



Variabiliteit mineraal stikstofresidu en relatie met nitraatuitspoeling

Pim M. Post, Koos Verloop, Wim van Dijk, Sander Gerritsen, Rikje van de Weerd, René Rietra



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Variabiliteit mineraal stikstofresidu en relatie met nitraatuitspoeling

Pim M. Post¹, Koos Verloop¹, Wim van Dijk¹, Sander Gerritsen¹, Rikje van de Weerd², René Rietra³

¹ Wageningen Plant Research

² Rechobot

³ Wageningen Environmental Research

Dit onderzoek is in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) uitgevoerd door de Stichting Wageningen Research (WR), business unit WPR, Agrosysteemkunde, in het kader van beleidsondersteunend onderzoeksthema land- en tuinbouw binnen de grenzen van de natuurlijke leefomgeving (projectnummer BO-43-206-01).

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, oktober 2025

Rapport WPR-1504

Post, P.M., Verloop, J., van Dijk, W., Gerritsen, S., van de Weerd, R., Rietra, R., 2025. *Variabiliteit mineraal stikstofresidu en relatie met nitraatuitspoeling*. Wageningen Research, Rapport WPR-1504. 47 blz.; 30 fig.; 7 tab.; 41 ref.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/pm> nog in te vullen

Het mineraal stikstofresidu (NR) is in beeld als indicator in een systeem voor doelsturing voor nitraat in uitspoelend water. Voor het uniform meten van NR is een protocol ontwikkeld. Aanvullend is de WUR gevraagd om inzicht te geven in de relatie is van NR met nitraatuitspoeling, al dan niet in combinatie met het N-bodemoverschot. Voor die opdracht is gebruik gemaakt van bestaande literatuur en van een aantal recente data over NR, N-bodemoverschot en de nitraatconcentratie in uitspoelend water. Daaruit blijkt dat de variatie in gerapporteerde NR metingen aanzienlijk is. Een deel van die variatie kan verklaard worden door de samenhang met gewastype, grondsoort en grondwaterstand. Ook blijkt dat over het algemeen de nitraatconcentratie toeneemt met een toename van NR maar door de ruis rond deze relatie is op perceelsniveau op dit moment niet nauwkeurig te voorspellen wat de nitraatconcentratie in uitspoelend grondwater zal zijn bij een gemeten NR. Het N-bodemoverschot levert alleen in sommige gevallen een iets betere voorspelling op van de nitraatconcentratie.

Trefwoorden: stikstof, nitraatuitspoeling, akkerbouw, melkveehouderij, grondwater

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Agrosysteemkunde, Postbus 16, 6700 AA Wageningen; T 0317 48 07 00; www.wur.nl/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-1504

Foto omslag: Arjan Mager

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
2 Deskstudie	9
2.1 Achtergrond	9
2.2 Variabiliteit in NR en samenhang met weer, bodem, grondwater en gewas	13
2.3 Samenhang met management	13
2.4 Nitraatconcentratie in relatie tot NR	14
2.5 Nitraatconcentratie in relatie tot N-bodemoverschot	15
3 Data analyse	16
3.1 Opzet analyse	16
3.1.1 Gemeten NR waarden en hun spreiding tussen gewas-gt-bodem combinaties	16
3.1.2 Relatie NR en Nitraatconcentratie	16
3.1.3 N-bodemoverschot en de relatie tussen Nitraatconcentratie en NR	19
3.1.4 Gebruikte software	19
3.2 Data	19
3.2.1 Bronnen	19
3.2.2 Meetmethodes	21
3.3 Resultaten	23
3.3.1 Variabiliteit in Nitraatresidu metingen	24
3.3.2 Betrouwbaarheid NR in relatie tot Nitraatconcentratie	24
3.3.3 Effect van N-bodemoverschot op voorspelling van nitraatconcentratie	27
4 Synthese	28
Literatuur	30
Appendix 1 Aanvullende tabellen en figuren	33

Samenvatting

Het mineraal stikstofresidu (NR) wordt voorgesteld als een indicator in een systeem voor doelsturing voor nitraat in uitspoelend water. Voor het uniform meten van NR is een protocol ontwikkeld. Aanvullend is de WUR gevraagd om een analyse uit te voeren van de indicatoren NR en het N-bodemoverschot, hoe deze indicatoren zich onderling verhouden en van hun relatie met nitraatuitspoeling. Deze vraag is uitgewerkt aan de hand van de volgende drie vragen die in dit rapport centraal staan:

1. Hoe verschillen gemeten NR waarden en hun spreiding tussen verschillende gewasgroepen, grondwatertrappen en bodemtypen?
2. Wat is de relatie tussen NR en de nitraatconcentratie in uitspoelend water? Hoe betrouwbaar is deze relatie: met hoeveel zekerheid kan er iets worden gezegd over deze nitraatconcentratie bij een gemeten waarde van NR?
3. Hoe verhoudt N-bodemoverschot zich tot NR en nitraatconcentratie in uitspoelend water?

Om deze vragen te beantwoorden is zowel gebruik gemaakt van bestaande literatuur als van een aantal recentere datasets over NR, N-bodemoverschot en nitraatconcentratie in uitspoelend water. Daaruit blijkt dat de variatie in gerapporteerde NR metingen aanzienlijk is. Een deel van die variatie kan verklaard worden door de samenhang met gewasstype, grondsoort en grondwaterstand. Bij suikerbieten en gras werden in het algemeen lagere NR-waarden gevonden, terwijl de hoogste waarden doorgaans werden waargenomen bij aardappelen en bladgroenten, en de waarden bij maïs, granen en overige groenten lagen er meer tussenin. Uit de onderzochte databronnen blijkt bovendien dat kleigronden gemiddeld genomen de NR-waarden lager waren dan bij de andere grondsoorten. Het effect van de grondwaterstand verschilt in de analyses per grondsoort. Management heeft ook invloed op de gemeten NR waarde en dat lijkt een belangrijk voordeel van deze indicator: het maakt het mogelijk om snel te zien of bepaalde maatregelen effect hebben.

Uit de resultaten blijkt ook dat er bij de meeste databronnen een positieve relatie is tussen NR en nitraatgehalte in uitspoelend water: een hoger NR gaat doorgaans samen met een hogere nitraatconcentratie. Deze relatie is echter met veel onzekerheid omgeven, waardoor op perceelsniveau op dit moment niet goed te voorspellen is wat de nitraatconcentratie in uitspoelend water zal zijn bij een gemeten NR. De sterkte van de relatie tussen NR en nitraatconcentratie die volgt uit analyse van recente datasets was bovendien kleiner dan die afgeleid in de eerdere studie Sturen op Nitraat.

Het opnemen van het N-bodemoverschot in een regressiemodel, in aanvulling op NR, resulteert in een deel van de analyses in een iets betere voorspelling van de nitraatconcentratie. Het model geeft aan dat een hoger overschot samengaat met een hogere nitraatconcentratie; maar niet in alle analyses is een significant effect te zien. Een N mineraal bodemoverschot -gebaseerd op de balans van aanvoer en afvoer van minerale N naar en van de bodem- over twee jaren leverde de beste voorspelling maar dat kon maar bepaald worden voor een beperkt aantal datasets.

Conclusies

- Voor een juiste interpretatie van NR-metingen is het zinvol om onderscheid te maken naar gewas en grondsoort. Gemiddeld ligt de NR lager bij suikerbieten en gras, en hoger bij aardappelen en bladgroenten terwijl de waarden bij maïs, granen en overige groenten er tussenin zullen liggen. Bij kleigronden ligt de NR gemiddeld lager dan op zandgrond.
- De nitraatconcentratie neemt over het algemeen toe met een toename van NR maar door de ruis om deze relatie is de nitraatconcentratie op perceelsniveau op dit moment niet nauwkeurig te voorspellen
- NR verklaart over het algemeen meer variatie in de nitraatconcentratie dan het N-bodemoverschot

Aanbevelingen

- Blijf bij jaarlijkse bepaling van NR op veel bedrijven, de resultaten uitsplitsen naar gewas, grondsoort en grondwatertrap om een scherper beeld te krijgen van de te verwachten NR per situatie.
- Gebruik NR vooralsnog niet als directe voorspeller van de nitraatconcentratie op perceelsniveau, maar eventueel wel als hulpmiddel voor sturing door ondernemers of het signaleren van hoge mestaanwending.
- Om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen nitraatconcentratie in uitspoelend water en NR, zal de bepaling van de nitraatconcentratie ruimtelijk en temporeel beter afgestemd moeten worden op de bepaling van NR.

1 Inleiding

Ter voorbereiding van het 8^e Actieprogramma Nitraatrichtlijn werkt het Ministerie van LNVN samen met sectorpartijen aan een systeem voor doelsturing voor nitraat in uitspoelend water dat naast generieke maatregelen (gebruiksnormen, middelvoorschriften) zal staan. Bedrijfsgerichte doelsturing beoogt agrariërs op hun bedrijf meer vrijheid te geven om zelf te beslissen over het nemen van maatregelen om de grondwaterkwaliteit te verbeteren en sluit daarmee aan bij wensen geuit door sectorpartijen en de Tweede Kamer.

Een onderdeel van dit systeem van doelsturing is het introduceren van indicatoren die de agrariër informeren over de mate waarin op het bedrijfsareaal risico's optreden voor nitraatuitspoeling. Indicatoren die als geschikt worden beschouwd zijn, het mineraal stikstofresidu (NR) en het overschot van stikstof op de bodembalans (N-bodemoverschot). Het NR is de hoeveelheid minerale stikstof die zich in het najaar in de bodem bevindt. Het N-bodemoverschot is het verschil op jaarbasis tussen de aanvoer van stikstof naar de bodem en de afvoer met de oogst van gewassen. Dit verschil tussen aan- en afvoer blijft jaarlijks achter in de bodem en draagt bij aan de bodemvoorraad of gaat verloren naar het milieu via nitraatuitspoeling en gasvormige verliezen als gevolg van denitrificatie. Deze indicatoren worden beschouwd als kansrijk, enerzijds omdat ze een aanwijzing kunnen geven van het risico op nitraatuitspoeling en anderzijds omdat ze aansluiten op het handelen van de ondernemer, met name op het teeltplan, bodembewerking en bemesting. NR is naar voren gekomen als aanvulling op en eventueel ter vervanging van het N-bodemoverschot, omdat NR mogelijk een directer en meer gedetailleerd beeld kan geven van de uitspoelingsrisico's op percelen op de korte termijn, terwijl het N-bodemoverschot de risico's op bedrijfsniveau voor de iets langere termijn reflecteert.

Om te borgen dat de bepaling van het NR op een uniforme manier gebeurt die aansluit op het beleidskader is het 'Protocol bepaling mineraal stikstofresidu' (NR-protocol) ontwikkeld (Gerritsen et al., 2025). Aanvullend is de WUR gevraagd om inzicht te geven in de voorspellende waarde van NR al dan niet in combinatie met het N-bodemoverschot voor nitraatuitspoeling. Onder nitraatuitspoeling verstaan we de concentratie van nitraat in uitspoelend water onder landbouwbedrijven. Dit is het water in de bovenste meter van het grondwater, het water uit drainagebuizen of in het bodemvocht onder de wortelzone. Deze begripsaanduiding sluit aan op die in de Nitraatrapportage 2024 (Claessens et al., 2024).

Deze vraag, de bruikbaarheid van NR als basis voor doelsturing, is geconcretiseerd aan de hand van drie vragen die in dit rapport centraal zullen staan:

1. Hoe verschillen gemeten NR waarden en hun spreiding tussen verschillende gewasgroepen, grondsoort en grondwaterstand? De grondwaterstand wordt daar waar mogelijk meegenomen, omdat deze een belangrijke factor is bij het risico van nitraatuitspoeling.
2. Wat is de relatie tussen NR en de nitraatconcentratie in uitspoelend water?
 - a. Hoe betrouwbaar is deze relatie: met hoeveel zekerheid kan er iets worden gezegd over de nitraatuitspoeling bij een gemeten waarde van NR?
3. Hoe verhoudt N-bodemoverschot zich tot NR en de nitraatconcentratie in uitspoelend water?

Bij de beantwoording van deze vragen zijn alleen minerale gronden in beschouwing genomen: zand, klei en löss. Veengrond is buiten beschouwing gelaten.

Om deze vragen te beantwoorden wordt zowel gebruik gemaakt van bestaande literatuur (hoofdstuk 2) als van (recente) Nederlandse datasets met betrekking tot NR, N-bodemoverschot en nitraatuitspoeling (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 vindt een synthese van de resultaten van beide onderdelen plaats en worden de belangrijkste conclusies gegeven.

2 Deskstudie

De deskstudie heeft zich gericht op wat al bekend en geconstateerd is over de variabiliteit in NR en de relatie tussen NR en N-bodemoverschot enerzijds en de nitraatuitspoeling anderzijds. Hierbij is met name gekeken naar studies die zich richten op gebieden met een vergelijkbare context als Nederland. De belangrijkste studies zijn al eerder samengevat in een rapportage over het project Nitraatwijzer (Noij & ten Berge, 2019). Zij bespreken bijvoorbeeld de resultaten van het project Sturen op Nitraat (Hack-ten Broeke et al., 2004) waarin in de begin jaren 2000 de relatie tussen NR en nitraatuitspoeling uitgebreid is onderzocht, en ook de situatie in Vlaanderen en de Duitse deelstaat Baden-Württemberg, waar NR al langer een rol speelt in het beleid. Hier vatten we de belangrijkste conclusies van het Nitraatwijzer rapport in relatie tot de voorspelkracht van het N-bodemoverschot en NR voor de nitraatuitspoeling samen. Daarnaast bespreken we andere, deels recentere, studies en publicaties over dit onderwerp.

2.1 Achtergrond

Nitraatuitspoeling

Nitraatuitspoeling is het proces waarbij nitraat, één van de twee minerale vormen waarin stikstof voorkomt, zich met het neerslagoverschot vanuit de bodem verplaatst naar het grondwater. Het uitgespoelde nitraat komt op diep gedraineerde droge zandgrond voornamelijk terecht in het grondwater. Nitraat kan, afhankelijk van de hydrologische omstandigheden ook via drains en ondiepe uitspoeling tot belasting van oppervlaktewater leiden. Ook ammonium, de andere minerale stikstofverbinding, kan verloren gaan naar watersystemen. Het grootste deel van de via bemesting aan de bodem toegevoegde ammonium wordt echter omgezet in nitraat en zal, indien niet opgenomen door het gewas, uitspoelen als nitraat. De relatieve bijdrage van nitraat en ammonium aan de totale belasting van het watersysteem is afhankelijk van recent en historisch landgebruik, bodemtype en hydrologie. In zandgronden wordt de belasting van het watersysteem vooral bepaald door nitraatuitspoeling naar het grondwater. Op (gedraineerde) kleigronden en veengronden speelt ook de belasting van het oppervlaktewater een belangrijke rol.

Monitoring van nitraatuitspoeling vindt onder andere plaats in het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM). In de zandregio wordt de bovenste meter van het grondwater op bedrijven in de zomer bemonsterd mits de grondwaterstand niet dieper is dan 5 meter onder het maaiveld. In de kleiregio wordt de bovenste meter van het grondwater in de winter bemonsterd of wordt drainwater in vier rondes bemonsterd als percelen gedraineerd zijn. In de Lössregio wordt het bodemvocht tussen 1,5 en 3 meter onder maaiveld bemonsterd in het najaar. In de Veenregio wordt het slootwater bemonsterd. Op zand- en lössgronden wordt de nitraatconcentratie gemeten, op klei en veen de N-totaalconcentratie (nitraat, ammonium en opgeloste organische N). De metingen in het kader van monitoring van nitraatuitspoeling worden uitgedrukt als nitraatconcentratie in uitspoelend water (mg/l). Deze worden geacht onder de norm van 50 mg/l te blijven in het kader van de Nitraatrichtlijn.

Het bepalen van een goed gemiddelde van de nitraatconcentratie in uitspoelend water van een perceel is intensief en kostbaar, en daarom minder geschikt als indicator voor doelsturing. In plaats daarvan komen het NR en het N-bodemoverschot in aanmerking (Noij & ten Berge, 2019). Beide indicatoren zijn een maat voor de hoeveelheid stikstof die overblijft na een groeiseizoen en potentieel kan uitspoelen.

Het N-bodemoverschot

Het N-bodemoverschot is het verschil tussen de totale aanvoer van N naar de bodem (na aftrek van NH_3 verliezen na toediening van meststoffen) en de totale afvoer (de hoeveelheid N in geoogst landbouwproduct en de NH_3 -emissie uit gewasresten) (van Dijk et al., 2024). Het N-bodemoverschot blijft achter in de bodem en wordt zo toegevoegd aan de totale voorraad van stikstof in de bodem, of gaat verloren door vervluchtiging als gasvormige stikstofverbinding of spoelt uit naar grondwater (Brussée et al., 2024; Oenema et al., 2024).

Op de korte termijn is niet alle stikstof die als bodemoverschot aan de bodemvoorraad wordt toegevoegd, even gevoelig voor uitspoeling naar grondwater. Stikstof die ingebouwd is in aangevoerde organische stof (organische N) is niet mobiel en gaat niet direct verloren naar grondwater. Stikstof die aangevoerd is in minerale vorm (ammonium of nitraat) en in deze vorm in de bodem aanwezig is, is wel mobiel (met name nitraat) en draagt bij aan het risico op verlies naar grondwater. Een groot deel van de minerale N in bodems is aanwezig als nitraat, omdat ammonium door nitrificatie relatief snel wordt omgezet in nitraat.

Op de langere termijn geldt dat ook de organische N wordt afgebroken tot minerale N en bijdraagt aan het risico op uitspoeling (Wosten et al., 2019). Dit bleek ook uit een praktijkexperiment met verschillende compostdoseringen op droge zandgrond in Markelo (Dekker & Verloop, 2023).

In welke mate het N-bodemoverschot tot uitspoeling leidt, hangt naast de vorm en het moment waarin de stikstof is aangevoerd, ook af van factoren, zoals de gewasbedekking in de winter, de diepte van beworteling, het bodemtype, de hoogte van de grondwaterstand en weersomstandigheden. Op basis van metingen van het nitraatgehalte op bedrijven in het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) is afgeleid welk deel van het N-bodemoverschot verloren gaat door uitspoeling (Brussée et al., 2024). Deze uitspoelfractie was afhankelijk van grondgebruik (grasland of bouwland), gemiddelde grondwaterstand en grondsoort.

Het mineraal stikstofresidu (NR)

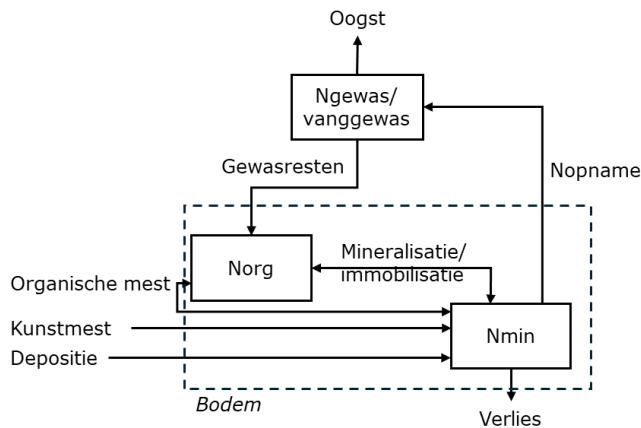
Het NR is de hoeveelheid minerale N (nitraat en ammonium) die zich in het najaar in de bodem bevindt in een afgebakende bodemlaag. In het Nederlandse protocol voor meting van NR wordt uitgegaan van de bodemlaag 0-90 cm onder maaiveld; in het Nederlandse protocol wordt de meetperiode gespecificeerd als de periode van 15 oktober tot 1 december. Om het verlies naar grondwater te beperken, is het streven om het mineraal stikstofresidu zo laag mogelijk te houden. Daarbij zullen telers het niveau van minerale stikstof tijdens het groeiseizoen wel zodanig hoog willen hebben als landbouwkundig wenselijk. Het ideaal is dus om de bemestingskundige behoefte te combineren met een laag stikstofresidu na het groeiseizoen (van Enckevort et al., 2002).

Belangrijke verschillen met het N-bodemoverschot zijn: i) dat het mineraal stikstofresidu een momentopname is in het najaar, terwijl het N-bodemoverschot een jaarbalans is en ii) dat het mineraal stikstofresidu, zoals de naam al aangeeft, betrekking heeft op de minerale verschijningsvormen van stikstof, terwijl het N-bodemoverschot zowel minerale als organisch gebonden stikstof omvat. Een praktisch verschil is dat het N-bodemoverschot normaliter wordt bepaald op bedrijfsniveau en niet op perceelniveau. Verdere detaillering is lastig en kan eigenlijk alleen betrouwbaar op hoofdgewasniveau o.a. omdat opbrengsten en daarmee de N-afvoer met oogstproduct vaak niet op perceelniveau bekend zijn. Ook kan het pas achteraf nauwkeurig bepaald worden, wanneer de gewasopbrengsten bekend zijn. Het mineraal stikstofresidu wordt in eerste instantie juist op perceelniveau bepaald en kan vervolgens in combinatie met gegevens van andere percelen vertaald worden in een bedrijfsgemiddelde. Het mineraal stikstofresidu is daarom te beschouwen als een meer directe indicator van het uitspoelingsrisico (Noij & Ten Berge, 2019). Overigens reflecteert NR deels ook de effecten van aangevoerde organische N (aangevoerd in het jaar van toediening en de jaren daarvoor), omdat hieruit N gemineraliseerd kan zijn.

De relaties tussen enerzijds NR en N-bodemoverschot en anderzijds nitraatuitspoeling

Figuur 1 geeft de interactie tussen bemesting, gewasopname en nitraatuitspoeling weer. De nitraatuitspoeling hangt direct samen met de NR, die weer samenhangt met het N-bodemoverschot. Metingen van NR en nitraatconcentratie zijn echter momentopnames. Ze zijn erg afhankelijk van gewasonttrekking, het voorafgaand management (bemesting, oogst) en vooral ook van weersomstandigheden (neerslag, temperatuur) en grondwaterstand. Figuur 2 geeft voor grasland een potentieel verloop in de tijd weer voor de verschillende processen in de N-kringloop die van invloed zijn op de hoeveelheid minerale N in de bodem. De stippellijn geeft het verloop van de hoeveelheid minerale N weer die een resultante is van de genoemde processen. Bij de NR-(minerale N in er herfst) speelt nog mee dat deze in de tijd kan veranderen door mineralisatie van organische N uit toegediende organische mest, achtergebleven gewasresten en organische stof in de bodem. Omgekeerd kan NR dalen door opname door een vanggewas, immobilisatie (bijvoorbeeld na inwerken van stro), gasvormige N-verliezen (denitrificatie) en vroegtijdige af- en uitspoeling. In het N-bodemoverschot worden de bodemprocessen maar beperkt meegenomen maar gewasresten en vanggewassen kunnen daar wel in worden meegenomen.

Naast NR en N-bodemoverschot van een specifiek jaar speelt de al in de bodem aanwezige organische N, mede als gevolg van historische bemesting, een belangrijke rol. Een deel van de toegediende stikstof kan decennia lang in de bodem verblijven (Sebilo et al., 2013; Sørensen et al., 2023). Gemineraliseerde stikstof uit de bodem is bovendien een belangrijke bron van nitraatuitspoeling (Frick et al., 2022; Sørensen et al., 2023).

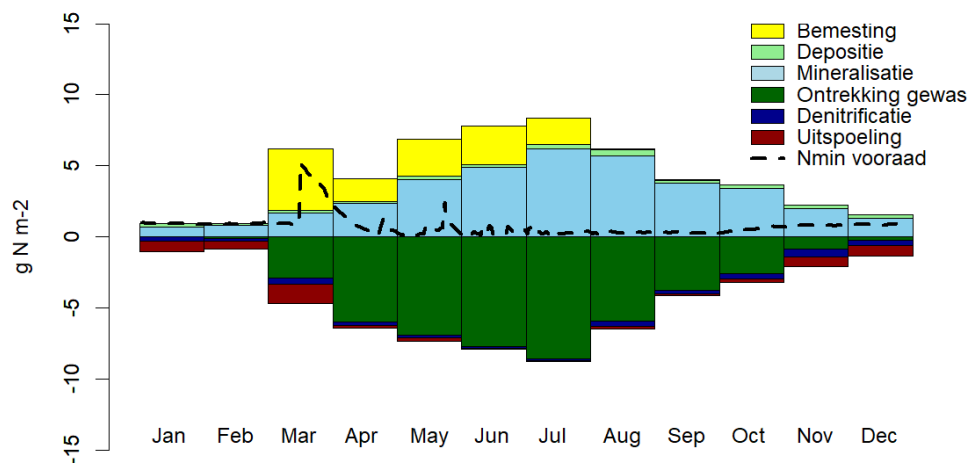


Figuur 1. Schematische weergave van stikstofstromen in gewas en bodem (verlies: gasvormige verliezen + uitspoeling).

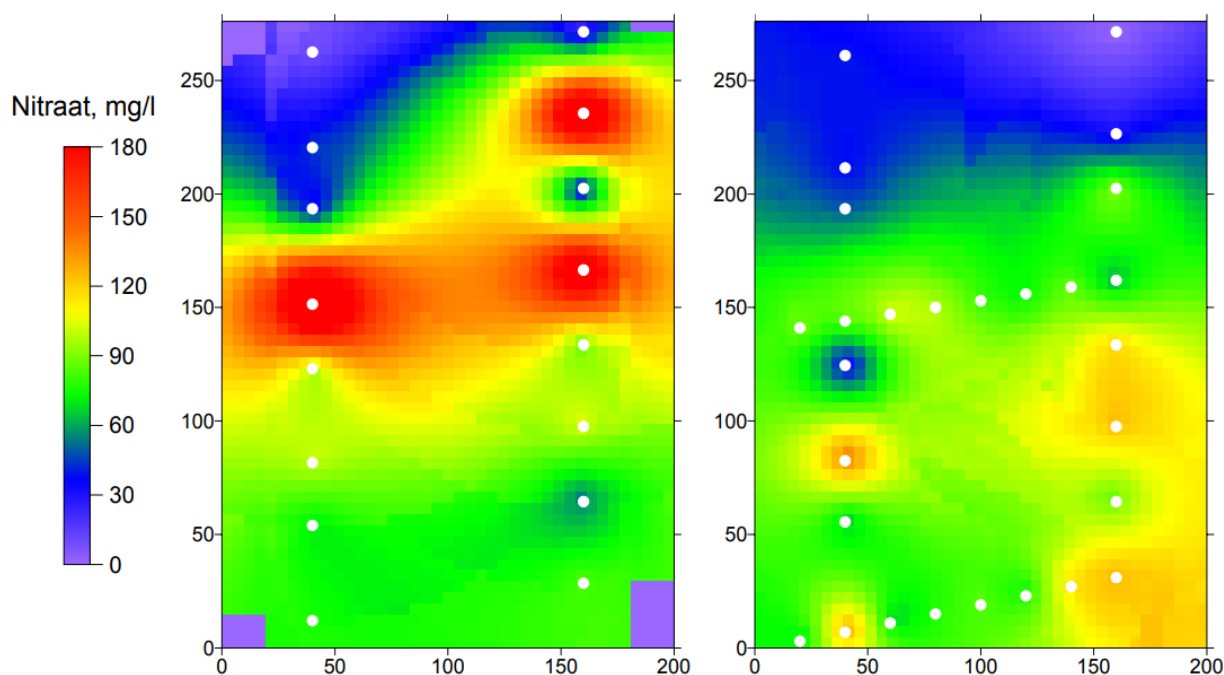
Naast variatie in de tijd, variëren zowel nitraatconcentratie als NR ook ruimtelijk binnen een perceel. Figuur 3, overgenomen uit (Smit et al., 2005), laat zien dat de variatie in nitraatconcentratie binnen een perceel aanzienlijk kan zijn. Onderzoek op een ander perceel laat een iets beperktere variatie zien (Steenvoorden et al., 1986), maar Noij & ten Berge (2019) concluderen dat bijna 300 puntmetingen nodig zouden zijn voor een betrouwbare bepaling van de gemiddelde nitraatconcentratie in uitspoelend water op een perceel. Bovendien zal de uitspoeling niet op alle gronden hoofdzakelijk verticaal zijn over 90 cm (de bemonsteringsdiepte voor NR), wat de relatie tussen NR en de nitraatconcentratie in uitspoelend water verstoort. Een uitgebreide studie naar afspoeling en uitspoeling liet zien dat uitspoeling en uitspoeling routes sterk afhankelijk zijn van grondsoort en drainagesituatie, en dat op klei en veen over het algemeen meer ondiepe (meer horizontale gerichte) uitspoeling plaatsvindt dan op zandgronden (van de Weerd & Torenbeek, 2007).

Ook NR kan ruimtelijk sterk variëren. Recente studies in Vlaanderen op verschillende akkerbouw- en graspercelen op zand en leemgronden laten variatiecoëfficiënten¹ zien die variëren van 0,26-2,56 (Hofman, 2023; Hofman & Brus, 2021) met een gemiddelde variatiecoëfficiënt van boven de 0,6. Bovendien is de variatie vaak niet-normaal verdeeld. Hierdoor wordt het rekenkundig percelsgemiddelde sterker beïnvloed door uitschieters. Specifieke studies laten soms lagere variatie zien (Inagro & PCA, 2024) maar eerder is beschreven dat de variatie aanzienlijk kan zijn (gemiddeld 0,4 maar in 10-20% van de studies 0,8-0,9; Corré et al., 1994). Mogelijk neemt deze variatie af over de tijd omdat deze veroorzaakt wordt door ongelijke bemesting (Van Meirvenne & Hofman, 1989).

¹ De variatiecoëfficiënt is het quotiënt van standaardafwijking en gemiddelde



Figuur 2. Maandelijks aanvoer en afvoer van stikstof op een grasperceel en resulterende minerale stikstofvoorraad in de bodem (stippellijn). Gemiddelde simulatie voor een perceel op proefbedrijf de Marke met het CNGRAS model (Conijn, 2005). De gesimuleerde bemesting is goed terug te zien in de pieken van Nmin voorraad. N.B. voor akkerbouwgewassen is een ander patroon te verwachten door de vaak kortere periode van actieve N-opname en een eenmalige oogst.



Figuur 3. Gemeten nitraatconcentraties in uitspoelend water op proefbedrijf Vredepeel in januari 2003, overgenomen uit Smit et al. (2005). "De beide blokken representeren twee teeltsystemen met daarbinnen de gewassen van het bouwplan. Het Peelkanaal grenst aan het de bovenzijde en de boerderij ligt rechtsonder. De getallen geven de afstand in meters weer. Duidelijk is te zien dat in de buurt van het Peelkanaal de nitraatconcentraties het laagst zijn. Verder is het effect van de dubbelteelt erwt-boon goed te zien als de rode band midden in het linker blok. Door middel van geostatistiek zijn de resultaten van puntmetingen omgezet in concentraties over het gehele blok."

2.2 Variabiliteit in NR en samenhang met weer, bodem, grondwater en gewas

In de bekeken studies (de Haan et al., 2018a, 2018b; D'Haene & Hofman, 2022; Dieser et al., 2023; Hack-ten Broeke et al., 2004; Noij & ten Berge, 2019; Wesselink & de Haan, 2024) komen waarden van NR voor tussen de 0 en 812 kg N per ha. In Vlaanderen liggen de waarden gemiddeld over een groot aantal bedrijven tussen de 30 en 225 kg N per ha (D'Haene & Hofman, 2022). Deze variabiliteit kan voor een groot deel verklaard worden door het type gewas, de weersomstandigheden en de grondwaterstand (Dieser et al., 2023; Noij & ten Berge, 2019). Daarnaast zal bodemtype naar verwachting ook een rol spelen; maar vanwege hun hogere gevoeligheid voor nitraatuitspoeling richtten de meeste studies zich op zand- en lössgronden en kan het effect van bodemtype niet vastgesteld worden, omdat er relatief weinig data van klei- en veengronden beschikbaar zijn. Over het algemeen zijn gewas, weersomstandigheden en grondwaterstanden factoren die niet alleen NR maar ook het uitspoeling risico beïnvloeden (Noij & ten Berge, 2019).

In Vlaanderen is de nitraatstikstofresidu gemiddeld genomen het hoogst bij aardappelen en groenten (tussen de 75 en 180 kg NO₃-N/ha), en het laagst bij suikerbieten (tussen 20 en 60 kg NO₃-N/ha) en grasland (tussen 30 en 80 kg NO₃-N/ha), terwijl granen en maïs daar tussen in zitten (D'Haene & Hofman, 2022). Dat is een vergelijkbaar beeld als bij een studie op 48 bedrijven in nitraatgevoelige gebieden in Duitsland tussen 2017 en 2020 waar ook bij aardappelen gemiddeld relatief hoge waarden hadden (106 kg N/ha) en suikerbieten relatief lage waarden (64 kg N/ha) alleen zaten groenten en maïs hier dicht bij het niveau van aardappelen en granen dicht bij het niveau van suikerbieten (Dieser et al., 2023). In Hack-ten Broeke et al. (2004) zijn de NR waarden gemiddeld genomen ook wat lager voor grasland dan bij veel bouwlandgewassen. Door de verschillende gewasgroepindeling in die studie is de vergelijking met de gewasgroepen in D'Haene & Hofman (2022) lastig. In de studie Akkerbouw voor Waterkwaliteit is NR ook bij aardappel gemiddeld het hoogst en bij suikerbiet en granen wat lager maar hier hebben ook groenten (bloemkool, erwten, stamslabonen en peen) in tegenstelling tot het onderzoek in Vlaanderen gemiddeld een lagere waarde (Wesselink & de Haan, 2024). Dit effect van gewas type kan nog verder versterkt worden door een interactie met bemestingsniveau (Noij & ten Berge, 2019), omdat bij sommige gewassen met een hoge NR worden gekenmerkt door relatief hoge N-bemesting.

Het weer kan op twee manieren NR beïnvloeden: door het effect op de gewasgroei en daarmee de N opname, en door de invloed van neerslag op de uitspoeling van NR (Noij & ten Berge, 2019). Daarnaast is temperatuur ook van belang voor omzettingsprocessen als mineralisatie en (de)nitrificatie. Het effect van neerslag lijkt sterker op maïspercelen (NR daalt met 32 kg N per ha per 100 mm in de periode 1 april-1 oktober) dan bij andere gewassen en gras (NR daalt met 15-21 kg N per ha per 100 mm in de periode 1 april tot bemonstering). Daarentegen zijn NR en nitraatuitspoeling doorgaans hoger in droge jaren door een lagere N-opname door het gewas, indikking van het nitraatgehalte door een lager neerslagoverschot en een hogere uitspoeling door een verlaging van de grondwaterstand (Brussée et al., 2024). De gevoeligheid van NR voor variatie in het weer laten Noij & ten Berge (2019) concluderen dat meetresultaten uit een enkel jaar geen goede grondslag zijn voor conclusies met betrekking tot nitraatuitspoeling.

Het effect van grondwater speelt vooral een rol bij akkerbouwgewassen. Daar kan de NR bij percelen met een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) ondieper dan 40 cm 20 kg lager zijn dan bij percelen met een diepere GHG (Hack-ten Broeke et al., 2004; Noij & ten Berge, 2019). Het verschil is een gevolg van meer afbraak van nitraat (denitrificatie) bij nattere omstandigheden.

2.3 Samenhang met management

Naast factoren zoals het weer en het bodemtype, waar minder op te sturen is, kan management ook van invloed zijn op de hoogte van NR. Management zal er in de eerste plaats op gericht zijn om de stikstoftoediening toe te spitsen op de gewasbehoefte en zo het N-bodemoverschot, NR en uiteindelijk de nitraatuitspoeling zo klein mogelijk te maken. Dat zit niet alleen in de hoogte van de bemesting, maar ook in maatregelen waarmee de toegediende N beter wordt opgenomen, zoals juiste tijdstip van toediening, keuze van de soort meststof, toedieningstechniek (bijvoorbeeld rijenbemesting), beweidingsintensiteit, rekening

houden met N leverend vermogen van de grond en nalevering van N uit gewasresten en ingewerkte vanggewassen, en verdeling van de stikstofgebruiksruimte per bedrijf (D'Haene & Hofman, 2022; Noij & ten Berge, 2019; van Enckevort et al., 2002). Door gebruik van vanggewassen, grondbewerking, verschillende maatregelen om bodemkwaliteit te verbeteren, teeltrotatie, keuze voor mengteelten en variëteiten kan verder gestuurd worden op een efficiënte opname van N en daarmee een lagere NR lager en uitspoeling (D'Haene & Hofman, 2022; Noij & ten Berge, 2019; van Enckevort et al., 2002). Veel van de genoemde maatregelen hebben een verlagend effect op zowel de NR als het N-bodemoverschot. Daarnaast zijn er management maatregelen die niet direct effect hebben op het N-bodemoverschot, maar wel invloed hebben op de hoogte van de NR, zoals late beweiding en scheuren van grasland wat de NR aanzienlijk kan verhogen (Noij & ten Berge, 2019). Deze snelle respons van NR op maatregelen is volgens Noij & ten Berge dan ook een belangrijk voordeel van de NR indicator.

2.4 Nitraatconcentratie in relatie tot NR

Het idee van het gebruik van NR als indicator voor nitraatuitspoeling in Nederland gaat terug tot begin jaren 1990, toen een voorgestelde grenswaarde van maximale hoeveelheid NR werd voorgesteld door de Commissie Stikstof (Corré et al., 1994). Om de grenswaarde te bepalen werd ervan uitgegaan dat de helft van de NR uitspoelt, en dat deze uitspoeling zich 1 op 1 vertaalt in een hoger nitraatgehalte, ten minste voor zandgronden (Corré et al., 1994). Volgens deze aanname en bij een gemiddeld neerslagoverschot van 300 mm, zal bij een toename van NR met 100 kg N/ha, de nitraatconcentratie met 73 mg NO₃/l toenemen². Dat ligt in dezelfde orde grootte als de toename van 60-70 mg NO₃/l bij een toename van NR met 100 kg N/ha welke gevonden werd in Sturen op Nitraat, waarbij rekening gehouden werd met gewasgroep, grondsoort, grondwaterniveau, en neerslag (Hack-ten Broeke et al., 2004). Noij & Ten Berge (2019) vonden een lagere toename, namelijk 20 mg NO₃/l bij een NR-toename van 100 kg N per ha. Dat hangt mogelijk samen met specifieke omstandigheden in het jaar dat de metingen plaatsvonden (2018, droog jaar) en daarnaast werd de NR later in het jaar gemeten en beperkte de metingen zich tot enkele regio's in Nederland en tot melkvee- en groentebedrijven. Op individuele bedrijven is de relatie tussen een lage NR en een lage nitraatconcentratie niet vanzelfsprekend, zoals bijvoorbeeld te zien is in het onderzoek van (Smit et al., 2005). Sommige (oudere) studies vonden een duidelijke relatie, maar dat was bij hele hoge bemestingsniveaus (Corré et al., 1994).

Alhoewel er in verschillende studies een relatie tussen nitraatconcentratie en NR gevonden wordt, wordt daarbij ook telkens de grote onzekerheid daaromheen, ook na correctie voor gewasgroep, grondsoort, grondwaterniveau, en neerslag, aangehaald (Corré et al., 1994; Hack-ten Broeke et al., 2004; Noij & ten Berge, 2019). Om vanuit de NR het nitraatgehalte in uitspoelend water te voorspellen was de onzekerheid in de orde van enkele tientallen mg NO₃/l. Als verklaring voor de grote variatie wordt genoemd de grote perceelsverschillen en variatie binnen percelen, en de invloed van vanggewassen. Noij en ten Berge (2019) concludeerden dat in vergelijking tot andere indicatoren als N-aanvoer, werkzame N-aanvoer en N-bodemoverschot, NR weliswaar de beste schatter is voor de nitraatconcentratie in uitspoelend water, maar dat de onzekerheid te groot is om beleid sterk aan de relatie tussen nitraatuitspoeling en NR te verbinden. Zij suggereren dat de NR indicator als beleidsinstrument vooral geschikt is om excessief meststoffengebruik op te sporen.

Omdat een groot deel van de variatie in nitraatconcentratie niet verklaard kon worden met regressiemodellen, is in het project Sturen op Nitraat ook een procesmodel opgesteld (Hack-ten Broeke et al., 2004). Dat model bleek echter niet goed te kalibreren te zijn met de verzamelde gegevens. Ook het model ANIMO had moeite met het nauwkeurig voorspellen van de nitraatconcentratie voor zandgronden in Nederland (Wolf et al., 2005). Een koppeling van ANIMO met het bodemvocht-model SWAP leverde een nauwkeuriger beeld op maar voor een relatief simpel grondwatersysteem in Duitsland (Kroes & Roelsma,

² → bij toename NR van 100 kg N/ha spoelt 50 kg N/ha uit (= helft; aanname aangehaald in (Corré et al., 1994)(Corré et al., 1994))

→ dat is 50 * 4,4 = 220 kg NO₃/ha

→ dat is 220 / 10000 = 0,022 kg NO₃/m²

→ dat is 0,022 / 0,3 = 0,073 kg NO₃/m³

→ dat is 0,073*10³ = 73 mg NO₃/l

2007). Dat suggereert dat gedetailleerde simulatie van bodemvocht nodig is voor nauwkeurige voorspelling van nitraatconcentraties.

2.5 Nitraatconcentratie in relatie tot N-bodemoverschot

Op regionale schaal is er een verband te zien tussen nitraatconcentratie en N-bodemoverschot (Claessens et al., 2024; Fraters et al., 2020). Op bedrijfsniveau komt deze relatie echter veelal niet duidelijk naar voren (de Haan et al., 2018b; Oenema et al., 2024; van Geel et al., 2023; Verloop et al., 2025). Volgens Noij & ten Berge (2019) is NR, ondanks de onzekerheid eromheen, een betere voorspeller dan andere indicatoren op basis van gegevens uit het voorgaande jaar zoals N-bodemoverschot en werkzaam N-bodemoverschot. Wel is er voor grasland een veel minder groot verschil tussen de voorspelkracht van de indicatoren (Berge et al., 2004). Het meenemen van het N-bodemoverschot aanvullend op NR in een regressiemodel voor het voorspellen van de nitraatconcentratie had in het Sturen op Nitraat onderzoek een significant positief effect bij akkerbouwgewassen maar de Ngift was een betere voorspeller (Hack-ten Broeke et al., 2004). In datzelfde onderzoek was het effect van N-bodemoverschot niet significant bij gras en maïs.

3 Data analyse

Dit hoofdstuk gaat in op de analyse van data van het minereaal stikstof-residu, het N overschot op de bodembalans en nitraatuitspoeling. Paragraaf 3.1 beschrijft de aanpak van de analyse. Paragraaf 3.2 gaat in op de databronnen die bij de analyse betrokken konden worden. Paragraaf 3.3 geeft de resultaten weer.

3.1 Opzet analyse

Ook de data analyse richt zich op de drie vragen die in deze rapportage centraal staan:

1. Hoe verschillen gemeten NR waarden en hun spreiding tussen verschillende gewasgroepen, grondwatertrappen en bodemtypen?
2. Wat is de relatie tussen NR en nitraatconcentratie in uitspoelend water?
 - a. Hoe betrouwbaar is deze relatie: met hoeveel zekerheid kan er iets worden gezegd over de nitraatconcentratie in uitspoelend water bij een gemeten waarde van NR?
3. Hoe verhoudt N-bodemoverschot zich tot NR en nitraatconcentratie in uitspoelend water?

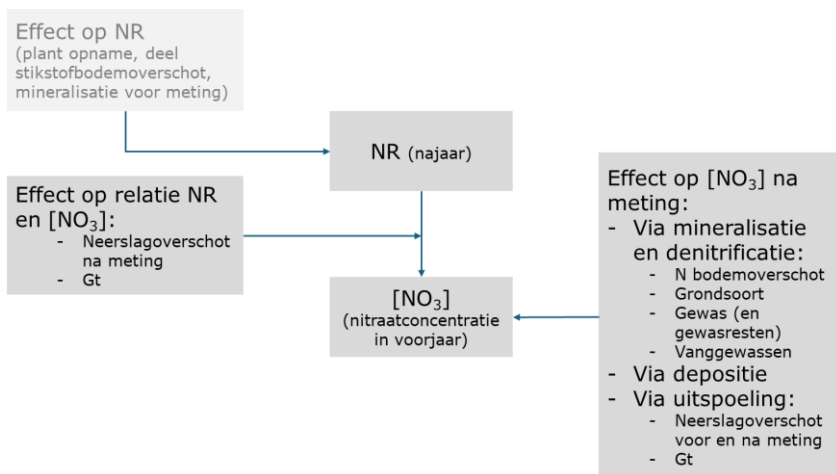
3.1.1 Gemeten NR waarden en hun spreiding tussen gewas-gt-bodem combinaties

De variabiliteit in Nitraatresidu metingen in relatie tot gewas, Gt, en grondsoort is voornamelijk visueel geanalyseerd. Dit levert een algemeen beeld van hoe NR samenhangt met deze factoren, en vormt daarmee de basis voor het duiden van een gemeten NR in specifieke situaties. Aanvullend op de visuele analyse is een regressiemodel selectieprocedure uitgevoerd voor NR in relatie tot gewas, Gt, grondsoort, en verschillende specificaties van het N-bodemoverschot; om verder te duiden in hoeverre deze factoren de variatie in waargenomen NR verklaren.

3.1.2 Relatie NR en Nitraatconcentratie

De processen die ten grondslag liggen aan de relatie tussen N-bodemoverschot, NR en nitraatconcentratie en die beschreven zijn in sectie 2.1 zijn nogmaals weergegeven in Figuur 4. In deze figuur komen verschillende variabelen terug die te meten zijn. Grotendeels komen deze ook voor in de geanalyseerde datasets.

Sommige variabelen zullen onafhankelijk van NR een effect hebben op de nitraatconcentratie in het voorjaar en helpen daarmee om de variatie in de nitraatconcentratie te verklaren. Voor andere wordt verwacht dat ze (ook) effect hebben op de sterkte van de relatie tussen NR en nitraatconcentratie; op percelen met een hoge grondwaterstand is bijvoorbeeld te verwachten dat die relatie sterker is dan op percelen met een lage grondwaterstand.



Figuur 4. Causaal diagram dat weergeeft hoe verschillende variabelen samenhangen met de nitraatconcentratie in uitspoelend water in het voorjaar ($[NO_3]$). Variabelen die uitsluitend een verwacht effect hebben op NR, en daarmee gevat zouden moeten zijn in NR metingen zijn lichtgrijs gemaakt.

In beginsel zal de relatie tussen $[NO_3]$ in het opvolgende voorjaar, en andere factoren worden onderzocht met lineaire regressie technieken; met de algemene vorm:

$$y \sim a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + b$$

Analyses naar voorbeeld van Sturen op Nitraat en meta-analyses

Deze regressie structuur is ook de structuur die in het project Sturen op Nitraat is aangehouden (Hack-ten Broeke et al., 2004)(Hack-ten Broeke et al., 2004). Daarin zijn aparte analyses gedaan voor akkerbouwgewassen, gras, en maïs. Die analyse bestond uit modelselecties waarmee het belang van verschillende variabelen is onderzocht. Voor akkerbouw resulteerde dat in drie modellen:

Model 1 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}}$

Model 2 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times \text{Neerslagoverschot1} + d \times \text{Neerslagoverschot2}$

Model 3 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times \text{Neerslagoverschot1} + d \times \text{Neerslagoverschot2} + e \times C_{\text{Nverh}} + f_j \times \text{Ngift}$

waarbij : C_i = de constante per bodem-Gt-gewascombinatie (zie tabel 4.2); a, b, d, e = te schatten regressiecoëfficiënten; f_j = te schatten regressiecoëfficiënt die verschilt voor de twee gewasgroepen ($j=2$); Nitraat = nitraatconcentratie van uitspoelend water in het voorjaar (mg/l); $N_{\text{minnitraat}}$ = nitraatdeel van N_{min} gemeten in de bodem in het najaar (oktoberdecember) voor de laag 0-90 cm-mv (kg N/ha); Neerslagoverschot1 = Neerslagoverschot in de zomerperiode (mm), 1 april-1 oktober; Neerslagoverschot2 = Neerslagoverschot in de winterperiode (mm), 1 oktober-1 april; C_{Nverh} = C/N-verhouding voor de bouwvoor; Ngift = som van kunstmest en totale dierlijke mestgift (kg/ha).

Voor grasland kwamen vier modellen naar voren:

Model 1 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}}$

Model 2 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times C_{\text{Nverh}} + d \times \text{PotMin}$

Model 3 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times C_{\text{Nverh}} + d \times \text{PotMin} + e \times \text{Neerslagsom1} + f \times \text{Neerslagsom2}$

Model 4 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + g \times \text{GHG} \times (\text{Gt-groep}=3) + h \times \text{Scheuren}$

waarbij: PotMin = potentiële mineralisatie die gezien kan worden als een maat voor de afbreekbaarheid van organische stikstof in de bouwvoor; Neerslagsom1 = Neerslagsom in de zomerperiode (mm), 1 april-1 oktober; Neerslagsom2 = Neerslagsom in de winterperiode (mm), 1 oktober-1 april; GHG = gemiddelde hoogste grondwaterstand; deze speelt alleen een rol bij Gt-groep 3 en valt weg bij Gt-groep 1 en 2; Scheuren = het al dan niet scheuren van grasland in het najaar (0=niet scheuren, 1=wel scheuren).

Voor maïsproductie op melkveebedrijven kwamen ook vier modellen naar voren:

Model 1 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}}$

Model 2 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times \text{Neerslagoverschot2}$

Model 3 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times \text{Neerslagoverschot2} + d \times \text{GHG} \times (\text{Gt-groep}=3) + e_j \times \text{Voorvrucht}$

Model 4 : Nitraat = $C_i + a \times N_{\text{minnitraat}} + b \times \text{Neerslagsom2} + f \times N_{\text{NH4}}$

waarbij: Voorvrucht = effect op de nitraatconcentratie door andere voorvrucht dan maïs; N_NH4 = 'hot KCl' extraheerbaar ammonium (mg N per kg), een indicator voor N-mineralisatie.

In eerste instantie zijn deze regressiemodellen uitgetest op de nieuwe data, voor zover die daarvoor geschikt waren. Daarbij werden databronnen afzonderlijk geanalyseerd, en in plaats van Nminnitraat (alleen het nitraatdeel van NR) werd NR gebruikt als verklarende variabele. De uitkomsten van deze modellen zijn vergeleken met de oorspronkelijke resultaten van Hack-ten Broeke (Hack-ten Broeke et al., 2004). De resultaten van de nieuwe analyses en bestaande analyses zijn gecombineerd in meta-analyses; apart voor akkerbouwgewassen, gras, en maïs.

Gepoolde regressieanalyses

Naast analyses van de afzonderlijke datasets zijn ook gepoolde analyses gedaan, waarbij de verschillende datasets zijn samengevoegd en geanalyseerd in lineaire mixed-effects modellen. Voor deze analyse is gestart met een basismodel dat afgeleid is van de relaties in Figuur 4:

$$[\text{NO}_3] \sim$$
$$\text{aNR} +$$
$$\text{bNeerslagoverschot2:NR} +$$
$$\text{cNeerslagoverschot1cat} +$$
$$\text{dNeerslagoverschot2cat} +$$
$$\text{eGrondwaterklasse:NR} +$$
$$\text{fGrondwaterklasse}$$
$$\text{gGewasgroep} +$$
$$\text{hGrondsoort} +$$
$$\text{iNoverschot} +$$
$$(1|\text{perceel}) + (1|\text{jaar})$$

Hierin geven (1|perceel) en (1|jaar) zogenaamde bronnen voor "random effects" weer die geclusterd zijn in perceel of jaar. Daarmee wordt rekening gehouden met het feit dat waarnemingen op het zelfde perceel of in hetzelfde jaar niet onafhankelijk van elkaar zijn. De gebruikte variabelen komen ook terug in analyses naar voorbeeld van Sturen op Nitraat. Voor de neerslagoverschot variabelen zijn categorieën gemaakt: positief en negatief voor het neerslagoverschot in de maanden april-oktober (Neerslagoverschot1cat) en hoog en laag voor het neerslagoverschot in de maanden oktober-april (Neerslagoverschot2cat)³. Een ":" tussen variabelen geeft een interactie aan; die is toegevoegd bij variabelen waarbij een effect wordt verwacht tussen de relatie tussen NR en nitraatconcentratie (Figuur 4).

Dit model is gebruikt als basis om het best passende model te vinden op basis van de zogenoemde Akaike Information Criterion (AIC)⁴ en Bayesian Information Criterion (BIC)⁵. Daarbij zijn eerst modellen vergeleken voor verschillende specificaties van het N-bodemoverschot: Het totaal stikstof overschot, het werkzame stikstof overschot, het verschil van het totaal stikstof overschot en werkzaam stikstof overschot (organische stikstof aanvoer), een combinatie van totaal stikstof overschot en werkzaam stikstof overschot, en een som van deze overschotten over meerdere jaren. Bij dat sommeren zijn niet alle observaties te gebruiken omdat de datasets maar een beperkt aantal jaren beslaan. Hoe meer jaren er gesommeerd worden, hoe minder observaties bruikbaar zijn. Daarom is afzonderlijk een selectie gedaan voor een dataset waarbij er niet gesommeerd is, waarbij er gesommeerd is over twee jaren, en waarbij er gesommeerd is over vijf jaren.

Voor elke selectieprocedure, is nadat er geselecteerd is voor de best passende specificatie van het N-bodemoverschot, een stapsgewijze selectie gedaan, waarbij telkens een voor een elke term is weggelaten om te bepalen of dat een lagere waarde van AIC en BIC gaf en daarmee een beter passend model. Voor het model met de laagste AIC en BIC werd vervolgens weer één voor één een term weggelaten, totdat dat niet meer leidde tot een lagere AIC en BIC.

³ Bepaald op basis van een histogram van het neerslagoverschot in die periode per jaar

⁴ Dit is rekenprocedure die aanwijzingen geeft voor de balans tussen de kwaliteit van een model en de kwaliteit ervan.

⁵ Dit is een rekenprocedure met een vergelijkbare functie als de AIC, maar die meer nadruk legt op beperken van de complexiteit.

Voor het best passende model is een voorspellingsinterval bepaald voor elke combinatie van variabelen die overbleven in het model. Daarbij is de willekeurige variatie in percelen en jaren weggelaten en dus alleen een schatting gedaan voor de variatie in observaties.

3.1.3 N-bodemoverschot en de relatie tussen Nitraatconcentratie en NR

Verschillende specificaties van het N-bodemoverschot spelen mogelijk een rol in de relatie tussen NR en nitraatconcentratie, deels door alleen een effect op de nitraatconcentratie en deels door ook een effect op NR (Figuur 4). Daarbij gaat het er om of het N-bodemoverschot het minerale deel, het organische deel, of beide fracties beslaat, en over het tijdsbestek van het N-bodemoverschot (sectie 2.1). Dat is de reden dat verschillende specificaties zijn uitgetoetst in de in 3.1.2 beschreven regressiemodel selectieprocedure. Het wel of niet wegvallen van het N-bodemoverschot in zo'n procedure, en de residuele variantie die daarmee samenhangt is een indicatie van de bijdrage van het N-bodemoverschot. Naast de eerder beschreven selectie is ook een regressiemodel selectie procedure uitgevoerd voor afzonderlijke datasets waarbij dat mogelijk was; om op dezelfde manier na te gaan in hoeverre het N-bodemoverschot bijdraagt aan het verklaren van de waargenomen variantie in nitraatconcentratie.

De volgende specificaties voor het N-bodemoverschot zijn onderzocht⁶:

- Totaal N-bodemoverschot: het verschil van alle stikstofaanvoer op een perceel en alle stikstofafvoer op een perceel
- Mineraal N-bodemoverschot: het verschil van alle minerale stikstofaanvoer op een perceel stikstofafvoer op een perceel
- Het verschil tussen Totaal N-bodemoverschot en Mineraal N-bodemoverschot: dit geeft informatie over het organische deel van het stikstofbodembodemoverschot

Naast deze specificaties zijn voor beperkt aantal datasets cumulatieve maten van deze overschotten berekend over twee en vijf jaar.

3.1.4 Gebruikte software

Voor alle analyses is gebruik gemaakt van R (R Core Team, 2022). Voor de meta-analyses is gebruik gemaakt van de `rma` functie het R-pakket `metafor` (Viechtbauer, 2010); voor de gepoolde analyses is gebruik gemaakt van de `lmer` functie uit het `lmerTest` R-pakket (Kuznetsova et al., 2017) en de `predictionInterval` functie uit het `merTools` pakket (Knowles & Frederick, 2024).

3.2 Data

3.2.1 Bronnen

Voor de analyses is gebruik gemaakt van verschillende datasets (Tabel 1). Sommige betreffen systeemonderzoek op proefbedrijven (Valthermond, Vredepeel, De Marke), andere betreffen projecten/studies waarin op verschillende praktijkbedrijven de NR en soms ook het nitraatgehalte in uitspoelend water is gemeten (Akkerbouw voor Waterkwaliteit, Cosun, Nitraatwijzer). Voor droge zandgronden zijn de meeste gegevens, terwijl met name bij Klei, Löss en Zavelgronden de databronnen beperkt zijn (Tabel 1). De resultaten van de analyse zijn naar verwachting dus goed toepasbaar voor droge zandgronden, welke het meest gevoelig zijn voor uitspoeling. Toepasbaarheid van de resultaten van de analyse op de andere gronden is mogelijk beperkter is, met name als de drainagesituatie afwijkt.

⁶ N.B. Dit betreft allemaal specificaties van het N-bodemoverschot op perceelsniveau; niet op bedrijfsniveau.

Tabel 1. Het voorkomen van factoren in databronnen (Ja: Meetwaarde komt voor; - meetwaarde komt niet voor) en de geschiktheid van databronnen voor analyses (Ja: dataset is geschikt; Nee meetwaarde is niet geschikt).

Databron (jaren)	Voorkomende factor in de databron											Geschiktheid van de databron voor analysedoelen			Referentie
	Gewas		Grondsoort						NR	N bodem overschot	NO3 grond water	Relatie NR-NO3	Relaties N bodem overschot	Hoogtegevoel en spreiding	
	Akkerbouw	Gras	Zand droog	Zand nat	Klei	Zavel	Moerig	Löss							
Akkerbouw voor Waterkwaliteit	JA	-	JA	JA	-	-	JA	-	JA	JA	JA	JA	JA	JA	(Wesselink & de Haan, 2024)
Cosun	Ja ¹	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA ²	-	-	NEE	JA	JA ¹	
De Marke	JA	JA	JA	-	-	-	-	-	JA	JA	-	NEE	NEE	JA	
Nitraatwijzer	JA	JA	JA	JA	JA	-	JA	JA	JA	-	JA	JA	NEE	JA	(Noij & ten Berge, 2019)
Valthermond	JA	-	-	-	-	-	JA	-	JA	-	JA	JA	NEE	JA	(de Haan et al., 2020)
Vredepeel	JA	-	JA	-	-	-	-	-	JA	JA	JA	JA	JA	JA	(de Haan et al., 2018a, 2018b)

¹ Alleen suikerbiet

² Alleen mineraal

3.2.2 Meetmethodes

De meetmethodes voor NR en, indien gemeten, de nitraatconcentraties in uitspoelend water verschillen per dataset (Tabel 2). Er is gekozen om alleen gegevens te gebruiken waarbij NR is gemeten in de periode half oktober-december en in de bodemlaag 0-90 cm. Voor de nitraatconcentraties is, met uitzondering van de gegevens van Nitraatwijzer, alleen gebruik gemaakt van concentraties gemeten in februari. Dit sluit aan bij het eerdere Sturen op Nitraat onderzoek (Hack-ten Broeke et al., 2004) maar bij zandgrond wijkt dit meetmoment af van LMM; in LMM vinden metingen in de Zandregio voornamelijk in de zomer plaats. RIVM bemonstert een selecte groep gedraineerde bedrijven in de Zandregio ook in de winter. Deze metingen geven aan dat in 'zand winter' de nitraatconcentratie in uitspoelend water gemiddeld hoger is dan in de zomer (RIVM, 2023) wat verklaard wordt door (geringe) afbraak van nitraat in de periode tussen de winter en de zomer. De metingen in de zomer worden door RIVM beschouwd als een realistischer schatting van de nitraatconcentratie in het water dat uitspoelt naar het diepere grondwater (persoonlijke mededeling Hooijboer). Bij interpretatie van de relatie tussen NR en nitraatuitspoeling is het van belang dit in het oog te houden. Daarnaast is het ook belangrijk te benoemen dat bij gedraineerde bedrijven een substantieel deel van het uitgespoelde nitraat naar het oppervlaktewater gaat. Voor de analyse van de relatie tussen NR en nitraatconcentratie is verder van belang dat in alle datasets qua meetmoment van nitraat uniform zijn (steeds meting in februari). Omdat dit bij de nitraatwijzer pilot niet zo is, wordt voor die dataset lagere effectgrootte verwacht. De gebruikte methodes voor meten NR en nitraatconcentratie in grondwater verschillen enigszins (Tabel 2) maar worden beschouwd als voldoende uniform voor een gepoolde analyse.

Tabel 2. Meetmethodes voor NR en Nitraatconcentraties voor de verschillende databronnen.

Bron	Aantal steken (n)	Diepte (cm-mv)	Moment	Nitraatconcentratie		
				Aantal peilbuizen	Protocol	Moment
Akkerbouw voor Waterkwaliteit	30 per perceel	0-30;30-60; 60-90	Najaar	3 per perceel	LMM-methode MIL-W-4015 (RIVM, 2020)	februari
Cosun	~30 per perceel	0-30;30-60; 60-90	Najaar	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
De Marke	15-20 per 2 ha	0-30;30-60; 60-90	Najaar	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Nitraatwijzer	15-33 per perceel	0-30;30-60; 60-90	Najaar	3 per perceel	LMM-methode MIL-W-4015 (RIVM, 2020)	groeiseizoen
Valthermond ¹	7-8 per veldje (144 m ²) ~ 60 per perceel	0-30; 30-60; 60-90	Najaar	1 per veldje (144m ²) = 8 per perceel	(Hack-ten Broeke et al., 1993)	februari
Vredepeel	30 per perceel	0-30;30-60; 60-90	Najaar	3 per perceel	(Hack-ten Broeke et al., 1993)	februari

¹ Voor proefstation Valthermond zijn de gegevens van één perceel gebruikt waar uitgebreider is gemeten. Voor andere percelen zijn niet alle dieptes bemonsterd.

Voor het neerslagoverschot is gebruik gemaakt van aanvullende data van het KNMI⁷. Daarbij is voor elke dataset gebruik gemaakt van gegevens van het dichtstbijzijnde meetstation (Akkerbouw voor Waterkwaliteit: Eelde en Eindhoven; Valthermond: Hoogeveen; Vredepeel: Arcen). Het neerslagoverschot is bepaald als het verschil tussen de etmaalsom van de neerslag en de referentiegewasverdamping (Makkink).

Voor het weergeven van de resultaten is aangesloten bij indelingen voor Gt-groepen en grondsoorten zoals onderscheiden in (Hack-ten Broeke et al., 2004) en (Noij & ten Berge, 2019). De indeling in Gt-groepen is weergegeven in Tabel 3. De indeling in grondsoorten is weergegeven in Tabel 4.

⁷ <https://daggegevens.knmi.nl/>

Tabel 3. Indeling Gt-groepen.

Beschrijving	Indeling (Hack-ten Broeke et al., 2004)	Indeling (Noij & ten Berge, 2019)
GHG (Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand) ondieper dan 40 cm (Gt I, II, II*, IIb, III, III*, V, V*);	1	VOCHTIG
GHG tussen 40 en 80 cm (Gt IIc, IV, VI)	2	DROOG
GHG dieper dan 80 cm (Gt IVc, VII, VII* en VIII)	3	DROOG

Tabel 4. Indeling grondsoorten.

Indeling dit rapport	Indeling (Hack-ten Broeke et al., 2004)	Indeling (Noij & ten Berge, 2019)
Moerig	Z1	Moerig
Zand	Z2, Z3	Zand
Löss	L	Löss
Klei	n.v.t.	Klei
Zavel	n.v.t.	n.v.t.

Voor gewasgroepen is deels aangesloten bij de indeling van (Hack-ten Broeke et al., 2004) en deels bij een wat meer herkenbare verdeling tussen aardappel, biet, bloembollen, braakliggend land, granen, gras, bladgroenten, overige groenten, maïs, peulvruchten, en ui. De indeling van (Hack-ten Broeke et al., 2004) maakt onderscheid tussen twee akkerbouwgroepen, gras, en maïs op melkveebedrijven, waarbij een van de akkerbouwgroepen de volgende gewassen bevat: andijvie, boerenkool, bloemkool, Chinese kool, knolselderij, korrelmaïs, spitskool, ijsbergsla, CCM en MKS. Tabel 5 geeft de beschikbaarheid van gegevens voor de verschillende gewasgroepen, Gt-groepen en grondsoorten aan.

Tabel 5. Beschikbaarheid van gegevens voor de verschillende gewasgroepen, Gt-groepen en grondsoorten

Bron	Gewasgroep(en)	Gt-groep(en)	Grondsoort(en)
Akkerbouw voor Waterkwaliteit	akkerbouw1, akkerbouw2	1,2,3 ¹	Zand1(Moerig), Zand3
Cosun	akkerbouw1	1,2,3	Zand, Klei, Löss, Zavel
De Marke	maïs, gras	3	Zand3
Nitraatwijzer	akkerbouw1, akkerbouw2, maïs, gras	1,3	Zand1(Moerig), Zand3, Klei, Löss
Valthermond	akkerbouw1	3	Zand1(Moerig)
Vredepeel	akkerbouw1	3	Zand3

¹ Geen gt-gegevens beschikbaar maar wel grondwaterstanden van de onderzochte jaren.

3.3 Resultaten



Figuur 5. Variabiliteit in NR meting bij verschillende gewasgroepen, Gt-groepen, grondsoorten en datasets (AW= Akkerbouw voor Waterkwaliteit; C = Cosun; M = de Marke; NW = Nitraatwijzer; V = Valthermond; VP = Vredepeel). De zwarte balken geven het gemiddelde over alle datasets weer.

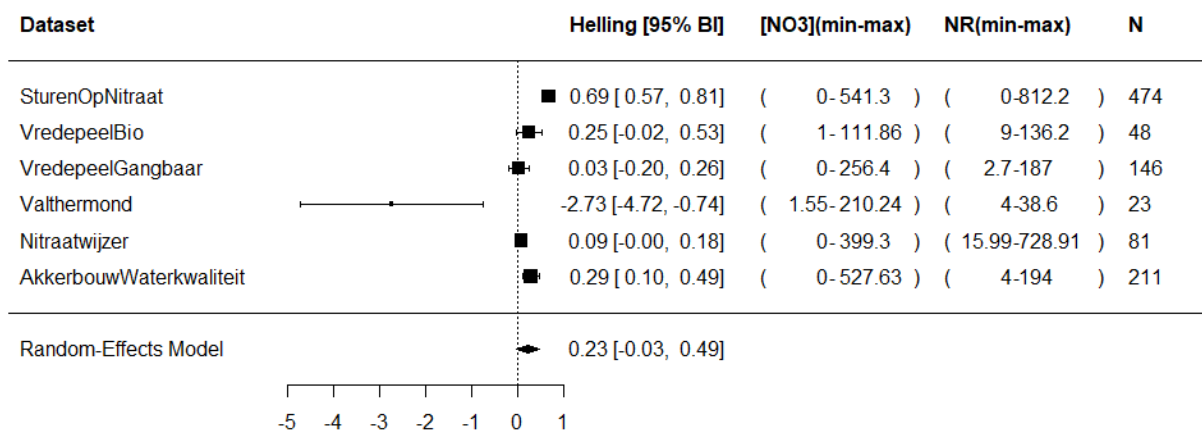
3.3.1 Variabiliteit in Nitraatresidu metingen

De waargenomen variabiliteit in NR metingen is aanzienlijk. Deels kan die variatie verklaard worden door gewastype, grondsoort en grondwaterstanden maar ook dan blijft er een aanzienlijke variatie (Figuur 5). Uit de regressiemodel selectieprocedure kwam naar voren dat gewasgroep en de interactie tussen grondsoort en grondwaterstand een belangrijke rol spelen. Gemiddeld genomen zullen granen, bieten en peulvruchten een wat lagere NR hebben dan aardappelen, maïs, ui, of overige groenten terwijl de NR bij bladgroenten gemiddeld genomen wat hoger ligt. Kleigronden hebben een gemiddeld lagere NR dan de andere gronden. Het effect van de grondwaterstand is wat lastiger duiden maar laat een interactie met grondsoort zien⁸. Neerslagoverschot, bemestingsniveaus en stikstofbodemonverschot komen uit de analyse niet naar voren als belangrijke voorspellers voor de variabiliteit in NR metingen.

3.3.2 Betrouwbaarheid NR in relatie tot Nitraatconcentratie

Regressieanalyses volgens Sturen op Nitraat

Voor akkerbouw laat het meest simpele model van (Hack-ten Broeke et al., 2004), voor de meeste databronnen een positieve relatie zien, dat wil zeggen, bij een toename van NR neemt de Nitraatconcentratie ook toe (Figuur 6). Deze relatie is echter niet zo sterk als gevonden door (Hack-ten Broeke et al., 2004) en ook niet voor alle databronnen significant. Samengenomen in een meta-analyse laten deze resultaten een positieve relatie zien maar ook deze is niet significant (Figuur 6, onderste regel). Voor een model waarin ook de effecten van neerslag zijn meegenomen ("model2") is de positieve relatie wat sterker (Figuur 7). De gegevens van de Nitraatwijzer pilot konden hierin niet worden meegenomen omdat er geen beschikking was over neerslaggegevens gerelateerd aan deze dataset. Het weglaten van deze dataset zal deels bijdragen aan de hogere effectgrootte in dit "model2" vanwege de deels door de latere gemeten nitraatconcentraties te verklaren lagere effect in de "Nitraatwijzer" dataset. "model3", waarin ook de C:N verhouding en N gift zijn meegenomen, kon alleen gedraaid worden voor Valthermond en Vredepeel; dat zorgde niet voor een sterke verandering van het beeld.



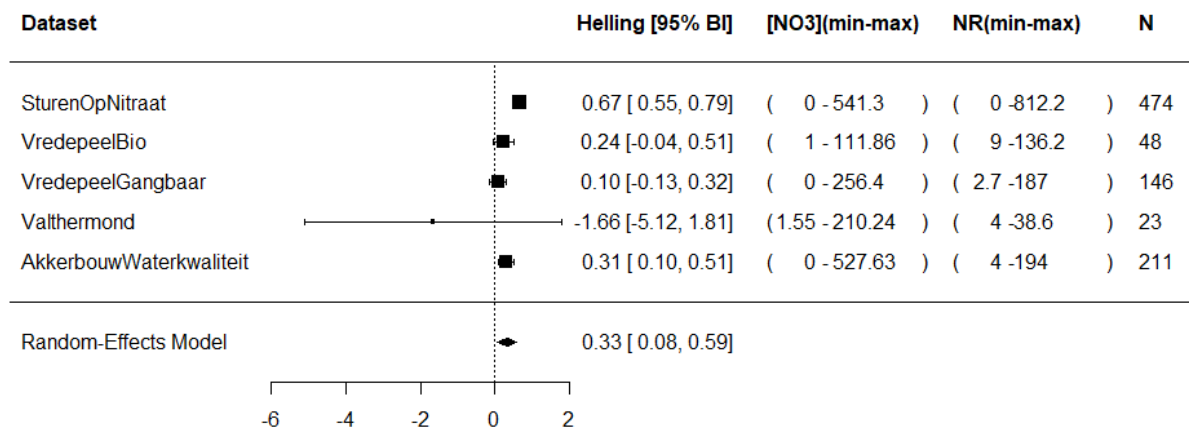
Figuur 6. Forestplot van een meta-analyse model van verschillende datasets voor akkerbouw (groepen a, b en r) geanalyseerd met lineaire regressiemodel 1 uit (Hack-ten Broeke et al., 2004) (sectie 3.1.2). De schatting onder de onderste streep geeft het resultaat van de meta-analyse weer. De helling betreft hier de helling van de relatie tussen NR en de nitraatconcentratie. De ranges van deze variabelen en de grootte van de verschillende datasets (N) zijn ook weergegeven.

Niet alleen de helling (de stijging van het NO₃-gehalte bij een stijging van NR met 100 kg/ha) verschilt tussen de datasets; ook de asafsnode (Tabel A1). Dit kan in theorie geïnterpreteerd worden als de Nitraatconcentratie bij een gemeten NR van 0. Deze verschillen per dataset, en ook met de asafsnedes gerapporteerd in (Hack-ten Broeke et al., 2004). Over het algemeen zijn deze hoger bij lagere gemiddeld grondwaterstanden en lager op moerige gronden dan op andere zandgronden. Wel liggen veel asafsnedes in

⁸ De Nitraatwijzer dataset heeft hier een grote invloed op de uitkomst; als deze weggelaten wordt is er nog steeds een interactie maar de richting verschilt.

de buurt van de 50 mg/L wat suggereert dat de modellen voorspellen dat ook bij lage NR waarden de Nitraatconcentratie niet snel onder de norm zal liggen.

Bij grasland en maïs bij melkveebedrijven konden alleen de gegevens van de Nitraatwijzer pilot gebruikt worden. Bij grasland laten die een significant positieve relatie zien (0.22, 95% BI: 0.046-0.4), die wel lager is dan gevonden in (Hack-ten Broeke et al., 2004) (0.65, 95% BI:0.532-0.768). Bij maïs is de relatie ook positief maar niet significant (0.25; 95% BI:-0.22-0.73) en ook lager dan gevonden in (Hack-ten Broeke et al., 2004) (0.76; 95% BI: 0.50-1.02).



Figuur 7 Forestplot van een meta-analyse model van verschillende datasets voor akkerbouw (groepen a, b en r) geanalyseerd met lineaire regressiemodel 2 uit (Hack-ten Broeke et al., 2004) (sectie 3.1.2). De schatting onder de onderste streep geeft het resultaat van de meta-analyse weer. De helling betreft hier de helling van de relatie tussen NR en de nitraatconcentratie. De ranges van deze variabelen en de grootte van de verschillende datasets (N) zijn ook weergegeven.

Tabel 6. Resultaten modelselectie gepoolde regressieanalyses

Basis	Pooled 1 (N = 302)	Pooled 2 (N = 172 ²)	Pooled 3 (N = 89 ³)
[NO3] ~	[NO3] ~	[NO3] ~	[NO3] ~
a ₁ NR +		a ₁ NR +	
a ₂ Neerslagoverschot2:NR ¹ +			
a ₃ Neerslagoverschot1 +	a ₃ Neerslagoverschot1 +	a ₃ Neerslagoverschot1 +	
a ₄ Neerslagoverschot2 ¹ +			
a ₅ Grondwaterklasse:NR +	a ₅ Grondwaterklasse:NR +		
a ₆ Grondwaterklasse +	a ₆ Grondwaterklasse +		
a ₇ Gewasgroep	a ₇ Gewasgroep	a ₇ Gewasgroep	a ₇ Gewasgroep
a ₈ Grondsoort	a ₈ Grondsoort		
a ₉ Noverschot		a ₉ Nwerkzaamoverschot2jaar	
(1 perceel) + (1 jaar)	(1 perceel) + (1 jaar)	(1 perceel) + (1 jaar)	(1 perceel) + (1 jaar)

¹ Weggelaten in alle modellen omdat bij indeling in categorieën (laag/hoog) observaties alleen in de categorie laag vielen.

² Alleen observaties uit categorie "Droog" geselecteerd omdat er maar twee observaties in de categorie "Vochtig" waren. De set bevat ook alleen observaties met grondsoort "Zand".

³ Bevat alleen observaties met grondwaterklasse "Droog", grondsoort "Zand", Neerslagoverschot1 "Negatief", en Neerslagoverschot2 "Laag".

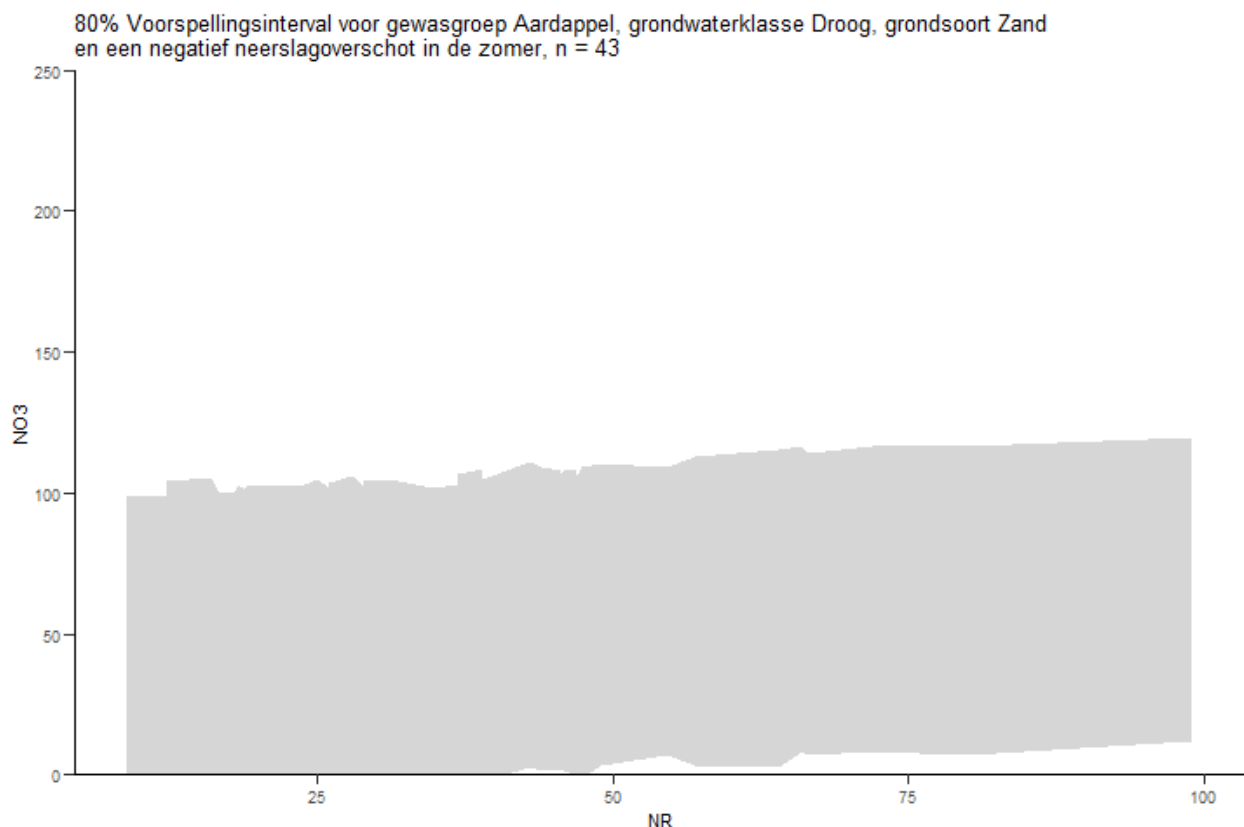
Gepoolde regressieanalyses

De best passende modellen uit de gepoolde analyses zijn weergegeven in Tabel 6. Uit de modelselectie op de eerste set van gepoolde observaties komt een interactie naar voren tussen grondwaterklasse en NR: de relatie tussen nitraatconcentratie en NR is sterker voor percelen met grondwaterklasse "Vochtig" (1.22, 95%

BI: 0.88-1.57) dan voor percelen met grondwaterklasse "Droog" (0.25, 95% BI: 0.05-0.45). Dit onderscheid volgt niet uit de twee andere modelselecties omdat daarin geen percelen met grondwaterklasse "Vochtig" zijn meegenomen. Uit modelselectie 2 blijkt nog steeds een effect van NR (0.30, 95% BI: 0.09-0.51) maar voor modelselectie 3 draagt NR niet meer bij aan een goed passend model. In modelselectie 2 draagt het cumulatieve werkzame stikstof overschot over 2 jaar ook bij (0.13, 95% BI: 0.07-0.20).

Onzekerheidskarakterisering

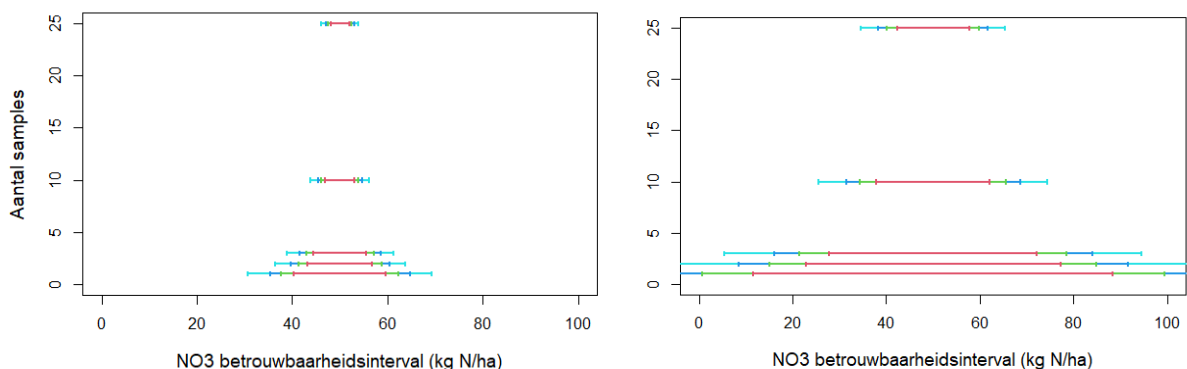
De gevonden asafsnedes en betrouwbaarheidsintervallen rond de gevonden schattingen impliceren een grote onzekerheid. Die is weergegeven in Figuur 8 bij aardappel op droge zandgronden. Daarin is de grote 80% voorspellingsinterval te zien die niet onder de 50 mg/l nitraat komt. Bij hogere waarden van NR wordt het wel steeds zekerder dat de norm niet gehaald wordt. Dergelijke voorspellingsintervallen zijn vergelijkbaar voor andere combinaties van grondsoort, grondwaterklasse en neerslagoverschot (Appendix 1).



Figuur 8. 80% Voorspellingsinterval op basis van het geselecteerde model uit gepoolde dataset 1 (Tabel 6) gesimuleerd zonder willekeurige variatie bij aardappel op droge zandgronden.

Betere voorspelling vraagt andere aanpak van meting nitraat

Het is de vraag of de onzekerheid in de voorspelling van de relatie NR en nitraatuitspoeling veroorzaakt wordt doordat de relatie daadwerkelijk zwak is of door de meetmethode. De meetmethode maakt het onwaarschijnlijk is dat een dergelijke voorspelling makkelijk verbeterd kan worden. Dit heeft te maken met de variatie in nitraatconcentraties op percelen. In sectie 2.1 is beschreven dat die variatie aanzienlijk kan zijn. Dit kan ook worden geïllustreerd door de nitraatmetingen van Vredepeel. Op deze locatie blijkt de variatiecoëfficiënt voor een aantal percelen in sommige jaren op te kunnen lopen tot meer dan 1,5. Bij een variatiecoëfficiënt van 0,6 zal met drie metingen per perceel een gemeten nitraatconcentratie van 50 mg/L met 95% zekerheid tussen de 16 en 84 mg/L liggen (Figuur 9). Met een dergelijk betrouwbare meting kan een voorspelling ook nooit preciezer zijn.



Figuur 9. Betrouwbaarheidsintervallen (rood 80%; groen 90%; donkerblauw 95%; lichtblauw 99%) van de gemiddelde gemeten nitraatconcentratie voor verschillende aantallen samples, bij een variatiecoëfficiënt van 0,15 (links) en een variatiecoëfficiënt van 0,6 (rechts).

3.3.3 Effect van N-bodemoverschot op voorspelling van nitraatconcentratie

Het meenemen van het N-bodemoverschot in modellen voor voorspelling van nitraatconcentratie levert geen eenduidig beeld op. In de modelselecties die in sectie 3.3.2 besproken zijn (Tabel 6) helpt het cumulatieve minerale N-bodemoverschot over twee jaar om ongeveer 6% van de residuele variantie te voorspellen terwijl NR helpt om 8% te voorspellen, en er blijft nog aanzienlijke onverklaarde variantie over. In de andere modelselecties levert het meenemen van N-bodemoverschot geen verbetering van het model op en had N-bodemoverschot ook geen significant effect op de nitraatconcentratie.

Naast deze modelselecties zijn ook modelselecties uitgevoerd voor de afzonderlijke datasets van Akkerbouw voor Waterkwaliteit en Vredepeel. Daarin kwam in beide datasets een effect van het minerale N overschot naar voren. In Akkerbouw voor Waterkwaliteit en de gangbare Vredepeel dataset was het effect van het minerale N overschot niet significant (in overeenstemming met eerder gepubliceerde analyses door de Haan et al., 2018b maar in tegenstelling tot een eerder onderzoek bij snijmaïs op Vredepeel door van Geel et al., 2024) maar in de biologische Vredepeel dataset was het minerale N overschot zelfs een betere voorspeller van de nitraatconcentratie dan NR (0.14 mg/l per kg N/ha, 95% BI:0.04-0.25).

4 Synthese

Dit rapport richt zich op drie vragen: over de bronnen van variatie in NR metingen; over de relatie tussen nitraatconcentratie en NR; en over de invloed van het N-bodemoverschot op deze relatie. Om met de eerste vraag te beginnen: de variatie in gerapporteerde NR metingen is aanzienlijk. Een deel van die variatie kan verklaard worden door de factoren gewastype, grondsoort en grondwaterstand. Uit zowel de literatuur en onderzochte databronnen, komt het beeld naar voren dat gemiddeld genomen de NR lager zal liggen bij suikerbieten en gras, en hoger bij aardappelen en bladgroenten. De waarden bij maïs, granen en overige groenten zullen daar meer tussenin liggen. Uit de onderzochte databronnen blijkt bovendien dat kleigronden gemiddeld genomen een lagere NR hebben dan andere gronden maar zowel in de onderzochte databronnen en de literatuur is de meeste aandacht voor zandgronden. Dat betekent dat de toepasbaarheid van de uitkomsten van deze studie voor andere gronden dan zandgronden beperkt is; zeker ook voor situaties waar niet alleen sprake is van verticale uitspoeling. De samenhang van het effect van grondwaterstand op NR met grondsoort die in de analyses naar voren komt vraagt dan ook om bevestiging met ander onderzoek. Neerslagoverschot komt uit de analyses niet naar voren als belangrijke voorspeller van de variabiliteit in NR metingen maar in de literatuur komt deze factor wel naar voren.

Management zal ook van invloed zijn op de gemeten NR waarde en lijkt daarmee ook een belangrijk voordeel van deze indicator: het maakt het mogelijk om te zien of bepaalde maatregelen effect hebben. Maatregelen die in het algemeen effect hebben op stikstofbeschikbaarheid en nitraatuitspoeling zullen ook effect hebben op NR. Dit gaat om maatregelen die gaan over hoeveel, waar, wanneer en welke stikstof wordt toegediend maar ook om maatregelen gericht op de verbetering van de bodemkwaliteit, gewasrotatie, en het gebruik van vanggewassen (D'Haene & Hofman, 2022; Noij & ten Berge, 2019). De effectiviteit van deze maatregelen zal niet overal hetzelfde zijn maar door ondernemers toegespitst worden op hun eigen bedrijfsvoering. Dat het bemestingsniveau in de analyses weinig variatie in NR verklaart zal dan ook eerder een artefact van de analyse zijn, te verklaren door een geringe variatie in bemestingsniveaus en een sterke samenhang met gewasgroep, wat een belangrijke voorspeller is voor NR.

Een toename van de nitraatconcentratie met een toename van het NR is over het algemeen te verwachten blijkt zowel uit de literatuur als bij analyse van recente datasets. De ruis rond deze relatie maakt echter dat op perceelsniveau op dit moment niet goed te voorspellen is wat de nitraatconcentratie zal zijn bij een gemeten NR. De sterkte van de relatie tussen nitraatconcentratie en NR die volgt uit analyse van recente datasets lijkt bovendien kleiner dan te verwachten op basis van bestaande inzichten in de transport en omzetting van nitraat en kleiner dan uit de eerdere Sturen op Nitraat studie naar voren kwam. Op een regionaal schaalniveau is te verwachten dat de relatie tussen NR en nitraatconcentratie betrouwbaarder is.

Een deel van de ruis rond de relatie tussen nitraatconcentratie en NR hangt samen met de variatie in gemeten nitraatconcentratie op een perceel. Deze ruimtelijke variatie kan aanzienlijk zijn, zo blijkt uit eerdere studies (Noij & ten Berge, 2019; Smit et al., 2005; Steenvoorden et al., 1986). Dat wordt slechts beperkt ondervangen door de drie metingen per perceel die in de meeste studies gebruikt zijn. De grote betrouwbaarheidsintervallen die daardoor rond metingen van nitraatconcentratie zullen liggen, maakt dat voorspellingen niet heel precies kunnen worden, zolang data gebaseerd zijn op nitraatmetingen met een dichtheid van drie boorpunten per perceel. Het aantal metingen van de nitraatconcentratie moet aanzienlijk toenemen om de gemiddelde nitraatconcentratie op een perceel nauwkeurig te kunnen voorspellen. Een bijkomende moeilijkheid is dat zowel NR als de nitraatconcentratie aanzienlijk kunnen variëren over de tijd. Dat zorgt voor extra onzekerheid en daarmee ruis voor het bepalen van de relatie.

Naast de variatie in gemeten nitraatconcentraties op een perceel speelt ook mee dat niet alleen NR maar ook andere factoren van invloed zijn op de hoogte van de nitraatconcentratie. Ook neerslagoverschot, grondwaterstand, gewastype en grondsoort zijn van invloed, zo bevestigen analyses. Deze hebben niet alleen een effect aanvullend op NR, maar de resultaten suggereren ook een interactie van NR met grondwaterstand: op percelen met gemiddeld hoge grondwaterstanden is de relatie tussen NR en nitraatconcentratie sterker dan op percelen met gemiddeld lage grondwaterstanden.

De effecten van de verschillende factoren kon goed mee worden genomen. Daarmee kan een deel van de variatie in gemeten nitraatconcentraties worden verklaard dat niet door NR wordt verklaard maar er blijft een aanzienlijke onverklaarde variatie over. Deels kan dat samenhangen met het feit dat niet altijd gegevens op perceelsniveau zijn gebruikt; zoals het neerslagoverschot.

Alhoewel de nitraatconcentratie in uitspoelend water op landbouwbedrijven in februari belangrijk inzicht geeft in nitraatuitspoeling is dat niet enige relevante maatstaf in het kader van de Nitraatrichtlijn. Het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) meet de nitraatconcentratie in uitspoelend water in de Zandregio bijvoorbeeld in de zomer. De metingen vallen in die periode lager uit dan in de winter (RIVM, 2023). Dat kan te maken hebben met een geringe afbraak van nitraat. Naast de nitraatconcentratie in uitspoelend water worden ook oppervlaktewater en diepere grondwaterlagen gemonitord (Claessens et al., 2024). Dit laat zien dat uitspoeling bepaling op bedrijfsniveau niet alles zegt over regionale oppervlaktewater- en grondwaterkwaliteit, onder andere door de bijdrage van meerdere bronnen tegelijkertijd en historische uitspoeling.

De analyses geven geen heel duidelijk beeld van de bijdrage van het N-bodemoverschot aan de relatie tussen Nitraatconcentratie en NR. In sommige modelselecties komt het N-bodemoverschot wel terug met een significant positief effect op de nitraatconcentratie maar in andere niet. Daarbij komt ook niet naar voren dat een bepaalde definitie van het N-bodemoverschot beter voorspellend is. Wel is het zo dat een N mineraal bodemoverschot over twee jaren de beste voorspelling gaf voor de beperkte dataset waarmee deze analyse mogelijk was. Mogelijk levert een uitgebreidere dataset aanvullende inzichten op.

Conclusies

- Voor een juiste interpretatie van NR-metingen is het zinvol om onderscheid te maken naar gewas en grondsoort. Gemiddeld ligt de NR lager bij suikerbieten en gras, en hoger bij aardappelen en bladgroenten terwijl de waarden bij maïs, granen en overige groenten er tussenin zullen liggen. Bij kleigronden ligt de NR gemiddeld lager dan op zandgrond.
- De nitraatconcentratie neemt over het algemeen toe met een toename van NR maar door de ruis om deze relatie is de nitraatconcentratie op perceelsniveau op dit moment niet nauwkeurig te voorspellen.
- NR verklaart over het algemeen meer variatie in nitraatconcentratie dan het N-bodemoverschot.

Aanbevelingen

- Blijf bij jaarlijkse bepaling van NR op veel bedrijven, de resultaten uitsplitsen naar gewas, grondsoort en grondwatertrap om een scherper beeld te krijgen van de te verwachten NR per situatie.
- Gebruik NR vooralsnog niet als directe voorspeller van de nitraatconcentratie op perceelsniveau, maar eventueel wel als hulpmiddel voor sturing door ondernemers of het signaleren van hoge mestaanwending.
- Om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen nitraatconcentratie in uitspoelend water en NR, zal de bepaling van de nitraatconcentratie ruimtelijk en temporeel beter afgestemd moeten worden op de bepaling van NR.

Literatuur

- Berge, H. F. M. ten, Burgers, S. L. G. E., Hack-ten Broeke, M. J. D., Smit, A., Gruijter, J. J. de, Velthof, G. L., Schröder, J. J., Oenema, J., Ruijter, F. J. de, Radersma, S., Hoving, I. E., & Boels, D. (2004). Nitrogen rate, surplus or residue? Performance of selected indicators for nitrate leaching. In D. J. Hatc, D. R. Chadwick, S. C. Jarvis, & J. A. Roker (Eds.), *Controlling nitrogen flows and losses* (pp. 397–405). Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-528-4>
- Brussée, T. J., Negash, A., & Oosterwoud, M. R. (2024). *De uitspoeling van het stikstofoverschot naar grond- en oppervlaktewater op landbouwbedrijven*. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2024-0108>
- Claessens, J., van Gils, D., Brussée, T., Vrijhoef, A., van Duijnen, R., Oosterwoud, M., Plette, A., Kotte, M., Rozemeijer, J., Ouwerkerk, K., Gosseling, M., Roskam, J., & Taconis, F. (2024). *Landbouwpraktijk en waterkwaliteit in Nederland; toestand (2020-2023) en trend (1992-2023). Resultaten van de monitoring van de effecten van de EU Nitraatrichtlijn actieprogramma's, 2024*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2024-0113>
- Conijn, J. G. (2005). *CNCRAS A dynamic simulation model for grassland management and C and N flows at field scale*. www.plant.wur.nl
- Corré, W. J., Lepelaar, A., Loman, H., Niers, H., Van Noordwijk, M., Whitmore, A. P., & Zwart, K. B. (1994). *Bepaling van de hoeveelheid minerale stikstof in de bodem in het najaar als instrument voor het te voeren stikstofbeleid Akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten*.
- de Haan, J., van Asperen, P., Visser, J., van der Burgt, G. J., Smit, E., Dawson, A., & Klompe, K. (2020). *Bodemmaatregelen op dalgrond in de Veenkoloniën: effecten op bodemkwaliteit, opbrengst en financiële meerwaarde: Analyse van de resultaten van de systeemproof Bodemkwaliteit Veenkoloniën 2014-2017*. <https://doi.org/10.18174/520429>
- de Haan, J., Wesselink, M., van Dijk, W., Verstegen, H., van Geel, W., & van den Berg, W. (2018a). *Biologische teelt op een zuidelijke zandgrond: opbrengst, bemesting, bodemkwaliteit en stikstofverliezen: Resultaten van het biologische bedrijfssysteem van het project Bodemkwaliteit op zand in de periode 2000-2016*. <https://doi.org/10.18174/440225>
- de Haan, J., Wesselink, M., van Dijk, W., Verstegen, H., van Geel, W., & van den Berg, W. (2018b). *Effect van organische stofbeheer op opbrengst, bodemkwaliteit en stikstofverliezen op een zuidelijke zandgrond: Resultaten van de gangbare bedrijfssystemen van het project Bodemkwaliteit op zand in de periode 2011-2016*. <https://doi.org/10.18174/440226>
- Dekker, N. J., & Verloop, J. (2023). Compost, nitraat en droogte. *V-Focus*, 28–31.
- D'Haene, K., & Hofman, G. (2022). *MILIEU-EN LANDBOUWKUNDIGE NITRAATSTIKSTOFRESIDU-DREMPELWAARDEN*.
- Dieser, M., Zieseniß, S., Mielenz, H., Müller, K., Greef, J. M., & Stever-Schoo, B. (2023). Nitrate leaching potential from arable land in Germany: Identifying most relevant factors. *Journal of Environmental Management*, 345, 118664. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118664>
- Fraters, B., Hooijboer, A. E. J., Vrijhoef, A., Plette, A. C. C., van Duijnhoven, N., Rozemeijer, J. C., Gosseling, M., Daatselaar, C. H. G., Roskam, J. L., & Begeman, H. A. L. (2020). *Landbouwpraktijk en waterkwaliteit in Nederland; toestand (2016-2019) en trend (1992-2019)*. www.rivm.nl
- Frick, H., Oberson, A., Frossard, E., & Bünemann, E. K. (2022). Leached nitrate under fertilised loamy soil originates mainly from mineralisation of soil organic N. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 338, 108093. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2022.108093>
- Gerritsen, S., van Dijk, W., & Verloop, K. (2025). *Protocol bepaling mineraal stikstofresidu*.
- Hack-ten Broeke, M. J. D., Burgers, S. L. G. E., ten Berge, H. F. M., de Gruijter, J. J., Hoving, I. E., Knotters, M., Radersma, S., & Velthof, G. L. (2004). *Ontwikkeling van een indicator om te Sturen Op Nitraat*.
- Hack-ten Broeke, M. J. D., de Boer, W. A., Dekkers, J. M. J., de Groot, W. J. M., & Jansen, E. J. (1993). *Stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op de proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel; resultaten van veldonderzoek op de proefbedrijven Borgerswold en Vredepeel in het voorjaar van 1991, 1992 en 1993*.
- Hofman, S. (2023). *Monsternamen van bodem op landbouwpercelen*.

- Hofman, S., & Brus, D. J. (2021). How many sampling points are needed to estimate the mean nitrate-N content of agricultural fields? A geostatistical simulation approach with uncertain variograms. *Geoderma*, 385, 114816. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114816>
- Inagro, & PCA. (2024). *Rijenbemesting van stikstof in aardappelen Opvolging praktijkpercelen*.
- Knowles, J. E., & Frederick, C. (2024). *merTools: Tools for Analyzing Mixed Effect Regression Models*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.merTools>
- Kroes, J., & Roelsma, J. (2007). Simulation of water and nitrogen flows on field scale; application of the SWAP-ANIMO model for the Müncheberg data set. *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems*, 111–128. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4479-3_9
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13). <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Noij, G.-J., & ten Berge, H. (2019). *Rapportage project Nitraatwijzer Fase I*. <https://doi.org/10.18174/494580>
- Oenema, J., Verloop, J., & Hooijboer, A. (2024). *Waterkwaliteit in Koeien & Kansen 1999-2022: een trendanalyse op bedrijfsniveau*. <https://doi.org/10.18174/687906>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RIVM. (2023, December). Vraag en antwoord. *LMM-Nieuws. Jaargang 16, Nr. 4*, 8–9. <https://www.rivm.nl/documenten/lmm-nieuws-december-2023>
- Sebilo, M., Mayer, B., Nicolardot, B., Pinay, G., & Mariotti, A. (2013). Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(45), 18185–18189. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1305372110>
- Smit, A. L., De Haan, J. J., & Zwart, K. B. (2005). *Kan de akkerbouw en groenteteelt op zandgrond voldoen aan de nitraatnorm? Resultaten Experimenteel Onderzoek op de Kernbedrijven Vredepeel en Meterik*.
- Sørensen, P., Pedersen, B. N., Thomsen, I. K., Eriksen, J., & Christensen, B. T. (2023). Plant availability and leaching of 15N-labelled mineral fertilizer residues retained in agricultural soil for 25 years: A lysimeter study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(4), 441–450. <https://doi.org/10.1002/JPLN.202200288>
- Steenvoorden, J., Fonck, H., & Oosterom, H. P. (1986). Losses of nitrogen from intensive grassland systems by leaching and surface runoff. *Nitrogen Fluxes in Intensive Grassland Systems*, 85–97. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4394-0_8
- Van de Weerd, H., & Torenbeek, R. (2007). *UITSPOELING VAN MESTSTOFFEN UIT GRASLAND*.
- Van Dijk, W., de Boer, J. A., Schils, R. L. M., de Haan, M. H. A., Mostert, P., Oenema, J., & Verloop, J. (2024). *Rekenregels van de KringloopWijzer 2024 : Achtergronden van BEX, BEA, BEN, BEP en BEC: actualisatie van de 2023-versie*. <https://doi.org/10.18174/678185>
- Van Enckevort, P. L. A., van der Schoot, J. R., & van den Berg, W. (2002). *Relatie tussen N-overschot en N-uitspoeling*. www.ppo.dlo.nl
- Van Geel, W., Rietra, R., Verstegen, H., Duan, K., Groenendijk, P., & Verhoeven, J. (2023). *Effect N-vanggewassen na aardappel op zandgrond op de nitraatuitspoeling : Verslag van driejarig veldonderzoek op zuidelijk zandgrond te Vredepeel*. <https://doi.org/10.18174/631358>
- Van Geel, W., Rietra, R., Verstegen, H., & Verhoeven, J. (2024). *Effect N-vanggewassen na snijmaïs op zandgrond op de nitraatuitspoeling : Verslag van vierjarig veldonderzoek op zuidelijk zandgrond te Vredepeel*. <https://doi.org/10.18174/658845>
- Van Meirvenne, M., & Hofman, G. (1989). Spatial variability of soil nitrate nitrogen after potatoes and its change during winter. *Plant and Soil*, 120(1), 103–110. <https://doi.org/10.1007/BF02370296>
- Verloop, J., van den Brink, C., & Gielen, J. (2025). Effectiveness of Voluntary Nutrient Management Measures to Reduce Nitrate Leaching on Dairy Farms Using Soil N Surplus as an Indicator. *Water*, 17(3), 455. <https://doi.org/10.3390/w17030455>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. *Journal of Statistical Software*, 36(3). <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
- Wesselink, M., & de Haan, J. (2024). *Akkerbouw voor Waterkwaliteit Voortgangsrapportage 2023*. <https://doi.org/10.18174/677112>
- Wolf, J., Broeke, M. J. D. H. Ten, & Rötter, R. (2005). Simulation of nitrogen leaching in sandy soils in The Netherlands with the ANIMO model and the integrated modelling system STONE. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(3), 523–540. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2004.07.010>

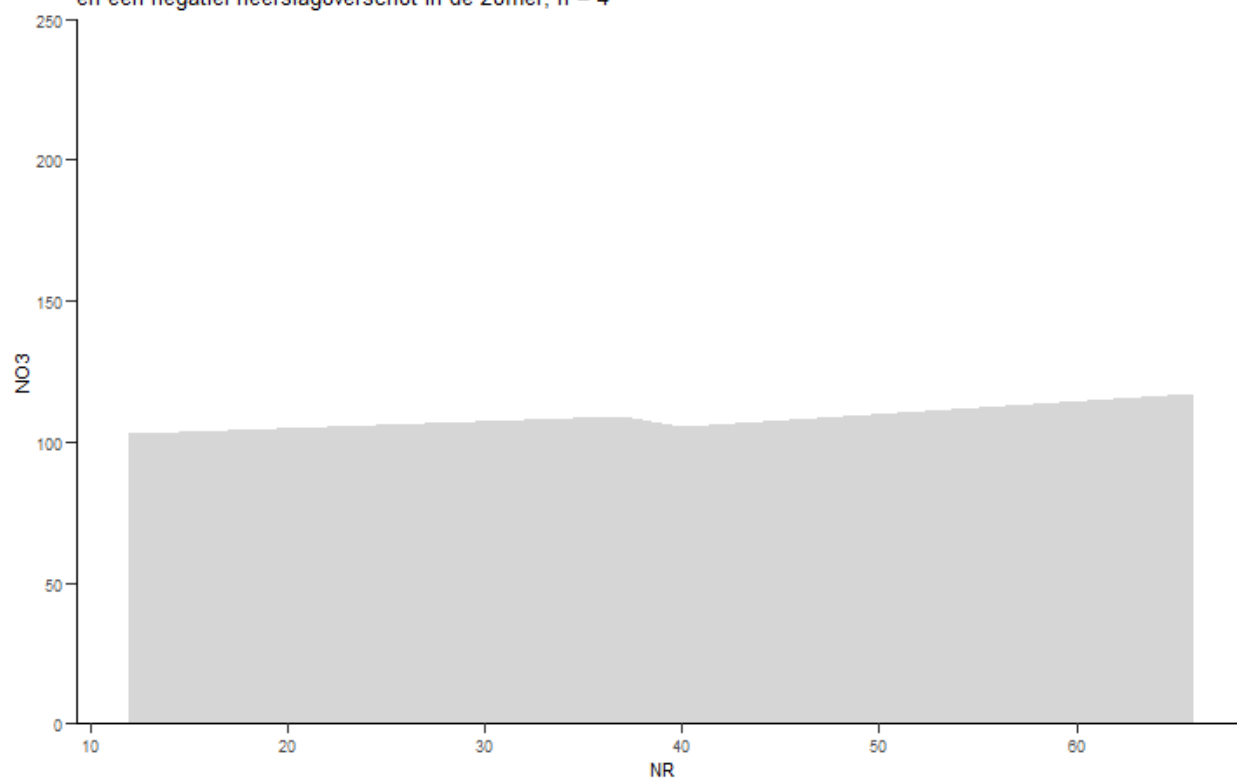
Wosten, J. H. M., Groenedijk, P., Veraart, J. A., & van der Lugt, L. M. (2019). *Soil Organic Matter and its Importance for Water Management*.

Appendix 1 Aanvullende tabellen en figuren

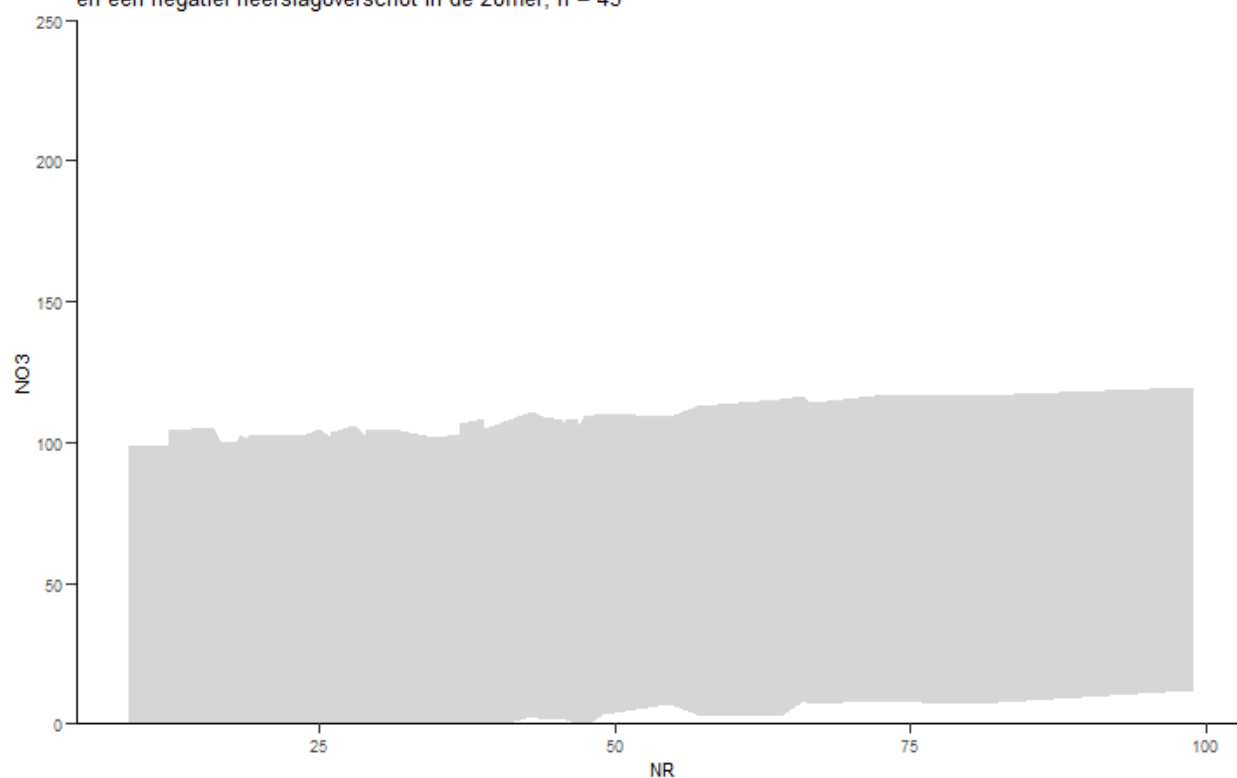
Tabel A1. Asafsnedes (constante C) van model 1 uit Hack-ten Broeke et al. (2004) voor analyses van verschillende datasets.

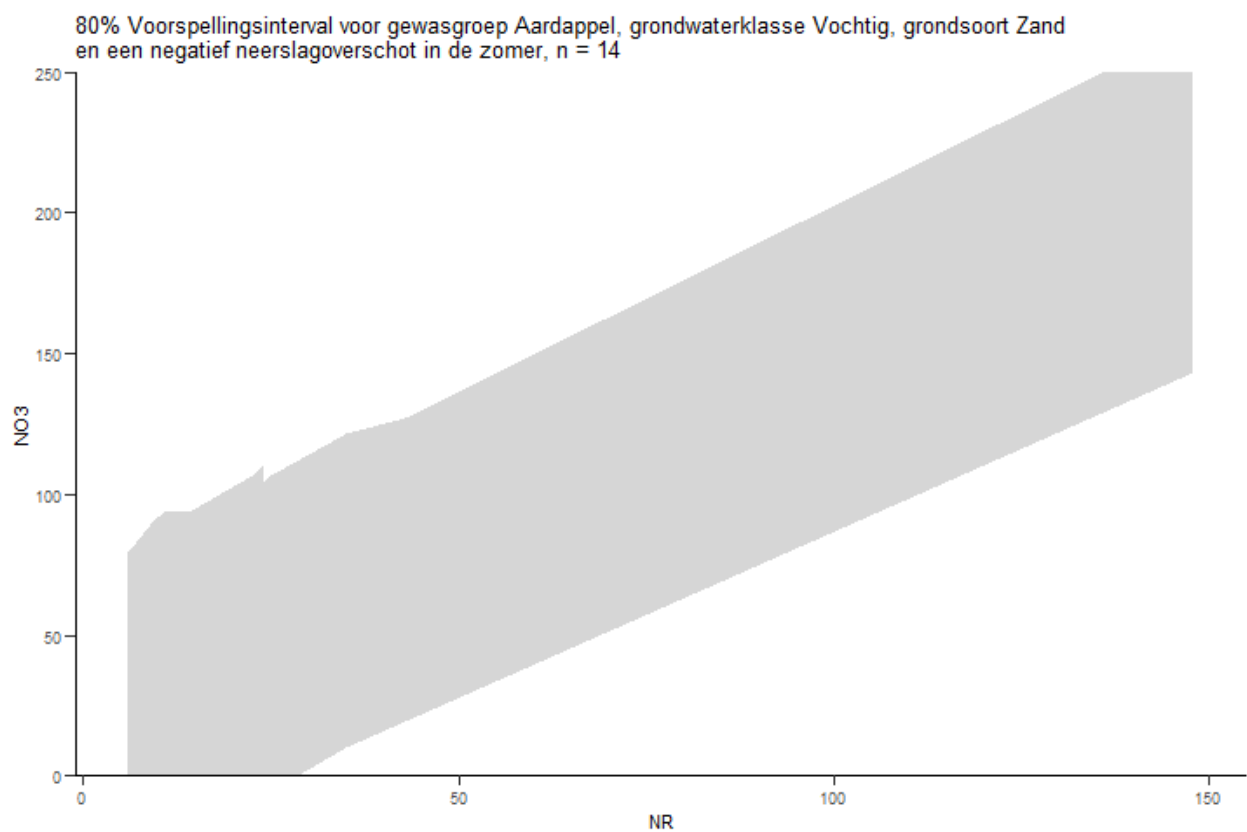
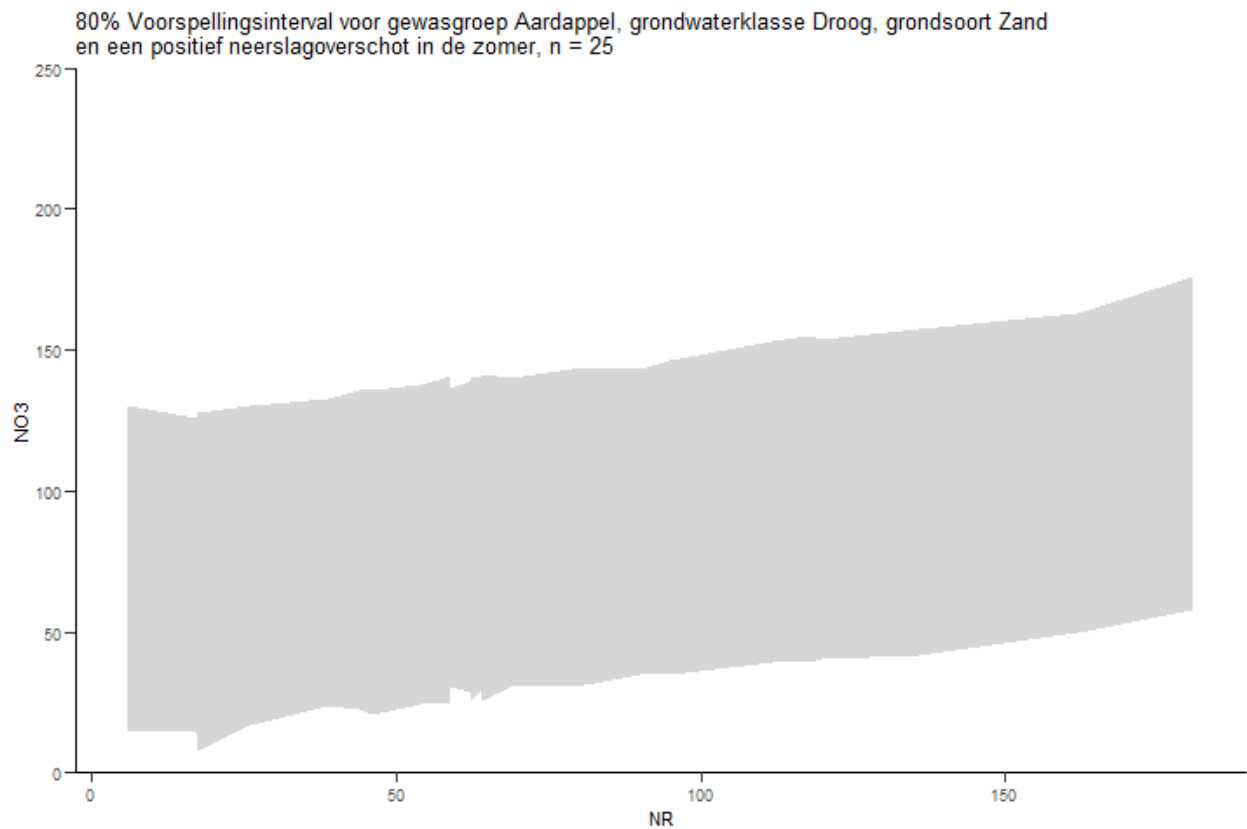
Gewas	Gt	Bodem	SturenOpNitraat	Vredepeel Bio	Vredepeel Gangbaar	Valthermond	Nitraatwijzer	Akkerbouw Waterkwaliteit
<i>abr</i>	1	<i>Loss</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	2	<i>Loss</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	3	<i>Loss</i>	28.5	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	1	<i>Loss</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	2	<i>Loss</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	3	<i>Loss</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	1	Z1	NA	NA	NA	NA	74.6	39.6
<i>abr</i>	2	Z1	27.4	NA	NA	NA	NA	29.6
<i>abr</i>	3	Z1	42.5	NA	NA	135.6	146.1	51.5
<i>t</i>	1	Z1	NA	NA	NA	NA	68.6	14.4
<i>t</i>	2	Z1	94.1	NA	NA	NA	NA	4.5
<i>t</i>	3	Z1	109.2	NA	NA	NA	140.1	26.4
<i>abr</i>	1	Z2	0.0	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	2	Z2	47.8	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	3	Z2	62.9	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	1	Z2	66.7	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	2	Z2	114.5	NA	NA	NA	NA	NA
<i>t</i>	3	Z2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>abr</i>	1	Z3	-4.3	NA	NA	NA	122.0	50.9
<i>abr</i>	2	Z3	43.5	NA	NA	NA	NA	41.0
<i>abr</i>	3	Z3	58.6	19.2	45.5	NA	193.5	62.9
<i>t</i>	1	Z3	62.4	NA	NA	NA	116.1	25.7
<i>t</i>	2	Z3	110.2	NA	NA	NA	NA	15.8
<i>t</i>	3	Z3	125.3	NA	NA	NA	187.5	37.7

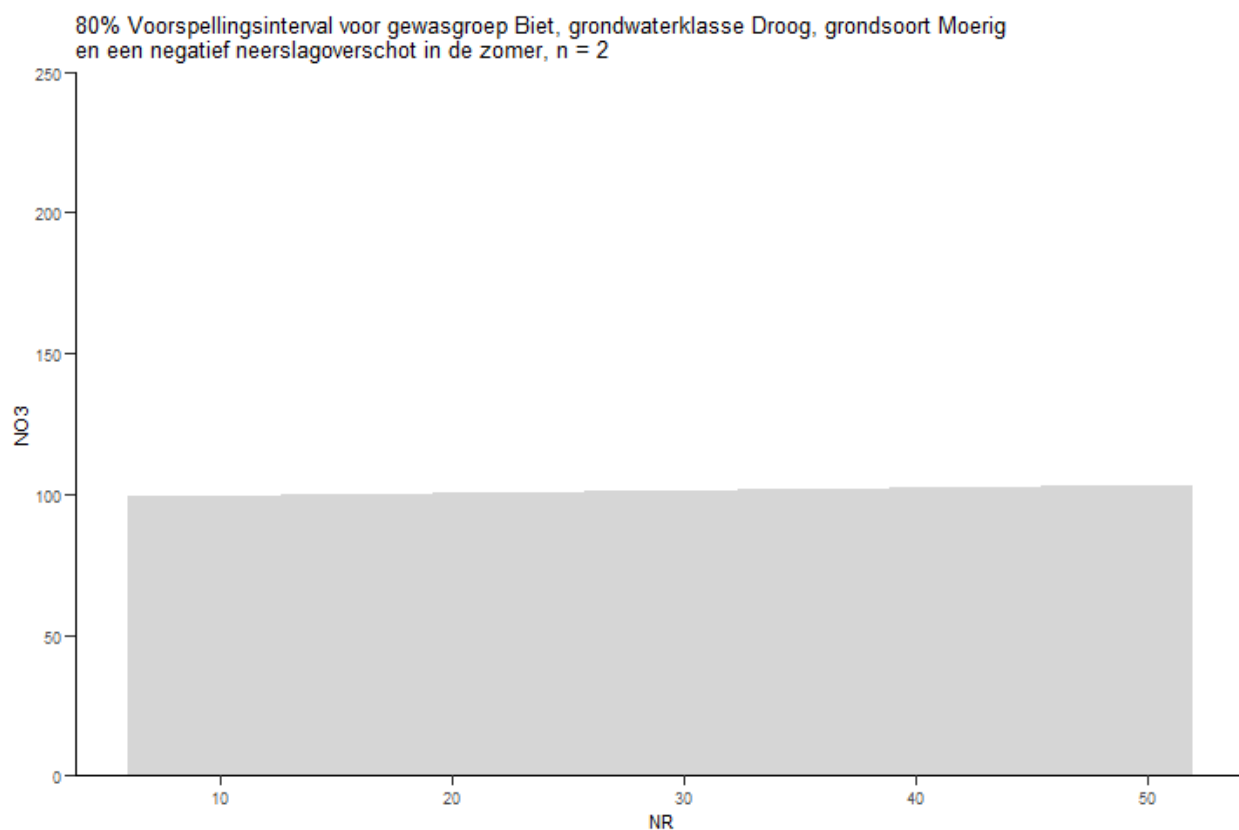
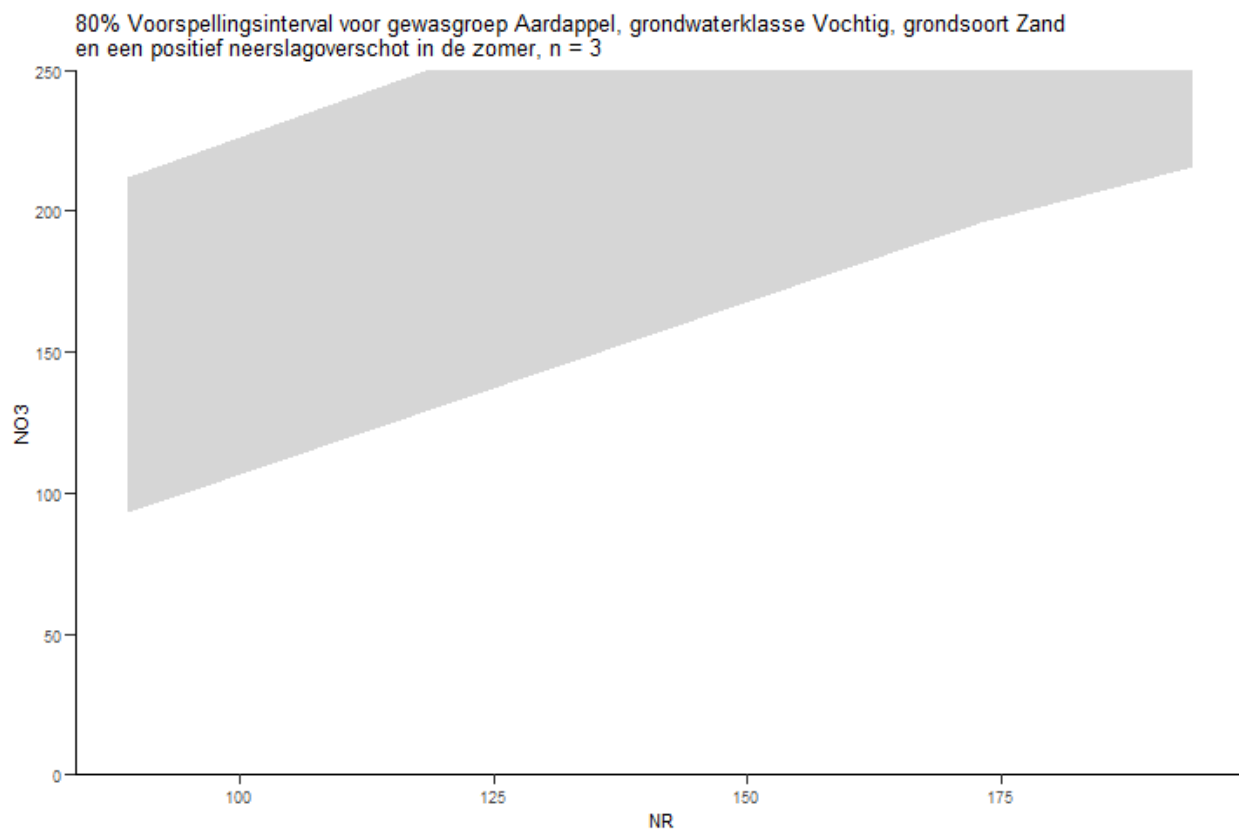
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Aardappel, grondwaterklasse Droog, grondsoort Moerig en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 4



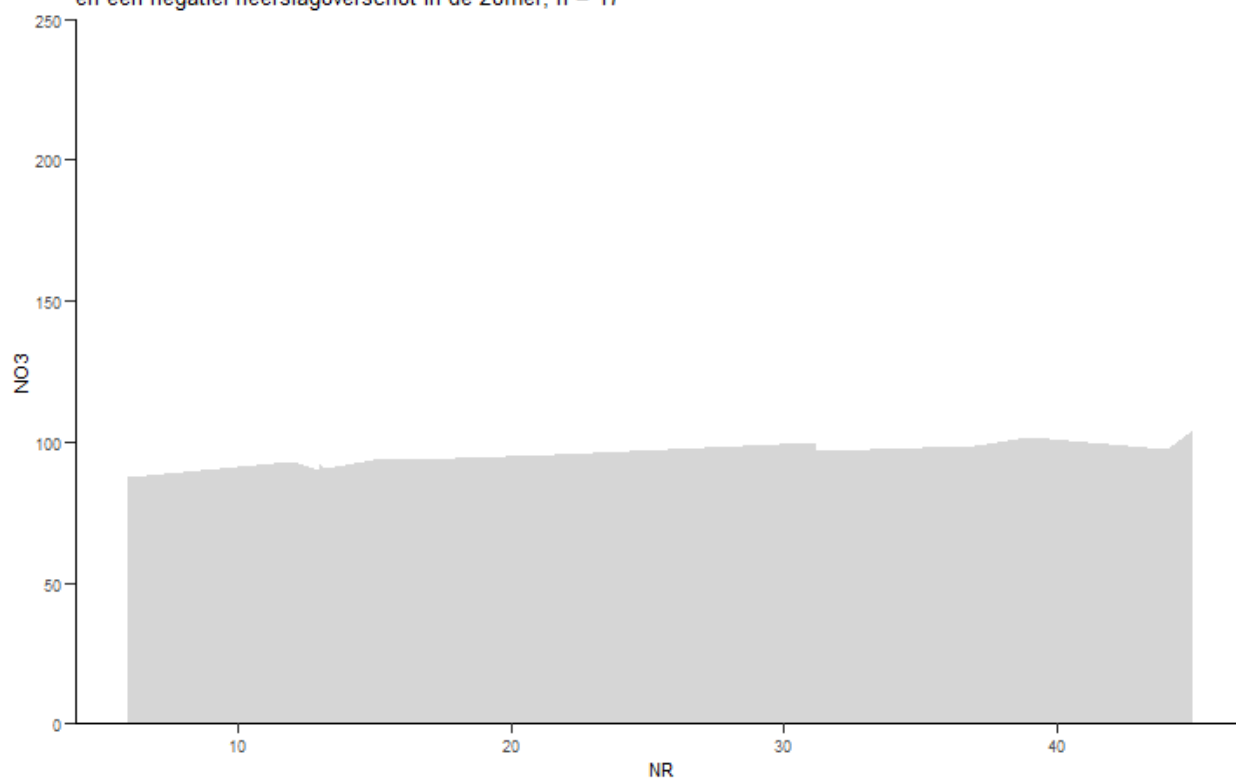
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Aardappel, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 43



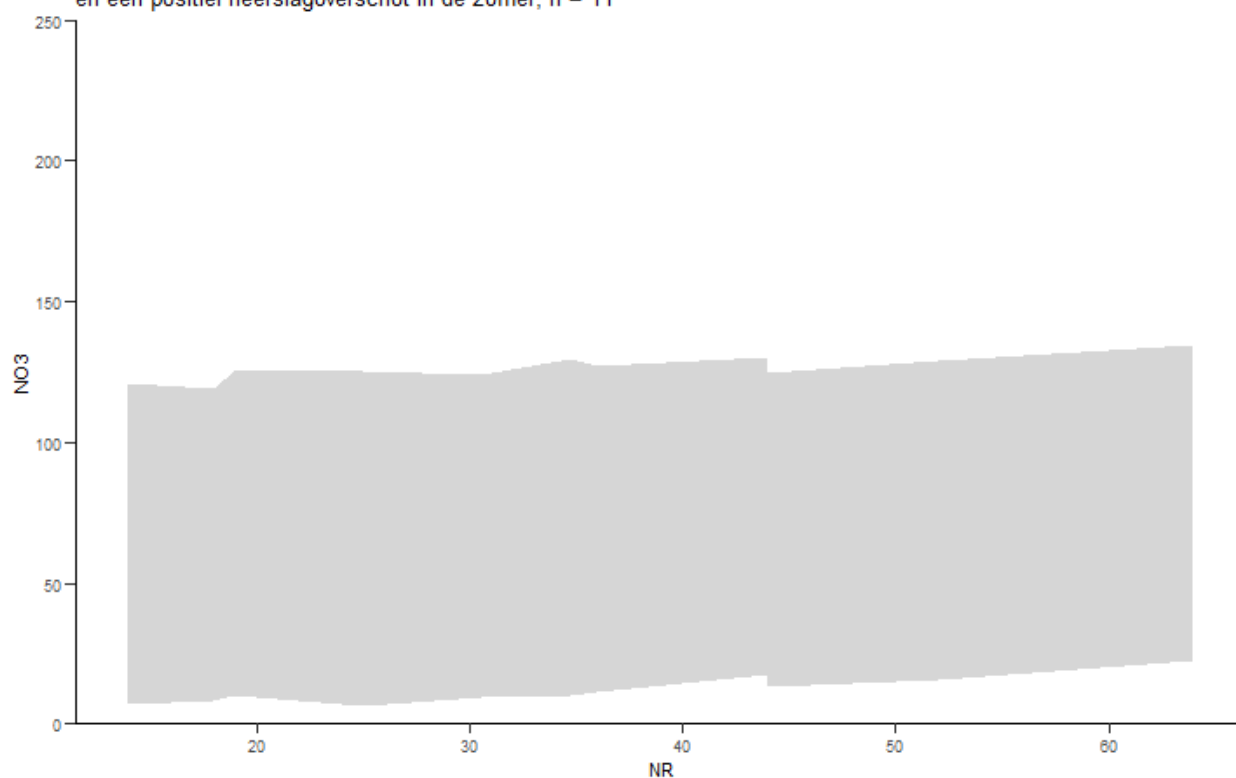




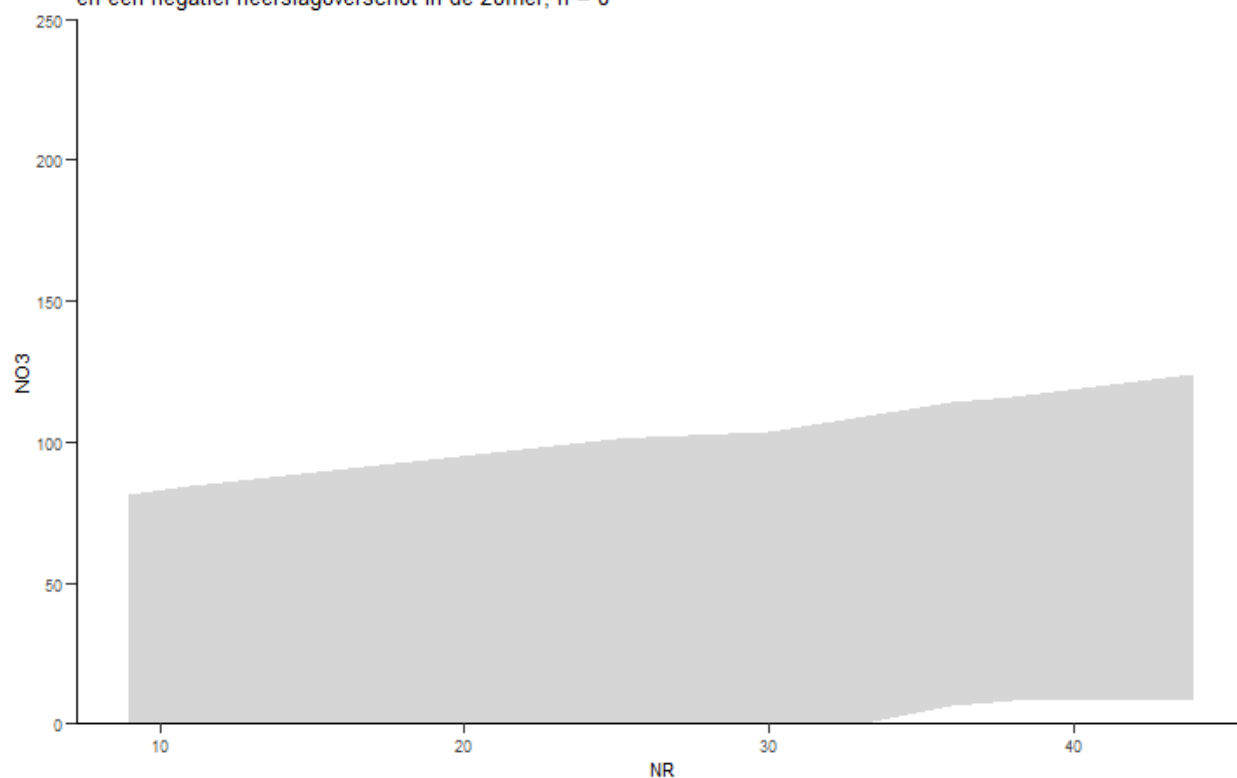
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Biet, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 17



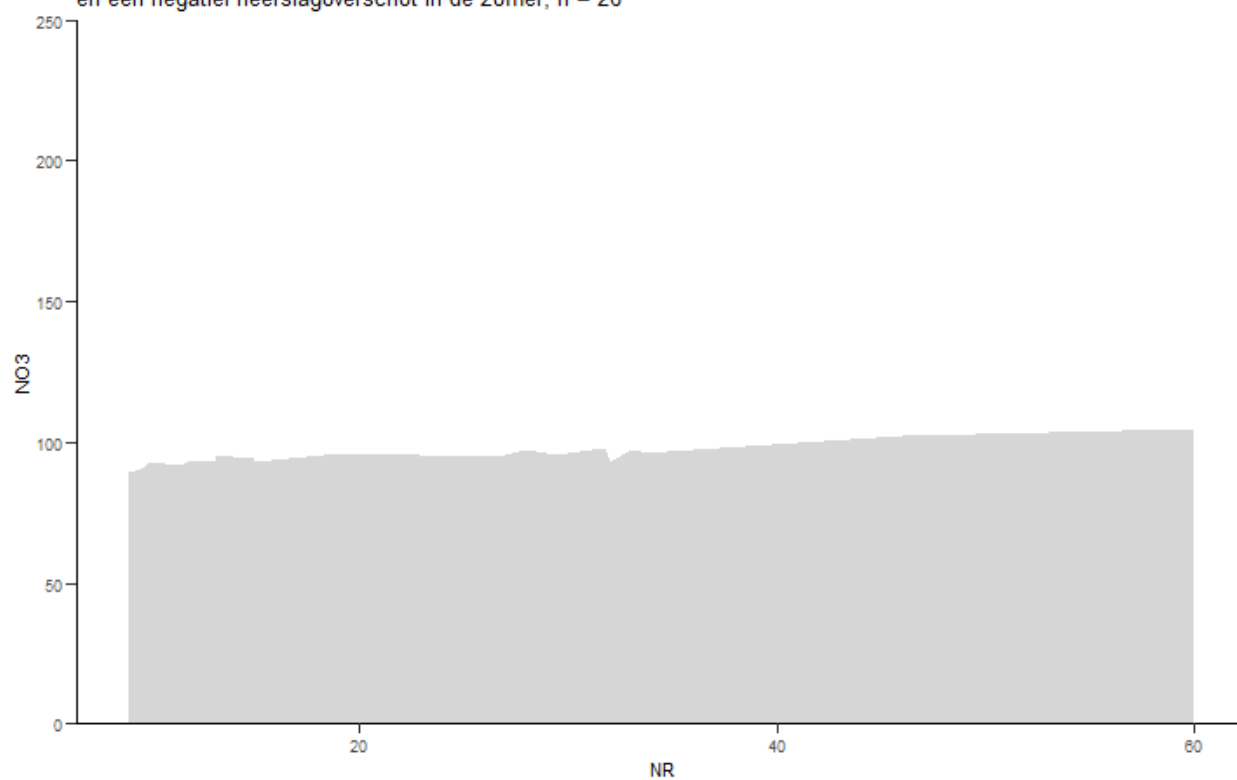
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Biet, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een positief neerslagoverschot in de zomer, n = 11

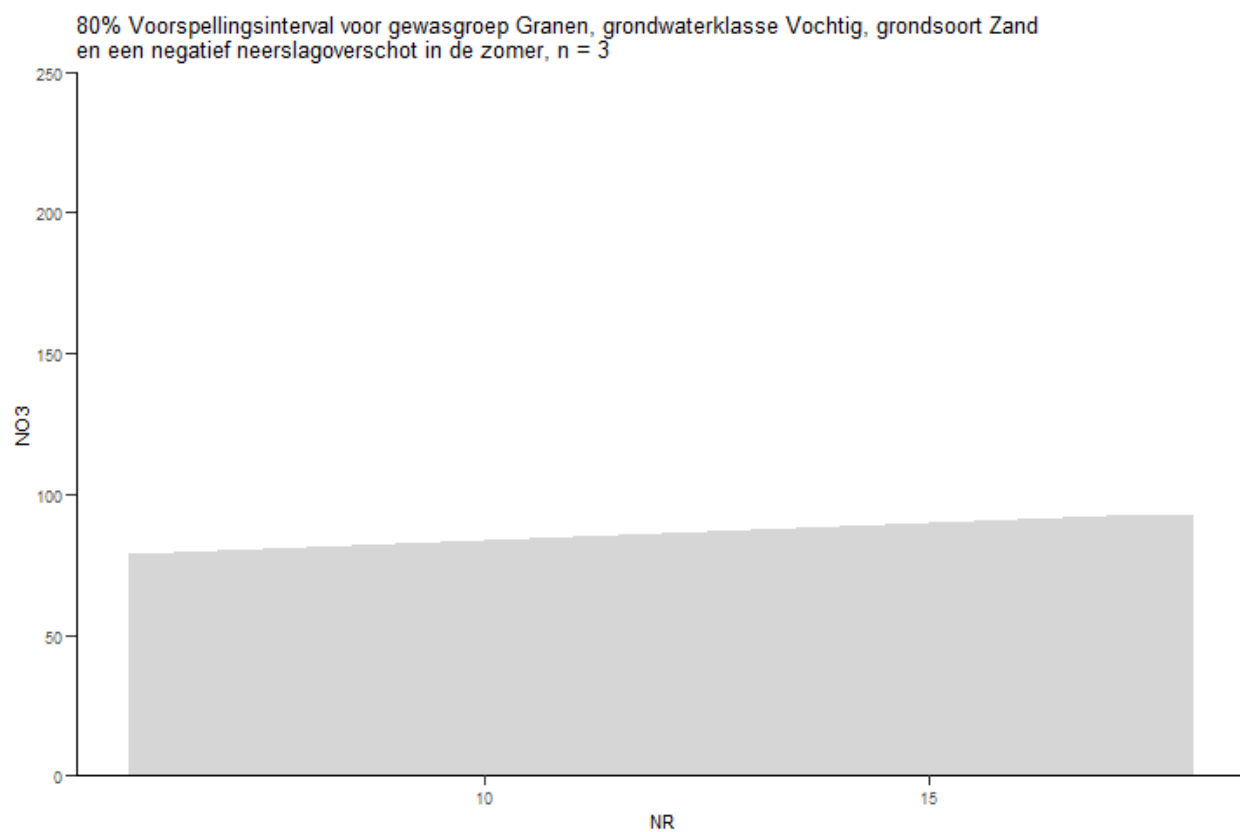
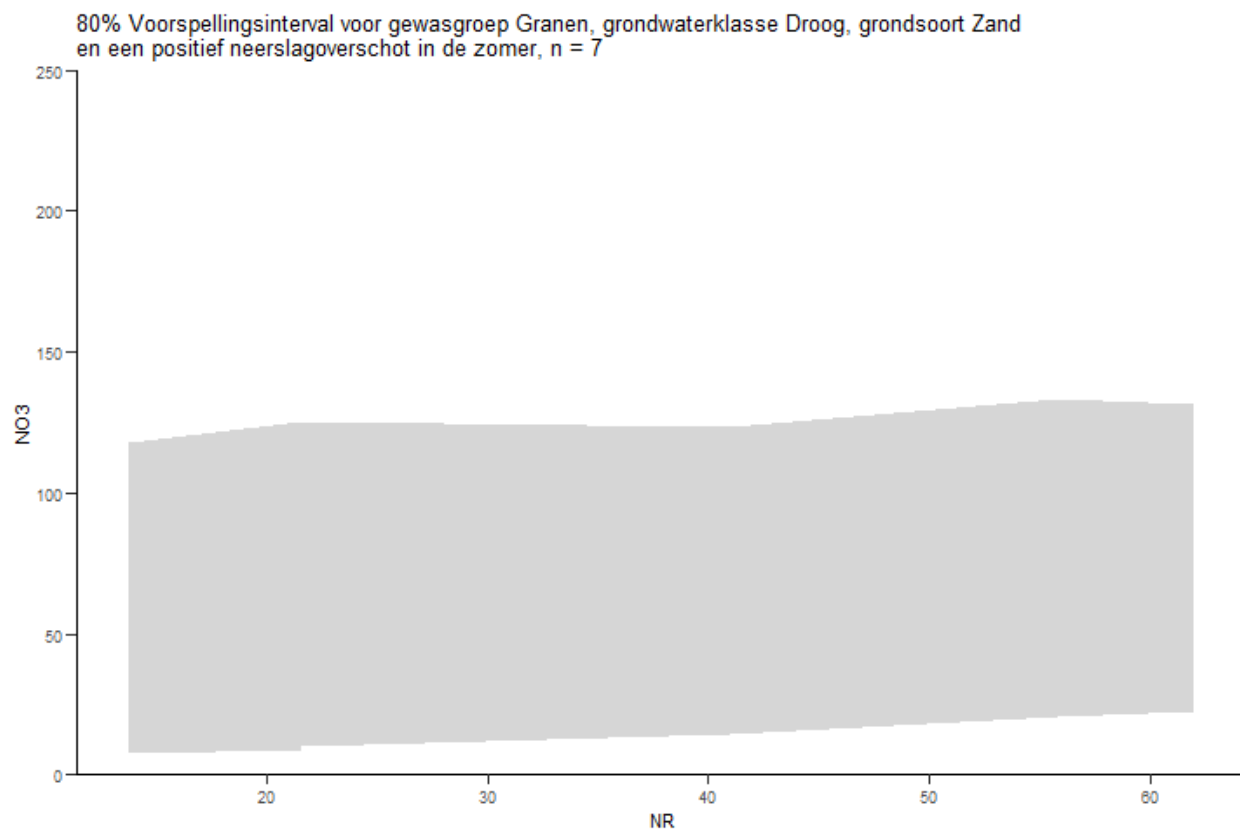


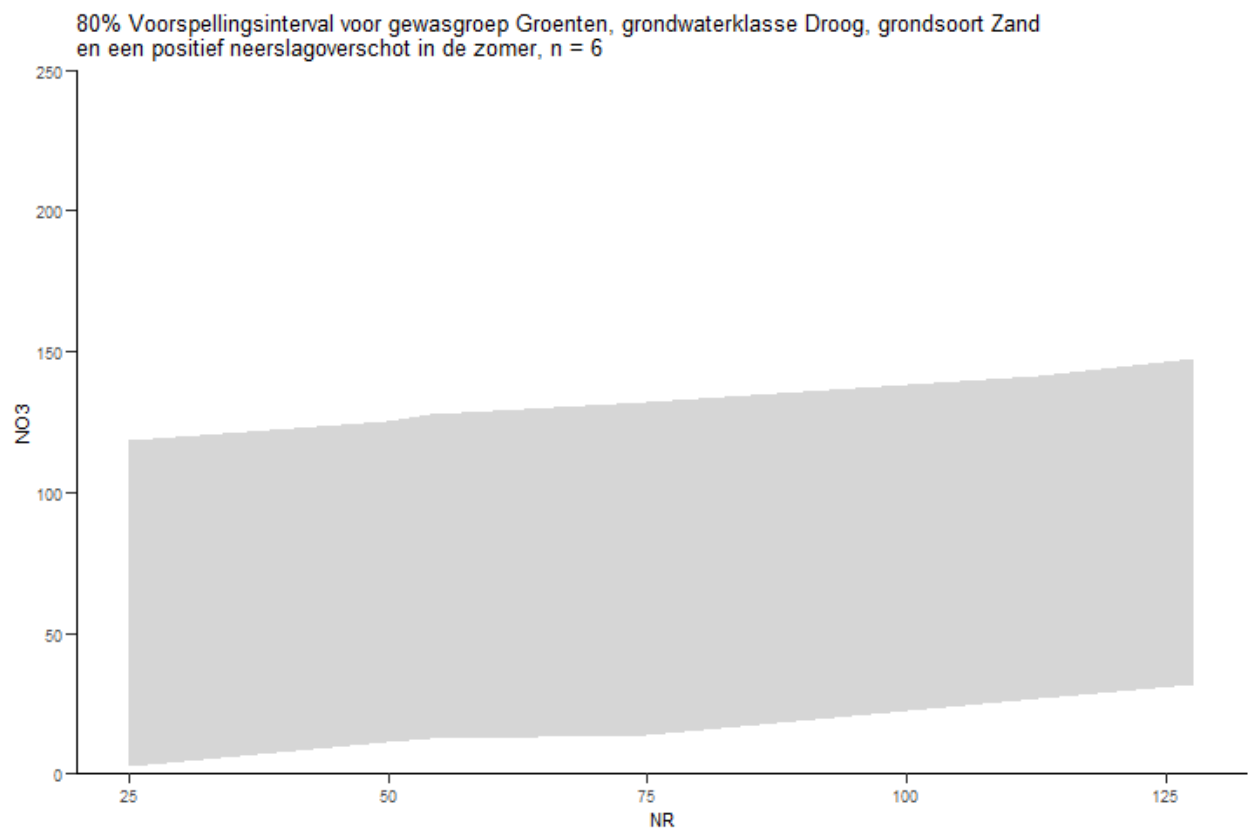
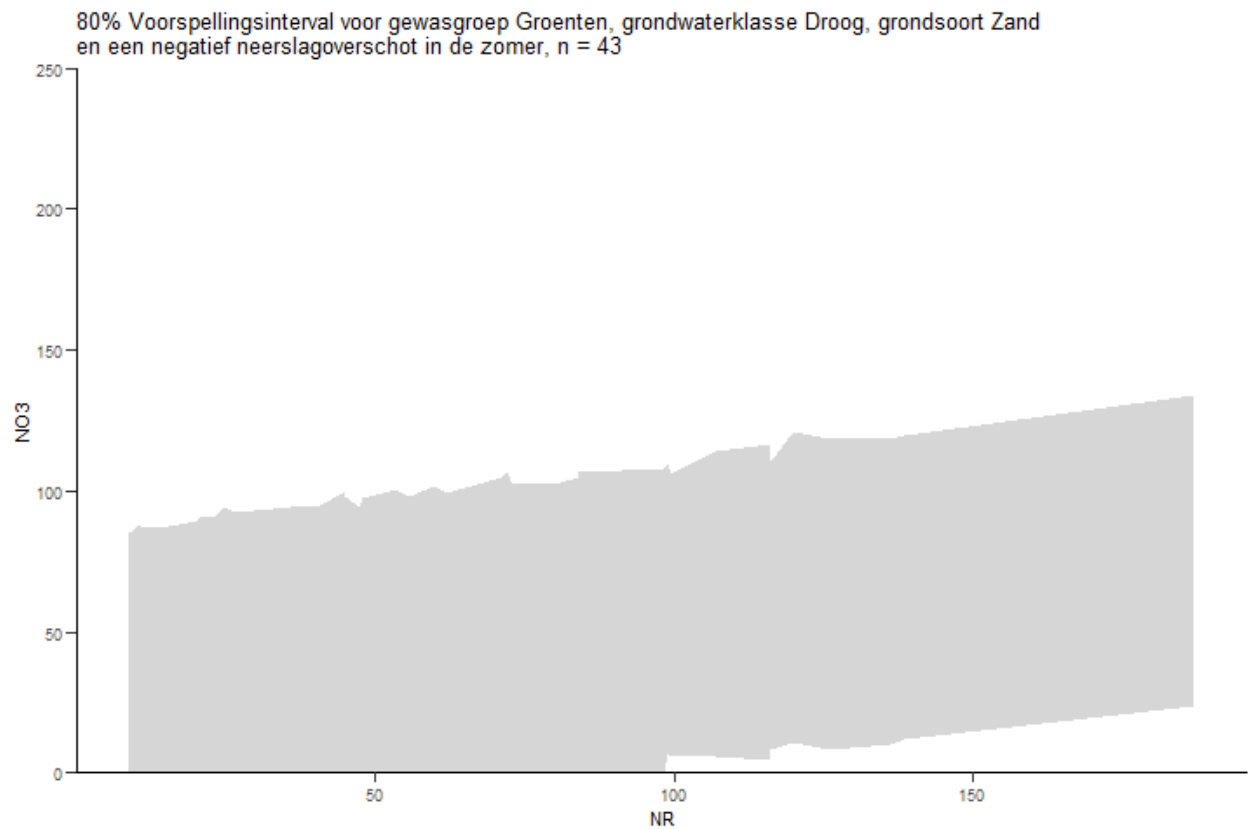
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Biet, grondwaterklasse Vochtig, grondsoort Zand en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 8



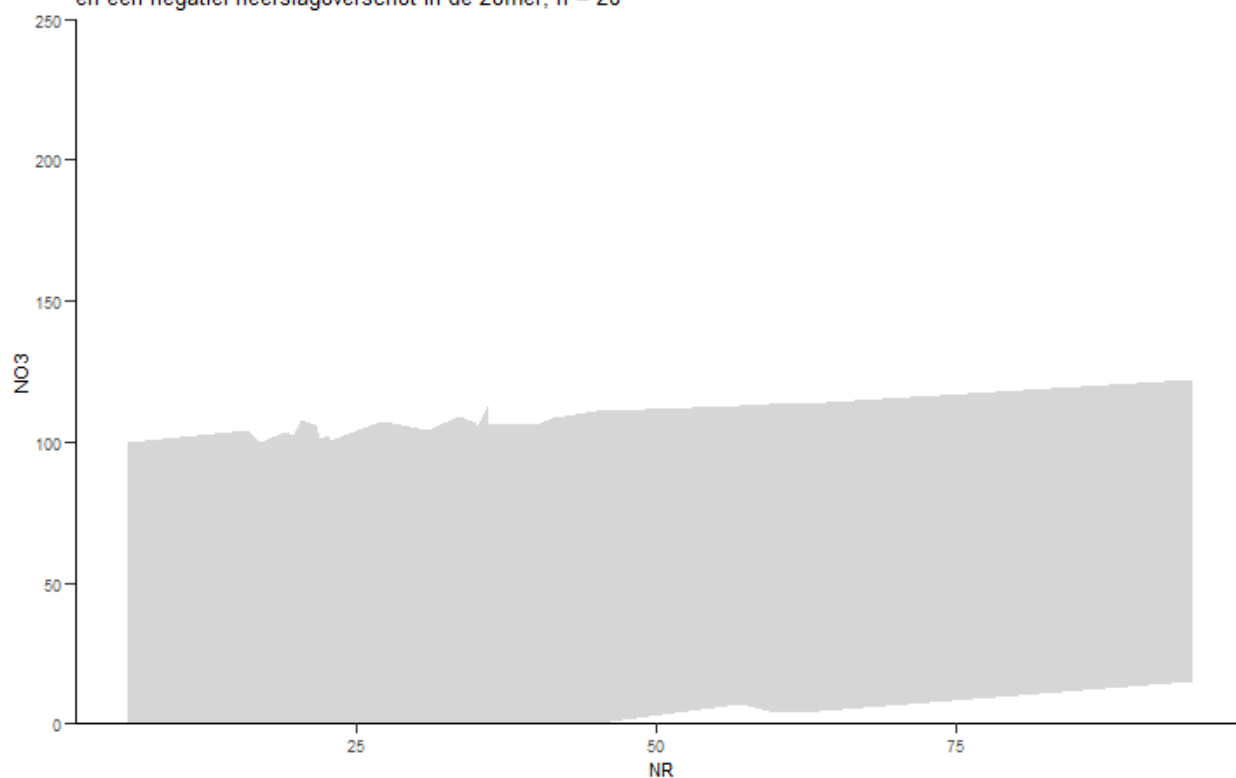
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Granen, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 26



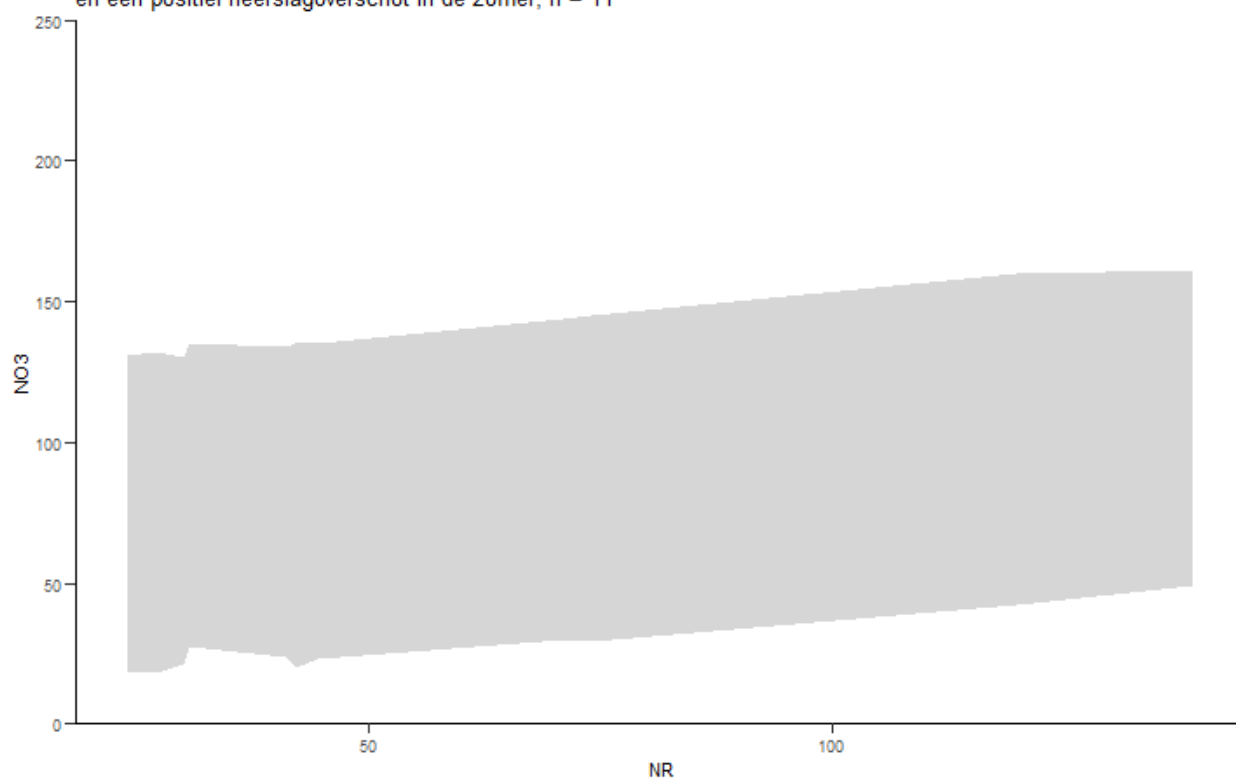


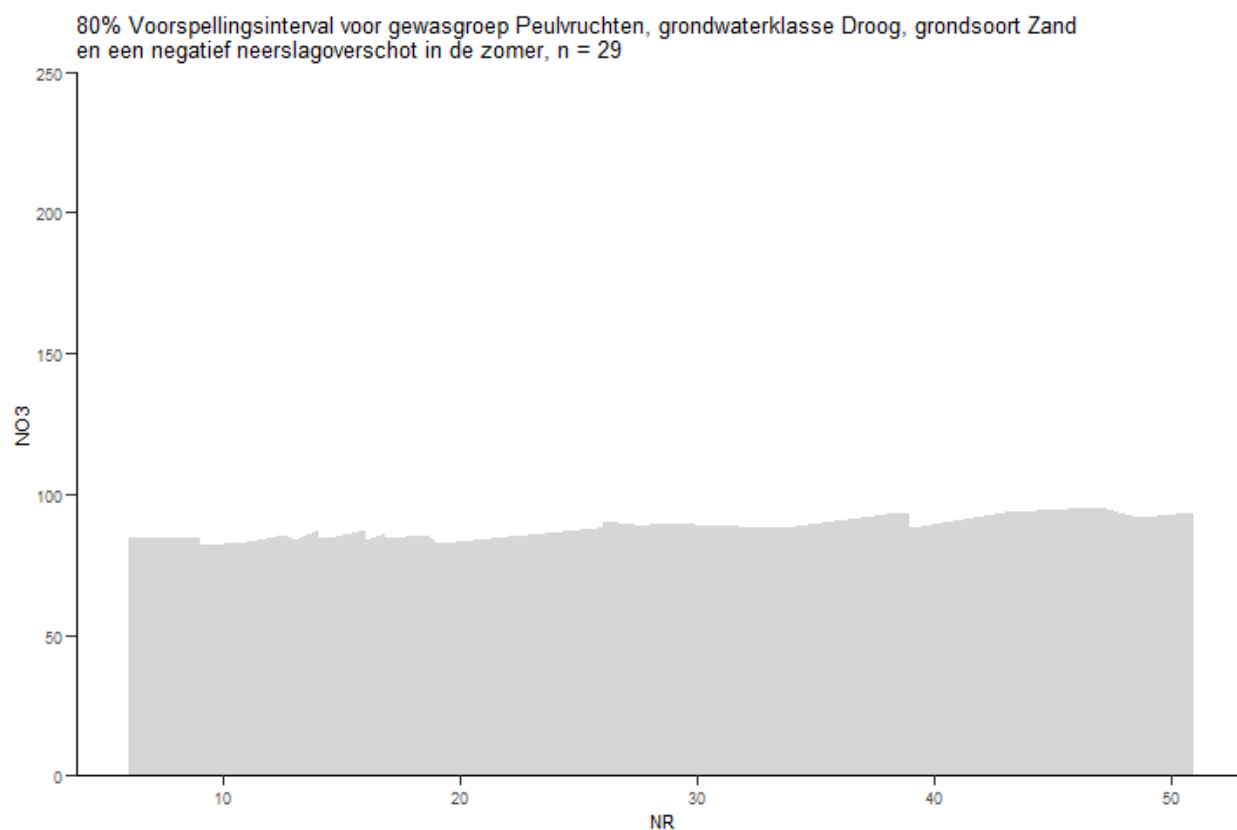
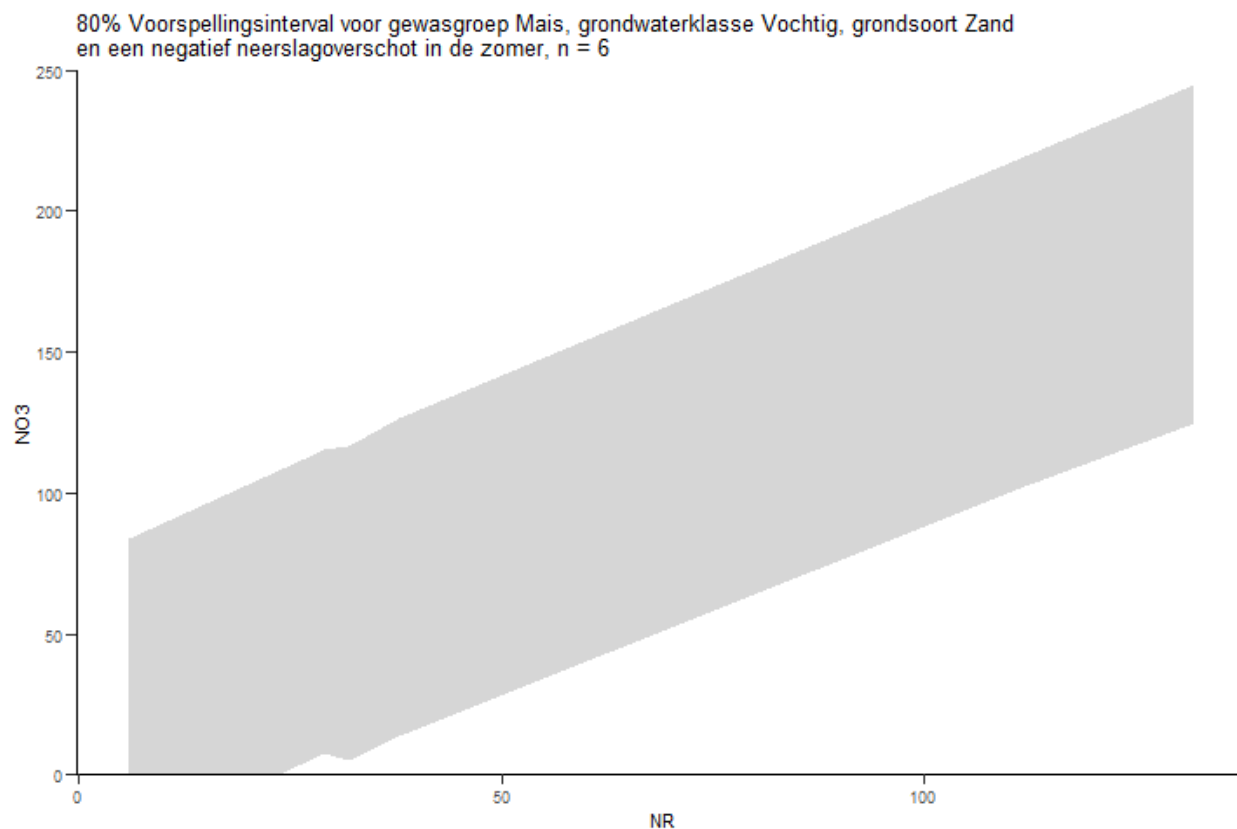


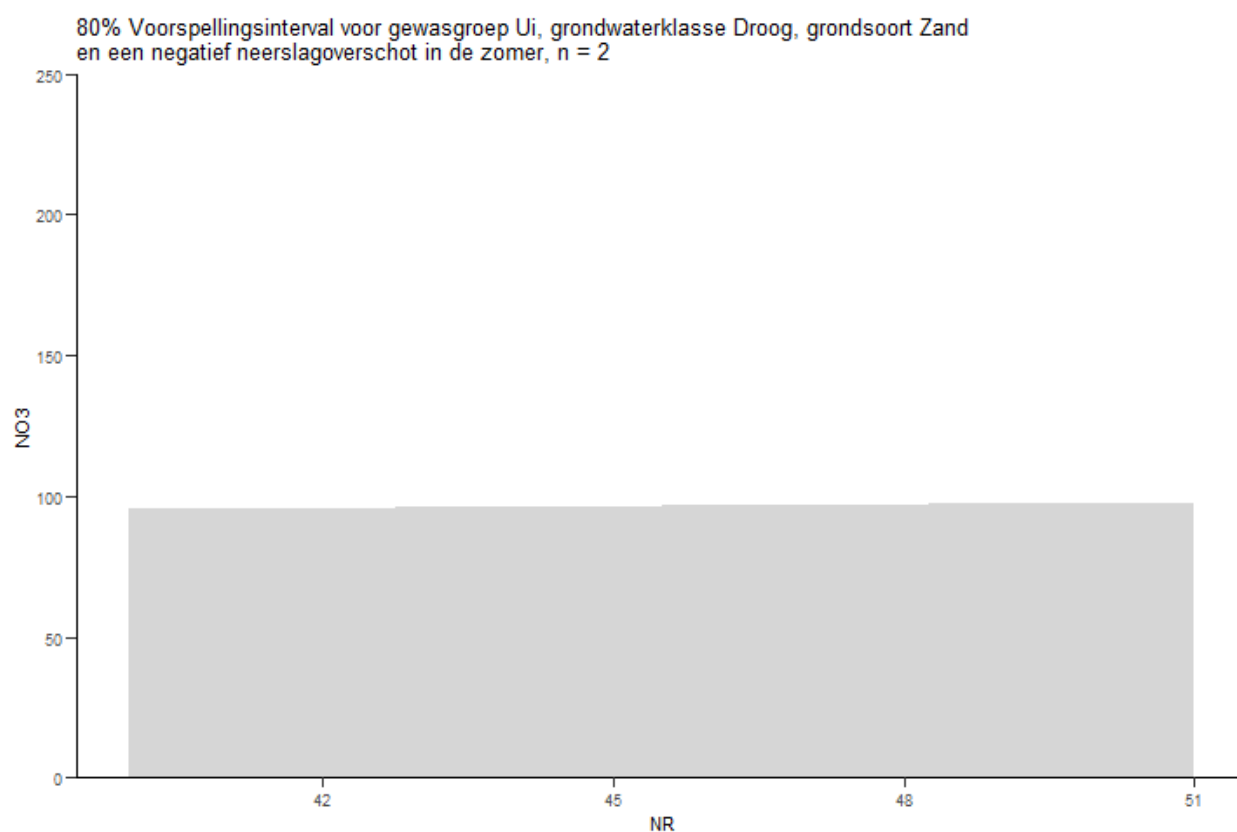
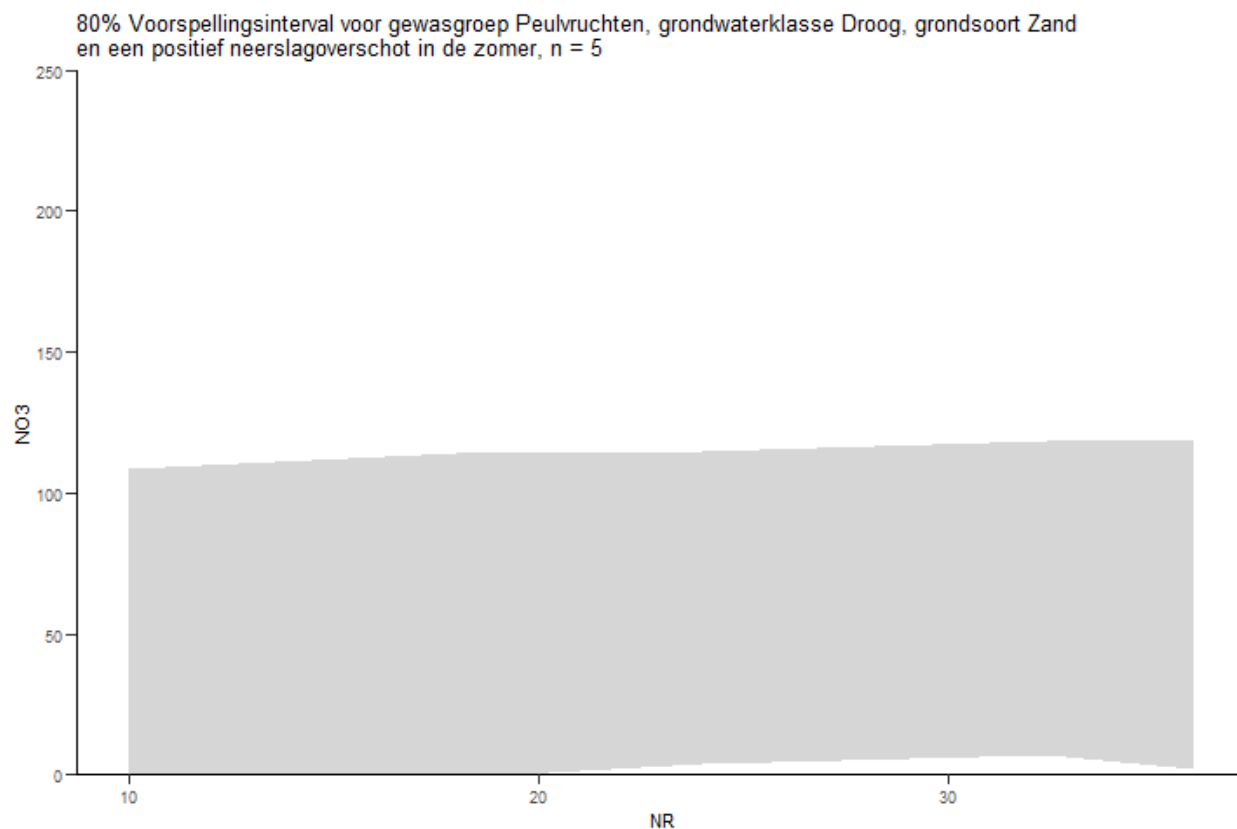
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Mais, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een negatief neerslagoverschot in de zomer, n = 28



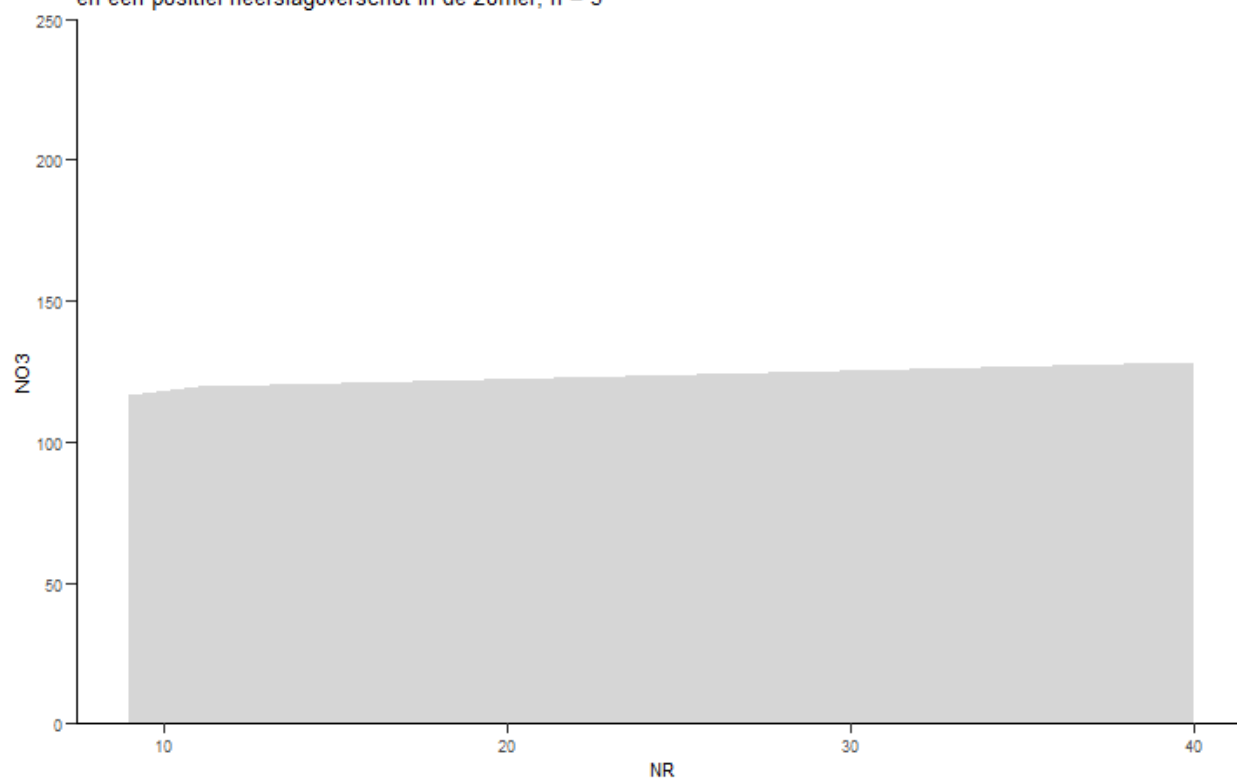
80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Mais, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand en een positief neerslagoverschot in de zomer, n = 11







80% Voorspellingsinterval voor gewasgroep Ui, grondwaterklasse Droog, grondsoort Zand
en een positief neerslagoverschot in de zomer, n = 3



Correspondentie adres voor dit rapport:
Postbus 16
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
<http://www.wur.nl/plant-research>

Rapport WPR-1504



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.