

Bodemkundige vertaalfuncties bij SC-DLO

State of the art

J.H.M. Wösten

Rapport 563

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1997

REFERAAT

Wösten, J.H.M., 1997 *Bodemkundige vertaalfuncties bij SC-DLO; state of the art*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 563. 48 blz.; 7 fig.; 8 tab.; 44 ref.

Vertaalfuncties vormen een belangrijk hulpmiddel om het aanwezige, brede bestand aan basisgegevens (de horizontale gegevenslaag) te 'vertalen' naar invoergegevens voor modellen (de verticale applicaties). Omdat vertaalfuncties nogal verspreid en gefragmenteerd binnen SC-DLO aanwezig zijn, is een systematisch overzicht gemaakt van alle, binnen het instituut, aanwezige vertaalfuncties. Dit rapport geeft een overzicht van de beschikbare vertaalfuncties. Aan de hand van deze inventarisatie valt na te gaan of er belangrijke vertaalfuncties ontbreken of dat er een keuze moet worden gemaakt indien er meer dan één functie beschikbaar is voor eenzelfde soort vertaling. Tevens wordt ingegaan op de mogelijkheid om de onzekerheid te kwantificeren van de voorspellingen die met vertaalfuncties worden gedaan.

Trefwoorden: bodemchemische karakteristiek, bodemfysische karakteristiek, bodemkundige basisgegevens, continue-vertaalfunctie, klasse-vertaalfunctie, multicollineariteit, regressietechniek.

ISSN 0927-4499

©1997 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Bodemfysische vertaalfuncties	13
2.1 De Staringreeks	13
2.2 Continue-vertaalfuncties voor puntvoorspellingen van de waterretentiekarakteristiek	16
2.3 Continue-vertaalfuncties voor de voorspelling van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek	17
2.4 Neurale netwerken als alternatief voor continue-vertaalfuncties	19
2.5 Verzadigde doorlatendheid van watervoerende sedimenten in de ondergrond	19
2.6 Relaties tussen grondwaterstand en afvoer (Q(h)-relatie)	22
2.7 Krimp-karakteristieken van kleigronden	23
2.8 Klasse-vertaalfunctie voor gasdiffusie	25
2.9 Continue-vertaalfunctie voor gasdiffusie	27
2.10 Dichtheid van de vaste fase van de grond	28
2.11 Dichtheid van de grond	28
2.11.1 Hoekstra en Poelman (1982)	29
2.11.2 Van der Sluijs (1988)	29
2.11.3 Van Wallenburg (1988)	30
2.11.4 Wösten (1997)	30
2.12 Afbraaksnelheid van stabiele humus	31
2.13 Warmtegeleiding van grond	31
3 Chemische vertaalfuncties	33
3.1 Cation Exchange Capacity (CEC)	33
3.2 pH-H ₂ O	33
3.3 Fosfaatbindend vermogen van de grond	34
3.4 Neerslag van fosfaat	34
3.5 Sulfaatbindend vermogen van de grond	35
3.6 Concentraties zware metalen	35
3.7 Concentraties bestrijdingsmiddelen	37
3.8 Pyrietoxidatie-snelheid	38
3.9 Bodemvruchtbaarheid	38
4 Omgaan met vertaalfuncties	39
4.1 Onzekerheid in klasse-vertaalfuncties	39
4.2 Onzekerheid in continue-vertaalfuncties	39
4.3 Uitwisselbaarheid van verklarende variabelen	41
5 Conclusies en aanbevelingen	43
Literatuur	45

Woord vooraf

Dit onderzoek heeft plaatsgevonden in het kader van de DLO-programma's 'Ruimtelijke patronen en variabiliteit van bodem en grondwater (228)' en 'Kennisontwikkeling voor de milieuplanbureau functie (315)'. Het initiatief voor dit onderzoek is uitgegaan van de twee programmaleiders. Het onderzoek bestond uit een inventarisatie van binnen DLO-Staring Centrum beschikbare vertaalfuncties en is uitgevoerd in het voorjaar van 1997. Graag wil ik alle medewerkers en in het bijzonder die van de afdelingen 1, 2, 3 en 4, bedanken voor de onderdelen die zij mij hebben aangeleverd voor dit overzicht.

Samenvatting

Bodemkundige vertaalfuncties zijn in dit onderzoek gedefinieerd als wiskundige formuleringen waarmee bodemkundige basisgegevens zoals textuur, organische-stofgehalte en structuur worden omgezet in vooral bodemfysische en bodemchemische invoergegevens voor simulatiemodellen. Bij SC-DLO zijn verschillende vertaalfuncties ontwikkeld en sommige van deze worden veelvuldig toegepast in de modelstudies die het instituut uitvoert. Deze inventarisatie van beschikbare functies is uitgevoerd omdat het tot op heden ontbrak aan een systematisch overzicht.

De beschikbare bodemkundige vertaalfuncties zijn onderverdeeld in een groep bodemfysische en een groep bodemchemische vertaalfuncties. Binnen de bodemfysische vertaalfuncties wordt de Staringreeks veelvuldig gebruikt om waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken toe te wijzen aan de verschillende textuurklassen. Als verfijning van de Staringreeks zijn continue-vertaalfuncties ontwikkeld waarmee uitgaande van bodemkundige basisgegevens zoals organisch stofgehalte en textuur voorspellingen worden gedaan van modelparameters die de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek beschrijven. Als alternatief voor het gebruik van regressie technieken bij het opstellen van continue-vertaalfuncties wordt ook gebruik gemaakt van de theorie van neurale netwerken. Andere geïnventariseerde bodemfysische vertaalfuncties zijn: verzadigde doorlatendheid van watervoerende sedimenten, grondwaterstand-afvoer-relaties, krimp-karakteristieken, gasdiffusie, dichtheid, afbraaksnelheid van humus en warmtegeleiding. Met name voor de dichtheid van de grond is een groot aantal vertaalfuncties beschikbaar. Keuze van de voor een bepaalde grond meest geschikte vertaalfunctie wordt het best gemaakt aan de hand van bodemkundige verwantschap tussen gronden.

Binnen de bodemchemische vertaalfuncties zijn functies geïnventariseerd die betrekking hebben op: cation exchange capacity, pH-H₂O, fosfaatbindend vermogen, neerslag van fosfaat, sulfaatbindend vermogen, concentraties zware metalen, concentraties bestrijdingsmiddelen, pyrite-oxydatie en bodemvruchtbaarheid. Binnen deze groep worden met name de functies voor concentraties zware metalen en bestrijdingsmiddelen veelvuldig toegepast.

Aan de hand van voorbeelden wordt geïllustreerd hoe met de onzekerheid in vertaalfuncties kan worden omgegaan en hoe deze onzekerheid doorwerkt in de variabiliteit van eindresultaten. Tevens wordt ingegaan op de mogelijke complicaties die optreden indien verklarende variabelen in continue-vertaalfuncties uitwisselbaar zijn. Tenslotte worden conclusies en aanbevelingen geformuleerd m.b.t. de huidige stand van zaken. Op grond hiervan kunnen vervolgacties worden ondernomen.

1 Inleiding

Bodemkundige vertaalfuncties zijn wiskundige formuleringen waarmee bodemkundige basisgegevens zoals textuur, organischestofgehalte en structuur worden omgezet in vooral bodemfysische en bodemchemische invoergegevens voor studies waarin simulatiemodellen worden toegepast (Bouma en Van Lanen, 1987). De functies kunnen de vorm aannemen van een gemiddelde bodemfysische of bodemchemische karakteristiek voor een textuurklasse (klasse-vertaalfunctie). De functie kan ook een regressievergelijking zijn waarmee locatie-specifieke bodemkundige basisgegevens worden vertaald in vooral bodemfysische en bodemchemische karakteristieken (continue-vertaalfunctie). Als alternatief voor regressie kan tenslotte ook gebruik worden gemaakt van de theorie van neurale netwerken om het verband te leggen tussen bodemkundige basisgegevens en bodemfysische en bodemchemische invoergegevens. Bovenstaande omschrijving van vertaalfuncties geeft aan dat in dit overzicht geen aandacht wordt besteed aan verschillende vormen van aggregatie waarmee verschillende, veelal ruimtelijke gegevensbestanden worden gecombineerd tot een nieuw ruimtelijk bestand dat in modelberekeningen wordt gebruikt.

Invoergegevens voor modelstudies kunnen worden verkregen door directe metingen van de gegevens in het laboratorium of in het veld. Het probleem hierbij is echter dat de bepalingstechnieken veelal tijdrovend en duur zijn. Het is daarom aantrekkelijk om uitgaande van een bestand aan directe metingen, relaties af te leiden waarmee de invoergegevens kunnen worden voorspeld. Voor veel toepassingen zijn deze voorspellingen mogelijkwerwijs voldoende nauwkeurig. Dit heeft tot gevolg gehad dat de afgelopen jaren bij SC-DLO verschillende vertaalfuncties zijn ontwikkeld en sommige van deze worden veelvuldig toegepast in de modelstudies die het instituut uitvoert. De functies zijn echter ontwikkeld door verschillende medewerkers binnen het instituut, waardoor ze nogal verspreid en gefragmenteerd aanwezig zijn. Tot op heden ontbreekt daardoor een systematisch overzicht van de beschikbare functies, met het risico dat de functies door verschillende gebruikers opnieuw worden afgeleid.

Een extra stimulans om een systematisch overzicht van vertaalfuncties beschikbaar te krijgen, vormt de tendens binnen het instituut om in horizontale zin, een breed bestand aan basis- en invoergegevens beschikbaar te krijgen, waarop in verticale zin de verschillende applicaties oftewel modelberekeningen worden geënt. Tenslotte worden de uitkomsten van de verschillende modelberekeningen weer in horizontale zin met elkaar verbonden in projecten met een sterk integrerend en overkoepelend karakter. In een dergelijke structuur vormen vertaalfuncties een belangrijke schakel voor de vertaling van basis- naar invoergegevens.

Het projectresultaat is een overzicht van de vertaalfuncties die op dit moment bij SC-DLO beschikbaar zijn. Impliciet wordt hiermee ook duidelijk of en zo ja waar leemtes voorkomen. Het is niet de bedoeling een oordeel te geven over de al dan niet gerechtvaardigde toepassing van de vertaalfuncties. Evenmin ligt de nadruk op de software-omgeving waarin de functie kan worden gebruikt en waardoor het gebruikersgemak voor een belangrijk gedeelte wordt bepaald. Wel wordt ingegaan

op de mogelijkheid om de onzekerheid in de voorspelling met de functie te kwantificeren.

De vertaalfuncties kunnen globaal in twee groepen worden onderverdeeld; bodemfysische en bodemchemische vertaalfuncties. De eerste groep wordt beschreven in hoofdstuk 2 en de tweede in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt aan de hand van een voorbeeld ingegaan op de effecten van onnauwkeurigheid in vertaalfuncties op de variabiliteit in modeluitkomsten en op het verschijnsel van multicollineariteit oftewel uitwisselbaarheid van verklarende variabelen in vertaalfuncties.

Het project maakt de huidige stand van zaken m.b.t. vertaalfuncties bij het SC-DLO duidelijk en toont onze zwakke en sterke punten op dit terrein. Als zodanig wordt de basis gelegd op grond waarvan vervolgacties kunnen worden ondernomen.

2 Bodemfysische vertaalfuncties

2.1 De Staringreeks

Door over een lange reeks van jaren veelvuldig bepalingen uit te voeren, is een bestand opgebouwd bestaande uit 620 gemeten waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Uit dit bestand is de Staringreeks afgeleid waarbij gronden waaraan deze karakteristieken zijn gemeten, allereerst zijn onderverdeeld in bovengronden (A-horizont) en ondergronden (B- en C-horizonten). Vervolgens zijn zowel binnen de boven- als de ondergronden 18 verschillende textuurklassen onderscheiden. Uitgaande van de individuele karakteristieken binnen iedere textuurklasse is voor iedere klasse de geometrisch gemiddelde karakteristiek berekend. Bovendien is de spreiding weergegeven door ook de waarden plus en min 1 standaardafwijking rond het gemiddelde te vermelden.

De gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek per textuurklasse wordt beschreven met de volgende twee vergelijkingen (Van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^l)^{1-1/n}}$$

$$K(h) = K_s \frac{((1 + |\alpha h|^l)^{1-1/n} - |\alpha h|^{l-1})^2}{(1 + |\alpha h|^l)^{(1-1/n)(l+2)}}$$

Hierin heeft het subscript s betrekking op waarden van het vochtgehalte θ en de doorlatendheid K bij verzadiging. Het subscript r heeft betrekking op de residuaire waarde van het vochtgehalte θ . In de praktijk is θ_r het vochtgehalte bij een grote negatieve waarde (-1×10^6 cm) van de drukhoogte h . De parameters α , l en n bepalen de vorm van de karakteristieken.

De onbekende modelparameters θ_r , θ_s , K_s , α , l en n in deze vergelijkingen zijn geschat met een optimalisatieprocedure, waarbij tegelijkertijd de verschillen tussen de gemeten en geschatte vochtgehalten en die tussen gemeten en geschatte doorlatendheden worden geminimaliseerd. Beschrijving van de karakteristieken met vergelijkingen maakt de karakteristiek makkelijk hanteerbaar en daarmee goed toepasbaar als invoergegeven in simulatieberekeningen.

Ter illustratie van de gevolgde werkwijze worden in figuur 1 de 67 individuele metingen voor de bouwsteen B14 siltige leem getoond. Figuur 2 toont de geometrisch gemiddelde karakteristieken (getrokken lijn) die zijn berekend uitgaande van de individuele metingen. De waarden plus en min 1 standaardafwijking en de beschrijvingen van de gemiddelde karakteristieken met de bovenstaande vergelijkingen (stippellijnen) worden eveneens getoond.

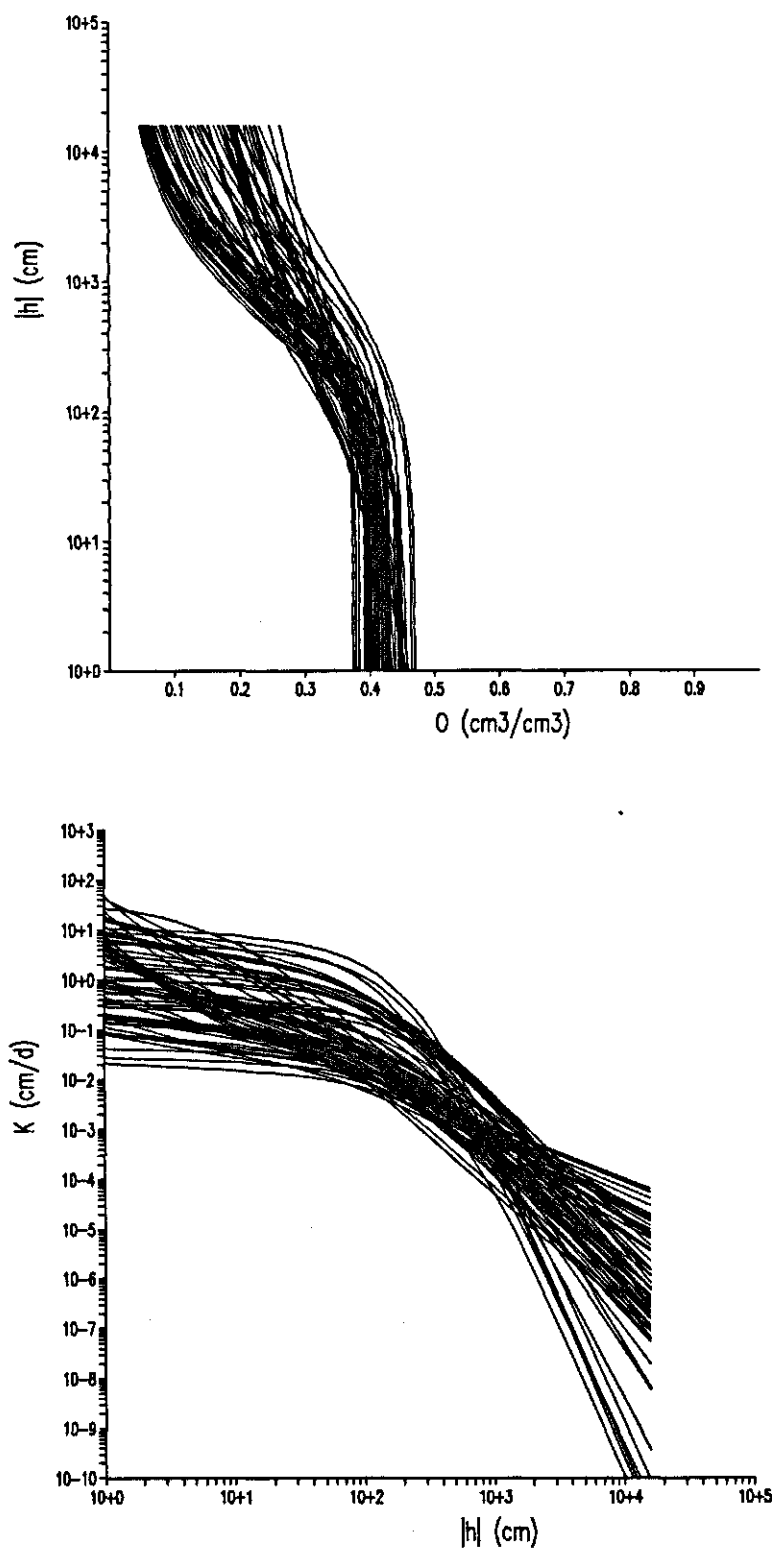


Fig. 1 Individuele bodemfysische karakteristieken (boven waterretentie en onder doorlatendheid) voor de textuurklasse siltige leem (Wösten et al. 1994)

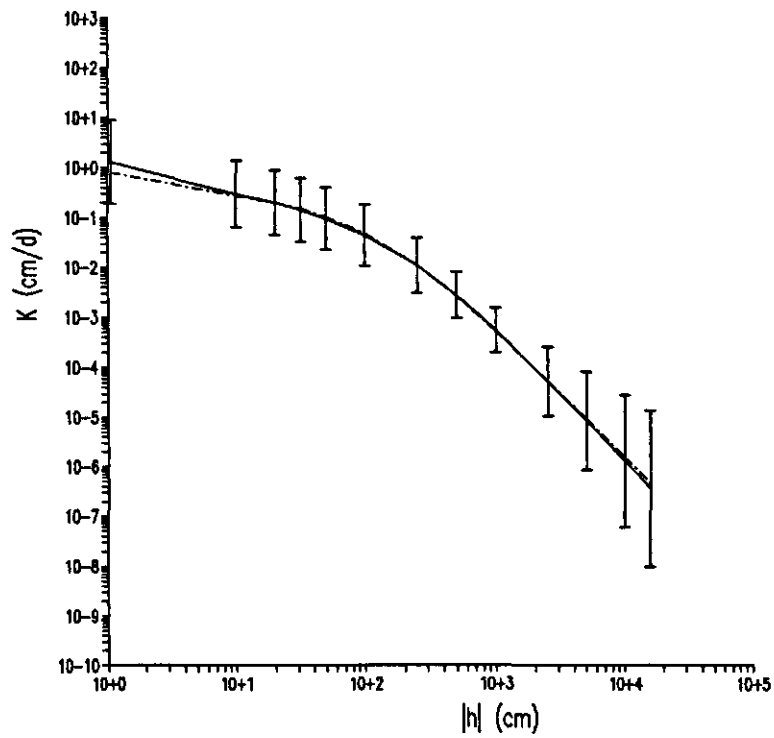
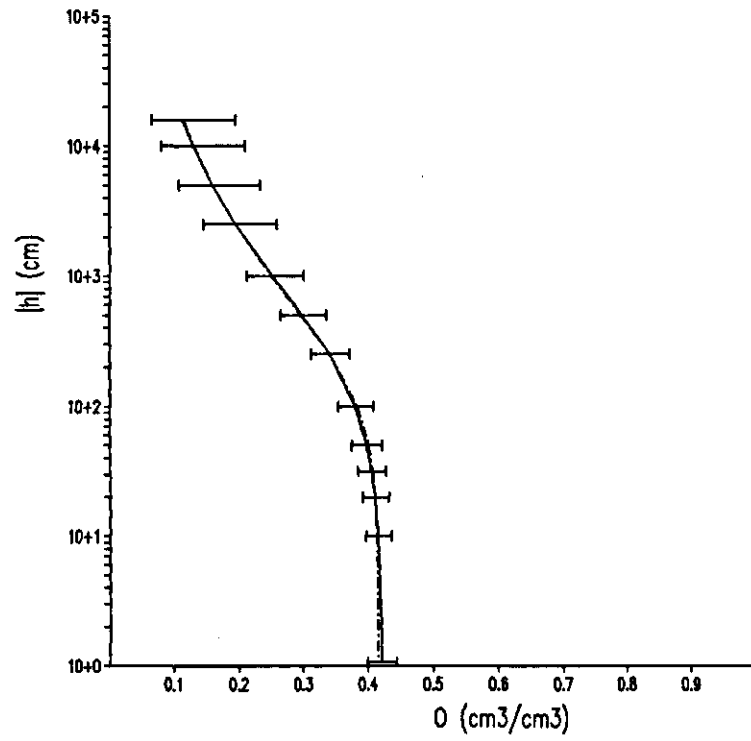


Fig. 2 Gemiddelde bodemfysische karakteristieken (boven waterretentie en onder doorlatendheid) voor de textuurklasse siltige leem (Wösten et al. 1994)

Om de gemiddelde K - h - θ -relatie per bouwsteen te kunnen berekenen, is gesteld dat voor die bouwsteen minimaal vier gemeten K - h - θ -relaties beschikbaar moeten zijn. Dit resulteert erin dat nu voor 30 van de 36 onderscheiden bouwstenen gemiddelde relaties beschikbaar zijn. De ontbrekende bouwstenen beslaan echter qua oppervlak maar een klein gedeelte van de Nederlandse bodems, waardoor de Staringreeks toch redelijk landsdekkend is.

De gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken per textuurklasse staan vermeld in de Staringreeks (Wösten et al., 1994). Deze reeks is daarmee een klasse-vertaalfunctie waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan van de bodemfysische karakteristieken voor regionale toepassingen op schaal 1 : 50 000 of kleiner.

2.2 Continue-vertaalfuncties voor puntvoorspellingen van de waterretentiekarakteristiek

Continue-vertaalfuncties die specifieke punten van de waterretentiekarakteristiek voorspellen zijn ontwikkeld door Poelman en Van Egmond (1979) voor zee- en rivierkleigronden en door Krabbenborg et al. (1983) voor zandgronden en veenkoloniale gronden. Deze functies hebben de volgende algemene vorm:

$$\theta \text{ (bij bijvoorbeeld } h = -100 \text{ cm)} = b_0 + b_1 \cdot H + b_2 \cdot LU + b_3 \cdot RD + \dots + b_x \cdot X$$

waarin:

b_0, b_1, b_3 en b_x	= regressiecoëfficiënten
H	= het organischestofgehalte (%)
LU	= het lutumgehalte (%)
RD	= de reciproque van de dichtheid (cm^3/g)
X	= elke andere makkelijk meetbare bodemeigenschap.

In het geval van zandgronden wordt i.p.v. het lutumgehalte het leemgehalte gebruikt.

De regressiecoëfficiënten worden verkregen door regressieanalyse van het gemeten vochtgehalte θ bij bijvoorbeeld $h = -100$ cm met de bodemkundige eigenschappen als verklarende variabelen. Voorspellingen worden veelal gedaan voor het vochtgehalte θ bij de drukhoogten h van -2,5, -10, -30, -100, -200, -500, -2500 en -16 000 cm. Alhoewel door medewerkers van de vroegere STIBOKA een gedegen en uitgebreid bestand aan continue-vertaalfuncties is opgebouwd, worden de functies nu nog maar zeer beperkt gebruikt. Redenen hiervoor zijn dat alleen de waterretentie- en niet tegelijkertijd ook de doorlatendheidskarakteristiek wordt voorspeld, plus het feit dat het om puntvoorspellingen gaat waardoor er een groot aantal functies nodig is om de complete waterretentiekarakteristiek te beschrijven. Deze laatste eigenschap bemoeilijkt de efficiënte opname van bodemfysische eigenschappen in simulatiemodellen.

2.3 Continue-vertaalfuncties voor de voorspelling van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek

Als alternatief voor functies die specifieke punten van de waterretentiekarakteristiek voorspellen is een functie ontwikkeld waarmee de modelparameters θ_r , θ_s , K_s , α , l en n die de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek beschrijven (paragraaf 2.1), kunnen worden voorspeld. Hiervoor zijn alle individuele karakteristieken die ten grondslag liggen aan de Staringreeks beschreven met de vergelijkingen van Van Genuchten (1980). Vervolgens is lineaire regressieanalyse gebruikt om het verband vast te stellen tussen de modelparameters en makkelijk meetbare bodemkundige eigenschappen.

Om aan een aantal fysische randvoorwaarden te voldoen zijn getransformeerde i.p.v. de oorspronkelijke modelparameters in de regressie gebruikt. In het geval van zandgronden zijn de randvoorwaarden; $K_s > 0$, $\alpha > 0$, $n > 1$ en $-2 < l < +2$. In het geval van zavel- en kleigronden luidt de laatste randvoorwaarde: $-10 < l < +10$. Hierdoor zijn de modelparameters op de volgende manier getransformeerd; $K_s^* = \ln(K_s)$, $\alpha^* = \ln(\alpha)$, $n^* = \ln(n-1)$ en voor zandgronden: $l^* = \ln((l+2)/(2-l))$ terwijl voor zavel- en kleigronden geldt; $l^* = \ln((l+10)/(10-l))$. Voor zandgronden worden de volgende bodemkundige eigenschappen als verklarende variabelen gebruikt: organischestofgehalte, leemgehalte, dichtheid mediaan van de zandfractie (M50) en ook de kwantitatieve variabele boven- of ondergrond. Voor zavel- en kleigronden is het leemgehalte vervangen door het lutumgehalte.

In de regressievergelijkingen worden lineaire, reciproque en exponentiële verbanden van de bodemkenmerken gebruikt, terwijl ook de interacties tussen de kenmerken wordt meegenomen. Hierdoor bestaat de uiteindelijke regressievergelijking oftewel continue-vertaalfunctie uit die verschillende bodemkenmerken en interacties die allemaal significant bijdragen aan de voorspelling van de getransformeerde modelparameters. De continue-vertaalfuncties staan vermeld in tabel 1. Na voorspelling van de getransformeerde modelparameters worden de bodemfysische karakteristieken verkregen door terug-transformatie naar de oorspronkelijke modelparameters.

Tabel 1 Continue-vertaalfuncties voor de voorspelling van de bodemfysische karakteristieken van Nederlandse gronden.

Zandgronden:

$$\theta_s = -13,6 - 0,01533*LE + 0,0000836*LE^2 - 0,0973*LE^{-1} + 0,708*D^{-1} - 0,00703*M50 + 225,3*M50r^1 + 2,614*\ln(M50) + 0,0084*H^1 + 0,02256*\ln(H) + 0,00718*D*LE$$

($R^2 = 71 \%$)

$$K_s^* = 9,5 - 1,471*D^2 - 0,688*H + 0,0369*H^2 - 0,332*\ln(LE)$$

($R^2 = 32 \%$)

$$\alpha^* = 146,9 - 0,0832*H - 0,395*bovengrond - 102,1*D + 22,61*D^2 - 70,6*D^{-1} - 1,872*LE^{-1} - 0,3931*\ln(LE)$$

($R^2 = 53 \%$)

$$f^* = 0,797 - 0,591*H + 0,0677*H^2 + 0,573*bovengrond$$

($R^2 = 42 \%$)

$$n^* = 1092 + 0,0957*LE + 1,336*M50 - 13229*M50^{-1} - 0,001203*M50^2 - 234,6*\ln(M50) - 2,67*D^{-1} - 0,115*H^{-1} - 0,4129*\ln(H) - 0,0721*D*LE$$

($R^2 = 63 \%$)

Zavel- en kleigronden:

$$\theta_s = 0,8085 - 0,2617*D - 0,038*bovengrond + 0,00001046*LU^2 + 0,01287*\ln(H) + 0,000789*LU*bovengrond$$

($R^2 = 86 \%$)

$$K_s^* = -43,1 + 64,8*D - 22,21*D^2 + 7,02*H - 0,1562*H^2 + 0,985*\ln(H) - 0,01332*LU*H - 4,71*D*H$$

($R^2 = 30 \%$)

$$\alpha^* = 11 - 2,298*D^2 - 12,41*D^{-1} + 0,838*H + 0,343*H^{-1} + 2,03*\ln(H) - 1,263*D*H$$

($R^2 = 51 \%$)

$$f^* = 0,451 + 2,678*D^{-1} - 1,093*\ln(LU)$$

($R^2 = 44 \%$)

$$n^* = -0,34 + 1,224*D^{-1} - 0,7952*\ln(LU) - 0,3201*\ln(H) + 0,0651*D*H$$

($R^2 = 74 \%$)

waarin:

$\theta_s, K_s^*, \alpha^*, f^*$ en n^* = de getransformeerde modelparameters in de Van Genuchten (1980) vergelijkingen

H = het organischestofgehalte (%)

LU = het lutumgehalte (%)

LE = het leemgehalte (%)

D = de dichtheid ($g.cm^{-3}$)

$M50$ = de mediaan van de zandfractie (μm)

$\ln$ = de logaritme met grondtal e

Boven- en ondergrond zijn kwalitatieve variabelen die de waarde 1 of 0 aannemen.

2.4 Neurale netwerken als alternatief voor continue-vertaalfuncties

Als alternatief voor het gebruik van regressieanalyse bij het opstellen van continue-vertaalfuncties wordt ook gebruik gemaakt van de theorie van neurale netwerken. Bij neurale netwerken wordt niet zoals bij regressie een bepaald model hetzij lineair, reciproque of exponentieel opgelegd, maar wordt aan de hand van een 'training set' in de procedure zelf het beste model opgesteld. Neurale netwerken zijn geschikt voor het oplossen van multi-variate, niet-lineaire problemen waarbij goed gebruik gemaakt wordt van zowel kwantitatieve als kwalitatieve bodemkundige gegevens. Tamari et al. (1996) laten voor Nederlandse gronden zien dat de voorspellingen van de onverzadigde doorlatendheden bij $h = -100$ cm en bij $h = -250$ cm iets nauwkeuriger zijn met een neuraal netwerk dan met regressie. Neurale netwerken worden behalve voor de voorspelling van puntwaarden, ook gebruikt voor het voorspellen van modelparameters in de Van Genuchten vergelijkingen (Schaap en Bouten, 1996).

2.5 Verzadigde doorlatendheid van watervoerende sedimenten in de ondergrond

Voor hydrologisch onderzoek dient men te beschikken over de verzadigde doorlatendheid van de watervoerende sedimenten in de ondergrond. Deze doorlatendheid kan worden gemeten door pompproeven uit te voeren, maar kan ook worden geschat aan de hand van een aantal bodemkenmerken. Zo wordt deze doorlatendheid in belangrijke mate bepaald door het specifiek oppervlak (U-cijfer), de sorteringsgraad (S-cijfer) het slibgehalte (percentage $< 16 \mu\text{m}$) en het grindgehalte (percentage tussen 2000 en 63 000 μm).

Het U-cijfer is gedefinieerd als de verhouding tussen het totale oppervlak van de korrels van een bepaalde gewichtshoeveelheid zand en het oppervlak van de korrels met een doorsnede van 1 cm van eenzelfde gewichtshoeveelheid zand. Uiterst fijne sedimenten hebben een U-cijfer van 180 en uiterst grove van 10. Het S-cijfer is de som van de percentages van de drie grootste zeeffracties en is daarmee een maat voor de homogeniteit van een monster. Een S-cijfer van 80 duidt op zeer goed gesorteerd materiaal terwijl een S-cijfer van 50 aangeeft dat het materiaal tweetoppig is gesorteerd. Het slibgehalte heeft ook een grote invloed op de doorlatendheid. Zand met een slibgehalte $> 7\%$ blijkt vrijwel ondoorlatend te zijn. Bij grind is het effect omgekeerd aan dat bij slib. Naarmate het grindgehalte toeneemt neemt ook de doorlatendheid toe; een grindgehalte van 60% geeft een verdubbeling van de doorlatendheid. Vanaf 60% wordt dit effect echter snel minder.

Vanaf de jaren zestig worden voor boormonsters schattingen gemaakt van het U- en S-cijfer en het slib- en grindgehalte. Op grond van deze gegevens heeft Pomper (1996) tabel 2 voor verzadigde doorlatendheden opgesteld. De relaties in de tabel vormen klasse-vertaalfuncties waarmee uitgaande van boorbeschrijvingen op regionale schaal op eenvoudige en goedkope wijze schattingen kunnen worden gemaakt van de verzadigde doorlatendheid van watervoerende sedimenten in de ondergrond. Niet-gevulde waarden in tabel 2 duiden op ontbrekende gegevens.

Tabel 2 Vertaling van beschreven boorbeschrijvingen naar doorlaafactoren (m/dag)

Slibgehalte omschrijving	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6
Zeer fijn zand (U140)	geen	data									
Middelfijn zand (U100)									2		
S80		12	8			4					
S70		9									
S60	6	6				4		2	1		
S55		4				2			1		0,5
S50											
Middel fijn - matig fijn (U80)											
S80		9	7	6	4	5			3		1
S70		6		5		4		3			
S65		6									
S60		5		4		3				1	
S50		4		3		2					
Matig fijn (U60)											
S80		15	12	10	9	8	7	6		5	
S70		13	12	9	8	7	6	5	4		
S65		11	9	8	7	6	5	4	3		
S60		10	8	7	6	5	4	3	3		1
S55		9	7	6	5	4	3	2,5	2		
S50		8	6	5	4	3			2		
S40		6	5	4	3	2			1		0,5
Matig fijn - matig grof (U50)											
S80	24	22									
S70	22	19									
S65	19	17	15								
S60	17	15	13	11							
S55	15	13	11	10	9						
S50	13	11	10	9	8	7					
S40	11	10	9	8	7	6					
Matig grof (U40)											
S80	43										
S70	34	30									
S65	30	27									
S60	27	23	20	18	15	13					
S55	23	20	18	15							
S50	20	18	15	14							
S40	18	15	13	10	9						

Slibgehalte omschrijving	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6
Middel - matig grof (U30)											
S80	76										
S70	60										
S65	53	48									
S60	45	39					23				
S55	40	36									
S50	40	31									
S40	30	25									
Middelgrof (U25)											
S70	86	54			45						
S65	50	48									
S60	45	42									
S55	40	38									
Middelgrof (U20)	geen	data									
Grof (U20)	geen	data									
Zeer grof met grind (U20)											
S65	210										
Middel - zeer grof met grind (U20)											
S80	170										
S70	139	121				72					
S65	119										
S60	115										
Middel - zeer grof zonder grind (20)											
S70	110			51							
Matig fijn, tweetoppig S50	10	7	6	5		4	3	2	1		
Middelgrof, tweetoppig S50											
Middel - matig grof, tweetoppig S50	35	31									
S40	28										

Slibgehalte omschrijving	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6
Matig grof, tweetoppig											
S70	86										
S65	70	27									
S60	45	20									
S50	25	18		14		10					

2.6 Relaties tussen grondwaterstand en afvoer (Q(h)-relatie)

In hydrologische modellen moet de onderrandvoorwaarde gedefinieerd worden. Dit kan o.a. door aan te geven in welke mate er bij een bepaalde grondwaterstand afvoer richting grond- en oppervlaktewater plaatsvindt. De door Ernst (1962) ontwikkelde relatie tussen grondwaterstand en afvoer (Q(h)-relatie) heeft de volgende vorm:

$$Q = a * e^{-b*|h|}$$

waarin:

a en b = modelparameters

Q = de afvoer naar grond- en oppervlaktewater (cm/dag)

h = de grondwaterstand beneden maaiveld (cm)

Het blijkt dat de Q(h)-relatie een karakteristiek verloop vertoont voor de verschillende op de bodemkaart onderscheiden grondwaterstandsklassen (Gt). Met het oog hierop zijn door De Groot (1997) per Gt-klasse de modelparameters a en b vastgesteld met behulp van regressieanalyse. De resultaten (tabel 3) hebben de vorm van een klassevertaalfunctie waarmee per Gt-klasse een voorspelling kan worden gedaan van de bij een bepaalde grondwaterstand optredende afvoer. Deze Gt-klassen zijn dezelfde als toegepast door Vermulst (1992).

Tabel 3 Modelparameters voor de verschillende Gt-klassen

Gt	a	b
I	0,585	0,1552
II	0,544	0,0671
III, V	0,839	0,0356
II*, III*, V*	4,620	0,0687
IV, VI	1,976	0,0412
VII, VII*	0,177	0,0099

Uit een vergelijking van Q(h)-relaties die zijn voorspeld met de vertaalfuncties met de door Massop en De Wit (1994) vastgestelde Q(h)-relaties blijkt dat de twee goed overeenkomen

voor een testgebied in het oosten van Gelderland. Beperkingen van deze vertaalfuncties zijn de regionale en niet lokale toetsing, en het feit dat geen kwelsituaties worden beschreven. Figuur 3 geeft een beeld van de opgestelde vertaalfuncties.

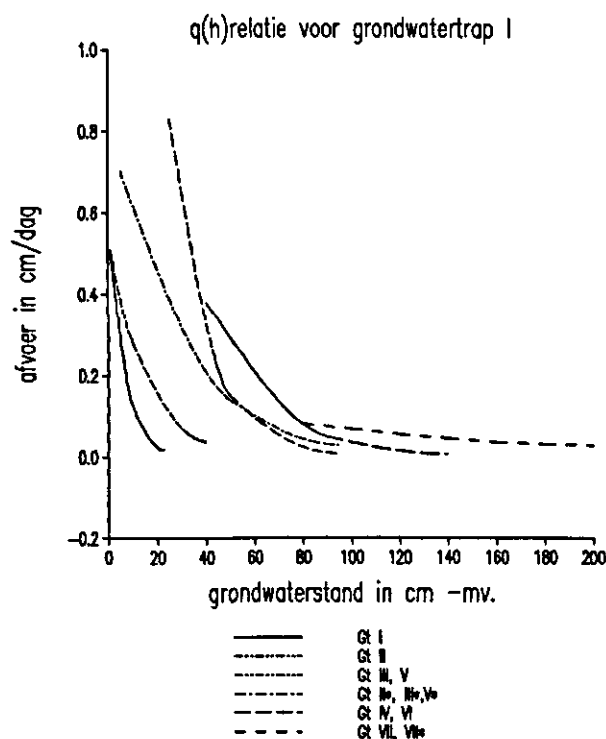


Fig. 3 Grondwaterstand-afvoerrelaties voor verschillende Gt-klassen (De Groot, 1997)

2.7 Krimpkaracteristieken van kleigronden

In tegenstelling tot de meeste andere gronden treden in kleigronden zwel- en krimpprocessen op. De krimpscheuren die als gevolg van deze processen ontstaan, hebben een grote invloed op het transport van water en opgeloste stoffen (Bronswijk en Evers-Vermeer, 1990). Berekening van dit transport met simulatiemodellen is in kleigronden alleen mogelijk indien met zwel- en krimpprocessen rekening wordt gehouden.

Een belangrijk invoergegeven is hierbij de krimpkaracteristiek die voor de bodemmatrix het verband aangeeft tussen de veranderingen in volume en in vochtgehalte. Uit de krimpkaracteristiek van de bodem kan eenvoudig de potentiële zwel en krimp worden afgelezen. Als de krimpkaracteristiek in simulatieberekeningen wordt gebruikt, kan de actuele grootte van zwel en krimp en tevens de invloed van het proces op het water- en stoftransport worden berekend.

Op grond van metingen van krimpkaracteristieken aan gerijpte gronden is door Bakker et al. (1995) een vertaalfunctie ontwikkeld waarmee de verhouding tussen de volumeverandering en vochtgehalteverandering wordt voorspeld uit het lutum-

gehalte (percentage $< 2 \mu\text{m}$). In figuur 4 is aangegeven welk deel van het waterverlies (vochtgehalteverandering) resulteert in krimp (volumeverandering) bij drukhoogteverlagingen h van 0 tot respectievelijk -10, -100, -1000 en -16 000 cm. Het lutumgehalte blijkt een grote invloed te hebben op de krimppeigenschappen van kleigrond. De krimp komt voor meer dan 90% overeen met het waterverlies bij een daling van de drukhoogte h van 0 naar -1000 cm in kleien met een lutumgehalte hoger dan ca. 35%. Bij lichtere kleien komt een aanmerkelijk groter deel van het water vrij zonder dat dit resulteert in krimp doordat in de aggregaten lucht de plaats van het water gaat innemen. Bij verdere daling van de drukhoogte tot -16 000 cm blijft alleen in de kleien met een lutumgehalte $> 45\%$ de krimp voor meer dan 90% gelijk aan het waterverlies.

De krimpkarakteristiek kan worden voorspeld door voor een bepaalde grond waarvan het lutumgehalte bekend is, uit figuur 4 af te lezen wat bij bepaalde drukhoogten de verhouding is tussen het volume krimp en het volume waterafname. De drukhoogte wordt vertaald in een vochtgehalte door gebruik te maken van de waterretentiekarakteristiek van de grond met het bepaalde lutumgehalte. Het uiteindelijke resultaat is een relatie tussen de poriënverhouding en het vochtgehalte oftewel de krimp-karakteristiek. Figuur 5 geeft een voorbeeld van een krimpkarakteristiek zoals vermeld door Bronswijk (1987).

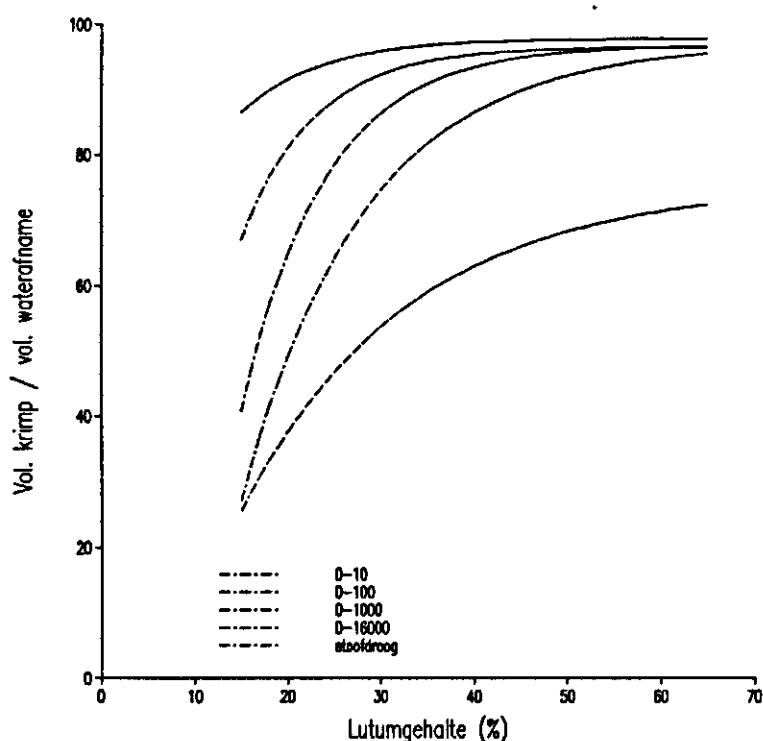


Fig. 4 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de drukhoogte van 0 naar resp. -10, -100, -1000 en -16000 cm in relatie tot het lutumgehalte (Bakker et al., 1995)

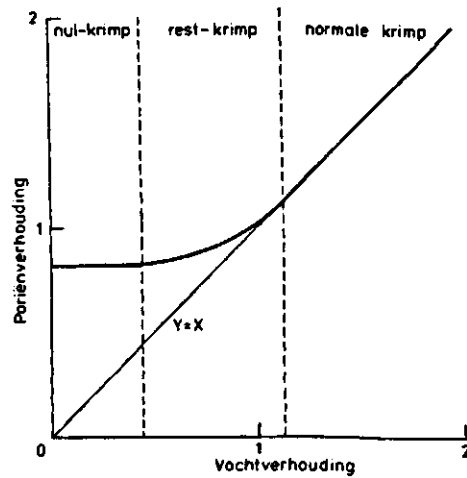


Fig. 5 Krimp karakteristiek van een klei-aggregaat: vochtverhouding = volume vocht/volume vaste fase; poriënverhouding = volume poriën/volume vaste fase (Bronswijk, 1987)

2.8 Klasse-vertaalfunctie voor gasdiffusie

Het transport van gassen in de bodem heeft voornamelijk plaats door diffusie en is afhankelijk van de vorm, hoeveelheid en continuïteit van de met water gevulde poriën en van de oplosbaarheid van het gas in water. De laatste grootte is echter meestal zeer klein. Op grond van theoretische beschouwingen en aanvullende metingen hebben Bakker et al. (1987) vertaalfuncties opgesteld voor zuurstofdiffusiecoëfficiënten in gronden (D_s), uitgedrukt in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bij 20°C , uitgaande van de volumefractie gas (V_g) in de grond. Zij differentieerden hun vertaalfuncties voor Nederlandse gronden op de volgende manier naar structuur en textuur van de bodem:

$$D_s = 0,3 \cdot 10^{-4} V_g^{3,0}$$

voor enkelkorrelstructuren van humus en humusarme zanden;

$$D_s = 1,5 \cdot 10^{-4} V_g^{4,0}$$

voor enkelkorrelstructuren van lemige zanden en lichtere zavel;

$$D_s = 0,5 \cdot 10^{-4} V_g^{3,0}$$

voor zwak en matig geaggregeerde bouwvoren van zavel en humeuze zanden en ondergronden van zavel;

$$D_s = 0,4 \cdot 10^{-4} V_g^{2,5}$$

voor duidelijk geaggregeerde zavels en kleien;

$$D_s = 0,06 \cdot 10^{-4} V_g^{1,5}$$

voor verdichte zavels en kleien waarin gangen en scheurtjes voorkomen, zoals in ploegzolen en langdurig niet-bewerkte bouwvoren.

In duidelijk krimpende en scheurende gronden is geen van deze relaties toepasbaar. Hier kan door één volumeprocent scheuren D_s toenemen van nul tot waarden die ruim voldoende zijn om het noodzakelijk gastransport ongehinderd te laten verlopen.

Door Bakker en Van der Bolt zijn de zuurstofdiffusiecoëfficiënten van Bakker et al. (1987) op basis van een 'deskundigen-oordeel' toegekend aan de bouwstenen van de Staringreeks (Wösten et al., 1994). Daarbij zijn per bouwsteen drie bodemgebruiksvormen met een eigen diffusiecoëfficiënt onderscheiden: grasland, bouwland en bos. De zuurstofdiffusiecoëfficiënten voor grasland en bos komen voor vrijwel alle bouwstenen overeen. In deze opzet wordt in feite het door Bakker et al. (1987) onderscheiden structuurtype gecorreleerd aan een bepaalde bodemgebruiksvorm. Om de presentatie in tabelvorm te vergemakkelijken, wordt de volgende vertaalfunctie gebruikt:

$$D_s = a \cdot 10^{-4} V_g^b$$

In tabel 4 staan de waarden voor de coëfficiënten a en b vermeld.

De in tabel 4 vermelde relaties zijn gebruikt voor de berekening van stikstofbalansen (Van der Bolt et al., 1996). De eerste berekeningen resulteerden in onrealistische denitrificatiehoeveelheden voor bouwland. De uiteindelijke berekeningen zijn daarom voor alle bodemgebruiksvormen uitgevoerd met de diffusiecoëfficiënten voor grasland. De invloed van structuur op de diffusiecoëfficiënten is duidelijk. Een goede koppeling met de Staringreeks is echter alleen mogelijk als in de Staringreeks ook de structuur wordt opgenomen.

Tabel 4 Zuurstofdiffusiecoëfficiënten van Bakker et al. (1987) voor de bodemgebruiksvormen grasland, bouwland en bos toegekend aan de bouwstenen van de Staringreeks (Wösten et al., 1994)

Bouwsteen	Grasland		Bos		Bouwland	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
B01	0,5	3,0	0,5	3,0	0,3	3,0
B02	0,5	3,0	0,5	3,0	1,5	4,0
B03	0,4	2,5	0,4	2,5	0,5	3,0
B04	0,4	2,5	0,4	2,5	0,5	3,0
B05	0,5	3,0	0,5	3,0	0,3	3,0
B06	0,5	3,0	0,5	3,0	0,3	3,0
B07	0,06	1,5	0,06	1,5	1,5	4,0
B08	0,4	2,5	0,06	1,5	0,5	3,0
B09	0,06	1,5	0,06	1,5	0,4	2,5
B10	0,06	1,5	0,06	1,5	0,4	2,5
B11	0,06	1,5	0,06	1,5	0,4	2,5
B12	0,06	1,5	0,06	1,5	0,4	2,5
B13	0,4	2,5	0,4	2,5	1,5	4,0
B14	0,4	2,5	0,4	2,5	1,5	4,0
B15	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5
B16	0,06	1,5	0,06	1,5	0,06	1,5
B17	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5
B18	0,06	1,5	0,06	1,5	0,06	1,5
O01	0,3	3,0	0,3	3,0	0,3	3,0
O02	1,5	4,0	1,5	4,0	1,5	4,0
O03	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O04	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O05	0,3	3,0	0,3	3,0	0,3	3,0
O06	0,3	3,0	0,3	3,0	0,3	3,0
O07	0,3	3,0	0,3	3,0	0,3	3,0
O08	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O09	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O10	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O11	0,5	3,0	0,5	3,0	0,5	3,0
O12	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5
O13	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5
O14	1,5	4,0	1,5	4,0	1,5	4,0
O15	1,5	4,0	1,5	4,0	1,5	4,0
O16	0,06	1,5	0,06	1,5	0,06	1,5
O17	0,06	1,5	0,06	1,5	0,06	1,5
O18	0,06	1,5	0,06	1,5	0,06	1,5

2.9 Continue-vertaalfunctie voor gasdiffusie

Naast de bovenvermelde klasse-vertaalfuncties heeft Finke (1996a, 1996b) op basis van de metingen van Bakker et al. (1987) ook continue-vertaalfuncties afgeleid. Deze functies hebben wederom de volgende vorm:

$$D_s = a * V_g^b$$

Voor de modelparameters *a* en *b* zijn de volgende continue-vertaalfuncties opgesteld (Finke, 1996a en 1996b):

$$a = 3,63 + 0,957 * LE - 1,071 * H$$

met een maximum waarde voor a van 0,01

($R^2 = 10,6 \%$)

voor zandgronden,

$$a = 0,01 * \text{EXP}(114,3 + 0,775 * LU - 363/LU - 36,4 * \ln(LU))$$

($R^2 = 12,5 \%$)

voor kleigronden,

$$b = -1,29 + 0,0565 * LE + 13,04 / (1 + H)$$

($R^2 = 27,5 \%$)

voor zandgronden,

$$b = 0,01 / (-0,116 - 0,00001003 * LU^2 + 0,435 / LU)$$

($R^2 = 24,7 \%$)

voor kleigronden,

waarin:

H = het organischestofgehalte (%)

LE = het leemgehalte (%)

LU = het lutumgehalte (%)

2.10 Dichtheid van de vaste fase van de grond

De dichtheid van de vaste fase van de grond (D in g.cm^{-3}) is de dichtheid in het geval geen luchtgevulde poriën in de grond aanwezig zijn, maar de grond volledig bestaat uit organische stof en minerale delen. Voor de voorspelling van de dichtheid van de vaste fase van rivierkleigronden is door Poelman (1975) de volgende vertaalfunctie opgesteld.

$$D = \frac{100}{\frac{\% H}{1,47} + \frac{\% LU}{2,88} + \frac{100 - \% H - \% LU}{2,66}}$$

2.11 Dichtheid van de grond

De werkelijke dichtheid van de grond wordt bepaald door de fracties lucht, organische stof en minerale delen die in de grond aanwezig zijn en de dichtheden van deze afzonderlijke fracties. De dichtheid van de grond is een belangrijk bodemkundig gegeven waarmee bijvoorbeeld de verhouding wordt berekend tussen de vaste bodembestanddelen en de poriën. Verschillende onderzoekers hebben vertaalfuncties voor de voorspelling van de dichtheid opgesteld. In deze paragraaf worden de belangrijkste vermeld.

2.11.1 Hoekstra en Poelman (1982)

Hoekstra en Poelman (1982) hebben een groot aantal dichtheidsmetingen voor Nederlandse gronden verzameld en bewerkt tot continue-vertaalfuncties. Hierbij is een onderscheid gemaakt in enerzijds zandgronden en anderzijds zee- en rivierkleigronden. In de zandgronden wordt alleen het organischestofgehalte als verklarende variabele gebruikt, terwijl in de kleigronden het organischestofgehalte en het lutumgehalte worden gebruikt. Binnen de zandgronden vindt een verdere onderverdeling plaats naar type horizont (A, B en C) en naar vochtigheidstoestand uitgedrukt in grondwaterstandsklassen (Gt). Binnen de kleigronden vindt een verdere onderverdeling plaats naar regio's in het kleigebied. Voor de afzonderlijke relaties wordt verwezen naar Hoekstra en Poelman (1982), hier worden ter illustratie twee voorbeelden gegeven.

$$1/D = 0,667 + 0,021 \cdot H$$

($R^2 = 64 \%$)

voor A(an)-horizonten van hoge veldpodzol-, laarpodzol-, haarpodzol- en zwarte enkeerdgronden op Gt VI en VII.

$$1/D = 0,633 + 0,024 \cdot H$$

($R^2 = 73 \%$)

voor B-horizonten van hoge veldpodzol-, laarpodzol- en haarpodzolgronden op Gt VI en VII.

2.11.2 Van der Sluijs (1988)

De door Hoekstra en Poelman (1982) verzamelde en bewerkte dichtheidscijfers zijn door Van der Sluijs (1988) geaggregeerd tot vertaalfuncties waarmee schatting mogelijk is van de gemiddelde dichtheden van de belangrijkste Nederlandse grondsoorten. De vertaalfunctie heeft de volgende vorm:

$$1/D = b_0 + b_1 \cdot H + b_2 \cdot LU$$

Tabel 5 geeft de waarden voor de regressiecoëfficiënten in de bovenstaande vertaalfunctie voor de verschillende grondsoorten, hierbij is n het aantal analysegegevens.

Tabel 5 Regressiecoëfficiënten voor de verschillende grondsoorten

Grondsoort	Horizont	b_0	b_1	b_2	n
Zeeklei	A	0,597	0,0350	0,0009	394
Zeeklei	C	0,628	0,0155	0,0024	397
Rivierklei	A	0,618	0,0230	0,0007	87
Rivierklei	C	0,572	0,0053	0,0039	229
Pleistoceen zand	A en B2	0,637	0,0257	-	964
Pleistoceen zand	C	0,598	0,0355	-	518

2.11.3 Van Wallenburg (1988)

Voor de dichtheid van veengronden, uitgedrukt in kg.m^{-3} , geeft Van Wallenburg (1988) de volgende continue-vertaalfuncties:

$$D = 1457 - 578 \cdot \log(H)$$

$$(R^2 = 77 \%)$$

voor bovengronden bestaande uit humusrijk t/m kleiig veen zonder toemaakdek,

$$D = 1726 - 693 \cdot \log(H)$$

$$(R^2 = 84 \%)$$

voor bovengronden bestaande uit humusrijk t/m kleiig veen met toemaakdek,

$$D = 1251 - 564 \cdot \log(H)$$

$$(R^2 = 85 \%)$$

voor geoxideerd moerige ondergronden.

2.11.4 Wösten (1997)

Gebaseerd op de individuele metingen die ten grondslag liggen aan de Staringreeks geeft Wösten (1997) de volgende continue-vertaalfuncties voor de dichtheid:

$$1/D = -1,984 + 0,01841 \cdot H + 0,032 \cdot \text{bovengrond} + 0,00003576 \cdot LE^2 + 67,5 \cdot M50^{-1} + 0,424 \cdot \ln(M50)$$

$$(R^2 = 72 \%)$$

voor zandgronden,

$$1/D = 0,603 + 0,003975 \cdot LU + 0,00207 \cdot H^2 + 0,01781 \cdot \ln(H)$$

$$(R^2 = 77 \%)$$

voor zavel- en kleigronden.

waarin:

LU = het lutumgehalte (%)

LE = het leemgehalte (%)

H = het organischestofgehalte (%)

D = de dichtheid (g.cm^{-3})

$M50$ = de mediaan van de zandfractie (μm)

$\ln$ = de logaritme met grondtal e

$\log$ = de logaritme met grondtal 10

Boven- en ondergrond zijn kwalitatieve variabelen die de waarde 1 of 0 aannemen.

2.12 Afbraaksnelheid van stabiele humus

Door Vermeulen en Hendriks (1996) zijn door middel van ademhalingsmetingen, de potentiële relatieve afbraaksnelheden van verschillende veensoorten bepaald. De afbraak oftewel oxidatie van veen is beschreven met de volgende eerste-orde-vergelijking:

$$Y = Y_0 * e^{-kt}$$

waarin:

Y = de hoeveelheid organische stof per gewichtseenheid droge stof aanwezig op tijdstip t (g.g^{-1})

Y_0 = de hoeveelheid organische stof aanwezig op tijdstip $t = 0$ (g.g^{-1})

k = de relatieve afbraaksnelheid (jaar^{-1})

t = tijd (jaar)

Onder optimale omstandigheden wordt over de potentiële relatieve afbraaksnelheid k_{pot} gesproken. Voor deze snelheid hebben Vermeulen en Hendriks (1996) de volgende continue-vertaalfunctie opgesteld:

$$k_{pot} = 0,016 - 0,00021 * C/N$$

Deze relatie is geldig bij $10 < C/N < 55$ en $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zoals uit de vertaalfunctie blijkt, is de trofiegraad van grote invloed op de afbraaksnelheid. In een arm, oligotroof veen (hoge C/N -verhouding) is k_{pot} klein en in een rijk, eutroof veen (lage C/N -verhouding) is k_{pot} groot. Gegeven de potentiële relatieve afbraaksnelheid k_{pot} , kan uit de vergelijking voor de afbraak de halfwaardetijd worden berekend. Zo is in het geval $k_{pot} = 0,01\text{ jaar}^{-1}$ de halfwaardetijd 69 jaar.

2.13 Warmtegeleiding van grond

Voor de warmtegeleiding van grond die afhankelijk is van het vochtgehalte en de textuur heeft De Vries (1966) een vergelijking opgesteld. In deze vergelijking speelt de vormfactor van de bodemdeeltjes een erg belangrijke rol. Voor de belangrijkste textuurgroepen gelden de volgende waarden voor de dimensieloze vormfactoren (Campbell et al., 1994; Feddes, 1971; Stolte et al., 1996):

zand = 0,144 klei = 0,125 löss = 0,071 veen = 0,330

3 Chemische vertaalfuncties

3.1 Cation Exchange Capacity (CEC)

Voor het voorspellen van de Cation Exchange Capacity (*CEC* uitgedrukt in mmol. kg⁻¹ grond) van verschillende bodemhorizonten in Nederland hebben Breeuwsma et al. (1986) de volgende continue-vertaalfuncties opgesteld:

$$CEC = 25 * H + 5 * LU$$

($R^2 = 99 \%$)

voor B-horizonten van podzolen,

$$CEC = 15 * H + 5 * LU$$

($R^2 = 99 \%$)

voor andere horizonten en/of bodemeenheden.

De *CEC* van de gehele onverzadigde zone wordt op grond van gegevens voor de afzonderlijke horizonten, als volgt berekend (Breeuwsma et al., 1986):

$$CEC_{\text{onv.zone}} = \sum_{i=1}^n 10^{-4} D_i \cdot d_i (a_h * H_i + 5 * LU_i)$$

Hierin is D de dikte van horizont i in cm en d de dichtheid van horizont i in g.cm⁻³. a_h is 25 voor B-horizonten en 15 voor alle andere horizonten en n is het aantal horizonten in de onverzadigde zone.

3.2 pH-H₂O

Voor het voorspellen van de pH-H₂O van verschillende, Nederlandse bodemeenheden zijn de volgende vertaalfuncties beschikbaar (Finke, 1996b):

$$\text{pH-H}_2\text{O} = 1,3235 + 0,8581 * \text{pH-KCl}$$

($R^2 = 92,6 \%$)

voor veengronden,

$$\text{pH-H}_2\text{O} = 0,9843 + 0,9003 * \text{pH-KCl} + 0,00995 * H$$

($R^2 = 90,7 \%$)

voor zandgronden met $H < 15\%$,

$$\text{pH-H}_2\text{O} = 2,189 + 0,7748 \cdot \text{pH-KCl}$$

$$(R^2 = 90,7 \%)$$

voor kleigronden.

3.3 Fosfaatbindendvermogen van de grond

Het fosfaatbindend vermogen van de grond bepaalt in belangrijke mate de fosfaatuitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater. Kennis hiervan is vooral van belang voor de kalkloze zandgronden waarop het overgrote deel van de intensieve veehouderij is gelokaliseerd. Op grond van laboratoriumexperimenten die vervolgens met kolomexperimenten zijn gevalideerd, hebben allereerst Breeuwsma et al. (1986) en vervolgens Schoumans (1995) de volgende vertaalfunctie opgesteld voor het fosfaatbindendvermogen (FBV_{tot}) uitgedrukt in mmol.kg^{-1} , voor bodemhorizonten:

$$FBV = 0,533 (Al + Fe)$$

Hierin zijn Al en Fe, uitgedrukt in mmol.kg^{-1} , de oxalaat-extraheerbare hoeveelheden Al and Fe. Uitgaande van bovenstaande vergelijking geldt de volgende vertaalfunctie voor het fosfaatbindend vermogen van de hele onverzadigde zone nu uitgedrukt in $\text{kg.ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$.

$$FBV_{\text{onv.zone}} = \sum_{i=1}^n 3,78 D_i d_i (Al + Fe)_i$$

Hierin is D de dikte van horizont i in cm en d de dichtheid van horizont i in g.cm^{-3} en n is het aantal horizonten in de onverzadigde zone.

3.4 Neerslag van fosfaat

Fosfaat slaat neer als een bepaalde bufferconcentratie wordt overschreden. Voor het voorspellen van deze concentratie hebben Boogaard en Kroes (1996) de volgende vertaalfunctie opgesteld:

$$C_{\text{buf}} = 0,001 * 135,0 * 3,0^{(-\text{pH-H}_2\text{O} + 5,0)}$$

waarin:

$$C_{\text{buf}} = \text{bufferconcentratie (g.l}^{-1}\text{)}$$

3.5 Sulfaatbindend vermogen van de grond

Voor het sulfaatbindend vermogen (SBV) van Nederlandse gronden (SBV, uitgedrukt in mmol.kg⁻¹ grond) wordt door De Vries (1994) gebruikgemaakt van de volgende door Johnson en Todd (1983) opgestelde vertaalfunctie:

$$SBV = 0,02 * Al$$

Hierin is *Al*, uitgedrukt in mmol.kg⁻¹, de oxalaat-extraheerbare hoeveelheden Al.

3.6 Concentraties zware metalen

De Freundlich-evenwichtsvergelijking beschrijft de relatie tussen de hoeveelheid zware metalen dat is gebonden aan bodemdeeltjes en de hoeveelheid zware metalen in de bodemoplossing:

$$M_s = K_f * (M)^n$$

waarin:

M = de totale hoeveelheid van het zware metaal *M* in de grond (mol.kg⁻¹)

K_f = de Freundlich-adsorptieconstante voor het zware metaal *M* (mol¹⁻ⁿ.m³ⁿ.kg⁻¹)

(*M*) = de activiteit van het zware metaal *M* in de bodemoplossing (mol.m⁻³)

n = de Freundlich-exponent

Elzinga et al. (1996) gebruikte het verband tussen de totale metalenconcentratie in de bodem (in mg.kg⁻¹) en de totale metalenconcentratie (in mg.l⁻¹) in de bodemoplossing om de volgende vertaalfuncties op te stellen voor de relatie tussen de Freundlich-adsorptieconstante (*K_{f,tot}*) voor verschillende zware metalen en de bodemeigenschappen pH-KCl, cation exchange capacity (*CEC*), bodem/water-ratio en de activiteit van calcium:

$$\log (K_{f,tot}) = a_0 + a_1 * \text{pH-KCl} + a_2 * \log(CEC) + a_3 * \log(SW) - a_4 * \log(Ca)$$

waarin:

K_{f,tot} = de Freundlich-adsorptieconstante voor het zware metaal *M* waarmee het totale metalen gehalte in de grond wordt gerelateerd met de totale metalen concentratie in de bodemoplossing (mol¹⁻ⁿ.lⁿ.kg⁻¹)

SW = bodem/water-ratio (-)

(*Ca*) = de calciumactiviteit (mg.l⁻¹).

Bovendien is in deze experimenten een waarde voor de Freundlich-exponent *n* vastgesteld. Tabel 6 geeft de resultaten zoals die in De Vries en Bakker (1996) vermeld staan.

Tabel 6 Regressiecoëfficiënten voor de verschillende zware metalen in het geval van Freundlich-adsorptie

<i>M</i>	<i>N</i> ¹⁾	<i>n</i>	<i>a</i> ₀	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>R</i> ²
Cd	1125	0,87	-3,22	0,45	0,63	-	0,47	0,78
Cu	408	0,57	-0,78	0,23	0,45	-0,63	-	0,69
Zn	487	0,70	-1,07	0,28	0,68	-	-	0,80

¹⁾*N* is het aantal metingen.

Onder de aanname van lineaire adsorptie (*n*=1 in de Freundlich-evenwichtsvergelijking) hebben Janssen et al. (1996) de volgende vertaalfunctie opgesteld voor de relatie tussen de lineaire adsorptieconstante (*K*_{*p,tot*}) en bodemeigenschappen:

$$\log (K_{p,tot}) = b_0 + b_1 \cdot \text{pH-CaCl}_2 + b_2 \log(H) + b_3 \cdot \log(LU) + b_4 \cdot \log(\text{Fe}_{ox})$$

waarin:

*K*_{*p,tot*} = de lineaire adsorptieconstante voor het zware metaal *M* waarmee het totale metalengehalte in de grond wordt gerelateerd met de ongecomplexeerde metalenconcentratie in de bodemoplossing (m³.kg⁻¹)

*Fe*_{ox} = het oxalaat-extraheerbare Fe-gehalte (mmol.kg⁻¹)

Tabel 7 Regressiecoëfficiënten in de vertaalfunctie met vier verklarende variabelen voor verschillende zware metalen in het geval van lineaire adsorptie

<i>M</i>	<i>N</i>	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃	<i>b</i> ₄	<i>R</i> ²
Pb	32	-1,14	0,24	-0,43	-	0,49	0,71
Cd	31	-3,43	0,48	-0,71	-	-	0,70
Cu	33	-2,98	0,23	-	-	0,63	0,63
Zn	33	-3,26	0,45	-	0,60	-	0,85
Ni	32	-2,00	0,25	-	0,57	-	0,74
Cr	19	-0,78	0,15	-	-	0,50 ¹⁾	0,69

¹⁾ heeft betrekking op *Al*_{ox} en niet op *Fe*_{ox}

Een nadeel van de bovenstaande vertaalfunctie is dat het oxalaat-extraheerbare *Al* of *Fe* mee wordt genomen als verklarende variabele. Indien deze bodemeigenschap wordt verwaarloosd, ontstaat een vertaalfunctie met alleen de makkelijk beschikbare bodemeigenschappen pH en percentages lutum en organischestof als verklarende variabelen. Voor deze situatie geeft Tabel 8 de resultaten zoals die in De Vries en Bakker (1996) staan vermeld.

Tabel 8 Regressiecoëfficiënten in de vertaalfunctie met drie verklarende variabelen voor verschillende zware metalen in het geval van lineaire adsorptie

<i>M</i>	<i>N</i>	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃	<i>R</i> ²
Pb	32	-0,95	0,35	-	-	0,60
Cd	31	-3,93	0,48	0,71	-	0,70
Cu	33	-2,62	0,36	-	-	0,49
Zn	33	-3,26	0,45	-	0,60	0,85
Ni	32	-2,00	0,25	-	0,57	0,74
Cr	19	-0,36	0,21	-	-	0,54

3.7 Concentraties bestrijdingsmiddelen

De adsorptie-eigenschappen van bestrijdingsmiddelen kunnen goed beschreven worden met een Freundlich-vergelijking (Brouwer et al., 1990; Boesten en Van der Linden, 1991):

$$X = K_d * c_r * (c/c_r)^N$$

waarin:

X = gehalte geadsorbeerd (mg.kg^{-1})

K_d = de Freundlich-adsorptiecoëfficiënt voor het bestrijdingsmiddel (l.kg^{-1})

c_r = een referentieconcentratie (1 mg.l^{-1})

c = de concentratie in de vloeibare fase (mg.l^{-1})

N = de Freundlich-exponent

Voor het veelgebruikte herbicide atrazine hebben Brouwer et al. (1990) de volgende vertaalfunctie opgesteld waarbij de adsorptieconstante K_d wordt voorspeld aan de hand van het organischestofgehalte (H in %) van de grond.

$$K_d = 0,6174 * H$$

($R^2 = 82 \%$)

Figuur 6 toont het verband tussen K_d en H .

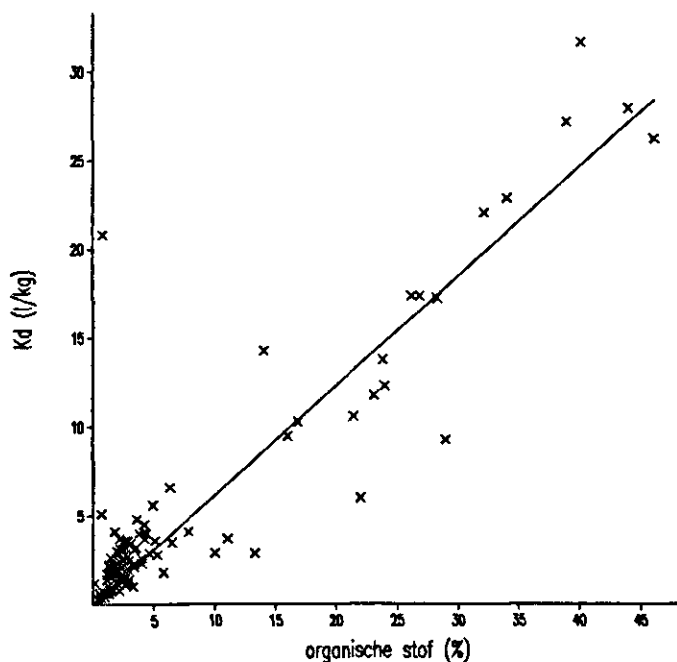


Fig. 6 Relatie tussen de Freundlich-adsorptieconstante en het organischestofgehalte

3.8 Pyrietoxidatie-snelheid

Bronswijk et al. (1995) voorspelde de jaarlijkse pyrietoxidatie-snelheid (*POS*), uitgedrukt in $\text{kg.m}^{-2}.\text{jaar}^{-1}$, in katekleigronden in Indonesië als een functie van de gemiddelde grondwaterstand, uitgedrukt in cm beneden maaiveld, als volgt:

$$POS = 0,0643 \sum_{n=1}^{n=365} (h(n) - Z_{\text{FeS}_2}) / 365$$

Hierin is $h(n)$ de grondwaterstand op dag n en Z_{FeS_2} is de begindiepte van de pyrietlaag. Voor dagen dat de pyrietlaag onder het grondwater ligt, geldt $h(n) - Z_{\text{FeS}_2} = 0$.

3.9 Bodemvruchtbaarheid

In bodemvruchtbaarheidsstudies voor tropische gronden wordt gebruikt gemaakt van vertaalfuncties die zijn opgesteld door Janssen et al. (1990). Met deze functies wordt een voorspelling gemaakt van de potentiële hoeveelheden (uitgedrukt in kg.ha^{-1}) stikstof (*SN*), fosfaat (*SP*) en kalium (*SK*) die de bodem kan leveren. De potentieel te leveren hoeveelheden nutriënten zijn gedefinieerd als de maximale hoeveelheden van deze nutriënten die door maïs kan worden opgenomen indien er geen andere nutriënten of factoren belemmerend zijn. De functies hebben de volgende vorm:

$$SN = 17 \times (\text{pH} - 3) \times N_{\text{org}}, \text{ of}$$
$$SN = 1,7 \times (\text{pH} - 3) \times C_{\text{org}}$$

$$SP = 0,014 \times (1 - 0,5 \times (\text{pH} - 6)^2) \times P\text{-tot.} + 0,5 \times P\text{-Olsen}, \text{ of}$$
$$SP = 0,35 \times (1 - 0,5 \times (\text{pH} - 6)^2) \times C_{\text{org}} + 0,5 \times P\text{-Olsen}$$

$$SK = 250 \times (3,4 - 0,4 \times \text{pH}) \times K_{\text{exch}} / (2 + 0,9 \times C_{\text{org}})$$

waarin:

C_{org} = organisch C (g.kg^{-1})

N_{org} = organisch N (g.kg^{-1})

$P\text{-Olsen}$ = P volgens Olsen (mg.kg^{-1})

$P\text{-tot.}$ = P totaal (mg.kg^{-1})

K_{exch} = uitwisselbaar K (mmol.kg^{-1})

De verklarende variabelen in de bovenstaande vertaalfuncties zijn de bodemchemische eigenschappen van de bodemhorizont van 0-20 cm diepte. De functies vormen een onderdeel van een systeembeschrijving voor de kwantitatieve evaluatie van de oorspronkelijke vruchtbaarheid van tropische gronden.

4 Omgaan met vertaalfuncties

Met vertaalfuncties worden voorspellingen gemaakt van invoergegevens voor modellen. Deze voorspellingen zijn echter niet exact maar steeds behept met een zekere fout. In dit hoofdstuk worden voorbeelden gegeven van hoe met de onzekerheid in vertaalfuncties kan worden omgegaan. Tenslotte wordt ingegaan op mogelijke complicaties die kunnen optreden bij het opstellen van continue-vertaalfuncties.

4.1 Onzekerheid in klasse-vertaalfuncties

Voor de textuurklassen in de Staringreeks is uitgaande van de individuele metingen, de geometrisch gemiddelde karakteristiek per textuurklasse berekend. Behalve deze gemiddelde karakteristieken zijn voor een 13-tal waarden van de drukhoogte h ook de θ en K waarden berekend die gelijk zijn aan de gemiddelde waarden plus en min 1 standaardafwijking. Deze standaardafwijkingen geven inzicht in de mate van spreiding van de afzonderlijke relaties rond de gemiddelde relatie. De balkjes in figuur 2 laten zien dat de afzonderlijk gemeten relaties die alle tot bouwsteen B14 'siltige leem' behoren, onderling aanzienlijk variëren.

4.2 Onzekerheid in continue-vertaalfuncties

Uitgaande van de afzonderlijke bodemhorizonten die in een bepaalde textuurklasse van de Staringreeks zijn gegroepeerd, hebben Wösten en Van Genuchten (1988) de vertaalfuncties gebruikt om voorspellingen te doen van de bodemfysische karakteristieken voor de afzonderlijke horizonten. Door gebruik te maken van de standaardafwijkingen van de verschillen tussen gemeten en voorspelde waarden van θ en $\log(K)$ bij 13 waarden van h is een 90% betrouwbaarheidsinterval gecreëerd om de voorspellingen. Figuur 7 toont het resultaat voor de Staringreeks klasse O13 'zeer zware klei'. De berekende betrouwbaarheidsintervallen zijn nogal breed wat erop duidt dat de voorspellingen die met de vertaalfuncties worden gemaakt een aanzienlijke dispersie vertonen.

Het vermelden van een betrouwbaarheidsinterval geeft weliswaar een indruk van de spreiding rond de voorspelling, maar maakt het nog niet mogelijk om deze spreiding daadwerkelijk te kwantificeren en vervolgens te gebruiken in modelberekeningen. Een mogelijkheid om dit wel te doen wordt gegeven door Finke et al. (1996). In hun opzet worden de vertaalfuncties gebruikt om bodemfysische karakteristieken te voorspellen voor dezelfde groep gronden als waarvoor deze karakteristieken zijn gemeten. De verschillen in voorspelde en gemeten karakteristieken worden weergegeven in een error-variantie-covariantie-matrix. Vervolgens wordt deze matrix gebruikt om aan de gemiddelde voorspelling een onzekerheidsterm toe te voegen. Het resultaat is dan niet alleen een voorspelde, gemiddelde karakteristiek, maar ook een aantal andere karakteristieken die de spreiding in de voorspelling tot uitdrukking brengen. Vervolgens wordt de set aan karakteristieken in een Monte Carlo procedure gebruikt om een uiteindelijke modeluitkomst te berekenen. In een variantie-analyse

kan worden achterhaald welk percentage van de spreiding in modeluitkomsten kan worden verklaard door spreiding in de bodemfysische invoergegevens. Zo bleek in de studie van Finke et al. (1996) dat spreiding in bodemfysische karakteristieken voor een belangrijk gedeelte de spreiding kon verklaren van praktische grootheden met een sterke fysische component zoals berijdbaarheid, luchtvoorziening en doorbraak van inerte tracers zoals chloride. De spreiding van berekende, praktische grootheden met een sterke chemische component zoals de doorbraak van tracer, die degraderen en adsorberen, werd echter nauwelijks beïnvloed door spreiding in bodemfysische karakteristieken. In dit geval waren variaties in organische stofgehaltes veel belangrijker. Afhankelijk van de beschouwde grootheid zijn dus vaak verschillende bronnen van onzekerheid in de invoergegevens belangrijk.

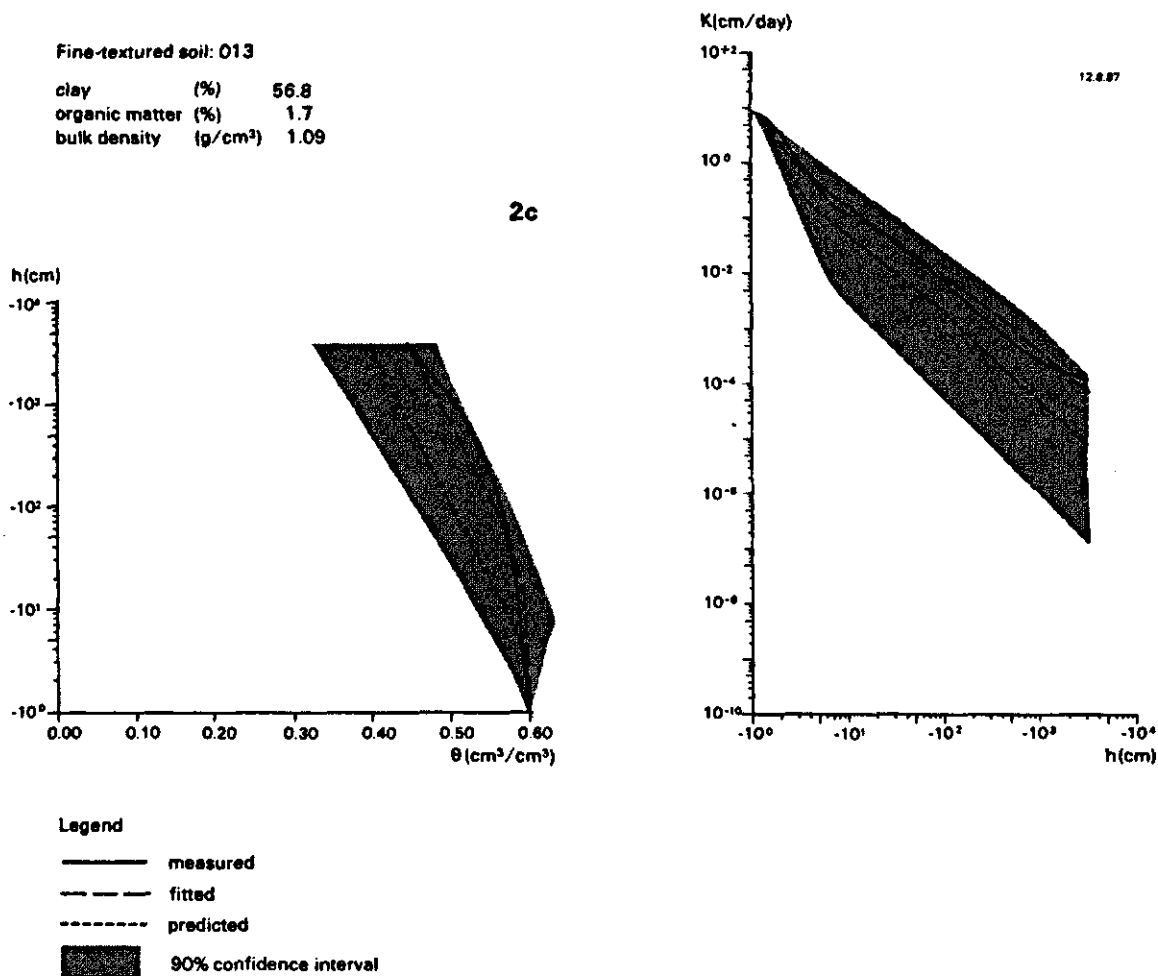


Fig. 7 Gemeten, gefitte en voorspelde bodemfysische karakteristieken voor de Staringreeksklasse 013 'zeer zware klei'

Vertaalfuncties zijn belangrijke schakels bij de vertaling van bodemkundige basisgegevens in invoergegevens voor modelstudies. Het blijkt tevens dat de spreiding in de voorspelde invoergegevens op een aantal manieren kan worden gekwantificeerd. Deze invoergegevens vormen echter geen eindproducten, maar eerder half-producten die in de modellen waarin ze worden toegepast een groot aantal lineaire en niet-lineaire transformaties ondergaan. Als gevolg van deze transformaties resulteert een

bepaalde spreiding in invoergegevens meestal niet in eenzelfde spreiding in modeluitkomsten. Variantie-analyse is een geschikt middel om het relatieve belang vast te stellen van de verschillende bronnen van onzekerheid in invoergegevens. Een dergelijke analyse is uiterst geschikt om richting te geven aan de afweging op welk invoergegeven aanvullende dataverzameling zich dient te richten om tegen de minste kosten en inspanning het hoogste resultaat te behalen.

4.3 Uitwisselbaarheid van verklarende variabelen

Continue-vertaalfuncties zijn regressievergelijkingen die als verklarende variabelen bodemkundige basisgegevens en hun interacties gebruiken. Er kunnen echter complicaties optreden bij de keus welke bodemkundige basisgegevens als verklarende variabelen te gebruiken. Dit kan het best worden uitgelegd aan de hand van een voorbeeld dat Oude Voshaar (1994) geeft voor de situatie waarbij de vertaalfunctie twee verklarende variabelen heeft; X_1 en X_2 . In dit geval zijn er drie mogelijkheden:

- De door X_1 en X_2 gezamenlijk verklaarde kwadraatsom is gelijk aan de som van de door X_1 en X_2 in afzonderlijke modellen verklaarde kwadraatsom. Ook de regressiecoëfficiënten zijn in het gezamenlijke model gelijk aan die voor de afzonderlijke modellen.
- De variabelen X_1 en X_2 verklaren gezamenlijk niet veel meer dan ze in de afzonderlijke modellen ook al doen.
- De variabelen X_1 en X_2 verklaren gezamenlijk veel meer dan de som van de door X_1 en X_2 afzonderlijk verklaarde kwadraatsommen.

In de eerste situatie zijn X_1 en X_2 orthogonaal. In de tweede situatie zijn X_1 en X_2 inwisselbaar en kan de een door de ander worden vervangen. Een voorbeeld hiervan is de pH bepaald in water en in KCl. In deze situatie waarbij de verklarende variabelen sterk zijn gecorreleerd, doet zich het probleem van multicollineariteit oftewel uitwisselbaarheid voor. In de derde situatie zijn X_1 en X_2 aanvullend.

Het gevolg is dat in een gebalanceerde proefopzet (eerste situatie) modelparameters zoals de parameters in de Van Genuchten vergelijkingen, correct worden voorspeld. Ook kan worden verklaard welke verklarende variabelen een grote invloed hebben op de voorspelling van de modelparameters. In dit geval blijft het oorzakelijk verband gehandhaafd en is de interpretatie van de effecten eenduidig, allemaal eigenschappen die in de tweede en derde situatie niet opgaan.

De correlatiematrix van de verklarende variabelen geeft op eenvoudige wijze inzicht of sommige variabelen al dan niet sterk onderling zijn gecorreleerd. Als dit het geval is dan kan de betreffende variabele het best door de gecorreleerde variabele worden vervangen. Multicollineariteit komt vaak voor in observationeel onderzoek waarbij men de gegevens neemt zoals ze zijn waardoor de ongebalanceerdheid toeneemt.

5 Conclusies en aanbevelingen

- 1 Bij SC-DLO is een groot aantal vertaalfuncties aanwezig. Doordat het echter tot op heden ontbrak aan een systematisch overzicht van de beschikbare vertaalfuncties, hebben onderzoekers deze functies veelvuldig opnieuw afgeleid of er in het geheel geen gebruik van gemaakt.
- 2 Omdat directe metingen van invoergegevens voor modelstudies vaak tijdrovend en duur zijn, is het aantrekkelijk bestaande gegevensbestanden te bewerken zodat uit deze bestanden algemene regels oftewel vertaalfuncties volgen.
- 3 Voor veel toepassingen zijn de invoergegevens verkregen uit voorspellingen met vertaalfuncties mogelijkterwijs voldoende nauwkeurig, waardoor soms dure metingen voorkomen kunnen worden.
- 4 Omdat vertaalfuncties worden verkregen door bewerking van een aanwezig gegevensbestand, zijn vertaalfuncties net zo goed, of net zo slecht, als de basisgegevens die eraan ten grondslag liggen.
- 5 Omdat vertaalfuncties worden verkregen uit bewerking op het bestand aan directe metingen, zijn vertaalfuncties geschikt om voorspellingen te doen voor gegevens die binnen de range van basisgegevens liggen (geoorloofd interpoleren), terwijl ze ongeschikt zijn voor het doen van voorspellingen voor gegevens die buiten de range van basisgegevens liggen (onverantwoord extrapoleren).
- 6 Tot op heden worden de vertaalfuncties vooral gebruikt om de gemiddelde waarden te voorspellen van de verschillende invoergegevens in modelstudies. De functies lenen zich echter ook goed op de spreiding in de voorspellingen te kwantificeren. In het geval van klasse-vertaalfuncties kan dit door behalve de gemiddelde waarde ook de waarde plus of min x -keer de standaardafwijking te vermelden. In het geval van continue-vertaalfuncties wordt dit gerealiseerd door nieuwe trekkingen uit de error-variantie-covariantie-matrix.
- 7 Om het gebruik van vertaalfuncties te bevorderen, verdient het aanbeveling dat de spreiding in de vertaalfuncties op één van de boven vermelde wijzen wordt gekwantificeerd.
- 8 Omdat er in simulatieberekeningen allerlei niet-lineaire verbanden worden gelegd, valt niet op voorhand te voorspellen hoe de spreiding in een bepaald invoergegeven zal doorwerken in de spreiding in modelresultaten.
- 9 Via variantie-analyse kan worden achterhaald welk aandeel de spreiding in de afzonderlijke invoergegevens heeft op de spreiding in de uiteindelijke uitkomsten van de modelberekeningen. Op deze manier kan een strategie worden uitgezet voor aanvullende dataverzameling.

Literatuur

- Bakker, J.W., F.R. Boone en P. Boekel, 1987. *Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden*. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, Rapport 20.
- Bakker, J.W., J.J.H. van den Akker, P. Cornelissen en D. Boels, 1995. *Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 318.
- Boesten, J.J.T.I. en A.M.A. Van der Linden, 1991. Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. *J. Environ. Qual.* 20: 425-435.
- Bolt, F.J.E. van der, P. Groenendijk en H.P. Oosterom, 1996. *Nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater in de stroomgebieden van de Beerze, de Reusel en de Rosep. Simulatie van de nutriëntenhuishouding*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 306.1.
- Boogaard, H.L. en J.G. Kroes, 1996. *GONAT, National nutriënt simulations with ANIMO 3.5*. DLO Winand Staring Centrum, Wageningen, Technical Document 41.
- Bouma, J. en J.A.J. van Lanen, 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: K.J. Beek et al. (Eds.). *Quantified land evaluation*. Proc. Worksh. ISSS and SSSA, Washington, DC. 27 April-2 May 1986. Int. Inst. Aerospace Surv. Earth Sci. Publ. no. 6. ITC Publ., Enschede, The Netherlands. p. 106-110.
- Breeuwsma, A., J.H.M. Wösten, J.J. Vleeshouwer, A.M. van Slobbe en J. Bouma, 1986. Derivation of land qualities to assess environmental problems from soil surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 186-190.
- Bronswijk, J.J.B., 1987. Zwel- en krimpprocessen in zware kleigronden. *Cultuurt. Tijdschr.* 6: 379-387.
- Bronswijk, J.J.B. en J.J. Evers-Vermeer, 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Neth. J. Agric. Sc.* 38: 175-194.
- Bronswijk, J.J.B., J.E. Groenenberg, C.J. Ritsema, A.L.M. Van Wijk en K. Nugroho, 1995. Evaluation of water management strategies for acid sulphate soils using a simulation model: a case study in Indonesia. *Agric. Water Manag.* 27: 125-142.
- Brouwer, W.W.M., J.J.T.I. Boesten en W.G. Siegers, 1989. Adsorption of transformation of atrazine by soil. *Weed Res.* 30: 123-128.
- Campbell, G.S., J.D. Jungbauer, jr., W.R. Bidlake en R.D. Hungerford, 1994. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Sci.* 158: 307-313.

Elzinga, E.J., B. van den Berg, J.J.M. van Grinsven en F.A. Swartjes, 1996. *Freundlich isothermen voor cadmium, koper en zink als functie van de bodemeigenschappen, op basis van een literatuuronderzoek*. Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rapport 711501001.

Ernst, L.F., 1962. *Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale open leidingen*. Versl. Landbouwk. Onderz. 67.15. Pudoc, Wageningen, 189 pp.

Feddes, R.A., 1971. *Water, heat and crop growth*. Dissertatie Landbouwuniversiteit Wageningen.

Finke, P.A., J.H.M. Wösten en M.J.W. Jansen, 1996. Effects of uncertainty in major input variables on simulated functional soil behaviour. *Hydrological Processes* 10: 661-669.

Genuchten, M.Th. van, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

Hoekstra, C. en J.N.B. Poelman, 1982. *Dichtheid van gronden gemeten aan de meest voorkomende bodemeenheden in Nederland*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, Rapport 1582.

Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf en H. van Reuler, 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 46: 299-318.

Janssen, R.P.T., F.A. Swartjes, M.A.G.T. van den Hoop en W.J.G.M. Peijnenburg, 1996. *Evaluatie van het evenwichtspartitieconcept voor zware metalen in bodems en sedimenten*. Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rapport 719101027, 42 pp.

Johnson, D.W. en D.E. Todd, 1983. Relationships among iron, aluminium, carbon, and sulfate in a variety of forest soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 47: 792-800.

Krabbenborg, A.J., J.N.B. Poelman en E.J. van Zuilen, 1983. *Standaardvocht karakteristieken van zandgronden en veenkoloniale gronden*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, Rapport 1680.

Massop, H.Th.L. en P.A.J.W. de Wit, 1994. *Hydrologisch onderzoek naar drainageweerstand van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 373, 130 pp.

Oude Voshaar, J.H., 1994. *Statistiek voor onderzoekers*, Wageningen Press, Wageningen, the Netherlands.

Poelman, J.N.B., 1975. Dichtheid van de vaste delen van rivierkleigronden. *Boor en Spade* XIX: 32-38. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Poelman, J.N.B. en Th. van Egmond, 1979. *Uit eenvoudige grootheden af te leiden vocht karakteristieken voor zee- en rivierkleigronden*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, Rapport 1492.

Pomper, A.B., 1996. Schatting van doorlaatfactoren (k-waarden) aan de hand van in boorarchieven aanwezige boorbeschrijvingen. *Stromingen* 2, 4: 37-46.

Schaap, M.G. en W. Bouten, 1996. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. *Water Res. Research* 32: 3033-3040.

Schoumans, O.F., 1995. *Beschrijving en validatie van de procesformulering van de abiotische fosfaatreacties in kalkloze zandgronden*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 381, 52 pp.

Sluijs, P. van der, 1988. *De poriënindex: een karakteristiek voor vergelijking van de pakking van gronden*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, Rapport 2074.

Stolte, J., J.G. Wesseling en J.H.M. Wösten, 1996. *Pedotransfer functions for hydraulic and thermal properties of soil and the tool HERCULES*. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, Report 126, 41 pp.

Tamari, S., J.H.M. Wösten en J.C. Ruiz-Suárez. 1996. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1732-1741.

Vermeulen, J. en R.F.A. Hendriks, 1996. *Bepaling van afbraaksnelheden van organische stof in laagveen: ademhalingsmetingen aan ongestoorde veenmonsters in het laboratorium*. DLO-Staring centrum, Wageningen, Rapport 288, 99 pp.

Vermulst, J.A.P.H., 1992. *Redesign DEMGEN: Een voorstel tot groepering van grondwatertrappen*. LU Wageningen, Vakgroep Waterhuishouding, Rapport 24; RIZA Werkdocument 92.038X, Lelystad.

Vries, D.A. de, 1966. Thermal properties of soils. In : Van Wijk, W.R. ed. *Physics of plant environment*, 2nd ed. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, the Netherlands.

Vries, W. de, 1994. *Soil response to acid deposition at different regional scales; field and laboratory data, critical loads and model predictions*. Dissertatie Landbouwuniversiteit Wageningen.

Vries, W. de en D.J. Bakker, 1996. *Manual for calculating critical loads of heavy metals for soils and surface waters*. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, Report 114.

Wallenburg, C. van, 1988. *De bodemdichtheid van koopveen-, weideveen- en waardveengronden in relatie met bodemkenmerken*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, Rapport 2040.

Wösten, J.H.M. en M.Th. van Genuchten, 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1762-1770.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Technisch Document/Technical Document 18, 66 pp.

Wösten, J.H.M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: E.G. Gregorich and M.R. Carter (Eds.). *Soil quality for crop production*. Advances in soil science, Elsevier (in press).

Niet-gepubliceerde bronnen

Finke, P.A., 1996a. *Beschrijving CLUSPROF; een programma voor de middeling van procesparameters bij bodemschematisatie*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Interne mededeling 426.

Finke, P.A., 1996b. *Beschrijving PTF; een programma voor het schatten van de waarde van procesparameters uit bodemkenmerken bij bodemschematisatie*. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Interne mededeling 425.

Groot, W.J.M. de, 1997. *Vertaalfuncties voor de $Q(h)$ relatie per gecombineerde grondwatertrap*. DLO-Staring Centrum (in voorbereiding).