Inleiding

Stikstof (N) is een essentieel element voor de groei en ontwikkeling van planten en heeft een directe invloed op de opbrengst en kwaliteit van gewassen zoals aardappelen. Deze teelt heeft echter een relatief lage stikstofbenuttingsgraad (*Nitrogen Use Efficiency, NUE*) in vergelijking met andere gewassen, vanwege een ondiep wortelstelsel, een lage worteldichtheid en een beperkte periode waarin stikstof wordt opgenomen.

In het kader van duurzame landbouw is het verbeteren van de stikstofbenuttingsgraad een belangrijke uitdaging om agronomische performantie te verzoenen met het terugdringen van de milieu-impact (nitraatuitspoeling, N_2O-emissies). Deze uitdaging is bijzonder cruciaal in de biologische landbouw, waar de stikstoftoevoer beperkt is en voornamelijk afhankelijk is van de mineralisatie van organisch materiaal, vruchtwisseling en organische bodemverbeteraars (Möller et al., 2007).

De stikstofbenuttingsgraad (NUE) is een geïntegreerde indicator die het resultaat is van complexe fysiologische en milieuprocessen (Ravi et al., 2008). Deze wordt doorgaans onderverdeeld in twee hoofdcomponenten (Moll et al., 1982): de NUpE (*Nitrogen Uptake Efficiency*) en de NUtE (*Nitrogen Utilization Efficiency*). Dus:

$$NUE = NUpE \times NUtE$$

Er bestaan echter verschillende benaderingen, afhankelijk van de manier waarop stikstofbronnen (enkel bemesting of bodem + mineralisatie) en productie-indicatoren (totale biomassa of knolopbrengst) in rekening worden gebracht (Errebhi et al., 1998; Zebarth et al., 2004).

Bovendien vormt de stikstofvoedingsindex (*Nitrogen Nutrition Index*, NNI) een belangrijke indicator voor de stikstofstatus van het gewas, gebaseerd op de relatie tussen biomassa en kritische stikstofconcentratie (Lemaire en Gastal, 1997). De NNI maakt het mogelijk de prestaties van de plant te interpreteren in relatie tot de beschikbaarheid van stikstof en vormt een centraal instrument om stikstofbeheer, groei en omgevingsverliezen met elkaar te verbinden (Sadras en Lemaire, 2014).

Er worden ook aanvullende indicatoren gebruikt om de verliezen en de agronomische respons beter te karakteriseren, met name de stikstofterugwinningsefficiëntie (NRE) en de agronomische efficiëntie (AE).

Het doel van dit document is een protocol voor te stellen waarmee de stikstofbenuttingsgraad (NUE) bij verschillende aardappelgenotypes kan worden gekwantificeerd, om zo de rassen te identificeren en te selecteren die de beste prestaties vertonen op het vlak van stikstofopname en -benutting.

1. Proefuitvoering

1.1 Proefpercelen en opzet

De analyse van de stikstofefficiëntie wordt uitgevoerd met een veldproef met herhalingen (drie tot vier). In overeenstemming met de aanbevelingen van De Haan et al. (2014) wordt voor proeven waarbij de opbrengst wordt geëvalueerd de voorkeur gegeven aan een volledig gerandomiseerd blokontwerp met vier herhalingen. Deze opzet maakt het mogelijk de proeffout te verkleinen door de belangrijkste bronnen van heterogeniteit in het veld, zoals de bodemvruchtbaarheid of de hellingsgraad, te neutraliseren.

In dit type opzet worden alle behandelingen (basisklonen en/of geavanceerde aardappelrassen) verdeeld over blokken van gelijke grootte, waarbij elk blok een volledige herhaling van alle genotypen bevat. Wanneer de variabiliteit van het veld voorspelbaar is (helling, textuur- of vruchtbaarheidsgradiënt), worden de blokken gerangschikt in lange, smalle stroken die in de richting van deze gradiënt lopen. Bij gebrek aan identificeerbare variabiliteit worden de blokken zo vierkant mogelijk ontworpen om vertekeningen tot een minimum te beperken.

Elke experimentele eenheid wordt afgebakend door visuele markeringen (rode of witte planten; tegengestelde kleur van de aardappelplanten in de plot zelf), wat de identificatie van de knollen tijdens de oogst vergemakkelijkt. Indien deze methode niet toepasbaar is, kunnen extra tussenruimtes tussen de proefplots worden aangebracht om een duidelijke scheiding te garanderen en de doorgang voor waarnemingen te vergemakkelijken.

Elk experimentele eenheid is verdeeld in twee zones op basis van functie:

- een zone voor visuele waarnemingen en destructieve bemonstering tijdens het seizoen;
- een zone die is gereserveerd voor de de uiteindelijke opbrengstmeting.

De indeling kan volgens de lengte of de breedte worden gemaakt, afhankelijk van vorm van het veld en het aantal beschikbare aardappelruggen.

1.2 Stikstofbemesting in de biologische landbouw

In het kader van deze proef in de biologische landbouw wordt op alle proefveldjes één enkel niveau van stikstofbemesting gehanteerd. Het doel van deze opzet is niet om de reactie van het gewas op stijgende stikstoftrappen te bestuderen, maar om de genotypen te vergelijken onder identieke stikstofomstandigheden die representatief zijn voor de regionale biologische praktijk.

In vergelijkende rassenproeven die gericht zijn op het beoordelen van de stikstofbenuttingsgraad (NUE), wordt vaak een identiek bemestingsniveau tussen genotypen gebruikt om de interacties tussen het dosiseffect en het raseffect te beperken. Deze aanpak maakt het mogelijk om de intrinsieke verschillen tussen rassen beter te karakteriseren met betrekking tot:

- het vermogen om beschikbare stikstof op te nemen (NUpE),
- de efficiëntie van de omzetting van opgenomen stikstof in biomassa en opbrengst (NUtE),
- en de totale stikstofbenuttingsgraad (NUE).

Deze aanpak sluit aan bij het onderzoek dat reeds in de biologische landbouw is verricht naar rassenkeuze en stikstofefficiëntie bij aardappelen (Lammerts van Bueren et al., 2011; Tiemens-Hulscher et al., 2014; Zebarth et al., 2004; Bohman et al., 2023).

Stikstof moet worden toegediend in de vorm van in de biologische landbouw toegestane en in de handel verkrijgbare organische meststoffen. Er moet worden geselecteerd op de homogeniteit en de relatief voorspelbare mineralisatiedynamiek bij de keuze. Deze meststoffen geven over het algemeen een homogenere en beter reproduceerbare stikstofafgifte dan stalmest, drijfmest of compost (die laatste kan erg variabel kan zijn qua samenstelling). Handelsmeststoffen maken het mogelijk om een meer gelijke stikstofbeschikbaarheid tussen proefveldjes te verzekeren en de robuustheid van de evaluatie van de stikstofefficiëntieparameters bij de onderzochte genotypen te versterken.

2. Karakterisering van de omgevingsomstandigheden

De karakterisering van de omgeving is een essentiële stap om de stikstofefficiëntie correct te kunnen interpreteren. De bodem, de waterbeschikbaarheid en de weersomstandigheden hebben een directe invloed op de stikstofopname, de plantengroei en de mineralisatiedynamiek. De volgende parameters worden daarom gedurende de gehele teeltcyclus gemeten.

2.1 Minerale stikstof in de bodem

De voorraad minerale stikstof in de bodem wordt vóór het planten bepaald en in verschillende belangrijke stadia van de teeltcyclus opnieuw gemeten (opkomst, knolvorming, sluiting van de rij, net voor de loofdoding). De monsters worden per bodemlaag genomen (0–30 cm, 30–60 cm en 60–90 cm), waardoor de verticale verdeling van de beschikbare stikstof in kaart kan worden gebracht. De bemonsteringsdiepte kan worden aangepast aan het fenologisch stadium van de plant en het doel van de meting. Een bemonsteringsdiepte van 0 tot 90 cm is doorgaans voldoende om de voorraad minerale stikstof in te schatten en de aanbevolen stikstofdosering door bemesting aan het begin van het seizoen te bepalen. Voor de evaluatie van de reststoffen na de oogst wordt aanbevolen te bemonsteren, tot 90 cm, om de potentieel uitloogbare stikstof onder de belangrijkste wortelzone te kwantificeren.

De analyses worden uitgevoerd volgens gestandaardiseerde methoden, zoals KCl-extractie, afhankelijk van het laboratorium.

2.2 Tijdstip van de analyses

De bodemanalyses worden op drie complementaire tijdstippen uitgevoerd:

- Vóór de aanplant: schatting van de initiële voorraad stikstof die beschikbaar is voor het gewas.
- Tijdens de vegetatieperiode (belangrijke stadia: opkomst, gesloten gewas, knolvorming, net voor de loofdoding): monitoring van de dynamiek van de beschikbare stikstof.
- Na de oogst: evaluatie van de resterende minerale stikstof en de potentiële verliezen.

Deze aanpak maakt het mogelijk om de inschatting van de werkelijk voor de plant beschikbare stikstof te verbeteren en de efficiëntie-indicatoren, met name NUpE en NUE, te verfijnen.

2.3 Bodemvochtigheid

De bodemvochtigheid wordt gedurende het seizoen gemeten met behulp van Watermark-tensiometers (Irrometer Company, Californië), die bestaan uit poreuze capsules. De sondes worden op een diepte van 25 cm vanaf de top van de rug geplaatst en gelijkmatig over de proefplotjes verdeeld. De sondes maken het mogelijk om de waterspanningswaarden van de bodem, uitgedrukt in kPa, te meten en te vergelijken met drempelwaarden voor voldoende waterbeschikbaarheid of watertekort. Bij waarden tussen 10 en 30 kPa spreekt men van veldcapaciteit. Tot 100 kPa wordt het water beschouwd als gemakkelijk beschikbaar voor de planten.

2.4 Weersomstandigheden

De lokale weersomstandigheden worden geregistreerd met behulp van een weerstation dat direct op het proefterrein is geïnstalleerd of, bij gebrek daaraan, op basis van het dichtstbijzijnde referentiestation. De gemeten variabelen omvatten onder meer de luchttemperatuur, neerslag, straling, ...

Deze gegevens maken het mogelijk om de agronomische waarnemingen in hun ecologische context te plaatsen en de variaties in groei, mineralisatie en stikstofopname te interpreteren.

3. Beoordeling van de stikstofefficiëntie

De beoordeling van de stikstofefficiëntie heeft tot doel het vermogen van genotypen te kwantificeren om beschikbare stikstof op te nemen en om te zetten in opbrengst, in een context waarin stikstof in organische vorm wordt toegediend en geleidelijk vrijkomt. Het gekozen conceptuele kader definieert de stikstofbenuttingsgraad (NUE) als het product van de stikstofopname-efficiëntie (NUpE) en de efficiëntie van het gebruik van de opgenomen stikstof (NUtE), volgens het model voorgesteld door Bock (1984) en op grote schaal gebruikt in onderzoek naar de aardappel (Fageria et al., 2008; Tiwari et al., 2018). Studies van Zebarth et al. (2004) hebben aangetoond dat commerciële cultivars sterk verschillen in deze twee componenten, ongeacht de stikstofhoeveelheid toegediend. Evenzo heeft een Frans onderzoek, uitgevoerd over een periode van vijf jaar in de regio's Beauce, Picardië en Nord-Pas-de-Calais, aangetoond dat de rassen ‘Agata’, ‘Bintje’, ‘Innovator’, ‘Lady Claire’ en ‘Spirit’ verschillende stikstofbehoeften hebben om hun optimale opbrengst te bereiken, wat het belang bevestigt van een grondige rassenbeoordeling, zelfs in de biologische landbouw.

3.1 Monitoring van de bodembedekking

De bodembedekking wordt (bijvoorbeeld tweemaal per week) beoordeeld vanaf het opkomen van de planten totdat het bladerdak gesloten is. De monitoring vindt plaats op een strook van 75 cm breed en ongeveer 90 cm lang. Afhankelijk van de omstandigheden ter plaatse kunnen twee complementaire methoden worden gebruikt: beeldanalyse via een mobiele app of het gebruik van een observatierooster.

Bij de eerste methode worden twee verticale foto's (“downward facing”) boven de voren genomen, in donkere modus, op gestandaardiseerde hoogte, waarbij het beeld tussen de twee ruggen wordt gecentreerd. Deze beelden worden geanalyseerd met de Canopeo-app, die de groene pixels identificeert en het aandeel levende vegetatie op de bodem berekent. Deze aanpak maakt een snelle, reproduceerbare en objectieve kwantificering van de bladbedekking mogelijk en blijkt bijzonder geschikt te zijn voor frequente monitoring in open veldomstandigheden.

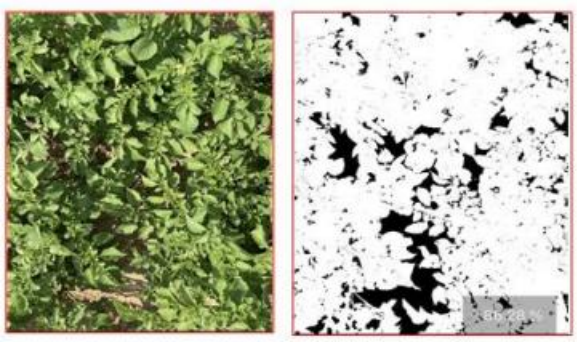


Figure 1: Beeld van Canopéo

Wanneer het gebruik van Canopeo niet lukt, wordt een analysekader van 75 × 90 cm gebruikt, onderverdeeld in 100 rechthoekige vakken. Elk vakje waarin meer dan 20% van het oppervlak bedekt is met bladmassa, wordt geteld als 1% bodembedekking. Hoewel deze methode arbeidsintensiever is, maakt ze een robuuste schatting van de bodembedekking mogelijk en vormt ze een betrouwbaar alternatief voor digitale metingen.

Het opvolgen van de bodembedekking maakt het mogelijk om de snelheid van de gewasontwikkeling te karakteriseren, een bepalende factor voor zowel de vroege stikstofvraag als het vermogen tot lichtinterceptie. Tiemens-Hulscher et al. (2014) toonden aan dat, in de biologische landbouw, de meest efficiënte genotypen deze zijn die snel een dicht gewas ontwikkelen, vroeg in het groeiseizoen een hoge bladindex bereiken en deze bedekking langer behouden.

Deze dynamiek beïnvloedt rechtstreeks de stikstofopname-efficiëntie (NUpE), aangezien een vroege lichtinterceptie de groei en stikstofopname stimuleert. Ze heeft ook een effect op de stikstofbenuttingsefficiëntie (NUtE), omdat een langer functionerend gewas de omzetting van opgenomen stikstof in biomassa en opbrengst bevordert. Het regelmatig opvolgen van de bodembedekking vormt zo een vroege en gevoelige indicator voor rasverschillen in stikstofefficiëntie.

3.2 Optische metingen

Optische metingen vormen een essentieel onderdeel van de beoordeling van de stikstofefficiëntie, omdat ze het mogelijk maken om tegelijkertijd de structuur van het bladerdak, de fotosynthetische werking ervan en de stikstofstatus van de planten te karakteriseren. Deze waarnemingen worden regelmatig uitgevoerd tussen het moment dat het bladerdak gesloten is en het begin van de veroudering (senescentie), om de groeidynamiek en de ontwikkeling van de fysiologische toestand van het gewas tijdens de teeltcyclus te volgen. Voor elke proefplot zijn meerdere metingen nodig om de experimentele fout te beperken en rekening te houden met de heterogeniteit binnen het perceel. De waarden die voor de analyses worden gebruikt, komen overeen met het gemiddelde van de metingen die binnen elke proefplot zijn uitgevoerd, en vervolgens met het gemiddelde van de herhalingen binnen het proefontwerp, bestaande uit drie of vier herhaalde proefplots.

Er worden hemisferische foto's van de vegetatie gemaakt vanaf een gestandaardiseerde hoogte met een camera met een *fisheye*-lens, waarna deze worden geanalyseerd met de CAN-EYE-software om verschillende structurele parameters van de vegetatie te schatten, waaronder de *Leaf Area Index* (LAI), *de Plant Area Index* (PAI) en het percentage vegetatiebedekking. De LAI komt overeen met het bladoppervlak per eenheid bodemoppervlak en is een belangrijke indicator voor

het lichtinterceptievermogen en het fotosynthesevermogen van de vegetatie. Zoals Sharma en Bali (2020) aangeven, is de LAI sterk gecorreleerd met de plantproductiviteit, hoewel deze relatie ook afhangt van factoren zoals de hoeveelheid geïntercepteerd licht, de architectuur van de begroeiing, de lichtdempingscoëfficiënt en de efficiëntie van het stikstofgebruik. Bij aardappelen gaat een snelle ontwikkeling van een bodembedekking met een hoge LAI in het begin van de cyclus doorgaans gepaard met een efficiëntere interceptie van straling en een betere opname van beschikbare stikstof.

Daarnaast worden bladindicatoren gemeten met behulp van een draagbare SPAD-chlorofylmeter, zoals de Minolta SPAD-502 of een vergelijkbaar apparaat. De metingen worden uitgevoerd op volledig ontwikkelde blaadjes die representatief zijn voor het middelste deel van het bladerdak. Chlorofylmeters geven een indirecte schatting van het chlorofylgehalte in de bladeren, dat nauw verband houdt met de stikstofconcentratie. Talrijke studies hebben de relevantie ervan voor stikstofdiagnostiek aangetoond, met name die van Markwell et al. (1995), Uddling et al. (2007) en Richardson et al. (2002), die aantonen dat draagbare chlorofylmeters een snelle, niet-destructieve en betrouwbare methode vormen om het stikstofgehalte in bladeren te schatten. Deze metingen maken het mogelijk om eventuele stikstoftekorten in een vroeg stadium te identificeren en te gebruiken voor de berekening van integrerende indicatoren zoals de *Nitrogen Nutrition Index* (NNI).

Aanvullende spectrale metingen kunnen ook worden uitgevoerd met behulp van sensoren zoals GreenSeeker, N-Sensor of vergelijkbare apparaten, waarmee verschillende vegetatie-indexen kunnen worden berekend, zoals de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). De NDVI is een veelgebruikte spectrale index voor het schatten van de groene biomassa, de groeikracht en de fysiologische toestand van de vegetatie. Het werk van Tucker (1979), Gitelson (2004) en Haboudane et al. (2004) hebben de sterke correlatie aangetoond met de bovengrondse biomassa en de bladontwikkeling, hoewel er een verzadigingsverschijnsel kan optreden bij zeer dichte gewassen met hoge LAI-waarden. In het geval van de aardappel maakt deze index het mogelijk om de groeidynamiek van het gewas effectief te volgen en verbanden te leggen tussen vegetatieve ontwikkeling, stikstofopname en biomassaproductie.

De hierboven beschreven instrumenten vormen echter geen uitputtende lijst van methoden die kunnen worden ingezet voor het monitoren van de fysiologische en stikstofstatus van gewassen. Afhankelijk van de experimentele omstandigheden en het beschikbare materiaal kunnen ook andere benaderingen voor fenotypering en teledetectie worden geïntegreerd. Hiertoe behoren met name chlorofylfluorescentie (Maxwell & Johnson, 2000, Ben Abadllah et al., 2020), multispectrale of hyperspectrale beeldvorming (Thenkabail et al., 2012), sensoren aan boord van drones (Hunt et al., 2010) en proximale teledetectiesystemen aan boord van tractoren (Mulla, 2013). Deze technologieën bieden toegang tot aanvullende informatie over de fotosynthetische activiteit, de bladtemperatuur, waterstress of de ruimtelijke heterogeniteit van de vegetatiebedekking. De combinatie ervan kan de nauwkeurigheid van de schatting van structurele en fysiologische parameters verbeteren en bijdragen aan een fijnere karakterisering van de efficiëntie van het stikstofgebruik.

Door structurele en fysiologische indicatoren zoals LAI, PAI, SPAD, NDVI en NNI gezamenlijk te integreren, kan de dynamiek van de vegetatiebedekking, de fotosynthetische werking ervan en de stikstofstatus op een geïntegreerde manier worden beschreven. Deze aanpak vormt een belangrijk hulpmiddel om rasverschillen in stikstofefficiëntie in de biologische landbouw te analyseren en om de kenmerken van de bodembedekking te koppelen aan de waargenomen agronomische prestaties.

3.3 Bemonstering van volledige planten en analyses

De destructieve bemonsteringen worden uitgevoerd in vier belangrijke stadia van de cyclus: vegetatieve groei, knolvorming, net voor verouderen (pre-senescentie) en oogst. Op elke datum worden zes planten per proefplot bemonsterd om een representatief monster te verkrijgen en tegelijkertijd de impact op het plot te beperken. Wanneer de proefopstelling dit toelaat, kunnen extra bemonsteringen worden uitgevoerd, met name tussen 25 en 50 dagen na het zaaien (DAZ). Deze periode komt overeen met een kritieke fase van de vegetatieve groei, waarin de stikstofbehoefte snel toeneemt; deze tussentijdse bemonsteringen maken het dus mogelijk om de ontwikkeling van de stikstofstatus van de gewassen nauwkeuriger te volgen en de tussentijdse berekening van de NNI tijdens het seizoen te maken. De planten worden in drie delen gescheiden (bladeren + stengels, wortels, knollen), gewassen en vervolgens het vers gewicht gewogen. Vervolgens worden ze 48 uur bij 80 °C gedroogd om het drogestofgehalte te bepalen. De gedroogde monsters worden vermalen. De bepaling van het totaal stikstofgehalte kan vervolgens worden uitgevoerd volgens verschillende referentiemethoden, waaronder nabij-infraroodspectrometrie (NIRS, FOSS NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, VS), de Dumas-verbranding (LECO, St Joseph, MI, VS) en de Kjeldahl-methode.

Aan de hand van deze plantmonsters kunnen de bovengrondse en ondergrondse biomassa, het stikstofgehalte van de verschillende organen en de totale hoeveelheid door de plant opgenomen stikstof worden geschat.

3.3.1 Stikstofgehalte (%N)

Het stikstofgehalte komt overeen met de stikstofconcentratie in de droge stof van het geanalyseerde orgaan. Het wordt uitgedrukt in procenten van de droge stof (% DS):

$$\%N = \frac{\text{Hoeveelheid stikstof (DS)}}{\text{Hoeveelheid droog materiaal (DS)}} \times 100$$

Deze variabele wordt gebruikt om de stikstofstatus van het gewas te beoordelen en vormt de basis voor de berekening van de *stikstofvoedingsindex* (NNI). Het stikstofgehalte alleen volstaat echter niet om de totale hoeveelheid geabsorbeerde stikstof per hectare direct te schatten.

3.3.2 Hoeveelheid geabsorbeerde stikstof per orgaan (kg N ha^{-1})

De hoeveelheid stikstof die door elk orgaan wordt opgenomen, wordt verkregen door het stikstofgehalte te combineren met de geproduceerde droge biomassa:

$$N_i\ (kg\ N\ ha^{-1}) = \left(\frac{\%N_i}{100}\right) \times DM_i$$

waarbij: %N_i = stikstofgehalte van orgaan i,

DM_i = droge stof van orgaan i, uitgedrukt in kg DS ha^{-1}.

Met deze benadering kan de werkelijk geaccumuleerde stikstof in elk compartiment van de plant worden geschat.

3.3.3 Berekening van de gewogen gemiddelde stikstofconcentratie van de plant

Bij de berekening van de gemiddelde stikstofconcentratie van het gewas moet rekening worden gehouden met de relatieve bijdrage van elk orgaan aan de totale biomassa. Deze wordt berekend als een gewogen gemiddelde:

$$\%N_{\text{gem}} = \frac{\sum_i (\%\, N_i \times DM_i)}{\sum_i DM_i}$$

waarbij i de verschillende geanalyseerde organen vertegenwoordigt.

Bij de aardappel worden doorgaans de volgende organen in aanmerking genomen:

- de bladeren en stengels,
- de knollen.

De wortels worden doorgaans buiten beschouwing gelaten bij de berekeningen van de NNI en de kritische stikstofverdelingsscurves, omdat:

- hun bijdrage aan de totale biomassa relatief klein is,
- het bemonsteren ervan moeilijk en weinig reproduceerbaar is,
- de voor de aardappel ontwikkelde kritische verdelingsmodellen voornamelijk gebaseerd zijn op de bovengrondse biomassa en de knollen.

Deze benadering maakt het mogelijk om de werkelijke voedingsstatus van het gewas nauwkeuriger weer te geven.

3.3.4 Berekening van de totale stikstofopname door het gewas

De totale stikstofopname (‘absorbed’) door het gewas (N_abs) wordt verkregen door de stikstof die is opgeslagen in alle betrokken organen bij elkaar op te tellen:

$$N_{\text{abs}} = \sum_i N_i$$

Deze variabele vertegenwoordigt de totale stikstofopname door het gewas en vormt een centrale indicator bij de beoordeling van de efficiëntie van het stikstofgebruik.

3.4 Bepaling van de uiteindelijke opbrengst

Er wordt een agronomische opbrengstbeoordeling uitgevoerd (zie protocol nr. 3).

3.5 Bepaling van de stikstofefficiëntieparameters op basis van plantmonsters

3.5.1 Stikstofopname-efficiëntie

De stikstofopname-efficiëntie (Nitrogen Uptake Efficiency, NUpE) beschrijft het vermogen van het gewas om de beschikbare stikstof uit het bodem-plant-systeem op te nemen. Dit is de eerste component van de NUE en weerspiegelt voornamelijk:

- de efficiëntie van het wortelstelsel,
- de snelheid waarmee de bodem bedekt wordt,
- de synchronisatie tussen de beschikbaarheid van stikstof en de behoefte van de plant,
- evenals het vermogen van het genotype om gemineraliseerde stikstof te benutten.

De NUpE wordt berekend volgens:

$$\mathrm{NUpE} = \frac{N_{\mathrm{abs}}}{N_{\mathrm{av}}}$$

waarbij:

- N_abs = totale door het gewas opgenomen stikstof (kg N ha^{-1}),
- N_av = beschikbare stikstof ('available') in het systeem (kg N ha^{-1}).

De beschikbare stikstof omvat:

- de oorspronkelijke minerale stikstof in de bodem,
- de tijdens het teeltseizoen gemineraliseerde stikstof,
- en de stikstof die wordt toegevoerd door organische of minerale meststoffen.

De NUpE wordt uitgedrukt:

- hetzij als een verhouding zonder eenheid,
- hetzij in kg N opgenomen per kg beschikbare N.

Deze definitie is bijzonder geschikt voor biologische of low-input-systemen, waar de mineralisatie van de bodem een belangrijke stikstofbron vormt. Ze sluit aan bij de aanbevelingen van Zebarth et al. (2004), Gastal et al. (2015) en Bohman et al. (2023).

Een hoge NUpE duidt doorgaans op een goed stikstofopnamvermogen. In bepaalde situaties kan ze echter ook wijzen op sterke concurrentie om beperkende stikstof. De interpretatie ervan moet daarom in combinatie met de NNI en de opbrengst plaatsvinden.

Sommige studies maken gebruik van vereenvoudigde definities die uitsluitend gebaseerd zijn op de toegepaste stikstofbemesting (Errebhi et al., 1999), of schatten de mineralisatie door het verschil te berekenen tussen een onbemeste controlegroep en een bemeste behandelingsgroep (Errebhi et al., 1998; Zvomuya et al., 2002). Deze benaderingen zijn echter minder geschikt voor biologische systemen.

3.5.2 Efficiëntie van het gebruik van opgenomen stikstof

De efficiëntie van het stikstofgebruik (NUtE) beschrijft het vermogen van de plant om opgenomen stikstof om te zetten in biomassa of opbrengst. Deze weerspiegelt de fysiologische efficiëntie van het genotype, met inbegrip van fotosynthese, de translocatie van assimilaten, de verdeling naar de knollen en de duur van het functioneren van het bladerdak. De NUtE wordt uitgedrukt in kg opbrengst per kg opgenomen stikstof, of in t ha^{-1} kg^{-1} N ha^{-1}. Ze wordt berekend volgens:

$$\mathrm{NUtE} = \frac{Y}{N_{\mathrm{abs}}}$$

waarbij Y staat voor de knolopbrengst (t ha^{-1} in versgewicht of drooggewicht). In de literatuur bestaan twee benaderingen: een NUtE op basis van de totale biomassa (Swain et al., 2014; Zebarth et al., 2004) en een NUtE op basis van de verkoopbare opbrengst. In dit protocol wordt de voorkeur gegeven aan de op de opbrengst gebaseerde NUtE, omdat deze overeenkomt met de belangrijkste agronomische doelstelling.

3.5.3 Oogstindex

Bij de interpretatie van de NUtE moet rekening worden gehouden met de oogstindex (*Harvest Index*, HI), die het vermogen van de plant beschrijft om de geproduceerde biomassa toe te wijzen aan de geoogste delen, met name de knollen bij de aardappel. Deze wordt gedefinieerd als:

$$HI = \frac{DM_{\text{knollen}}}{DM_{\text{totaal}}}$$

Zoals Gastal et al. (2015) en Hawkesford (2012) hebben aangetoond, kunnen twee genotypen een vergelijkbare NUtE voor de totale biomassa hebben, maar verschillende oogstindexen, wat leidt tot sterk uiteenlopende opbrengsten. Een hoge NUtE duidt op een goede omzetting van stikstof in opbrengst, maar kan ook wijzen op een situatie van stikstofstress waarin de plant de voorkeur geeft aan de vorming van knollen ten koste van de bovengrondse biomassa. Een gezamenlijke analyse van de NNI is daarom onontbeerlijk om verkeerde interpretaties te voorkomen.

3.5.4 Stikstofvoedingsindex

De NNI maakt het mogelijk om de afstemming te beoordelen tussen de daadwerkelijk door het gewas opgenomen stikstof en de behoeften die nodig zijn voor een optimale groei. Deze wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de gemiddelde stikstofconcentratie van de plant en de kritische concentratie die overeenkomt met een bepaalde biomassa.

De gemiddelde stikstofconcentratie wordt berekend als een gewogen gemiddelde van de stikstofgehalten van de verschillende organen, doorgaans de bovengrondse biomassa en de knollen, afhankelijk van het ontwikkelingsstadium. De wortels worden niet meegenomen in de berekening vanwege hun relatief geringe bijdrage en de moeilijkheden bij het nemen van monsters.

De kritische stikstofconcentratie volgt een verdunningsrelatie in functie van de biomassa volgens de algemene vorm:

$$N_c = a \cdot DM^{-b}$$

Onder Belgische omstandigheden wordt de referentiecurve voor het ras Bintje (Ben Abdallah et al., 2016) weergegeven door:

$$N_c = 5.37 \cdot DM^{-0.45}$$

Waarbij DM staat voor de droge biomassa (bovengrondse delen en knollen) van het gewas. Deze verhouding weerspiegelt de geleidelijke afname van de stikstofconcentratie naarmate de biomassa toeneemt, een klassiek verdunningsverschijnsel.

Met de NNI kan de voedingsstatus van het gewas worden vastgesteld: een NNI dicht bij 1 duidt op een optimale toestand, een NNI lager dan 1 duidt op een stikstoftekort dat de groei en de opbrengst kan verminderen, terwijl een NNI hoger dan 1 wijst op een stikstofoverschot met een verhoogd risico op verliezen in het milieu.

3.5.5 Totale stikstofbenuttingsgraad (NUE)

De totale stikstofbenuttingsgraad (*Nitrogen Use Efficiency*, NUE) combineert de twee belangrijkste componenten van de stikstofefficiëntie, namelijk de stikstofopname-efficiëntie (NUpE) en de benuttingsgraad van de opgenomen stikstof (NUtE) (Moll et al., 1982; Bock, 1984). Deze wordt uitgedrukt als het product van deze twee termen en vertegenwoordigt de hoeveelheid opbrengst die wordt geproduceerd per eenheid beschikbare stikstof in het bodem-plant-systeem.

De NUE maakt het mogelijk om tegelijkertijd het vermogen van het gewas om de beschikbare stikstof in het bodem-plant-systeem op te nemen en om te zetten in economische productie te integreren (Moll et al., 1982; Bock, 1984). Een hoge NUE duidt over het algemeen op een goede algemene prestatie van het systeem, maar kan ook worden waargenomen in situaties met stikstofbeperking, met name wanneer de voedingsstatus van de plant (NNI) lager is dan het optimum, wat wijst op een schijnbare efficiëntie die verband houdt met een sterke beperking van de stikstofbeschikbaarheid (Lemaire & Gastal, 2019; Sadras & Lemaire, 2014).

Omgekeerd komt een gematigde NUE in combinatie met een NNI dicht bij 1 meestal overeen met een agronomisch optimale situatie, die wordt gekenmerkt door een evenwicht tussen stikstofbeschikbaarheid, opname en gebruik door het gewas (Lemaire et al., 2008; Gastal et al., 2015; Bohman et al., 2023). Deze geïntegreerde NNI–NUE-benadering wordt algemeen aanbevolen voor de interpretatie van stikstofprestaties, om vertekende conclusies op basis van één enkele indicator te vermijden.

Een lage NUE kan het gevolg zijn van een beperkte stikstofopname (NUpE), een inefficiënte omzetting in biomassa of opbrengst (NUtE), of van milieubeperkingen zoals water- of biotische stress die de groei en de opnamedynamiek beïnvloeden (Fageria et al., 2008; Zebarth et al., 2004; Gastal et al., 2015).

3.5.6 Aanvullende indicatoren en toepassingsvoorwaarden

In het kader van dit experimentele programma kunnen bepaalde indicatoren die doorgaans in stikstofefficiëntiestudies worden gebruikt, niet worden berekend. Met name de stikstofopname-efficiëntie (NRE) en de agronomische efficiëntie (AE) vereisen de aanwezigheid van ten minste twee bemestingsniveaus of een controlegroep zonder stikstoftoevoer om de reacties van het gewas te kunnen vergelijken.

In dit protocol wordt echter slechts één stikstofniveau toegepast op alle rassen met het oog op een genotypische vergelijking onder identieke omstandigheden. Bijgevolg worden deze indicatoren niet gebruikt in de hoofdanalyse.

In een opzet met een onbemeste controlegroep kunnen de volgende indicatoren echter worden berekend:

Grootheid	Formule	Eenheid	
NRE	(Nabs bemest − Nabs referentie) / Ntoegediend	kg N kg^{-1}	referentie + bemest

Grootheid	Formule	Eenheid	
AE	(Opbrengst bemest – opbrengst referentie) / Ntoegediend	t kg^{-1} N	referentie + bemest

Aan de hand van deze indicatoren kunnen respectievelijk de opname van de door het gewas toegevoerde stikstof en de agronomische respons in termen van opbrengst worden beoordeeld. Ze vormen een nuttige aanvulling op de NUpE-, NUtE-, NUE- en NNI-analyses wanneer de proefopzet dit toelaat.

4. Statistische analyse

Voor het analyseren van de opbrengstgegevens zal een lineair gemengd model worden gebruikt om zowel de vaste effecten (met name het raseffect) als de willekeurige effecten (blok, herhaling, eventueel perceel) in rekening te brengen. Dit type model maakt het mogelijk om de experimentele structuur te beheren en de robuustheid van de vergelijkingen te vergroten. Wanneer de datastructuur het toelaat, kan ook een eenvoudige of twee-factoriële variantieanalyse (ANOVA) worden uitgevoerd. Meervoudige vergelijkingen tussen rassen zullen worden uitgevoerd met behulp van geschikte post-hoc tests (bv. Tukey-test) om groepen te onderscheiden die significant van elkaar verschillen.

De statistische analyses zullen voornamelijk worden uitgevoerd in het softwarepakket R, met behulp van de packages lme4 (gemengde modellen), emmeans (vergelijking van gemiddelden) en ggplot2 (visualisatie). In eenvoudigere gevallen, of voor een snelle gegevensverwerking, kan Excel aanvullend worden gebruikt. Het gebruikte significantieniveau voor de statistische toetsen is $\alpha = 0,05$. De resultaten zullen worden geïnterpreteerd met inachtneming van deze grens, waarbij bijzondere aandacht wordt besteed aan de consistentie van de resultaten tussen herhalingen en sites.

5. Bibliografie

- Möller, K., J. Habermeyer, V. Zinkernagel & H. Reents, 2007. Impact and interaction of nitrogen and Phytophthora infestans as yield-limiting and yield reducing factors in organic potato (Solanum tuberosum L.) crops. Potato Research 49: 281-301.
- Finckh, M.R., E. Schulte-Gelderman & C. Bruns, 2006. Challenges to organic potato farming: disease and nutrient management. Potato Research 49: 27-42.
- Van Delden, A., 2001. Yield and growth of potato and wheat under organic N-management. Agronomy Journal 93: 1370-1385.