



Kunnen stikstofbemestingsadviezen verder verfijnd worden op basis van bodemeigenschappen?

A.A. Pronk & J.J. Schröder





Kunnen stikstofbemestingsadviezen verder verfijnd worden op basis van bodemeigenschappen?

A.A. Pronk & J.J. Schröder

© 2006 Wageningen, Plant Research International B.V.

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 Plant Research International B.V.

Plant Research International B.V.

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.pri.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1. Inleiding	3
1.1 Bodemkwaliteit	3
1.2 Bemestingsrichtlijnen	3
1.3 Mineralisatieschatters	4
1.4 Determinanten van de optimale N-gift	5
1.5 Doelstelling van het onderzoek	5
2. Materiaal en methoden	7
2.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassaproductie	7
2.2 Uitbreiding databestanden met mogelijke indicatoren	8
2.3 Berekening van de economisch optimale N-gift	9
3. Resultaten	11
3.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassaproductie	11
3.2 Uitbreiding databestanden met mogelijke indicatoren	12
3.3 De economisch optimale N-gift	15
4. Discussie en conclusies	17
4.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassaproductie	17
4.2 De economisch optimale N-gift	17
4.3 Mogelijke indicatoren	17
4.4 Conclusies	19
5. Literatuur	21
Bijlage I. Afkortingen, eenheden en de betekenis	1 p.

Samenvatting

De Nederlandse landbouw heeft in toenemende mate te maken met beperkingen bij het gebruik van stikstof (N). Naast een goede gewasproductie moet de landbouw ook aan milieudoelstellingen voldoen. Vooral op zandgrond kunnen de milieudoelstellingen niet gemakkelijk gerealiseerd worden. Om de N-bemesting met zo min mogelijk verliezen te kunnen uitvoeren bestaat de behoefte om bemestingsadviezen zo mogelijk verder te verfijnen en de efficiëntie van de N-giften te verhogen op basis van eenvoudig te meten bodemkenmerken, indicatoren.

In grote delen van de landbouwpraktijk bestaat de intuïtieve opvatting dat hoge opbrengsten hand in hand gaan met hogere economisch optimale N-giften. De bestaande literatuur geeft echter aan dat een dergelijk verband niet altijd even vanzelfsprekend is. Dit komt omdat in bodems die in staat zijn gewassen met hoge opbrengsten voort te brengen door, bijvoorbeeld, een goede vochtvoorziening, tegelijkertijd ook de N-mineralisatie en de benutbaarheid van gemineraliseerde en toegediende N hoger kan zijn.

In deze studie is aan bovengenoemde aspecten aandacht besteed. Enerzijds is gekeken of de indicatoren organische stof en N-totaal een voorspellend karakter hebben voor de bodemmineralisatie, de N-benutting of de maximale biomassa-productie. Anderzijds is gekeken of er een verband bestaat tussen de bodemmineralisatie, de N-benutting en de maximale biomassa-productie, en of er een verband bestaat tussen de economisch optimale N-gift en de biomassa-productie bij die economisch optimale N-gift. Er is gebruik gemaakt van een groot aantal beschikbare doses response curven voor aardappelen en maïs vanuit QUADMOD aangevuld met doses responsecurven die nog niet in QUADMOD zijn opgenomen. Alleen datasets van zandgrond zijn in de studie meegenomen.

De indicatoren organische stof en N-totaal hadden geen relatie met de bodemmineralisatie, de N-benutting of de maximale biomassa-productie en zijn derhalve niet geschikt om te gebruiken als indicator voor de bodemmineralisatie, de maximale biomassa-productie of de N-benutting. Enige relatie tussen de indicatoren en de economisch optimale N-gift en de biomassa-productie bij die economisch optimale N-gift kon evenmin worden vastgesteld.

In deze studie kon geen verband worden aangetoond tussen de maximale biomassa-productie en de N-benutting, of tussen de biomassa-productie en de bodemmineralisatie. Er bestond wel een sterk verband tussen de N-benutting en de bodemmineralisatie. Dit betekent dat bij een lager stikstofaanbod uit de bodem het gewas efficiënter met N omgaat en alsnog, binnen bepaalde grenzen, een zo hoog mogelijke biomassa zal proberen te realiseren.

De economisch optimale N-gift was niet gecorreleerd aan de bijbehorende biomassa-productie bij maïs. Tussen de optimale N-gift en de N-benutting werd echter een vergelijkbaar verband vastgesteld als tussen de bodemmineralisatie en de N-benutting: de N-benutting nam toe bij lagere economisch optimale N-giften. Bij aardappelen werd een vergelijkbaar resultaat gevonden maar minder expliciet omdat er wel een verband bestond tussen de economisch optimale N-gift en de biomassa-productie bij die economisch optimale N-gift. Dit verband bestond echter niet per type aardappelteelt. Daardoor is het ook bij aardappelen mogelijk dat een hogere biomassa-productie niet op voorhand samen gaat met een hogere economisch optimale N-gift. Het compenserende vermogen van de N-benutting kwam bij aardappelen echter minder expliciet naar voren dan bij maïs.

Vooralsnog lijkt het stikstofbemestingsadvies voor aardappelen en maïs op zandgrond niet verfijnd te kunnen worden op basis van het percentage organische stof of N-totaal. Tevens ondersteunt deze studie de suggesties uit de literatuur dat de economisch optimale N-gift niet aangepast hoeft te worden in relatie tot het niveau van biomassa-productie. Binnen bepaalde grenzen wordt de hogere behoefte aan N namelijk gecompenseerd door een hogere N-benutting door het gewas.

1. Inleiding

1.1 Bodemkwaliteit

Het begrip bodemkwaliteit kan op veel manieren gedefinieerd worden en geeft daarom veel aanleiding tot verwarring. Een mogelijke omschrijving van bodemkwaliteit is het vermogen van de bodem om gewassen nu en later van voldoende water en nutriënten te voorzien zodat de gewassen tot een hoge productie per eenheid productiefactor komen met een lage belasting van de omgeving (naar Beare *et al.*, 1999). Productiefactoren hebben daarbij betrekking op aangevoerde nutriënten, water, energie en arbeid. Het begrip omgeving heeft betrekking op de directe omgeving van het veld maar ook op het grond- en oppervlaktewater en de lucht rond het bedrijf, in de regio of zelfs in de wereld als geheel. Impliciet omvat deze definitie dat gewaakt moet worden voor afwentelingen in ruimte en tijd, dat bodemkwaliteit ook tot uiting komt in de beheersbaarheid van ziekten en plagen, en dat productiefactoren efficiënt benut moeten worden.

Van oudsher werd een goede bodemkwaliteit nagestreefd voor een 'goede' opbrengst. Sinds de jaren 90 wordt onder een 'goede' opbrengst meer verstaan dan alleen een hoge en oogstzekere productie. Hoge producties dienen bij voorkeur samen te gaan met zo min mogelijk emissies van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen. Deze aanvullende randvoorwaarde verlangt een antwoord op de vraag of bodemkwaliteitseisen ten behoeve van de opbrengst wel te verenigen zijn met bodemkwaliteitseisen ten behoeve van lage emissies. Letey *et al.* (2003) gingen uitgebreid in op de dilemma's die zich hierbij voor kunnen doen.

1.2 Bemestingsrichtlijnen

De Nederlandse landbouw heeft bij het gebruik van stikstof (N) in toenemende mate te maken met beperkingen. Dit is met name het geval op zandgrond omdat daar een groot deel van de niet-opgenomen N naar het grondwater zal uitspoelen. Tabel 1 illustreert dat er bij een aantal belangrijke gewassen grote discrepanties bestaan tussen de N-gift die vanuit een opbrengsthoogpunt gegeven zou moeten worden en de N-gift die vanuit een grondwaterkwaliteitsdoelstelling (i.e. 11,3 mg nitraat-N per liter) nog net verantwoord is.

Tabel 1. De N-bemestingsrichtlijnen voor aardappelen, suikerbieten en maïs op verschillende grondsoorten (Van Dijk, 2003), het aantal hectares dat in Nederland geteeld werd in 2005 (www.cbs.nl) en de voorgestelde stikstofgebruiksnorm voor zand met grondwatertrap VII (Schröder, 2004).

Gewas	Grondsoort	10 ³ ha	Richtlijn (kg ha ⁻¹) ¹	N-norm
Consumptieaardappelen	klei/löss	5000	285 – 1,1 * Nmin (0-60)	
	zand, dal	2350	300 – 1,8 * Nmin (0-30)	140
Zetmeel- en industrieaardappelen	zand, dal	5100	275 – 1,8 * Nmin (0-30)	120
Pootaardappelen	alle gronden	4000	140 – 0,6 * Nmin (0-60)	120
Suikerbieten	alle gronden	9774 ²	200 – 1,7 * Nmin (0-60)	134
Maïs; voor zaaien	alle gronden	23500	205 – Nmin (0-30)	130

¹ Afhankelijk van het type groenbemesters en oogstresten, het moment van onderwerken en de ontwikkeling van het gewas, kan een extra korting op de N-gift uitgevoerd worden variërend van 15 tot 60 kg N ha⁻¹.

² Areaal van 2004.

Agrarische ondernemers zijn van mening dat een hoge productie niet gerealiseerd kan worden binnen de op termijn beoogde N-gebruiksnormen. Dat de kans op opbrengstdervingen als gevolg van verlaagde N-giften toeneemt, kan niet worden ontkend (Schröder *et al.*, 2004). Toch vallen bij de huidige N-bemestingsrichtlijnen wel enkele kanttekeningen te maken. Zo zijn de richtlijnen grotendeels gebaseerd op responsecurves met een kwadratisch verloop. Naar hun aard neigen deze curven naar relatief hoge optimale N-giften (Cerrato & Blackmer, 1990; Verloop, 1999). Hierdoor is automatisch een veiligheidsmarge gecreëerd in de huidige N-bemestingsrichtlijnen. Responscurves met een negatief exponentieel verloop of een kwadratisch plus plateau verloop indiceren economisch optimale giften die 35-50 kg N ha⁻¹ lager kunnen liggen (Schröder *et al.*, 1998). Dit verkleint de veronderstelde discrepantie tussen economie en milieu.

1.3 Mineralisatieschatters

Hoe dan ook, de huidige N-bemestingsrichtlijnen houden maar in beperkte mate rekening met lokale bodemeigenschappen ondanks het feit dat dit onderwerp al vele decennia in onderzoek is (Bélanger *et al.*, 2000b; Simard *et al.*, 2001). De richtlijn houdt doorgaans wel rekening met de voorraad minerale bodem-N bij aanvang van of gedurende de teelt en differentieert soms ook per grondsoort, maar een verdere verfijning aan de hand van andere bodemeigenschappen ontbreekt. Zo is voor akker- en tuinbouwgewassen geen schatter voor de mineralisatie van organische bodem-N beschikbaar (Van Dijk, 2003).

In het verleden is al veel onderzoek verricht naar het vinden van geschikte indicatoren voor het schatten van de N-mineralisatie in open teelten, maar vooralsnog zonder succes (Curtin & McCallum, 2004; Jarvis *et al.*, 1996; Powelson, 1997). Het onderzoek richtte zich in eerste instantie op het voorspellen van de mineralisatie met één of enkele bepalingen aan de bodem. Doordat hier weinig voortgang in geboekt werd, heeft het onderzoek zich in toenemende mate gericht op steeds complexere modelbenaderingen die met meerdere relevante factoren tegelijk rekening houden. Daarbij worden gemeten gegevens met actuele of verwachte weersomstandigheden gecombineerd om de mineralisatie op een bepaald tijdstip te voorspellen. Er zijn veel verschillende modellen beschikbaar die de mineralisatie in retrospectief redelijk goed kunnen simuleren op voorwaarde dat ook rekening wordt gehouden met de plaatselijke waterbalans (Smith *et al.*, 1997). De invloed van actuele weersomstandigheden op de aanwezige minerale N in de bodem is echter groot. De nauwkeurigheid van modelbenaderingen als schatter vooraf valt daarom tegen.

In het Nederlandse bemestingsadvies voor grasland is desondanks een schatter voor de bodemmineralisatie in gebruik (www.bemestingsadvies.nl). Die schatter is gebaseerd op een regressievergelijking waarin de N-opname van een onbemest veldje (N-leverend vermogen (NLV) genoemd) voorspeld wordt met onder andere de leeftijd van de grasmat en het organische N-gehalte in de bodem. De hoogte van de N-gift wordt vervolgens aangepast aan de berekende NLV. De NLV varieert van 50 tot 300 kg N ha⁻¹. De correcties op de uiteindelijke N-gift kunnen daardoor aanzienlijk zijn waardoor onnodige N-giften en de daaruit resulterende N-verliezen kunnen worden beperkt. De N-benutting van akkerbouwgewassen varieert van 45 tot ruim 80% (Smit & Van der Werf, 1992; Ten Berge *et al.*, 2000) en is daarmee beduidend lager dan de 80-90% bij grasland (Ten Berge *et al.*, 2000). Die lagere benutting impliceert dat van iedere kilogram N die (te veel) gegeven wordt, bij akkerbouwgewassen een relatief groot deel in het milieu terecht komt. Juist bij akkerbouwgewassen zou een schatter van het NLV daarom meer dan welkom zijn. Het Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewebeanalyse (BLGG) heeft onlangs een NLV voor akkerbouwgewassen in het N-advies geïntroduceerd. Deze NLV wordt berekend op basis van de totale hoeveelheid N in de bouwvoor, de C/N verhouding in de organische stof en de verwachte gemiddelde temperatuur (bron: presentatie BLGG themadagen, A. Reijneveld). Op basis van de aldus berekende NLV wordt op de N-bemestingsrichtlijn voor akker- en tuinbouwgewassen een correctie aangebracht die varieert van een korting van 40 kg N ha⁻¹ tot een toeslag van 20 kg N ha⁻¹. Het BLGG benadrukt dat het om een perceelseigenschap gaat die de potentie aangeeft om tijdens het seizoen N te leveren maar dat de gerealiseerde N-levering van de actuele omstandigheden af hangt.

1.4 Determinanten van de optimale N-gift

In beginsel klinkt het plausibel om N-adviesgiften te reduceren naarmate meer N vanuit de bodemvoorraad geleverd wordt. Vanuit een theoretische benadering zal een grotere organische N-voorraad in de bodem, d.w.z. een hogere N-totaal meting, bij dezelfde afbraaksnelheid meer N leveren. De N-opname in de onbemeste veldjes zal daardoor in principe hoger zijn en de behoefte aan aanvullende N-giften daarom kleiner (Figuur 1A). Vooralsnog is echter moeilijk aan te tonen dat een meting van het N-totaal gehalte een nauwkeurige relatie vertoont met potentiële N-mineralisatie (Velthof, 2003). Ook mineralisatiemetingen onder laboratoriumomstandigheden blijken niet zonder meer vertaald te kunnen worden naar schatters voor N-mineralisatie onder veldomstandigheden (Zwart *et al.*, 1999). Zelfs als voornoemde bepalingen wél nauwkeurige schatters voor de N-mineralisatie zouden zijn, resteert een andere fundamentele vraag. Een optimale N-gift (lees: verlangde N-aanvulling in de vorm van (kunst)mest) wordt namelijk niet alleen bepaald door de N-mineralisatie (S_{min}), maar ook door de benutting ('helling' Rho) van de beschikbare N (Figuur 1B) en de door het gewas uitgeoefende vraag ('plafond' U_{max}) naar N (Figuur 1C).

Elk van de drie factoren zou op zichzelf aanleiding geven een N-advies aan te passen. Echter, als deze factoren (mineralisatie, helling, plafond) positief gecorreleerd zijn, kunnen hun afzonderlijke effecten op het N-advies elkaar min of meer opheffen.

Een dergelijke koppeling van eigenschappen via het organische stof gehalte is op zichzelf voorstelbaar. Ook in de WUR-workshop 'Bodemkwaliteit' kwam 'organische stof' als belangrijkste bodemkwaliteitskenmerk naar voren (Pronk *et al.*, 2002). Organische stof is vermoedelijk positief gecorreleerd met mineralisatie, het vochtleverend vermogen van een bodem en daarmee op de N-vraag en op de N-benutting, de ziekteverendheid van de bodem en de beworteling van gewassen. Organische stof kan gemakkelijk als het cement tussen S_{min} , Rho en U_{max} gezien worden.

Als S_{min} en U_{max} (Figuur 1D), Rho en U_{max} (Figuur 1E), of S_{min} , Rho en U_{max} (Figuur 1F) positief gekoppeld zijn, geeft dit geen aanleiding om het N-advies te differentiëren. Ook als een lagere S_{min} gecompenseerd wordt door een hogere Rho (Figuur 1G), blijft de optimale N-gift en daarmee het N-advies ongewijzigd.

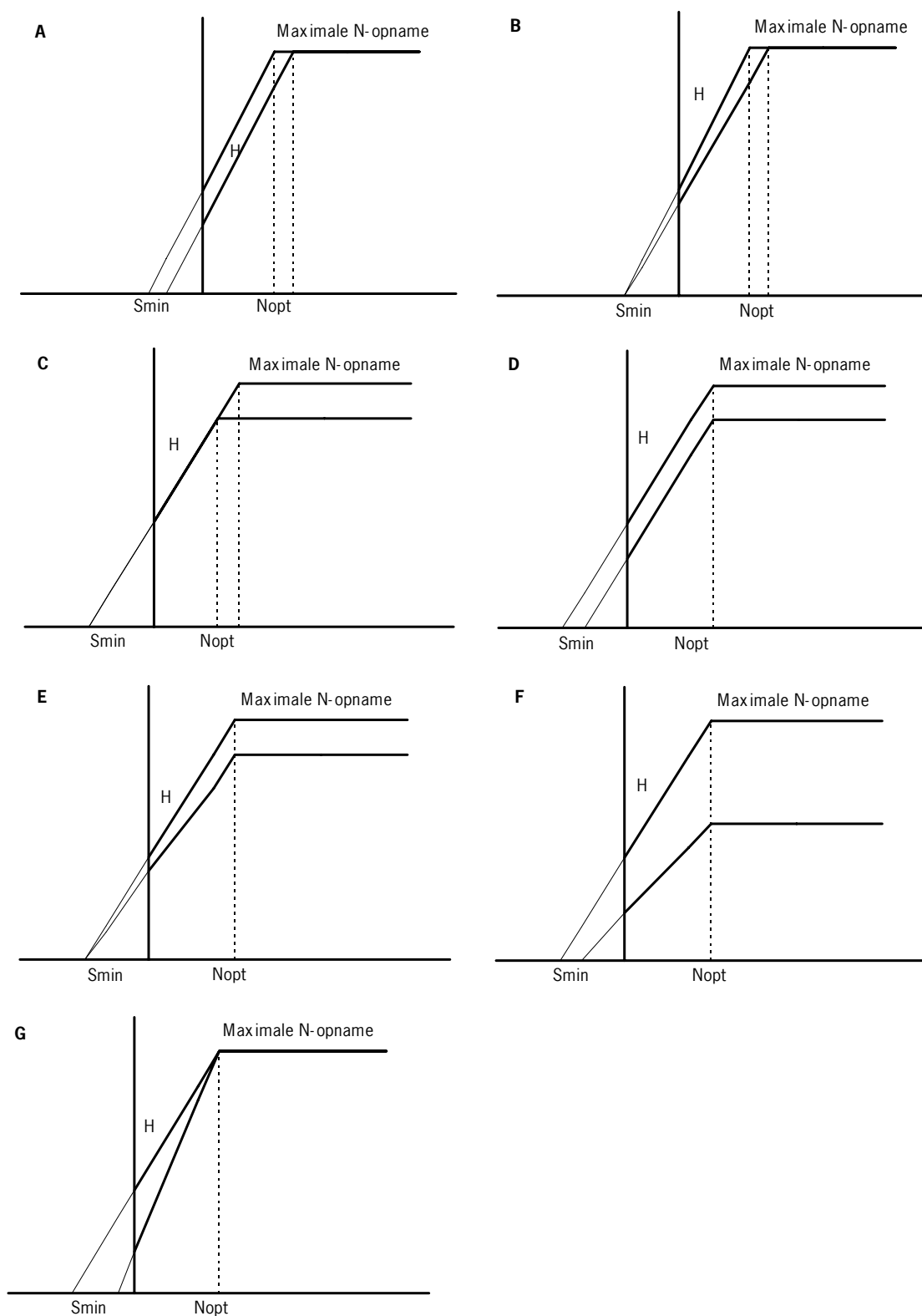
In de bovengenoemde analyse van de determinanten van de optimale N-gift is U_{max} sterk gecorreleerd aan maximale biomassa Y_{max} . De Wit (1953) toonde aan dat de toename van de biomassa Y bij een toenemende N-gift toegeschreven kan worden aan meervoudige reacties: een toename van Y doordat de N-opname U hoger is en een toename van U doordat de N-gift hoger is. Een aanpassing van het N-advies is daarom evenmin nodig als S_{min} en Y_{max} , Rho en S_{min} of Rho en Y_{max} positief gekoppeld zijn.

De bestaande literatuur geeft diverse aanwijzingen voor het bestaan van voornoemde compensaties in de praktijk. Zo is bij maïs bij herhaling geconcludeerd dat hogere opbrengsten geen aanleiding zijn voor een verhoging van de economische optimale N-gift (Nevens & Reheul, 2005; Schröder *et al.*, 1998; Vanotti & Bundy, 1994a en b). Ook bij aardappelen zijn er aanwijzingen dat voor een hogere (vers)opbrengst geen hogere economische optimale N-giften nodig zijn (Bélanger *et al.*, 2000a en b; Li *et al.*, 1999). Bodemeigenschappen die bevorderlijk zijn voor hoge opbrengstniveaus gaan kennelijk hand in hand met eigenschappen met een gunstig effect op de N-mineralisatie dan wel N-benutting. Ook het omgekeerde geldt dan: de op het eerste gezicht te rechtvaardigen korting van de N-gift bij een hoge N-mineralisatie dan wel hoge benutbaarheid van de beschikbare N, wordt op zijn minst deels teniet gedaan door de geassocieerde grotere vraag naar N.

1.5 Doelstelling van het onderzoek

Het hier beschreven onderzoek richt zich in eerste instantie op beantwoording van de vraag of de parameters S_{min} , Rho en Y_{max} afhankelijk dan wel onafhankelijk zijn. Daartoe zijn responsecurves gebruikt van oplopende N-giften met daarbij behorende biomassaproductie en N-opname.

Het onderzoek beperkt zich tot aardappelen en maïs omdat dit de belangrijkste gewassen op zand zijn (Tabel 1). In tweede instantie is gezocht naar een mogelijke indicator voor de parameters S_{min} , Rho en Y_{max} . De indicatoren die in aanmerking kwamen waren organische stof en N-totaal.



Figuur 1. Situaties waarbij de maximale N-opname uitgezet tegen de beschikbare stikstof uit bodemmineralisatie (S_{min}) plus bemesting, aanleiding geeft om de economisch optimale N-gift (N_{opt}) te verfijnen (A t/m C) of niet te verfijnen (D t/m G).

2. Materiaal en methoden

2.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassa-productie

Het model QUADMOD is in 2000 ontwikkeld en beschrijft de relaties tussen de biomassa-productie Y , de stikstofgift A en de N-opname U (Ten Berge *et al.*, 2000). De parameterisering van dit model is gebaseerd op een groot aantal datasets van diverse gewassen. Voor een uitgebreide beschrijving van QUADMOD wordt verwezen naar Ten Berge *et al.* (2000). De datasets voor de parameterisering van QUADMOD zijn als basis gebruikt voor het analyseren van de samenhang tussen de bodemmineralisatie (S_{min}), de N-benutting (Rho) en de maximale biomassa-productie (Y_{max}). De datasets zijn uitgebreid met de resultaten van responsproeven beschreven in Dekker (2005), Meyer & Marcum (1998), Nevens *et al.* (2005), Schröder *et al.* (2005), Steenhuizen *et al.* (2000, 2001, 2002), Van Geel (2004), Velvis (2001) en Vos (1997) (Tabel 2). Aan alle gegevens zijn de volgende criteria opgelegd:

- er moet een niet met N bemest veldje aanwezig zijn binnen de responsproef,
- de minimale drogestofopbrengst van voornoemd veldje moet minder zijn dan 75% van de maximale drogestofopbrengst ($Y_{nul} < 0.75 * Y_{max}$),
- alleen de proeven op zandgrond zijn betrokken in de analyse.

Tabel 2. Datasets gebruikt voor het analyseren van de samenhang tussen bodemmineralisatie S_{min} , de N-benutting Rho , en de maximale biomassa-productie Y_{max} .

Bron	Gewas	Jaren	# experimenten
Neeteson, 1989	Aardappelen	1974, 1976-'82	14
Vos, 1997	Aardappelen	1988-'90, 1992, 1993	8
Meyer & Marcum, 1998	Aardappelen	1993	2
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2000	Aardappelen	1998	4
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2001	Aardappelen	1998	10
Velvis, 2001	Aardappelen	1999	3
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2002	Aardappelen	2000	1
Van Geel <i>et al.</i> , 2004	Aardappelen	2003	2
Dekker <i>et al.</i> , 2005	Aardappelen	2002-2003	3
Van Dijk, 1996	Maïs	1992-'94	7
Schröder <i>et al.</i> , 2005	Maïs	1998-2003	10
Nevens & Reheul, 2005	Maïs	1987-2001	17
Totaal			81

De bodemmineralisatie S_{min} is berekend als de gemeten N-opname van de onbemeste veldjes (U_{min}) gedeeld door de N-benutting Rho . In deze bodemmineralisatie zit enige atmosferische N-depositie en een hoeveelheid minerale bodem-N in de bewortelde laag op het moment van planten/zaaien. Voor beide is niet gecorrigeerd. Bij een $Rho < 0.2$, is de gemiddelde Rho (berekend zonder deze lage waarden), gebruikt om S_{min} te berekenen.

Waar mogelijk is de Rho van QUADMOD gebruikt. Indien deze niet beschikbaar was, is Rho berekend door de opname efficiëntie van N bij de eerste bemestingstrap (A_{trap1}) te berekenen ($(U_{trap1} - U_{nul})/A_{trap1}$).

De maximale biomassa-productie Y_{max} van QUADMOD is gebruikt als maximale biomassa-productie. Deze asymptotische waarde wordt weliswaar nooit bereikt maar een procentuele korting op de maximale biomassa-productie zal

de relatie tussen Y_{max} en Rho of S_{min} niet veranderen. Indien Y_{max} niet beschikbaar was, is de maximale biomassaproductie berekend door een exponentiële curve door de gemeten opbrengsten bij een toenemende N-gift te fitten ($Y = a + b \cdot R^x$). Enkele datasets hadden echter slechts 3 N-giften waardoor het fitten van een exponentiële curve niet mogelijk was. Bij deze sets is de maximaal gemeten biomassaproductie voor de regressieanalyse gebruikt.

In de regressieanalyse zijn de volgende modellen bekeken:

- 1: $Y_{max} = \text{constante} + S_{min} + \text{gewas} + S_{min} \cdot \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen S_{min} en gewas:
 $Y_{max} = \text{constante} + S_{min} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect bestond van gewas:
 $Y_{max} = \text{constante} + S_{min}$.
- 2: $Rho = \text{constante} + S_{min} + \text{gewas} + S_{min} \cdot \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen S_{min} en gewas:
 $Rho = \text{constante} + S_{min} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect van gewas bestond:
 $Rho = \text{constante} + S_{min}$.
- 3: $Rho = \text{constante} + Y_{max} + \text{gewas} + S_{min} \cdot \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen Y_{max} en gewas:
 $Rho = \text{constante} + Y_{max} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect van gewas bestond:
 $Rho = \text{constante} + Y_{max}$

De analyses zijn uitgevoerd met GENSTAT 8.

2.2 Uitbreiding databestanden met mogelijke indicatoren

De datasets zijn ook gebruikt om na te gaan of S_{min} , Rho dan wel Y_{max} verband houden met het organische stofgehalte van de bodem (o.s., % in stooftroge grond) of het N-totaal gehalte van de bodem (N_{tot} , % in stooftroge grond). In de analyse is ook de fractie N in de organische stof meegenomen ($NOS = N_{tot} / \text{o.s. (g N/kg o.s.)}$).

Tabel 3 en Tabel 4 geven aan in welke datasets de gegevens aanwezig waren.

Op basis van de data hebben de volgende regressieanalyses plaatsgevonden:

S_{min}	= constante + N_{tot}	of constante + o.s.	of constante + NOS;
Rho	= constante + N_{tot}	of constante + o.s.	of constante + NOS;
Y_{max}	= constante + N_{tot}	of constante + o.s.	of constante + NOS.

Het effect van gewas en de eventuele interactie is tussen gewas en verklarende variabele N_{tot} , o.s. of NOS is eveneens bekeken. De analyses zijn uitgevoerd met GENSTAT 8.

Tabel 3. Datasets waarvan het percentage organische stof aanwezig was.

Bron	Gewas	Jaren	# experimenten
Neeteson, 1989	Aardappelen	1977, 1979, 1980-'81	6
Meyer & Marcum, 1998	Aardappelen	1993	2
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2000	Aardappelen	1998	3
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2001	Aardappelen	1998	10
Velvis, 2001	Aardappelen	1999	3
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2002	Aardappelen	2000	1
Van Geel <i>et al.</i> , 2004	Aardappelen	2003	2
Van Dijk, 1996	Maïs	1992-'94	7
Schröder & Ten Holte, 1996	Maïs	1990, 1992-'93	3
Nevens, 2003	Maïs	2000	1
Schröder <i>et al.</i> , 2005	Maïs	2000-'03	6
Totaal			44

Tabel 4. Datasets waarvan N-totaal aanwezig was.

Bron	Gewas	Jaren	# experimenten
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2001	Aardappelen	1998	10
Velvis, 2001	Aardappelen	1999	3
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2002	Aardappelen	2000	1
Schröder & Ten Holte, 1996	Maïs	1990, 1992-'93	3
Nevens, 2003	Maïs	2000	1
Schröder <i>et al.</i> , 2005	Maïs	1998-2000, 2003	6
Totaal			24

2.3 Berekening van de economisch optimale N-gift

De economisch optimale N-gift (Nopt) is voor een aantal datasets berekend op basis van de exponentiele opbrengstcurven. Voor maïs is de economisch optimale N-gift berekend als die N-gift waarbij de toename van drogestof 5 kg/kg N is. Bij aardappelen zijn doses responsecurven van de versgewichtproductie van het oogstbaar product gebruikt om exponentiele curven te fitten zoals omschreven in paragraaf 2.1. De economisch optimale N-gift is berekend als die N-gift waarbij de versgewichtstoename per kg N gelijk is aan de kosten voor de kunstmest N, of te wel 9.2 (Dekkers, 2002). Nevens *et al.* (2005) geeft zelf de economisch optimale N-gift gebaseerd op een kosten: opbrengstverhouding van 10. Deze N-opt is gebruikt in de analyse.

Tabel 5. Datasets voor de berekening van de economisch optimale kunstmest-N-gift N-opt, de relatie tussen Smin of Rho en Nopt en de minerale stikstofvoorraad in het voorjaar 0-60 cm diep, Nmin, voorjaar.

Bron	Gewas	jaren	Aantal experimenten		
			Nopt	Smin/Rho	Nmin, voorjaar
Griffin & Hesterman, 1991	Aardappelen	1987	2	-	-
Meyer & Marcum, 1998	Aardappelen	1993	4	2	2
Bélanger <i>et al.</i> , 2000	Aardappelen	1995-1997	11	-	-
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2000	Aardappelen	1998	3	3	-
Steenhuizen <i>et al.</i> , 2001	Aardappelen	1998	8	8	-
Van Geel <i>et al.</i> , 2004	Aardappelen	2003	4	4	4
Schröder & Ten Holte, 1996	Maïs	1990	1	1	-
Van Dijk, 1996	Maïs	1992-1994	7	7	7
Schröder <i>et al.</i> , 1998	Maïs	1982-'86, 1988-'89, 1992-'93	-	-	9
Nevens, 2003	Maïs	2000	1	1	-
Nevens & Reheul, 2005	Maïs	1987-2001	15	15	-
Totaal			56	41	22

De biomassa-productie behorende bij de economisch optimale N-gift (Yopt) is vervolgens berekend en een regressie-analyse met de volgende modellen is uitgevoerd:

1. $S_{min} = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas} + \text{Nopt} * \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen Nopt en gewas:

$S_{min} = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect van gewas bestond:

$S_{min} = \text{constante} + \text{Nopt}$.

2. $Y_{opt} = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas} + \text{Nopt} * \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen Nopt en gewas:

$Y_{opt} = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect van gewas bestond:

$Y_{opt} = \text{constante} + \text{Nopt}$.

3. $Rho = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas} + \text{Nopt} * \text{gewas}$, indien er geen interactie bestond tussen Nopt en gewas:

$Rho = \text{constante} + \text{Nopt} + \text{gewas}$, en indien er geen hoofdeffect van gewas bestond:

$Rho = \text{constante} + \text{Nopt}$.

De analyses zijn uitgevoerd met GENSTAT 8.

3. Resultaten

3.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassa-productie

De gemiddelde N-mineralisatie van de bodem Smin was 129 kg N ha⁻¹ (Tabel 6). De spreiding is aanzienlijk: 62 kg N ha⁻¹. Smin en Rho zijn bij aardappelen en maïs gelijk. De Rho van aardappelen is hoger dan de Rho van Ten Berge *et al.* (2000) op zand van 0.57 (c.v. 0.22) en 0.61 op dalgrond (c.v. 0.15). Ook hier is de spreiding echter zo hoog dat er geen systematische verschillen verondersteld mogen worden. Bij maïs is het verschil tussen de Rho van Ten Berge *et al.* (2000) en de hier gevonden waarde 0.07 en dit valt eveneens binnen de spreiding. De maximale biomassa-productie van maïs is significant hoger dan de biomassa-productie van aardappelen.

Tabel 6. De gemiddelde gemineraliseerde hoeveelheid N Smin (kg ha⁻¹), de N-benutting Rho en de maximale biomassa-productie Ymax (kg DS ha⁻¹). Tussen haakjes is de standaardfout aangegeven.

Gewas	Smin	Rho	Ymax
Aardappelen	131 (66) a ¹	0.63 (0.19) a	13956 (2957) a
Maïs	128 (58) a	0.66 (0.19) a	16679 (2648) b
Gemiddelde	129 (62)	0.64 (0.19)	15151 (3120)

¹ Verschillende letters geven aan dat de gemiddelden van elkaar verschillen, getoetst met de t-test voor steekproeven van ongelijke grootte en een lsd van 5%.

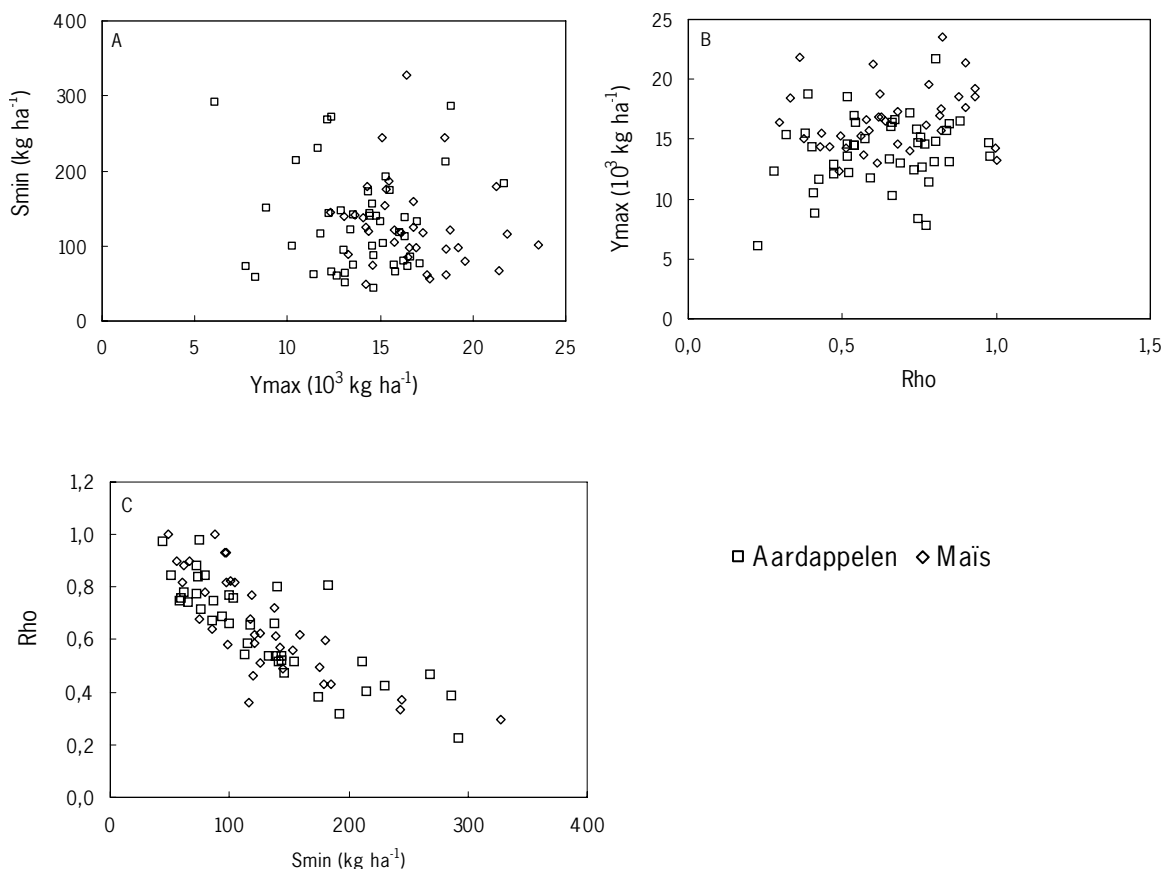
In Figuur 2A is Smin uitgezet tegen de Ymax. Er is geen interactie tussen Smin en gewas maar er is wel een duidelijk hoofdeffect van gewas, $P < 0.001$. Er is geen hoofdeffect van Smin en daarmee geen verband tussen Ymax en Smin. Binnen een gewas is evenmin een relatie vast te stellen tussen Ymax en Smin. De correlatie tussen Ymax en Smin is laag, -7,6% (Tabel 7).

In Figuur 2B is Ymax uitgezet tegen Rho. Ook hier geen interactie tussen Rho en gewas, er is wel een hoofdeffect van gewas ($P < 0.002$) en geen hoofdeffect van Rho. Het regressiemodel is significant, ($P < 0.001$), maar de correlatie tussen Ymax en Rho is laag, 21,3%. Uit deze regressieanalyse komt naar voren dat Ymax tussen de twee gewassen verschilt maar dat er geen verband kan worden aangetoond tussen Ymax en Rho.

Tabel 7. Correlatie matrix tussen de bodemmineralisatie Smin, de N-benutting Rho en de maximale biomassa-productie Ymax.

	Smin	Rho	Ymax
Smin	-	-	-
Rho	-80,8	-	-
Ymax	-7,6	21,3	-

In Figuur 2C is Rho uitgezet tegen Smin. Wederom is er geen interactie tussen Rho en Smin. Er is geen hoofdeffect van gewas, alleen een hoofdeffect van Smin: Rho neemt af naarmate Smin hoger is volgens de relatie $Rho = 0.96 - 0.0025 * Smin$. De correlatie tussen Smin en Rho is hoog, -80,8% (Tabel 7). Deze relatie is verklaarbaar doordat bij hoge Smin het gewas minder efficiënt met de beschikbare stikstof om zal gaan. Eigenlijk bevindt Rho zich bij een hoge Smin niet meer in het lineaire traject, maar neemt Rho af. De relatie tussen Rho en Smin kan voorgesteld worden zoals in Figuur 1G.



Figuur 2. De relatie tussen de bodemmineralisatie Smin en de maximale biomassa-productie Ymax (A), de maximale biomassa-productie Ymax en de N-benutting Rho (B), en de N-benutting Rho en de berekende bodemmineralisatie Smin bij aardappelen en maïs.

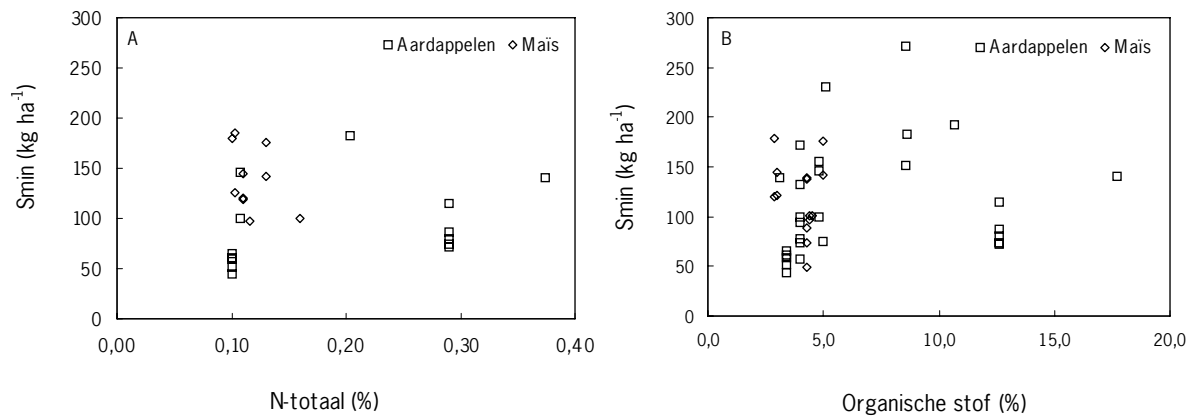
3.2 Uitbreiding databestanden met mogelijke indicatoren

Het percentage organische stof (o.s.) varieert van 2,9 tot 17,7% en is gemiddeld 6,3 bij aardappelen en 4,0 bij maïs (Tabel 8). Het hoge gemiddelde percentage o.s. bij aardappelen komt doordat diverse dalgronden in de datasets opgenomen zijn (8 waarnemingen). Ook N-totaal is op dalgrond hoger dan op zand maar de hoeveelheid N in de organische stof is voor dalgrond juist lager dan op zandgrond.

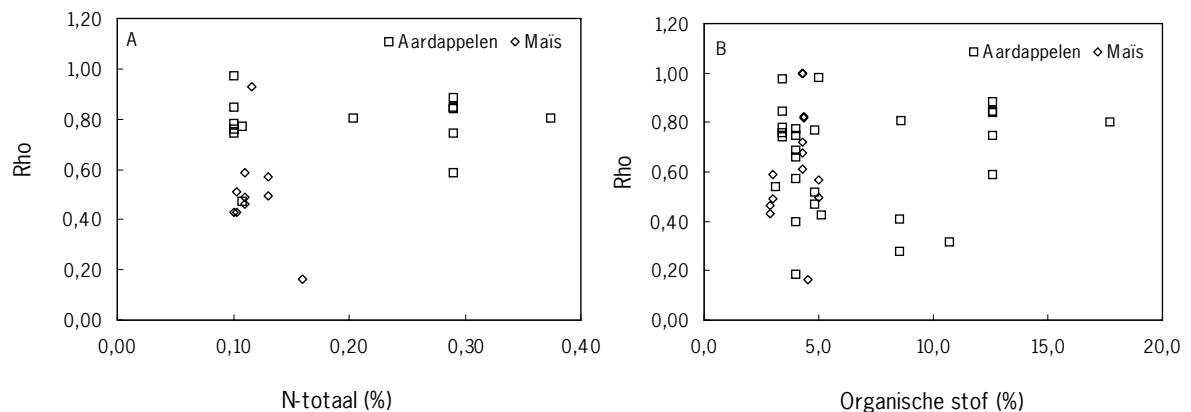
Er bestaat geen relatie tussen de bodemmineralisatie Smin en N-tot (Figuur 3A) of tussen Smin en het percentage o.s. (Figuur 3B). Ook is er geen relatie vast te stellen tussen Rho en N-tot (Figuur 4A) of Rho en het percentage o.s. (Figuur 4B).

Tabel 8. Gemiddelde percentage organische stof (o.s., %), N-totaal (%) en de hoeveelheid N in de organische stof (g/kg) voor aardappelen en maïs. De standaardafwijking en het aantal waarnemingen is tussen haakjes weergegeven.

Gewas	Grondsoort	o.s.	Ntotaal	Ntotaal:o.s.
Aardappelen	dalgrond	12,5 (3,5, n=8)	0,30 (0,034,n=7)	2,27 (0,077, n=7)
	zand	4,1 (1,7, n=22)	0,10 (0,004,n=7)	2,74 (0,337, n=7)
Maïs	zand	4,0 (0,75, n=14)	0,12 (0,020,n=10)	3,33 (0,512, n=10)
Gemiddelde		5,9 (3,7)	0,17 (0,093)	2,81 (0,56)



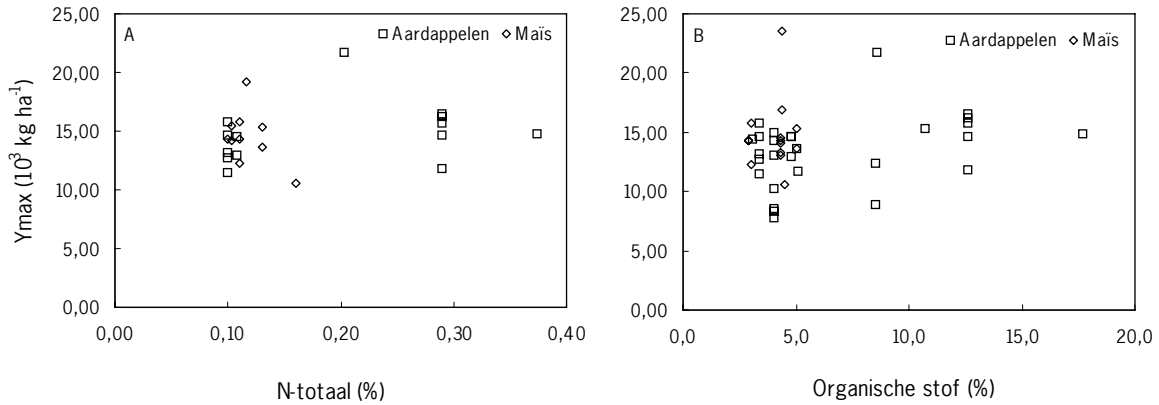
Figuur 3. De bodemmineralisatie Smin bij verschillende gemeten N-totaal (A) en percentages organische stof (B) voor aardappelen en maïs.



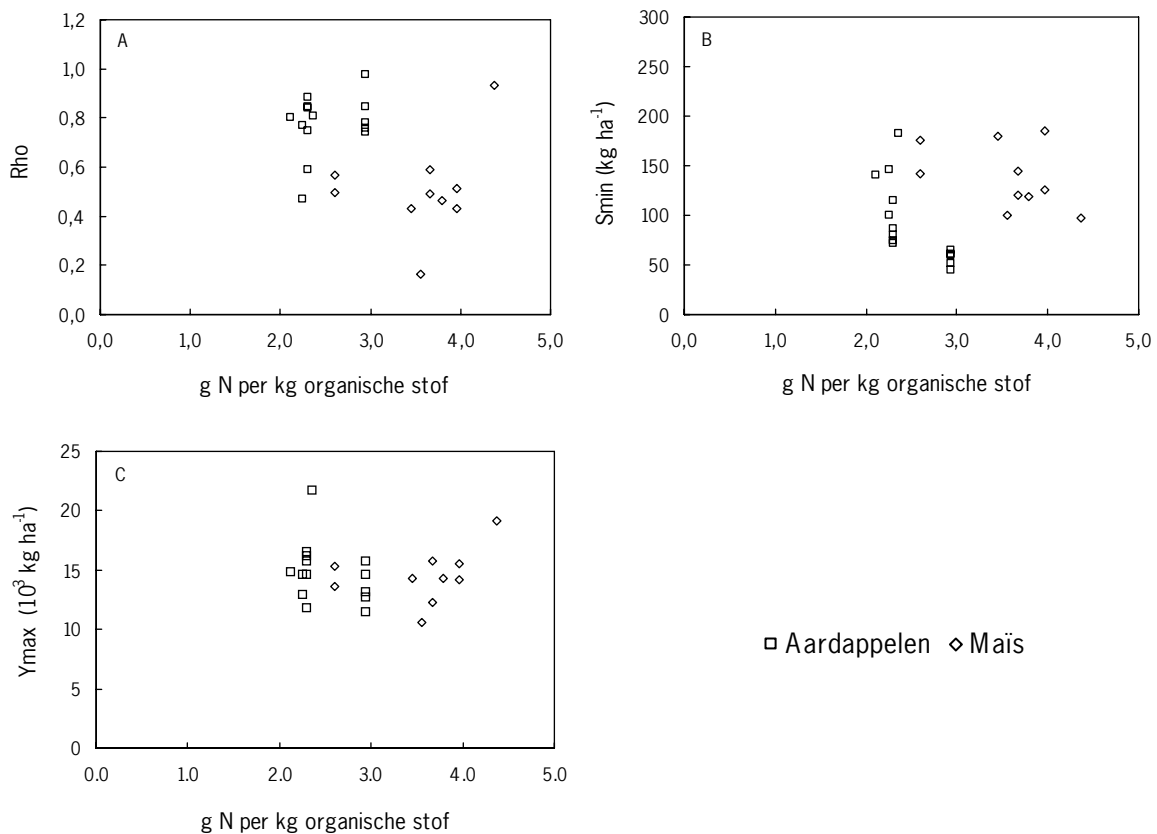
Figuur 4. De N-benutting Rho bij verschillende gemeten N-totaal (A) en percentages organische stof (B) voor aardappelen en maïs.

De biomassa-productie Ymax kan evenmin in relatie gebracht worden met N-tot of het percentage o.s. (Figuur 5). Indien de regressieanalyses afzonderlijk per gewas worden uitgevoerd levert dit geen extra informatie op.

Er bestaat een licht negatief verband tussen Rho en de hoeveelheid stikstof in de organische stof NOS, $R^2 = 23,3\%$ en $P = 0.018$ (Figuur 6A). Wordt echter gewas als factor aan het regressiemodel toegevoegd, dan neemt de verklaarde variantie weliswaar toe tot 54,5%, maar wordt de factor gewas significant en verliest de factor NOS zijn significante bijdrage aan de verklaarde variantie. Er bestaat derhalve geen verband tussen Rho en NOS.



Figuur 5. De maximale biomassa-productie Y_{max} bij verschillende gemeten N-totaal (A) en percentages organische stof (B) voor aardappelen en maïs.



Figuur 6. De N-benutting Rho (A), de bodemmineralisatie Smin (B) en de maximale biomassa-productie Y_{max} (C) uitgezet tegen de verhouding N-totaal : fractie organische stof (NOS) voor aardappelen en maïs.

Smin en NOS hebben geen relatie met elkaar (Figuur 6B). Indien aan het regressiemodel gewas als factor wordt toegevoegd, bestaat er wel een relatie tussen Smin en NOS. Gewas en NOS zijn beide significant ($R^2 = 64,6\%$, P_{NOS}

= 0.003, $P_{\text{gewas}} < 0.001$, geen interactie tussen Smin en NOS). De regressieanalyse per gewas geeft aan dat bij maïs geen relatie bestaan tussen Smin en NOS. Bij aardappelen neemt Smin af bij een toenemende NOS volgens de relatie: $S_{\text{min}} = 296 - 81,4 \text{ NOS}$, $R^2 = 40.5\%$. Er bestaat geen relatie tussen Ymax en NOS (Figuur 6C).

3.3 De economisch optimale N-gift

De gemiddelde economisch optimale N-gift voor aardappelen is 235 kg N ha⁻¹ en voor maïs 171 kg N ha⁻¹ (Tabel 9). De standaardfout bij aardappelen is aanzienlijk. De bijbehorende biomassa-productie Yopt van aardappelen varieert van 43481 tot 82488 kg versproduct ha⁻¹ en bedraagt gemiddeld 50013 kg ha⁻¹ (Tabel 9). Voor maïs varieert Yopt van 6682 tot 20800 kg drogestof ha⁻¹ en bedraagt gemiddeld 16146 kg ha⁻¹.

Tabel 9. De gemiddelde berekende economisch optimale N-gift (Nopt, kg ha⁻¹) en de bijbehorende biomassa-productie van aardappelen (Yopt, kg versgewicht ha⁻¹) en maïs (kg drooggewicht ha⁻¹) en de bodem-mineralisatie Smin (kg ha⁻¹). Tussen haakjes staat de standaardfout aangegeven.

Gewas	Nopt	Yopt
Aardappelen	235 a (109)	50013 a ¹ (18576)
Maïs	171 b (47)	16146 b (2908)
Gemiddeld	207 (93)	35316 (21981)

¹ Verschillende letters geven aan dat de gemiddelden van elkaar verschillen, getoetst met de t-test voor steekproeven van ongelijke grootte en een lsd van 5%.

In Figuur 7A is Nopt, uitgezet tegen de bijbehorende biomassa-productie Yopt. Yopt voor aardappelen is berekend voor de versgewichtproductie en de Yopt voor maïs voor de drogestofproductie. Yopt voor aardappelen is daardoor significant hoger dan Yopt voor maïs (Tabel 9). Daarom is per gewas bekeken of Nopt een relatie heeft met Yopt. Bij aardappelen bestaat er een relatie, $R^2 = 43,2\%$, $P < 0.001$ met $\text{Nopt} = 3,9 * \text{Yopt} + 37$ en de correlatie tussen Nopt en Yopt is 50,5% (Tabel 10). In Figuur 7A is tevens aangegeven welke Nopt en Yopt uit dezelfde datasets komen. Hierbij valt op dat zowel Nopt als Yopt sterk verschillen per dataset. De grote verscheidenheid aan teeltsystemen bij aardappelen draagt bij aan de grote spreiding in Yopt. Binnen dezelfde teeltsystemen, hier datatests (meer dan twee waarnemingen) is de spreiding in Yopt en daarmee de vraag naar N, veel kleiner. Binnen datasets kan geen relatie tussen Nopt en Yopt worden aangetoond. Bij maïs bestaat er geen relatie tussen Nopt en Yopt en de correlatie is laag, 6% (Figuur 7B, Tabel 10).

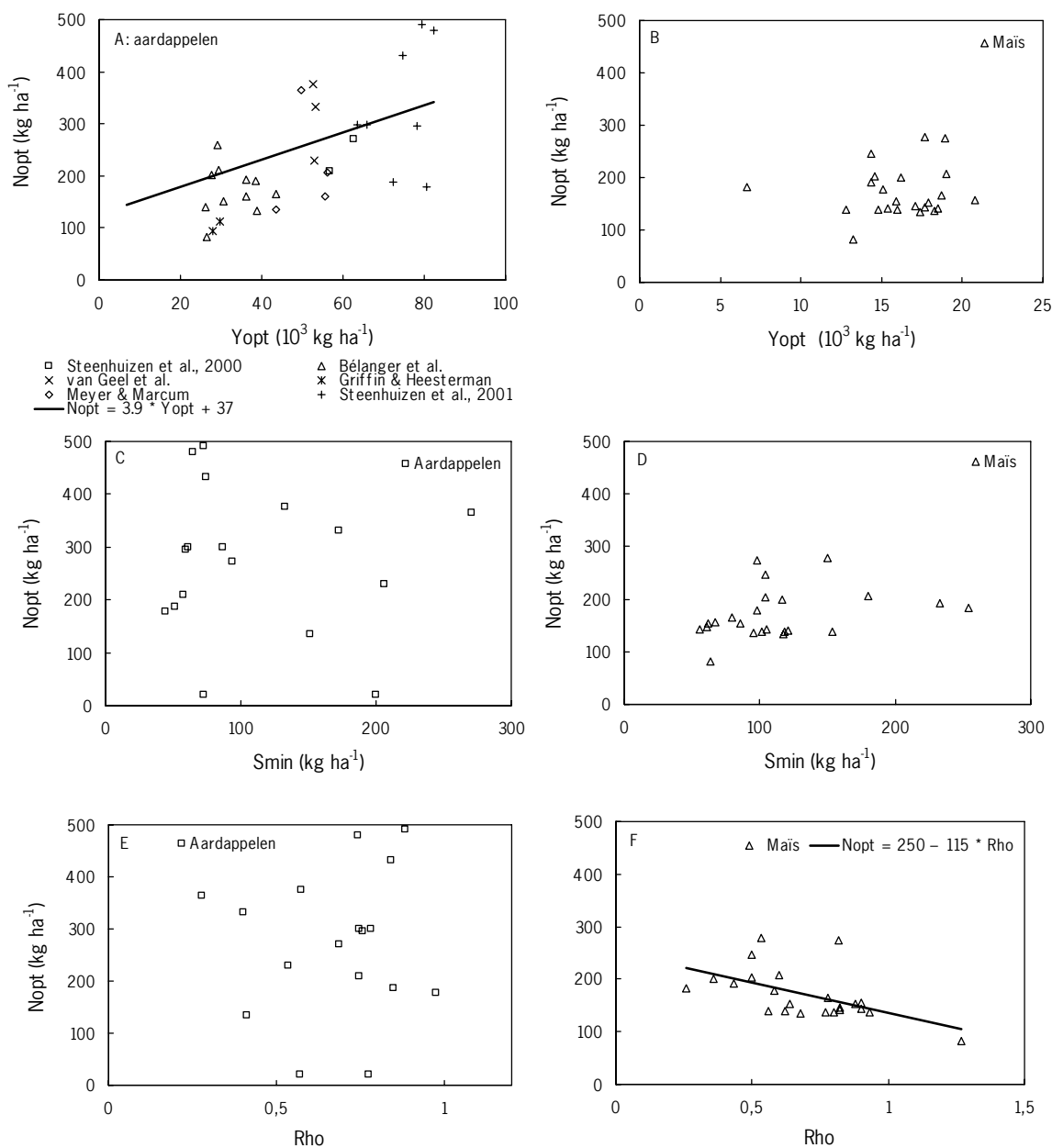
De totale hoeveelheid beschikbare N (Nmintot), de som van Smin en Nopt, bedraagt 382 kg N ha⁻¹ voor aardappelen en 283 kg N ha⁻¹ voor maïs. Ook hier bestaat geen verband tussen Nmintot en Yopt, noch voor aardappelen noch voor maïs (Tabel 10).

Er bestaat geen relatie tussen Nopt en Smin (Tabel 10), noch voor aardappelen (Figuur 7C), noch voor maïs (Figuur 7D). Dit leidt tot de conclusie dat vanuit een bekende bodemmineralisatie geen voorspellingen gedaan kunnen worden voor de economisch optimale N-gift.

De relatie tussen Nopt en Rho, alle data, is zwak, $R^2 = 24,9\%$ (Figuur 7E en F). Hier is een significante interactie tussen gewas en Nopt ($P = 0.042$). Bij aardappelen bestaat er geen relatie tussen Nopt en Rho (Figuur 7F, Tabel 10). Bij maïs neemt Nopt af bij toenemende Rho volgens de regressievergelijking: $\text{Nopt} = 250 - 115 * \text{Rho}$ (Figuur 7E). Wordt de regressieanalyse voor maïs met Nmintot in plaats van met Nopt uitgevoerd dan is de correlatie tussen Rho en Nmintot nog hoger dan tussen Rho en Nopt, -55,1% respectievelijk -78,5%. Bij aardappelen is slechts een zwakke correlatie gevonden tussen Rho en Nmintot (Tabel 10).

Tabel 10. Correlatie matrix tussen de optimale N-gift N_{opt} , de bijbehorende biomassa-productie Y_{opt} , de N-benutting Rho , de bodemmineralisatie $Smin$ en de totale hoeveelheid beschikbare N voor aardappelen en mais berekend met de datasets van Tabel 5.

	Aardappelen					Mais				
	N_{opt}	Y_{opt}	Rho	$Smin$	N_{mintot}	N_{opt}	Y_{opt}	Rho	$Smin$	N_{mintot}
N_{opt}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Y_{opt}	50,5	-	-	-	-	6,7	-	-	-	-
Rho	6,0	76,1	-	-	-	-55,1	41,2	-	-	-
$Smin$	-9,5	-67,0	-90,0	-	-	31,9	-51,6	-71,8	-	-
N_{mintot}	89,3	17,1	-35,0	36,3	-	79,5	-29,1	-78,5	82,8	-



Figuur 7. De economisch optimale N-gift (N_{opt}) uitgezet tegen de bijbehorende biomassa-productie (Y_{opt}), de bodemmineralisatie $Smin$ en de N-benutting Rho voor aardappelen (respectievelijk A, C en E) en mais (respectievelijk B, D en F).

4. Discussie en conclusies

4.1 Samenhang tussen bodemmineralisatie, N-benutting en maximale biomassa-productie

In deze studie is geen relatie aangetoond tussen de bodemmineralisatie S_{min} en de maximale biomassa-productie Y_{max} , of tussen de N-benutting Rho en Y_{max} . Alleen tussen S_{min} en Rho bestaat een duidelijk aantoonbare relatie: Rho neemt sterk af bij toenemende S_{min} (Figuur 2C). Dit resultaat suggereert dat het lineaire traject van Rho veel kleiner is dan aangegeven in Figuur 1 en dat een exponentiële curve voor de doses response curve een correctere weergave zou zijn dan de hier gebruikte broken stick curve.

Figuur 1A, B, D en E veronderstellen dat Rho onafhankelijk is van S_{min} . Deze voorstelling van de doses-responsecurves zijn minder aannemelijk, gezien de gevonden afhankelijkheid van Rho en S_{min} . Alleen Figuur 1F en G veronderstellen dat Rho afhankelijk is van S_{min} . Echter, bij Figuur 1F neemt Rho af bij een kleinere S_{min} en deze studie toont aan dat Rho juist toe neemt bij een kleinere S_{min} , zoals weergegeven in Figuur 1G.

4.2 De economisch optimale N-gift

De economisch optimale N-gift ('Nopt') verschilt per gewas. De Nopt voor aardappelen is hoger dan voor maïs, hetgeen in overeenstemming is met de N-bemestingsrichtlijn waarbij de streefwaarde van de N-bemestingsrichtlijn voor aardappelen hoger is dan voor maïs (Tabel 1).

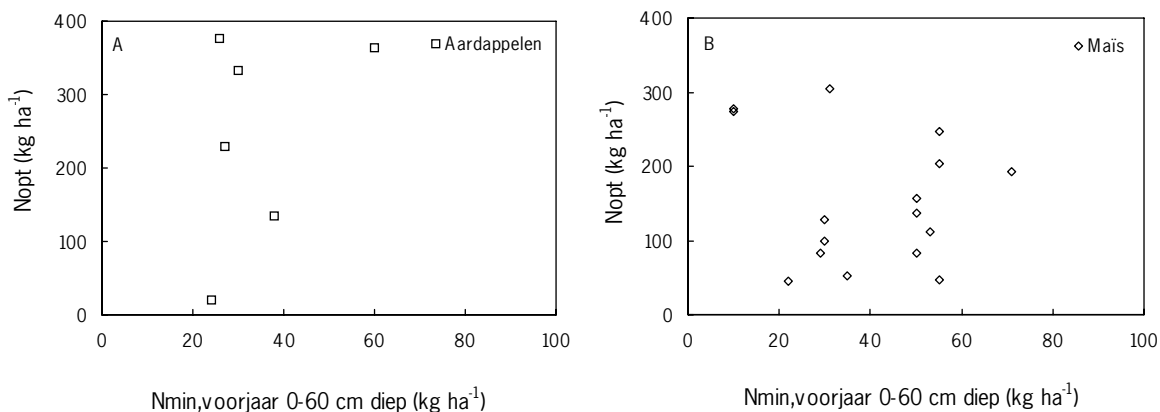
Bij aardappelen bestaat er een verband tussen Nopt en de bijbehorende biomassa-productie Y_{opt} . Dit duidt erop dat het nodig kan zijn om Nopt aan te passen bij een hogere Y_{opt} (hogere vraag naar stikstof). De spreiding in Nopt en Y_{opt} is bij aardappelen aanzienlijk (Figuur 7A). Eén van de mogelijke oorzaken is de grote verscheidenheid in teeltsystemen bij aardappelen waarbij zowel type aardappelgewas als het tijdstip van oogsten en de afrijping, sterk kunnen verschillen. In deze studie is geen onderscheid gemaakt tussen consumptieaardappelen en zetmeelaardappelen of tussen vroege en late rassen. De biomassa-productie en de N-opname van consumptie- en zetmeelaardappelen, en van vroege en late aardappelen, kan sterk verschillen. Binnen dezelfde datasets, waarbij gewerkt is aan dezelfde teeltsystemen, is geen verband aan te tonen tussen Nopt en Y_{opt} (Figuur 7A).

Bij maïs bestaat er geen verband tussen Nopt en Y_{opt} . Het ontbreken van een verband tussen Nopt en Y_{opt} betekent dat bij een hogere Y_{opt} , en daarmee hogere vraag naar stikstof, de optimale N-gift niet mee stijgt: er is immers geen verband tussen vraag en het benodigde aanbod. De hogere N-opname, nodig om aan de hogere vraag te voldoen, kan gerealiseerd worden doordat andere factoren compenserend werken. Uit deze studie blijkt dat de N-benutting Rho toeneemt bij een afnemende bodemmineralisatie S_{min} (Figuur 2C). Bij een lager N-aanbod gaat het gewas efficiënter om met N en kan de gewenste optimale drogestofproductie toch gerealiseerd worden.

4.3 Mogelijke indicatoren

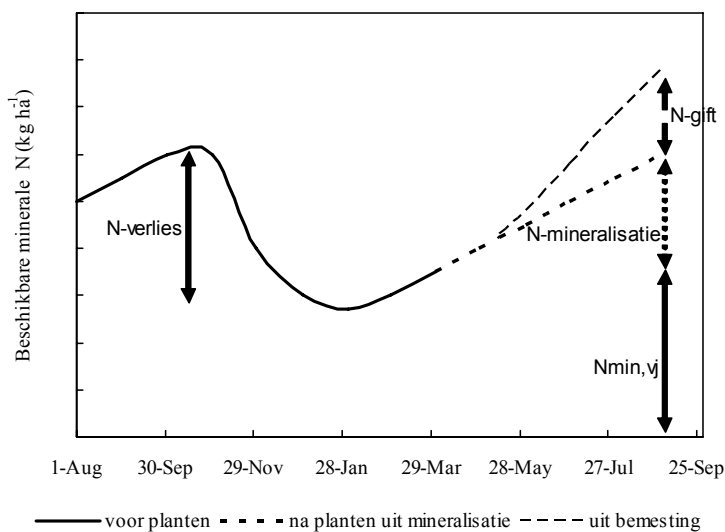
De economisch optimale N-gift Nopt varieert per gewas en kent een aanzienlijk spreiding, ruim 20% voor aardappelen en bijna 15% voor maïs (Tabel 9). Hoewel uit deze studie naar voren komt dat Nopt niet aangepast hoeft te worden aan Y_{opt} (Figuur 7A en B), is het nog steeds wenselijk om zo zuinig mogelijk om te gaan met N en rekening te houden met locale en temporale omstandigheden. Een hoge S_{min} bijvoorbeeld, gaat samen met een lagere Rho (Figuur 2C) en daardoor treden bij een hoge S_{min} grotere N-verliezen op. Het goed inschatten van S_{min} en aanpassen van Nopt aan S_{min} is hierdoor wenselijk. Geen van de in deze studie onderzochte bodemkenmerken komt echter als mogelijk indicator naar voren voor het aanpassen van Nopt via een goede schatting van S_{min} , Y_{max} of Rho op zandgrond. Het percentage organische stof (o.s.), N-totaal (N_{tot}) noch de hoeveelheid N in de organische stof (NOS), zijn in verband te brengen met Y_{max} , Rho of S_{min} (Figuren 3, 4, 5 en 6). Er is alleen een negatief verband gevonden tussen S_{min} en NOS bij aardappelen. Deze relatie tussen S_{min} en NOS bij aardappelen is niet voor

de hand liggend. Een hogere fractie N in de organische stof zou bij gelijke afbraak van de organische stof meer N moeten leveren. Het hier gevonden negatieve verband duidt juist op het tegenovergestelde: een hogere fractie N in de organische stof gaat samen met een lagere bodemmineralisatie. De gronden met een lage fractie N in de organische stof zijn de dalgronden en deze hebben een hogere Smin dan de zandgronden, vermoedelijk door een hogere afbraak van de organische stof. Het aantal waarnemingen op dalgrond is echter beperkt (Tabel 8) zodat het resultaat als een mogelijke richting voor vervolgonderzoek gezien moet worden. Door het ontbreken van een verband tussen bodemkenmerken en Ymax, Rho of Smin, kan deze studie de door het BLGG gehanteerde NLV voor de correctie van Nopt niet ondersteunen.



Figuur 8. De berekende economisch optimale N-gift (Nopt) uitgezet tegen de gemeten minerale stikstofvoorraad (0-60 cm diep) in het voorjaar voor aardappelen (A) en maïs (B).

Een andere indicator die in de N-bemestingsrichtlijn gebruikt wordt, is de hoeveelheid minerale N in het voorjaar (Nmin) vermenigvuldigd met een factor (Tabel 1). Hoewel het aantal datasets waarbij ook Nmin bepaald is slechts 22 is, kan er geen verband aangetoond worden tussen Nopt en de gemeten Nmin-voorjaar, noch voor aardappelen, noch voor maïs (Figuur 8).



Figuur 9. De hoeveelheid beschikbare minerale stikstof (N) voor opname uit verschillende bronnen (aangepast overgenomen van Ostergaard et al. (1985).

Kennelijk is de in deze (zandgrond) proeven de variatie van N_{min} in het voorjaar te klein om een dergelijk verband te kunnen aantonen. Verschillen in N_{min} zoals die, ook op zandgrond, in de voorgaande herfst kunnen bestaan in afhankelijkheid van het voorafgaande gewas en zijn bemesting, doven gedurende de winter uit als gevolg van een neerslagoverschot en het geringe vermogen van zandgronden om water vast te houden. N_{min} als zodanig is bovendien niet meer dan een momentopname. Immers, in het voorjaar neemt de minerale hoeveelheid beschikbare N toe door mineralisatie. Samen met de gift bepaalt dit de totale hoeveelheid beschikbare N voor opname. Echter, uitspoeling voorafgaande aan de teelt en tijdens het teeltseizoen, maken N_{min} voorjaar kennelijk een minder goede indicator voor het aanpassen van de optimale N-gift (Figuur 9).

4.4 Conclusies

De drie onderzochte bodemparameters organische stof, N-totaal en de hoeveelheid N in de organische stof, zijn niet geschikt om te gebruiken als indicator voor de bodemmineralisatie S_{min} , de maximale biomassa-productie Y_{max} of de N-benutting Rho .

In deze studie is tevens geen verband aangetoond tussen de maximale biomassa-productie Y_{max} en de N-benutting Rho , of Y_{max} en de bodemmineralisatie S_{min} . Er is wel een sterk verband gevonden tussen Rho en S_{min} . Dit betekent dat bij een lager stikstofaanbod uit de bodem het gewas efficiënter met N omgaat en alsnog, binnen bepaalde grenzen, een zo hoog mogelijke biomassa probeert te realiseren. Ook is er bij maïs geen verband vastgesteld tussen de economisch optimale N-gift N_{opt} en Y_{opt} . Tussen N_{opt} en Rho bestaat een vergelijkbaar verband als tussen S_{min} en Rho : een lagere N_{opt} gaat samen met een hogere Rho . Deze resultaten maken aannemelijk dat N_{opt} voor maïs niet op voorhand aangepast hoeft te worden aan een hogere Y_{opt} . De hogere vraag naar N door een hogere Y_{opt} wordt in eerste instantie immers gecompenseerd door een hogere benutting van stikstof. Bij aardappelen is een vergelijkbaar resultaat gevonden maar minder expliciet omdat er wel een verband bestaat tussen N_{opt} en Y_{opt} . Dit verband bestaat echter niet per type aardappelteelt. Daardoor is het ook bij aardappelen mogelijk dat een hogere Y_{opt} niet op voorhand samen gaat met een hogere N_{opt} . Het compenserende vermogen van Rho komt bij aardappelen echter minder expliciet naar voren dan bij maïs en zal verder per type aardappelteelt geëvalueerd moeten worden.

5. Literatuur

- Beare M.H., P.H. Williams & K.C. Cameron, 1999.
On-farm monitoring of soil quality for sustainable crop production. In Proceedings of the 1999 Fertilizer and Lime Research Centre Conference, 1999. pp. 81-90.
- Bélanger G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn & N. Ziadi, 2000a.
Yield response of two potato cultivars to supplemental irrigation and N fertilization in New Brunswick. *American Journal of Potato Research* 77, 11-21.
- Bélanger G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn & N. Ziadi, 2000b.
Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 92, 902-908.
- Cerrato M.E. & A.M. Blackmer, 1990.
Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 82, 138-143.
- Curtin D. & F.M. McCallum, 2004.
Biological and chemical assays to estimate nitrogen supplying power of soils with contrasting management histories. *Australian Journal of Soil Research* 42, 737-746.
- De Wit C.T., 1953.
A physical theory on placement of fertilizers. Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage. 71 pp.
- Dekker P., W. Van den Berg, L. Bommelé & D. Reheul, 2005.
Landbouwkundige en milieutechnische aspecten bij teelt van aardappelen op gescheurd grasland. Project nr. 510179, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Wageningen, 41 pp.
- Dekkers W.A., 2001.
Kwantitatieve informatie: Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt 2002. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Wageningen. 320 pp.
- Griffin T.S. & O.B. Hesterman, 1991.
Potato response to legume and fertilizer nitrogen sources. *Agronomy Journal* 83, 1004-1012.
- Jarvis S.C., E.A. Stockdale, M.A. Shepherd & D.S. Powlson, 1996.
Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: Processes and measurement. *Advances in Agronomy* 57, 187-235.
- Letey J., R.E. Sojka, D.R. Upchurch, D.K. Cassel, K.R. Olson, W.A. Payne, S.E. Petrie, G.H. Price, R.J. Reginato, H.D. Scott, P.J. Smethurst & G.B. Triplett, 2003.
Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of soil and water conservation* 58, 180-187.
- Li H., L.E. Parent, C. Tremblay & A. Karam, 1999.
Potato response to crop sequence and nitrogen fertilization following sod breakup in a Gleyed Humo-Ferric Podzol. *Canadian Journal of Plant Science*, 439-446.
- Meyer R.D. & D.B. Marcum, 1998.
Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen. *Agronomy Journal* 90, 420-429.
- Nevens F. & D. Reheul, 2005.
Agronomical and environmental evaluation of a long-term experiment with cattle slurry and supplemental inorganic N applications in silage maize. *European Journal of Agronomy* 22, 349-361.
- Ostergaard H.S., E.K. Hvelplund & D. Rasmussen, 1985.
Assessment of optimum nitrogen fertilizer requirement on the basis of soil analysis and weather conditions prior to the growing season. In *Assessment of nitrogen fertilizer requirement*, Eds J.J. Neeteson & K. Dilz. pp. 25-36. Institute for Soil Fertility [etc.], Haren (Gr.).
- Powlson D.S., 1997.
Integrating agricultural nutrient management with environmental objectives - current state and future prospects. In *Proceedings 402, International Fertiliser Society*, 1997. pp. 42.

- Pronk A.A., J.J. Schröder & R. Booij, 2002.
Verslag van de workshop 'Bodemkwaliteit', Wageningen, 20 september 2002. 54, Plant Research International B.V., Wageningen, 36 pp.
- Schröder J.J., H.F.M. Aarts, M.J.C. De Bode, W. Van Dijk, J.C. Van Middelkoop, M.H.A. De Haan, R.L.M. Schils, G.L. Velthof & W.J. Willems, 2004.
Gebruiksnormen bij verschillende landbouwkundige en milieukundige uitgangspunten. Plant Research International B.V., Wageningen. 60 pp.
- Schröder J.J., J.J. Neeteson, J.C.M. Withagen & I.G.A.M. Noij, 1998.
Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils. *Field Crops Research* 58, 55-67.
- Schröder J.J., J.J. Neeteson, J.C.M. Withagen & I.G.A.M. Noij, 2005.
Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils. *Field Crops Research* 58, 55-67.
- Simard R.R., N. Ziadi, M.C. Nolin & A.N. Cambouris, 2001.
Prediction of nitrogen responses of corn by soil nitrogen mineralization indicators. // *Optimizing Nitrogen Management on Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of the 2nd International nitrogen conference on Science and Policy, 2001.* pp. 135-141.
- Smit A.L. & A. Van der Werf, 1992.
Fysiologie van stikstofopname en -benutting: gewas- en bewortelingskarakteristieken. In *Stikstofstromen in agro-ecosystemen*, Eds H. Van der Meer & J.H.J. Spiertz. pp. 51-69. Cabo-Dlo, Wageningen.
- Smith P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. McGill, J.R.M. Arah, O.G. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Frohling, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein Gunnewiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Müller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley & A.P. Whitmore, 1997.
A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153-225.
- Steenhuizen J.W., R. Booij, J.R. Begeman & K.H. Wijnholds, 2002.
Invloed van stikstofbemesting en kunstmatige beregening op de landbouwkundige en industriële kwaliteit van verschillende zetmeelaardappelrassen. *Nota 176*, Plant Research International B.V., Wageningen, 38 pp.
- Steenhuizen J.W., R.J.F. Haren, J.R. Begeman & K.H. Wijnhold, 2000.
Invloed van verschillende methoden van stikstofbemesting op de kwaliteit van de zetmeelaardappel. *Nota 46*, Plant Research International B.V., Wageningen, 68 pp.
- Steenhuizen J.W., R.J.F. Haren, J.R. Begeman & K.H. Wijnhold, 2001.
Invloed van stikstofbemesting op de landbouwkundige en industriële kwaliteit van verschillende zetmeelaardappelrassen. *Nota 110*, Plant Research International B.V., Wageningen, 68 pp.
- Ten Berge H.F.M., J.C.M. Withagen, F.J. De Ruijter, M.J.W. Jansen & H.G. Van Der Meer, 2000.
Nitrogen responses in grass and selected field crops : QUADMOD parameterisation and extensions for STONE-application. *Rapport 24*, Plant Research International, Wageningen, 45 pp.
- Van Dijk W., 2003.
Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving*, Lelystad. 66 pp.
- Van Geel W.C.A., K.H. Wijnholds & C. Grashoff, 2004.
Ontwikkeling van geleide bemestingssystemen bij de teelt van zetmeelaardappelen 2002-2003. PPO nr. 510168, *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.*, Wageningen, 81 pp.
- Vanotti M.B. & L.G. Bundy, 1994a.
An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. *Journal of Productive Agriculture* 7, 243-249.
- Vanotti M.B. & L.G. Bundy, 1994b.
Corn nitrogen recommendations based on yield response data. *Journal of Productive Agriculture* 7, 249-256.
- Velthof G.L., 2003.
Relaties tussen mineralisatie, denitrificatie en indicatoren voor bodemkwaliteit in landbouwgronden. *Rapport 6*, Alterra Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 38 pp.
- Velvis H., 2001.
Calcium en borium in zetmeelaardappelteelt. *Nota 113*, Plant Research International B.V., Wageningen, 14 pp.

Verloop K., 1999.

Overschotten van stikstof en fosfaat: bruggen slaan tussen landbouwproductie en milieudoelstellingen. Tcb, Den Haag. 180 p.

Vos J., 1997.

The nitrogen response of potato (*Solanum tuberosum* L.) in the field: nitrogen uptake and yield, harvest index and nitrogen concentration. *Potato Research* 40, 237-248.

Zwart K.B., A.P. Whitmore & J.G. Bokhorst, 1999.

Beheer van organische stof in open biologische, ecologische en geïntegreerde teeltsystemen: eindrapport. Rapport 102, Ab-Dlo, Wageningen, 90 pp.

Bijlage I.

Afkortingen, eenheden en de betekenis

Afkorting	Eenheid	Betekenis
Y _{nul}	kg drogestof ha ⁻¹	biomassaproductie van de drogestof van onbemeste veldjes
Y _{max}	kg drogestof ha ⁻¹	maximale biomassaproductie van de drogestof
Y _{opt}	kg ha ⁻¹	optimale productie van het oogstbaar product, behorende bij de economisch optimale stikstofgift. Voor aardappelen is dit versgewicht, voor maïs drogestof.
N	-	stikstof
Nopt	kg N ha ⁻¹	economisch optimale stikstofgift
S _{min}	kg N ha ⁻¹	stikstofmineralisatie vanuit de bodem
Rho	-	stikstofbenutting
U _{min}	kg N ha ⁻¹	stikstofopname van onbemeste veldjes
U _{max}	kg N ha ⁻¹	maximale stikstofopname
Y _{max}	kg drogestof ha ⁻¹	Maximale biomassaproductie
Y _{opt}	kg ha ⁻¹	optimale biomassaproductie, aardappelen versgewicht, maïs drooggewicht
NLV	kg N ha ⁻¹	N-levend vermogen (=N-opname van onbemeste veldjes)
C/N	-	verhouding koolstof en stikstof in de bodem
BLGG	-	Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasanalyse
N _{tot}	g/kg drogestof	totaal stikstofgehalte in de grond
NOS	g N/kg o.s.	totaal stikstofgehalte in de organische stof
o.s.	%	percentage organische stof op drogestof basis
N _{mintot}	kg N ha ⁻¹	Totale hoeveelheid beschikbare stikstof (S _{min} + Nopt)

