie.
- **Miscanthus Nursery Limited** (MNL) (UK): 36 boeren aandeelhouders telen verse wortelstok voor teelt, oogst en handel. Zij onderhandelen zelf over contracten voor eindgebruik en geven advies over alle aspecten van de teelt en verkoop van Miscanthus.

2.4.3 Veenmos (Sphagnum sp.)

Sphagnum mos komt veel voor in moerassige gebieden, het heeft een groot vermogen om water vast te houden tot 16-26 keer zijn eigen droge gewicht (Duursen et al. , 2016). Na hon-



Figuur 64: Sphagnumveldproef in het project PROSUGA aan de universiteit van Greifswald (Greifswald Mire Center, 2020).

derden jaren vormde het langzaam bevochtigde oude veenmos het sphagnumveen. Sphagnumteelt is de teelt van dit veenmos, voor hernieuwbare biomassa-productie, veenbehoud en vermindering van de uitstoot van broeikasgassen (Greifswald Mire Center, 2020). Veenmos kan potentieel worden geteeld in gedegradeerde veengebieden die momenteel worden gebruikt voor grasland, en kan zorgen voor een duurzaam en klimaatvriendelijk landgebruik op deze venen, terwijl het een vervanger voor turf in tuinbouwkweekmedia produceert (Gaudig et al., 2017). De opbrengst bedraagt ongeveer $3,5 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ volgens sphagnumkweeklocaties in Duitsland (Greifswald Mire Center, 2015). Veenmos groeit bij waterniveaus van ongeveer 10 cm onder het grondoppervlak en permanente en stabiele natte omstandigheden zijn fundamenteel voor een optimale productiviteit. In tegenstelling tot andere paludicultuurgewassen hebben voedselarme bodems en zure omstandigheden de voorkeur om concurrentie met algen of onkruid, ook een lage PH, te vermijden (Collins et al., 2019). Voedingsstoffen worden aan het water onttrokken, waardoor een zuur milieu ontstaat dat de concurrentie met andere planten vermindert, maar ook de afbraak van het organische materiaal, dat de belangrijkste bron van broeikasgassen is in veengebieden (Holtuis et al., 2021). Brakke omstandigheden zijn niet geschikt voor de teelt van veenmos (IPV, 2022). Vermeerdering van sphagnum gebeurt via fragmenten of microvermeerderde planten (Collins et al., 2019; Gaudig et al., 2017). Oogsten kan normaal gesproken het hele jaar door, zolang er geen natuurbeschermingsvoorschriften of hoge waterstanden zijn (Collins et al., 2019).

Potentiële toepassingen

Sphagnum wordt voornamelijk gebruikt en onderzocht voor tuinbouwsubstraten en potgronden dankzij de eigenschappen die vergelijkbaar zijn met die van turf. Deze eigenschappen omvatten structurele stabiliteit, watervasthoudend vermogen, luchtigheid, zuurgraad en gehalte aan voedingsstoffen en organische stoffen. Veenmos is niet erg bekend, maar wordt al wel gebruikt in de markt voor orchideeësubstraten (Duursen et al., 2016). Producenten

van land- en tuinbouwsubstraten zijn op zoek naar veenalternatieven om hun koolstofvoetafdruk te verkleinen (CANAPE, 2020). Deze markt is momenteel zeer concurrerend omdat er aan specifieke productspecificaties moet worden voldaan, wat varieert met sphagnumsoorten (Duursen et al. , 2016).

Sphagnum kan op korte termijn ook gebruikt worden als decoratiemateriaal in bloemstukken en andere toepassingen. Er is een kleine maar groeiende markt op dit gebied omdat productiehoeveelheden, kennis en investeringsbehoeften duidelijk zijn (Duursen et al. , 2016). Voor dit doel zijn waterretentie en groen fundamenteel. Andere toepassingen zijn filtering van afvalwater, biologisch afbreekbaar adsorbens van koolwaterstoffen en bekleding van terraria (CANAPE, 2020).

Beperkingen

Net als de andere paludicultuurgewassen, berusten de beperkingen van de sphagnumteelt op de kleine marktmogelijkheden, het gebrek aan bewustzijn bij producenten en consumenten, en het feit dat verder onderzoek nodig is om optimale variëteiten en teeltmethoden voor verschillende toepassingen te vinden. Uitgangsmateriaal is momenteel duur en er zijn hogere initiële investeringen nodig (Duursen et al. , 2016) Er zijn slechts beperkte proef-/onderzoeksprojecten, voornamelijk in Duitsland (Sphagnum Farm Barver, site Ramsloh), die nog steeds lopen. Ook laten de specifieke teeltomstandigheden (d.w.z. voedselarme bodems, zure omstandigheden) de teelt van andere natte gewassen niet toe, wat een beperkende factor kan zijn in het kader van natuurbeschermingswetten.

Voorbeelden

- **Bio-Kultura:** volgens Duursen et al. (2016) gebruikt dit bedrijf ongeveer 20% sphagnum in hun substraten.

2.4.4 Riet (*Phragmites australis*)

Riet is wereldwijd de meest voorkomende moerasplant, het komt voor in Europa, het Midden-Oosten en Amerika. In Europa wordt riet vooral aangeplant in Zuid-Zweden, Oostenrijk en Estland (Köbbing et al. , 2013). Dit gewas wordt al eeuwenlang gebruikt, hetzij als veevoer wanneer het in de zomer wordt geoogst, hetzij als bouw materiaal voor riet, papierproductie of isolatie wanneer het in de winter wordt geoogst (Köbbing et al. , 2013). Riet is een hoog en dun gras dat 3 tot 4 m hoog kan worden, de wortels kunnen zeer diep in de bodem groeien waardoor het gewas goed bestand is tegen droogte of schommelingen in het waterpeil (Bestman et al. , 2019). De opbrengst is afhankelijk van klimaat, watervoorziening, bodem en voedingsstoffen en kan oplopen tot 30 ton ha⁻¹ jr⁻¹ (Köbbing et al. , 2013), hoewel opbrengsten van rond de 10 ton ha⁻¹ jr⁻¹ realistischer zijn (Bestman et al. , 2019). In de winter worden voedingsstoffen opgeslagen in de wortels, waardoor de opbrengsten in de winter stabiel zijn. In de zomer verspreiden voedingsstoffen zich naar de bovengrondse biomassa. Riet presteert beter bij hoge (+20 cm) of relatief lagere waterstanden (-20 cm) (Bestman et al. , 2019). Tijdens de vestigingsfase kan riet kwetsbaar zijn voor onkruiden en aquatische herbivoren (Geurts en Fritz, 2018).



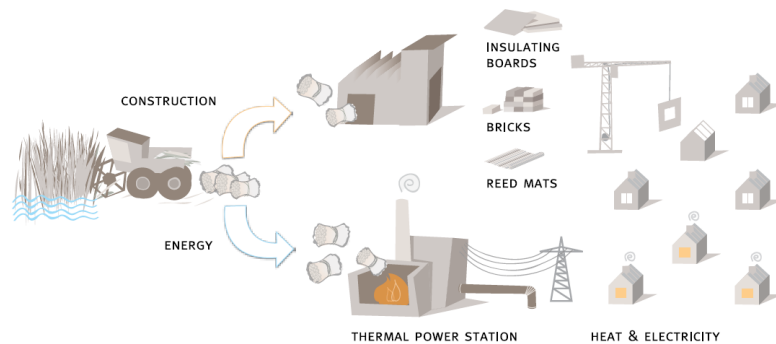
Figuur 65: Gewoon riet dat spontaan groeit op de oevers van de Vaart Leuven-Mechelen.

Potentiële toepassingen

Volgens Köbbing et al. (2013) kunnen de potentiële toepassingen van riet worden onderverdeeld in industriële, energie-, landbouw- en milieutoepassingen. Binnen de industriële toepassingen is riet waarschijnlijk het meest traditionele gebruik van riet dankzij zijn duurzaamheid, flexibiliteit en stevigheid. Voor dit doel moet het vochtgehalte lager zijn dan 18 % en daarom wordt het riet geoogst in de winter, wanneer de plant al droog is. Riet ging vroeger 50 tot 100 jaar mee, maar momenteel is dit door de vervuiling gedaald tot maximaal 30 jaar. Een ander industrieel gebruik is isolatiemateriaal voor muren en daken en panelen. Hier kunnen ook de bladeren en resten van riet worden gebruikt omdat de vereiste kwaliteit lager is. Riet heeft een laag warmtegeleidingsvermogen van (λ) van $0,055 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ dat niet veel onderdoet voor traditionele isolatiematerialen, en zorgt voor een hoge volume-gewichtsverhouding (Bestman et al. , 2019; Köbbing et al. , 2013), uitstekend om voor een passend binnenklimaat te zorgen. Verder kan rietpulp worden gebruikt voor papierproductie dankzij de cellulose en hemicellulose die aanwezig zijn in rietbiomassa. Deze toepassing wordt in Europa echter niet meer onderzocht vanwege de ontoereikende rietvoorraad en om milieuredenen (Köbbing et al. , 2013).

In termen van energiegebruik kan rietbiomassa worden gebruikt voor verbranding, biogas en de productie van biobrandstof (Köbbing et al. , 2013). Wintergeoogst riet met een laag vochtgehalte wordt gebruikt voor verbranding en biobrandstof, terwijl zomergeoogst riet met een hoog vochtgehalte wordt gebruikt voor biogas. In de winter is het gehalte aan voedingsstoffen en as in de bovengrondse biomassa laag, wat gunstig is tegen corrosie van apparatuur en emissies na verbranding. De calorische waarde of energie aanwezig in rietbiomassa is ongeveer $14\text{-}17 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Bestman et al. , 2019; Köbbing et al. , 2013), vergelijkbaar met houtpellets. Rietbiomassa neemt een groot volume in beslag door de lage dichtheid, daarom is het comprimeren tot pellets of briketten belangrijk voor gemakkelijk vervoer en minder op-

slagvereisten. Een verwerking op lokale schaal heeft ook de voorkeur. Voor de productie van biogas (d.w.z. methaan) is vers zomerriet met een hoog nutriëntengehalte nodig, aangezien het proces anaërobe vergisting door bacteriën omvat. Het methaan dient vervolgens voor de productie van warmte en elektriciteit. Bij de productie van biobrandstof wordt na voorbehandelingen glucose gewonnen uit rietcellulose. Dit gebruik is nog in onderzoek (Köbbing et al. , 2013).



Figuur 66: Energiecyclus van teelt tot eindproduct voor riet (Greifswald Mire Center, 2015)

Gebruik in de landbouw omvat veevoer en meststoffen. In de zomer geoogst riet heeft een matig ruw eiwitgehalte van ongeveer $60\text{--}115\text{ gr kg}^{-1}\text{ DM}$ (Bestman et al. , 2019), en een hoog stikstof-, kalium- en mangaangehalte, waardoor riet een zeer voedzaam veevoeder is (Köbbing et al. , 2013). Winterriet kan ook worden gebruikt als strooisel voor dieren. Voor gebruik als meststof wordt riet eerst gehakseld en samen met tuinafval gecomposteerd om het stikstofgehalte te verhogen. Ook zijn de resten van de biogasproductie klaar voor planten (Köbbing et al. , 2013).

Riet kan ook milieudiensten aanbieden zoals waterzuivering, wateropslag en turfconservering. Deze diensten kunnen gemakkelijk worden gecombineerd met andere productieve toepassingen. Rietproductie voor voedergewassen of biogas kan ook dienen voor het zuiveren van met nutriënten vervuilde wateren. Voor een opbrengst van minimaal 10 ton DM ha^{-1} kan de koolstofvastlegging $4\text{--}14\text{ ton C}$ bedragen, en de verwijdering van nutriënten $150\text{--}600\text{ kg N ha}^{-1}$, $10\text{--}60\text{ kg P ha}^{-1}$, en $50\text{--}350\text{ kg K ha}^{-1}$ (Geurts et al. , 2020). Riet kan de veenvorming en -conservering bevorderen wanneer het er overheen groeit. Aangezien riet goed bestand is tegen overstroomde omstandigheden, kan het ook samen met waterbergingsprojecten worden gebruikt (Bestman et al. , 2019).

Beperkingen

De teelt van riet heeft te maken met dezelfde beperkingen als andere paludicultuurgewassen. Er is nog verder onderzoek nodig om de teelt en de voedingsdynamiek te optimaliseren voor een langetermijnperspectief van de paludicultuur. Bovendien zijn sommige potentiële toepassingen, zoals papierproductie, in de vergetelheid geraakt en kunnen deze niet opnieuw worden onderzocht wegens het geringe aanbod. Er kunnen ook conflicten ontstaan tussen natuurbehoud en energieproductie (Becker et al. , 2020).

Voorbeelden

- **Verwarmingsinstallatie op biomassa Malchin** (Duitsland): Sinds 2014 wordt riet en riet van de bevoeide weilanden bij het Kummerow-meer in Mecklenburg-Vorpommern gebruikt voor de productie van warmte, die in de stad Malchin wordt gebruikt.

2.4.5 Wilg (*Salix* sp.)



Figuur 67: Wilgenboom Bron: Natuurpunt

Wilgenbomen of struiken zijn in Vlaanderen wijdverspreid in de grenzen tussen land en water. Er zijn vele variëteiten en soorten, geleidelijk aan toleranter voor ziekten en met een hogere opbrengst (Natuurpunt, 2022; Larsen et al. , 2016). Ze kunnen typisch groeien in overstromingszones langs rivieren of in voedselarme en vochtige gebieden. Wilgen kunnen groeien in waterstanden van -40 tot 20 cm, maar lagere waterstanden hebben de voorkeur (Collins et al. , 2019). Ze zijn bestand tegen korte periodes van overstroming (minder dan 10 weken), gevolgd door een droge periode waarin herstel kan plaatsvinden (Bestman et al. , 2019). De typische soort is witte wilg (*Salix alba*), deze kan tot 20 m hoog worden (Natuurpunt, 2022). Vermeerdering gebeurt met twijgstekken van 20-30 cm en aanplant met een dichtheid van 16000 planten ha⁻¹. De opbrengst is gemiddeld 4,3 ton DM ha⁻¹, wat afhangt van de leeftijd van de boom, en kan afnemen bij een te hoge waterstand (Bestman et al. , 2019). Wilgen kunnen voordeliger zijn dan andere natte gewassen omdat ze op arme gronden kunnen groeien (Larsen et al. , 2016).

Potentiële toepassingen

Meer haalbare toepassingen voor wilg zijn agroforestry en andere rendabele toepassingen zoals diervoeder en wateropslag. Twijgen, jonge takken en groene bladeren kunnen worden gebruikt als voedsel voor koeien, geiten en schapen, omdat ze een ruw eiwitgehalte tot 190 g kg⁻¹ DM en een hoog selenium- en zinkgehalte bevatten, waardoor wilgen goed zijn als ruwvoer (Bestman et al. , 2019). Wilgen kunnen ook dienen als schuilplaats voor scharrelkippen om ze te beschermen tegen wind, regen, fel zonlicht of roofdieren (Bracke et al. , 2020). Dit is ook gunstig voor het verbeteren van de vlees- en ei kwaliteit en de fysieke gezondheid van kippen.

Andere toepassingen zijn houtvezels voor energieproductie, vanwege hun hoge calorische waarde van 18 MJ kg⁻¹ (Bestman et al. , 2019).

In tijdelijke waterbergingsgebieden (dus in de winter) kan wilg worden geteeld, zolang overstromingsperioden worden gevolgd door droge perioden (Bestman et al. , 2019). Volgens LIFE Veenherstel kan wilg ook dienen als buffer voor natte natuur en landbouwgronden, om negatief effect van beide kanten te voorkomen, en ook bloemen leveren voor veel bestuivers zoals solitaire bijen, honingbijen en zweefvliegen. Dit milieugebruik kan gemakkelijk worden gecombineerd met productief gebruik.

Beperkingen

De belangrijkste beperkingen zijn het gebrek aan regelgeving, de complexiteit van het werk en het gebrek aan kennis over het beheer van de bomen. Gebieden met wilgenbomen kunnen worden aangemerkt als bos in plaats van landbouwgrond, waardoor de prijs ervan kan dalen. Ook is onkruidbestrijding nodig tijdens de vestiging van wilgen, wat de initiële investeringskosten verhoogt (Luske, 2014).

Voorbeelden

- **AGFORWARD WP5** (Nederland): Wilg voor runderen en geiten
- **LEGCOMBIO** (België): Wilg voor kippenhok

2.5 Verdienmodellen

Tabel 3 beschrijft enkele mogelijke bedrijfsmodellen voor Vlaanderen met betrekking tot paludicultuur in opnieuw bevochtigde gebieden, die in onderzoek zijn of reeds in andere landen worden toegepast. Verder onderzoek is zeker nodig.

2.6 Onderzoeksperspectieven

De volgende aanbevelingen voor verder onderzoek in Vlaanderen zijn grotendeels gebaseerd op Ziegler et al. (2021) en de resultaten van verschillende proefprojecten die reeds in Nederland en Duitsland zijn uitgevoerd.

- Samenwerking zoeken met andere bedrijven en organisaties die geïnteresseerd zijn in het testen en verder ontwikkelen van paludicultuur.
- Opzetten van langlopende pilots of demonstratieprojecten om de unieke eigenschappen van paludicultuurgewassen te onderzoeken en hun levensvatbaarheid in Vlaanderen aan te tonen. Deze proeven kunnen ook dienen om gewasmodellen te kalibreren voor deze natte teelten.
- Bij onderzoeksprojecten en nieuwe initiatieven aandacht hebben voor het opzetten van een participatief traject met belanghebbenden, om hun behoeften en kennis mee te nemen, het bewustzijn over klimaatverandering te vergroten en een nieuwe cultuur van duurzame landbouw tot stand te brengen.

Tabel 17: Mogelijke verdienmodellen in Vlaanderen

| Verdienmodel | Beschrijving | Pros/Cons | Bron |
|---|---|---|--|
| Vee in natte weiden | Vee aangepast aan natte weiden omstandigheden (d.w.z. water buffalo) voor vlees- en melkproductie kunnen worden gecombineerd met paludicultuur (b.v. riet) voor diervoeder of biobrandstof. | + Goed voor veehouders die reeds ervaring hebben. Lage investeringen - Wetenschappelijke ondersteuning voor de controle van de waterstanden | (Collins et al. , 2019) (Greifswald Mire Center, 2015) (Ziegler et al. , 2021) |
| Multifunctioneel gebruik van natte graslanden | Paludicultuur en natuurlijk grasland kunnen worden gebruikt voor compost, diervoeder en bouwmaterialen, in combinatie met milieudiensten. | + Slechts kleine veranderingen in het oogsten van biomassa. Biomassa kan dienen voor verschillende toepassingen naar keuze van de landbouwer. - De transportkosten naar de bedrijven zijn hoog. | (Collins et al. , 2019) (Compeer en Mattheij, 2019) |
| Telen van substraten voor tuinbouw | Geschikt voor hoogveen waar sphagnum kan worden gekweekt | + Hoge vraag naar teeltsubstraten en turfalternatieven in de markt. - Hoge kosten voor aangepaste machines of hydrologische infrastructuur. - Landbouwers moeten onderzoek doen naar de winstgevendheid van de markt. | (Collins et al. , 2019) |
| Natuurbehoud | Paludicultuur kan worden gebruikt in bufferzones of natuurgebieden voor CO2-emissiereductie en biodiversiteitsherstel. | + Verscheidene en belangrijke milieudiensten - Biomassa kan niet op elk moment worden geoogst, behalve sphagnum. | (Collins et al. , 2019) |
| Biomassa voor energieproductie | Voor de verbranding kunnen gewassen zoals lisdodde, miscanthus of riet worden gebruikt. | + Nuttig voor biomassa van lage kwaliteit. - De verwarmingsinstallatie moet dicht bij de boerderijen staan. - De machines moeten worden aangepast. | (Collins et al. , 2019) (Greifswald Mire Center, 2015) |
| Agroforestry | Bomen zoals wilgen die aangepast zijn aan natte omstandigheden kunnen voedsel en onderdak bieden aan dieren. | + Verschillende productieve en milieudiensten die kunnen worden verhandeld om extra inkomsten en/of diversificatie te genereren. - Devaluatie van de grondprijs door gebrek aan regelgeving. | (Bracke et al. , 2020) (Luske, 2014) |

- De in andere landen toegepaste bedrijfsmodellen als voorbeeld gebruiken om aangepaste verdienmodellen voor Vlaanderen te creëren. Onderzoek ook andere bedrijfsmodellen die geschikt zijn voor natte gronden, zoals het gebruik van gras in natte omstandigheden voor energieproductie of compost.
- Een economische analyse maken van de waardeketen, van teelt tot eindproduct, van de meest geschikte paludicultuurgewassen zodat geïnteresseerden duidelijker kunnen zien wat de transitie naar 'natte landbouw' kan betekenen.
- Prikkels en beleid ontwikkelen om investeringen in paludicultuur en meer diverse toepassingen te stimuleren, waardoor de inkomsten zullen toenemen. Subsidies en betalingen voor ecosysteemdiensten (bvb. koolstofkredieten) en beheersovereenkomsten voor wateropslag zouden ook kunnen worden ingevoerd.

2.7 Bibliografie

S. Abel, J. Couwenberg, T. Dahms en H. Joosten. De Databank van Potentiële Paludicultuurplanten (DPPP) en resultaten voor West-Pommeren. *Plant Diversity and Evolution*, 130(3-4):219-228, dec 1 2013. ISSN 1869-6155. doi:10.1127/1869-6155/2013/0130-0070. URL <http://dx.doi.org/10.1127/1869-6155/2013/0130-0070>.

L. Becker, S. Wichmann en V. Beckmann. Gewoon riet voor strooisel in Noord-Duitsland: Estimating the Market Potential of Reed of Regional Origin. *Resources*, 9(12):146, dec 16 2020. ISSN 2079-9276. doi:10.3390/resources9120146. URL <http://dx.doi.org/10.3390/resources9120146>.

J. Belle. Natte teelt voor waterkwaliteit Verkenning van de bijdrage van paludicultuur aan waterkwaliteitsverbetering in een Friese polder. techreport, Hogeschool Van Hall Larenstein, 2021. URL <https://beterwetter.nl/wp-content/uploads/2022/01/Natte-teelt-voor-waterkwaliteit-v1.1def.pdf>.

N. Ben Fradj, S. Rozakis, M. Borzęcka, en M. Matyka. Miscanthus in de Europese bio-economie: Een netwerkanalyse. *Industrial Crops and Products*, 148:112281, 6 2020. ISSN 0926-6690. doi:10.1016/j.indcrop.2020.112281. [Online; bekeken op 2022-02-25].

M. Bestman, J. Geurts, Y. Egas, K. Houwelingen, F. Lenssinck, A. Koornneef, J. Pijlman, R. Vroom, en

N. Eekeren. Natte teelten voor het,veenweidengebied Verkenning van de mogelijkheden van lisdodde, riet, miscanthus en wilg. techreport, 2019.

J. Bracke, E. Haas, L. Van Vooren, P. Pardon, V. Nelissen, T. Decroos, D. Van Grembergen, F. Tuyttens, en

B. Reubens. Meerwaarde creëren in de biologische landbouw door duurzame combinaties van plantaardige teelten met uitloop voor pluimvee Eindrapport project LEGCOMBIO (2017-2020). pagina 126, 2020. ISSN 1784-3197.

URL https://pure.ilvo.be/ws/portalfiles/portal/17622589/266_ilvo_mededeling_LEGCOMBIO.pdf.

CANAPE. Paludicultuur. 2020. URL <https://northsearegion.eu/canape/paludiculture/>. [Online;

ac- cessed 2022-06-15].

R. Collins, P. Leadbitter, C. Fritz, en G. J. Duinen. Deliverable nr. T1.1.2 State of the Art (SotA) documenten (landtypes, gewastypes, waterstanden). Interreg NWE Carbon Connects, 2019.

A. Compeer en S. Mattheij. Inventarisatie en economische analyse biomassastromen Vlaanderen en Noord-Brabant. techreport, Interreg Grensregioprogramma-GrasGoed, 2019. URL <https://www.grensregio.eu/assets/files/site/Grasgoed-rapport-inventarisatie.pdf>.

M. de Jong, O. van Hal, J. Pijlman, N. van Eekeren, en M. Junginger. Paludicultuur als paludifuture op Nederlandse veengronden: An environmental and economic analysis of Typha cultivation and insulation production. *Science of The Total Environment*, 792:148161, 10 2021. ISSN 0048-9697. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148161. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148161>.

A. De La Haye, C. Devereux en S. Herk. Peatlands across Europe: Innovation and Inspiration |. techreport, Bax & Company, Barcelona, 6 2021. URL <http://www.decadeonrestoration.org/es/node/4649>. [Online; bekeken op 2022-03-18].

J. Duursen en A. N. al. Marktverkenning Paludicultuur Kansen voor de landbouw in veenweidegebieden met behoud van veen. techreport, 5 2016. URL <https://www.veenweiden.nl/wp-content/uploads/2018/09/Marktverkenning-Paludicultuur.pdf>.

J. Duursen, A. Nieuwenhuijs, G. Meijers, K. Leeuw, B. Riet, N. Hogeweg, R. Gerwen, en C. Fritz. Marktverkenning Paludicultuur Kansen voor de landbouw in veenweidegebieden met behoud van veen. techreport, 5 2016. URL <https://www.veenweiden.nl/wp-content/uploads/2018/09/Marktverkenning-Paludicultuur.pdf>.

E. D. R. (EDR). Paludicultuur Interreg Deutschland Nederland. 2022. URL <https://bioeco-edr.eu/nl/paludicultuur>. [Online; geraadpleegd 2022-04-08].

W.-J. Emsens, C. Aggenbach, C. Dictus, F. Smolders, E. Verbruggen, en R. Diggelen. Laagveenherstel door vernatting Terug naar oernatuur in de vallei van de Zwarte Beek. *Natuurfocus*, pagina 7, 2019.

G. Gaudig, M. Krebs, en H. Joosten. Sphagnumkweek op maaiveld in NW Duitsland: Langetermijnstudies naar de groei van Sphagnum. *Mires and Peat*, (20):1-19, 14 mei 2017. ISSN 1819-754X. doi:10.19189/MaP.2016.OMB.238. URL <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.238>.

J. J. Geurts, C. Oehmke, C. Lambertini, F. Eller, B. K. Sorrell, S. R. Mandiola, A. P. Grootjans, H. Brix,

W. Wichtmann, L. P. Lamers en C. Fritz. Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soil. *Science of The Total Environment*, 747:141102, 12 2020. ISSN 0048-9697. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141102. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141102>.

J. J. M. Geurts en C. Fritz. Paludicultuur pilots en experimenten met focus op kattenstaart en riet in Nederland. 510, 2018. doi:10.13140/RG.2.2.12916.24966.

URL <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.12916.24966>.

Greifswald Mire Center. Paludicultuur Duurzaam productief gebruik van opnieuw bevochtigde veengebieden. 2015. URL [https://www.moorwissen.de/doc/infothek/Broschure Paludiculture EN.pdf](https://www.moorwissen.de/doc/infothek/Broschure_Paludiculture_EN.pdf).

Greifswald Mire Center. Sphagnum landbouw. 2020. URL <https://www.moorwissen.de/en/paludikultur/imdetail/torfmooskultivierung.php>. [Online; geraadpleegd 2022-06-15].

C. Hartung en E. Meinken. Fen plantenbiomassa als groeimediuumbestanddeel - vermindering van stikstofmobilisatie door compostering. *Acta Horticulturae*, (1317):93-98, 8 2021. ISSN 0567-7572, 2406-6168. doi:10.17660/ActaHortic.2021.1317.11.

URL https://www.actahort.org/books/1317/1317_11.htm. [Online; geraadpleegd 2022-04-21].

J.-u. Holtuis, J. Belle, en H. Mach. CANAPE Chats: Aflevering 2 - Sphagnumteelt in Barver. 6 2021. URL <https://www.youtube.com/watch?v=Xw3eS07kV6A&t=1s>. [Online; bekeken op 2022-06-15].

S. V. Hulle, C. V. Waes, A. D. Vliegheer, J. Baert, en H. Muylle. Comparison of dry matter yield of lignocellulosic perennial energy crops in a long term Belgian field experiment. In *Grassland Science in Europe : Grassland - a European Resource*, blz. 499-501, 2012. URL <https://pureportal.ilvo.be/nl/publications/comparison-of-dry-matter-yield-of-lignocellulosic-perennial-energy>. [Online; bekeken op 2022-04-26].

IEA. Belgium 2022 Energy Policy Review. techreport, 2022. URL https://iea.blob.core.windows.net/assets/638cb377-ca57-4c16-847d-ea4d96218d35/Belgium2022_EnergyPolicyReview.pdf.

IPV. Samen 5 jaar zoeken naar duurzaam landgebruik in het veenweidegebied Eindrapportage Innovatie Programma Veen 2017-2022. techreport, 2022. URL [URL PDF](#).

IUCN. Veengebieden en klimaatverandering. 11 2021. URL <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/peatlands-and-climate-change>. [Online; bekeken op 2022-02-14].

G. Kaur, G. Singh, P. P. Motavalli, K. A. Nelson, J. M. Orlowski, en B. R. Golden. Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, 112(3):1475-1501, 5 2020. ISSN 0002-1962, 1435-0645. doi:10.1002/agj2.20093. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/agj2.20093>. [Online; geraadpleegd 2022-03-17].

J. F. Köbbing, N. Thevs, en S. Zerbe. Het gebruik van riet (*Phragmites australis*): een overzicht. 2013.

S. Larsen, D. Jaiswal, N. S. Bentsen, D. Wang, en S. P. Long. Comparing predicted yield and yield stability of willow and *Miscanthus* across Denmark. *GCB Bioenergy*, 8(6):1061-1070, apr 30 2016. ISSN 1757-1693. doi:10.1111/gcbb.12318. URL <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12318>.

K. Leiber-Sauheitl, H. Bohne en J. Böttcher. First Steps toward a Test Procedure to Identify Peat Substitutes for Growing Media by Meadow of Chemical, Physical, and Biological Material Characteristics. *Horticulturae*, 7(7): 164, 7 2021. ISSN 2311-7524. doi:10.3390/horticulturae7070164.

URL <https://www.mdpi.com/2311-7524/7/7/164>. Nummer: 7 Uitgever: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

I. Lewandowski, J. Clifton-Brown, J. Scurlock en W. Huisman. Miscanthus: Europese ervaring met een nieuw energiegewas. *Biomassa en bio-energie*, 19(4):209-227, 10 2000. ISSN 0961-9534. doi:10.1016/s0961-

9534(00)00032-5. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5).

I. Lewandowski, J. Clifton-Brown, L. M. Trindade, G. C. Linden, K.-U. Schwarz, K. Müller-Sämann, A. Anisimov, C.-L. Chen, O. Dolstra, I. S. Donnison, K. Farrar, S. Fonteyne, G. Harding, A. Hastings, L. M. Huxley, Y. Iqbal,

N. Khokhlov, A. Kiesel, P. Lootens, H. Meyer, M. Mos, H. Muylle, C. Nunn, M. Özgüven, I. Roldán-Ruiz,

H. Schüle, I. Tarakanov, T. Weijde, M. Wagner, Q. Xi, en O. Kalinina. Progress on Optimizing Miscanthus Biomass Production for the European Bioeconomy: Resultaten van het EU FP7-project OPTIMISC. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2016. ISSN 1664-462X.

URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.01620>. [Online; bekeken op 2022-04-25].

B. Luske. Initial Stakeholder Meeting Report Fodder trees for cattle and goats in the Netherlands. techreport, Louis Bolk Instituut, 2014.

URL https://www.agforward.eu/documents/WP5_NL_fodder_trees.pdf.

G. A. Moore, Agriculture Western Australia en National Landcare Program (W.A.). *Soilguide: a handbook for understanding and managing agricultural soils*. Agriculture Western Australia, South Perth, W.A., 1998. OCLC: 38903946.

J. F. Morton. Kattenstaarten (*Typha* spp.) - Onkruidprobleem of potentieel gewas? *Economic Botany*, 29(1):7-29, 1 1975. ISSN 1874-9364. doi:10.1007/BF02861252.

URL <https://doi.org/10.1007/BF02861252>. [Online; bekeken op 2022-04-06].

H. Muylle, S. Van Hulle, A. De Vlieghe, J. Baert, E. Van Bockstaele, en I. Roldán-Ruiz. Yield and energy balance of annual and perennial lignocellulosic crops for bio-refinery use: Een 4-jarig veldexperiment in België. *European Journal of Agronomy*, 63:62-70, 2 2015. ISSN 1161-0301. doi:10.1016/j.eja.2014.11.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.001>.

Natuurpunt. Wilgen. 2022. URL <https://www.natuurpunt.be/pagina/wilgen>. [Online; geraadpleegd 2022-06-17].

K. Samaras, M. L. Pappas, E. Fytas, en G. D. Broufas. Pollen Provisioning Enhances the Performance of *Amblydromalus limonicus* on an Unsuitable Prey. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, apr 18 2019. ISSN 2296-701X. doi:10.3389/fevo.2019.00122.

SEIL. Miscanthus, een revolutionair biomassa-gewas. 2012. URL <http://www.recrops.com/miscanthus>. [Online; bekeken op 2022-06-14].

E. Talpe en H. Crevits. Paludicultuur - Integratie in het Vlaamse landbouwbeleid. 2021. URL <https://docs.vlaamsparlement.be/pfile?id=1700755>.

S. Van Weyenberg, T. Ulens, K. De Reu, I. Zwertvaegher, P. Demeyer, en L. Pluym. Haalbaarheid van *Miscanthus* als alternatief strooisel voor melkkoeien. *Veterinárni Medicína*, 60(No. 3):121-132, jul 15 2016. ISSN 0375-8427. doi:10.17221/8059-vetmed. URL <http://dx.doi.org/10.17221/8059-VETMED>.

B. Vandecasteele, H. Muylle, I. De Windt, J. Van Acker, N. Ameloot, K. Moreaux, P. Coucke, en J. Debode. Plantaardige vezels voor hernieuwbare groeimedia: Potentieel van defibratie, verzuring of inoculatie met biocontrole schimmels om de N-trek en plantpathogenen te verminderen. *Journal of Cleaner Production*, 203:1143-1154, 12 2018. ISSN 0959-6526. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.167.

B. Vandecasteele, S. Pot, K. Maenhout, I. Delcour, K. Vancampenhout, en J. Debode. Verzuring van compost versus houtachtige beheersresiduen: Optimizing biological and chemical characteristics for a better fit in growing media. *Tijdschrift voor Milieubeheer*, 277:111444, 1 2021. ISSN 0301-4797. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111444. [Online; bekeken op 2022-04-21].

R. J. Vroom, F. Xie, J. J. Geurts, A. Chojnowska, A. J. Smolders, L. P. Lamers, en C. Fritz. *Typha latifolia* paludiculture effectively improves water quality and reduces greenhouse gas emissions in rewetted peatlands. *Ecological Engineering*, 124:88-98, 12 2018. ISSN 0925-8574. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.09.008.

S. Waegebaert en V. D. Mey. Teelthandleiding miscanthus. Ten behoeve van biocomposietmaterialen voor bouwapplicaties. techreport, 2019. URL <https://www.grensregio.eu/assets/files/site/Growing-A-Green-Future-Teelthandleiding-miscanthus-ten-behoeve-van-biocomposiet-materialen-voor-bouw.pdf>.

S. Wichmann. Economische stimulansen voor klimaatslimme landbouw op veengronden in de EU. techreport, Institute of Botany, 2018. URL [URL PDF](#) .

W. Wichtmann, C. Schröder, en H. Joosten. Paludicultuur - productief gebruik van natte veengebieden. 4 2016. URL <https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/978351065283> ISBN: 9783510652839 Uitgever: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

D. Wilson, D. Blain, en J. Couwenberg. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, (17):1-28, apr 8 2016. ISSN 1819-754X. doi:10.19189/MaP.2016.OMB.222. URL

<https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>.

R. Ziegler, W. Wichtmann, S. Abel, R. Kemp, M. Simard, en H. Joosten. Gebruik van natte veengronden voor klimaatbescherming - Een internationaal overzicht van innovaties in de paludicultuur. *Cleaner Engineering and Technology*, 5: 100305, 12 2021. ISSN 2666-7908. doi:10.1016/j.clet.2021.100305.

–DEEL VII–

Conclusies

Het hoofddoel van deze studie was om een overzicht te geven van de mogelijke effecten die hoge grondwaterstanden op de landbouwproductie in Vlaanderen hebben en een modelkader te ontwikkelen dat beleidsmakers en onderzoekers gemakkelijk kunnen gebruiken om die effecten te voorspellen. We deden een uitgebreide literatuurstudie over de impact van natte omstandigheden op de landbouwpraktijk in het algemeen en op de mobilisatie van nutriënten, en over de kansen en belemmeringen voor natte landbouw (paludicultuur) in Vlaanderen. We pasten het model SWAP-WOFOST toe op het hele Vlaamse landbouwareaal voor vijf conventionele gewassen: gras, voedermaïs, aardappel, wintertarwe en suikerbiet en gebruikten hiervoor publieke datalagen. We gebruikten het landbouwgebied rond De Zegge-Mosselgoren als voorbeeld over hoe het model ook lokaal kan worden ingezet om impact van grondwaterbeheer op landbouw in te schatten. Het model en de bijbehorende documentatie is vrij beschikbaar in de PEILIMPACT github repository.

Hieronder vatten we de hoofdpunten van de studie samen:

Literatuuroverzicht

- Te ondiepe grondwaterstanden veroorzaken opbrengstvermindering omdat de meeste akkerbouwgewassen gevoelig zijn voor zuurstofstress, en natte omstandigheden kunnen leiden tot de verspreiding van ziekten en plagen. Het heeft ook gevolgen voor landbouwpraktijken waarbij machines worden gebruikt, omdat natte bodems minder draagvermogen hebben. Zo kan het land onbereikbaar zijn en leiden tot vertragingen bij zaaien of oogsten.
- De bodemtextuur bepaalt in grote mate hoeveel water in een bodem opgeslaan kan worden en hoe beschikbaar het is voor planten. Bovendien bepaalt het ook mee hoe wortels zich ontwikkelen en dus in welke mate planten toegang krijgen tot dat bodemwater.
- Te natte omstandigheden leiden tot een gebrek aan zuurstof in de bodem, waardoor de fysische en elektrochemische eigenschappen ervan drastisch veranderen. In deze nieuwe omstandigheden zijn geadsorbeerde fosfor en organische koolstofverbindingen mobieler en kunnen zij makkelijker in oppervlakte- en grondwater terecht komen.
- Natte landbouw of 'paludicultuur' kan in theorie een alternatief zijn voor conventionele landbouw in gebieden waar vernatting gepland is. De kleinschalige percelen in Vlaanderen kunnen een beperkende factor zijn om paludicultuur rendabel te maken en voldoende afzetmarkten te creëren. Lokale samenwerkingsverbanden maken dan wellicht het meeste kans. Onderzoek/proefprojecten zijn nodig om te bepalen of natte landbouw een voldoende robuust en rendabel verdienmodel kan bieden in de Vlaamse omstandigheden.

Regionale analyse en plausibiliteitscontrole

- Op Vlaamse schaal leidt droogte tot een grotere afname van de gewasopbrengst dan

natte omstandigheden. Aardappel, voedermaïs en suikerbiet zijn gevoeliger voor waterstress dan gras en wintertarwe. De grote variabiliteit van weersomstandigheden, bodem- en grondwaterstanden bepaalt de variabiliteit van de opbrengst in tijd en ruimte. In gebieden met zandleem- en leembodems schat het model de opbrengsten veelal hoger in dan op kleigronden, omdat de lichtere texturen de wortelgroei minder beperken.

- Gemiddelde grondwaterstanden die minder diep zijn dan 1m hebben over het algemeen een negatief effect op de opbrengst in natte jaren, maar zijn gunstig in droge jaren. De optimale grondwaterstand over alle gewassen en bodemtypes heen is gemiddeld 1m in normale en droge jaren, en 1,5 m in natte jaren. Deze drempels kunnen sterk veranderen als gevolg van variabiliteit door gewassen, bodem, grondwaterdynamiek en het weer en het is dus aangewezen deze complexiteit in rekening te brengen en niet uit te gaan van deze algemene richtcijfers in concrete gevallen.
- Uit de plausibiliteitscontrole van het model is gebleken dat SWAP-WOFOST in staat is algemene meerjarige trends in de gemiddelde gewasopbrengst te beschrijven, ondanks vele beperkingen in de invoergegevens en modelvereenvoudigingen. Het model heeft echter de neiging de gewasopbrengst te onderschatten, behalve voor gras. Bij suikerbiet was de onderschatting groot. Dit kan worden toegeschreven aan het gebruik van gewasparameters van verouderde variëteiten, soms ontbrekende informatie ivm veldbeheer (bv. irrigatie), een beperkte opbrengstdataset voor de validatie en het onzekere verschil tussen oogstresultaten van proefpercelen ten opzichte van velden van landbouwers.

Casus ‘De Zegge-Mosselgoren’

Het model werd toegepast op de studiecaser van het landbouwgebied rondom natuurgebieden De Zegge en Mosselgoren voor gras en voedermaïs.

- Ondiepe grondwaterstanden in het studiegebied zijn gunstig voor de gewasproductie in droge jaren, maar veroorzaken zuurstofstress in gewassen in natte en licht natte jaren. De totale opbrengstvermindering als gevolg van te droge of te natte omstandigheden en van indirecte effecten (bv. minder bewerkbaarheid, oogstvertraging) bedraagt voor de twee betrokken gewassen normaliter niet meer dan 30% voor het huidige klimaat en waterbeheer in het gebied.
- Momenteel zijn het veldbeheer en de beheersing van het grondwaterpeil in het gebied optimaal voor de teelt van gras en voedermaïs, vooral in droge jaren. Uit deze studie konden nog geen gedetailleerde conclusies worden getrokken over het effect van hogere grondwaterstanden als gevolg van mogelijke vernattingsstrategieën op de landbouw in het studiegebied, aangezien er tot aan de afsluiting van dit project geen grondwater-scenario's beschikbaar waren van de ecohydrologische studie voor het gebied.

–DEEL VIII–

Aanbevelingen

Het huidige modelkader is vrij beschikbaar en kan dus in principe door iedereen gebruikt worden voor nieuwe beleidsvragen of effectenstudies. Het blijft echter nog noodzakelijk om basis-kennis te hebben van programmeren om de tools die op Github beschikbaar zijn makkelijk te kunnen gebruiken. Ook is enige kennis van bodem-plant interacties en gewasmodellering nodig om de huidige tekortkomingen correct in te schatten. Om overheden of landbouwers ook zelf de mogelijkheid te geven met deze tool aan de slag te gaan is er nog een **vertaalslag nodig naar de noden en achtergrond van deze eindgebruikers**. Voor deze vertaalslag plaats kan vinden, is het aangewezen om op korte termijn nog aan een aantal tekortkomingen te werken in het model zelf en de input ervan.

Het modelkader met SWAP-WOFOST en open datalagen voor Vlaanderen bleek de gewasopbrengst bij benadering te simuleren, zelfs met beperkte invoergegevens en modelvereenvoudigingen. Er is echter zeker nog ruimte voor verbetering, zeker bij de voorspellingen voor suikerbiet.

De opbrengstdatabank bevat waardevolle maar beperkte gegevens, voorlopig vooral afkomstig van rassenproeven in West- en Oost-Vlaanderen. Meestal is er ook geen data beschikbaar over grondwaterstanden. Het is enerzijds nodig om **bestaande oogstdata van proeven in heel Vlaanderen** op te nemen in de databank, liefst via een gestructureerde samenwerking met alle proefcentra. Daarnaast zouden **gerichte veldexperimenten onder verschillende, gekende hydrologische omstandigheden** welkom zijn. Daarin zouden dan metingen van bodem- en gewasgroei moeten plaatsvinden met speciale aandacht voor droogte- en zuurstofstress voor de belangrijkste gewassen in Vlaanderen. Op die manier kunnen de gewasparameters worden bijgewerkt tot recente variëteiten onder Vlaamse omstandigheden, en kunnen locatiespecifieke beheersgegevens en omgevingsfactoren worden gebruikt voor modelvalidatie, waarbij aanzienlijke verbeteringen in de simulaties kunnen worden verwacht.

Modellen zijn slechts een vereenvoudiging van de werkelijkheid, en invoergegevens en parameters hebben inherent ook onzekerheid. Op regionale schaal waren alleen oude bodemeigenschappen uit de Aardewerk-databank en de Belgische bodemkaart beschikbaar. De maximale bewortelingsdiepte van de bodem werd benaderd op basis van het kleigehalte en de berekende bulkdichtheid. In werkelijkheid kan bodemverdichting de bewortelingsdiepte in landbouwgebieden beïnvloeden. **Het zou wenselijk zijn de bewortelingsdiepte voor elk bodemtype te herzien en de bodemverdichting mee te nemen wanneer deze beschikbaar is**. Momenteel is loopt er een project gefinancierd door het Departement omgeving van de Vlaamse overheid, nl. 'Inschatting van de vochtretentiecapaciteit van bodems op basis van bodem- en landgebruikskenmerken', dat gegund werd aan Antea Belgium, Universiteit Gent en de Bodemkundige Dienst van België en dat in februari 2025 klaar zal zijn. Het doel van dit project is om voor Vlaanderen actuele pedotransferfuncties voor bodemvocht karakteristieken te bepalen via vlot meetbare bodemparameters. Deze informatie zal zeer waardevol

zijn om de huidige bodemparameters in het model te verbeteren.

De karakterisering van de seizoensgebonden grondwaterstandschoommelingen was gebaseerd op een eenvoudige sinusfunctie en geschatte kaarten van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG). Deze schommelingen kunnen ook worden geschat op basis van de drainageklassen op de Belgische bodemkaart, maar die zijn al verouderd en dus minder betrouwbaar. Er is momenteel een project gaande gefinancierd door het Departement Omgeving van de Vlaamse overheid en uitgevoerd door oa Antea groep, nl. 'Update drainageklassen van de bodemkaart'. Dit project zo een **geactualiseerde kaart van grondwatertafels en drainageklassen** moeten opleveren die ook als input voor het model in dit project kan gebruikt worden. Daarnaast is er behoefte aan een **regionaal grondwatermodel dat de freatische grondwaterdynamiek beschrijft**, die cruciaal is om de impact ervan op de groei van akkerbouwgewassen te voorspellen. Het lopende onderzoeksproject TURQUOISE, gefinancierd door FWO SBO, kan hier wellicht eerste stappen zetten.

De weerbaarheid tegen de gevolgen van de klimaatverandering verhogen door vernatting van wetlands en beekvalleien om infiltratie en wateropslag te bevorderen is een belangrijke doelstelling in Vlaanderen. Landbouwers zullen zich in die gevallen moeten aanpassen aan de gevolgen van die natte omstandigheden in minstens een deel van het jaar, zodat natuurgebieden en (aangepaste) landbouw naast elkaar kunnen bestaan. De case-study bij De Zegge-Mosselgoren is een goed voorbeeld van hoe deze twee vormen van landgebruik vaak vlak naast elkaar bestaan en elkaar beïnvloeden en hoe er dus conflicten kunnen ontstaan. De ontwikkelde modelinstrumenten kunnen nu ingezet worden met lokale gegevens en door alle relevante factoren mee te nemen (landbouwpraktijken, specifiek waterbeheer, ...). Toekomstig onderzoek in dit soort gebieden kan dan de gevolgen van specifieke scenario's voor vernatting voor de landbouwpercelen inschatten. Het zou echter ook goed zijn om een aantal **pilotstudies te doen waarin de impact ook in de realiteit wordt gemonitord**, zodat het model verder gevalideerd en stelselmatig verbeterd kan worden.

–DEEL IX–

Metingen fosformobilisatie

1 Achtergrond

Het project OP-PEIL onderzoekt peilgestuurde drainage (CD) als één van de instrumenten meer water te bufferen in het landbouwlandschap. Een van de doelstellingen is om het effect van peilgestuurde drainage op verzilting in de poldercontext te monitoren. In het verleden kwam het zeewater over het land in de huidige polders, wat ten dele verklaart dat het grondwater zout is. Door de aanleg van dijken en een netwerk van grachten, stuwen en pompen werd dit land op de zee gewonnen en drooggelegd om het geschikt te maken voor landbouw. Met de tijd en de regenval ontwikkelde zich een oppervlakkige (enkele meters) dikke zoetwaterlens. Deze zoetwaterlens is essentieel voor gewassen, omdat de meeste klassieke landbouwgewassen stress ondervinden of zelfs sterven onder direct contact met het zoute water. Naarmate de buien intenser worden, heeft de neerslag echter minder tijd om te infiltreren en de zoetwaterlens aan te vullen en wordt de neerslag vaak direct afgevoerd door het bestaande grachten- en drainagesysteem. Bij droogte in de zomer wordt dit probleem acuut, omdat de zoetwaterlens stelselmatig krimpt en het zoute water gaat opstijgen naar de wortelzone, waardoor de opbrengst in gevaar komt.

Bij peilgestuurde drainage kan een landbouwer de watertafel onder zijn veld dynamische regelen naar gelang van de meteorologische omstandigheden en het geplande veldwerk, door het waterpeil in een controleput bij de moerbuis aan te passen. In de polder helpt peilgestuurde drainage om in de winter meer zoet water in de bodem te laten infiltreren om de zoetwaterlens in stand te houden.

In het kader van dit project werden twee naburige proefvelden in de polders geselecteerd om de effecten van peilgestuurde drainage op het grondwaterpeil en het hydrologisch functioneren van de velden te monitoren. Van april 2021 tot november 2022 werden beide velden conventioneel gedraineerd en gemonitord. Vanaf december 2022 werd een van de velden uitgerust met een controleput, terwijl het andere als referentie dient voor conventionele drainage. Beide velden zijn uitgerust met diverse sensoren om het grondwaterpeil, bodemvocht, bodemtemperatuur en elektrische geleidbaarheid van de bodem op verschillende plaatsen in elk veld te monitoren.

Gezien het hoge niveau van instrumentatie en controle bieden deze velden een unieke gelegenheid om na te gaan of fosfor (P) wordt gemobiliseerd naarmate het grondwaterpeil stijgt, door het meten van het P-gehalte in watermonsters uit de drainagebuizen en in bodemstalen. De proefopstelling en de eerste resultaten worden hieronder beschreven. Het jaar 2022 was echter uitzonderlijk droog en er konden slechts drie watermonsters worden genomen voor het einde van dit project vermits het grondwaterpeil onder de drainagediepte zat gedurende een lange periode. In dit hoofdstuk worden de eerste experimentele gegevens gepresenteerd. ILVO zal de monitoring van de fosforconcentraties in het drainagewater de komende 2 jaar

voortzetten in het kader van het VLAIO LA-traject OP-PEIL.

2 Methodologie

2.1 Experimentele site

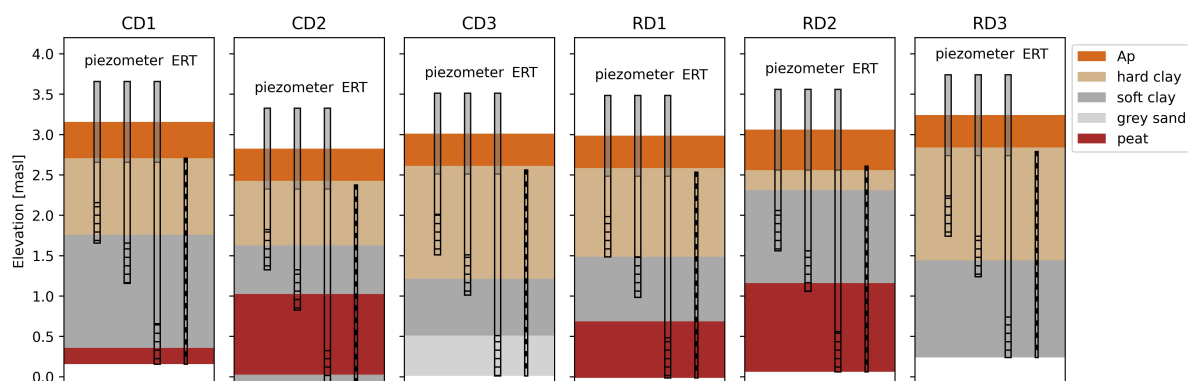
De twee experimentele velden, een regelmatige drainage (RD) en een gecontroleerde drainage (CD) liggen in Middelkerke (51° 8' 23.26" N, 2° 48' 51.86" E) en maken deel uit van dezelfde boerderij (figuur 1). Op elk veld werden drie locaties (CD1, CD2, CD3 of RD1, RD2, RD3) uitgerust met drie piëzometers van verschillende lengte (150, 200 en 300 cm onder het oppervlak), een stok met 16 elektroden om de elektrische geleidbaarheid van de bodem te meten, en bodemvocht- en temperatuursensoren. De veldmonitoring omvatte grondwaterniveau- en elektrische geleidbaarheidsmetingen (EC) van het grondwater op deze zes locaties. Handmatige metingen van de piëzometrische stijghoogten werden sinds maart 2022 maandelijks uitgevoerd en automatische duikers (DL-CTD10, Decentlab) werden sinds juli 2022 geïnstalleerd in vier piëzometers (CD1, CD2, RD1 en RD2). In elk veld werden op 28 maart 2022 bodemmonsters genomen om de chemische samenstelling en kenmerken ervan te analyseren.



Figuur 68: Ligging van de proefvelden, samen met de positie van elk meetpunt en de drainagebuizen. In transparante overlay staat het bodemtype volgens de Belgische bodemkaart.

Uit de boringen voor de piëzometers hebben we op elk meetpunt de bodemprofielen afgeleid (figuur 2). De bodem wordt gekenmerkt door een landbouwhorizont (Ap) van ongeveer 0,45 m die overeenkomt met de ploegdiepte, gevolgd door een geconsolideerde kleilaag (harde klei) die soms een diepte van 3 m kan bereiken, en daaronder een zandige bodemlaag of een veenlaag. De veenlaag kan op sommige plaatsen ongeveer 1 m dik zijn.

In het eerste experimentele jaar (2022) werd winter vlas gezaaid in het gecontroleerde drainageveld (CD), terwijl in het reguliere drainageveld (RD) gras voor zaadproductie (RD1 en RD2) en een combinatie van wintertarwe plus bonen werden geplant (RD3). Eind 2022 bestond de nieuwe teeltcyclus uit wintertarwe in het CD-veld en gras voor RD1 en RD2 en winter vlas voor



Figuur 69: Bodemprofielen op elk meetpunt. De diepte van de bodemprofielen wordt uitgedrukt in meters boven zeeniveau (mTAW).

Tabel 18: Landbouwpraktijken op de referentievelden en gecontroleerde drainagevelden tijdens de experimenten. Vetgedrukte cijfers geven de verwachte oogstdata aan. Merk op dat het vlas eerst wordt gekapt ("oogst" gebeurtenis) en vervolgens aan de oppervlakte blijft om te rotten totdat het wordt opgehaald ("ophaling" gebeurtenis).

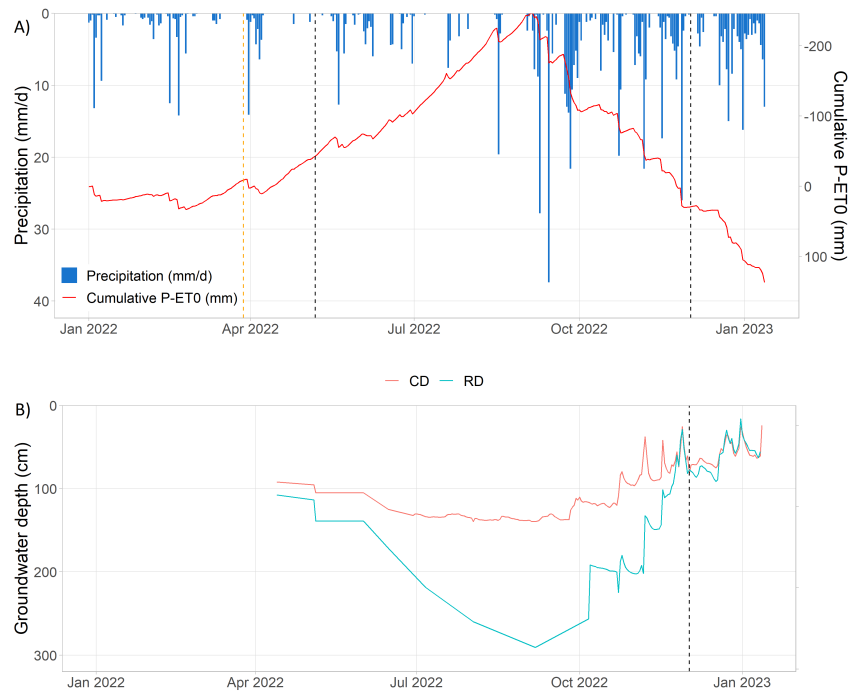
| Veld | Gewas | Evenement | Datum |
|------|---------------------|----------------|-------------------|
| RD | Wintertarwe + bonen | het zaaien van | 15/11/2021 |
| RD | Gras | het zaaien van | 20/11/2021 |
| CD | Wintervlas | zaaien | 25/11/2021 |
| RD | Gras | geknipt | 01/04/2022 |
| RD | Gras | zaadoogst | 07/07/2022 |
| CD | Wintervlas | oogst | 20/06/2022 |
| CD | Wintervlas | collectie | 12/08/2022 |
| RD | Wintertarwe + bonen | oogst | 12/08/2022 |
| RD | Gras | geknipt | 01/10/2022 |
| CD | Wintertarwe | ploegen | 20/09/2022 |
| CD | Wintertarwe | zaaien | 10/10/2022 |
| RD | Wintervlas | zaaien | 10/10/2022 |
| CD | Wintertarwe | oogst | 01/07/2023 |
| RD | Wintervlas | oogst | 01/08/2023 |
| RD | Gras | oogst | 01/10/2023 |

RD3. De specifieke ploeg-, plant- en oogstdata voor elk gewas en de verwachte oogstdata in 2023 zijn samengevat in Table 18.

2.2 Weersomstandigheden en grondwaterstanden

Figuur 3 toont de neerslag en het cumulatieve neerslagtekort (neerslag - referentie-evapotranspiratie, P-ETO), en de gemiddelde grondwaterstanddiepten, ten opzichte van het oppervlak, gemeten in de proeflocatie gedurende het jaar 2022 en begin 2023. In figuur 3A geeft de oranje stippellijn de datum aan waarop de bodemmonsters op het veld zijn genomen (28/03/2022) en de zwarte stippellijnen de data waarop de watermonsters uit de drainagebuizen zijn genomen (05/07/2022 en 02/12/2022). In figuur 3B geeft de zwarte stippellijn de datum aan waarop het gecontroleerde drainagesysteem in het CD-veld werd geïnstalleerd, waarbij wordt getracht het waterniveau stabiel te houden tot een niveau van ongeveer 25 cm onder het bodemoppervlak.

Een droge periode deed zich voor in augustus-september 2022 toen het neerslagtekort meer dan 200 mm bedroeg. Het neerslagtekort daalde in de volgende maanden door meer neerslag en lagere temperaturen en bereikte een neerslagoverschot van 100 mm in januari 2023. Dit is te merken aan de ondiepere grondwaterstanden in de velden CD en RD. De grondwaterstand is hoger in het CD-veld, vooral tijdens de drogere maanden. In het algemeen blijft het grondwaterpeil in de winter boven de 100 cm, maar soms wordt het zeer ondiep. Volgens de ruwe metingen bereikte het waterpeil zelfs het maaiveld op 12/01/2023.



Figuur 70: Dagelijkse neerslag, cumulatief neerslagtekort (neerslag - referentie-evapotranspiratie, P-ET0) (A), en gemiddelde grondwaterstand, ten opzichte van de oppervlakte, gemeten in de proeflocatie (B). De oranje stippellijn in de bovenste figuur (A) staat voor de datum waarop de bodemonsters zijn genomen (28/03/2022) en de zwarte stippellijnen geven de data aan waarop de watermonsters uit de drainagebuizen zijn genomen (05/07/2022 en 02/12/2022). In de onderste figuur (B) geeft de zwarte stippellijn de datum aan waarop het gecontroleerde drainagesysteem in het CD-veld werd geïnstalleerd.

2.3 Bemonstering en analyse van bodem en water

De door het ILVO Eenheid Plant Laboratorium Teelt en Omgeving toegepaste methoden voor monstervoorbereiding en verdere analyse worden hieronder beschreven.

2.3.1 Bodemstalen

Op 28/03/2022 werden bodemstalen verzameld uit de bodemlagen 0-30 cm, 30-60 cm en 60-90 cm in beide velden. De stalen werden in plastic zakken gedaan en bij -20 °C bewaard tot ze op 29/08/2022 konden worden geanalyseerd.

Voorbereiding van bodemonsters

Visuele planten en wortels >2 mm werden uit het vochtige monster verwijderd. De grond werd gedurende ten minste 24 uur gedroogd bij 40 +/-2 °C. Het monster werd vermalen met een kaakbreker (breker op 1,5 mm) en gezeefd op 2 mm. Materiaal dat de zeef niet passeerde, werd handmatig in een mortier fijn gemalen en opnieuw op 2 mm gezeefd.

Ammoniumlactaat

Met ammoniumlactaat extraheerbaar fosfor (P), calcium (Ca), magnesium (Mg) en kalium (K) (P-AL, Ca-AL, Mg-AL en K-AL) werden beoordeeld door extractie van de bodem met 0,1 M ammoniumlactaat en 0,4 M azijnzuur bij pH 3,75 (extractieverhouding 1:20) in donkere polyethyleenflessen, geschud gedurende 4 uur en de suspensie werd gefiltreerd in donkere polyethyleenflessen die tot de analyse koel werden bewaard (4 °C). P-AL, Ca-AL, Mg-AL en K-AL werden geanalyseerd met een 5110 VDV Agilent ICP-OES (Agilent, Santa Clara, CA).

Oxalaat - fosfaatverzadigingsgraad (FVG, fosfaatverzadigingsgraad)

Met oxalaat extraheerbaar P, aluminium (Al) en ijzer (Fe) werden beoordeeld door extractie van de bodem met 0,2 M ammoniumoxalaat en 0,14 M oxaalzuur bij pH 3 (extractieverhouding 1:20) in donkere polyethyleenflessen, geschud gedurende 2 uur en de suspensie werd gefiltreerd in donkere polyethyleenflessen die tot de analyse koel werden bewaard (4 °C). P, Fe en Al werden geanalyseerd met een 5110 VDV Agilent ICP-OES (Agilent, Santa Clara, CA).

Het FVG, uitgedrukt in %, wordt als volgt berekend op basis van het fosfaatbindend vermogen (FBV, fosfaatbindend vermogen) in mmol P.kg⁻¹ luchtdroge grond:

$$FBV = 0.5 * (Fe_{ox} + Al_{ox}) \quad (IX.1)$$

$$FVG = \frac{P_{ox}}{FBV} * 100 \quad (IX.2)$$

2.3.2 Waterstalen

Op 07/05/2022 en 02/12/2022 werden waterstalen uit de afvoerleidingen verzameld in polyethyleenbuizen. Ze werden opgeslagen bij -20 °C totdat ze konden worden geanalyseerd. De totale fosforconcentratie werd gemeten in gefilterde en ongefilterde monsters. De watermonsters werden gefilterd met een papieren filter van 0,45 µm om na te gaan of er wat P aan colloïden vastzat. Beide reeksen monsters (gefilterd en ongefilterd) werden geanalyseerd met een 5110 VDV Agilent ICP-OES (Agilent, Santa Clara, CA).

3 Resultaten: Fosformetingen

Table 19 bevat P-AL, het gemeten fosforgehalte (P) in de bodem dat op lange termijn beschikbaar is voor gewassen (kleiner dan de totale fosforconcentratie in de bodem). De P-AL-gehalten in de bodem waren hoger in de bovenste 30 cm van de bodem. P was bijna 50

Tabel 19: Fosfor (P) gemeten door middel van ammoniumlactaatextractie (AmLact) en fosfaatbindingscapaciteit (FVG) op 30 cm, 60 cm en 90 cm, in de CD- en RD-velden.

| Veld ID -> | CD | | RD | |
|----------------------|-------------------|---------|-----------|----|
| Diepte (cm) | P-AL (mg/100g DS) | FVG (%) | P-AL | |
| (mg/100g DS) (%) | FVG | | | |
| 0-30 | 48 | 91 | 49 | 76 |
| 30-60 | 25.4 | 62 | 11.2 | 50 |
| 60-90 | 19.6 | 59 | 10.8 | 46 |

mg/100g DS op 0-30 cm diepte in beide velden, en het daalde tot 25 mg/100g DS en 11 mg/100g DS in de CD- en RD-velden, respectievelijk op 30-60 cm diepte. De waarden in de bovenste 30 cm worden als "hoog" aangemerkt volgens (Tits et al., 2020), waarin wordt gespecificeerd dat het streefcijfer tussen 12 en 18 mg/100 g DS moet liggen.

Zoals uiteengezet in punt 3.1 van het hoofdstuk Effect van grondwaterstand op de mobiliteit van nutriënten, heeft P een hoge affiniteit met kleideeltjes, Fe-, Al- en Ca-oxiden. Onder anaërobe omstandigheden wordt een deel van de Fe-oxiden gereduceerd tot oplosbare vormen, waardoor het geadsorbeerde fosfor vrijkomt in de bodemoplossing. De fosfaatverzadigingsgraad (FVG) in tabel 2 is zeer hoog, vooral in de eerste 30 cm van de bodem. Bodems met waarden boven 35 % worden volgens de Vlaamse Mestbank beschouwd als "fosfaatverzadigde bodems" en hebben een risico op P-uitspoeling. Aangezien het grondwater gedurende een grote periode ondieper blijft dan 100 cm, kunnen in grote delen van het bodemprofiel anaërobe omstandigheden ontstaan en kan de P-mobilisatie toenemen. Gezien de hoge P-concentratie en de hoge FVG is er een groot risico van P-mobilisatie en -transport naar het oppervlaktewater wanneer het grondwaterpeil zich dicht bij het bodemoppervlak bevindt. Dit kan verder worden geanalyseerd wanneer meer gegevens beschikbaar zijn, met name bij actieve wateropslag met gecontroleerde drainage.

Table 20 toont het gemeten totaal P, Fe en Al in mg.l^{-1} in drie watermonsters, genomen uit de drainagebuizen van de CD- en RD-velden. De concentratie van P in gefilterde en ongefïlterde monsters is bijna gelijk, wat aantoont dat P gehecht aan grotere colloïden ($>0,45 \mu\text{m}$, particulate P) zeer laag is en het meeste P in oplossing (oplosbaar P) en kleinere nanodeeltjes zit. De concentratie van P in het drainagewater is lager in december 2022 dan in mei 2022, mogelijk door een hogere disolutie in aanwezigheid van meer grondwater. Volgens de Vlaamse wetgeving (Vlarem II, bijlage 2.3.1) moet de P-concentratie in het oppervlaktewater lager zijn dan $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$ (algemene waarde afhankelijk van de fosformeting en het type waterlichaam). In dit geval ligt de P-concentratie soms ver boven de limiet en kan een probleem vormen voor nabijgelegen waterbronnen.

Tabel 20: Fosforconcentratie in het drainagewater van de CD- en RD-velden.

| textbfDatum | Locatie | Oplosbaar P (gefilterd monster) [mg.l ⁻¹] | Totaal P (ongefilterd monster) [mg.l ⁻¹] | mon- |
|-------------|-----------|---|---|------|
| 07/05/2022 | afvoer CD | 1.83 | 1.85 | |
| 02/12/2022 | afvoer CD | 0.64 | 0.63 | |
| 02/12/2022 | afvoer RD | 0.14 | 0.15 | |

3.1 Referenties

Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Bries, J., & Vandendriessche, H. (2020). Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2016-2019) (p. 235) [Techreport]. Publicatie van de Bodemkundige Dienst van België.

Contact

Sarah Garré
sarah.garre@ilvo.vlaanderen.be

Deze publicatie kan ook geraadpleegd worden op:
[www.ilvo.vlaanderen.be/pers en media/publicaties](http://www.ilvo.vlaanderen.be/pers-en-media/publicaties)

Vermenigvuldiging of overname van gegevens toegestaan mits duidelijke bronvermelding.

ILVO

Aansprakelijkheidsbeperking

Deze publicatie werd door ILVO met de meeste zorg en nauwkeurigheid opgesteld. Er wordt evenwel geen enkele garantie gegeven omtrent de juistheid of de volledigheid van de informatie in deze publicatie. De gebruiker van deze publicatie ziet af van elke klacht tegen ILVO of zijn ambtenaren, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie. In geen geval zal ILVO of zijn ambtenaren aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

The logo for ILVO, consisting of the letters 'ILVO' in a bold, green, sans-serif font. A vertical green bar is located on the right side of the page.

ILVO

Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek
Burg. Van Gansberghelaan 92
9820 Merelbeke - België

T +32 9 272 25 00

ilvo@ilvo.vlaanderen.be

www.ilvo.vlaanderen.be