

COLOFON

© 1998 Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een automatisch gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced and/or published in any form, photoprint, microfilm or by any other means without written permission from the publisher.

Het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij het gebruik van de gegevens in deze uitgave.

SYN
LC
132

Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente
Vestiging Naaldwijk
Kruisbroekweg 5, Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. 0174-636700, fax 0174-636835

ISSN 1385 - 3015

NITRAATTRANSPORT NAAR DE WORTELS DOOR DE NEERWAARTSE WATERSTROMING IN DE GROND BIJ IN KASSEN GETEELDE TOMATEN

Een simulatie

J. van den Ende
J.A. Kipp

Naaldwijk, maart 1998

Rapport 132
Prijs f 25,-

Rapport 132 wordt u toegestuurd na storting van f 25,- op gironummer 293110
ten name van Proefstation Naaldwijk onder vermelding van 'Rapport 132,
Nitraattransport naar de wortels van tomaten'.



INHOUD

SAMENVATTING	4
1. INLEIDING	5
2. NEERWAARTSE WATERSTROMING	6
2.1. Materialen en Methoden	6
2.1.1. Bodemprofielen	6
2.1.2. Waterretentie- en doorlatenheidskarakteristieken	6
2.1.3. Evapotranspiratie en watergift	7
2.1.4. Patroon van wateropname	7
2.1.5. Verdere invoergegevens	8
2.1.6. Snelheid van de verticale waterstroming	8
2.2. Resultaten	9
2.2.1. Benodigde simulatieperiode	9
2.2.2. Verticale waterflux	9
2.2.3. Gemiddelde snelheid van de verticale waterstroming	11
3. VERTICAAL WATERTRANSPORT VERSUS WATEROPNAME DOOR DE WORTELS	12
4. VERTICAAL NITRAATTRANSPORT VERSUS NITRAATOPNAME DOOR DE WORTELS	14
5. DISCUSSIE	20
6. LITERATUUR	26
TABELLEN	29
FIGUREN	41
LIJST VAN SYMBOLEN	45

SAMENVATTING

Voor teelten van tomaten in kassen waarbij bij het fertigeren een doorspoelfractie van 0.25 wordt aangehouden, is het potentiële belang van de neerwaartse waterstroming in de grond voor het transport van nitraat naar de wortel nagegaan.

Voor dit doel is een simulatie van die stroming uitgevoerd met behulp van het model SWACROP. Uit de hierbij verkregen snelheid van de neerwaartse waterstroming en de nitraatconcentratie van de bodemoplossing is de snelheid van het neerwaartse nitraattransport afgeleid en vergeleken met een schatting van de door de plant benodigde nitraatopnameflux aan het worteloppervlak.

De diverse gebruikte basisgegevens worden omschreven en toegelicht. De verkregen resultaten worden vanuit verschillende gezichtspunten bediscussieerd. Zij maken het aannemelijk dat, althans gedurende de produktiefase van het gewas, bij genoemde teelten het vereiste nitraattransport naar de wortel grotendeels voor rekening van de neerwaartse waterstroming kan komen.

1. INLEIDING

Algemeen wordt aangenomen dat bij teelten in de open grond transport van nutriënten naar de plantenwortel voornamelijk plaatsvindt door twee vormen van transport: massastroming teweeggebracht door de opname van water door de wortel en diffusie (de Willigen en van Noordwijk, 1994). Bij teelten onder glas wordt echter zeer frequent gefertigeerd. Hier zal ook de neerwaartse waterstroming een belangrijk mechanisme voor het nutriëntentransport naar de wortel zijn. Zeker wanneer ter voorkoming van zoutaccumulatie en compensatie van ongelijkheid in wateropname of watertoediening circa een derde meer water moet worden toegediend dan door het gewas wordt opgenomen (Sonneveld et al., 1991).

Met het doel het potentiële belang van de neerwaartse waterstroming voor het transport van nitraat na te gaan is een simulatie van die stroming uitgevoerd met behulp van het model SWACROP (Wesseling et al., 1989; Kabat et al., 1992). Uit de hierbij verkregen snelheid van de neerwaartse waterstroming en de nitraatconcentratie van de bodemoplossing is de snelheid van het neerwaartse nitraattransport afgeleid en vergeleken met een schatting van de door de plant benodigde nitraatopnameflux aan het worteloppervlak. Als gewas werd tomaat in de productiefase gekozen, waarbij werd gerekend met een doorspoelfractie van 0.25.

In dit rapport worden de diverse verkregen gegevens samengevat en bediscussieerd.

2. NEERWAARTSE WATERSTROMING

2.1. MATERIALEN EN METHODEN

2.1.1. Bodemprofielen

De simulatie werd uitgevoerd met vijf bedachte homogene bodemprofielen die onderling sterk van grondsoort verschilden. Als diepte van de profielen, tevens diepte van de vaste grondwaterstand, werd 80 cm gekozen.

Enkele kenmerken van de profielen zijn weergegeven in Tabel 1. De vermelde kenmerkwaarden komen overeen met de gemiddelde waarden van de desbetreffende kenmerken die bij een onderzoek van kasgronden in de laag van 5-30 cm zijn gevonden voor vijf onderscheiden grondsoortklassen (van den Ende, 1988).

2.1.2. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken

Waterretentie- $(h(\theta))$ en doorlatendheidscurven $(K(h))$ werden afgeleid van Wösten et al. (1987). Uit de reeks van bovengrondklassen van deze auteurs werden zes klassen (B_1 , B_2 , B_3 , B_7 , B_{10} , B_{11}) gekozen, voornamelijk op basis van met de profielen 1 t/m 5 (Tabel 1) min of meer overeenkomende organische stof-, lutum- en leemgehalten. De profielen werden als volgt aan die grondklassen gerelateerd: 1 (B_1 , B_2), 2 (B_3 , B_7), 3 (B_{10}), 4 en 5 (B_{11}).

Bij de keuze van de grondklassen werd geen gebruik gemaakt van de dichtheden van profielen en grondklassen. In overeenstemming met het door Sonneveld (1990) geconstateerde verschil in dichtheid tussen kasgronden en buitengronden, zijn de dichtheden van de profielen 1 t/m 5 lager tot veel lager dan die van de grondklassen B waaraan zij gerelateerd werden.

Samenhangend met genoemd verschil zijn de θ_{-1} -waarden (gelijk verondersteld aan de poriëfracties) van de profielen hoger tot veel hoger dan aangegeven door Wösten et al. (1987). Met het oog hierop werden de $h(\theta)$ -curven van genoemde auteurs in het hoge h -traject aangepast.

Voor deze aanpassing kon, doordat van kasgronden maar weinig $h(\theta)$ -curven bekend zijn, geen gebruik worden gemaakt van sofistieke niet-lineaire functies, zoals de vijf-parameterfunctie van van Genuchten en Nielsen (1985). Vandaar dat

een lineaire aanpassing werd gerealiseerd. Hierbij werden de $h(\theta)$ -curven in het hoge h -traject vervangen door rechten die lopen door de punten die de $\theta_{.1}$ - en $\theta_{.63}$ -waarden van de profielen weergeven, en doorlopen tot zij bij h -waarden variërend van -118 cm tot -311 cm aansluiting geven op de curven (zie Fig.3 t/m 7). In het geval van profiel 1 echter werden de rechten met het oog op een goede aansluiting vanuit het punt dat de $\theta_{.1}$ -waarde van het profiel weergeeft, iets stijler getrokken dan wanneer zij vanuit genoemd punt door het punt dat de $\theta_{.63}$ -waarde weergeeft, zouden zijn gegaan (zie Fig.1 en 2). De op de beschreven wijze verkregen grafieken werden in tabelvorm in het SWACROP-model ingevoerd.

Ook de $K(h)$ -curven werden in het hoge h -traject vervangen door rechten (zie Fig.1 t/m 7). Deze werden getrokken vanuit de punten aangegeven door de hoogste K -waarden die in het gearceerde gebied rond de curven bij $h = -1$ cm zijn af te lezen, naar de punten op de curven aangegeven door de h -waarden waarbij de curve- en rechtegedeelten van de bovengenoemde grafieken samenkomen.

2.1.3. Evapotranspiratie en watergift

De transpiratie werd van dag tot dag constant gehouden en wel op een waterhoeveelheid van 0.34 cm per dag. Dit is in West-Nederland de gemiddelde transpiratiehoeveelheid van volwassen tomatengewassen in juni (de Graaf, 1988). Ook de evaporatie vanaf het grondoppervlak werd constant gehouden en wel op 0.01 cm per dag.

In de simulatie is er van uitgegaan dat bij het fertigeren het water gelijkmatig over de grondoppervlakte wordt verdeeld en het gewas niet wordt bevochtigd (berekening onder het gewas door). Als regel werd een fertigatiefrequentie van om de drie dagen ($f_{\text{fer}} = (3d)^{-1}$) gehanteerd, hetgeen overeenkomt met de gangbare frequentie in de praktijk. In een paar gevallen werd echter ook een frequentie van om de twee dagen ($f_{\text{fer}} = (2d)^{-1}$) toegepast.

Rekening houdend met een doorspoelfractie van 0.25 volgt uit het voorgaande dat als grootte van de watergift per drie of twee dagen respectievelijk 1.4000 en 0.9333 cm werd aangehouden. De hoeveelheid water die in de productie van plantenweefsel gaat zitten, is hierbij niet in rekening gebracht.

2.1.4. Patroon van wateropname

De diepte van beworteling werd constant gehouden, in één geval op 40 cm en in alle andere gevallen op 80 cm. Voor simulatie van de wateropname door de wortels werd, op twee uitzonderingen na, het opnamemodel van Hoogland et al.

(1981) gebruikt. In dit model wordt een lineaire afname van de wateropname met de diepte verondersteld. Bij een bewortelingsdiepte van 80 cm en een onbelemmerde wateropname in de gehele wortelzone werd als verloop van de dagelijkse opname (0.34 cm) met de diepte aangenomen: $0.00765 \text{ cm cm}^{-1}$ bovenin, lineair afnemend tot $0.00085 \text{ cm cm}^{-1}$ onderin de wortelzone. Dit opnamepatroon (Opn_h) stemt overeen met de in de literatuur veel genoemde vuistregel 40-30-20-10 (Raats, 1974; Gardner, 1991), waarmee wordt aangeduid dat 40% van de opname plaatsvindt in het bovenste kwart van de wortelzone, 30% in het tweede kwart, 20% in het derde kwart en 10% in het onderste kwart.

Om na te gaan wat de invloed van een diepere of ondiepere wateropname op de neerwaartse waterstroming is, werd voor één profiel naast het genoemde opname-model ook het opnamemodel van Feddes et al. (1978) gebruikt. Dit model (Opn_f) veronderstelt een constante wateropname over de gehele bewortelingsdiepte. Bij overigens gelijkblijvende condities leidt het tot een wateropname van 0.00425 en $0.0085 \text{ cm cm}^{-1} \text{ d}^{-1}$ bij een bewortelingsdiepte van respectievelijk 80 en 40 cm.

In beide opnamemodellen dienen kritische drukhoogten te worden opgegeven waarboven (${}^h h(\text{lim})$) dan wel waarbeneden (${}^b h(\text{lim})$) belemmering van de wateropname optreedt, door respectievelijk te lage luchtgehalten en te lage watergehalten. ${}^b h(\text{lim})$ werd gekozen bij -50 cm , waarbeneden de wateropname lineair afnam om bij $h = -8000 \text{ cm}$ volledig te stoppen. ${}^h h(\text{lim})$ werd gekozen bij luchtgehalten van 5 of 10% (${}^h \phi_s(\text{lim}) = 0.05$ dan wel 0.10), boven welke desbetreffende h -waarden de wateropname lineair afnam om bij de h -waarde van 2% lucht te stoppen.

2.1.5. Verdere invoergegevens

Naast bovengenoemde invoergegevens werden onder andere de volgende initia gebruikt: simulatieperiode van 90 dagen, hydraulisch evenwicht in het profiel op $t = 0$, laagdikte waarmee gerekend werd: 10 cm (acht lagen, genummerd 1 t/m 8).

2.1.6. Snelheid van de verticale waterstroming

Uit de door het SWACROP-model geproduceerde dagwaarden van de verticale waterflux (Bouma, 1991), v_v , op de diverse profiellaaggrenzen werd de gemiddelde snelheid, $v'_v (= v_v / \theta)$, van de verticale waterstroming berekend. Het is namelijk niet zozeer v_v als wel v'_v die de bepalende factor is voor de capaciteit van die water-

stroming om nitraat naar de wortels te voeren. v'_v op een laaggrens werd berekend door v_v op die grens te delen door het gemiddelde van de θ -waarden (niet vermeld) op de laagknooppunten direct boven en onder die grens. Aan het boven- en onder-einde van de profielen was genoemde berekeningswijze niet mogelijk. Bovenin werd de berekening uitgevoerd door deling door de θ -waarde op 5 cm diepte en onderin door deling door de θ -waarde bij waterverzadiging.

2.2. RESULTATEN

2.2.1. Benodigde simulatieperiode

Onder benodigde simulatieperiode voor v_v wordt verstaan het aantal gesimuleerde dagen dat nodig was om van fertigatietijdvak (3 of 2 dagen) tot fertigatietijdvak over het gehele profiel voor de v_v -waarden tot een constante variatie te komen. Die periode liep uiteen van 16 dagen voor profiel 1 (B_1), bij $f_{ter} = (3d)^{-1}$, tot 37 dagen voor profiel 5. De toegepaste simulatieperiode van 90 dagen was dus ruim voldoende om die constante variatie te bereiken.

In het navolgende zal er alleen gewerkt worden met v_v -waarden die werden verkregen, nadat die situatie was bereikt.

2.2.2. Verticale waterflux

De simulaties werden op vier wijzen (combinaties van wateropnamemodel, fertigatiefrequentie, en limiterend luchtgehalte) uitgevoerd. Deze simulatiemethoden (SW) zijn vermeld in Tabel 2 (bladzijde 30-32), tezamen met een selectie uit de verkregen v_v -waarden, te weten de waarden op 10, 40, 70 en 80 cm diepte. Het is niet nodig alle v_v -waarden te vermelden. Enerzijds werden de waarden aan het grondoppervlak volledig bepaald door fertigatie en evaporatie en anderzijds was het verloop van de waarden van 10 tot 80 cm diepte min of meer geleidelijk. Op dag 1 van de fertigatietijdvakken namen de absolute waarden in het algemeen van 10 tot 80 cm af en op dag 2 en 3 namen zij toe tot een diepte van respectievelijk 20 à 30 cm en 40 à 60 cm om dieper weer af te nemen.

De grootste afwijking van het geschetste verloop deed zich voor bij profiel 2 (B_3) bij de bewortelingsdiepte van 40 cm (SW 4, Tabel 2). Hier namen in de ondergrond op dag 1 en 3 de absolute waarden van 40 tot 80 cm toe. Ook bij $\phi_a(lim) = 0.10$ (SW 3, Tabel 2) deden zich afwijkingen voor, dit onder invloed van te lage luchtgehalten (zie hieronder).

De v_v -waarden aan het grondoppervlak bedroegen op dag 1 bij $f_{ter} = (3d)^{-1}$ -1.3900 cm en bij $f_{ter} = (2d)^{-1}$ -0.9233 cm. Op de dagen 2 en 3 bedroegen zij

0.0100 cm. De laatste waarden waren de enige positieve (opwaartse flux). Zij zijn overigens laag.

De per fertigatietijdvak gesommeerde v_v -waarden komen in het algemeen nauw overeen met de fluxwaarden die berekend kunnen worden uit fertigatie, evaporatie en wateropnamemodel (onbelemmerde opname). Voor de in Tabel 2 vermelde diepten zijn deze waarden (cm d⁻¹):

diepte (cm)	10	40	70	80
$Opn_{H,f_{ter}} = (3d)^{-1}$	-1.1532	-0.6560	-0.3882	-0.3500
$Opn_{H,f_{ter}} = (2d)^{-1}$	-0.7688	-0.4373	-0.2588	-0.2333
$Opn_{F,}$ bewortelingsdiepte 80 cm	-1.2425	-0.8600	-0.4775	-0.3500
$Opn_{F,}$ bewortelingsdiepte 40 cm	-1.1150	-0.3500	-0.3500	-0.3500

Een vergelijking van de waarden uit dit tabellarisch overzicht met de gesommeerde v_v -waarden uit Tabel 2 leert dat van laatstgenoemde waarden er slechts vijf, verkregen bij $\phi_a(\text{lim}) = 0.10$ (SW 3), sterk afwijken van de desbetreffende waarden uit het overzicht. Die vijf waarden zijn in absolute zin veel groter dan de laatstgenoemde waarden. Voor profiel 2(B₇) betreft dit de waarde op 80 cm diepte en voor profiel 3 de waarden op alle diepten. Voor laatstgenoemd profiel wijkt ook de bij $\phi_a(\text{lim}) = 0.05$ verkregen waarde op 80 cm diepte (SW 1) in beperkte mate af. Al deze afwijkingen zijn het gevolg van een te laag luchtgehalte in de grond (ϕ_a lager dan $\phi_a(\text{lim})$), waardoor het gesimuleerde tomatengewas minder water opnam. Voor profiel 2(B₇) bij $\phi_a(\text{lim}) = 0.10$ en profiel 3 bij $\phi_a(\text{lim}) = 0.05$ is het tekort aan lucht beperkt gebleven tot laag 8 van het profiel. ϕ_a in die laag bedroeg gemiddeld respectievelijk 0.065 en 0.049. Bij profiel 3 bij $\phi_a(\text{lim}) = 0.10$ is tekort aan lucht opgetreden in de lagen 1 t/m 3 en 6 t/m 8. In eerstgenoemde lagen was dit gedurende ongeveer één dag na het fertigeren het geval, in laag 6 gedurende een groot deel van het fertigatietijdvak en in de lagen 7 en 8 gedurende het gehele fertigatietijdvak. ϕ_a in de twee laatstgenoemde lagen bedroeg gemiddeld respectievelijk 0.085 en 0.048.

De belemmering van de wateropname heeft bij de profielen 2(B₇) (SW 3) en 3 (SW 1 en 3) tot verhoging van de doorspoelfractie van 0.250 tot respectievelijk 0.270, 0.251 en 0.335 geleid.

Van de hierboven nog niet genoemde gesommeerde v_v -waarden uit Tabel 2 wijkt nog een aantal af van de desbetreffende waarden uit het bovenstaand tabellarisch overzicht. Het betreft de acht waarden van profiel 1(B₁) (SW 1 en 2) en zeven van de twaalf waarden van profiel 2(B₇) (vier waarden bij SW 1 en drie bij SW 3).

Deze afwijkingen zijn maar gering, maar ook zij zijn een gevolg van een belemmer-

de wateropname, die in deze gevallen is veroorzaakt doordat de h-waarden in met name profiellaag 1 tijdelijk flink onder de $h(\text{lim})$ -waarde lagen. Op de laatste dag van het fertigatietijdvak bedroeg de h-waarde in laag 1 van profiel 1(B₁) -73.5 cm bij $f_{\text{ter}} = (3d)^{-1}$ (SW 1) en -68.5 cm bij $f_{\text{ter}} = (2d)^{-1}$ (SW 2) en in laag 1 van profiel 2(B₇) -71.6 cm (SW 1 en 3). In de andere profielen waren de h-waarden hoger.

Een vergelijking van de afzonderlijke v_v -waarden leert dat, afgezien van de waarden op dag 2 en 3 aan het grondoppervlak, er acht een relatief lage absolute waarde hebben. Deze acht waarden werden verkregen bij $f_{\text{ter}} = (3d)^{-1}$. Het betreft waarden van profiel 1(B₁) en 2(B₇), van de profielen dus, zoals wij boven zagen, met bovenin relatief lage drukhoogten. Van eerstgenoemd profiel zijn het de waarden van dag 1 op 70 en 80 cm diepte (SW 1) en van laatstgenoemd profiel de waarden van dag 1 op 70 en 80 cm diepte en de waarde van dag 3 op 10 cm diepte (SW 1 en 3). Onder de v_v -waarden die voor deze profielen bij $f_{\text{ter}} = (2d)^{-1}$ werden verkregen (SW 2), komen geen relatief lage absolute waarden voor, met uitzondering dan van de waarden van dag 2 aan het grondoppervlak.

De v_v -waarden die via Opn_f werden verkregen laten zien dat, zoals te verwachten was, de absolute waarden in het profiel (de diepten van 0 en 80 cm dus niet meegerekend) bij de bewortelingsdiepte van 80 cm groter tot veel groter zijn dan bij de bewortelingsdiepte van 40 cm (SW 4).

2.2.3. Gemiddelde snelheid van de verticale waterstroming

In Tabel 3 (bladzijde 33-35) is een selectie uit de verkregen v'_v -waarden opgenomen. Deze selectie is conform die voor de v_v -waarden in Tabel 2.

Om de v'_v -waarden te verkrijgen werden de v_v -waarden vermenigvuldigd met $1/\theta$. De waarden van dit quotiënt liepen uiteen van 1.45 (profiel 5, 80 cm diepte, dagen 1 t/m 3) tot 4.26 (profiel 1(B₁), grondoppervlak, dag 3).

3. VERTICAAL WATERTRANSPORT VERSUS WATEROPNAME DOOR DE WORTELS

Voor het gedachte tomatengewas is een schatting gemaakt van de gemiddelde wateropnameflux aan het worteloppervlak (${}^m v_r$ -waarde) en van een relatief hoge opnameflux (${}^h v_r$ -waarde). De eerstgenoemde schatting werd gebaseerd op de eerder genoemde transpiratiesnelheid van 0.34 cm d^{-1} . Voor de tweede schatting is uitgegaan van gegevens van R. de Graaf (persoonlijke mededeling). De hoogste transpiratiesnelheid, door hem gemeten op een zonnige junidag, deed zich voor gedurende een drietal uren rond het middaguur. Zij bedroeg ongeveer 2.5 keer de gemiddelde snelheid. De schatting van de ${}^h v_r$ -waarde werd op grond hiervan gebaseerd op een transpiratiesnelheid van $0.34 \times 2.5 = 0.85 \text{ cm d}^{-1}$.

Bij de schattingen is ervan uitgegaan dat alle wortels van een wortelsysteem per eenheid van worteloppervlakte met dezelfde snelheid water opnemen (de Willigen en van Noordwijk, 1987). Aan de hand van potexperimenten van genoemde auteurs is voorts voor de worteloppervlakte van een plant van het gedachte tomatengewas 2.5 m^2 aangehouden.

Bij een plantdichtheid van 2.5 per m^2 volgt uit voornoemde aannames een ${}^m v_r$ -waarde van 0.0544 cm d^{-1} en een ${}^h v_r$ -waarde van 0.1360 cm d^{-1} . Deze geschatte waarden kunnen rechtstreeks worden vergeleken met de v'_v -waarden. Op de diepten van 20, 30, 40 en 50 cm waren de absolute v'_v -waarden in alle gevallen hoger dan zowel de ${}^m v_r$ - als de ${}^h v_r$ -waarde. Op de andere diepten waren de eerstgenoemde waarden deels lager dan de laatstgenoemde. In het volgende tabellarisch overzicht zijn de percentages van die delen vermeld:

diepte(cm)	percent ten opzichte van	
	${}^m v_r$	${}^h v_r$
0	64.9	64.9
10	0.0	16.2
60	0.0	8.1
70	8.1	8.1
80	8.1	13.5

Veruit de meeste lagere absolute v'_v -waarden kwamen dus voor aan het grondoppervlak. Zij hadden betrekking op de door de evaporatie teweeggebrachte opwaartse waterflux.

In Tabel 4 zijn voor elk van de vier toegepaste simulatiewijzen per profiel de percentages van de absolute v'_v -waarden die lager zijn dan de ${}^m v_r$ - en de ${}^h v_r$ -waarde, weergegeven. Bij de berekening van deze percentages zijn aan de v'_v -waarden op de diverse profiellaaggrenzen gewichten toegekend. Bij deze gewichtstoekenning werden twee factoren verdisconteerd, te weten de dikte van de grondlaag die de profiellaaggrenzen vertegenwoordigden (5 of 10 cm) en het patroon van de onbelemmerde wateropname over het profiel (paragraaf 2.1.4). Aldus werden voor de drie toegepaste wateropnamepatronen de volgende gewichten verkregen en toegekend:

diepte (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$Opn_{F_8}, 80^1$	1	2	2	2	2	2	2	2	1
$Opn_{F_8}, 40^1$	1	2	2	2	1				
Opn_H	4.375	8	7	6	5	4	3	2	0.625

¹⁾ bewortelingsdiepte in cm

Uit Tabel 4 blijkt dat voor de profielen 1(B_1) en 2(B_7) de percentages verkregen via SW 2 ($f_{ter} = (2d)^{-1}$) lager waren dan die verkregen via SW 1 ($f_{ter} = (3d)^{-1}$). Dit is begrijpelijk, daar door frequenter fertigeren fluctuaties in het neerwaartse watertransport in de grond afnemen. Wanneer voor genoemde twee profielen alleen fertigatietijdvakken van twee dagen zouden zijn aangehouden, dan zou voor de in het onderzoek opgenomen profielen het percentage absolute v'_v -waarden lager dan de ${}^m v_r$ - en de ${}^h v_r$ -waarde in het algemeen niet hoger zijn geweest dan respectievelijk 7.3 en 14.0. Alleen de percentages verkregen via SW 4 voor profiel 2(B_3) met een bewortelingsdiepte van 40 cm, respectievelijk 8.3 en 16.7, vormden hierop een uitzondering.

4. VERTICAAL NITRAATTRANSPORT VERSUS NITRAATOPNAME DOOR DE WORTELS

Om de gemiddelde snelheid van het door de verticale waterstroming teweeggebrachte nitraattransport te kunnen vergelijken met de door de plant benodigde nitraatopnameflux aan het worteloppervlak dienden die snelheid en die flux door schatting te worden vastgesteld. De schatting van genoemde snelheid werd gebaseerd op de aanname dat het transport van nitraat door verticale waterstroming plaatsvindt volgens het "piston-flow" model (Jury en Nielsen, 1990). De gemiddelde snelheid van het door de verticale waterstroming teweeggebrachte nitraattransport (F'_v) is met deze aanname vastgelegd als het produkt van de gemiddelde snelheid van de verticale waterstroming (v'_v) en de nitraatconcentratie van de bodemoplossing (c_s).

Voor het schatten van de door de plant benodigde nitraatopnameflux aan het worteloppervlak is een drietal aannames gedaan:

- De stikstofvoorziening van de plant is geheel afhankelijk van nitraat. Met andere woorden, andere stikstofvormen werden geacht geen rol van betekenis te spelen.
- Alle wortels van een wortelsysteem nemen per eenheid van oppervlakte zowel nitraat als water met dezelfde snelheid op (de Willigen en van Noordwijk, 1987).
- De opnameconcentratie van nitraat is van dag tot dag en ook in de loop van de dag constant. Adams en Massey (1984) vonden voor volwassen tomatenplanten in juni dat de opnameconcentratie van nitraat overdag inderdaad maar betrekkelijk weinig varieerde.
's Nachts was de opnameconcentratie weliswaar belangrijk hoger, maar de opgenomen hoeveelheden nitraat en water waren 's nachts maar gering.

Op basis van genoemde drie aannames kan de voor de plant benodigde nitraatopnameflux (F_r) worden weergegeven als het produkt van de wateropnameflux (v_r) en de opnameconcentratie van nitraat (c_n). In aansluiting op de in het vorig hoofdstuk onderscheiden ${}^m v_r$ - en ${}^h v_r$ -waarden is er gewerkt met een ${}^m F_r$ - en een ${}^h F_r$ -waarde. Bij de beoogde vergelijking van het door de verticale waterstroming teweeggebrachte nitraattransport met de door de plant benodigde nitraattoevoer naar het worteloppervlak is er gebruik gemaakt van het $F'_v/{}^m F_r$ - en het $F'_v/{}^h F_r$ -quotiënt:

$$\frac{F'_v}{mF_r} = \frac{v'_v \times c_s}{m_{v_r} \times c_u}$$

$$\frac{F'_v}{hF_r} = \frac{v'_v \times c_s}{h_{v_r} \times c_u}$$

Deze quotiënten kunnen als index worden gezien voor de mate waarin het door de verticale waterstroming teweeggebrachte nitraattransport kan voorzien in de benodigde nitraattoevoer naar de wortels bij respectievelijk gemiddelde en relatief hoge transpiratiesnelheid.

Met gebruikmaking van de gevonden v'_v - en v_r -waarden kunnen genoemde quotiënten worden berekend, als voor de opnameconcentratie van nitraat (c_u) en de nitraatconcentratie van het fertigatiewater waarden worden aangenomen. Uit de laatstgenoemde concentratie moeten dan eerst nog wel de c_s -waarden op de diverse profiellaaggrenzen worden berekend. Als c_u -waarde werd 10 mol m^{-3} aangehouden (Voogt, 1993).

Bij de berekening van de c_s -waarden uit de nitraatconcentratie van het fertigatiewater is ervan uitgegaan dat de nitraatconcentratie van de bodemoplossing behalve door eerstgenoemde nitraatconcentratie alleen nog werd beïnvloed door opname door de wortels van nitraat en water. Voorts is ervan uitgegaan dat het aantal fertigatietijdvakken voldoende groot is geweest om van fertigatietijdvak tot fertigatietijdvak tot dezelfde c_s -waarden te komen.

De berekening werd gebaseerd op de hoeveelheden water en nitraat die per fertigatietijdvak de diverse profiellaaggrenzen passeerden. Voor nitraat was deze berekeningswijze mogelijk op basis van de eerder genoemde aanname dat alle wortels van een wortelsysteem per eenheid van oppervlakte zowel nitraat als water met dezelfde snelheid opnemen. Deze aanname houdt namelijk in dat het opnamepatroon van nitraat over het profiel evenredig is aan dat van water, althans bij onbelemmerde opname. Door het ontbreken van gegevens over belemmering van de nitraatopname is bij de berekening van de hoeveelheden nitraat die per fertigatietijdvak de profiellaaggrenzen passeerden, uitgegaan van onbelemmerde opname.

Om hierop aan te sluiten is ook bij de berekening van de hoeveelheden water die die grenzen passeerden, van onbelemmerde opname uitgegaan. In paragraaf 2.2.2 is al vermeld dat de resultaten van deze berekening voor SW 1, 2 en 4 nauw overeenstemmen met de per fertigatietijdvak gesommeerde v_v -waarden. Voor SW 3 was er niet van een nauwe overeenstemming sprake. De via SW 3 gevonden v'_v -waarden zijn op grond hiervan niet gebruikt voor berekening van F'_v/mF_r - en F'_v/hF_r -quoti-

enten.

De berekening van de c_s -waarden is uitgevoerd voor een aantal nitraatconcentraties van het fertigatiewater. Deze concentraties zijn zo gekozen dat de volgende situaties ontstonden:

- A. De nitraatconcentratie van de bodemoplossing is in het gehele profiel 10 mol m^{-3} .
- B. De hoeveelheid nitraat in het fertigatiewater is gelijk aan de door het gewas benodigde hoeveelheid nitraat.
- C. De nitraatconcentratie van het 1:2 extract (Sonneveld et al., 1990) van 0-25 cm diepte is 5 mol m^{-3} (Bemestingsadviesbasis Glastuinbouw 1994-1995).

Situatie A

De nitraatconcentratie van het fertigatiewater moest in dit geval ook 10 mol m^{-3} zijn. In verband met evaporatie aan het grondoppervlak moest per fertigatie echter niet aan 1.40 of 0.9333 cm water nitraat worden toegediend maar aan 1.37 of 0.9133 cm.

Situatie B

In dit geval werd de nitraatconcentratie van het fertigatiewater verkregen door de opnameconcentratie van nitraat te vermenigvuldigen met 1.02/1.37 of, wat hetzelfde is, met 0.68/0.9133, wat $7.4453 \text{ mol m}^{-3}$ oplevert.

Op de diverse profiellaagsgrenzen werden de volgende c_s -waarden (mol m^{-3}) berekend:

diepte (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Opn_H	7.4453	6.9651	6.3617	5.6044	4.6646	3.5335	2.2566	0.9852	0.0000
Opn_F 80 ¹	7.4453	7.1831	6.8610	6.4557	5.9302	5.2218	4.2149	2.6702	0.0000
Opn_F 40 ¹	7.4453	6.8610	5.9302	4.2149	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

¹ bewortelingsdiepte in cm

Situatie C

Een nitraatconcentratie van 5 mol m^{-3} in het 1:2 extract komt volgens Sonneveld et al. (1990) overeen met 25.6 mol m^{-3} in de bodemoplossing. Daar deze concentratie hoger is dan 10 mol m^{-3} , nam de nitraatconcentratie van de bodemoplossing met de diepte toe. De nitraatconcentratie van het fertigatiewater die genoemde concentratie van 25.6 mol m^{-3} teweegbracht, moest daarom door opeenvolgende benaderingen worden vastgesteld. Bij Opn_H werd voor de nitraatconcentratie van het fertigatiewa-

ter 22.4 mol m^{-3} gevonden en bij Opn_F 23.7 en 21.6 mol m^{-3} voor bewortelingsdiepten van respectievelijk 80 en 40 cm. Op de diverse profiellaaggrenzen werden de volgende c_s -waarden (mol m^{-3}) berekend:

diepte (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Opn_H	22.400	24.730	27.659	31.335	35.896	41.387	47.584	53.775	58.537
Opn_F 80 ¹	23.700	25.106	26.833	29.007	31.824	35.623	41.023	49.307	63.626
Opn_F 40 ¹	21.600	24.253	28.479	36.268	55.406	55.406	55.406	55.406	55.406

¹ bewortelingsdiepte in cm

De berekening van de $F'_v / {}^mF_r$ - en de $F'_v / {}^hF_r$ - quotiënten is uitgevoerd voor de v'_v -waarden verkregen via SW 1,2 en 4. De gevonden absolute waarden van de quotiënten zijn voor zover zij kleiner zijn dan 1.00, opgenomen in de Tabellen 5, 6 en 7. De quotiënten verkregen via SW 1 voor de profielen 1(B₁) en 2(B₂) zijn echter bij het samenstellen van deze tabellen buiten beschouwing gelaten. Zij zullen verder op aan de orde komen.

De quotiënten in Tabel 5 hebben betrekking op situatie C. Deze situatie, geënt op de bemestingsadviesbasis, was die met de hoogste nitraatconcentraties in de bodemoplossing. Van de hiervoor via SW 1 en 2 verkregen $F'_v / {}^mF_r$ - quotiënten, vertegenwoordigd in Tabel 5, was de absolute waarde van slechts 5 quotiënten lager dan 1.00. Voor de $F'_v / {}^hF_r$ - quotiënten was het desbetreffende aantal 12. Die aantallen hadden geheel betrekking op de opwaartse waterflux aan het grondoppervlak. Zij maakten respectievelijk 2.9 en 6.9 % uit van de totale aantallen quotiënten (percentageberekening met toekenning van gewichten als eerder genoemd). Dit zijn maar lage percentages.

Opgemerkt wordt dat hoge absolute waarden van $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^hF_r$ - quotiënten er wél op kunnen wijzen dat het nitraattransport via de verticale waterstroming geheel of grotendeels in de nitraattoevoer naar de wortels kan voorzien, maar niet dat die toevoer niet geheel door een ander proces kan plaatsvinden. Zo zal, zo lang de nitraatconcentratie van de bodemoplossing hoger is dan de opnameconcentratie van nitraat, de transpiratiestroom naar de wortels toe steeds meer dan voldoende nitraat naar de wortels voeren, waarbij het overschot aan nitraat via diffusie weer van de wortels wordt afgevoerd.

De quotiënten in Tabel 6 hebben betrekking op situatie A, waarin de nitraatconcentratie van de bodemoplossing gelijk was aan de opnameconcentratie van nitraat. Het nitraat in de bodemoplossing was in deze situatie niet onderhevig aan diffusie. Van de in dit geval via SW 1 en 2 verkregen $F'_{\sqrt{m}}F_r$ - en $F'_{\sqrt{h}}F_r$ - quotiënten, vertegenwoordigd in Tabel 6, was de absolute waarde van respectievelijk 12 en 15 quotiënten lager dan 1.00. Deze aantallen vormden respectievelijk 6.9 en 9.1% van de totale aantallen (percentageberekening met toekenning van gewichten).

De quotiënten in Tabel 7 (bladzijde 39 en 40) hebben betrekking op situatie B, waarin de hoeveelheid nitraat in het fertigatiewater gelijk was aan de door het gewas benodigde hoeveelheid nitraat. Daar in elk geval bij een lagere nitraatgift niet geheel aan de nitraatbehoefte van het gewas zou kunnen worden voldaan, vertegenwoordigde deze situatie de voor een normale gewasgroei theoretisch laagst denkbare nitraatconcentratie in de bodemoplossing. De benodigde toevoer van nitraat naar de wortels was hierbij in belangrijke mate afhankelijk van diffusie. Van de in deze situatie via SW 1 en 2 verkregen $F'_{\sqrt{m}}F_r$ - en $F'_{\sqrt{h}}F_r$ - quotiënten, vertegenwoordigd in Tabel 7, was de absolute waarde in overeenstemming daarmee voor veel hogere percentages, respectievelijk 13.5 en 30.6%, lager dan 1.00 dan bij de andere situaties het geval was. Dit neemt niet weg dat van respectievelijk 86.5 en 69.4% van de quotiënten de absolute waarde hoger was dan 1.00, wat erop wijst dat de benodigde nitraattoevoer naar de wortels in belangrijke mate voor rekening kon komen van het nitraattransport via de verticale waterstroming.

Voor profiel 2(B₃) werden voor de absolute waarden van de $F'_{\sqrt{m}}F_r$ - en $F'_{\sqrt{h}}F_r$ - quotiënten lager dan 1.00, de volgende percentages verkregen:

	$ F'_{\sqrt{m}}F_r < 1.00$			$ F'_{\sqrt{h}}F_r < 1.00$		
	SW 1	SW 4(80 ¹)	SW 4(40 ¹)	SW 1	SW 4(80)	SW 4(40)
situatie C	0.0	0.0	0.0	7.3	4.2	8.3
situatie A	7.3	4.2	8.3	7.3	6.2	16.7
situatie B	13.9	10.4	20.8	31.4	18.8	37.5

¹ bewortelingsdiepte in cm

Zoals uit dit tabellarisch overzicht blijkt, waren de percentages verkregen via SW 4(80) lager dan die verkregen via SW 1. Dit is begrijpelijk, daar in het eerste geval de opname van nitraat en water in de ondergrond groter was en daardoor ook het nitraattransport via de neerwaartse waterstroming. De percentages verkregen via

SW 4(40) waren juist hoger dan die verkregen via SW 1. Dit moet worden toegeschreven aan de ondiepere beworteling bij SW 4(40).

Voor de profielen 1(B₁) en 2(B₇) werden voor de absolute waarden van de $F'_{\sqrt{m}}/F_r$ - en $F'_{\sqrt{h}}/F_r$ - quotiënten lager dan 1.00 de volgende percentages verkregen:

		$ F'_{\sqrt{m}}/F_r < 1.00$		$ F'_{\sqrt{h}}/F_r < 1.00$	
		SW 1	SW 2	SW 1	SW 2
profiel 1(B ₁)	situatie C	0.5	0.0	7.8	5.5
	situatie A	9.5	5.5	12.0	5.5
	situatie B	14.7	12.0	28.9	19.5
profiel 2(B ₇)	situatie C	0.0	0.0	7.8	5.5
	situatie A	9.5	5.5	18.6	5.5
	situatie B	21.4	12.0	34.7	19.5

Zoals uit dit tabellarisch overzicht blijkt, waren de percentages verkregen via SW 2 lager dan die verkregen via SW 1, d.w.z. zij waren lager bij $f_{ter} = (2d)^{-1}$ dan bij $f_{ter} = (3d)^{-1}$. Dit is een gevolg van het feit dat de percentages van de absolute v'_v - waarden die lager waren dan de ${}^m v_r$ - c.q. ${}^h v_r$ - waarde, in het eerste geval lager waren (Tabel 4).

5. DISCUSSIE

De profielen 1 t/m 5 en de hiervoor afgeleide $h(\theta)$ - en $K(h)$ - grafieken hebben twee bezwaren.

Eén hiervan is dat die grafieken zijn verkregen door rechtlijnige aanpassing van curven van Wösten et al. (paragraaf 2.1.2). Het ziet er echter niet naar uit dat die aanpassingswijze de hoogte van de $F'_{\sqrt{m}}F_r$ - en $F'_{\sqrt{h}}F_r$ - quotiënten sterk heeft beïnvloed. Hoewel de aanpassing van profiel tot profiel nogal verschilde (Fig. 1 t/m 7), lopen namelijk de percentages die via SW 1 voor de absolute waarden van de quotiënten lager dan 1.00 werden verkregen, voor elk van de situaties A, B en C maar betrekkelijk weinig uiteen. Voor de profielen 1(B₁) en 2(B₇), de profielen dus waarin bovenin de h -waarden tijdelijk flink onder de $h(lim)$ - waarde lagen, zijn de percentages echter in de meeste gevallen wel het hoogst. De voor deze profielen via SW 2 verkregen percentages zijn per situatie juist steeds het laagst. Hieruit blijkt dat de percentages door verhoging van de fertigatiefrequentie verlaagd kunnen worden.

Het tweede bezwaar is dat de dichtheid van de ondergrond van de profielen 1 t/m 5 gelijk is gehouden aan die van de bovengrond. In werkelijkheid heeft de ondergrond vaak een hogere dichtheid (Wösten et al , 1987).

Vanwege twee redenen is echter bij de profielen 1 t/m 5 zo'n onderscheid niet aangebracht. Enerzijds ontbraken daartoe in de ondergrond van kassen bepaalde dichtheidswaarden en anderzijds werden de dichtheidswaarden van de ondergrond-klassen van genoemde auteurs niet geschikt geacht en wel vanwege de lage organische-stofgehalten van die klassen. In kassen is het organische-stofgehalte van de ondergrond gewoonlijk niet laag, althans voor de diepte van 30-60 cm is dat zo. Bij het onderzoek van kasgronden waaraan de grondsoorten van de profielen 1 t/m 5 zijn ontleend, werden in elk geval voor de grondsoortklassen 1 t/m 5 (profielen 1 t/m 5) op genoemde diepte organische-stofgehalten gevonden die gemiddeld respectievelijk ongeveer 60, 70, 80, 80 en 100% bedroegen van die op 5-30 cm diepte. Wanneer bij de simulaties in de ondergrond van een hogere dichtheid zou zijn uitgegaan, dan zou het luchtgehalte daar lager zijn geweest. Het simulatiemodel had dan niet alleen bij SW 3 maar ook bij de andere simulatiewijzen, met uitzondering van SW 4(40), in de ondergrond een verminderde wateropname kunnen aangeven. In zulke gevallen is het model voor het beoogde doel eigenlijk niet geschikt, omdat de voor de gehele diepte gevonden wateropname onvoldoende is voor de gestelde transpiratie. In werkelijkheid zal de plant de hoeveelheid transpiratiewater wel degelijk opnemen. Voorts zal bij zulke omstandigheden het wortelsysteem niet steeds de gestelde diepte bereiken. In werkelijkheid zal de hoeveelheid transpiratiewater dan dus worden opgenomen over een geringere diepte.

De met profiel 2(B₃) verkregen resultaten laten zien dat zoiets een verlagend effect heeft op de absolute waarden van de $F'_{\sqrt{}}/{}^mF_r$ - en $F'_{\sqrt{}}/{}^hF_r$ -quotiënten. Wanneer de vermindering van de bewortelingsdiepte niet sterk is, zal dat effect echter niet groot zijn.

De toegepaste grens van 2% lucht in de grond, waarbij de wateropname geacht werd volledig te stoppen, is arbitrair. Het is zelfs de vraag of voor de ondergrond van de profielen 1 t/m 5, waarin bij de simulaties het luchtgehalte maar zeer weinig varieerde, het toepassen van zo'n grens, naast een grens waarbeneden belemmering van de wateropname begint, wel op zijn plaats is. De groei van wortels is namelijk gevoeliger voor slechte aëratie dan allerlei andere fysiologische activiteiten (Brouwer en Kuiper, 1972; Saglio et al., 1984; van Noordwijk en Brouwer, 1993). Met andere woorden, bij een min of meer constant slechte aëratie gaat het er blijkbaar niet zozeer om of wortels al of niet onder belemmering activiteiten, zoals de opname van water en voedingsstoffen, kunnen verrichten, als wel of zich wortels kunnen vormen. Wanneer de grens van 2% lucht niet zou zijn toegepast en er zou zijn uitgegaan van een abrupt en volledig stoppen van de wateropname bij 5% lucht, dan zou in laag 8 van profiel 3 een veel sterkere belemmering van de wateropname zijn opgetreden dan via SW 1 is waargenomen.

Bij de toegepaste grens van 5% lucht, waarbeneden belemmering van de wateropname geacht werd te beginnen, werd bij geen van de profielen zo'n belemmering waargenomen, met uitzondering dan van de geringe belemmering in laag 8 van profiel 3. De vraag is nu of die grens van 5% reëel is. De mogelijkheden die de gasuitwisseling via de gas-gevulde poriën in de grond voor het zuurstoftransport naar de wortels biedt (Woolley, 1966; Greenwood, 1970; Bakker et al., 1987) en het feit dat tomaat geen al te hoge eisen aan de doorluchting van de grond stelt (van Noordwijk en Brouwer, 1993), zouden erop kunnen wijzen dat dat ten naaste bij zo is. Zekerheid hierover is er echter niet en het percentage lucht dat noodzakelijk is voor een onbelemmerde opname, zou in werkelijkheid hoger kunnen zijn. Wanneer bij de simulaties in plaats van 5% een wat hoger percentage lucht als kritische grens zou zijn toegepast, dan had het simulatiemodel niet alleen bij profiel 3 maar ook bij de andere profielen in de ondergrond een verminderde wateropname kunnen aangeven. Zoals bij de bespreking van het effect van een hogere dichtheid in de ondergrond is vermeld, is het simulatiemodel dan al gauw niet meer voor ons doel geschikt, terwijl de plant in werkelijkheid de gehele hoeveelheid transpiratiewater over een geringere diepte zou opnemen, zonder dat dit grote consequenties zou hebben voor de grootte van de $F'_{\sqrt{}}/{}^mF_r$ - en $F'_{\sqrt{}}/{}^hF_r$ -quotiënten. Het een en ander gaat echter alleen op zolang het hogere percentage lucht niet te hoog is. Zo laten de voor

de profielen 2(B₇) en 3 via SW 3 verkregen resultaten zien dat een kritische grens van 10% lucht voor het laatstgenoemde profiel te hoog is. Bij dit profiel werd bij die grens de wateropname niet alleen in de ondergrond maar ook in de bovengrond belemmerd.

Zoals vermeld in paragraaf 2.1.4, stemt het wateropnamepatroon van Opn_H overeen met het patroon van de vuistregel 40-30-20-10.

Volgens Klepper (1987) is dit patroon ook de vuistregel voor de wortelverdeling van gewassen op uniforme profielen die goed van water worden voorzien. Het gaat ook op voor de kastomaat (van der Post en van der Meys, 1964). In ons geval stemt Opn_H dus beter overeen met de werkelijkheid dan Opn_F .

De voor de tomatenplanten aangehouden worteloppervlakte van 2.5 m² is ontleend aan de Willigen en van Noordwijk (1987). Deze auteurs vonden deze waarde voor volwassen tomatenplanten die waren geteeld in potten van 6 dm³ inhoud, waarin het substraat, steenwol, ruim van water en voedingsstoffen was voorzien. Van tomaten in kasgrond zijn over de worteloppervlakte geen gegevens bekend. Een vraag is nu of de worteloppervlakte van deze tomaten min of meer overeenkomt met de gestelde 2.5 m², of dat zij in het algemeen groter is. Enerzijds heeft de plant in kasgrond door het grote bewortelbare volume alle ruimte om een groot wortelsysteem te vormen. Maar anderzijds worden kastomaten ruim van water en voedingsstoffen voorzien en is hierdoor op grond van de theorie over het functioneel evenwicht tussen wortel- en scheutgroei (Brouwer, 1983; Lambers, 1983; de Willigen en van Noordwijk, 1987) de vorming van zo'n groot wortelsysteem niet te verwachten. Gezien de onzekerheid over het antwoord op genoemde vraag is niet getracht op de oppervlakte van 2.5 m² een correctie aan te brengen voor incompleet wortel-grondcontact (Kooistra et al., 1992; van Noordwijk et al., 1993). Wanneer de effectieve worteloppervlakte in werkelijkheid kleiner of groter zou zijn dan 2.5 m², dan zouden de absolute waarden van de gevonden $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^nF_r$ - quotiënten respectievelijk te hoog en te laag zijn.

Situatie A heeft ten opzichte van situatie C het voordeel van een veel geringere uitspoeling van stikstof. Bij een ongestoorde wateropname in het geval van Opn_H bedroeg die uitspoeling over de maand juni respectievelijk 49 en 287 kg ha⁻¹ (bij een wateropname van 650 mm per jaar komt dit neer op respectievelijk 312 en 1828 kg ha⁻¹ j⁻¹). Gezien het geringe verschil tussen genoemde situaties voor wat betreft het percentage van de absolute waarden van de $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^nF_r$ - quotiënten die lager waren dan 1.00, rijst dan ook de vraag, of in situatie A het gewas van voldoende stikstof wordt voorzien. Proeven met tomaten op substraat, waarbij

bij een vrij snel recirculerende voedingsoplossing het effect van lage nitraatconcentraties werd nagegaan (Nukaya et al., 1991; Voogt, 1992), wijzen erop dat dat waarschijnlijk zo is. Ter verkrijging van een voldoende hoog elektrisch geleidingsvermogen in de bodemoplossing zal bij een nitraattoediening van 10 mol per m³ water zo nodig wel extra sulfaat of chloride moeten worden toegediend.

Het is niet waarschijnlijk dat bij nitraatconcentraties in de bodemoplossing als bij situatie B goede tomatenopbrengsten kunnen worden verkregen. Het ziet er overigens niet naar uit dat die situatie, precies zoveel nitraat geven dat er net geen nitraat uitspoelt, in werkelijkheid is te realiseren. Volgens de Willigen en van Noordwijk (1987) is in een vochtige grond weliswaar een geringe bewortelingsdichtheid voldoende voor een nagenoeg complete depletie van nitraat, maar in hun model was geen neerwaartse waterstroming opgenomen. Bij situatie B, met een doorspoelfractie van 0.25, is in werkelijkheid in de ondergrond geen complete depletie te verwachten, maar zal in afwijking van de desbetreffende aanname een zekere hoeveelheid nitraat uitspoelen.

Ook met betrekking tot andere aannames kunnen zich in werkelijkheid afwijkingen voordoen. Een potentieel belangrijke afwijking is de beïnvloeding van de nitraatconcentratie van de bodemoplossing door denitrificatie.

Het feit dat in kasgronden het nitraatgehalte, de vochtigheid en de temperatuur in het algemeen hoog zijn, is bevordelijk voor het denitrificatieproces. Voor wat de bouwvoor betreft staat daar echter tegenover dat de dichtheid hierin in het algemeen laag is en dientengevolge de doorluchting goed, wat het proces belemmert. Bij recente metingen heeft Postma (1996) in de laag van 0-40 cm van kasgronden inderdaad maar een geringe denitrificatie gevonden. In de ondergrond zijn zulke metingen nog niet verricht. Bij gronden met een grondwaterstand op 80 cm diepte, zoals bij de hier besproken gronden, neemt echter in het algemeen de doorluchting met de diepte af en is dieper een flinke denitrificatie te verwachten.

Bij onderzoeken naar de stikstofbalans van grondteelten in kassen (Hamaker en van der Burg, 1979; Korsten, 1996), waarbij stikstofafvoeren via de drains van 500-1300 kg ha⁻¹j⁻¹ voorkwamen, zijn onverklaarde stikstoftekorten van 200-500 kg ha⁻¹j⁻¹ gevonden. Het ziet ernaar uit dat deze tekorten grotendeels zijn veroorzaakt door denitrificatie. Wanneer dit inderdaad zo is, rijst de vraag of zulke denitrificatieverliezen in hoofdzaak onderin de wortelzone optreden (hier waarschijnlijk meer gemakkelijk oxydeerbare organische stof aanwezig dan dieper in de grond) of daaronder in het water dat op weg is naar de drains (hier minder tot geen doorluchting en mogelijkheid van aanwezigheid van gemakkelijk oxydeerbare anorganische ver-

bindingen). Om die vraag te kunnen beantwoorden zal nader onderzoek moeten worden verricht.

Bij een poging situatie C in de praktijk te realiseren zal bij denitrificatieverliezen zoals genoemd de stikstofafvoer via de drains zo'n 10 à 25% lager zijn dan voor situatie C (Opn_H) is berekend. In afhankelijkheid van de plaats waar die verliezen zich in hoofdzaak voordoen, kunnen daarbij de absolute waarden van de $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^hF_r$ - quotiënten onderin de wortelzone afnemen, maar waarschijnlijk niet zodanig dat de percentages van deze quotiënten die lager zijn dan 1.00, zullen toenemen.

Genoemd traject van denitrificatieverliezen (200-500 kg stikstof per ha per jaar) overschrijdt de voor situatie A (Opn_H) berekende stikstofuitspoeling ($312 \text{ kg ha}^{-1}\text{ j}^{-1}$). Het lijkt er dus op dat denitrificatie de plant een tekort aan nitraat kan bezorgen. Wanneer de denitrificatie in hoofdzaak onder de wortelzone optreedt en de grootte ervan lager is dan $300 \text{ kg ha}^{-1}\text{ j}^{-1}$, dan zullen echter bij een poging situatie A in de praktijk te realiseren de absolute waarden van de $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^hF_r$ - quotiënten onderin de wortelzone maar betrekkelijk weinig lager zijn dan die die voor de situatie A zijn berekend en de percentages van genoemde quotiënten die lager zijn dan 1.00 maar betrekkelijk weinig hoger.

SWACROP is een één-dimensionaal model. Dit houdt in dat ruimtelijke aspecten van de waterstroming er niet in kunnen worden betrokken. Zulke aspecten mogen voor toepassing van het model dus geen of slechts een geringe rol spelen. Dit geldt onder andere voor preferente stroming (Bouma, 1991; Selker, 1996).

Wanneer deze stroming optreedt, kan de werkelijke neerwaartse stroming sterk afwijken van de door het model berekende stroming. Ook de op basis van de model-uitkomsten berekende nitraatconcentraties van de bodemoplossing wijken dan in het algemeen af van de werkelijkheid. Bij de omstandigheden van de tomatenteelt in kassen, zoals in dit rapport beschreven, zal er echter nagenoeg geen preferente stroming optreden, noch via doorgaande macroporiën (Bouma, 1991) noch via vingervormige vochtbanen (Selker, 1996). De eerstgenoemde vorm van preferente stroming wordt voorkomen doordat als gevolg van de intensieve grondbewerking er, althans in de bovengrond, praktisch geen doorgaande macroporiën zijn en de laatstgenoemde vorm wordt voorkomen doordat de grond steeds vochtig wordt gehouden.

Ook door een niet-regelmatige verdeling van de wortels over de per plant beschikbare grond kunnen de werkelijke neerwaartse waterstroming en nitraatconcentraties sterk afwijken van die die op basis van het SWACROP- model worden berekend. Eerder zagen wij al dat bij de door ons beschreven tomatenteelt de dichtheid van beworteling met toenemende diepte in het profiel geleidelijk afneemt en dat deze afname in het model kan worden betrokken. Voor eventuele variatie van de bewor-

telingsdichtheid in horizontale richting bestaat deze mogelijkheid niet. Voor toepassing van het model dient de verdeling van de wortels in deze richting dus vrij gelijkmatig te zijn. Dankzij de intensieve grondbewerking is dit bij genoemde tomatenteelt, met name voor de fijne wortels, inderdaad het geval (van der Post en van der Meijs, 1964).

In het voorgaande zijn de looppaden buiten beschouwing gelaten. Als gevolg van het lopen krijgt de bovenlaag van de grond in die paden een hogere dichtheid, waardoor de bewortelingsdichtheid erin en de waterdoorlatendheid ervan geringer worden dan elders in de bovenlaag. De neerwaartse waterstroming en de nitraatconcentraties zullen door het een en ander worden beïnvloed. Het looppadeffect wordt echter beperkt geacht. De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat voor ons doel met behulp van het SWACROP-model een redelijk beeld wordt verkregen van de werkelijke neerwaartse waterstroming en nitraatconcentraties.

Wanneer water en nitraat door de wortels uiterst dispersief zouden worden opgenomen, dan zouden de absolute waarden van de $F' \sqrt{m} F_r$ - en $F' \sqrt{h} F_r$ - quotiënten het aantal malen aangeven dat de neerwaartse waterstroming in het vereiste nitraattransport naar de wortels kan voorzien. De neerwaartse waterstroming en de nitraatconcentraties zouden dan op gelijke diepten in het profiel overal gelijk zijn. In werkelijkheid zal de opname minder dispersief zijn en zullen de neerwaartse waterstroming en de nitraatconcentraties op gelijke diepten enigszins uiteenlopen. Bij een gelijkmatige verdeling van de wortels, zoals bovengenoemd, zal dat uiteenlopen echter niet sterk zijn en zullen de absolute waarden van de $F' \sqrt{m} F_r$ - en $F' \sqrt{h} F_r$ - quotiënten toch ten naaste bij het aantal malen van het genoemde vereiste nitraattransport aangeven. De voor deze quotiënten gevonden waarden maken het dan ook aannemelijk dat bij de beschreven teeltomstandigheden en bij een toediening van nitraat aan het fertigatiewater die voldoende is voor de stikstofvoeding van het gewas, de neerwaartse waterstroming grotendeels in het vereiste nitraattransport naar de wortels kan voorzien. Wel dient ten aanzien van de aangehouden doorspoelfractie van 0.25 een aantekening te worden gemaakt, namelijk dat niet kan worden uitgesloten dat die doorspoelfractie bij bepaalde kleigronden te hoog is en een onvoldoende doorluchting van de grond tot gevolg zal hebben.

6. LITERATUUR

- Adams, P., and D.M. Massey, 1984. Nutrient uptake by tomatoes from recirculating solutions. *ISOSC Proceedings 1984*: 70-79.
- Bakker, J.W., F.R. Boone en P. Boekel, 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstof-diffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden. Rapport 20, ICW, Wageningen.
- Bouma, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy* 46: 1-37.
- Brouwer, R., 1983. Functional equilibrium: sense or nonsense? *Netherlands Journal of Agricultural Science* 31: 335-348.
- Brouwer, R., en P.J.C. Kuiper, 1972. *Leerboek der Plantenfysiologie: 3. Oecofysiologische relaties*. Oosthoek Uitgeversmaatschappij, Utrecht.
- Ende, J. van den, 1988. Water contents of glasshouse soils at field capacity and at saturation: 1. Relationships between water contents. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36: 265-274.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Gardner, W.R., 1991. Modeling water uptake by roots. *Irrigation Science* 12: 109-114.
- Genuchten, M.T. van, and D.R. Nielsen, 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae* 3: 615-628.
- Graaf, R. de, 1988. Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculating the transpiration and measuring the amount of drainage water. *Acta Horticulturae* 229: 219-231.
- Greenwood, D.J., 1970. Soil aeration and plant growth. *Reports on Progress in Applied Chemistry* 58: 423-431.
- Hamaker, Ph., en A.M.M. van der Burg, 1979. De water- en mineralenhuishouding van een glastuinbouwbedrijf op een zandgrond in het Westland in de periode 1977/1978. Nota 1129, ICW, Wageningen.
- Hoogland, J.C., R.A. Feddes and C. Belmans, 1981. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. *Acta Horticulturae* 119:123-136.
- Jury, W.A., and D.R. Nielsen, 1990. Nitrate transport and leaching mechanisms. In: *Nitrogen management and ground water protection*. Ed. R.F. Follett. pp 139-157. Elsevier, Amsterdam.
- Kabat, P., B.J. van den Broek and R.A.Feddes, 1992. SWACROP: A water management and crop production simulation model. *ICID Bulletin* 41, no. 2: 61-84.
- Klepper, B., 1987. Origin, branching and distribution of root systems. In: *Root development and function*. Eds. P.J. Gregory, J.V Lake and D.A. Rose. pp 103-124, Cambridge University Press.
- Kooistra, M.J., D. Schoonderbeek, F.R. Boone, B.W. Veen and M. van Noordwijk, 1992. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique: 2. Effects of soil compaction. *Plant and Soil* 139: 119-129.

2. Effects of soil compaction. *Plant and Soil* 139: 119-129.
- Korsten, P.H.J., 1996. Mineralenbalans grondteelten. Verslag van vijf chrysantenbedrijven. Rapport 59, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk.
- Lambers, H., 1983. The functional equilibrium: nibbling on the edges of a paradigm. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 31: 305-311.
- Noordwijk, M. van, and G. Brouwer, 1993. Gas-filled root porosity in response to temporary low oxygen supply in different growth stages. *Plant and Soil* 152: 187-199.
- Noordwijk, M. van, D. Schoonderbeek and M.J. Kooistra, 1993. Root-soil contact of field-grown winter wheat. *Geoderma* 56: 277-286.
- Nukaya, A., W. Voogt and C. Sonneveld, 1991. Effects of NO_3 , SO_4 and Cl ratios on tomatoes grown in recirculating system. *Acta Horticulturae* 294: 297-304.
- Post, C.J. van der, en M.Q. van der Meys, 1964. Wortelontwikkeling van tomaat. Jaarverslag 1963, pp 93-97, Proefstation voor de Groente- en Fruitteelt onder Glas, Naaldwijk.
- Postma, R., 1996. Stikstofverliezen door denitrificatie op praktijkbedrijven met jaar-rondchrysant. Verslag 96.11, Nutriënten Management Instituut, Wageningen.
- Raats, P.A.C., 1974. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots. *Soil Science Society of America Journal* 38: 717-722.
- Saglio, P.H., M. Rancillac, F. Bruzan and A. Pradet, 1984. Critical oxygen pressure for growth and respiration of excised and intact roots. *Plant Physiology* 76: 151-154.
- Selker, J.S., 1996. Applying preferential flow concepts to horticultural water management. *HortTechnology* 6: 107-110.
- Sonneveld, C. 1990. Estimating quantities of water-soluble nutrients in soils using a specific 1:2 by volume extract. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21: 1257-1265.
- Sonneveld, C., J. van den Ende and S.S. de Bes, 1990. Estimating the chemical compositions of soil solutions by obtaining saturation extracts or specific 1:2 by volume extracts. *Plant and Soil* 122: 169-175.
- Sonneveld, C., A.L. van den Bos, A.M.M. van der Burg and W. Voogt, 1991. Fertigation in the greenhouse industry in The Netherlands. Proceedings of the Expert Consultation on Fertigation/Chemigation, Cairo, pp 186-193. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Voogt, W., 1992. Plant is niet vies van chloride. *Groenten + Fruit/Glasgroenten* no. 48 (27 november): 32-33.
- Voogt, W., 1993. Nutrient uptake of year round tomato crops. *Acta Horticulturae* 339: 99-112.
- Wesseling, J.G., P. Kabat, B.J. van den Broek and R.A. Feddes, 1989. Instructions for input SWACROP, simulation model of the water balance of a cropped soil with different types of boundary conditions including the possibility of drainage and irrigation and the calculation of crop yields. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen.

- Willigen, P. de, and M. van Noordwijk, 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency, Thesis, Wageningen.
- Willigen, P. de, and M. van Noordwijk, 1994. Mass flow and diffusion of nutrients to a root system with constant or zero-sink uptake: 1.Constant uptake. Soil Science 157: 162-170.
- Woolley, J.T., 1966. Drainage requirements of plants. Proceedings Conference on Drainage for Efficient Crop Production, 1965, Chicago, Illinois, pp 2-5. American Society Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan.
- Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving, 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks. ICW-rapport 18, STIBOKA-rapport 1932, Wageningen.

Tabel 1. Kenmerken van de vijf bodemprofielen.

Kenmerk	Bodemprofiel				
	1	2	3	4	5
Organische stof ¹	4.8	3.8	6.5	14.8	26.5
Lutum ¹	2.9	8.7	21.4	25.1	24.3
Silt ¹	3.0	13.7	32.7	26.2	20.8
Dichtheid ²	1.03	1.24	1.10	0.82	0.60
Poriënfractie (ϕ_p)	0.56	0.48	0.53	0.61	0.69
Volumefractie water bij $h = -63$ cm ($\theta_{.63}$)	0.28	0.29	0.40	0.46	0.48

¹ Massafractie van stoofdroge grond x 100

² Gram stoofdroge grond per cm³ ongestoorde grond

Tabel 2A. Waarden van de verticale waterflux verkregen via vier simulatiewijzen.

profiel ¹	dag ²	SW ¹ 1: $Opn_H; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.05$				SW 2: $Opn_H; f_{ter} = (2d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.05$			
		diepte ³ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		$v_v^{1,4}$				v_v			
1(B ₁)	1	-0.8268	-0.1449	-0.0169	-0.0030	-0.5677	-0.1882	-0.1003	-0.0886
	2	-0.2863	-0.3829	-0.2455	-0.2271	-0.2013	-0.2495	-0.1588	-0.1451
	3	-0.0404	-0.1287	-0.1264	-0.1205				
	totaal	-1.1535	-0.6565	-0.3888	-0.3506	-0.7690	-0.4377	-0.2591	-0.2337
1(B ₂)	1	-0.7939	-0.1518	-0.0789	-0.0706				
	2	-0.3097	-0.3201	-0.1464	-0.1254				
	3	-0.0497	-0.1842	-0.1630	-0.1541				
	totaal	-1.1533	-0.6561	-0.3883	-0.3501				
2(B ₃)	1	-0.8131	-0.1466	-0.0776	-0.0697				
	2	-0.2976	-0.3284	-0.1449	-0.1234				
	3	-0.0425	-0.1810	-0.1658	-0.1569				
	totaal	-1.1532	-0.6560	-0.3883	-0.3500				
	1								
	2								
	3								
	totaal								
2(B ₇)	1	-0.8854	-0.1604	-0.0203	-0.0068	-0.6010	-0.1908	-0.1026	-0.0913
	2	-0.2490	-0.3782	-0.2339	-0.2141	-0.1679	-0.2466	-0.1563	-0.1421
	3	-0.0191	-0.1177	-0.1343	-0.1293				
	totaal	-1.1535	-0.6563	-0.3885	-0.3502	-0.7689	-0.4374	-0.2589	-0.2334

¹ zie tekst² dagen van irrigatietijdvak³ cm⁴ cm d⁻¹ dan wel cm (3d)⁻¹ c.q. cm(2d)⁻¹

Tabel 2B. Waarden van de verticale waterflux verkregen via vier simulatiewijzen

profiel ¹	dag ²	SW ¹ 1: Opn _H ; f _{ter} = (3d) ⁻¹ ; $\phi_s(\text{lim}) = 0.05$				SW 2: Opn _H ; f _{ter} = (2d) ⁻¹ ; $\phi_s(\text{lim}) = 0.05$			
		diepte ³ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		v _v ^{1,4}				v _v			
3	1	-0.8384	-0.1263	-0.0959	-0.0879				
	2	-0.2773	-0.3341	-0.1192	-0.1011				
	3	-0.0376	-0.1955	-0.1731	-0.1624				
totaal		-1.1533	-0.6559	-0.3882	-0.3514				
4	1	-0.8190	-0.1271	-0.1220	-0.1123				
	2	-0.2906	-0.3072	-0.1023	-0.0876				
	3	-0.0436	-0.2217	-0.1640	-0.1502				
totaal		-1.1532	-0.6560	-0.3883	-0.3501				
5	1	-0.7003	-0.1740	-0.1371	-0.1252				
	2	-0.3743	-0.2365	-0.1172	-0.1052				
	3	-0.0786	-0.2455	-0.1340	-0.1196				
totaal		-1.1532	-0.6560	-0.3883	-0.3500				

¹ zie tekst

² dagen van irrigatietijdvak

³ cm

⁴ cm d⁻¹ dan wel cm (3d)⁻¹

Tabel 2C. Waarden van de verticale waterflux verkregen via vier simulatiewijzen

pro- fiel ¹	dag ²	SW ³ 3: $Opn_H; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.10$				SW 4: $Opn_F; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.05$			
		diepte ³ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		$v_v^{1,4}$				v_v			
2 (B ₃)						bewortelingsdiepte 80 cm			
	1					-0.8593	-0.2106	-0.0984	-0.0610
	2					-0.3176	-0.4092	-0.1814	-0.1289
	3					-0.0656	-0.2402	-0.1977	-0.1601
totaal						-1.2425	-0.8600	-0.4775	-0.3500
						bewortelingsdiepte 40 cm			
	1					-0.7875	-0.0497	-0.0741	-0.0785
	2					-0.2903	-0.2151	-0.1263	-0.1188
	3					-0.0373	-0.0854	-0.1498	-0.1528
totaal						-1.1151	-0.3502	-0.3502	-0.3501
2 (B ₇)	1	-0.8854	-0.1604	-0.0202	-0.0157				
	2	-0.2490	-0.3782	-0.2340	-0.2233				
	3	-0.0191	-0.1177	-0.1343	-0.1383				
totaal		-1.1535	-0.6563	-0.3885	-0.3773				
3	1	-0.8599	-0.1354	-0.1175	-0.1205				
	2	-0.2840	-0.3688	-0.1477	-0.1390				
	3	-0.0391	-0.2078	-0.2094	-0.2096				
totaal		-1.1830	-0.7120	-0.4746	-0.4691				

¹ zie tekst² dagen van irrigatietijdvak³ cm⁴ cm d⁻¹ dan wel cm (3d)⁻¹

Tabel 3A. Gemiddelde snelheden van de verticale waterstroming verkregen via vier simulatiewijzen.

pro- fiel ¹	dag ¹	SW'1: $Opn_H; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.05$				SW 2: $Opn_H; f_{ter} = (2d)^{-1}; \theta_s(lim) = 0.05$			
		diepte ¹ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		v'_v				v'_v			
1(B ₁)	1	-2.9267	-0.4542	-0.0396	-0.0054	-2.0910	-0.5918	-0.2352	-0.1582
	2	-1.1250	-1.1947	-0.5749	-0.4055	-0.8036	-0.7871	-0.3719	-0.2591
	3	-0.1659	-0.4105	-0.2967	-0.2152				
1(B ₂)	1	-2.2846	-0.4465	-0.1848	-0.1261				
	2	-0.9693	-0.9305	-0.3425	-0.2239				
	3	-0.1624	-0.5450	-0.3813	-0.2752				
2(B ₃)	1	-2.3298	-0.4416	-0.1995	-0.1452				
	2	-0.9285	-0.9774	-0.3715	-0.2571				
	3	-0.1378	-0.5477	-0.4257	-0.3269				
	1								
	2								
	3								
2(B ₇)	1	-2.5516	-0.4732	-0.0517	-0.0142	-1.7834	-0.5645	-0.2611	-0.1902
	2	-0.7757	-1.1140	-0.5937	-0.4460	-0.5297	-0.7339	-0.3972	-0.2960
	3	-0.0614	-0.3535	-0.3417	-0.2694				
3	1	-1.8631	-0.2986	-0.2078	-0.1658				
	2	-0.6595	-0.7779	-0.2580	-0.1908				
	3	-0.0922	-0.4622	-0.3747	-0.3064				

¹ zie noten bij Tabel 2

Tabel 3B. Gemiddelde snelheden van de verticale waterstroming verkregen via vier simulatiewijzen

profiel ¹	dag ¹	SW 1: $\text{Opn}_H; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(\text{lim}) = 0.05$				SW 2: $\text{Opn}_H; f_{ter} = (2d)^{-1}; \phi_s(\text{lim}) = 0.05$			
		diepte ¹ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		v'_v ¹				v'_v			
4	1	-1.5750	-0.2607	-0.2304	-0.1841				
	2	-0.5949	-0.6187	-0.1930	-0.1436				
	3	-0.0917	-0.4520	-0.3094	-0.2462				
5	1	-1.2641	-0.3369	-0.2384	-0.1814				
	2	-0.7170	-0.4526	-0.2040	-0.1525				
	3	-0.1555	-0.4717	-0.2330	-0.1733				

¹ zie noten bij Tabel 2.

Tabel 3C. Gemiddelde snelheden van de verticale waterstroming verkregen via vier simulatiewijzen.

profiel ¹	dag ¹	SW ¹ 3: $Opn_H; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.10$				SW 4: $Opn_F; f_{ter} = (3d)^{-1}; \phi_s(lim) = 0.05$			
		diepte ¹ in de grond				diepte in de grond			
		10	40	70	80	10	40	70	80
		v'_v ¹				v'_v			
						bewortelingsdiepte 80 cm			
2(B ₃)	1					-2.4377	-0.6277	-0.2530	-0.1271
	2					-0.9787	-1.2053	-0.4645	-0.2685
	3					-0.2099	-0.7213	-0.5069	-0.3335
						bewortelingsdiepte 40 cm			
	1					-2.2826	-0.1513	-0.1905	-0.1635
	2					-0.9158	-0.6459	-0.3238	-0.2475
	3					-0.1227	-0.2608	-0.3846	-0.3183
2(B ₇)	1	-2.5516	-0.4732	-0.0514	-0.0327				
	2	-0.7757	-1.1140	-0.5939	-0.4652				
	3	-0.0614	-0.3535	-0.3417	-0.2881				
3	1	-1.9067	-0.3197	-0.2546	-0.2274				
	2	-0.6746	-0.8567	-0.3190	-0.2623				
	3	-0.0956	-0.4907	-0.4532	-0.3955				

¹ zie noten bij Tabel 2

Tabel 4. De bij vier simulatiewijzen gevonden percentages van de absolute v'_v -waarden die lager waren dan de ${}^m v_r$ -waarde en de percentages die lager waren dan de ${}^h v_r$ -waarde

profiel ¹	$ v'_v < {}^m v_r$				$ v'_v < {}^h v_r$			
	SW ¹ 1	SW 2	SW 3	SW 4	SW 1	SW 2	SW 3	SW 4
	percent ²				percent			
1(B ₁)	9.5	5.5			12.0	5.5		
1(B ₂)	7.3				7.8			
2(B ₃)	7.3			4.2 ³	7.3		—	6.2 ³
				8.3 ⁴				16.7 ⁴
2(B ₇)	9.5	5.5	9.5		18.6	5.5	18.6	
3	7.3		7.3		14.0		14.0	
4	7.3				14.0			
5	7.3				7.3			

¹) zie tekst

²) percentageberekening met toekenning van gewichten (zie tekst)

³) diepte van beworteling 80 cm

⁴) diepte van beworteling 40 cm

Tabel 5. De absolute waarden van $F'_v / {}^mF_r$ - en $F'_v / {}^hF_r$ -quotiënten, voor zover zij lager waren dan 1.00, verkregen bij nitraatconcentraties in de bodemoplossing die geënt waren op de bemestingsadviesbasis.

Profiel ¹	SW ¹	diepte ² en dag ³	$\frac{ F'_v }{^mF_r}$ ¹	$\frac{ F'_v }{^hF_r}$ ¹		Profiel	SW	diepte en dag	$\frac{ F'_v }{^mF_r}$	$\frac{ F'_v }{^hF_r}$
1(B ₁)	2	0-2		0.68		4	1	0-2	0.85	0.34
1(B ₂)	1	0-2		0.52				0-3	0.87	0.35
		0-3		0.55		5	1	0-2	0.79	0.32
2(B ₃)	1	0-2		0.52				0-3	0.82	0.33
		0-3		0.54		2(B ₃)(80 ⁴)	4	0-2		0.54
2(B ₇)	2	0-2		0.52				0-3		0.56
3	1	0-2	0.99	0.40		2(B ₃)(40 ⁴)	4	0-2		0.51
		0-3		0.41				0-3		0.53

¹) zie tekst

²) cm

³) dagen van fertigatietijdvak

⁴) bewortelingsdiepte in cm

Tabel 6. De absolute waarden van $F'_v / {}^mF_r$ en $F'_v / {}^hF_r$ -quotiënten, voor zover zij lager waren dan 1.00, verkregen bij een nitraatconcentratie in de bodemoplossing die gelijk was aan de opnameconcentratie van nitraat.

profiel ¹	SW ¹	diepte ¹ en dag ¹	$\frac{ F'_v }{^mF_r}$	$\frac{ F'_v }{^hF_r}$		profiel	SW	diepte en dag	$\frac{ F'_v }{^mF_r}$	$\frac{ F'_v }{^hF_r}$
1(B ₁)	2	0-2	0.76	0.30		4	1	0-2	0.38	0.15
1(B ₂)	1	0-2	0.58	0.23				0-3	0.39	0.16
		0-3	0.61	0.24				10-3		0.67
		80-1		0.93		5	1	0-2	0.35	0.14
2(B ₃)	1	0-2	0.58	0.23				0-3	0.37	0.15
		0-3	0.60	0.24		2(B ₃)(80 ¹)	4	0-2	0.57	0.23
2(B ₇)	2	0-2	0.58	0.23				0-3	0.60	0.24
3	1	0-2	0.44	0.18				80-1		0.93
		0-3	0.45	0.18		2(B ₃)(40 ¹)	4	0-2	0.58	0.23
		10-3		0.68				0-3	0.61	0.24
								10-3		0.90

¹) zie noten bij Tabel 5.

Tabel 7A. De absolute waarden van F'_v/mF_r - en F'_v/hF_r -quotiënten, voor zover zij lager waren dan 1.00, verkregen bij de situatie waarin de hoeveelheid nitraat in het fertigatiewater gelijk was aan de door de plant benodigde hoeveelheid nitraat.

Profiel ¹	SW ¹	diepte ¹ en dag ¹	$\frac{ F'_v ^{1,2}}{mF_r}$	$\frac{ F'_v ^{1,2}}{hF_r}$		profiel	SW	diepte en dag	$\frac{ F'_v }{mF_r}$	$\frac{ F'_v }{hF_r}$
1(B ₁)	2	0-2	0.56	0.23		3	1	70-1	0.38	0.15
		60-1		0.53				70-2	0.47	0.19
		60-2		0.80				70-3	0.68	0.27
		70-1	0.43	0.17		4	1	0-2	0.28	0.11
		70-2	0.67	0.27				0-3	0.29	0.12
1(B ₂)	1	0-2	0.43	0.17				10-3		0.47
		0-3	0.45	0.18				40-1		0.89
		10-3		0.83				50-1		0.71
		50-1		0.83				50-2		0.99
		60-1		0.41				60-1		0.45
		60-2		0.80				60-2		0.43
		60-3		0.77				60-3		0.62
		70-1	0.33	0.13				70-1	0.42	0.17
		70-2	0.62	0.25				70-2	0.35	0.14
		70-3	0.69	0.28				70-3	0.56	0.22
2(B ₃)	1	0-2	0.43	0.17		5	1	0-2	0.26	0.11
		0-3	0.45	0.18				0-3	0.27	0.11
		10-3		0.71				10-3		0.80
		50-1		0.84				50-1		0.86
		60-1		0.43				50-2		0.84
		60-2		0.85				60-1		0.48
		60-3		0.83				60-2		0.43
		70-1	0.36	0.14				60-3		0.49
		70-2	0.67	0.27				70-1	0.43	0.17
		70-3	0.77	0.31				70-2	0.37	0.15

1) zie noten bij tabel 5

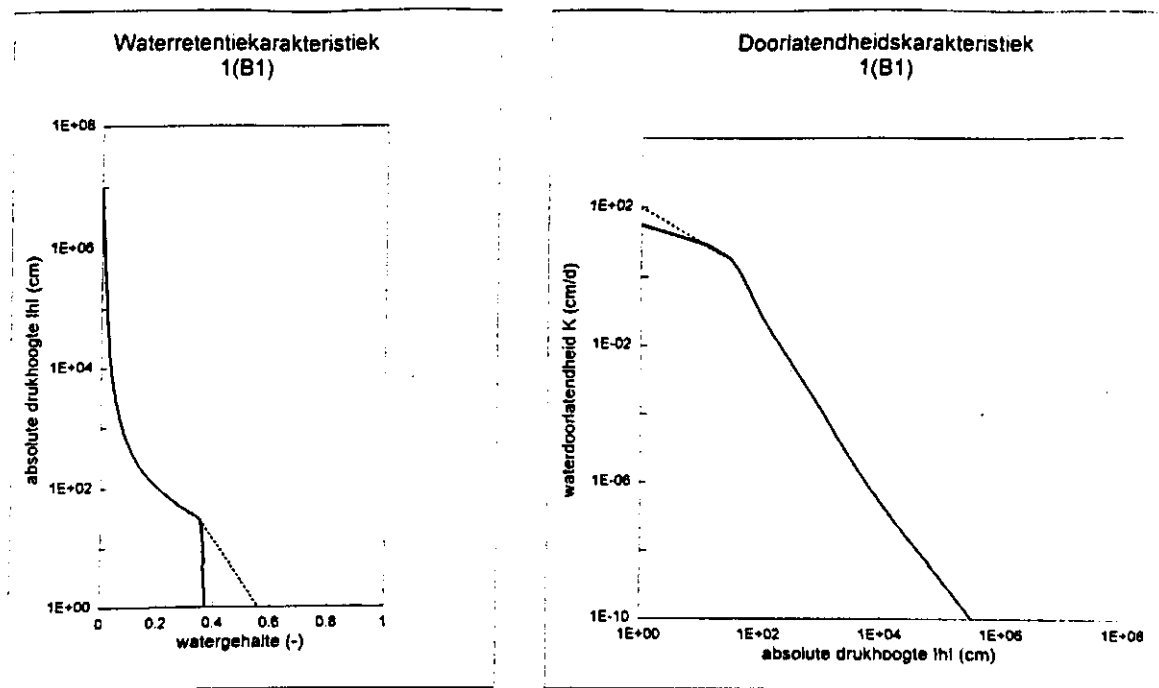
2) De quotiënten op 80 cm diepte zijn niet vermeld. Zij waren alle gelijk aan 0.

Tabel 7B. De absolute waarden van F'_v/mF_r - en F'_v/hF_r -quotiënten, voor zover zij lager waren dan 1.00, verkregen bij de situatie waarin de hoeveelheid nitraat in het fertigatiewater gelijk was aan de door de plant benodigde hoeveelheid nitraat.

Profiel ¹	SW ¹	diepte ¹ en dag ¹	$\frac{ F'_v ^{1,2}}{mF_r}$	$\frac{ F'_v ^{1,2}}{hF_r}$		profiel	SW	diepte en dag	$\frac{ F'_v }{mF_r}$	$\frac{ F'_v }{hF_r}$
2(B ₇)	2	0-2	0.44	0.17		5	1	70-3	0.42	0.17
		60-1		0.56		2(B ₃)(80 ¹)	4	0-2	0.43	0.17
		60-2		0.82				0-3	0.44	0.18
		70-1	0.47	0.19				70-1		0.50
		70-2	0.72	0.29				70-2		0.91
3	1	0-2	0.33	0.13		2(B ₃)(40 ¹)	4	0-2	0.44	0.17
		0-3	0.34	0.14				0-3	0.45	0.18
		10-3		0.47				10-3		0.62
		50-1		0.68				30-3		0.99
		60-1		0.41						
		60-2		0.58						
		60-3		0.72						

¹) zie noten bij tabel 5

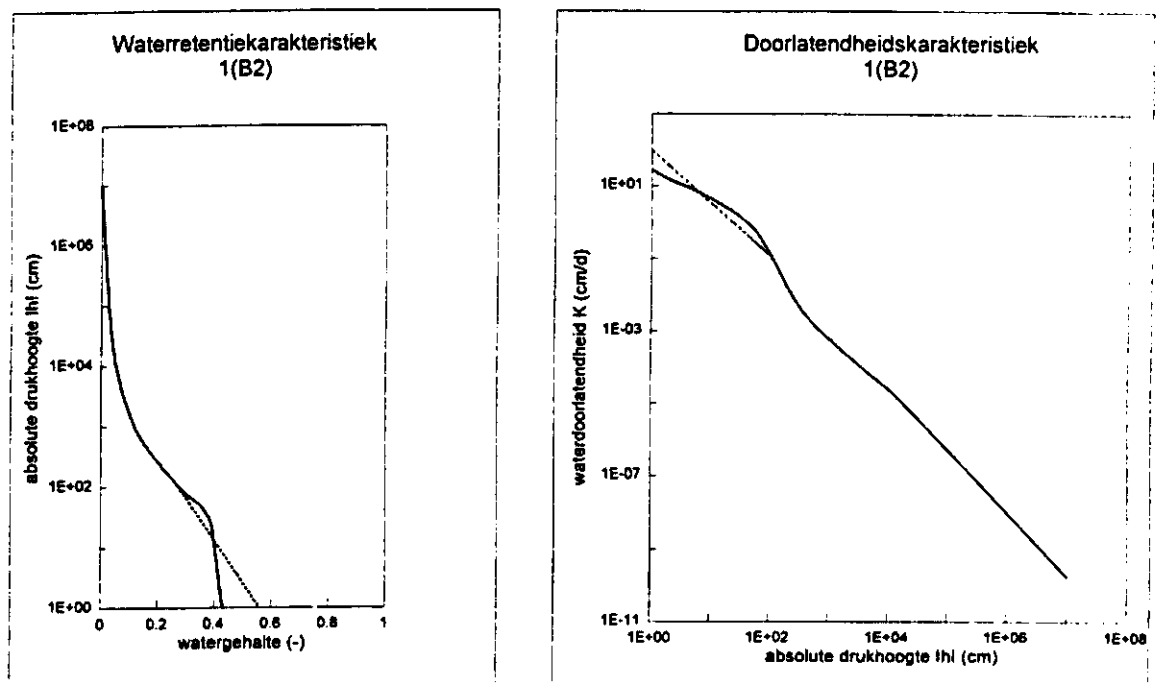
²) De quotiënten op 80 cm diepte zijn niet vermeld, evenals de quotiënten voor 2(B₃)(40) op 40 cm diepte. Zij waren alle gelijk aan 0.



Figuur 1. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 1(B1)

———— : Wösten et al. 1987

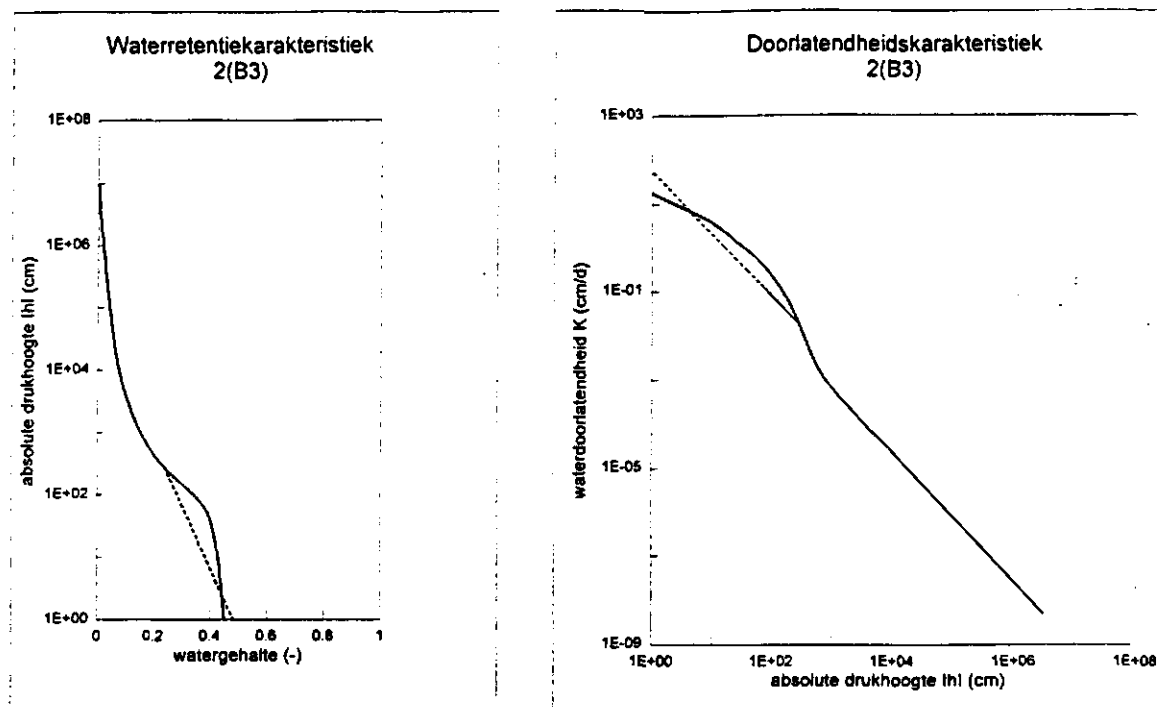
----- : rechtlijnige aanpassing



Figuur 2. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 1(B2)

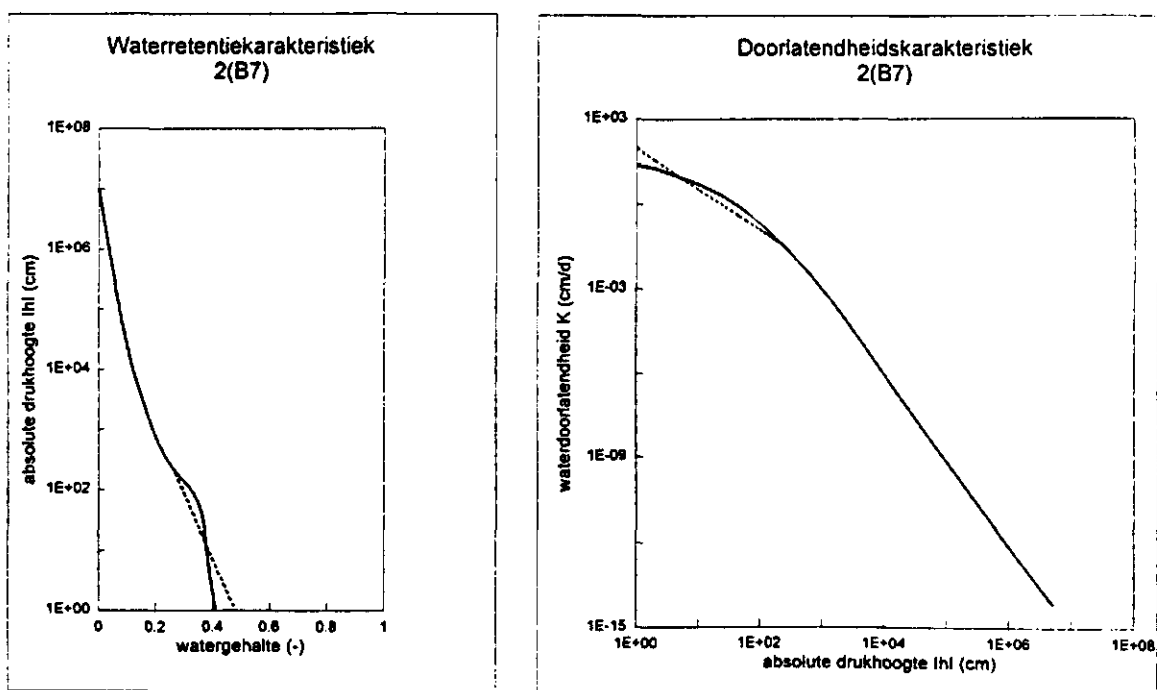
———— : Wösten et al. 1987

----- : rechtlijnige aanpassing



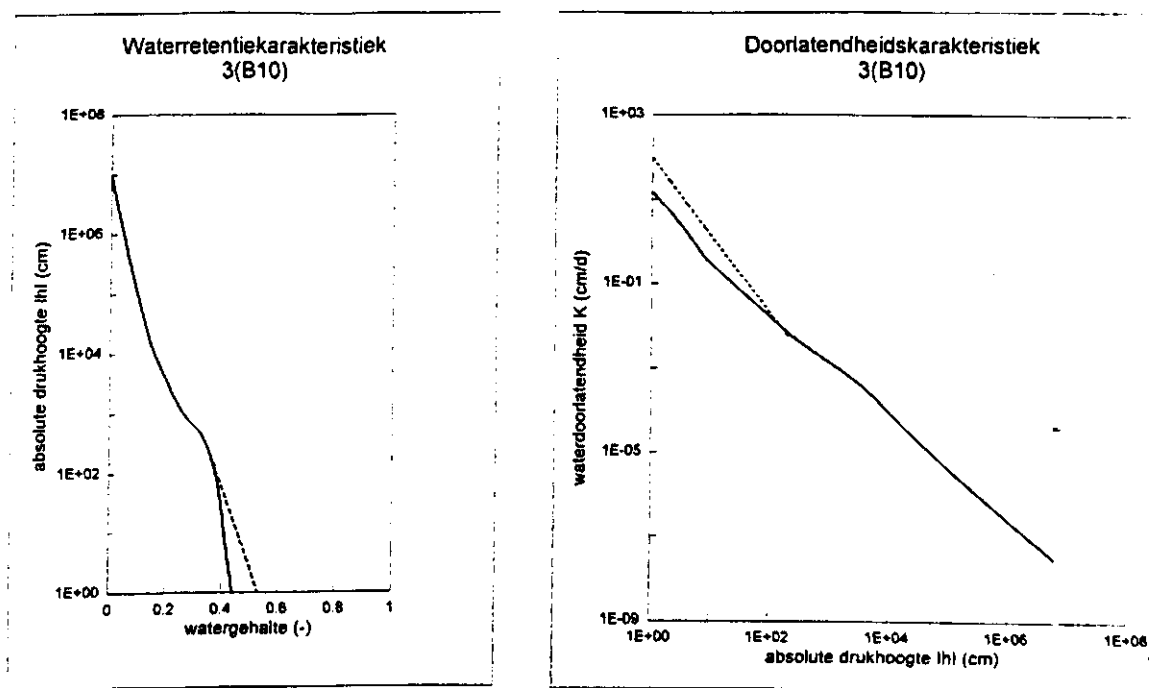
Figuur 3. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 2(B3)

———— : Wösten et al. 1987 - - - - - : rechte lijnige aanpassing



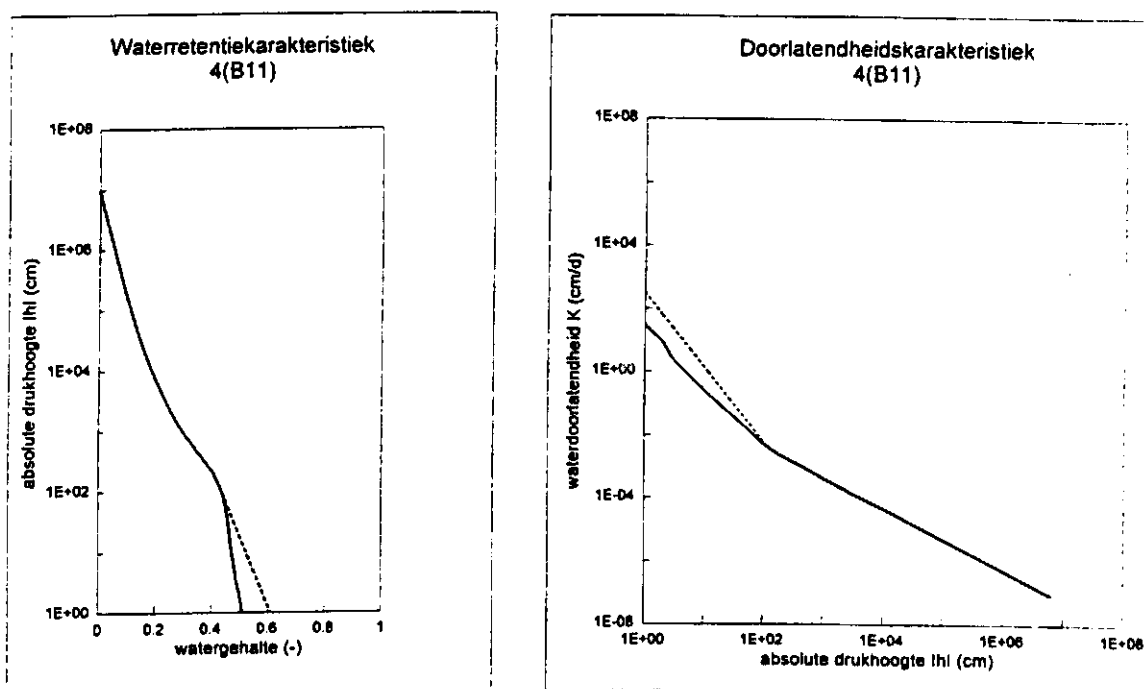
Figuur 4. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 2(B7)

———— : Wösten et al. 1987 - - - - - : rechte lijnige aanpassing



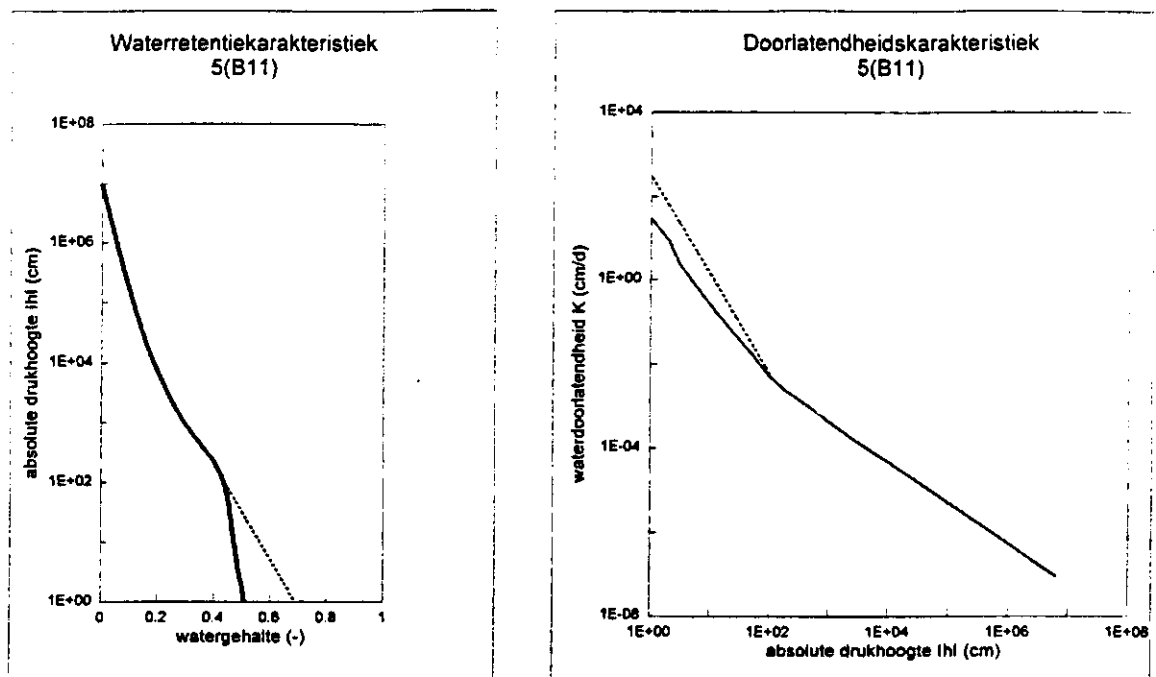
Figuur 5. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 3(B10)

———— : Wösten et al. 1987 - - - - - : rechte lijnige aanpassing



Figuur 6. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 4(B11)

———— : Wösten et al. 1987 - - - - - : rechte lijnige aanpassing



Figuur 7. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bodemtype 5(B11)

----- : Wösten et al. 1987 - - - - - : rechte lijnige aanpassing

LIJST VAN SYMBOLEN

Symbol	Definitie
B_1, B_2 enz.	bovengrondklassen van Wösten et al. (1987)
c_s	nitraatconcentratie van de bodemoplossing
c_u	opnameconcentratie van nitraat
F_r	nitraatopnameflux aan het worteloppervlak
mF_r	gemiddelde waarde van F_r
hF_r	hoge waarde van F_r
F'_v	gemiddelde snelheid van het door de verticale waterstroming teweeggebrachte nitraattransport
f_{fer}	fertigatiefrequentie
h	drukhoogte
${}^h h(lim)$	h -waarde waarboven belemmering van de wateropname optreedt door tekort aan lucht
${}^l h(lim)$	h -waarde waarbeneden belemmering van de wateropname optreedt door tekort aan water
K	doorlatendheid
Opn_H	wateropnamepatroon volgens Hoogland et al. (1981)
Opn_F	wateropnamepatroon volgens Feddes et al. (1978)
SW	simulatiewijze
v_v	verticale waterflux
v'_v	gemiddelde snelheid van de verticale waterstroming ($= v_v/\theta$)
v_r	wateropnameflux aan het worteloppervlak
${}^m v_r$	gemiddelde waarde van v_r
${}^h v_r$	hoge waarde van v_r
θ	volumefractie water
θ_{-1} en θ_{-63}	waarde van θ bij $h =$ resp. -1 en -63 cm
ϕ_a	luchtgehalte als volumefractie
${}^l \phi_a(lim)$	waarde van ϕ_a waarbeneden belemmering van de wateropname optreedt door tekort aan lucht
ϕ_p	porositeit als volumefractie