

N-opname en gewas- eigenschappen bij spinazie (*Spinacia oleracea* L.) in de vollegrond

H. Niers

Het DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO) is onderdeel van de Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

Het instituut is opgericht op 1 november 1993 en is ontstaan door de samenvoeging van het Wageningse Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek (CABO-DLO) en het in Haren gevestigde Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (IB-DLO).

DLO heeft tot taak het genereren van kennis en het ontwikkelen van expertise ten behoeve van de beleidsvoorbereiding en -uitvoering van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, het bevorderen van de primaire landbouw en de agrarische industrie, het inrichten en beheren van het landelijk gebied, en het beschermen van natuur en milieu.

AB-DLO heeft tot taak het verrichten van zowel fundamenteel-strategisch als toepassingsgericht onderzoek en is gepositioneerd tussen het fundamentele basisonderzoek van de universiteiten en het praktijkgerichte onderzoek op proefstations. De verkregen onderzoeksresultaten dragen bij aan de bevordering van:

- de bodemkwaliteit;
- duurzame plantaardige produktiesystemen;
- de kwaliteit van landbouwprodukten.

Adres:

Vestiging Wageningen:

Postbus 4, 6700 AA Wageningen

tel. 08370-75700

fax 08370-23110

e-mail postkamer@ab.agro.nl

Vestiging Haren:

Postbus 129, 9750 AC Haren

tel. 050-337777

fax 050-337291

e-mail postkamer@ab.agro.nl

Inhoudsopgave

1. Inleiding en legenda	1
2. Algemeen	3
2.1 Areaal	3
2.2 Teeltmethoden	3
2.3 Ontwikkeling en groei	3
2.4 Bodem en bemesting	4
3. Opbrengst en kwaliteit	5
3.1 Verse opbrengst	5
3.2 Oogstrest	6
3.3 Drogestofgehalte van de opbrengst	6
3.4 Drogestofopbrengst	7
3.5 Toename drogestofopbrengst met de tijd	7
3.6 Toename drogestofopbrengst met hoeveelheid N in het gewas	8
3.7 Toename drogestofopbrengst met het N-aanbod	9
3.8 Kwaliteit	11
4. Stikstofgehalte in gewas	13
4.1 N-gehalte van de verse opbrengst en de oogstrest	13
4.2 N-gehalte in de drogestof van de opbrengst	14
4.3 N-gehalte van de drogestof en de tijd	14
4.4 N-gehalte van de drogestof en het N-aanbod	15
4.5 Nitraatgehalte in de opbrengst	15
5. Stikstofhoeveelheid in gewas	17
5.1 Hoeveelheid N in gewasonderdelen	17
5.1.1 Hoeveelheid N in de opbrengst	17
5.1.2 Hoeveelheid N in de oogstrest	17
5.1.3 Totale hoeveelheid N in het gewas	18
5.2 Hoeveelheid N in het gewas en het N-aanbod	19
5.3 N-opnamesnelheid van het gewas	21
5.3.1 Maximale N-opnamesnelheid	21
5.3.2 Tijdstip van de hoogste N-opnamesnelheid	21
6. Nitraatopname-kinetiek en waterverbruik	23
6.1 De vergelijking van Michaelis-Menten	23
6.1.1 Maximale nitraatopnamesnelheid	25
6.1.2 Constante van Michaelis-Menten	26
6.2 Nitraatconcentratie en de nitraatopnamesnelheid	27
6.3 Waterverbruik	29
7. Wortels en stikstofopname	31
7.1 Hoeveelheid wortels	31
7.2 Bewortelde bodemlagen	32
7.3 Bodemlaag en de N-opname	33
7.4 Wortellengte-dichtheid	35
7.4.1 Afstand tot het maaiveld	35
7.4.2 Teeltperiode	35
7.4.3 N-aanbod	35
7.4.4 Groeiduur	36
7.4.5 Rijafstand	36
7.5 Wortelafmetingen	36
7.6 Wortelharen	38
7.7 Wortel/spruit-verhouding	39

8. Samenvatting en discussie	41
8.1 Algemeen	41
8.2 Opbrengst en de kwaliteit	42
8.3 N-gehalte in het gewas	42
8.4 Hoeveelheid N in het gewas	43
8.5 N-opname-kinetiek en het waterverbruik	44
8.6 Wortels en de N-opname	45
8.7 Toekomstig onderzoek	46
8.7.1 Opbrengst en N-opname	46
8.7.2 N-mineraal-rest en vochtgehalte	47
8.7.3 Wortelgroei	47
9. Literatuur	49
Bijlagen	53

1. Inleiding en legenda

IB-DLO-project 450 heeft als titel "Modelmatig onderzoek naar optimale beheersing van nutriëntenstromen in de vollegrondsgroenteteelt". In het kader van dit project is de vraag naar voren gekomen welke gegevens in de literatuur te vinden zijn over gewaseigenschappen van groenten die verband houden met de N-opname. Verder zou moeten worden vastgesteld of er nog experimenteel onderzoek nodig is voor het verzamelen van gegevens.

De aard van het beschouwde element, de plant en de omgeving hebben invloed op het opnameproces (Smolders, 1993). Overeenkomstig de taakstelling gaat dit verslag over N, en daarbij vooral over nitraat. Gezien de beschikbare tijd is, in overleg, besloten in eerste instantie gegevens over spinazie, waarvoor ook de mogelijkheden van N-bijmestsystemen zouden worden nagegaan, te verzamelen. De literatuur over de ontwikkeling, groei en fysiologie van planten in relatie tot abiotische omgevingsfactoren is door Biemond (1992) bestudeerd. Bij teelt in de vollegrond is de omgeving zeer variabel en maar in beperkte mate manipuleerbaar. Vooral de vochtvoorziening en het aanbod van nutriënten kunnen worden beïnvloed.

Nye en Tinker (1977), De Willigen en Van Noordwijk (1987) en Smolders (1993) vermelden de processen die bij de nitraatopname van belang zijn. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen:

- 1) het transport van nitraat in de bodem,
- 2) de nitraatopname door de plant en
- 3) de processen in de plant waarbij nitraat een rol speelt.

Door diffusie en massatransport komt nitraat bij de wortel terecht. Op de aard van deze processen heeft de plant geen invloed, maar wel op de snelheid en omvang van het transport door wateropname, elementopname en de aard van het wortelstelsel. De bodemprocessen worden bepalend voor de opname zodra niet meer aan de vraag van de plant kan worden voldaan.

De Willigen en Van Noordwijk (1987) behandelen de invloed van wortelkenmerken op de opnameprocessen, vooral voor de periode waarin de opname niet wordt beperkt door uitputting rond de wortel. De mate van synchronisatie en/of synlocatie van vraag en aanbod bepalen de efficiëntie waarmee de aanwezige hoeveelheid voedingselement wordt gebruikt. Laatstgenoemde auteurs en Smolders (1993) benadrukken het belang van de regeling van de opname door de plant, waardoor belangrijke opnameparameters veranderen. Dit is het gevolg van processen in de plant. De vraag van de plant bepaalt hoeveel er wordt opgenomen, tenzij de aanvoer in de grond de vraag niet kan bijhouden (Barber, 1984 in Smolders, 1993).

Uitgaande van een bodem met een ruime voorraad aan nitraat, die door een daarop gezaaid gewas wordt uitgeput, kan dan achtereenvolgens beperkend zijn voor de totale N-opname:

1. De vraag van de plant.

Hoofdstuk 3 geeft kwantitatieve gegevens over de hoeveelheid vers en droog materiaal in de opbrengst, bovengrondse oogstrest en ondergrondse oogstrest bij een optimaal N-aanbod. Met bekende, zie hoofdstuk 4, of aangenomen N-gehalten kan de totale hoeveelheid N in gewasonderdelen, zie hoofdstuk 5, worden berekend. Daarmee is de totale vraag van het gewas naar N bekend.

2. De aanvoer naar de wortel toe in de bodem.

Dit valt buiten het bestek van dit verslag, maar paragraaf 7.3 geeft enige gegevens over het transport van nitraat in de bodem.

3. De omvang van het wortelstelsel kan in bepaalde situaties onvoldoende zijn om aan de vraag te voldoen. Die omvang is bij een te geringe aanvoer naar de wortel mede bepalend voor de aanzuigende kracht die door de plant op voedingselementen kan worden uitgeoefend.

Gegevens over worteleigenschappen die verband houden met de stikstofopname staan in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 6 staan gegevens over variabelen en parameters in de vergelijking van Michaelis-Menten. Deze vergelijking wordt vaak gebruikt om de N-opname te beschrijven.

Verder staan in hoofdstuk 2 algemene gegevens over spinazie. Er komt een groot aantal variabelen aan de orde waarmee rekening moet worden gehouden bij modelbouw en bij proeven. Het laatste hoofdstuk bevat een samenvatting en discussie.

Ik ben mij er van bewust dat het vervaardigen van dit stuk meer tijd heeft gekost dan oorspronkelijk was gepland. Voor een deel is dat gekomen door de ruime hoeveelheid materiaal die is gevonden en het rekenen daaraan, en voor een ander deel doordat niet met een eenvoudige compilatie van gegevens, een eerste variant, is volstaan.

Legenda

Tenzij anders is vermeld heeft de tekst betrekking op het gewas spinazie en op minerale N, grotendeels op nitraat.

1) Teeltomschrijving: Benaming, doel (zaaitijd - oogsttijd) ras.

Benaming:

VJ = voorjaarsspinazie (zaaitijd mrt - 20 apr),

ZO = zomerspinazie (zaaitijd 21 apr - eind juni bij teelt voor industriële verwerking, tot eind juli bij teelt voor directe consumptie),

NJ = najaarsspinazie (zaaitijd aug, bij teelt voor directe consumptie tot 15 sept) en

WI = winterspinazie.

Doel: i = industrie, v = verse markt.

De gebruikelijke aanhalingstekens bij het ras ontbreken. Zaai- en oogsttijden: afkortingen voor maanden hebben geen punt. b. = begin, e. = eind, h. = half/helft, w. = week.

2) Opbrengsten, vers en droog, zijn zo nodig omgerekend naar ton ha⁻¹ en stikstofgift, -aanbod en -voorraad naar kg ha⁻¹.

3) N-aanbod (0-30) staat voor de som van de minerale N-voorraad in de laag van 0 tot 30 cm en de verstrekte N-gift. Tussen de haken kunnen andere getallen staan die informatie geven over de laag waar het om gaat.

4) In dit stuk geeft de optimale N-gift of het optimale N-aanbod de maximale opbrengst aan gewasopbrengst. De economisch optimale N-gift respectievelijk het economisch optimale N-aanbod zullen hiervan meestal maar weinig afwijken.

5) Met "externe concentratie" wordt de concentratie aan het worteloppervlak in de voedingsoplossing of de bodemoplossing bedoeld.

6) In de uitdrukking (n = x) staat x voor het aantal proeven of bedrijven waarop een gegeven berust.

7) Voor een betere leesbaarheid van tabellen is een punt gezet op plaatsen waarvoor gegevens ontbreken, ook als dat logische gronden heeft.

8) S/W betekent spruit/wortel-verhouding en W/S wortel/spruit-verhouding.

9) Het in de tekst genoemde IB-DLO, dat is het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, is per 1 november 1993 opgegaan in het AB-DLO, dat is het Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek.

2. Algemeen

In dit hoofdstuk staan algemene gegevens over spinazie. Er komt een groot aantal variabelen aan de orde waarmee rekening moet worden gehouden bij het maken van simulatiemodellen en bij het nemen van proeven.

2.1 Areaal

In de EG is de totale oppervlakte aan spinazie 20.000 ha, met de grootste oppervlakten in Italië en Frankrijk (Krug, 1986).

Voor Nederland geeft Anon. (1992b) in mei 1990, 1991 en 1992 een areaal van respectievelijk 1.153, 945 en 927 ha. Anon. (1993) vermeldt voor 1980, 1985, 1989, 1990 en 1991 een totale oppervlakte van respectievelijk 1.814, 2.500, 1.791, 1.717 en 1.612 ha. Van het totaal areaal in de EG ligt dus zo'n 10% in Nederland.

2.2 Teeltmethoden

De teelthandleiding van De Kraker et al. (1991) bevat veel gegevens voor Nederlandse omstandigheden. Bij teelt voor de verse markt worden, al naar gelang de zaaitijd, tien teelten onderscheiden. Er wordt per ha 150 tot 800 kg zaad gezaaid. De zaaitijd loopt uiteen van eind december tot 15 september en de oogsttijd van 1 april tot begin november. Gerekend per maand wordt in mei de meeste spinazie geoogst, daarop volgt april. Bij teelt voor de verwerkende industrie worden zeven teelten onderscheiden, met 50 tot 150 kg zaad per ha. Er wordt gezaaid van februari tot eind juni en in augustus, en geoogst van 20 april tot eind oktober.

Voor de verschillende teelten is een groot aantal rassen beschikbaar en er is een enorme variatie in de zaaimethoden. Als er op rijen wordt gezaaid bedraagt de rijafstand bij industrieteelten vaak 12,5 cm. Bij de teelt voor de verse markt worden rijafstanden van 5, 7 en 7,5 cm genoemd. De groeiduur in de verschillende teelten varieert van minder dan een maand tot ongeveer drie maanden.

Volgens Krug (1986) wordt in West-Duitsland slechts 15% van de produktie als vers produkt door de consument gekocht. Daar wordt vooral geteeld in de late zomer, herfst en voorjaar. De teelt duurt 35 tot 80 dagen. De gebruikte hoeveelheid zaad varieert in de vollegrond van 30 tot 90 kg ha⁻¹, de rijafstand van 12,5 tot 20 cm en de zaaidiepte van 2 tot 4 cm.

2.3 Ontwikkeling en groei

De daglengte, de hoeveelheid licht en de temperatuur, ook door vernalisatie bij temperaturen van 2 tot 8 °C, hebben volgens Krug (1986) invloed op de ontwikkelingssnelheid en de groeisnelheid. De invloed van de daglengte is groter dan die van de temperatuur. Hogere temperaturen bevorderen de ontwikkelingssnelheid meer dan de groeisnelheid, vooral bij vroege rassen. De sterkste groei vindt plaats bij hoge instraling, gemiddelde temperatuur en hoge luchtvochtigheid. Er zijn grote rasverschillen in de mate van de fotoperiodische gevoeligheid. Onder korte dagen en dus op lagere breedten geven rassen met een kortere kritische daglengte en een geringere fotoperiodische gevoeligheid een hogere opbrengst.

2.4 Bodem en bemesting

Spinazie stelt hoge eisen aan de structuur en waterhuishouding van de grond. Het gewas is gevoelig voor verslechte grond bij het begin van de teelt, voor stagnerend water en voor droogte. Spinazie vraagt een lage zuurgraad (Pieters, 1972; Krug, 1986; De Kraker et al., 1991).

De Kraker et al. (1991) vermelden dat voor de vroege spinazie bij voorkeur lichte grondsoorten worden gekozen [vanwege de snellere groei], met een pH-KCl boven 6,0 en een voldoende gehalte aan organisch materiaal. De latere teelten worden vooral aangetroffen op lichte zavel, maar ook wel op lichte kleigronden. Men gaat wel tot 40% afslibbaar, dat is ongeveer 27% lutum. Op de zware gronden is een pH-KCl boven 6,5 en een goede voorziening met organisch materiaal gewenst.

Spinazie heeft een lage fosfaatbehoefte en een grote kaliebehoefte. De N-behoefte komt in dit stuk aan de orde. Voor noodzakelijke meststofgiften wordt verwezen naar de vigerende adviesbasissen.

3. Opbrengst en kwaliteit

De hoeveelheid vers plantemateriaal die bij de oogst aanwezig is kan worden opgedeeld in het deel dat wordt geoogst, de bovengrondse oogstrest en de ondergrondse oogstrest. Als het drogestofgehalte bekend is kan uit de verse opbrengst de opbrengst aan drogestof worden bepaald. In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de genoemde gewasonderdelen. De groeiduur en het N-aanbod, die een belangrijke invloed hebben op de hoeveelheid drogestof, worden apart behandeld, evenals de kwaliteit van het gewas.

3.1 Verse opbrengst

De Kraker et al. (1991) noemen een groot aantal variabelen dat invloed heeft op de hoogte van de opbrengst. Dat zijn de grondsoort, de bemesting, de zaaitijd, het ras, de zaaizaadhoeveelheid (beter het aantal planten per eenheid van oppervlakte), de weersomstandigheden, het ontwikkelingsstadium en de maaihoogte. Als er veel variabelen zijn die een duidelijk effect hebben op de verse opbrengst mag een grote variatie worden verwacht. Volgens bijlage 1 varieert de verse opbrengst bij de oogst, onder omstandigheden die meestal niet erg sterk van de Nederlandse verschillen, van 15 tot 60 ton ha⁻¹. In bepaalde gevallen is daarmee het maximaal haalbare bereikt omdat het gewas op het punt staat te gaan schieten. In andere gevallen had, door langer te wachten alvorens te oogsten, een veel grotere opbrengst kunnen worden verkregen. In één van de proeven van Schenk et al. (1991) groeit er tussen 41 en 47 dagen na het zaaien 5 ton ha⁻¹ dag⁻¹ aan versgewicht bij.

Uit de proefgegevens van bijlage 1 is een gemiddelde opbrengst van 30 ton ha⁻¹ (n = 51) berekend. Dit komt overeen met hetgeen De Kraker et al. (1991) als jaargemiddelde voor de verse markt vermelden. Gemiddelde opbrengsten per teelt staan in tabel 1.

Tabel 1 De verse opbrengst (ton ha⁻¹) voor verschillende teelten. Gemiddelden van proefgegevens. Tussen haken staan waarden die zijn afgeleid uit De Kraker et al. (1991).

Markt	Periode		
	voorjaar	zomer	najaar
Vers	35 (30-40)	36 (30-40)	30 (.)
Industrie	30 (30-50)	. (.)	. (30-50)

Bij VJ en ZO voor de verse markt zijn de gemiddelden 5 tot 6 ton ha⁻¹ hoger dan die bij andere teelten. In alle gevallen liggen de waarden in de trajecten die afgeleid zijn uit De Kraker et al. (1991).

In West-Duitsland ligt, volgens Krug (1986), de opbrengst bij teelt voor de directe consumptie tussen 20 en 30 ton ha⁻¹ en bij een teelt voor de industrie tussen 25 en 30 ton ha⁻¹. Deze waarden zijn wat lager dan die in tabel 1.

Gewichten van aparte planten in een veldsituatie zijn niet gevonden. Uit tabel 5 van Greenwood et al. (1980) valt echter af te leiden dat per plant als bovengrondse opbrengst 48 g vers materiaal aanwezig is, bij 420.000 planten per ha. Steingrobe en Schenk (1991) vermelden dat ongeveer 7 weken oude planten van het ras Norvak, die 32 dagen op voedingsoplossing staan, vers ongeveer 20 g per plant wegen. In een veldsituatie zal het te bereiken gewicht afhangen van veel variabelen.

3.2 Oogstrest

Gegevens over de hoeveelheid verse bovengrondse oogstrest zijn verzameld in bijlage 2. Ter vergelijking zijn naast de waarden voor spinazie gegevens van enige andere gewassen opgenomen. Bij een in de praktijk gebruikelijk N-aanbod varieert de bovengrondse oogstrest sterk, van 1 tot 20 ton ha⁻¹, met een gemiddelde van 14 ton ha⁻¹. Het traject dat Krug (1986) geeft ligt veel lager dan de overige gegevens.

Uit gegevens van proeven, niet gewogen naar aantal, en opgaven van auteurs is afgeleid dat ongeveer 36% van het bovengronds gewas op het veld achterblijft. Bij een ruim N-aanbod zit, afgaande op gegevens van Heins (1989), van de totale hoeveelheid N in de plant ongeveer 12% in de wortel. Wordt als een ruwe benadering aangenomen dat de relatieve verdeling van het versgewicht over respectievelijk bovengronds en ondergronds deel van de plant gelijk is aan de verdeling van N over genoemde delen, dan zit 12 gewichtsprocent van het verse plantmateriaal in de wortel. Na de oogst blijft dus in totaal 44% van de verse plantmassa achter en verdwijnt 56% van het veld.

Alt en Wiemann (1986) beschrijven een inventarisatie op praktijkbedrijven in Duitsland, waaruit een indruk over de spreiding wordt verkregen. Gemiddeld is aan verkoopbaar vers materiaal 21,2 ton ha⁻¹ geoogst (n = 4), met een variatiecoëfficiënt van 17%. Op drie bedrijven is ook de hoeveelheid bovengronds oogstafval bepaald. Dat is gemiddeld 15,4 ton ha⁻¹, met een variatiecoëfficiënt van 43%. Het bovengronds versgewicht is 36,7 ton ha⁻¹ en van het bovengronds gewas blijft gemiddeld 42% als oogstrest op het veld achter.

Afgaande op figuur 40 van Böhmer (1980) neemt de verse bovengrondse oogstrest, uitgedrukt op de hoeveelheid vers bovengronds gewas, af van 36 naar 29% als het N-aanbod (0-60) oploopt van 20 tot 275 kg ha⁻¹.

Krug (1986) benadrukt de invloed van de wijze van oogsten op de hoeveelheid nutriënten die in de oogstrest achterblijft. Bij diep gesneden spinazie blijft slechts 0 tot 20%, bij hoog gesneden spinazie 40 tot 50% van de opgenomen hoeveelheid voedingselement achter.

3.3 Drogestofgehalte van de opbrengst

In bijlage 3 zijn drogestofgehalten verzameld die in de literatuur zijn aangetroffen. De variatie is groot, van 5,2 tot 11,2%, bij opbrengsten die normaal worden geacht of maximaal zijn. Het gemiddelde over alle proeven is 7,3%. De Kraker et al. (1991) brengen naar voren dat de vochttoestand van de grond in sterke mate bepaalt hoeveel vocht wordt opgenomen, maar ook dat de mate van aanhangend water invloed heeft op het drogestofgehalte. Bij de voorjaars-teelten is gemiddeld 7,2, bij de zomerteelten 7,0 en bij de najaarsteelten 6,6% drogestof in de verse opbrengst aanwezig. Opdelen naar respectievelijk Duitse, Nederlandse en Engelse (weinig materiaal) proeven levert 6,2, 7,5 en 11,2% op. Het resultaat voor de Nederlandse spinazie voor de verwerkende industrie ligt 0,5% beneden de 8% die De Kraker et al. (1991) voor spinazie vermelden.

Volgens Greenwood et al. (1980), Greenwood en Hunt (1986) en Mehwald (1973) worden bij objecten die een sub- of supra-maximale groei vertonen hogere drogestofgehalten waargenomen dan bij objecten met maximale groei. Ook Smolders (1993) vindt, bij spinazie die op voedingsoplossing te weinig N krijgt toegediend, hogere drogestofgehalten dan bij ruim van N voorziene planten.

Uit gegevens van Alt en Wiemann (1986) volgt dat het oogstrestant (zonder wortels) en de opbrengst respectievelijk 4,4 en 6,7% drogestof bevatten. Ook De Kraker et al. (1991) vermelden dat de oogstrest een veel lager drogestofgehalte heeft dan de opbrengst.

3.4 Drogestofopbrengst

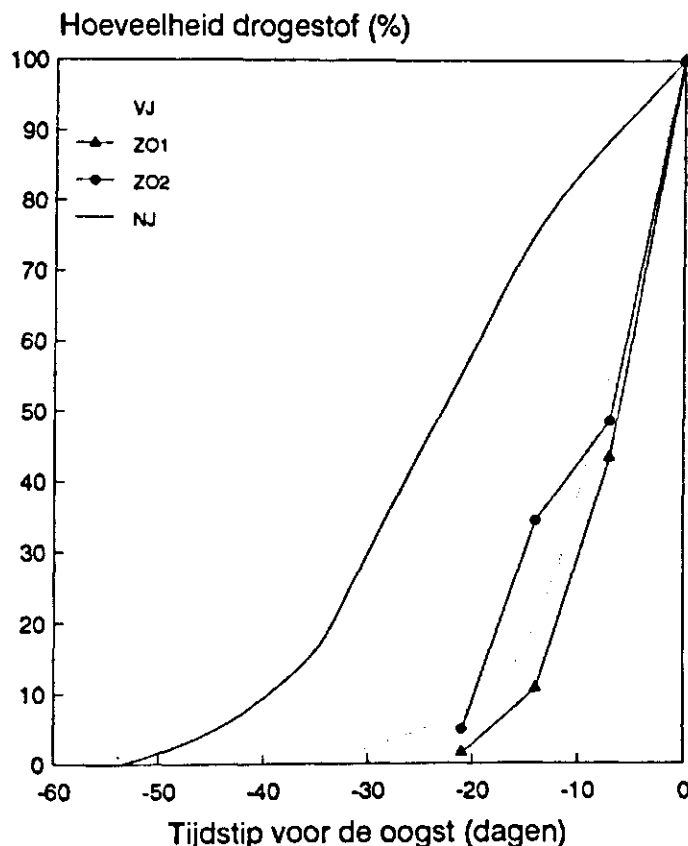
In bijlage 3 staan drogestofopbrengsten van goed gegroeide spinazie. Bij de proeven vanaf 1980 varieert de drogestofopbrengst van 1,4 tot 2,7 ton ha⁻¹. Er zit dus bijna een factor 2 tussen de laagste en de hoogste opbrengst. Gemiddeld is er 2,2 ton ha⁻¹ aan drogestof geoogst.

Om in te kunnen schatten hoeveel drogestof bij de oogst achterblijft, moet ook de hoeveelheid in de wortel bekend zijn. Smolders (1993) drukt de *S/W* uit als de verhouding tussen de hoeveelheid drogestof in spruit en wortel. Zijn figuur 4.1 laat zien dat, bij spinazie op voedingsoplossing, de verhouding sterk wordt beïnvloed door de N-voorziening. Uitgaande van een *S/W* van 2 varieert *S/W* bij planten die te weinig N ontvangen van 1,1 tot 2,5, maar loopt de *S/W* bij de planten met een ruim N-aanbod op tot 4,2 bij de oogst, 33 dagen na het zaaien. Bij de ruim van N voorziene planten zit dan 19% van de drogestof van de plant in de wortel.

3.5 Toename drogestofopbrengst met de tijd

Figuur 1, met gegevens die zijn afgeleid van Wiebe (1976) en Heins (1989), toont aan dat VJ en ZO wordt geoogst op het moment van de hoogste groeisnelheid en NJ maar even daarna.

Volgens Bäumer (1971) in Hähndel (1984) is de maximale drogestoftoename die een gewas kan bereiken 250 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Voor de Nederlandse landbouw veronderstellen De Willigen en Van Noordwijk (1987) voor een groot deel van de groeiperiode een constante dagelijkse drogestofproductie van 200 kg ha⁻¹ dag⁻¹.



Figuur 1 De hoeveelheid drogestof, als percentage van de hoeveelheid bij de oogst, op verschillende tijdstippen voor de oogst. De N-gift bij VJ en NJ is 120 kg ha⁻¹ (Wiebe, 1976) en het N-aanbod (0-60) bij ZO1 en ZO2 250 kg ha⁻¹ (Heins, 1989).

Uit Wiebe (1976) is afgeleid dat de maximale toename van de drogestof bij NJ 110, slaboon 175, witte kool 180, selderij 200, tarwe 210, bloemkool 230, VJ 240 en suikerbiet 260 kg ha⁻¹ dag⁻¹ is. Uit deze gegevens blijkt dat de hoge groeisnelheid van spinazie in het voorjaar alleen wordt overtroffen door suikerbiet. Volgens Hähndel (1984) neemt de hoeveelheid drogestof tijdens de drie dagen voor de oogst bij VJ gemiddeld toe met 238 kg ha⁻¹ dag⁻¹.

In tabel 2 staat de hoeveelheid drogestof op een aantal tijdstippen bij ZO en koolrabi.

Tabel 2 De hoeveelheid drogestof (kg ha⁻¹) op een aantal tijdstippen bij ZO en koolrabi (Heins, 1989). Tussen haken de specifieke drogestoftoename (g g⁻¹).

Teelt	Aantal weken voor de oogst			
	3	2	1	0
ZO(9 mei - 18 juni) Norvak	0,04	0,29 (6,2)	1,18 (3,1)	2,71 (1,3)
ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro	0,12	0,85 (6,1)	1,20 (0,4)	2,46 (1,0)
Koolrabi(17 jul -)	0,56	1,24 (1,2)	1,98 (0,6)	3,08 (0,6)

Op elk tijdstip is de absolute hoeveelheid drogestof bij spinazie lager dan bij koolrabi, maar bij spinazie is de groeisnelheid in de laatste week hoger. Voor de spinazieteelten is over de laatste week een drogestoftoename van respectievelijk 1,53 en 1,26 ton ha⁻¹ week⁻¹ berekend. Dat is gemiddeld 219 en 180 kg ha⁻¹ dag⁻¹. De overeenkomstige waarden voor koolrabi zijn: 1,1 ton ha⁻¹ week⁻¹ en 157 kg ha⁻¹ dag⁻¹. De specifieke toename van de hoeveelheid drogestof blijkt in de derde week voor de oogst bij spinazie veel groter te zijn dan bij koolrabi.

3.6 Toename drogestofopbrengst met hoeveelheid N in het gewas

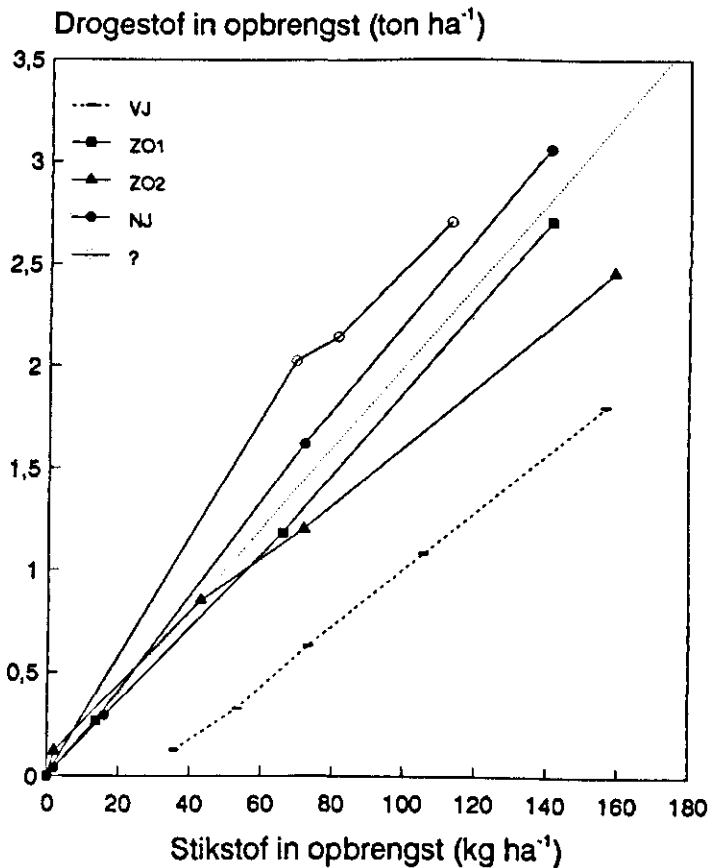
Globaal gezien neemt over een periode voor de oogst, afhankelijk van de teelt gedurende 1 tot 8 weken, de hoeveelheid drogestof in de opbrengst rechtlijnig toe met de hoeveelheid N in de opbrengst (figuur 2). In deze periode wordt meestal meer dan twee derde van de totale hoeveelheid N opgenomen.

In de loop van de teelt ontstaat er tussen de telten verschil in de hoeveelheid drogestof in de opbrengst bij eenzelfde hoeveelheid N in de opbrengst.

De gegevens van Heins en Schenk (1987) tonen aan dat bij een N-aanbod(0-60) van 100 tot 250 kg ha⁻¹ de toename van hoeveelheid drogestof in de opbrengst met de hoeveelheid N in de opbrengst reeds lager is dan bij een lager N-aanbod.

Figuur 3, die is afgeleid uit gegevens van Smolders (1993), toont een heel ander beeld dan figuur 2. De gegevens komen uit een potproef met een grondsoort met één en een andere met twee N-niveaus. In elk der gevallen neemt de hoeveelheid drogestof in de plant eerst rechtlijnig toe met de hoeveelheid opgenomen N, maar later wordt relatief steeds minder N opgenomen. De naar boven afbuigende lijnen ontstaan door N-gebrek. Bij 50 mg N per plant, deze hoeveelheid wordt in geen van de drie gevallen gehaald, zit er in 500.000 planten maar 25 kg N.

Groot (1987), in Van Keulen en Stol (1991), laat zien dat bij wintertarwe de hoeveelheid drogestof in het graan eerst ook rechtlijnig toeneemt met de hoeveelheid opgenomen N, maar later is er een optimum. Dit gewas wordt echter in een veel later groeistadium geoogst dan spinazie.



Figuur 2 De hoeveelheid drogestof in de opbrengst (bij VJ in een deel van de opbrengst) en de hoeveelheid N in de opbrengst. De stippellijn staat voor 5% N in de drogestof. Bij ZO1 en ZO2 is 3, 2, 1 en 0 weken (Heins, 1989) en bij NJ 54, 34 en 0 dagen (Liesegang, 1930) voor de eindoogst geoogst. Voor VJ wordt de toestand op 10, 7, 5, 3 en 0 dagen voor de oogst gegeven (Hähndel, 1984), waarbij in de hoeveelheid drogestof ontbreekt de hoeveelheid die 12 dagen voor de oogst al aanwezig is. Groei bij een voldoende N-aanbod. Bij ? geeft een oplopend N-aanbod (0-60), respectievelijk 100, 175 en 250 kg ha⁻¹, een oplopende hoeveelheid drogestof (Heins en Schenk, 1987).

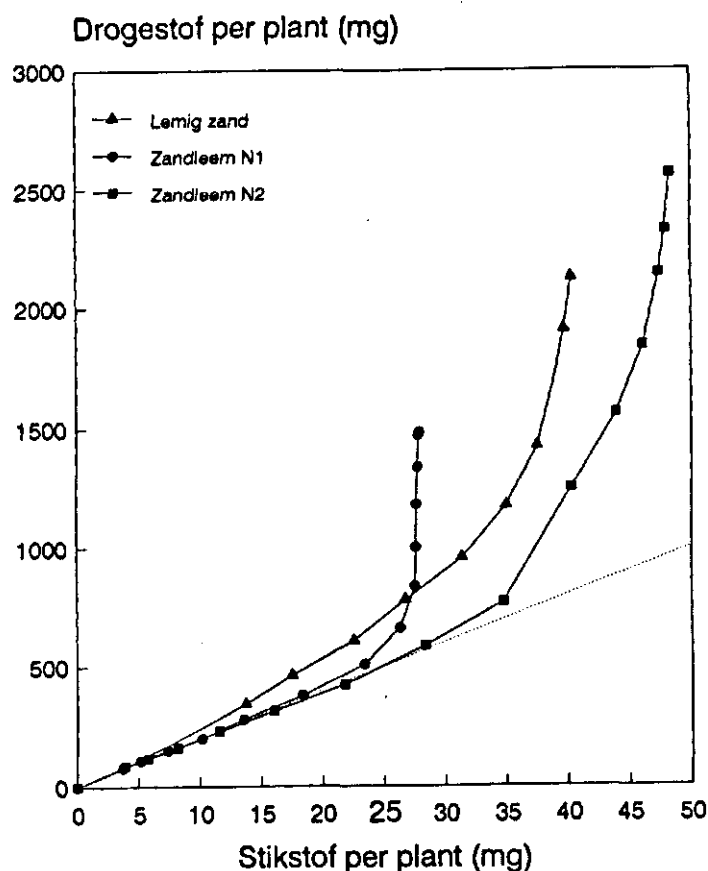
3.7 Toename drogestofopbrengst met het N-aanbod

Dat spinazie met de drogestofproductie sterk op het N-aanbod reageert blijkt uit de volgende literatuurgegevens. Telers zullen voor zo ver mogelijk in verband met nitraatnormen, streven naar een voor de verse opbrengst optimaal N-aanbod. Spinazie heeft bij het begin van de teelt geen hoger N-aanbod nodig dan later in de teelt, zoals bij andere gewassen wel is aangetroffen (5.3).

Greenwood et al. (1980) vinden bij geen, de optimale en de hoogste N-gift respectievelijk 1,1, 2,3 en 1,5 ton ha⁻¹ aan drogestof in de spruit (n = 2). Bij de optimale gift is 109% meer drogestof aanwezig dan bij de onbemeste variant.

Greenwood en Hunt (1986) geven de hoeveelheid drogestof die is geoogst bij respectievelijk geen, de optimale en de hoogste N-gift als 1,1, 2,1 en 1,5 ton ha⁻¹ (n = 2). Deze gegevens zijn bijna gelijk aan die van Greenwood et al. (1980).

Dat de hoeveelheid drogestof nog toeneemt met het N-aanbod bij een N-aanbod (0-60) hoger dan 100 kg ha⁻¹ blijkt uit tabel 3.



Figuur 3 De hoeveelheid drogestof per plant en de hoeveelheid N per plant, bij uitputting van de grond.

Tabel 3 De hoeveelheid drogestof in de spruit (ton ha⁻¹) en de hoogte van het N-aanbod (kg ha⁻¹) (Heins, 1989).

Teelt	N-aanbod (0-60)		
	100	175	250
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	2,0	2,1	2,7
ZO(24 jun - 3 sept) Alvaro	2,2	2,4	2,5
	N-aanbod (0-30) ¹⁾		
	159	199	238
ZO(9 mei - 16 jun)	1,7	1,7	2,1

¹⁾ N-aanbod (0-60) ongeveer 250 kg ha⁻¹.

Met 150 kg ha⁻¹ meer aan N-aanbod (0-60) wordt bij ZO 14 tot 35% meer drogestof geoogst. Uit het tweede deel van de tabel blijkt het belang van voldoende N in de laag van 0 tot 30 cm. Bij eenzelfde N-aanbod (0-60) wordt 24% meer drogestof geoogst als er aan N 40 tot 80 kg ha⁻¹ meer in de laag van 0 tot 30 cm zit.

Greenwood en Draycott (1989) vinden bij proeven met N-giften die variëren van 0 tot 448 kg ha⁻¹ als range voor de opbrengst aan drogestof in 1970 1,3 tot 2,8 en in 1972 0,9 tot 1,8

ton ha^{-1} . Door voldoende N te geven worden dus meeropbrengsten van respectievelijk 115 en 100% verkregen.

3.8 Kwaliteit

Bij het zoeken van een antwoord op de vraag welk N-aanbod gewenst is voor spinazie hebben andere kwaliteitscriteria dan het nitraatgehalte slechts een kleine rol gespeeld. Aan het nitraatgehalte van het gewas wordt in het volgende hoofdstuk enige aandacht besteed. Hier volgen gegevens over andere kwaliteitskenmerken.

Volgens Reuff (1970) wordt bij het oplopen van de N-gift van 100 naar 200 kg ha^{-1} het gehalte aan thiamine, riboflavine en carotine van de plant hoger, maar dat van vitamine C lager. Zwavelzure ammoniak verhoogt, vergeleken met kalksalpeter, het Mn-gehalte van de drogestof van 54 tot 174 mg kg^{-1} (N-gift = 200 kg ha^{-1}).

Wiebe (1976) noemt als een ongewenst effect van hoge N-giften het hogere oxaalzuurgehalte van het gewas. Echter ook het chlorofylgehalte neemt toe en dat voorkomt geel verkleuren. Met de oplopende N-gift dalen de eiwitkwaliteit en het suikergehalte. Het laatste is in bepaalde streken gewenst.

Figuur 4.2-2 van Krug (1986) laat zien dat het optimale N-aanbod voor opbrengst, caroteen- en thiaminegehalte ongeveer 120 kg ha^{-1} hoger ligt dan dat voor verschillende andere kwaliteitscriteria (drogestof, suikergehalte, eiwitkwaliteit, mineralen en vitamine C). Dat voor nitraat, oxaalzuur en vrije aminozuren ligt bij een nog hoger N-aanbod. Spinazie kan hoge gehalten aan nitraat en oxaalzuur bevatten.

4. Stikstofgehalte in gewas

In dit hoofdstuk staan gegevens over het N-gehalte in de verse en droge opbrengst, het effect van tijd en N-aanbod op het N-gehalte in de drogestof en over het nitraatgehalte van de opbrengst.

In het analysecijfer van een echte N-totaal-bepaling zit ook alle nitraat. Bij op het IB-DLO gebruikelijke N-bepalingen wordt met de methode N-Deys alle N verkregen, maar de goedkopere N-Kjeldahl-bepaling neemt maar een deel van de totale hoeveelheid nitraat (60%, hooguit 70 tot 80%) mee (persoonlijke mededelingen van medewerkers van het centraal laboratorium van het IB-DLO). Het verschil in de uitslag van beide bepalingen zal groter zijn naarmate het gewas een hoger nitraatgehalte heeft. In de literatuur komt men verschillende N-Kjeldahl-bepalingen tegen. Zo gebruiken Greenwood et al. (1980) en Greenwood en Draycott (1989) een bepaling waarbij alleen de organische N in de analyseuitslag komt, maar Smolders (1993) gebruikt de methode van Bremner en Mulvaney (1983), met salicylzuur-thiosulfaat, waarmee alle N wordt bepaald. Niet in alle publikaties is duidelijk welk deel van de totale hoeveelheid nitraat in het gepresenteerde N-totaal-gehalte zit.

Uit het volgende blijkt dat de fout die wordt gemaakt bij het gelijk stellen van N-Kjeldahl aan N-totaal bij IB-DLO-bepalingen meestal niet erg groot is. Wordt er uitgegaan van de nu maximaal toegestane nitraatnorm voor de zomerperiode, 3.500 mg nitraat per kg vers (Van Til, 1993), dan zit er in een opbrengst van 30 ton ha⁻¹ 24 kg N in de vorm van nitraat. Begrepen op de totale hoeveelheid N in de opbrengst, volgens 5.1.1 106 kg ha⁻¹, blijkt dat 23% te zijn. Als bij de N-Kjeldahl-analyse 60% van het nitraat in de uitslag komt, wordt meer dan 90% van N-totaal gevonden. Bij voor consumptie aangeboden spinazie zal het nitraatgehalte meestal veel lager zijn, want het gemiddelde moet ver onder de norm liggen indien maar een beperkt aantal overschrijdingen voorkomen. Bij een gehalte van 2.500 mg nitraat per kg vers zit er 17 kg nitraat-N in de opbrengst en wordt in de uitslag ongeveer 94% van N-totaal gevonden.

4.1 N-gehalte van de verse opbrengst en de oogstrest

In bijlage 4 zijn gegevens verzameld over het N-gehalte van de verse opbrengst bij spinazie. Gemiddelden over de proefgegevens zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4 Het N-gehalte in de verse opbrengst (N, kg ton⁻¹) bij drie teelten en gemiddeld over alle gegevens. Afgeleid uit bijlage 4.

Teelt	N	n =
Voorjaar	3,8	8
Zomer	3,3	5
Najaar	3,4	5
Gemiddeld	3,5	18

Gemiddeld zit er 3,5 kg ton⁻¹ aan N in de verse opbrengst van spinazie. Bij de voorjaarsteelten lijken de gehalten wat hoger te zijn. Het effect van de verschillen, zoals die in tabel 4 naar voren komen, op de totale hoeveelheid N die in de opbrengst zit is vrij gering. Bergmann (1983, 1988) geeft een traject van N-gehalten in de drogestof van spinazie bij maximale groei (zie 4.2). Uitgaande van een drogestofgehalte van 7,5% komt dat overeen met 2,9 tot 3,8 kg N per ton vers. De gehalten in tabel 4 passen hier goed bij.

Er zijn twee publikaties gevonden waarin N-gehalten in de oogstrest van spinazie worden vermeld (bijlage 5). Beide opgaven verschillen sterk van elkaar. Er is respectievelijk 2,2 en 4,5 kg N per ton vers gevonden.

4.2 N-gehalte in de drogestof van de opbrengst

Beneden een bepaald, soortafhankelijk en met de groei afnemend, N-gehalte in het gewas is de groei niet optimaal (Biemond, 1992). Volgens Greenwood et al. (1980) is het percentage N (N-Kjeldahl) geen gevoelige toets om te bepalen of door N-gebrek de groei al dan niet wordt beperkt.

In bijlage 6 zijn N-gehalten in de drogestof bij goede of maximale groei verzameld. Vaak gaat het om N-Kjeldahl-bepalingen waarbij niet alle nitraat in de uitslag van de N-bepaling komt. Daarmee wordt het werkelijk N-gehalte iets onderschat. Gemiddeld is bij de proeven in de vollegrond een N-gehalte van 4,9% aanwezig ($n = 14$). Deze waarde ligt boven in het traject met N-gehalten van 3,8 tot 5,0% op de drogestof dat Bergmann (1983), in Krug (1986), en Bergmann (1988), in Steingrobe en Schenk (1991), geeft voor jonge, net geheel ontwikkelde bladeren van spinazie bij maximale groei.

Genoemd gehalte stemt goed overeen met een gehalte van 5% N op de drogestof dat De Willigen en Van Noordwijk (1987) geven voor de meeste gewassen die over voldoende N kunnen beschikken. Het gehalte geldt totdat een drogestofproduktie van 2 ton ha^{-1} is bereikt. In paragraaf 3.4 is aangetoond dat bij de oogst van spinazie ongeveer 2,2 ton ha^{-1} aan drogestof aanwezig is.

Smolders (1993) teelt spinazie die de potgrond uitput, zodat op een bepaald moment de hoeveelheid N in het gewas nauwelijks meer toeneemt (figuur 3). Uit zijn gegevens wordt afgeleid dat er bij het begin van de teelt 4,6 tot 4,8% N in de drogestof aanwezig is en op het moment dat de lijnen afbuigen naar boven 4,2% bij lemig zand en 4,9% bij zandleem. Ook deze waarden liggen meest hoog in het genoemde traject van Bergmann. Bij de laatste oogst van de uitgeputte grond is in alle gevallen nog maar 1,9% N in de drogestof aanwezig, maar indien het gewas was blijven groeien zouden bij de twee objecten met de beste groei waarschijnlijk nog lagere gehalten zijn bereikt.

4.3 N-gehalte van de drogestof en de tijd

Afgaande op gegevens van Heins (1989) loopt het N-gehalte in de drogestof bij één ZO sterk op in de derde week voor de oogst, maar daalt het bij koolrabi over een periode van drie weken voor de oogst (tabel 5).

Tabel 5 Het N-gehalte op de drogestof in de loop van de tijd (%).

Teelt	Aantal weken voor de oogst			
	3	2	1	0
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	5,0	5,5	5,6	5,2
ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro	1,7	5,1	6,0	6,5
Koolrabi	5,9	4,6	4,6	4,4

N-gehalten berekend uit tabel 18 van Heins (1989). N-totaal volgens Peterson en Chesters (1964). N-gehalten mogelijk overschat doordat hoeveelheid N in "Aufwuchs" is betrokken op de opbrengst.

Smolders (1993) vindt bij spinazie op voedingsoplossing die ruim van N is voorzien een constant N-totaal-gehalte in de tijd, hoewel de relatieve groeisnelheid tot de helft van de oorspronkelijke waarde terugloopt.

Voor veel gewassen wordt, naar De Willigen en Van Noordwijk (1987) melden, tijdens het groeiseizoen een daling van het gemiddelde voedingselement-gehalte waargenomen. Dat komt doordat bij een constante dagelijkse groei en opname het aandeel van het jonge weefsel met een hoog gehalte daalt. Bij modelberekeningen is een kritisch N-gehalte van 1,5%, bij een toename van de drogestof met $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$, aangenomen.

4.4 N-gehalte van de drogestof en het N-aanbod

Bij teelt in de vollegrond loopt het N-gehalte in de drogestof op met het N-aanbod bij het begin van de teelt (bijlage 7). Volgens Greenwood et al. (1980) neemt, gaande van de optimale naar de hoogste N-gift, het percentage N in de drogestof van gewassen nog met 12% toe. Uitzonderingen zijn de verdubbelingen bij raap en koolraap. Greenwood en Draycott (1989) melden dat bij spinazie het hoogste organisch-N-gehalte slechts 1,2 maal het kritische N-gehalte, dat is het gehalte dat minimaal nodig is voor maximale groei, is.

Op voedingsoplossing worden vaak pas bij heel lage gehalten in de oplossing lagere N-gehalten in het gewas gevonden. Zo melden Steingrobe en Schenk (1991) dat het N-totaal-gehalte, inclusief nitraat, in de drogestof van ongeveer zeven weken oude spinazie Norvak 4,5% is, onafhankelijk van de nitraatconcentratie van de voedingsoplossing die varieert van 30 tot $1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$. Het N-totaal-gehalte van koolrabi Norika neemt bij concentraties lager dan $100 \mu\text{mol l}^{-1}$ wel sterk af.

4.5 Nitraatgehalte in de opbrengst

In 1968 melden Nicolaisen en Zimmermann dat hoge nitraatgehalten in spinazie een gevaar kunnen betekenen voor de gezondheid van de mens. Sinds eind zeventiger jaren staat het nitraatgehalte van groenten sterk in de belangstelling. De achtergronden zijn door Corré en Breimer (1979) en Breimer (1982) beschreven en worden hier niet herhaald. Hähndel en Wehrmann (1986) noemen veel variabelen die invloed hebben op het nitraatgehalte van planten.

Hier volgen enige gegevens over respectievelijk nitraatnormen, het aandeel van nitraat in N-totaal, de invloed van het N-aanbod op het nitraatgehalte, de samenhang met enige andere gewaseigenschappen en het nitraatgehalte als maatstaf voor de N-voorziening van de plant.

Volgens de Warenwet mag spinazie van 1 april tot 1 november maximaal 3.500 en vanaf 1 november tot 1 april maximaal 4.500 mg nitraat per kg vers bevatten. Vooral bij de herfstteelten schuilt het gevaar van een overschrijding van de norm (De Kraker et al., 1991; Van Til, 1993).

Hähndel (1984) merkt op dat in de laatste vijf dagen voor de oogst de hoeveelheid N in het bovengrondse gewas toeneemt met 80 kg ha^{-1} , waarvan 95% wordt gereduceerd tot organische verbindingen. In deze periode neemt de hoeveelheid nitraat-N kennelijk met 4 kg ha^{-1} toe.

Greenwood en Hunt (1986) laten zien dat bij de oogst zowel het nitraat-N-gehalte als het organisch-N-gehalte in de bovengrondse delen toeneemt met het N-aanbod. Bij geen, de optimale en de maximale N-gift is respectievelijk 1.719, 3.950 en $7.171 \mu\text{g}$ nitraat-N per gram drogestof en respectievelijk 2,4, 3,7 en 4,6% organisch-N in de drogestof aanwezig. Uit deze gegevens wordt afgeleid dat het aandeel van de nitraat-N op N-totaal in de bovengrondse delen van spinazie bij geen, de optimale en de hoogste N-gift respectievelijk 7, 10 en 14% is. Uit gegevens van Smolders (1993) is afgeleid dat bij spinazie op voedingsoplossing met een ruim

N-aanbod van de totale hoeveelheid N in de plant 19% als nitraat-N aanwezig is. Er is 33 dagen na het zaaien gemeten. In de inleiding van dit hoofdstuk is vermeld dat bij spinazie die net aan de nitraatnorm voldoet 23% van de N in de opbrengst uit nitraat kan bestaan. Genoemd percentage kan worden gezien als een soort bovengrens voor het aandeel van nitraat in N-totaal bij teelten in de vollegrond. Bij een gemiddeld nitraatgehalte is ongeveer 16% van N-totaal als nitraat-N aanwezig.

Dat het nitraatgehalte van spinazie oploopt bij het hoger worden van het N-aanbod wordt door Wiebe (1976), Van der Boon en Pieters (1981), Van der Boon et al. (1982, 1986), Hähndel en Wehrmann (1986) en De Kraker et al. (1991) gerapporteerd. Figuur 1 van Van der Boon et al. (1986) en figuur 4.2-2 van Krug (1986) tonen aan dat het maximale nitraatgehalte bij een hoger N-aanbod ligt dan dat waarbij de maximale opbrengst wordt bereikt. Een N-gift kort voor de oogst, die tot doel heeft diepgroene planten te krijgen, verhoogt het nitraatgehalte (Krug, 1986). Van der Boon et al. (1989) vinden dat het delen van de N-gift bij VJ leidt tot een hoger nitraatgehalte. Bij NJ is dat gehalte na alleen een basisgift al hoog. Volgens Hähndel en Wehrmann (1986) kan een lager nitraatgehalte bij spinazie niet worden verkregen door het gewas alleen of grotendeels met NH_4 te voeden. De opbrengst daalt dan namelijk drastisch.

Darwinkel (1975), in Biemond (1992), vindt dat het gehalte aan organische stikstof van een blad hoger is naarmate het blad jonger is, maar oudere en reeds afgestorven bladeren hebben het hoogste nitraatgehalte. Translocatie van nitraat vanuit deze bladeren vindt niet plaats en de omzetting van nitraat in transporteerbare organische N-verbindingen is gering. Terman et al. (1976) nemen waar dat als het N-totaal-gehalte in het blad van spinazie, die op pot in de kas goed groeit, hoger is dan 4,5% op de drogestof, het nitraatgehalte sterk toeneemt met het N-totaal-gehalte. Bij zeven andere gewassen varieert de grenswaarde van 1,5 tot 4,0% en bij sommige gewassen worden voor verschillende delen verschillende grenswaarden vastgesteld.

Biemond (1992) concludeert uit zijn literatuuronderzoek dat beneden een bepaald soortafhankelijk nitraatgehalte de groei van een plant niet optimaal is. Bij hogere nitraatgehalten treedt echter nitraataccumulatie op. Scaife en Bray (1977), in Greenwood et al. (1980), menen dat om te bepalen of N-gebrek de groei beperkt misschien beter op de nitraatconcentratie in het sap van de plant dan op het N-totaal-gehalte in de drogestof kan worden vertrouwd. Door Scaife (1983) wordt het nitraatgehalte bij 90% van de maximale verse opbrengst het kritische nitraatgehalte genoemd. Uit gegevens van Breimer (1982) berekent hij daarvoor 2.700 mg nitraat per kg vers (550 mmol nitraat kg^{-1} drogestof). Volgens Hähndel (1984) is het nitraatgehalte bij het optimale N-aanbod(0-60) bij VJ 2.000 en bij NJ 2.600 mg per kg vers.

5. Stikstofhoeveelheid in gewas

De hoeveelheid N in de plantmassa bij de oogst kan worden opgedeeld over de hoeveelheid in de opbrengst, de hoeveelheid in de bovengrondse oogstrest en de hoeveelheid in de wortel. In dit hoofdstuk staan gegevens over de hoeveelheid N in genoemde gewasonderdelen en in combinaties ervan, over de invloed van het N-aanbod op de verdeling van de hoeveelheden over gewasonderdelen en over de N-opnamesnelheid van het gewas.

Weinig gegevens zijn gevonden over het verloop van de N-opname met de tijd, over de totale N-opname van het gewas en over de verdeling van deze hoeveelheid over gewasonderdelen.

5.1 Hoeveelheid N in gewasonderdelen

In deze paragraaf staan gegevens over de hoeveelheid N in de opbrengst, die in de oogstrest en over de totale hoeveelheid N in het gewas.

5.1.1 Hoeveelheid N in de opbrengst

In bijlage 4 staan gegevens over de hoeveelheid N die met de verkoopbare opbrengst wordt afgevoerd. Het N-aanbod wordt als optimaal of normaal beschouwd, waarmee dus respectievelijk een maximale en goede opbrengst is verkregen. Een deel van de gegevens is afgeleid uit literatuurgegevens. Gemiddelden over gegevens uit proeven zijn weergegeven in tabel 6.

Tabel 6 De hoeveelheid N in de verkoopbare opbrengst (N_v , kg ha⁻¹) en het bovengronds gewas (N_b , kg ha⁻¹), de verkoopbare opbrengst (V, ton ha⁻¹), de hoeveelheid N per eenheid verkoopbare opbrengst ($N_1 = N_v/V$, kg ton⁻¹) en in 30 ton verse opbrengst (N_{30} , kg).

Teelt	N_v	N_b	V	N_1	N_{30}
VJ	116 (8)	164 (2)	31 (8)	3,8 (8)	112 (8)
ZO	130 (4)	153 (8)	43 (5)	3,3 (5)	100 (5)
NJ	112 (5)	114 (4)	33 (5)	3,4 (5)	103 (5)
Gem.	118 (17)	143 (14)	35 (18)	3,5 (18)	106 (18)

De gemiddelden zijn afgeleid uit bijlage 4. Tussen haken staat het aantal gegevens waarop een gemiddelde berust.

In de opbrengst blijkt bij de verschillende groepen 112 tot 130, gemiddeld 118 kg ha⁻¹, aan N te zitten.

Per ton vers materiaal is de N-afvoer gemiddeld 3,5 kg. Voor de drie verschillende gevallen is er een variatie van 3,3 tot 3,8 kg N per ton vers materiaal. Het is echter de vraag of dit echte verschillen zijn gezien de heterogeniteit van de gegevens. Bij een gemiddelde opbrengst van 30 ton ha⁻¹, zie 3.1, zit er 106 kg ha⁻¹ aan N in de opbrengst.

5.1.2 Hoeveelheid N in de oogstrest

In deze paragraaf wordt de hoeveelheid N in de oogstrest op verschillende manieren geschat uit beschikbare gegevens.

In proeven blijkt de hoeveelheid N die bij spinazie bovengronds achterblijft, bij een in de praktijk gebruikelijk N-aanbod, te variëren van 25 tot 96 kg ha⁻¹, met een gemiddelde van 51 kg ha⁻¹ (n = 7, bijlage 2). Bij bloemkool en suikerbiet blijft respectievelijk vier en drie maal zo veel achter. Volgens Krug (1986) heeft de wijze van oogsten een grote invloed op de hoeveelheid bovengrondse oogstrest. Bij diep gesneden spinazie blijft slechts 0 tot 20%, bij hoog gesneden spinazie 40 tot 50 % van de opgenomen hoeveelheid voedingselement achter. Gezien de genoemde 0% wordt hierbij alleen naar de hoeveelheid N in het bovengrondse gewas gekeken. Volgens tabel 6 zal er in de bovengrondse oogstrest gemiddeld 25 kg ha⁻¹ aan N zitten, dat is 17% van de totale hoeveelheid N in het bovengronds gewas. Bij een gemiddelde opbrengst van 30 ton ha⁻¹, zie 3.1, zit er 22 kg ha⁻¹ aan N in de bovengrondse oogstrest.

Uit de nu volgende gegevens van Heins (1989) wordt afgeleid dat, bij een in de praktijk gebruikelijk N-aanbod, ongeveer 12% van de totale hoeveelheid N in het gewas in de wortel zit. Betrokken op een gemiddelde totale hoeveelheid N in het gewas van 163 kg ha⁻¹, zie 5.1.3, is dat ongeveer 20 kg ha⁻¹ aan N. Volgens Heins (1989) neemt bij het oplopen van het N-aanbod (0-60) van 100 naar 250 kg ha⁻¹ de hoeveelheid N in de wortel bij ZO(9 mei - 18 jun) Norvak af van 24 tot 19 kg ha⁻¹, als aandeel in de totale hoeveelheid N in de plant van 26 naar 14%, en bij ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro af van 35 tot 17 kg ha⁻¹, als aandeel van de totale hoeveelheid N in de plant van 26 naar 11% (tabel 7).

Tabel 7 Het deel (%) van de opgenomen N dat bij de oogst in de wortel zit en het N-aanbod (0-60) (N, kg ha⁻¹) (Heins, 1989).

Teelt	N		
	100	175	250
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	26	21	14
ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro	26	19	11

Uit gegevens van een proef met ZO(9 mei -) wordt verder afgeleid dat er bij een N-aanbod (0-60) van 250 kg ha⁻¹ 25 kg ha⁻¹ aan N in de wortel zit. Als vergelijkingsmogelijkheid wordt vermeld dat bij koolrabi bij een N-aanbod (0-60) van 100 tot 150 kg per ha ongeveer 11 kg N in de wortel zit. Bij al deze gevallen zit 10% van de totale hoeveelheid N in de plant in de wortel.

Om de totale hoeveelheid N in de oogstrest te verkrijgen moet bij beide schattingen voor de bovengrondse oogstrest nog de hoeveelheid N in de wortel, 20 kg ha⁻¹, worden opgeteld. Hieruit volgt respectievelijk 45 en 71 kg N per ha. Nog een schatting van de totale hoeveelheid N in de oogstrest wordt verkregen door er van uit te gaan dat 44% van de totale plantmassa op het veld achterblijft; zie 3.2. Hiermee wordt de totale hoeveelheid N in de oogstrest op 72 kg ha⁻¹ geschat. Voorlopig wordt het gemiddelde van deze drie schattingen, 63 kg ha⁻¹, als beste schatting voor de totale hoeveelheid N in de oogstrest aangehouden. Tenslotte is voor een gemiddelde opbrengst van 30 ton ha⁻¹, zie 3.1, uit tabel 6 een totale oogstrest van ruim 40 kg ha⁻¹ afgeleid.

5.1.3 Totale hoeveelheid N in het gewas

Hier volgt een aantal schattingen voor de totale hoeveelheid N in het gewas. Uit tabel 7 is afgeleid dat door vermenigvuldiging van de hoeveelheid N in het bovengrondse gewas met de factor 1,14 de totale hoeveelheid N in het gewas wordt verkregen. Het verschil tussen de totaal opgenomen hoeveelheid N en de hoeveelheid in het bovengrondse deel is dus betrekkelijk gering. Als wordt uitgegaan van een gemiddelde hoeveelheid N in het bovengrondse gewas van 143 kg ha⁻¹, zie tabel 6, en genoemde factor, is in het gehele gewas 163 kg N aanwezig.

Uit tabel 6 is afgeleid dat er gemiddeld over de teelten bij een opbrengst van 30 ton ha^{-1} in totaal ongeveer 145 kg ha^{-1} aan N wordt opgenomen. Krug (1986) vermeldt dat de behoefte van spinazie aan N overeenkomt met 4,5 kg ton^{-1} aan verse opbrengst. Voor een opbrengst van 30 ton ha^{-1} betekent dat 135 kg ha^{-1} aan N. Deze hoeveelheid verschilt maar weinig met de hier berekende 145 kg ha^{-1} .

Gröninger en Soorsma (1991) veronderstellen bij hun NBS-adviezen voor ZO met een opbrengst van 28 ton ha^{-1} en NJ met een opbrengst van 25 ton ha^{-1} een totale N-opname van 125 kg ha^{-1} . De N wordt minder snel opgenomen naar gelang de teelt langer duurt. Uit tabel 6 wordt voor VJ, ZO en NJ een totale N-opname van respectievelijk 187, 174 en 130 kg ha^{-1} afgeleid. Bij de in de literatuur gevonden gegevens is de opbrengst hoger dan door genoemde auteurs is verondersteld.

De hoogte van de totale opbrengst aan gewasmateriaal heeft een zeer grote invloed op de hoeveelheid N die door het gewas wordt opgenomen en daarmee op de hoeveelheid N die met de oogst wordt afgevoerd en op de hoeveelheid in de oogstrest. Indien mogelijk zou de verwachte opbrengst als een variabele in het N-bemestingsadvies moeten worden opgenomen. De Willigen et al. (1992) vermelden dat een goede opbrengstvoorspelling, en een goede voorspelling van de N-levering door de grond, kunnen leiden tot een lager N-residu bij de oogst.

Heins (1989) heeft getracht de N-opname van gewassen met modellen te berekenen. Ze gebruikt voor de N-opname van spinazie en koolrabi het model van Claassen et al. (1986), waarin massastroming, diffusie en de wortellengte, zonder wortelharen, zijn opgenomen. De berekende waarden stemmen voor koolrabi goed overeen met die in een proef, maar zijn voor spinazie te laag. Er worden door haar veel mogelijke oorzaken voor dit verschil genoemd. Het zou kunnen dat de ingevoerde nitraatconcentratie in de grond en de maximale opname-snelheid I_{max} met groot effect, niet juist zijn. Verder kunnen wortelharen een groot effect hebben, is nitraat niet homogeen door de bodem verdeeld en zijn wortels niet homogeen door de grond verdeeld.

5.2 Hoeveelheid N in het gewas en het N-aanbod

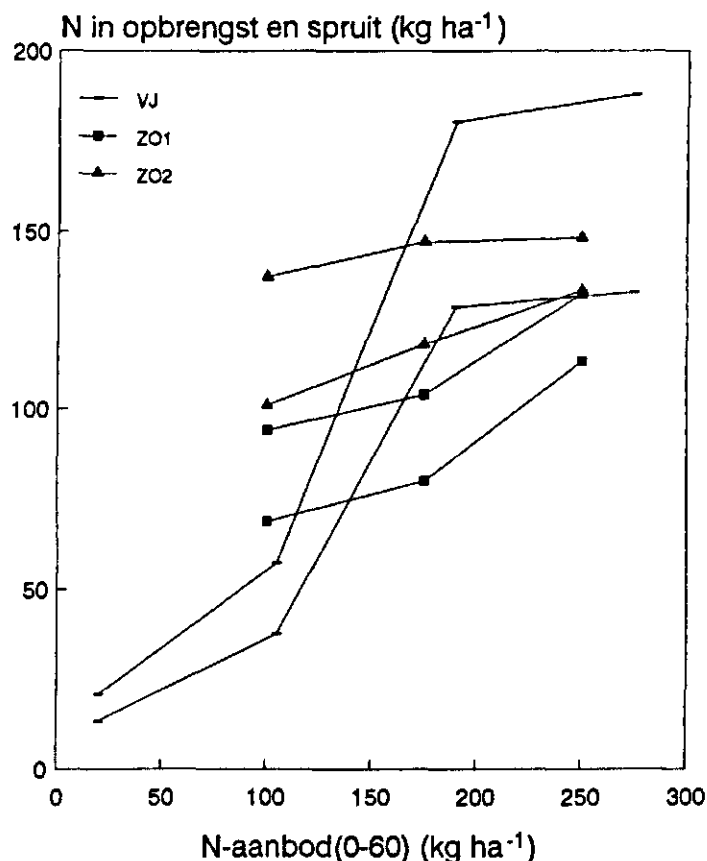
Wiebe (1976) vermeldt reeds dat bij de bemesting rekening moet worden gehouden met de hoeveelheid N die bij het begin van de teelt al in de bodem zit. Die hoeveelheid hangt volgens hem af van het voorgewas en de hoeveelheid neerslag. Uit de literatuurgegevens die in deze paragraaf worden besproken blijkt dat de hoeveelheid N in het gewas duidelijk toeneemt met het N-aanbod.

Uit figuur 4 blijkt dat de hoeveelheid N in opbrengst en spruit toeneemt met het N-aanbod (0-60) bij het begin van de teelt. De gegevens zijn, met de nodige veronderstellingen, afgeleid uit materiaal van Böhmer (1980) en Heins (1989). Bij een hoger N-aanbod wordt meer gewas geproduceerd en meer N opgenomen. De gegevens van Böhmer (1980) geven boven een N-aanbod (0-60) van ongeveer 150 kg ha^{-1} een verminderende meeropbrengst van de hoeveelheid N (Kjeldahl) in het gewas bij het oplopen van het N-aanbod. Figuur 1 van Greenwood et al. (1989) geeft eenzelfde beeld voor andere gewassen. VJ lijkt met de N-opname sterker te reageren op het N-aanbod bij het begin van de teelt dan ZO.

Omdat de grond dieper dan 30 cm vaak niet belangrijk blijkt te zijn voor de N-voeding van spinazie wordt tegenwoordig meer gekeken naar N-aanbod (0-30). Dat doen ook Schenk et al. (1991) in hun figuur 3 voor ZO (28 apr - 13 jun) Norvak. Na een N-aanbod (0-30) van respectievelijk 35, 120, 150, 180 en 210 kg ha^{-1} is in het bovengronds gewas respectievelijk 71, 86, 116, 122 en 120 kg ha^{-1} aan N, N-totaal volgens een gewijzigde Kjeldahl, aanwezig. Het hoogste N-aanbod geeft de hoogste verse opbrengst, namelijk 31 ton ha^{-1} . Tussen N-aanbod (0-30) 120 en 150 kg ha^{-1} neemt de opgenomen hoeveelheid N in het gewas het sterkste toe. Uit hun figuur 4

is afgeleid dat bij ZO(4 mei - 20 apr) Norvak op löss, bij het oplopen van N-aanbod (0-30) van 30 tot 240 kg ha⁻¹, de in de opbrengst aanwezige hoeveelheid N toeneemt van 64 tot 210 kg ha⁻¹. Een week voor de oogst zitten echter nog maar de helft van genoemde hoeveelheden in het gewas. Hierbij is verondersteld, zie 5.1.1, dat er 3,5 kg N per ton vers materiaal aanwezig is. De opbrengst bij het hoogste N-aanbod is 60 ton ha⁻¹.

Greenwood et al. (1980) en Greenwood en Hunt (1986) verstrekken gegevens waaruit wordt afgeleid dat er bij geen, de optimale en de hoogste N-gift respectievelijk ongeveer 27, 86 en 74 kg ha⁻¹ aan N in het gewas zit.



Figuur 4 De hoeveelheid N in respectievelijk opbrengst en spruit (kg ha⁻¹) en het N-aanbod (0-60) (kg ha⁻¹) voor drie teelten. Böhmer (1980). Figuur 40 voor VJ(12 apr - 11 jun) Nores. Bij een N-aanbod (0-60) van 190 kg ha⁻¹ is de maximale opbrengst van 48 ton ha⁻¹ verkregen. Heins (1989). ZO1(9 mei -18 jun) Norvak en ZO2 (24 jul - 3 sept) Alvaro. Hoogste opbrengst bij N-aanbod (0-60) = 250 kg ha⁻¹.

5.3 N-opnamesnelheid van het gewas

De N-opname van een plant wordt in sterke mate gereguleerd door de groeisnelheid van de plant, maar hoe dat gebeurt is volgens Smolders (1993) nog niet duidelijk.

De teelt van spinazie duurt maar kort. Bij zaai van spinazie voor industriële verwerking op 1 april bijvoorbeeld slechts 7 weken en bij zaai op 1 mei 5,5 weken. Dit is afgeleid uit figuur 2 van De Kraker et al. (1991), als een gemiddelde voor Nores en Spinoza. Het is van belang het verloop met de tijd van de N-opnamesnelheid van het gewas te kennen omdat zo duidelijk wordt wanneer knelpunten in de N-voorziening kunnen worden verwacht. Meteen na het zaaien wordt nauwelijks N opgenomen en zal er al gauw voldoende beschikbaar zijn voor het gewas, behalve als er veel uitspoelt. Hoewel het bewortelde volume dan ook klein is, is de

optimale N-gift in het begin van de teelt niet groter dan later in de teelt. Dit is door Greenwood et al. (1989) voor andere gewassen wel gevonden (zie hun tabel 5).

Smolders (1993) vindt dat er 13 dagen na het zaaien bij spinazie op voedingsoplossing, bij een optimaal N-aanbod, per plant 56,6 tot 70,3 $\mu\text{mol N}$ aanwezig is. Bij 500.000 planten per ha zit er dan twee weken na het zaaien aan N nog maar 0,4 kg ha⁻¹ in het gewas.

De Willigen en Van Noordwijk (1987) gaan bij hun berekeningen voor landbouwgewassen onder Nederlandse omstandigheden uit van een constante drogestofproductie en een constante N-opnamesnelheid van 3 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Hun figuur 3.12 laat zien dat bij veel gewassen de N-opnamesnelheid constant is gedurende 1 tot 2 maand. Bij spinazie is het rechtlijnige traject veel korter door de kortere groeiperiode en vaak ook doordat de oogst al plaats heeft in het rechtlijnige traject.

5.3.1 Maximale N-opnamesnelheid

In bijlage 8 zijn maximale opnamesnelheden van spinazie verzameld, die in de literatuur zijn aangetroffen of uit gegevens in de literatuur zijn afgeleid. De waarden variëren van 3 tot 17, met een gemiddelde van 9 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Dit is veel hoger dan het gemiddelde voor veel gewassen van 5,6 kg ha⁻¹ dag⁻¹, dat Burns (1980) aan Greenwood ontleent en de 3 kg ha⁻¹ dag⁻¹ voor landbouwgewassen onder Nederlandse omstandigheden van De Willigen en Van Noordwijk (1987). De maximale opnamesnelheid is lager naarmate later in het jaar met de teelt wordt gestart. Voor VJ, ZO en NJ zijn de gemiddelden respectievelijk 14, 10 en 4 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Als wordt verondersteld dat de maximale opnamesnelheid een week zou aanhouden, varieert de opnamesnelheid van 20 tot bijna 120, met een gemiddelde van ruim 60 kg ha⁻¹ week⁻¹.

5.3.2 Tijdstip van de hoogste N-opnamesnelheid

De meeste literatuur wijst erop dat bij spinazie de N-opnamesnelheid vlak voor of bij de oogst het grootste is. De hoge N-opnamesnelheden aan het eind van de teeltperiode en de variatie in opbrengsten en dus N-opname maken het onmogelijk om een nauwkeurig N-bemestingsadvies te geven bij het begin van de teelt.

Afgaande op figuur 1 van Liesegang (1930) vindt de snelste N-opname bij NJ (6 aug - 27 okt) plaats tussen acht en vijf weken voor de oogst. Laske (1962) meent dat de voedingsbehoefte 3 tot 4 weken voor de oogst het grootst is. Krug (1986) schrijft dat de hoogste dagelijkse N-opname bij de oogst optreedt. Hiermee stemmen gegevens van Heins (1989) en Schenk et al. (1991) voor ZO overeen. Hieruit worden voor de laatste week N-opnamesnelheden van respectievelijk 42, 75 en 87 kg ha⁻¹ week⁻¹ afgeleid. Gröninger en Soorsma (1991) veronderstellen de hoogste opnamesnelheid in de laatste twee (tot vijf) weken voor de oogst. Zij gaan bij ZO uit van een opnamesnelheid van 40 en voor NJ van 20 tot 30 kg ha⁻¹ week⁻¹ (bijlage 9).

Gezien de hoge N-opname tegen het eind van de teelt is de periode waarin de laatste helft van de N wordt opgenomen klein vergeleken met de lengte van de teeltperiode (tabel 8). Die periode is bij VJ 5 dagen, bij ZO een week en bij NJ twee weken.

Tabel 8 De lengte van de periode (P, d. = dagen, w. = week) waarin de laatste helft van de N wordt opgenomen. Afgeleid uit literatuur.

Teelt	P	Bron
VJ	5,5 d.	Wiebe, 1976
	< 5 d.	Hähndel, 1984 (fig. 7)
ZO	< 1 w.	Heins, 1989
	ca. 1,5 w.	Schenk et al., 1991 Gröninger en Soorsma, 1991
NJ	13 d.	Wiebe, 1976

6. Nitraatopname-kinetiek en waterverbruik

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de vergelijking van Michaelis-Menten die vaak wordt gebruikt voor het verband tussen de opnamesnelheid van een element en de externe concentratie van dat element. Voor spinazie worden waarden gegeven voor de minimale nitraatconcentratie die voor N-opname nodig is, de maximale opnamesnelheid, de nitraatconcentratie die nodig is voor de maximale opnamesnelheid en de constante van Michaelis-Menten. De laatste paragraaf in dit hoofdstuk bevat gegevens over het waterverbruik van spinazie. Een deel van de N komt met de massastroming van het water bij de wortel terecht.

De nitraatopnamesnelheid kan op diverse manieren worden uitgedrukt. Belangrijk is waarop de hoeveelheid die wordt opgenomen wordt betrokken. Daarvoor is een aantal mogelijkheden denkbaar.

- 1) Als naar de opname door de wortel wordt gekeken zal dat een eenheid van wortellengte, van worteloppervlakte, al dan niet inclusief dat van de wortelharen, of van vers of droog wortelgewicht kunnen zijn.
- 2) Als naar de opname door de plant wordt gekeken en naar de vraag of aan de behoefte van de plant kan worden voldaan zal de opname worden betrokken op het gewicht, vaak droog, van spruit of plant. Voor plant kan ook gewas worden gelezen.
- 3) Voor het leggen van verbanden tussen de hoeveelheid die wordt opgenomen en de hoeveelheid die wordt aangeboden zijn opnamesnelheden per eenheid van teeltoppervlakte geschikt.

Veel werk is beperkt tot een deelgebied, waarbij niet altijd duidelijk is wat de resultaten die op één gebied zijn bereikt voor andere gebieden betekenen. Vooral de onder 1) genoemde varianten lijken een beperkt nut te hebben. Ze zijn niet constant en het is niet altijd nodig dat er met maximale opnamesnelheid $I_{\max}$ wordt opgenomen om aan de vraag van de plant te kunnen voldoen. Sommige soorten planten, waaronder spinazie, kunnen bij nitraatconcentraties die lager zijn dan die welke nodig zijn voor een maximale opnamesnelheid per cm wortel toch een goede groei vertonen door een grote absorberende worteloppervlakte.

6.1 De vergelijking van Michaelis-Menten

Belangrijke kenmerken bij de nitraatopname-kinetiek zijn de laagste nitraatconcentratie waarbij nog opname plaatsvindt, de concentratie die nodig is voor de maximale opnamesnelheid, die snelheid ($I_{\max}$) zelf, en, als maatstaf voor het vermogen om bij lage nitraatconcentraties nitraat op te nemen, de concentratie waarbij de opnamesnelheid is teruggelopen tot de helft van de maximaal mogelijke.

De opnamesnelheid van nitraat, I , wordt meestal beschreven met de hyperbolische vergelijking van Michaelis-Menten.

$$I = \frac{I_{\max} \cdot C}{K_m + C}$$

In de vergelijking komen voor de maximale opnamesnelheid $I_{\max}$, de externe concentratie C en de constante van Michaelis-Menten K_m , dat is de concentratie waarbij de opnamesnelheid tot de helft van de maximale is teruggelopen. Voor achtergronden wordt verwezen naar Nye en Tinker (1977), Burns (1980) en Smolders (1993). Voor concentraties hoger dan $1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$ zou

er een tweede opnamemogelijkheid bestaan met passief transport en met veel hogere opnamesnelheden dan $I_{\max}$.

Verschillende auteurs hebben varianten van genoemd model naar voren gebracht of het belang ter discussie gesteld. Zo vermindert Heins (1989) de externe concentratie met een drempelwaarde, de laagste concentratie waarbij nog opname plaatsvindt.

De Willigen en Van Noordwijk (1987) gaan er bij hun model onder meer vanuit dat er een functioneel evenwicht tussen spruit en wortel bestaat, dat de opname van N wordt bepaald door de vraag van de plant, dat de plant voldoende N op kan nemen totdat de concentratie aan de wortelwand tot nul is gedaald, dat de minimaal benodigde worteloppervlakte wordt bepaald door de noodzakelijke wateropname en dat alle wortels met dezelfde snelheid opnemen als het aanbod voldoende is. Daarbij neemt de plant op met een constante opnamesnelheid die lager is dan $I_{\max}$. De opnamesnelheid is in sterke mate onafhankelijk van de concentratie in de bodemoplossing en loopt pas terug als de concentratie bij de wortelwand nul wordt. Uit literatuur blijkt dat als de termijn waarover het opnameproces wordt bestudeerd langer wordt, bij P en K zowel de concentratie die minimaal nodig is om $I_{\max}$ te bereiken als $I_{\max}$ zelf daalt.

Volgens Clarkson (1985), in Smolders (1993), variëren $I_{\max}$ en K_m met de leeftijd van de plant, de elementconcentratie waaraan de plant gewend is, de groeisnelheid en het deel van de wortels dat in contact staat met het element. Jackson et al. (1986), in Smolders (1993), brengen naar voren dat het toekennen van kinetische parameters aan een eenheid wortel de interne regulering door de plant ontkent en dat die er is blijkt uit een duidelijk vermogen opnamesnelheden aan te passen aan veranderingen in voeding en omgeving.

Smolders (1993) concludeert uit literatuurgegevens dat vast staat dat de opname van een element wordt geregeld door de plant. Voor cellulaire opnameprocessen zou het interne elementniveau de bron van controle kunnen zijn. Op plantniveau spelen mogelijk andere stoffen een rol. In zijn model worden in de plant drie vormen van N onderscheiden. N is vooral aanwezig als gereduceerd N, als nitraat in de vacuolen en als nitraat in het cytoplasma. De hoeveelheid in de vacuolen is lager als er meer oplosbare suikers voor handen zijn. De nitraat in het cytoplasma staat in evenwicht met die in de vacuolen. In een berekening wordt tussen de hoeveelheid nitraat in de vacuolen en die in het cytoplasma een verdelingsconstante K_v van 19 aangehouden. Dat wil zeggen dat van alle nitraat in de plant 95% in de vacuolen zit. Hij gebruikt de vergelijking van Michaelis-Menten voor het beschrijven van de nitraat-reductase-activiteit en, in aangepaste vorm, voor de specifieke nitraatopnamesnelheid U , uitgedrukt op het drooggewicht van de plant in $\text{mmol g}^{-1} \text{dag}^{-1}$.

$$U = \frac{U_{\max} ([\text{NO}_3]_{c,\text{set}} - [\text{NO}_3]_c) C}{K_{m,U} + C}$$

Naast de externe nitraatconcentratie C , verschijnt ook de nitraatconcentratie van het cytoplasma $[\text{NO}_3]_c$ en een referentie-concentratie van het cytoplasma $[\text{NO}_3]_{c,\text{set}}$ in de vergelijking. Als de N-niveaus in de plant tijdens de groei constant blijven en de nitraatconcentratie in het cytoplasma niet beperkend is kan het deel dat in de teller voor C staat worden vervangen door het produkt van de N-totaal-concentratie in de plant en de relatieve groeisnelheid van de plant (beide maximaal).

Smolders (1993) vergelijkt zijn model met dat van De Willigen en Van Noordwijk (1987) bij een hoge wortellengte-dichtheid, een hoge vraag en een nitraatconcentratie van $4.000 \mu\text{mol l}^{-1}$. Genoemde nitraatconcentratie betekent, omgerekend naar een laag van 30 cm met 20 volumepercent vocht, dat er een lage N-voorraad, ongeveer 34 kg ha^{-1} , aanwezig is. De verschillen in uitkomsten tussen beide modellen zijn vrij klein. Binnen een dag is de nitraatconcentratie aan het worteloppervlak bij het model van De Willigen en Van Noordwijk (1987) tot 0 en bij

dat van Smolders tot $250 \mu\text{mol l}^{-1}$ gedaald. Al heel snel bepaalt de diffusie in hoeverre aan de vraag van de plant wordt voldaan. Smolders trekt de conclusie dat de nitraatopname gevoelig is voor de externe nitraatconcentratie maar dat het effect op de hoeveelheid nitraat die wordt opgenomen klein is. Bepalend voor de opname zijn de vraag van de plant en wortel- en bodemeigenschappen die uitmaken af aan de vraag wordt voldaan.

6.1.1 Maximale nitraatopnamesnelheid

De maximale nitraatopnamesnelheid per plant kan gezien worden als het produkt van de maximale opnamesnelheid I_{max} per eenheid van wortellengte en de aanwezige wortellengte. Een plant kan de maximale hoeveelheid die per tijdseenheid wordt opgenomen dan beïnvloeden door variatie in de wortellengte en I_{max} . In de wortellengte kan de lengte van de wortelharen al dan niet zijn opgenomen. Volgens Heins (1989) is voor de nutriëntenopname de totale worteloppervlakte, inclusief dat van de wortelharen, bepalend voor de opnamesnelheid per plant. Voor wortellengte kan ook worteloppervlakte worden gelezen.

Volgens Clarkson (1985), in De Willigen en Van Noordwijk (1987), zijn I_{max} en K_m voor een bepaalde cultivar geen constante gegevens, maar afhankelijk van de ouderdom van de plant, de voedingselement-concentratie waaraan de plant is gewend en het gehalte aan element in de plant. Verder kan I_{max} in verband staan met de groeikracht en de reciproke van de relatieve wortelomvang of het deel van de wortels dat in contact staat met het voedingselement.

Het is niet voor elk gewas noodzakelijk om met I_{max} op te nemen om voldoende nutriënten binnen te krijgen. Zo vinden Steingrobe en Schenk (1991) dat zowel spinazie als koolrabi bij een lage nitraatconcentratie, ongeveer 25 vergeleken met $1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$, 33% meer aan totale wortellengte hebben. Spinazie vormt bij de lage concentratie echter ook een grotere absorberende worteloppervlakte door meer en langere wortelharen, maar koolrabi doet dat niet. Bij spinazie is er per cm wortel bij $1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$ aan nitraat in de voedingsoplossing een wortelhaar-oppervlakte van 7 en bij $30 \mu\text{mol l}^{-1}$ van 10 mm^2 . Om voldoende N op te kunnen nemen voor maximale groei is het daarom voor spinazie niet nodig om met maximale opnamesnelheid op te nemen, maar voor koolrabi wel.

In weinig publikaties wordt de oppervlakte van de wortelharen in aanmerking genomen bij de vermelde I_{max} -waarden. In tabel 9 zijn verzamelde I_{max} -waarden dan ook uitgedrukt per cm wortel ($\text{pmol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

De I_{max} -waarden in de tabel variëren van $0,1$ tot $1,9$ en voor spinazie van $0,1$ tot $0,7 \text{ pmol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Ze zijn op voedingsoplossingen bepaald. Nu volgen enige aantekeningen over variabelen die invloed hebben op de hoogte van I_{max} .

Spinazie heeft vergeleken met andere gewassen lage waarden voor I_{max} . Omdat er per g drogestof in spinazie en koolrabi evenveel N zit ligt de oorzaak volgens Heins (1989) bij de lage SAW van spinazie. Bij spinazie is per g drogestof 768 en bij koolrabi 170 cm^2 worteloppervlakte, zonder rekening te houden met de oppervlakte van de wortelharen, aanwezig. Steingrobe en Schenk (1991) geven aan dat spinazie ondanks de lage I_{max} voldoende nitraat op kan nemen door een grote absorberende worteloppervlakte.

Voor grond wordt door Heins en Schenk (1987) uitgegaan van een gemiddelde opnamesnelheid die voor spinazie hoger is dan voor koolrabi. Vermeld worden gemiddelde opnamesnelheden van respectievelijk $2,2$ en $1,4 \text{ pmol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Met een formule van Baldwin et al. (1973) is door hen berekend dat spinazie dan een nitraatconcentratie in de bodemoplossing nodig heeft die $3,3$ maal hoger is dan die welke koolrabi nodig heeft.

Tabel 9 De maximale opnamesnelheid ($I_{\max}$, $\mu\text{mol cm}^{-1} \text{s}^{-1}$).

$I_{\max}$	Ras of gewas	Bron
Spinazie		
0,66	.	Heins en Schenk, 1986
0,11	.	Heins, 1989
0,30	Norvak	Steingrobe en Schenk, 1991
Koolrabi		
0,54	.	Heins, 1989
0,60	Noriko	Steingrobe en Schenk, 1991
Rest		
1,90	maïs	Heins en Schenk, 1986
1,92	ui	

Heins (1989). Voor de omrekening van $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ naar $\mu\text{mol cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ is er van uitgegaan dat de wortelstraal voor beide gewassen op voedingsoplossing 60 μm is (Steingrobe en Schenk, 1991).
Steingrobe en Schenk (1991). Afgeleid uit hun figuur 2.

Figuur 18 van Heins (1989) toont aan dat $I_{\max}$ van nitraat in de periode van 2 weken voor de oogst bij spinazie daalt van 8 naar 3 en bij koolrabi van 17 naar 14 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Hierbij is de opname betrokken op de oppervlakte van de wortelcilinder. Wordt de oppervlakte aan wortelharen ook opgenomen, dan dalen bij spinazie in genoemde periode $I_{\max}$ en de gemiddelde opnamesnelheid in de vollegrond even snel, namelijk van 4,7 tot ongeveer 1,6 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Volgens Heins (1989) kan bij spinazie door N-gebrek de maximale opnamesnelheid, uitgedrukt op de wortellengte, maximaal tweemaal zo groot worden als die bij een ruim N-aanbod.

Heins (1989) toont aan dat spinazie in grond een W/S heeft die minder dan de helft is van die op voedingsoplossing, respectievelijk 325 en 768 cm^2 wortelcilinder per g drogestof. Spinazie vormt in grond echter veel meer wortelharen dan op voedingsoplossing. Koolrabi doet dat niet. Opnamesnelheden moeten daarom worden uitgedrukt op de totale worteloppervlakte, inclusief wortelharen.

Voor grond berekende gemiddelde opnamesnelheden zijn hoger dan $I_{\max}$ -waarden die op voedingsoplossing zijn bepaald. Maar Heins (1989) laat zien dat als rekening wordt gehouden met de vorming van wortelharen in de grond door spinazie, de in het veld vastgestelde gemiddelde opnamesnelheid gelijk is aan $I_{\max}$. Planten in het veld zouden nitraat opnemen met maximale snelheid, tenzij de aanvoer stagneert.

6.1.2 Constante van Michaelis-Menten

De constante van Michaelis-Menten (K_m) is de concentratie in de voedingsoplossing waarbij de opnamesnelheid tot de helft van de maximale opnamesnelheid is afgenomen. Als een gewas een relatief lage K_m heeft houdt dat in dat het gewas bij lage concentratie een efficiënte opname heeft. K_m blijkt echter niet constant, maar volgens Clarkson (1985), zie 6.1, te variëren met verschillende variabelen. In tabel 10 staan K_m -waarden gemeten bij spinazie en, als vergelijkingsmogelijkheid, bij koolrabi.

Tabel 10 De constante van Michaelis-Menten (K_m , $\mu\text{mol l}^{-1}$).

K_m	Bron
Spinazie	
6-15	Claassen en Barber, 1974
30	Heins en Schenk, 1986
8	Heins, 1989
Koolrabi	
11-20	Claassen en Barber, 1974
5	Heins, 1989
15	Steingrobe en Schenk, 1991

De gegevens van Claassen en Barber (1974) (uitputtingsproeven) en Heins en Schenk (1986) zijn ontleend aan Steingrobe en Schenk (1991).

Pas bij een heel lage concentratie is de opnamesnelheid gedaald tot de helft van de maximaal haalbare opnamesnelheid. Bij spinazie variëren de waarden van 8 tot 30 $\mu\text{mol l}^{-1}$. Bij koolrabi zijn ze van dezelfde orde van grootte. Deze waarden liggen onderin het traject [voor gewassen in het algemeen] van 10 tot 100 $\mu\text{mol l}^{-1}$ dat Smolders (1993) aan Glass et al. (1990) ontleent.

6.2 Nitraatconcentratie en de nitraatopnamesnelheid

Uit tabel 11 blijkt dat pas als de nitraatconcentratie is gedaald tot enkele μmol per liter de hoeveelheid nitraat in de plant niet meer toeneemt.

Tabel 11 De nitraatconcentratie die minimaal nodig is voor toename van de hoeveelheid nitraat in de plant (N_m , $\mu\text{mol l}^{-1}$).

N_m	Gewas	Bron
1-5	spinazie, koolrabi	Claassen en Barber, 1974
≤ 20	planten	Burns, 1980
ca. 3	spinazie, maïs, ui	Heins en Schenk, 1986
2-3	spinazie, koolrabi	Heins, 1989

De gegevens van Claassen en Barber (1974) komen van Steingrobe en Schenk (1991).

Tabel 12 toont aan dat planten voor het in stand houden van de maximale opnamesnelheid slechts een lage nitraatconcentratie in de voedingsoplossing of het bodemvocht nodig hebben, namelijk 60 tot 200, spinazie tot 100 $\mu\text{mol l}^{-1}$.

De opnamesnelheid zal te laag kunnen worden voor optimale groei bij een opnamesnelheid die hoger is dan de aanvoersnelheid. Of een plant al dan niet voldoende N op kan nemen wordt bepaald door het feit of de benodigde N al dan niet voldoende snel bij de wortel aankomt. Volgens De Willigen (1986) kan, behalve onder droge omstandigheden, bijna al het nitraat in de bewortelde zone door planten worden opgenomen, voordat niet meer kan worden voldaan aan

Tabel 12 De nitraatconcentratie die nodig is voor maximale opnamesnelheid $I_{\max}$ ($N_{\max}$ $\mu\text{mol l}^{-1}$).

$N_{\max}$	Opmerkingen	Bron
Spinazie		
ca. 100	.	Heins en Schenk, 1986
80	uit fig. 2	
100	Norvak	Heins, 1989
80	uit fig. 17	
60-100	Norvak	Steingrobe en Schenk, 1991
Koolrabi		
100	.	Heins en Schenk, 1987
100	Noriko	Heins, 1989
60	jong	Steingrobe en Schenk, 1991
100	.	
Planten algemeen, maïs en ui		
80-200	lit.	Burns, 1980
100	lit.	De Willigen en Van Noordwijk, 1987
80-200	lit.	Heins, 1989
ca. 100	maïs, ui	Heins en Schenk, 1986

Heins (1989). Op stromende voedingsoplossing wordt een maximale opnamesnelheid bereikt bij nog lagere concentraties.

de dagelijkse N-vraag van gemiddeld $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$. Bij spinazie kan de hoogste opnamesnelheid aanzienlijk hoger liggen (zie 5.3).

Smolders (1993) vindt dat bij spinazie op voedingsoplossing de specifieke nitraatopnamesnelheid U , uitgedrukt op het drooggewicht van de wortel en gemeten tussen 18 en 23 dagen na het zaaien, oploopt van $4,9$ tot $6,9 \text{ mmol g}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ als de nitraatconcentratie oploopt van 150 tot $12.850 \mu\text{mol l}^{-1}$. Het drooggewicht van de plant is, in de periode van 18 tot 33 dagen na het zaaien, bij $150 \mu\text{mol l}^{-1}$ lager dan bij hogere concentraties. Er is dus een hogere concentratie nodig dan volgens andere auteurs. Hierbij wordt opgemerkt dat in de voedingsoplossing de dalende nitraatconcentratie is opgevangen door een stijgende Cl-concentratie. Bij het laagste N-niveau is veel Cl, $12,7 \text{ mmol l}^{-1}$, aanwezig. Verder blijft in de plant de som van nitraat en chloor constant. Daarmee komt de vraag naar voren of er wellicht Cl-effecten zijn opgetreden. Uit een berekening met zijn model, zie 6.1, voor een situatie waarbij tijdens de groei de N-niveaus in de plant gelijk blijven en de nitraatconcentratie in het cytoplasma niet beperkend is volgt dat de nitraatconcentratie in het cytoplasma en de specifieke opnamesnelheid U , uitgedrukt in $\text{mmol g}^{-1} \text{ dag}^{-1}$, pas boven een hoge nitraatconcentratie in de voedingsoplossing, $1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$, nauwelijks meer toeneemt.

Er van uitgaande dat in de laatste week voor de oogst het grootste deel van de hoeveelheid nitraat wordt aangevoerd door diffusie, berekenen Heins en Schenk (1987), met een formule van Baldwin et al. (1973), de nitraatconcentratie die in de bodemoplossing nodig is om de maximale opbrengst bij spinazie en koolrabi te bereiken. Bij spinazie zou in het bodemvocht

van de lagen van 0 tot 15, 15 tot 30, 30 tot 45 en 45 tot 60 cm respectievelijk 1.600, 2.300, 2.900 en 3.800 $\mu\text{mol l}^{-1}$ nitraat aanwezig moeten zijn. Die concentratie zou bij spinazie meer dan drie maal zo hoog moeten zijn als bij koolrabi, vanwege de 1,5 maal grotere opnamesnelheid per cm wortel bij spinazie. De concentraties die volgens proeven nodig zijn liggen nog hoger. Voor spinazie ongeveer bij 7.500 $\mu\text{mol l}^{-1}$ voor de laag van 0 tot 30 cm.

Heins (1989) berekent, met het model van Baldwin et al. (1973) en Barraclough (1986), dat bij VJ de noodzakelijke nitraatconcentratie in de bodemoplossing bij planten die 2,5 week oud zijn 3,5 maal zo groot is als bij planten die 5,5 week oud zijn. De hogere waarde bij het begin van de teelt wordt veroorzaakt door een hoge opnamesnelheid per eenheid wortel die wordt veroorzaakt door een lage wortellengte-dichtheid. Uit haar figuur 25 wordt afgeleid dat de concentraties respectievelijk 7.000 en 2.000 $\mu\text{mol l}^{-1}$ zijn. Als mogelijke oorzaken voor verschillen tussen berekende en in proeven vastgestelde noodzakelijke nitraatconcentraties in de bodemoplossing noemt Heins (1989) een niet homogene verdeling van nitraat en mogelijk wortels in de grond, variaties in het vochtgehalte van de bodem naar ruimte en tijd, en worteleigenschappen (morfologie en prestatievermogen).

De Willigen en Van Noordwijk (1987) geven als de kritische N-concentratie, dat is die waarbij de vereiste opnamesnelheid net kan worden gehaald, voor planten in het algemeen een waarde van 100 $\mu\text{mol l}^{-1}$, maar dat hangt af van de opnamesnelheid. Uit deze nitraatconcentratie en een vochtgehalte van 20 volumeprocent wordt, door vermenigvuldiging van het volume vocht met genoemde concentratie, een noodzakelijke voorraad van nog geen kg nitraat-N per ha voor de laag van 0 tot 30 cm berekend. Maar in de bodem is, door fysische beperkingen, niet al de beschikbare N opgenomen als de opnamesnelheid begint terug te lopen. Genoemde auteurs berekenen dat bij een kritische N-concentratie in de bodemoplossing van 100 $\mu\text{mol l}^{-1}$ nog 3,5 kg ha^{-1} aan N in de bodem achterblijft. Die hoeveelheid zal bij lagere vochtgehalten echter beduidend groter zijn.

Volgens Schenk et al. (1991) heeft spinazie een hoge nitraatconcentratie in de bodemoplossing nodig, overeenkomend met 50 kg ha^{-1} aan N in de laag van 0 tot 30 cm, om er voor te zorgen dat er voldoende nitraat door diffusie bij het worteloppervlak komt. Dit komt overeen met een nitraatconcentratie van ongeveer 3.500 $\mu\text{mol l}^{-1}$. In de praktijk worden bij de oogst vaak veel hogere N-hoeveelheden in de grond aangetroffen. Als vergelijkingsmogelijkheid wordt genoemd dat de nitraatconcentratie op vruchtbare gronden volgens Reisenauer (1964), in Smolders (1993), gewoonlijk 2.000 tot 20.000 $\mu\text{mol l}^{-1}$ is. Plaatselijk zullen er echter veel lagere concentraties aanwezig kunnen zijn. Voor een bodemlaag van 30 cm met een vochtgehalte van 20 volumeprocent wordt hieruit een hoeveelheid N in het bodemvocht berekend van respectievelijk 17 en 170 kg ha^{-1} .

6.3 Waterverbruik

Een gewas heeft water nodig om te kunnen groeien. Met de aanvoer van water naar de wortel worden ook nutriënten aangevoerd. Een globale schatting van de aanvoer op basis van waterverbruik is niet mogelijk omdat de aanvoer door diffusie vaak een groot deel van de totale aanvoer uitmaakt. In tabel 13 zijn transpiratiecoëfficiënten verzameld die in de literatuur zijn aangetroffen.

Het gemiddelde is ongeveer 375 liter per kg drogestof. Hierbij is de waarde van Smolders (1993), die sterk afwijkt van de andere gegevens, buiten beschouwing gelaten. Voor de produktie van een gemiddelde opbrengst van 30 ton ha^{-1} met een drogestofgehalte van 7,5%, zie 3.1 en 3.3, is dan per ha 843.750 liter water nodig. Bij een opbrengst die 56% is van de totaal aanwezige plantmassa inclusief wortel, zie 3.2, is voor de totale produktie aan plantmateriaal per ha 1.506.696 liter water nodig. Dat komt overeen met 151 mm water. Hierbij is de hoeveelheid water die in het gewas zit verwaarloosd. Volgens Hartmann et al. (1989) zit er namelijk bij de oogst van de opgenomen hoeveelheid water nog slechts 2,8 tot 3,7% in de

Tabel 13 Transpiratiecoëfficiënten (T, liter per kg drogestof).

T	Teelt	Bron
300	VJ	Hähndel, 1984; Hähndel en Wehrmann, 1986
455 328	spinazie koolrabi	Pfölb et al., 1988
447-463	VJ(11 mrt - 19 mei)	Hartmann et al., 1989
145	spinazie, potproef	Smolders, 1993

De gegevens van Pfölb et al. (1988) zijn ontleend aan Heins (1989).

plant. Genoemde auteurs tonen in hun figuur 1 het totaal waterverbruik in de loop van de tijd voor VJ(11 mrt - 19 mei). In totaal wordt 140 mm opgenomen in 69 dagen. Dit verschilt niet noemenswaard van de 151 mm die hier is berekend. Het effect van de evaporatie van de grond is bij de beschouwingen verwaarloosd.

Uit Kuipers (1968) wordt afgeleid dat in een Brabantse zandgrond in de laag van 0 tot 60 cm tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt maar 78 mm vocht aanwezig is. In droge perioden is er bij teelt van spinazie op zo'n grond een grote kans op groeistagnaties als er niet wordt berekend. In het voorgaande is al naar voren gebracht dat het vochtgehalte van de bodem een groot effect heeft op de opnamesnelheid van nitraat, door effect op de effectieve diffusiecoëfficiënt.

Hebben gewassen een verschillende transpiratiecoëfficiënt dan trekken ze per kg drogestof die wordt geproduceerd ook een verschillende hoeveelheid nutriënten aan met de massastroming. Bij eenzelfde nitraatconcentratie in de bodemoplossing en een continue vochtvoorziening trekt spinazie per kg drogestof met de massastroming ongeveer 1,4 maal zoveel nitraat aan als koolrabi. Het verschil in aangevoerde hoeveelheid is groot in de gevallen dat het aandeel van de massastroming in de nitraat-aanvoer groot is. Dat is het geval bij een hoge nitraatconcentratie in het bodemvocht.

Feddes (1969) stelt dat bij tuinbouwgewassen ongeveer 40% van de hoeveelheid water tussen pF 2 en pF 4,2 mag worden verbruikt voordat schade door droogte optreedt. Voor spinazie wordt vermeld dat de uitdrogingsgrens in het midden van de wortelzone tussen pF 2,2 en pF 2,4 ligt. Spinazie heeft geen droogtegevoelige periode, maar wordt bij sterke uitdroging wel eerder generatief. Uitgaande van een goed vochtige grond zou berekening bij VJ alleen enkele dagen voor de oogst nodig zijn, maar ZO zou steeds kletsnat worden gehouden omdat het gewas anders generatief wordt.

Volgens De Kraker et al. (1991) is een goede vochtvoorziening gewenst. De maximale pF-waarde is voor VJ 2,7 en voor ZO 2,4 op humeuze zandgrond en 2,7 op zware zavel.

7. Wortels en stikstofopname

In dit hoofdstuk staan gegevens over worteleigenschappen die verband houden met de stikstofopname. Achtereenvolgens komen aan bod: de hoeveelheid wortels, de bewortelde bodemlagen, de lagen waar de N wordt opgenomen, de wortellengte-dichtheid, de wortelafmetingen, de wortelharen en de wortel/spruit-verhouding. Over de verandering van wortelverdelingspatronen met de tijd zijn maar weinig gegevens gevonden.

De opnamesnelheid van een element wordt vaak uitgedrukt per eenheid van worteloppervlakte, wortellengte of wortelgewicht, met het idee dat die opnamesnelheid in verband staat tot het aantal carriers, dat zijn de verbindingen die noodzakelijk geacht worden voor de opname, dat in zo'n eenheid aanwezig is. Steingrobe en Schenk (1991) drukken de opgenomen hoeveelheid N uit op de totale worteloppervlakte, inclusief de oppervlakte van de wortelharen. Andere auteurs hebben kritiek op het uitdrukken van de opgenomen hoeveelheid nitraat op een eenheid wortel. Door processen in de plant zijn opnamesnelheden die op deze manier worden uitgedrukt namelijk variabel (zie 6.1).

De Willigen en Van Noordwijk (1987) brengen naar voren dat hoeveel van de beschikbare hoeveelheid voedingselement door de plant wordt opgenomen met de vereiste snelheid afhankelijk is van die snelheid, de lengte van de weg waarover het transport moet plaatsvinden (een functie van de wortellengte-dichtheid), de transportmogelijkheden in de grond en de snelheid van uitputting door andere oorzaken dan de wortel van de plant. Vergroting van de bewortelde zone geeft een grotere beschikbare hoeveelheid en vergroting van de wortellengte-dichtheid een grotere benutting. Het laatste is vooral van belang bij voedingselementen met een geringe beweeglijkheid. Hogere wortellengte-dichtheden kunnen zowel de transportafstanden als de benodigde opname per eenheid wortellengte verminderen. Ook de concentratie die minimaal nodig is om te zorgen voor voldoende aanvoer kan er door worden verlaagd.

De vereiste omvang van het wortelstelsel wordt bepaald door de snelheid waarmee water en nutriënten kunnen worden opgenomen. In proeven met tomaat en komkommer op voedingsoplossing met 10,2 mmol nitraat per liter is de N-opnamesnelheid constant bij sterk verschillende totale worteloppervlakten. Bij voedingselementen die niet worden geadsorbeerd in de grond kan, indien het vochtgehalte van de grond voldoende hoog is, naar een wortelstelsel met een geringe wortellengte-dichtheid, minder dan 1 cm cm⁻³, alleen door diffusie al voldoende voedingselement worden aangevoerd zonder dat de opnamesnelheid terugloopt. De tijdsduur van niet beperkte opname, de hoeveelheid die bij die opname wordt opgenomen en welk deel van de aanwezige voorraad daarbij wordt opgenomen hangen echter sterk af van het vochtgehalte van de grond. De effectieve diffusiecoëfficiënt is namelijk afhankelijk van het vochtgehalte en een impedantiefactor, die ook weer afhangt van het vochtgehalte.

De N-opname van de wortel hangt waarschijnlijk samen met de wortellengte of -oppervlakte, terwijl de energiekosten van wortelvorming en -onderhoud in verband staan met het gewicht van de wortel.

Heins (1989) merkt op dat over de worteldiepte en de wortelverdeling van groenten weinig onderzoek is gedaan.

7.1 Hoeveelheid wortels

Burns (1980) vermeldt dat de meeste gewassen normaal kunnen groeien met minder dan 15% van hun wortellengte in contact met nitraat. Voor sommige groentegewassen worden echter hogere waarden gegeven: prei 18, sla 22, ui 35 en tuinboon 45%. Afgaande op gegevens van Heins (1989) stelt spinazie wel de hoogste eisen. Op voedingsoplossing is, bij sterk nitraatgebrek hoogstens een verdubbeling van de maximale opnamesnelheid $I_{\max}$ verkregen. Als deze

resultaten mogen worden overgebracht naar het veld waar wortels met maximale opnamesnelheid opnemen, heeft spinazie minstens 50% van zijn wortels nodig voor de N-voeding. Hieruit volgt een, vergeleken met andere gewassen, grotere gevoeligheid van spinazie voor stikstofgebrek in koude natte perioden bij het begin van de teelt. Dan spoelt veel N uit de ondiepe bewortelde zone en die N kan niet snel genoeg door de wortels worden ingehaald.

7.2 Bewortelde bodemlagen

Hoewel door Krug (1986) en De Kraker et al. (1991) vermeld wordt dat spinazie een dunne paalwortel maakt die tot 1,4 m diep gaat, worden in de literatuur voor de door spinazie als vollegrondsgroente bewortelde laag meestal veel lagere waarden gevonden. In bijlage 10 zijn gegevens verzameld voor spinazie en enige andere groenten. Voor spinazie varieert genoemde laag van 30 tot 80 (140) cm. Bij bewortelingsdiepten die in de literatuur worden opgegeven is meestal niet vermeld welk criterium is aangelegd bij het naar beneden afgrenzen van de bewortelde zone. Bij de oogst kan het overgrote deel van de wortels, 80 tot 85%, zich echter in de bovenste 15 cm van de grond bevinden.

Heins (1989) en Schenk et al. (1991) vestigen de aandacht op de toename van de dikte van de bewortelde laag met de tijd. Spinazie bewortelt de laag van 15 tot 30 cm pas vanaf twee weken voor de oogst en bij de oogst zit slechts 12% van alle wortels in genoemde laag (tabel 14).

Tabel 14 De hoeveelheid wortels in de laag van 15 tot 30 cm als percentage van alle aanwezige wortels (lengtemeting) (Heins, 1989).

Gewas	N-aanbod (0-60) (kg ha ⁻¹)	Aantal weken voor de oogst			
		3	2	1	0
ZO(9 mei - 18 jun)	250	0	1	19	12
Koolrabi(17 jul -)	150	13	18	23	20

Dit houdt in dat het gewas pas kort voor de oogst over de N in de laag van 15 tot 30 cm kan beschikken. Op het moment van de grootste wortelgroei, bij de oogst, zit ongeveer 80% van de wortels van ZO(9 mei - 18 jun) Norvak, ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro en op 17 juli geplante koolrabi in de bovenste 15 cm. Minder dan 5% van de wortels bevindt zich bij de oogst lager dan 30 cm onder het maaiveld.

Hier volgt informatie over variabelen die invloed hebben op de dikte van de bewortelde laag en de verdeling van wortels over verschillende lagen (B80 = Böhmer, 1980).

- Gewaseigenschappen (B80).

Door Greenwood en Draycott (1989) wordt de bewortelde laag (cm) berekend als $18,0 + 8,59W$. Hierbij is W het drooggewicht van de plantmassa zonder vezelige wortels (ton ha⁻¹). De formule is maar voor een bepaald traject geldig want voor het begin van de teelt, dan is er bijna geen plantmassa, wordt een niet realistische waarde van 18 cm berekend. Voor een versgewicht van 30 ton ha⁻¹, met 7,5% drogestof, zie 3.1 en 3.3, geeft de formule een bewortelde laag van ruim 37 cm. Heins (1989) berekent de dikte van de bewortelde laag van VJ met een formule van Burns (1980), met als verklarende variabelen opbrengst, aantal planten per ha en wortelstraal. Die laag neemt in de zevende teeltweek maar met 5 cm toe, van 30 naar 35 cm, bij een toename van de hoeveelheid drogestof van 2,7 bij het juiste oogsttijdstip tot 3,6 ton ha⁻¹ een week later. Voor de toename van de bewortelde laagdikte met de tijd is volgens De Willigen en Van Noordwijk (1987) een rechtlijnig verband geschikt.

- Duur van de teelt (B80). Dit heeft samenhang met het voorgaande onderdeel.

- Vochtgehalte van de grond (B80).

- Verdelingspatroon van N over de lagen.

Böhmer (1980) meldt dat bij VJ(18 apr -) op löss het inspoelen van een N-gift van 200 kg ha⁻¹ naar de laag van 20 tot 40 cm slechts een iets minder diepe beworteling tot gevolg heeft. Haar tabel 10 laat echter zien dat twee maanden na het zaaien de diepte van de beworteling bij dit object slechts 30 cm is, terwijl die bij het object met de N in de laag van 0 tot 20 cm 50 cm is. Bij de oogst is het verschil nog slechts 10 cm.

7.3 Bodemlaag en de N-opname

In grond wordt een deel van de N naar de wortel gevoerd met de massastroming en een ander deel bereikt de wortel via diffusie (Nye en Tinker, 1977). Voor de omvang van de hoeveelheid nitraat die kan worden opgenomen worden bodemeigenschappen pas bepalend als de aanvoer van nitraat naar de wortel de vraag van de plant niet meer kan bijhouden. Bij teeltomstandigheden zoals die gebruikelijk zijn zal dat meestal pas het geval zijn bij of kort voor de oogst. De werking van deze fysische processen is in principe onafhankelijk van de soort plant. Door opname van water en nutriënten en de aard van het wortelstelsel kan een plant echter wel invloed uitoefenen op de snelheid van het transport.

Volgens De Willigen en Van Noordwijk (1987) is de tijdsduur van niet beperkte opname, de hoeveelheid die bij die opname wordt opgenomen en welk deel van de aanwezige voorraad daarbij wordt opgenomen, sterk afhankelijk van het vochtgehalte van de grond. De effectieve diffusiecoëfficiënt is namelijk afhankelijk van het vochtgehalte en een impedantiefactor, die ook weer afhangt van het vochtgehalte. Bij een teruglopend vochtgehalte van de bodem kan de aanvoer stagneren. Hoge diffusiegradiënten, en dus grote N-voorraden in de bodem, zijn dan nodig om er voor te zorgen dat de nitraat-aanvoersnelheid voldoende hoog is om aan de vraag van de plant te kunnen blijven voldoen. Ook uit figuur 26 van Heins (1989) blijkt de grote invloed van het vochtgehalte van de bodem. Bij een halvering van het vochtgehalte van de bodem, van 30 naar 15 volumepercent, gaat de nitraatconcentratie in de bodemoplossing die noodzakelijk is om er voor te zorgen dat op de laatste teeltdag door diffusie voldoende nitraat wordt aangevoerd met een factor 10 omhoog, van 0,5 naar 5 $\mu\text{mol l}^{-1}$. Gezien de gegevens in 6.2 en tabel 15 zijn dit lage waarden.

Heins (1989) laat zien dat de diffusie belangrijker wordt naarmate het N-aanbod lager is. Bij een normaal N-aanbod (0-60) bij het begin van de teelt, 250 kg ha⁻¹ voor spinazie en 150 kg ha⁻¹ voor koolrabi, komt bij beide gewassen tegen het eind van de teelt globaal 50% van de totale aanvoer voor rekening van de massastroming. Bij een afnemend N-aanbod daalt het aandeel van de massastroming. Bij spinazie zelfs tot ongeveer 10% indien N-aanbod (0-60) bij het begin van de teelt 100 kg ha⁻¹ is. Hierbij is de aanvoer met de massastroming geschat uit de verdamping en de nitraatconcentratie in de bodemoplossing en betrokken op de gemiddelde opname in de laatste week van de teelt.

Voor spinazie met een drogestofproductie van 238 kg ha⁻¹ dag⁻¹ berekent Hähndel (1984), bij een actueel N-aanbod (0-60) van 100 kg ha⁻¹ en 30 volumepercent vocht, een N-aanvoer naar de wortel via massastroming van 3,9 kg ha⁻¹ dag⁻¹ en via diffusie van 16 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Volgens deze berekening komt dus 20% van de aanvoer via massastroming bij de wortel. Hierbij is de aanvoer via diffusie onafhankelijk van de massastroming berekend.

Hähndel en Wehrmann (1986) vermelden dat bij een drogestofproductie van 240 kg ha⁻¹ dag⁻¹ en een actueel N-aanbod (0-60) van 100 kg ha⁻¹ 24% van de N-opname wordt aangevoerd met de massastroming. Bij een actueel N-aanbod (0-60) van 50 kg ha⁻¹ kan de aanvoer door diffusie onvoldoende zijn.

Heins en Schenk (1987) en Heins (1989) gaan er bij berekeningen vanuit dat in de laatste week voor de oogst alle nitraat wordt aangevoerd door diffusie. Met een formule van Baldwin et al. (1973) is de bij ZO(9 mei - 18 jun) Norvak noodzakelijke nitraat-N-concentratie berekend voor verschillende bodemlagen (tabel 15). Doordat de wortellengte-dichtheid met toenemende

diepte afneemt, neemt de noodzakelijke nitraat-N-concentratie toe. De laag van 45 tot 60 cm is voor de voeding niet van belang omdat hier maar 0,2% van de totale wortellengte wordt gevonden. In genoemde tabel staan ook de aangetroffen concentraties. Bij het N-aanbod (0-60) van 175 wordt de maximale opbrengst nog niet gehaald, hoewel aanwezige concentraties hoger zijn dan volgens de berekening noodzakelijk is.

Tabel 15 De bij het eind van de teelt noodzakelijke en de bij het aangegeven N-aanbod (0-60) (N, kg ha⁻¹) aangetroffen nitraat-N-concentraties (mmol l⁻¹), voor verschillende bodemlagen (L, cm) (Heins en Schenk, 1987).

	N	L			
		0-15	15-30	30-45	45-60
Noodzakelijk	.	1,6	2,3	2,9	3,8
Aangetroffen	175	3,9	4,8	2,4	1,3
Aangetroffen	250	8,8	6,3	3,5	2,2

Het N-aanbod (0-60) is dat bij het begin van de teelt.

Bij de berekening zijn echter diverse aannamen gemaakt die niet met de werkelijkheid overeenstemmen. Het model houdt geen rekening met wortelharen, gaat uit van een homogene verdeling van nitraat en wortels in de grond, en mogelijk is de ingevoerde $I_{\max}$ -waarde, met een groot effect op de uitslag, niet juist.

Hoewel N van buiten het bewortelde volume bij de wortels terecht kan komen via massastroming en diffusie wordt globaal aangenomen dat alleen de minerale stikstof wordt benut die in bodemlagen zit die doorworteld zijn (Greenwood et al., 1989). Heins (1989) toont voor drie standplaatsen een nauwe samenhang aan tussen de hoeveelheid wortels in een bepaalde laag en de afname van de hoeveelheid minerale stikstof in die laag. Recente literatuur legt de nadruk op het dikker worden met de tijd van de laag waaruit spinazie de N onttrekt en op het feit dat de laag maar dun is.

Greenwood et al. (1989) benadrukken het belang van voldoende N in het bewortelde volume bij het begin van de teelt, als dat volume nog maar klein is. Voor verschillende gewassen worden dan zeer hoge optimale N-giften waargenomen. Dat geldt echter niet voor spinazie. Op dat tijdstip is de optimale N-gift namelijk 112 tot 224 kg ha⁻¹ ($n = 5$). Aangenomen wordt dat er naast de N-gift een N-voorraad van 50 kg ha⁻¹ aanwezig is. Berekeningen van Heins (1989) tonen aan dat bij het begin van de teelt 100 kg N per ha in de laag van 0 tot 30 cm nodig is om de nitraatopname veilig te stellen. Dit wijst ook niet op een hoge optimale N-gift bij het begin van de teelt.

Voor breedwerpig gezaaide spinazie met een hoge standdichtheid kan, voor een groot deel van de teelt, de hoeveelheid N in de grond tot de onderkant van de bewortelde laag als beschikbaar worden aangemerkt.

Böhmer (1980) geeft als de laag waaruit de N wordt opgenomen 60 cm bij VJ en 80 cm bij NJ. Volgens berekeningen aan gegevens van deze auteur, zie bijlage 11, wordt bij VJ en ZO echter bijna 90% uit de laag van 0 tot 40 cm onttrokken. Hierbij wordt aangetekend dat bij deze berekening de hoeveelheid wortels in de hogere lagen kan zijn onderschat omdat er hoger in het profiel meer N vrijkomt door mineralisatie van organische stof. Uitspoeling van N kan juist tot een overschatting van de hoeveelheid wortels in de bovenste lagen leiden.

Volgens Schenk et al. (1991) is de stikstof beneden 30 cm niet belangrijk voor spinazie en koolrabi en is zelfs uit de laag van 15 tot 30 cm niet alle N beschikbaar. Dit hangt samen met

de plaats waar de wortels in de grond zitten. Dit is door Heins (1989) en Schenk et al. (1991) ook aangetoond in een proef. Door van een N-aanbod (0-60) van 250 kg ha⁻¹ een deel lager dan de laag van 0 tot 15 cm in het profiel te plaatsen wordt er door ZO(9 mei - 16 jun) Norvak op lemig zand en koolrabi(18 jun - 1 sept) op löss minder N opgenomen.

Schenk et al. (1991) schrijven dat als er van wordt uitgegaan dat van een gewas alle wortels nitraat met dezelfde snelheid opnemen, ZO(9 mei - 18 jun) op löss 115 kg N per ha uit de bovenste 15 cm van de bodem haalt, dat is 80% van de totale opname. De laag van 15 tot 30 cm kan, bij een opnamesnelheid van de wortel die twee maal zo groot is als normaal, maximaal 40 tot 50 kg N per ha bijdragen aan de N-opname. Dat zou komen doordat de wortels pas vanaf 2 weken voor de oogst in deze laag komen. Hun figuur 1 laat een wat vroegere wortelontwikkeling in de laag van 15 tot 30 cm zien: 3 en 2 weken voor de oogst zit al ongeveer 20% van de wortels in de laag van 15 tot 30 cm.

7.4 Wortellengte-dichtheid

Bij goed doorwortelbare grond zijn er veel variabelen die invloed hebben op de wortellengte-dichtheid op een bepaalde plaats in de bouwvoor, zoals de afstand tot het maaiveld, de teeltperiode, de hoogte van het N-aanbod, de tijdsduur die een gewas heeft gegroeid en bij zaai op rijen van de rijafstand. Onder wortellengte-dichtheid wordt hier, overeenkomstig De Willigen en Van Noordwijk (1987), verstaan de lengte aan wortels per eenheid van bodemvolume. Zij geven, als een samenvatting van literatuurgegevens, voor de laag van 0 tot 30 cm bij bonen wortellengte-dichtheden van 0,5 tot 2 en bij aardappel en suikerbiet van 1 tot 2 cm cm⁻³.

7.4.1 Afstand tot het maaiveld

In de laag van 0 tot 15 cm worden bij de oogst hoge wortellengte-dichtheden gevonden. Daaronder is de waarde lager dan 1 cm cm⁻³. Bij een N-aanbod (0-60) dat het meest met praktijkomstandigheden overeenkomt, 250 kg ha⁻¹, wordt in de laag van 0 tot 15 cm 2,5 tot 4,4 cm wortel per cm³ grond aangetroffen (Heins, 1989). Als een gemiddelde voor de laag van 0 tot 60 cm neemt Hähndel (1984) voor een berekening een wortellengte-dichtheid van maar 1 cm cm⁻³ aan. Dit is bovendien een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid, gezien de verandering naar plaats en tijd die wordt waargenomen. Voor het beschrijven van de wortellengte-dichtheid als functie van de afstand tot het maaiveld kunnen exponentiële functies nodig zijn (De Willigen en Van Noordwijk, 1987).

7.4.2 Teeltperiode

Heins (1989) treft bij de oogst van op 9 mei gezaaide Norvak in de laag van 0 tot 15 cm een wortellengte-dichtheid aan die bij een N-aanbod (0-60) van 100 kg ha⁻¹ 1,5 en bij een N-aanbod(0-60) van 250 kg ha⁻¹ 1,8 maal zo groot is als die van op 24 juli gezaaide Alvaro (bijlage 12). Mogelijk hangen deze verschillen echter samen met het ras.

7.4.3 N-aanbod

Uit gegevens van Heins (1989), zie bijlage 12, kan worden afgeleid dat de wortellengte-dichtheid in de laag van 0 tot 15 cm bij spinazie in veldproeven daalt met het oplopen van het N-aanbod. In dit beeld van een bij het oplopen van het N-aanbod dalende wortellengte-dichtheid past figuur 36 van Böhmer (1980), het resultaat van een proef met spinazie in 6,5 cm brede "Wurzelkästen", waaruit blijkt dat gaande van een plaatsing van de N in de laag van 0 tot 30 cm naar 60 tot 90 cm, de zwaarste beworteling opschuift van 40 tot 70 cm naar 30 tot 50 cm. Dat geldt ook voor de resultaten van een proef van Heins (1989) met ZO(9 mei - 16 jun) Norvak op lemig zand, waarin de wortellengte-dichtheid zowel in de laag van 0 tot 15 cm als 15 tot 30 cm met 25% toeneemt, maar niet in diepere lagen, door van een totaal N-aanbod

(0-60) van 250 kg ha⁻¹ een deel dieper dan 15 cm, het N-aanbod is daarbij verdeeld over 0 tot 60 cm, in de bodem te plaatsen. De plaatsing van stikstof heeft hierbij geen invloed op de relatieve verdeling van wortels over de lagen 0 tot 30 cm. Bij koolrabi (18 jun - 1 sept) Noriko op löss is er geen effect van het dieper plaatsen van een N-aanbod van 150 kg ha⁻¹ op de wortellengte-dichtheid in verschillende bodemlagen.

De zeer hoge dichtheden die Heins en Schenk (1986) melden voor een potproef met een ruim N-aanbod zijn mogelijk terug te voeren op de teelt in pot.

7.4.4 Groeiduur

Verlenging van de teelt met een week, waardoor de drogestofopbrengst van de spruit met 30% stijgt, geeft bij VJ alleen een duidelijk grotere wortellengte-dichtheid in de laag van 0 tot 30 cm (Heins, 1989). De invloed van de groeiduur op de wortellengte-dichtheid in deze laag wordt geïllustreerd met tabel 16.

Tabel 16 De wortellengte-dichtheid in de laag van 0 tot 30 cm (cm cm⁻³) op een aantal tijdstippen voor de oogst van ZO en koolrabi (Heins, 1989).

Gewas	N-aanbod (0-60) (kg ha ⁻¹)	Aantal weken voor de oogst				
		4	3	2	1	0
ZO(9 mei - 18 jun)	250	0,01	0,32	0,29	0,64	2,50
Koolrabi(17 jul -)	150	0,23	0,37	0,63	0,70	1,78

De wortellengte-dichtheid neemt bij spinazie in de laatste weken voor de oogst sterk toe. Bij koolrabi is dat in veel mindere mate het geval.

7.4.5 Rijafstand

Heins (1989) meldt voor spinazie een lagere wortellengte-dichtheid tussen de rijen dan in de rij, bij een rijafstand van 20 cm. Dit kan één der oorzaken zijn van de, vergeleken met koolrabi, geringe N-benutting door spinazie.

7.5 Wortelafmetingen

Wortelparameters kunnen voor spruit/wortel-relaties per plant, voor opnameprocessen per eenheid van bodemvolume, en voor studies op gewasniveau per eenheid van afgeoogste oppervlakte worden uitgedrukt (De Willigen en Van Noordwijk, 1987). Als een maatstaf wordt gezocht voor de totale absorberende kracht van de wortel komt ook de oppervlakte aan wortelharen in beeld (zie 7.6). Volgens Heins (1989) en Steingrobe en Schenk (1991) bestaat bij spinazie en koolrabi op voedingsoplossing de helft van de totale worteloppervlakte uit de oppervlakte van de wortelharen.

Steingrobe en Schenk (1991) vinden dat bij een relatief lage nitraatconcentratie in de voedingsoplossing, 20 tot 30 vergeleken met 1.000 µmol l⁻¹, spinazie Norvak en koolrabi Noriko, bij gelijk blijvende worteldiameter, 30% meer aan totale wortellengte vormen. Bij de hogere gehalten is per spinazieplant ongeveer 100 m wortel aanwezig, per koolrabiplant 300 m. In een tweede proef met jongere koolrabi is echter niet meer wortel gevonden bij lagere nitraatgehalten. In tabel 17 zijn gegevens over de wortelstraal van spinazie, en ter vergelijking die van koolrabi, bij elkaar gebracht.

Tabel 17 De wortelstraal (R, μm) bij spinazie en koolrabi.

R	Opmerkingen	Bron
Spinazie		
150	aanname in berekening	Hähndel, 1984
200	ZO(9 mei - 24 jul) Norvak	Heins, 1989
200	ZO(24 jul - 3 sept) Alwaro	
60	spinazie Norvak, na 7w.	Steingrobe en Schenk, 1991
Koolrabi		
160	.	Heins, 1989
60	Noriko, na 6w.	Steingrobe en Schenk, 1991

De gegevens van Steingrobe en Schenk (1991) komen van gewassen op voedingsoplossing, de rest heeft betrekking op grond. Voor ZO(9 mei - 18 jun) Norvak wordt door Heins (1989) na 6 en 7 weken een R van respectievelijk 190 en 200 μm gegeven.

Voor spinazie in de vollegrond wordt hieruit een wortelstraal van 185 μm afgeleid. Voor koolrabi is die 160 μm . Op voedingsoplossing hebben de wortels van beide gewassen een veel kleinere straal, namelijk 60 μm .

Het is van belang te weten of er invloed is van het N-aanbod op de wortelstraal. Daarmee zou namelijk de absorberende oppervlakte veranderen. Verder zit de wortelstraal in formules voor de waterflux (De Willigen en Van Noordwijk, 1987). Volgens Barber (1984), in Steingrobe en Schenk (1991), zou een kleinere worteldiameter een aanpassing aan voedingselement-gebrek kunnen zijn. Maar op voedingsoplossing vinden Steingrobe en Schenk (1991) bij spinazie Norvak en koolrabi Noriko geen invloed van de hoogte van de nitraatconcentratie die globaal gezien varieert van 20 tot 1.000 $\mu\text{mol l}^{-1}$. Dit is in overeenstemming met Heins en Schenk (1986) die geen invloed vinden van de hoogte van het N-aanbod op de straal van de wortel in hun proeven met spinazie op "loamy sand" en voedingsoplossing. Ook Heins (1989) vindt geen invloed van N-aanbod (0-60) bij spinazie en koolrabi, bij een range van respectievelijk 100 tot 250 en 100 tot 150 kg ha^{-1} .

Bepalingen van de straal en de lengte van de wortel zijn voldoende voor de berekening van de worteloppervlakte. In de literatuur vermelde waarden voor de oppervlakte zijn verzameld in tabel 18 en dienen om een indruk te geven van de orde van grootte en als vergelijkingsmateriaal.

Bij spinazie is per cm wortel 0,08 cm^2 aan worteloppervlakte aanwezig en per plant 2.670 cm^2 . Hierbij is echter uitgegaan van kleine wortelstralen (150 en 120 μm). De worteloppervlakte die per ha aanwezig is varieert van 6 tot 13 ha, met lagere waarden naarmate het N-aanbod hoger is en de teelt later plaats vindt. De Willigen en Van Noordwijk (1987) geven in een samenvatting van eigen en literatuurgegevens bij aardappel en suikerbiet waarden die hier niet veel van afwijken, namelijk 5 tot 10 ha ha^{-1} in de laag van 0 tot 30 cm, maar bij bonen zijn de waarden lager, namelijk 1 tot 5 ha ha^{-1} . Proeven van Steingrobe en Schenk (1991) op voedingsoplossing tonen aan dat bij spinazie door lage nitraatgehalten in de voedingsoplossing zowel de wortelhaardichtheid als de wortelhaarlengte groter wordt. Daardoor neemt de wortelhaaroppervlakte met bijna 50% toe. Te samen met 1/3 meer wortellengte geeft dat een totale worteloppervlakte die bijna 2/3 groter is dan die bij hoge nitraatgehalten. Bij koolrabi heeft het nitraatgehalte geen invloed op de totale worteloppervlakte en het aantal en de lengte van de wortelharen. In één experiment neemt de wortellengte wel met 1/3 toe.

Tabel 18 De worteloppervlakte per cm wortel (O_w , $\text{cm}^2 \text{ cm}^{-1}$), per plant (O_p , cm^2) en per ha (O_h , ha ha^{-1}) bij spinazie en koolrabi.

O_w	O_p	O_h	Opmerkingen	Bron
Spinazie				
0,0942	.	5,65	aanname in berekening	Hähndel, 1984
.	.	13	ZO(9 mei - 18 jun) Norvak, N (0-60) 100	Heins, 1989
.	.	12		
.	.	10		
.	.	12		
.	.	9	ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro, N (0-60) 100	Heins, 1989
.	.	6		
.	.			
.	.			
0,07	2670	.	voedingsoplossing, nitraat-conc. hoog, uit hun fig. 4	Steingrobe en Schenk, 1991
Koolrabi				
.	.	5	(17jul-), geen invl. N-aanbod	Heins, 1989
0,07	740	.	voedingsoplossing, nitraat-conc. hoog, uit hun fig. 4,	Steingrobe en Schenk, 1991

7.6 Wortelharen

Uit de figuren van Foehse en Jungk (1983) is afgeleid dat de wortelhaarlengte kan variëren van bijna 0 tot 1.400 μm en het aantal wortelharen per 1.000 μm wortellengte van 10 tot 100. Op voedingsoplossing maken wortelharen volgens Steingrobe en Schenk (1991) 50% van de totale worteloppervlakte uit, in ieder geval bij spinazie en koolrabi. De laatstgenoemde auteurs onderkennen dat de verlenging van de wortelharen, gezien in verband met de afstand waarover nitraat kan diffunderen, een verwaarloosbaar effect heeft op de opname. In dit verband wordt opgemerkt dat Heins (1989) het heeft over verarmingszones die zich centimeters vanaf de wortel uitstrekken. De, vergeleken met koolrabi, efficiëntere nitraatopname van spinazie bij lage nitraatgehalten, berust volgens Steingrobe en Schenk (1991) echter wel op de vorming van meer wortelharen en niet op een toegenomen opnamesnelheid per eenheid van wortellengte. Door de wortelharen is er een grotere absorberende oppervlakte en dat heeft effect op de opname van nutriënten. Bij eenzelfde totale opname wordt de noodzakelijke opname per oppervlakte-eenheid lager of bij een gelijk blijvende opname per oppervlakte-eenheid wordt de totale opname groter. In het laatste geval zal de omgeving van de wortel sterker worden uitgeput. Er zal dan een grotere diffusiegradiënt ontstaan en meer nitraat via diffusie bij de plant terecht komen.

Gezien het effect van wortelharen op de opname van nutriënten is het van belang te weten of er variabelen zijn die effect hebben op de oppervlakte aan wortelharen. In de literatuur zijn effecten van gewas, N, P en groeimedium gevonden.

Foehse en Jungk (1983) menen dat een proces in de plant de wortelhaarovorming regelt. Bij proeven met P is namelijk gevonden dat als het grootste deel van de wortel in contact staat met een lage P-concentratie (2 $\mu\text{mol l}^{-1}$), ook wortelharen gevormd worden aan het deel dat in contact staat met hoge concentratie (1.000 $\mu\text{mol l}^{-1}$). Daarmee zou dus extra voedingselement uit plaatselijk rijkere delen van de grond kunnen worden opgenomen. In het geheel van gegevens voor drie gewassen, spinazie, raap en tomaat, daalt de gemiddelde wortelhaarlengte rechtlijnig van 750 μm tot ongeveer 0 μm met het oplopen van het percentage P in de drogestof van de spruit van 0,16 tot 0,96 (hun figuur 3).

Foehse en Jungk (1983) melden een gewasafhankelijk effect van de nitraatconcentratie in de voedingsoplossing op de wortelharen. Bij lagere concentratie zijn de wortelharen langer en zijn er meer per oppervlakte-eenheid wortel. Spinazie vormt bij lage nitraatconcentratie ($2 \mu\text{mol l}^{-1}$) wortelharen die 9 maal zo lang zijn als bij hogere concentratie ($1.000 \mu\text{mol l}^{-1}$). Bij raap is het verschil minder groot en bij tomaat zelfs klein. Variatie in NH_4 -concentratie heeft geen effect op de wortelhaavorming. Ook Steingrobe en Schenk (1991) tonen een verschil in reactie bij verschillende gewassen. Bij lage nitraatconcentraties in de voedingsoplossing vormt spinazie bijna 50% meer oppervlakte aan wortelharen, maar bij koolrabi is er geen effect van de nitraat-concentratie.

Uit tabel 19 blijkt dat spinazie, vergeleken met koolrabi, op grond een relatief zeer grote oppervlakte aan wortelharen vormt.

Tabel 19 Het effect van gewas en groeimedium op de verhouding tussen wortelhaaroppervlakte en oppervlakte van de wortelcilinder (Heins en Schenk, 1987; Heins, 1989).

Gewas	Groeimedium	
	Grond	Voedingsoplossing
Spinazie Norwag	9,7	0,8
Koolrabi Noriko	1,0	1,2

7.7 Wortel/spruit-verhouding

Tussen wortel en spruit van een plant bestaat volgens Brouwer (1963, 1983) in De Willigen en Van Noordwijk (1987) een dynamisch evenwicht. De ligging van dat evenwicht kan door verschillende variabelen worden beïnvloed. Hier wordt alleen aandacht besteed aan het effect van N bij verschillende gewassen. Al naar gelang het studieveld kan bij de wortel/spruit-verhouding (W/S) als maat voor de wortel de lengte, de oppervlakte of het gewicht worden genomen.

Als de wortelharen een grote invloed hebben op de opname van elementen heeft een W/S waarin alleen de oppervlakte van de wortelcilinder zit een beperkt nut. Zo meldt Heins (1989) weliswaar dat spinazie op grond een duidelijk lagere W/S heeft dan op voedingsoplossing, respectievelijk 325 en 768 cm^2 per g drogestof, maar ze toont ook aan dat spinazie op grond veel meer wortelharen vormt (7.6). Bij de nu volgende gegevens moet dit in gedachten worden gehouden.

In het algemeen reageren landbouwgewassen op N-gebrek met een hogere W/S (tabel 20).

Tabel 20 Het effect van het N-aanbod (0-60) (kg ha^{-1}) op de W/S (cm^2 wortel per g drogestof) bij spinazie en koolrabi (Heins, 1989).

Gewas	N-aanbod (0-60)			
	100	150	175	250
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	686	.	546	334
ZO(24 jul - 3 sept) Alwaro	540	.	360	227
Koolrabi(17 jul -)	179	157	.	.

Volgens Heins en Schenk (1986) reageren spinazie en maïs met hun W/S, uitgedrukt als cm wortel per g versgewicht van de spruit, minder sterk op N-gebrek als ui. Bij spinazie gaat de

oplopende W/S samen met een lagere wortellengte-dichtheid. De W/S van spinazie is ongeveer tweemaal zo hoog als die van maïs en ui en dat kan compenseren voor de lage maximale opnamesnelheid van spinazie.

Figuur 5.3 van Smolders (1993) toont bij een laag N-gehalte in het gewas zowel op grond als op voedingsoplossing een S/W , g drogestof in de scheut gedeeld door g drogestof in de wortel, van ongeveer 1,2. Bij het oplopen van het N-gehalte in het gewas stijgt de S/W op grond naar 2 en op voedingsoplossing naar 4.

8. Samenvatting en discussie

In het kader van IB-DLO-project 450, dat als titel heeft "Modelmatig onderzoek naar optimale beheersing van nutriëntenstromen in de vollegrondsgroenteteelt", is de vraag naar voren gekomen welke voor dit project bruikbare gegevens er in de literatuur beschikbaar zijn. Ook zou moeten worden aangegeven of er nog experimenteel onderzoek nodig is. Omdat gezien de beschikbare tijd een afperking van het doelgebied noodzakelijk was, is besloten in eerste instantie gegevens over één gewas te verzamelen. Als gewas is spinazie gekozen, waarvoor de mogelijkheden van N-bijmestsystemen zou worden nagegaan. Hier wordt eerst een indruk gegeven van de processen die bij de opname van N een rol spelen.

Als de N-aanvoer naar de wortel niet beperkend is, en voldoende worteloppervlakte aanwezig is, zou de opname door het gewas nog met relatief eenvoudige modellen kunnen worden beschreven. De toename van de hoeveelheid drogestof en indirect de temperatuur en de hoeveelheid licht zijn dan de variabelen die bepalen welke hoeveelheid N wordt opgenomen. Over veel relaties die voor zo'n beschrijving nodig zijn is echter nog te weinig bekend.

Bij teelt van een gewas in de vollegrond kan bovendien het aanbod aan de wortel tekortschieten door een veelheid van oorzaken. Het relatieve belang van de verschillende oorzaken is nog niet duidelijk vastgesteld, maar van belang zijn de plaats waar en het tijdstip waarop de nutriënten worden aangeboden, de plaats waar de wortels zitten, de hoeveelheid wortels die aanwezig is en het vochtgehalte van de bodem. Er volgen enkele illustraties.

In het begin van de teelt bewortelt spinazie de grond maar langzaam. Met hetzelfde tempo zal de nitraat in de doorwortelde volumina ter beschikking komen van de plant. Ook bij het eind van de teelt is de beworteling nog zeer ondiep, veelal beperkt tot de laag van 0 tot 30 cm, en alleen de nitraat in deze lagen is (gedeeltelijk) beschikbaar voor opname.

Vooraf bij het begin van de teelt is het gevaar groot dat een groot deel van de aanwezige hoeveelheid nitraat buiten het bereik van de groeiende plant komt. Als bij neerslag het bodemvocht zonder menging zou worden verdrongen, zou bij 22 volumeprocent vocht in de grond 13 mm neerslag al voldoende zijn om alle nitraat uit de bovenste 6 cm van de grond te laten verdwijnen. Ongeveer in het midden van deze zone ligt het kiemende zaad. Tegen het eind van de teelt zou, bij eenzelfde vochtgehalte voor de laag van 0 tot 30 cm 66 mm nodig zijn, nog afgezien van de gewasinvloed. Waargenomen groeistagnaties bij het begin van de teelt, na veel neerslag, kunnen dus mede op N-gebrek berusten.

Het vochtgehalte in de verschillende lagen heeft een grote invloed op de opneembaarheid van de aanwezige hoeveelheid nitraat. Verder zijn wortels, nitraat en vocht niet homogeen over de bodem verdeeld en daarmee ontstaat een scala van oorzaken die ervoor kunnen zorgen dat nitraat niet voldoende snel aan de wortel wordt aangeboden, hoewel de totale voorraad wel voldoende kan zijn.

8.1 Algemeen

In hoofdstuk 2 staan algemene gegevens over spinazie. Er komt een groot aantal variabelen aan de orde waarmee rekening moet worden gehouden bij modelbouw en bij de wijze waarop proeven moeten worden opgezet.

8.2 Opbrengst en de kwaliteit

In hoofdstuk 3 staat een groot aantal variabelen vermeld die invloed hebben op de hoogte van de opbrengst. Een hogere opbrengst kan bijvoorbeeld worden verkregen door meer planten

per oppervlakte-eenheid, door een betere verdeling van de planten over de beschikbare oppervlakte of door langer te wachten met het oogsten, tenzij de planten gaan schieten. In de literatuur is een enorme variatie aan haalbare/maximale opbrengsten aan versgewicht aangetroffen (15 tot 60 ton ha⁻¹). Gemiddeld kan worden uitgegaan van een opbrengst van 30 ton ha⁻¹ aan vers materiaal. Bij VJ en ZO voor de verse markt liggen de gemiddelden 5 tot 6 ton ha⁻¹ hoger dan die bij andere teelten.

Na een in de praktijk gebruikelijk N-aanbod bij het begin van de teelt varieert de bovengrondse oogstrest sterk, van 1 tot 20 ton ha⁻¹, met een gemiddelde van 14 ton ha⁻¹. Oorzaken van de grote variatie zijn onder meer de verschillende wijze van oogsten en de variatie in hoeveelheid bovengrondse gewasmassa. Ongeveer 36% van het bovengronds gewas blijft op het veld achter. Volgens een ruwe schatting zit ongeveer 12% van de totale verse plantmassa in de wortel. Na de oogst blijft 44% van het totaal aan verse plantmassa achter en verdwijnt er 56% van het veld.

Er worden zeer verschillende drogestofgehalten gerapporteerd voor goede opbrengsten: 5,1 tot 11,2%, met een gemiddelde van 7,3%. Voor Nederlandse industriespinazie is 7,5% gevonden. In de oogstrest worden volgens schaarse gegevens beduidend lagere gehalten aangetroffen.

Bij goede opbrengsten wordt 1,4 tot 2,7, gemiddeld 2,2 ton ha⁻¹ aan drogestof geoogst. De toename van de hoeveelheid drogestof is het grootst vlak voor of bij de oogst. Die kan dan bij VJ 240, bij ZO 200 en bij NJ 110 kg ha⁻¹ dag⁻¹ zijn. Spinazie behoort tot de gewassen die geoogst worden op het moment van snelle groei. In 6 dagen voor de oogst kan er in totaal wel 30 ton ha⁻¹ aan verse opbrengst bijgroeien. In dit verslag kunnen enige gegevens worden gevonden over de drogestoftoename in de loop van de tijd. Deze drogestoftoename heeft een nauwe samenhang met de vraag van de plant naar N. Er is een groot effect van het N-aanbod op de opbrengst aan drogestof. Bij een optimaal N-aanbod wordt ruim 100% meer geoogst dan bij het achterwege laten van een N-gift. De meeropbrengst hangt sterk af van de minerale N-voorraad in de bodem en het N-leverend vermogen van de bodem. Bij ZO neemt, bij het oplopen van N-aanbod (0-60) van 100 naar 250 kg ha⁻¹, de hoeveelheid drogestof nog toe met 14 tot 35% en bij het oplopen van N-aanbod (0-30) van 160 of 200 tot 240 kg ha⁻¹, N-aanbod (0-60) steeds 250 kg ha⁻¹, met 24%.

In dit verslag zijn enige gegevens opgenomen over andere kwaliteitscriteria dan het percentage drogestof.

8.3 N-gehalte in het gewas

Vergelijkingen van N-totaal-gehalten in het gewas kunnen vaak maar globaal zijn omdat analysemethoden kunnen zijn gebruikt waarbij slechts een deel van de nitraat-N in het analysecijfer tot uitdrukking komt. Dit bezwaar valt in de regel mee doordat maar een beperkt deel van de N als nitraat aanwezig is en bij veel methoden toch een aanzienlijk deel van de aanwezige nitraat in N-totaal komt.

In de verse opbrengst zit 3,5 kg N per ton vers en in de oogstrest, op basis van weinig gegevens, 2,2 tot 4,5 kg ton⁻¹.

Bij een maximale opbrengst zit er ongeveer 4,9% N in de drogestof, maar het gehalte aan N in de drogestof is geen gevoelige maatstaf om na te gaan of het gewas over voldoende N beschikt. Over het verloop van het N-gehalte in de drogestof tijdens het groeiseizoen geven de gevonden gegevens geen duidelijk beeld. Genoemd gehalte neemt toe met het N-aanbod bij het begin van de teelt. Op voedingsoplossing verandert het echter meestal weinig met de nitraatconcentratie als die hoger is dan 30 µmol l⁻¹.

Hoge nitraatgehalten in het voedsel worden vrij algemeen als een mogelijk gevaar voor de gezondheid van de mens gezien. Een belangrijk aandeel van de totale nitraatopname krijgt de mens binnen als groente. Daarom zijn voor verschillende groenten normen opgesteld waaraan het produkt moet voldoen, ook voor spinazie.

Van de totale hoeveelheid N in de opbrengst kan wel 23% als nitraat-N aanwezig zijn, maar in de regel zal dat bij optimale groei 10 tot 19% zijn.

Het nitraatgehalte in de opbrengst loopt sterk op met het N-aanbod bij het begin van de teelt, met de opbrengst en, boven een N-totaal-gehalte van 4,5% op de drogestof, met het N-totaal-gehalte. Ook het delen van de N-gift kan tot een hoger nitraatgehalte leiden. Het vervangen van de nitraat- door ammonium-voeding geeft een lager nitraatgehalte in het gewas, maar ook een sterke opbrengstreductie.

8.4 Hoeveelheid N in het gewas

De hoogte van de totale opbrengst aan gewasmasa heeft een zeer grote invloed op de hoeveelheid N die door het gewas wordt opgenomen en daarmee op de hoeveelheid N die met de oogst wordt afgevoerd en op de hoeveelheid N die in de oogstrest achterblijft. De hoogte van die opbrengst wordt in sterke mate bepaald door het N-aanbod en de lengte van de groeiperiode. De verwachte opbrengst zou zo mogelijk als een variabele in het N-bemestingsadvies moeten worden opgenomen. Een goede opbrengstvoorspelling en een goede voorspelling van de N-levering door de grond kunnen leiden tot een lager N-residu bij de oogst.

De totale hoeveelheid N in de plantmasa bij de oogst kan worden verdeeld over de hoeveelheid in de opbrengst, de hoeveelheid in de bovengrondse oogstrest en de hoeveelheid in de wortels. In tabel 21 staan de absolute en relatieve hoeveelheden N in de genoemde onderdelen als gemiddelden van in de literatuur gevonden gegevens en voor een gemiddelde opbrengst, zie 3.1, van 30 ton ha⁻¹.

Tabel 21 Hoeveelheid N in verschillende gewasonderdelen bij spinazie. Absolute hoeveelheid als gemiddelden over gegevens gevonden in de literatuur en omgerekend naar een verse opbrengst van 30 ton ha⁻¹ (N_{gem} respectievelijk N_{30} , kg ha⁻¹) en als relatief aandeel (N_r , %).

Gewasonderdeel	N_{gem}	N_{30}	N_r
Opbrengst	118	106	73
Bovengrondse oogstrest	25	21	14
Wortel	20	18	12
Totaal	163	145	100

Worden de waarden afgerond op 5 kg ha⁻¹, dan is gemiddeld over de proefresultaten 165 kg ha⁻¹ aan N opgenomen, waarvan 45 kg ha⁻¹ in de vorm van oogstresten achterblijft. Bij een verse opbrengst van 30 ton ha⁻¹ wordt door het gewas 145 kg ha⁻¹ opgenomen, waarvan 40 kg ha⁻¹ na de oogst achterblijft. Het verschil tussen de totaal opgenomen hoeveelheid N en de hoeveelheid in het bovengrondse deel blijkt, op grond van weinig gegevens, betrekkelijk gering te zijn. In het bovengrondse gewas blijkt gemiddeld in totaal 145 kg ha⁻¹ aan N te zitten, met een variatie van 115 tot 165 bij de verschillende teelten. De totale N-opname bij VJ, ZO en NJ is respectievelijk 185, 175 en 130 kg ha⁻¹.

Afhankelijk van de wijze van oogsten kan de oogstrest sterk variëren, van 0 tot 42% van het bovengrondse gewas, en daarmee ook de hoeveelheid N die daarin achterblijft. Gemiddeld

blijft volgens tabel 12 bij de oogst in de gewasresten in totaal 45 kg ha^{-1} aan N achter. Als gemiddelde van dit getal en twee andere schattingen wordt 65 kg ha^{-1} verkregen.

In de eerste weken van de teelt is de N-opname zeer beperkt, zo is na 13 dagen nog maar $0,4 \text{ kg ha}^{-1}$ aan N opgenomen, maar daarna neemt de opgenomen hoeveelheid N sterk toe met de tijd. Bij of even voor de oogst worden, vergeleken met andere gewassen, hoge N-opnamesnelheden waargenomen. Voor de snelle toename van de hoeveelheid drogestof bij de oogst, tot $240 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ bij VJ, is een zeer hoge N-opname nodig, tot $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ bij VJ. Als gemiddelden over uit de literatuur afgeleide waarden wordt voor de maximale opnamesnelheid bij VJ 14, bij ZO 10 en bij NJ $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ gevonden. De laatste helft van de op te nemen hoeveelheid N wordt bij VJ in 5 dagen, bij ZO in een week en bij NJ in 2 weken opgenomen.

8.5 N-opname-kinetiek en het waterverbruik

Globaal gezien kunnen situaties worden onderscheiden waarbij de vraag van de plant bepaalt hoeveel nitraat er wordt opgenomen en andere waarbij de aanvoer in de bodem de vraag niet bijhoudt en waarbij de opnamesnelheid vooral wordt bepaald door de aanvoersnelheid. In het tweede geval heeft de plant invloed op de hoeveelheid nitraat die wordt opgenomen door de aard van het wortelstelsel. Hoewel het opnameproces gevoelig is voor de externe concentratie, blijkt de invloed op de hoeveelheid nitraat die wordt opgenomen gering te zijn. De overgangstijd tussen genoemde situaties, dat is de periode waarbij de externe concentratie een grote rol speelt, is vaak maar kort.

Bij een teruglopend vochtgehalte van de bodem kan de aanvoer stagneren. Hoge effectieve diffusiegradiënten, en dus grote N-voorraden in de bodem, zijn dan nodig om ervoor te zorgen dat nitraat voldoende snel bij de wortel terecht komt.

De opnamesnelheid van nitraat wordt vaak beschreven met de hyperbolische vergelijking van Michaelis-Menten. Belangrijke kenmerken bij de opname zijn de laagste concentratie waarbij de opname begint, de concentratie die nodig is voor de maximale opnamesnelheid, die snelheid ($I_{\max}$) zelf, en de concentratie K_m waarbij de opnamesnelheid is teruggelopen tot de helft van de maximaal mogelijke. $I_{\max}$ en K_m blijken echter niet constant te zijn door reguleringsprocessen in de plant. Ze zijn onder meer afhankelijk van de soort plant, de ouderdom van de plant, de wortelomvang, het gehalte aan element in de plant, de voedingselement-concentratie waaraan de plant gewend is, het N-aanbod, het substraat en de wijze van uitdrukken. Daarmee wordt het belang van deze parameters minder.

Uit proeven met spinazie en andere planten op voedingsoplossing blijkt dat de nitraatconcentratie kan dalen tot enkele $\mu\text{mol l}^{-1}$ voordat de netto nitraatopname nul is. Voor het in stand houden van de maximale opnamesnelheid $I_{\max}$ is slechts een lage nitraatconcentratie in de voedingsoplossing nodig, bij spinazie 60 tot $100 \mu\text{mol l}^{-1}$. Uit een nitraatconcentratie van $100 \mu\text{mol l}^{-1}$ en een vochtgehalte van 20 volumeprocent volgt een voorraad van nog geen kg nitraat-N per ha voor de laag van 0 tot 30 cm. Er is evenwel een publikatie die aangeeft dat voor een optimale groei een veel hogere nitraatconcentratie nodig is, ongeveer $3.200 \mu\text{mol l}^{-1}$. Omgerekend betekent dit een N-voorraad van ongeveer 27 kg ha^{-1} . Uit een model met diffusie als enige drijvende kracht achter het nitraattransport volgt dat op grond de noodzakelijke nitraatconcentratie in de bodemoplossing tijdens de teelt daalt van 7.000 tot $2.000 \mu\text{mol l}^{-1}$, omgerekend respectievelijk 59 en 17 kg N per ha . Uit proeven blijkt echter dat er bij de oogst veel meer N in de laag van 0 tot 30 cm nodig is, 50 tot 65 kg ha^{-1} , om ervoor te zorgen dat er voldoende N bij de wortel aankomt. Genoemd model geeft een te eenvoudige voorstelling van de gang van zaken.

Gerapporteerde $I_{\max}$ -waarden van planten variëren van 0,1 tot 1,9 en voor spinazie van 0,1 tot $0,7 \text{ pmol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Volgens sommige onderzoekers moet de opgenomen hoeveelheid worden betrokken op de totale oppervlakte van de wortel, inclusief die van de wortelharen. Als dat

gebeurt blijkt bij spinazie in de periode van 2 weken voor de oogst $I_{\max}$ en de gemiddelde opnamesnelheid in de vollegrond even snel te dalen, namelijk van 4,7 tot ongeveer 1,6 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Spinazie heeft bij de oogst een veel hogere N-opnamesnelheid, gemeten in $\text{kg ha}^{-1} \text{dag}^{-1}$, dan de meeste andere gewassen. Hieruit zou kunnen worden afgeleid dat een zeer hoge opnamesnelheid per worteleenheid nodig is om aan de behoefte van de plant te voldoen. Het gewas heeft echter bij de oogst een relatief grote absorberende worteloppervlakte. Daardoor wordt de noodzakelijke opnamesnelheid per eenheid van wortellengte verlaagd. Door vergroting van het wortelstelsel kan een goede groei worden verkregen bij een lagere $I_{\max}$.

Pas bij een heel lage nitraatconcentratie in de voedingsoplossing is de opnamesnelheid gedaald tot de helft van de maximaal haalbare opnamesnelheid. Bij spinazie varieert de constante van Michaelis-Menten namelijk van 8 tot 30 $\mu\text{mol l}^{-1}$.

Voor de drogestofproductie heeft spinazie water nodig, ongeveer 375 liter per kg drogestof. Bij een verse opbrengst van 30 ton ha^{-1} is voor de totale drogestofproductie van het gewas ongeveer 150 mm water nodig. Door de waterconsumptie ontstaat een massastroming waarmee nitraat naar de wortelwand wordt gevoerd, maar wordt de effectieve diffusiecoëfficiënt lager, zodat minder nitraat de wortelwand door diffusie bereikt.

8.6 Wortels en de N-opname

Hoeveel van de beschikbare hoeveelheid voedingselement werkelijk wordt opgenomen door de plant met de vereiste snelheid is afhankelijk van die snelheid, de lengte van de weg waarover het transport moet plaatsvinden (een functie van de wortellengte-dichtheid), de transportmogelijkheden in de grond en de snelheid van uitputting door andere oorzaken dan de wortel van de plant. Vergroting van de bewortelde zone geeft een grotere beschikbare hoeveelheid en vergroting van de wortellengte-dichtheid een grotere benutting. Het laatste is vooral van belang bij voedingselementen met een geringe bewegelijkheid. Hogere wortellengte-dichtheden kunnen zowel de transportafstanden als de benodigde opname per eenheid wortellengte verminderen. Bij voedingselementen die niet worden geadsorbeerd in de grond kan een wortelstelsel met een geringe wortellengte-dichtheid, minder dan 1 cm cm^{-3} , al voldoende zijn om de totale hoeveelheid beschikbaar voedingselement op te nemen. Het functioneren van de wortel hangt waarschijnlijk samen met de wortellengte of -oppervlakte en niet met volume of gewicht van de wortel.

Uit de literatuur wordt duidelijk dat bij het eind van de teelt 50 tot bijna 100% van de N die bij de wortel aankomt daar terecht komt door diffusie. Het percentage is hoger naarmate het N-aanbod lager is. Hoeveel N dan bij de wortel aankomt wordt, behalve door het N-aanbod, de plaats waar de N zit en eigenschappen van de wortel, in sterke mate bepaald door het vochtgehalte van de grond dat een grote invloed heeft op de effectieve diffusiecoëfficiënt. Als er bij het eind van de teelt in de grond nog een N-aanbod (0-60) van 100 kg ha^{-1} en 30 volumeprocent vocht aanwezig is komt ruim 20% van de N bij de wortel met de massastroming.

Omdat aangenomen wordt dat een gewas alleen N onttrekt uit de lagen die doorworteld zijn, zijn de exploratie van bodemlagen door wortels in de loop van de tijd en de hoeveelheid N die in de doorwortelde lagen zit bepalend voor de hoeveelheid N die kan worden opgenomen. Vergeleken met andere gewassen moet bij sommige groenten een groter deel van de wortels in contact staan met nitraat om ervoor te zorgen dat er voldoende N wordt opgenomen. Van de groenten lijkt spinazie, waarbij 50% van wortels nodig zijn voor de N-opname, wel het meest extreem te zijn. Dit impliceert een gevoeligheid voor N-gebrek bij het begin van de teelt als het weer nat en koud is.

Hoewel spinazie potentieel wel diep kan wortelen blijft de beworteling tijdens een normale teelt zeer oppervlakkig, vaak maximaal 60 cm diep bij het eind van de teelt. Dan kan van de totale hoeveelheid wortels 80 tot 85% in de laag van 0 tot 15 cm zitten. De laag van 15 tot 30 cm wordt pas beworteld vanaf een paar weken voor de oogst. Wortels beneden de laag van 0 tot 30 cm spelen geen rol van betekenis. Bij NJ gaan de wortels wat dieper dan bij VJ.

In dit verslag wordt aandacht geschonken aan variabelen die invloed hebben op de dikte van de bewortelde laag en de verdeling van de totale hoeveelheid wortels over lagen in de grond. Voor wat betreft het effect van een bepaald N-aanbod wordt opgemerkt dat een ander verdelingspatroon van de N over de lagen voor de plant een ander N-aanbod betekent als de N of een deel ervan buiten de bewortelde laag terecht komt. In recente literatuur wordt aangenomen dat er geen invloed is van de hoogte van het N-aanbod en de verdeling ervan over lagen op de dikte van de bewortelde laag en de relatieve verdeling van de wortels over de lagen, maar er is één gegeven dat niet overeenstemt met deze zienswijze.

Omdat ervan wordt uitgegaan dat alleen N wordt opgenomen uit de bewortelde lagen, heeft de ondiepe beworteling tot gevolg dat alleen de N boven in het profiel voor het gewas beschikbaar is. Zo wordt bijvoorbeeld voor ZO op löss aangenomen dat het gewas 115 kg N per ha uit de bovenste 15 cm van de bodem haalt, dat is 80% van de totale opname. De laag van 15 tot 30 cm zou, bij een opnamesnelheid van de wortel die twee maal zo groot is als normaal, maximaal 40 tot 50 kg N per ha kunnen bijdragen aan de N-opname.

Alleen bij de oogst worden in de laag van 0 tot 15 cm wortellengte-dichtheden vastgesteld die ruim voldoende geacht worden om alle N uit deze laag te halen. In diepere lagen is de waarde dan lager dan 1 cm cm⁻³. De wortellengte-dichtheid is bij vroege teelten hoger dan bij late teelten en bij een hoog N-aanbod lager dan bij een laag N-aanbod. Bij teelt op rijen met een ruime rijafstand hangt de wortellengte-dichtheid af van de afstand tot de rij.

Bij studies naar het functioneren van de wortel is vooral gekeken naar de wortellengte of oppervlakte van de wortelcilinder. Voor de absorberende kracht van de wortel kan echter bepalend zijn hoe groot de totale worteloppervlakte, inclusief dat van de wortelharen, is. Spinazie reageert op N-gebrek met een hogere wortellengte-dichtheid, een hogere wortel/spruit-verhouding en, op voedingsoplossing, met een grotere totale wortellengte en meer en langere wortelharen. Er is geen effect van de N-concentratie op de lengte van de wortelstraal (185 µm in grond en 60 µm in voedingsoplossing). Bij spinazie op grond is de verhouding tussen de oppervlakte aan wortelharen en die van de wortelcilinder bijna tienmaal zo groot als in voedingsoplossing. Bij koolrabi is genoemde verhouding ongeveer gelijk in beide groeimmedia.

Over de worteldiepte en de wortelverdeling van groenten is nog weinig onderzoek gedaan.

8.7 Toekomstig onderzoek

In deze paragraaf wordt aangegeven op welke gebieden nog onderzoek nodig is. Er is niet geïnventariseerd op welke gebieden al onderzoek wordt gedaan.

8.7.1 Opbrengst en N-opname

Om groei en N-opname vanuit de basisprocessen te kunnen beschrijven is nog veel onderzoek nodig over verschillende relaties die in de modellen voorkomen. Uitkomsten van de modelberekeningen moeten worden getoetst aan de resultaten van proeven waarin zeer intensief wordt gemeten. Dergelijke proeven kunnen ook dienen om NBS-adviezen op te stellen. Op korte termijn gezien bieden genoemde adviezen de beste aanpak om te zorgen voor een lage N-min-rest bij de oogst. Mogelijk vallen ze te verfijnen door de N-gift tijdens de teelt af te laten hangen van de te verwachten opbrengst aan gewasmassa en de te verwachten N-levering door de bodem.

8.7.2 N-mineraal-rest en vochtgehalte

Het relatieve belang van de verschillende oorzaken die kunnen leiden tot een verschil tussen de hoeveelheid N die theoretisch bij de oogst aanwezig moet zijn om te zorgen voor optimale groei en die waarbij in de praktijk nog optimale groei optreedt is niet duidelijk. Inzicht kan mogelijk leiden tot een lagere N-min-rest bij de oogst. Wel is duidelijk dat het vochtgehalte van de grond een grote rol kan spelen. Omdat het vochtgehalte een sterke invloed heeft op de effectieve diffusiecoëfficiënt bepaalt het vochtgehalte bij de oogst hoeveel minerale N dan in de bouwvoor nodig is om aan de vraag van de plant te kunnen voldoen. Telers die op de juiste manier beregenen kunnen, bij eenzelfde produktie, met een lager N-aanbod toe. Het verband tussen aanwezig vochtgehalte en gewenst N-aanbod bij de oogst is, voor zover mij bekend, niet duidelijk beschreven.

8.7.3 Wortelgroei

Over de worteldiepte en wortelverdeling in de loop van de tijd zijn voor groenten maar weinig gegevens te vinden. Voor modelbouw is een beschrijving van de wortelontwikkeling van verschillende groentegewassen in de loop van de tijd, en soms driedimensionaal, nodig. Hierbij moet aandacht besteed worden aan variabelen die de waargenomen groei kunnen verklaren, zoals;

- relatie met de bovengrondse groei,
- invloed van het weer,
- invloed van de grond.

Verder is het belangrijk dat een indruk wordt verkregen over de variatie die onder praktijkomstandigheden, door variatie in de verklarende variabelen, optreedt.

9. Literatuur

- Alt, D. und F. Wiemann, 1986. Ergebnisse einer Erhebungsuntersuchung zur Ermittlung der Nährstoffabfuhr durch die Ernteprodukte im Gemüsebau. Fachhochschule Osnabrück, Osnabrück, 154 p.
- Alt, D. und F. Wiemann, 1987. Phosphor-, Kalium- und Magnesium-Abfuhr als Basis für die Düngungsempfehlungen. *Gemüse* 1987,6: 294-299.
- Alt, D. und F. Wiemann, 1990. Stickstoff im Erntegut und in den Ernterückständen von Gemüse. *Gemüse* 1990,7: 352-356.
- Anon., 1963. Faustzahlen für den Gartenbau. Ruhr-Stickstoff, Bochum, 293 p.
- Anon., 1992a. Lage stikstofgift verlaagt oogstzekerheid. *Groenten+Fruit/Vollegroondsgroenten* 1992,23: 5.
- Anon., 1992b. Areaal vollegrondsgroenten stijgt met duizend ha. *Groenten+Fruit/Vollegroondsgroenten* 1992,37: 4.
- Anon., 1993. Statistisch jaarboek 1993. Centraal Bureau voor de Statistiek. SDU/Uitgeverij, 's-Gravenhage, 568 p.
- Baldwin, J.P., P.H. Nye and P.B. Tinker, 1973. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute uptake by randomly dispersed root systems developing in a finite volume of soil. *Plant and Soil* 38: 621-635. 1)
- Barber, S.A., 1984. Soil nutrient bioavailability - A mechanistic approach. Academic Press, New York. 1)
- Bäumer, K., 1971. Allgemeiner Pflanzenbau. Ulmer Verlag. 1)
- Barracough, P.B., 1986. The growth and activity of winter wheat roots in the field: Nutrient inflows of high yielding crops. *J. Agr. Sci. Camb.* 106: 53-59. 1)
- Bergmann, W., 1983. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer, Stuttgart. 1)
- Bergmann, W., 1988. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. VEB Fischer Verlag, Jena. 1)
- Biemond, H., 1992. De ontwikkeling, groei en fysiologie van planten in relatie tot abiotische omgevingsfactoren. Mededeling 105. Vakgroep Landbouwplantenteelt en Graslandkunde van de Landbouwuniversiteit, Wageningen, 47 p.
- Böhmer, M., 1980. Der Mineralstickstoffgehalt von Böden mit Feldgemüseanbau und seine Bedeutung für die Stickstoffernährung der Pflanze. Dissertation. Universität Hannover, Hannover, 139 p.
- Boon, J. van der en J.H. Pieters, 1981. Stikstofaanbod uit grond en bemesting, en nitraat in spinazie. Stikstofbemestingsproeven bij spinazie op zeeklei in 1980. Nota 97. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.), 36 p.
- Boon, J. van der, J.H. Pieters, J.H.G. Slangen en H.H.H. Titulaer, 1982. Stikstofaanbod uit grond en bemesting, en nitraat in spinazie II. Stikstofbemestingsproeven bij spinazie op zeeklei, rivierklei en zand in 1981. Nota 106. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.), 89 p.
- Boon, J. van der, J.H. Pieters, J.H.G. Slangen and H.H.H. Titulaer, 1986. The effect of nitrogen fertilization on nitrate accumulation and yield of some field vegetables. In: H. Lambers, J.J. Neeteson and I. Stulen (Eds.). *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht/Boston/Lancaster, pp. 489-492.
- Boon, J. van der, H. Niers, J.H.G. Slangen en H.H.H. Titulaer, 1989. Nitraat in spinazie bij gedeelde stikstofbemesting. Nota 213. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.), 19 p.
- Breimer, T., 1982. Environmental factors and cultural measures affecting the nitrate content in spinach. Dissertation. Agricultural University, Wageningen, 102 p.

- Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. Nitrogen-total. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, 1982. Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and microbiological properties. Second Edition. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Publisher, Madison, USA, pp. 595-624. 1)
- Brouwer, R., 1963. Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. *Jaarb. IBS, Wageningen*, pp. 31-39. 1)
- Brouwer, R., 1983. Functional equilibrium: sense or nonsense? *Neth. J. Agric. Sci.* 31: 335-348. 1)
- Burns, I.G., 1980. Influence of the spatial distribution of nitrate on the uptake of N by plants: A review and a model for rooting depth. *J. Soil Sci.* 31: 155-173.
- Claassen, N. and S.A. Barber, 1974. A method for characterising the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. *Plant. Physiol.* 54: 564-568. 1)
- Claassen, N., K.M. Syring and A. Jungk, 1986. Verification of a mathematical model by simulation potassium uptake from soil. *Plant Soil* 95: 209-220. 1)
- Clarkson, D.T., 1985. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 36: 77-115. 1)
- Corré, W.J. and T. Breimer, 1979. Nitrate and nitrite in vegetables. Department of Soils and Fertilizers, Agricultural University, Wageningen. PUDOC, Wageningen, 85 p.
- Darwinkel, A., 1975. Aspects of assimilation and accumulation of nitrate in some cultivated plants. Dissertation. Landbouwhogeschool, Wageningen. PUDOC, Wageningen, 64 p. 1)
- Feddes, R.A., 1969. Beregeningsprogramma's. *Tuinbouwmededelingen* 32,10/11: 440-453.
- Foehse, D. and A. Jungk, 1983. Influence of phosphate and nitrate supply on root hair formation of rape, spinach and tomato plants. *Plant Soil* 74: 359-368.
- Glass A.D.M., M.Y. Siddiqi, T.J. Ruth and T.W. Rufty Jr., 1990. Studies of the uptake of nitrate in barley. II. Energetics. *Plant Physiol.* 93: 1585-1589. 1)
- Greenwood, D.J. and A. Draycott, 1989. Experimental validation of an N-response model for widely different crops. *Fert. Res.* 18: 153-174.
- Greenwood, D.J. and J. Hunt, 1986. Effect of nitrogen fertiliser on the nitrate contents of field vegetables grown in Britain. *J. Sci. Food Agric.* 37: 373-383.
- Greenwood, D.J., T.J. Cleaver and M.K. Turner, 1974. Fertilizer requirements of vegetable crops. *Proceedings* 145, The Fertiliser Society, London, pp. 1-31.
- Greenwood, D.J., T.J. Cleaver, M.K. Turner, J. Hunt, K.B. Niendorf and S.M.H. Loquens, 1980. Comparison of the effects of nitrogen fertilizer on the yield, nitrogen content and quality of 21 different vegetable and agricultural crops. *J. Agric. Sci.* 95: 471-485.
- Greenwood, D.J., K. Kubo, I.G. Burns and A. Draycott, 1989. Apparent recovery of fertilizer N by vegetable crops. *Soil Sci. Plant Nutr.* 35: 367-381.
- Gröninger, H. en H.E. Soorsma, 1991. Stikstofbijmeststelsysteem (NBS) voor enige vollegrondsgroentegewassen. 3^e druk. Informatie en Kennis Centrum Akker- en Tuinbouw, Afdeling Akkerbouw en Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, niet genummerd.
- Groot, J.J.R., 1987. Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. *Simulation Reports CABO/TT* 13. CABO, Wageningen. 1)
- Gysi, C.H. und J.-P. Ryser, 1977. Düngung der Gemüse. *Flugschrift* 91. Eidgenössischen Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil, 39 p.
- Hähndel, R., 1984. Beeinflussung des Nitratgehaltes von Spinat sowie von Kopfsalat, Rote Beete und Radies durch variierte N- und Cl-Ernährung. Dissertation. Universität Hannover, Hannover, 132 p.
- Hähndel, R. und J. Wehrmann, 1986. Einfluss der NO_3^- bzw. NH_4^+ -Ernährung auf Ertrag und Nitratgehalt von Spinat und Kopfsalat. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 149: 290-302.
- Hartmann, H.D., 1982. Stickstoff und die Qualität von Spinat. Die Wirkung langsamfließender Dünger. *Gemüse* 18,4: 159-160.
- Hartmann, H.D., E. Pfülb und K.H. Zengerle, 1989. Grundlagen zum Wasserverbrauch von Gemüse. *Gartenbauwissenschaft* 53,5: 215-220.

- Heins, B., 1989. Bedeutung von Wurzeleigenschaften für die Nutzung des Nitratangebotes durch Spinat und Kohlrabi. Dissertation. Fachbereich Gartenbau, Universität Hannover, Hannover, 121 p.
- Heins, B. and M. Schenk, 1986. Nitrate-uptake characteristics of roots as affected by nitrate supply. In: H. Lambers, J.J. Neeteson and I. Stulen (Eds.). *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht/Boston/Lancaster, pp. 41-45.
- Heins, B. and M. Schenk, 1987. Root growth and nitrate uptake of vegetable crops. *J. Plant Nutr.* 10: 1743-1751.
- Jackson, W.A., W.L. Pan, R.H. Moll and E.J. Kamprath, 1986. Uptake, translocation, and reduction of nitrate. In: C.A. Neyra (Ed.). *Biochemical basis of plant breeding*. Vol. II: Nitrogen metabolism. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 73-108. 1)
- Keulen, H. van and W. Stol, 1991. Quantitative aspects of nitrogen nutrition in crops. *Fert. Res.* 27: 151-160.
- Kraker, J. de, H. Bosch, H.H.H. Titulaer, J. Jonkers, A. Ester, R. Meier en C.F.G. Kramer, 1991. Teelt van spinazie. Teelthandleiding 38. IKC-agv en PAGV, Lelystad, 64 p.
- Krug, H., 1986. Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis. Paul Parey, Berlin/Hamburg, 446 p.
- Kuipers, S.F., 1968. Bodemkunde. W.E.J. Tjeenk Willink, Zwolle, 247 p.
- Laske, P., 1962. Gemüsedüngung im Freiland. Grüne Hefte 16. Verlagsgesellschaft für Ackerbau MBH, Hannover, 48 p.
- Liesegang, H., 1930. Untersuchungen über den Verlauf der Nahrungsaufnahme bei Herbstspinat und über die Höhe des Nährstoffverbrauchs bei verschieden gedüngtem Frühjahrsspinat. *Gartenbauwissenschaft* 3: 457-467.
- Mehwald, J., 1973. Die Düngung bei Spinat im Frühjahrs- und Herbstanbau. *Gemüse* 9: 197-198.
- Miedema, M. en P.C. Meeuwissen, 1992. Bewust omgaan met mineralen. Stikstofkringloop. IKC-AT, Ede, 36 p.
- Nicolaisen, W. und H. Zimmermann, 1968. Der Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Nitratgehalt von Spinat unter wechselnden klimatischen Bedingungen. *Gartenbauwissenschaft* 33: 353-380.
- Nye P.H. and P.B. Tinker, 1977. Solute movement in the soil-root system. *Studies in ecology* 4. Blackwell Scientific Publications, Oxford etc., 342 p.
- Peterson, L.A. and G. Chesters, 1964. A reliable total nitrogen determination on plant tissue accumulating nitrate nitrogen. *Agron. J.* 56: 89-90. 1)
- Pföhl, E., K.H. Zengerle und H.D. Hartmann, 1988. Effektivität der Wasseraufnahme. Vortrag DGG-Tagung Osnabrück. Institut für Gemüsebau, Geisenheim. 1)
- Pieters, J.H., 1972. Geschiktheid van de grond voor vollegronds groenteteelt. Consulentenschap in algemene dienst voor de groenteteelt in de vollegrond, Alkmaar, 19 p.
- Reisenauer, H.M., 1964. Mineral nutrients in soil solution. In: P.L. Altman and D.S. Dittmer (Eds.). *Environmental biology*. Fed. Am. Soc. Exp. Biol., USA, pp. 507-508. 1)
- Reuff, B., 1970. Vitamin- und Spurenelementgehalt von Spinat unter dem Einfluss verschiedener Stickstoffformen und Stickstoffmengen. *Landw. Forsch. Sonderheft* 25II: 106-114.
- Scaife, A., 1983. The nitrate content and yield of spinach. *Fert. Res.* 4: 297-300.
- Scaife, M.A. and B.G. Bray, 1977. Quick sap tests for improved control of crop nutrient status. *ADAS Quarterly Review* 27: 137-145. 1)
- Scharpf, H.C. und R. Schrage, 1989. Größenordnung und Einflussfaktoren der Freisetzung von Stickstoff aus Ernterückständen im Gemüsebau. Kongressband 1988, Teil II. VDLUFA-Schriftenreihe 28: 81-95.
- Scharpf, H.C. und U. Weier, 1988. Abgestimmte Sollwerte für die Stickstoffdüngung im Gemüsebau. *Rheinische Monatschrift* 76,5: 282.
- Schenk, M., B. Heins and B. Steingrobe, 1991. The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization. *Plant Soil* 135: 197-203.
- Schrage, R. und H.C. Scharpf, 1987. Ernterückstände - einer der Gründe für hohe N_{min} -Reste. Was passiert beim Einarbeiten von Gemüseresten. *Gemüse* 1987,10: 412-414.

- Schrage, R. und H.C. Scharpf, 1989. Abschätzung des N-min-Gehaltes gemüsebaulich genutzter Böden auf der Grundlage von Boden- Witterungs- und Bewirtschaftungsdaten. Kongressband 1988, Teil II. VDLUFA-Schriftenreihe 28: 1263-1271.
- Sieling, E.R.M., 1992. Stikstofbestedingsrichtlijnen voor de akkerbouw en de groenteteelt in de vollegrond. IKC-AT-agv, Lelystad, 30 p.
- Smolders, E., 1993. Kinetic aspects of the soil-to-plant transfer of nitrate. Doctoraalproefschrift 230. Katholieke Universiteit, Leuven, 143 p.
- Steingrobe, B. and M.K. Schenk, 1991. Influence of nitrate concentration at the root surface on yield and nitrate uptake of kohlrabi (*Brassica oleracea gongyloides* L.) and spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Plant Soil* 135: 205-211.
- Terman, G.L., J.C. Noggle and C.M. Hunt, 1976. Nitrate-N and total N concentration relationships in several plant species. *Agr. J.* 68: 556-560.
- Til, R. van, 1993. WVC wil nitraatnorm wintergroenten aanscherpen. *Groenten+Fruit/Algemeen* 1993,25: 10 (25 juni).
- Titulaer, H.H.H., 1993. Stikstof is grillig, maar niet ongrijpbaar. *Groenten+Fruit/Vollegrondsgroenten* 1993,25: 8-10 (25 juni).
- Titulaer, H.H.H., S. Bommelé, T. Breimer, E.P.H.M. Schijvens en J.H.G. Slangen, 1980. Het stikstofbestedingsadvies voor spinazie. Toetsing van het voorlopige stikstofbestedingsadvies voor spinazie in de praktijk, met het doel het nitraatgehalte van spinazie te verlagen. PAGV, Lelystad, ongenummerd.
- Uhte, R., 1991. Wasserschutzauflagen im Gemüsebau. Ökonomische Auswirkungen betrachtet. *GbGw* 91,21: 1022-1027.
- Versteeg, E.M., 1986. Voorlopige onttrekkingscijfers van enige groentegewassen. *Ad Fundum* 3: 27-28.
- Wehrmann, J. und H.C. Scharpf, 1983, 1985. Nitrat in Grundwasser und Nahrungspflanzen. AID 136. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, 28 p.
- Weier, U. und H.C. Scharpf, 1989. Ertragseinbußen bei suboptimaler N-Versorgung. Grundlagen für den Entgelt bei behördlichen Auflagen. *Gemüse* 25,4: 212-216.
- Westerdijk, C.E., J. Alblas, H.H.H. Titulaer en G.J.M. van Dongen, 1991. Stand van onderzoek stikstofvoorziening en -emissie. Interne Mededeling 826. PAGV, Lelystad, 63 p.
- Wiebe, H.-J., 1976. Schaden zu hohe N-Gaben der Gemüsequalität? Optimale N-Gaben beim Gemüse schwer zu bestimmen. *DLG-Mitteilungen* 21: 1144-1146.
- Willigen, P. de, 1986. Supply of soil nitrogen to the plant during the growing season. In: H. Lambers, J.J. Neeteson and I. Stulen (Eds.). *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Nijhoff, Dordrecht, pp. 417-432.
- Willigen, P. de and M. van Noordwijk, 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Dissertation. Agricultural University, Wageningen, 282 p.
- Willigen, P. de, W.P. Wadman en M. van Noordwijk, 1992. Modelberekeningen omtrent de risico's van minerale stikstofophoping in het najaar bij enige akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten. In: H.G. van der Meer en J.H.J. Spiertz (red.). *Stikstofstromen in Agro-ecosystemen*. CABO-DLO, Wageningen, pp. 87-101.
- Zimmermann, B. und K. Sommer, 1989. Untersuchungen zum praxisnahen Anbau von Freilandgemüse auf Ammoniumbasis. Kongressband 1989. VDLUFA-Schriftenreihe 30: 161-167.

1) Door andere auteur(s) geciteerd.

Bijlagen

1.	Verse opbrengsten die in de literatuur worden vermeld of eruit zijn afgeleid.	55
2.	De hoeveelheid verse bovengrondse oogstrest en de hoeveelheid N daarin.	57
3.	Het drogestofgehalte, de verse opbrengst, de drogestof-opbrengst en de N-gift of het N-aanbod. Gegevens uit de literatuur of eruit afgeleid.	59
4.	De hoeveelheid N in de verkoopbare opbrengst en het bovengronds gewas, de verkoopbare opbrengst, de hoeveelheid N per eenheid verkoopbare opbrengst en in 30 ton verse opbrengst.	61
5.	Het N-gehalte in het verse materiaal van de oogstrest.	63
6.	Het N-gehalte in de drogestof van de opbrengst.	65
7.	Het N-gehalte in de drogestof bij variatie van het N-aanbod (0-30), het N-aanbod (0-60) en de N-gift.	67
8.	De maximale N-opnamesnelheid per dag, de periode waarover is gemeten en de maximale N-opname in een week.	69
9.	De N-opnamesnelheid.	71
10.	De bewortelde bodemlaag, de "effective rooting depth" en de laag waaruit de N wordt opgenomen.	73
11.	Het deel van de totale N-opname dat uit de aangeduide lagen komt (Afgeleid uit Böhmer, 1980).	75
12.	De wortellengte-dichtheid in de laag van 0 tot 15 cm en het N-aanbod (0-60).	77

Bijlage 1 Verse opbrengsten (V, ton ha⁻¹) die in de literatuur worden vermeld of eruit zijn afgeleid.

V	Teelt, grond (aantal proeven of bedrijven)	Bron
Voorjaarsteelt		
29,7	VJi, zand (n = 5)	Titulaer et al., 1980
31,1	VJi, rivierklei (n = 5)	
28,7	VJi, zeeklei (n = 5)	
19,0-55,0	VJ(1 ^e h. apr - e. mei / b. jun) (n = 7)	Hähndel, 1984
20,0	VJ	Scharpf en Weier, 1988 Weier en Scharpf, 1989
tot 20/40	VJv	De Kraker et al., 1991
Zomerteelt		
22,0-42,5	ZO/NJ(2e h.jul/1e w.aug-e.sept/b.okt) (n = 5)	Hähndel, 1984
48	ZO(21 apr -) Mazurka "sandigen Lehm"	Zimmermann en Sommer, 1989
tot 20/40	ZOv	De Kraker et al., 1991
31,1	ZO(28 apr - 13 jun)	Schenk et al., 1991
25/30/60	ZO(4 mei - 9/15/21 jun)	
28	ZOv(na h. mei -)	Gröninger en Soorsma, 1991
Najaarsteelt		
20,0	NJ	Scharpf en Weier, 1988 Weier en Scharpf, 1989
32,7	[NJ] hoge opbrengst (n = 3)	Heins, 1989
25	NJv/i	Gröninger en Soorsma, 1991
Niet gespecificeerd		
15,0	Hoge opbrengst	Gysi en Ryser, 1977
21,7	Optimale N-gift	Greenwood et al., 1980
18,8	Optimale N-gift	Greenwood en Hunt, 1986
21,2	Bedrijven (n = 4)	Alt en Wiemann, 1986 en 1987
30	Nederland en Duitsland	Versteeg, 1986
30-31	Hoogste opbrengst (n = 6)	Uhte, 1991
26	(n = 1)	
30-40-50	i	De Kraker et al., 1991

Alt en Wiemann (1986, 1987). Variatiecoëfficiënt (= VC) 17%. Bij 2 bedrijven is ook de opbrengst op 4 afzonderlijke veldjes bepaald. Per bedrijf een VC van respectievelijk 18 en 33%.

Alt en Wiemann (1990). Op basis van dezelfde gegevens als (1986) en (1987) enigszins afwijkende resultaten. Opbrengst 21,9 ton ha⁻¹ (n = 3) en VC 18,5%.

Hähndel (1984). N-aanbod (0-60) bij VJ 250 en bij ZO/NJ 200 kg ha⁻¹.

Scharpf en Weier (1988). Weier en Scharpf (1989). N-aanbod (0-30) bij VJ 220 en bij NJ 170 kg ha⁻¹.

Schenk et al. (1991). N-aanbod (0-30) voor de vier genoemde varianten respectievelijk 210, 180, 200 en 240 kg ha⁻¹.

Zimmermann en Sommer (1989). N-aanbod [0-30] 220 kg ha⁻¹.

Bijlage 2 De hoeveelheid verse bovengrondse oogstrest (O, ton ha⁻¹) en de hoeveelheid N daarin (N, kg ha⁻¹). N₆₀ = N-aanbod (0-60) in kg ha⁻¹, Opbr. = opbrengst in ton ha⁻¹.

Teelt	N ₆₀	Opbr.	O	N	Bron
Spinazie					
VJ	190	23	.	27	Böhmer, 1980
VJ	283	32	.	56	
ZO(juli -)	273	41	.	96	
VJ(12 apr -	20	7	4	7	
11 jun) Nores	105	14	7	18	
	190	34	14	49	
	275	33	14	52	
.	.	.	.	25	Wehrmann en Scharpf, 1985
.	.	.	.	50	
.	.	.	1-5	.	Krug, 1986
. (n = 3)	.	21	15	.	Alt en Wiemann, 1986
.	.	.	10	.	Schrage en Scharpf, 1989
.	.	.	10-20	.	Scharpf en Schrage, 1989
ZO(na 15 mei -)	opt.	28	20	.	Gröninger en Soorsma, 1991
NJv/i	opt.	25	18	.	
.	.	.	.	35	Westerdijk et al., 1991
.	.	.	.	5-25	
Andere gewassen					
spruitkool	.	.	.	190	Wehrmann en Scharpf, 1985
bloemkool	.	.	.	150	
suikerbiet	.	.	.	150	
bloemkool	.	.	30-60	.	Krug, 1986
spruitkool	.	.	.	.	
prei, koolrabi	.	.	10-20	.	Scharpf en Schrage, 1989

opt. = optimaal.

De gegevens van Krug (1986), Gröninger en Soorsma (1991) en Westerdijk et al.(1991) zijn samenvattend van aard.

Böhmer (1980). Bij VJ en mogelijk ook bij ZO N-aanbod (0-100). Gegevens voor laatstgenoemde VJ uit figuur 40, met veronderstelling 7,5% drogestof in de spruit.

Krug (1986). "Ernterückstände". [alles?]

Westerdijk et al. (1991). Oogstresten. [alles?]

Bijlage 3 Het drogestofgehalte ($D_{\%}$, als percentage in de verse opbrengst), de verse opbrengst (V , ton ha^{-1}), de drogestofopbrengst (D , ton ha^{-1}) en de N-gift of het N-aanbod (N , kg ha^{-1} , zie voetnoot). Gegevens uit de literatuur of eruit afgeleid.

$D_{\%}$	V	D	N	Opmerkingen	Bron
Voorjaarseelt					
5,17	29,0	1,5	250	VJ/ZO(16 mrt tot 30 mei-6aug tot 2 sept) ($n = 1$) "sandiger Lehm"	Mehwald, 1973
8,39	29,7	2,5	306/6	VJi, zand ($n = 5$)	Titulaer et al., 1980
7,28	31,1	2,3	289/6	VJi, rivierklei ($n = 5$)	
6,98	28,7	2,0	275/6	VJi, zeeklei ($n = 5$)	
6,16	38,9	2,4	120	VJ(m.mrt-m.mei) ($n = 3$)	Hartmann, 1982
Zomerteelt					
7,67	35,2	2,7	250/6	ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	Heins, 1989
7,67	2,6	2,5	250/6	ZO(24 jul - 3 sept) Alwaro	
5,6	48	2,7	220/3	ZO(21 apr -) Mazurka	Zimmermann en Sommer, 1989
.	.	2,1	250/6	ZO(9 mei - 16 jun) Norvak	Schenk et al., 1991
Najaarseelt					
5,31	17,7	0,9	200	NJ(6 aug tot 2 sept-8 tot 23sept) ($n = 1$) "sandiger Lehm"	Mehwald, 1973
7,03	32,7	2,3	230/6	NJ ($n = 3$) Bedrijven	Heins, 1989
Niet gespecificeerd					
11,2	33,0	3,7	opt.	. ($n = 2$)	Greenwood en Hunt, 1986
6,69	21,2	1,4	.	Bedrijven ($n = 4$)	Alt en Wiemann, 1986
8	.	.	.	Literatuur	De Kraker et al., 1991

N-gift of -aanbod (N): /3 = N-aanbod (0-30), /6 = N-aanbod (0-60), opt. = optimale gift, voor de rest de N-gift.

Heins (1989) oogst bij koolrabi(17 jul -) 3,1 ton ha^{-1} aan drogestof in de spruit bij N-aanbod (0-60) = 150 kg ha^{-1} .

Bijlage 4 De hoeveelheid N in de verkoopbare opbrengst (N_v) en het bovengronds gewas (N_b) (kg ha^{-1}), de verkoopbare opbrengst (V , ton ha^{-1}), de hoeveelheid N per eenheid verkoopbare opbrengst ($N_1 = N_v/V$, kg ton^{-1}) en in 30 ton verse opbrengst (N_{30} , kg).

N _v	N _b	V	N ₁	N ₃₀	Opmerkingen	Bron
Voorjaarsteelt						
106	133	23,	4,61	138	VJ(- e. mei), löss	Böhmer, 1980
139	195	0	4,38	132	VJ(- e. mei), löss	
		31, 7				
114	.	32, 6	3,50	105	VJ/ZO (n = 6)	Van der Boon en Pieters, 1981
Zomerteelt						
175	271	41, 0	4,27	128	ZO(jul -)	Böhmer, 1980
.	139	.	.	.	ZO(9mei - 16 jun)	Heins, 1989
113	113	35,	3,21	96	ZO(9mei - 18jun) Norvak	
131	131	2	4,02	121	ZO(24 jul - 3sept) Alwaro	
		32, 6				
101	.	48, 0	2,10	63	ZO(21 apr -) Mazurka "sandigem Lehm"	Zimmermann en Sommer, 1989
73	125	28, 0	2,61	78	ZO(na h.mei -), NBS	Gröninger en Soorsma, 1991
.	120	.	.	.	ZO(28 apr - 13 jun), löss	Schenk et al., 1991
.	180	60	3,0	90	ZO(4 mei - 20 jun), löss	
.	139	.	.	.	ZO(9 mei - 16 jun), zand	
.	133	.	.	.	ZO(9 mei - 18 jun), löss	
Najaarsteelt						
136	136	29, 6	4,59	138	NJ(6 aug - 27 okt) Rhei- nische Riesen	Liesegang, 1930
107	.	37, 3	2,86	86	NJ	Böhmer, 1980
106	106	32, 7	3,24	97	(n = 3)	Heins, 1989
73	125	25, 0	2,92	87	NJ, NBS	Gröninger en Soorsma, 1991

Bij sommige publikaties wordt geen onderscheid gemaakt tussen spruit en opbrengst. Dan verschijnen in de eerste twee kolommen gelijke getallen.

Bijlage 4 (vervolg).

N _v	N _b	V	N ₁	N ₃₀	Opmerkingen	Bron
Niet gespecificeerd						
94	.	22,0	4,27	128	A	Laske, 1962
70	.	15,0	4,67	140	A	Anon., 1963
74	.	22,7	3,26	98	.	Greenwood et al., 1974
.	70	15,0	4,67	140	AT	Gysi en Ryser, 1977
113	.	23,5	4,81	144	Bedrijven (n = 7)	Böhmer, 1980
100	150	.	.	.	AT	Wehrmann en Scharpf, 1985
70	90	20,0	3,50	135	AT	Krug, 1986
110	.	30,0	3,67	110	A	Versteeg, 1986
.	110-140	.	.	.	AT	Heins en Schenk, 1987
.	90	.	.	.	AT	Schrage en Scharpf, 1989
80	114	21,9	3,67	110	(n = 3)	Alt en Wiemann, 1990
70	.	.	.	.	A	Westerdijk et al., 1991
.	190	.	.	.	AT, max. opbr.	Anon., 1992a
.	.	.	3,5	105	A	Miedema en Meeuwissen, 1992
70	105	.	.	.	AT	Titulaer, 1993

Kolom opmerkingen: A is door auteur verondersteld, is een T aanwezig dan geeft het getal onder N_b de totale N-opname.

Alt en Wiemann (1990). "— wurde nach Aufschluss mit Phenolschwefelsäure der Stickstoff durch automatische Destillation bestimmt." Variatiecoëfficiënt N-gehalte in opbrengst 18,1 en in de oogstrest 17,8. Voor de oogstrest kan als een gemiddelde over de gewassen worden aangehouden dat er 3 kg N per ton in zit in plaats van de tot nu gebruikelijke 3,3 kg N per ton.

Anon. (1963): De verhouding tussen de onttrokken hoeveelheden nutriënten is volgens Laske:

$N:P_2O_5:K_2O:CaO:MgO = 1:0,43:1,43:0,29:0,36$.

Anon. (1992a) put uit een artikel, het resultaat van een literatuuronderzoek, in het blad Gartenbau.

Gegeven is de N-behoefte.

Böhmer (1980). De variatie bij de praktijkbedrijven is enorm: de opbrengsten variëren van 10 tot 41 ton ha⁻¹ en de afgevoerde hoeveelheden N ("Entzug") van 48 tot 197 kg ha⁻¹.

Boon, van der en Pieters (1981).

VJZO(24 mrt tot 24 apr - 22 mei tot 3 jun) Butterfly, Estivato, Novak, Persifly en Spinoza. NJ(4 aug - 23 sept) Estivato.

De in de tabel vermelde gegevens zijn berekend voor het huidige bemestingsadvies volgens Sieling (1992), door lineaire interpolatie tussen de door de auteurs verstrekte gegevens.

Greenwood et al. (1974). Er is verondersteld dat er 7,5% drogestof in het "bovengronds gewas" zit.

Gysi en Ryser (1977). Oogst plus oogstrest. De totale onttrekking varieert bij een opbrengst van 15 ton ha⁻¹ van 40 tot 90 kg N per ha.

Heins (1989). N-totaal volgens Peterson en Chesters (1964). Volgens Hähndel (1984) komt bij deze bepaling alle N in de uitslag. Bij het 1^e geval is de totale N-opname 139, waarvan 114 kg ha⁻¹ in de spruit.

N-aanbod (0-30) = 238, N-aanbod (0-60) = 250 kg ha⁻¹. Voor het 2^e en 3^e geval is een drogestofgehalte van 7,67% aangenomen. Spruit plus wortel bevatten in het tweede geval 132 en in het derde geval 148 kg ha⁻¹ aan N.

Krug (1986). Berekend uit een verkoopbare opbrengst van 20 ton ha⁻¹ en een N-behoefte per ton van 4,5 kg. De verse opbrengsten variëren van 10 tot 30 ton ha⁻¹.

Schenk et al. (1991). N-totaal volgens een gewijzigde Kjeldahl-methode.

Eerste proef N-aanbod (0-30) = 150 tot 210 kg ha⁻¹. Tweede proef N-aanbod (0-30) = 240 kg ha⁻¹. Derde proef N-aanbod (0-60) = 250, N-aanbod (0-15) = 238 kg ha⁻¹. Vierde proef uit figuur 1. N-aanbod (0-60) = 250 kg ha⁻¹.

Schrage en Scharpf (1989). N-opname. N-totaal (niet gespecificeerd).

Titulaer, 1993. N_b = N_v + oogstresten.

Wehrmann en Scharpf (1985). De hoeveelheden worden als resp. "N-Entzug" en "N-Bedarf" aangeduid.

Zimmermann en Sommer (1989). N-aanbod [0-30] = 220 kg ha⁻¹.

Bijlage 5 Het N-gehalte in het verse materiaal van de oogstrest (N, kg ton⁻¹). Informatie over de soort N-analyse in bijlage 4.

Teelt	N	Bron
Spinazie	4,5	Schrage en Scharpf, 1989
Spinazie (n = 3)	2,2	Alt en Wiemann, 1990
Groenten gemiddeld	2,5	Schrage en Scharpf, 1987
Groenten gemiddeld	3,0	Alt en Wiemann, 1990

Bijlage 6 Het N-gehalte in de drogestof van de opbrengst (N, %). N_{60} = N-aanbod (0-60) in kg ha⁻¹, O = Opbrengst vers in ton ha⁻¹.

Teelt	N_{60}	O	N	Bron
.	opt.	24	3,8	Greenwood et al., 1980
VJ(12 apr - 11 jun) Nores	190	48	4,7	Böhmer, 1980
potproef	ruim	.	5,5	Heins en Schenk, 1986
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	250	33	4,2	Heins, 1989
ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro	250	35	5,3	
ZO(9 mei - 16 jun)	250	36	5,5	
[NJ] praktijk (n = 3)	.	33	4,6	
praktijk (n = 3)	.	22	5,6	Alt en Wiemann, 1990
voedingsoplossing	.	.	4,5	Steingrobe en Schenk, 1991
ZO(28 apr - 13 jun)	210 (0-30cm) 250	31	4,1	Schenk et al., 1991
ZO(9 mei - 16 jun) Norvak	.	(2,1)	5,5	
.	.	(1,7)	4,3	
voedingsoplossing	.	.	5,3	Smolders, 1993

In de kolom "Opbrengst" geven de getallen tussen haken drogestof-opbrengsten.

Achter de hier volgende auteursnaam (-namen) staat informatie over de toegepaste analysemethode bij de N-bepaling. Er zijn verschillende soorten "N-Kjeldahl" -bepalingen. De nitraat-N komt daarbij totaal of slechts gedeeltelijk in het analysecijfer tot uitdrukking.

Alt en Wiemann (1990). In de drogestof van de bovengrondse oogstrest zit 5,0% N.

Greenwood et al. (1980). N-Kjeldahl. Alleen de organische N.

Heins en Schenk (1986). Peterson en Chesters (1964). Volgens Hähndel (1984) wordt hiermee totaal N gemeten (org.-N + NH₄-N + nitraat-N).

Heins (1989). Peterson en Chesters (1964).

Steingrobe en Schenk (1991). N-gehalte omvat ook nitraat. Bij verschillende nitraatgehalten in de oplossing (gemiddeld 27 tot 1154 µmol l⁻¹).

Schenk et al. (1991). N-Kjeldahl (gewijzigd). Drogestofopbrengst (ton ha⁻¹) voor zover de getallen tussen haken staan.

Smolders (1993). Op de drogestof 4,5% gereduceerde N en 0,8% nitraat-N.

Bijlage 7 Het N-gehalte in de drogestof (%) bij variatie van het N-aanbod (0-30) (I), het N-aanbod (0-60) (II) en de N-gift (III) (kg ha⁻¹).

I.					
N-aanbod (0-30)	159	199	238		Heins, 1989
ZO(9 mei - 16 jun)	4,3	4,2	5,5		
N-aanbod (0-30)	35	120	150	180	210
ZO(28 apr - 13 jun)	2,9	3,5	4,2	4,2	4,1
II.					
N-aanbod (0-60)	20	105	190	275	Böhmer, 1980
VJ(12 apr - 11 jun) Nores	2,4	3,4	4,7	5,0	
N-aanbod (0-60)	100	175	250		Heins, 1989
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	3,4	3,8	4,2		
ZO(24 jul - 3 sept) Alvaro	4,6	4,9	5,3		
N-aanbod (0-60)	100	125	150		
Koolrabi(17 jul - 3 sept)	3,6	3,8	4,0		
III.					
N-gift	0	195	H		Greenwood et al., 1980
	2,4	3,8	4,6		
N-gift-range	0	tot	448		Greenwood en Draycott, 1989
range % N 1971	2,1	tot	4,5		
1972	2,7	tot	4,0		

Böhmer (1980). N-Kjeldahl. Maximale verse opbrengst 34 ton ha⁻¹ bij N-aanbod (0-60) = 190 kg ha⁻¹.
 Greenwood et al. (1980). H = hoog. Greenwood en Draycott (1989). N-Kjeldahl die de organische N bepaalt. De toegepaste micromethode reduceert niet meer dan 100 µg nitraat-N per g drogestof.
 Heins (1989). N-totaal volgens Peterson en Chesters (1964) in het bovengrondse deel (spruit). Bij de proef met variatie in N-aanbod (0-30) is N-aanbod (0-60) steeds ongeveer 250 kg ha⁻¹.
 Schenk et al. (1991). N-Kjeldahl (gewijzigd).

Bijlage 8 De maximale N-opnamesnelheid per dag (M_d , kg ha⁻¹ dag⁻¹), de periode waarover is gemeten (P in dagen, r = raaklijn aan de curve) en de maximale N-opname in een week (M_w , kg ha⁻¹ week⁻¹).

M _d	P	M _w	Teelt, literatuur	Bron
Voorjaarsteelt				
11,8	r	77	VJ	Wiebe, 1976
16/17	3	116	VJ	Hähndel, 1984
Zomerteelt				
10,7	7	75	ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	Heins, 1989
12,4	7	87	ZO(24 jul - 18 jun) Alvaro	
5,7	7	40	ZOv(h. mei - e. juli)	Gröninger en Soorsma, 1991
15	6	105	ZO(4 mei - 20 jun) Norvak	Schenk et al., 1991
6	7	42	ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	
Najaarsteelt				
5,4	r	35	NJ	Wiebe, 1976
4,3	7	30	NJv(b. aug - e. aug)	Gröninger en Soorsma, 1991
3,3	7	23	NJv(b. sept - h. sept)	
2,9	7	20	NJi(e. jul - b. aug)	
Niet gespecificeerd				
5,7	14	40	Literatuur	Heins, 1989
17	.	119	Literatuur	De Kraker et al., 1991

De Kraker et al. (1991). "Om goed te kunnen groeien heeft spinazie per dag 17 kg N per ha nodig."

Als algemeen geldende regel is dit niet juist.

Schenk et al. (1991). Löss. Eerste teelt: N-aanbod (0-60) = 250 kg ha⁻¹. Tweede teelt N-aanbod (0-30) = 240 kg ha⁻¹. Gegevens afgeleid uit figuur 1.

Wiebe (1976). Afgeleid uit een figuur en met de veronderstelling dat er 4,5% N in de drogestof zit.

Bijlage 9 De N-opnamesnelheid ($\text{kg ha}^{-1} \text{ week}^{-1}$).

Teelt	Aantal weken voor de oogst								Bron
	1	2	3	4	5	6	7	8	
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	75	50	14	?	.	.	.	.	Heins, 1989
ZO(24 jul - 18 jun) Alvaro	87	29	41	?	.	.	.	.	
ZO(9 mei - 18 jun) Norvak	42	35	25	?	.	.	.	.	Schenk et al., 1991
ZOv(h. mei - e. jul)	40	40	35	10	.	.	.	.	
NJv(b. aug - e. aug)	30	30	28	28	10	.	.	.	Gröninger en Soorsma, 1991
NJv(b. sept - h. sept)	23	23	23	23	23	10	.	.	
NJi(e. jul - b. aug)	20	20	20	20	20	13	6	6	

? = er zijn geen gegevens voor deze week en vroegere weken.

Heins (1989). 50 kg ha^{-1} zaad en rijafstand van 20 cm. Afgeleid uit haar tabel 18.

Schenk et al. (1991). Löss, N-aanbod (0-60) 250 kg ha^{-1} . Afgeleid uit hun figuur 1.

Bijlage 10 De bewortelde bodemlaag, de "effective rooting depth" en de laag waaruit de N wordt opgenomen (L, cm).

L	Gewas, grond, % wortels in laag	Bron
Bewortelde bodemlaag		
60	s., aardappel, prei, ijssla	Wehrmann en Scharpf, 1985
30	kropsla, erwt	
30	s.	Krug, 1986
140	s.	Krug, 1986 De Kraker et al., 1991
15	s. Norwag, löss, 85%	Heins en Schenk, 1987
30	s. Norwag, löss, 98%	
15	koolrabi Noriko, löss, 60/67/79%	
30	koolrabi Noriko, löss, 95-98%	
15	ZO(9 mei - 18 jun) Norvak, 80%	Heins, 1989
15	ZO(24 jul - 3 sept) Alwaro, 80%	
15	koolrabi(18 jul -), 80%	
30	s.	De Kraker et al., 1991
"Effective rooting depth"		
15	prei	Burns, 1980
20	sla	
25	ui	
Laag waaruit de N wordt opgenomen		
60	VJ	Böhmer, 1980 Krug, 1986
80	NJ	Böhmer, 1980
40/60	erwt	
60	stamboom	
100	witte kool, bloemkool	

s. = spinazie.

Böhmer (1980). Löss.

Burns (1980) definieert de "effective rooting depth" als die waarbij de opnamesnelheid per eenheid van wortellengte de helft is van de maximaal mogelijke. De auteur geeft een vergelijking waarbij de "effective rooting depth" afhangt van bovengronds drooggewicht (plus "tap root"), standdichtheid en gemiddelde oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de wortel.

Heins en Schenk (1987). N-aanbod (0-60) 100, 175 en 250 kg ha⁻¹ bij spinazie en 100, 125 en 150 kg ha⁻¹ bij koolrabi.

De Kraker et al. (1991) vermelden zowel dat spinazie een paalwortel maakt die wel 140 cm diep gaat als dat de wortels zijn geconcentreerd in de bovenste 30 cm van de bodem.

Bijlage 11 Het deel van de totale N-opname dat uit de aangeduide lagen komt (%) (Afgeleid uit Böhmer, 1980).

Laag (cm)			Teelt
0-20	20-40	40-60	
54	32	13	VJ, onbemest
41	27	23	WI
59	31	10	ZO(21 apr - 8 jun), löss
67	23	10	„ N-aanbod (0-60) = 250

Berekening uit de afname van N-min in de desbetreffende lagen. Het eerste en tweede geval zijn afgeleid uit figuur 32, het derde uit figuur 33 en het vierde uit figuur 39. Bij de WI is ook nog 9% uit de laag 60-80 cm opgenomen.

Bijlage 12 De wortellengte-dichtheid (cm cm^{-3}) in de laag van 0 tot 15 cm en het N-aanbod (0-60) (N, kg ha^{-1}).

N						Gewas, ras	Bron
laag	100	150	175	250	ruim		
3,2	.	.	.	.	11,3	spinazie	Heins en Schenk, 1986
8,6	.	.	.	.	26,3	mais	
4,3	.	.	.	.	3,0	ui	
.	6,2	.	5,7	4,4	.	ZO(9 mei- 18 jun) Norvak	Heins, 1989
.	4,1	.	3,4	2,5	.	ZO(24 jul- 3 sept) Alwaro	
.	1,6	2,9	.	.	.	koolrabi(17 jul-)	
.	.	.	.	3,2-3,9	.	ZO(9 mei- 16 jun) Norvak	

Heins en Schenk (1986). Potproef met "loamy sand". Potinhoud 5 liter, met respectievelijk 9 en 166 mg N per kg grond.

Heins (1989). In het laatste geval daalt de wortellengte-dichtheid bij het oplopen van N-aanbod (0-15) van 75 naar 230 kg ha^{-1} , hetgeen gepaard gaat met een drogestofopbrengst die oploopt van 1,7 tot 2,1 ton ha^{-1} .