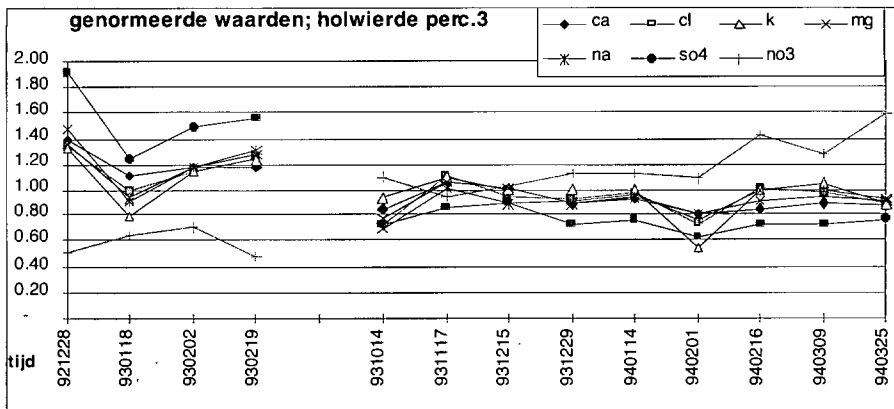


Verblijftijden in de bodem van door drainbuizen afgevoerd water

C.R. Meinardi

Inleiding

Bij een onderzoek naar stroming en samenstelling van het door drainbuizen afgevoerde water op ca. 30 boerderijen in de Nederlandse zeekelegebieden (Meinardi en Van den Eertwegh, 1995, 1997) bleek dat de concentraties van veel verbindingen in het afgevoerde water een regelmatig patroon in de tijd vertoonden. Dit werd vooral duidelijk bij de beschouwing van de situatie op acht bedrijven waar per maand monsters zijn verzameld in de loop van twee of meer drainageseizoenen, zodat een tijdreeks beschikbaar kwam. Per perceel werden meestal drie drains bemonsterd. De drie monsters zijn samengevoegd tot een mengmonster dat is geanalyseerd op de hoofdelementen met inbegrip van stikstof en fosfor. Per boerderij zijn steeds ongeveer vier percelen op die manier bemonsterd. De regelmaat in de gemeten waarden bleek al uit de waarden van de concentraties, maar kwam nog duidelijker tot uiting als de getallen werden genormeerd door ze te delen door de gemiddelde waarde per perceel. Een voorbeeld zijn de metingen van perceel 3 van de boerderij te Holwierde (Fig.1) voor de twee drainageseizoenen 92/93 en 93/94. Het aangegeven verband levert een aardige uitwerking op.



Figuur 1: Genormeerde waarden van de concentraties van de hoofdelementen

Uit figuur 1 blijkt dat het merendeel van de genormeerde concentraties zich binnen een vrij nauwe band beweegt. De waarden voor nitraat vormen een duidelijke uitzondering. De

Kees Meinardi is werkzaam bij het RIVM, Nationaal Instituut voor Volksgezondheid en Milieu, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven, telefoon (030) 274 33 67; fax (030) 274 44 19; e-mail kees.meinardi@rivm.nl.

reden is vermoedelijk dat het nitraat afkomstig is van de wisselende hoeveelheden mest, die de bedrijven per jaar op het land brengen. De andere stoffen hebben hun oorsprong in een afgifte door de bodem die veel constanter is in de tijd. De bodem van de onderzochte boerderijen bestaat uit zeeklei waarin nog steeds een zekere hoeveelheid mariene zouten aanwezig is. De zouten uit diepere lagen dan de doorstroomde toplaag met relatief zoet water bewegen naar boven onder de invloed van diffusie (Volker, 1961). Dit geeft een in de tijd constante toevoer van ionen bij de gekozen tijdschaal van enkele jaren. Diffusie levert een merkbare stroom van zouten op als de verschillen in concentratie groot zijn tussen de in dit geval zoute basislaag en de zoete toplaag erboven. Ook sulfaat lijkt af te wijken van het algemene patroon, maar minder uitgesproken dan nitraat. De concentraties zijn in het begin relatief hoger en aan het eind van de periode lager dan die van de overige stoffen. De afgifte van sulfaat door de bodem is vermoedelijk niet constant in de tijd doordat de afbraak van zwavelverbindingen in de toplaag een rol speelt.

Een zelfde gedrag geldt ook voor tijdreeksen die op de andere boerderijen gemeten zijn. Het waargenomen verschijnsel en de resultaten van andere onderzoekers (Van Ommen, 1988, Bronswijk e. a., 1994 en De Vos, 1987) hebben ertoe geleid om de concentratie van de stoffen in het drainwater gedurende één drainageseizoen (180 dagen vanaf oktober tot en met maart) te beschrijven als functie van de tijd en van de belasting van de bodem.

Eerste benadering van de concentraties in drainwater

De opmerking dat de genormeerde concentraties zich regelmatig gedragen in de tijd heeft aanleiding gegeven tot de opzet van vergelijking. De constanten in die vergelijking volgen uit een calibratie aan de vele metingen op de genoemde acht bedrijven. De vergelijking luidt:

$$c(t) = (0,6 * a_0/b_0 + 0,4 * a_1/b_1) * rt/180 + (0,15 * a_0/b_0 + 0,3 * a_1/b_1 + 0,15 * a_2/b_2 + 0,1 * a_3/b_3 + 0,3 * a_4/b_4) * (1 - rt/180) \quad (1)$$

waarin:

- $c(t)$ = concentratie van de beschouwde stof op tijdstip t (dag) van het door de drains in het beschouwde drainageseizoen afgevoerde water in $g.m^{-3}$, dus ook in $mg.l^{-1}$;
- a_0 = de bijdrage van de beschouwde stof in het kalenderjaar waarin het bemonsterde drainageseizoen aanvangt in $g.m^{-2}.a^{-1}$;
- b_0 = de grootte van het neerslagoverschot in het kalenderjaar waarin het bemonsterde drainageseizoen aanvangt in $m.a^{-1}$;
- $a_{1,2,3}$ = de bijdrage van de beschouwde stof in respectievelijk het eerste, tweede en derde kalenderjaar voorafgaande aan de metingen in $g.m^{-2}.a^{-1}$;
- $b_{1,2,3}$ = de grootte van het neerslagoverschot in respectievelijk het eerste, tweede en derde kalenderjaar voorafgaande aan de metingen in $m.a^{-1}$;
- a_4 = de bijdrage van de beschouwde stof in de voorafgaande periode in $kg.m^{-2}.a^{-1}$;

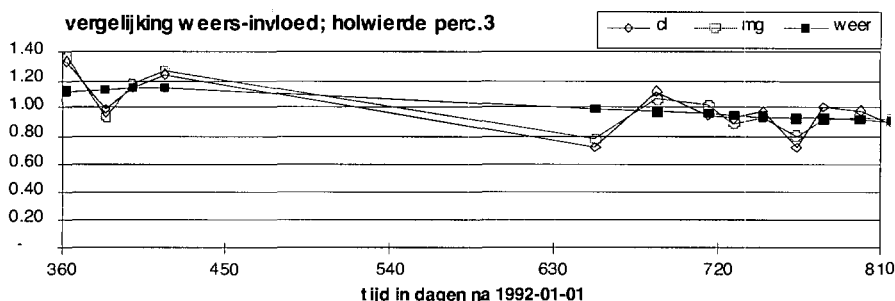
b_4	=	de grootte van het neerslagoverschot in de voorafgaande periode in $m.a^{-1}$;
t	=	de tijd in dagen na aanvang van het beschouwde drainageseizoen (dag);
r	=	een factor die het aandeel water uit de meest recente jaren bepaalt, in de regel is $r = 0,5$ genomen. Voor kleinere r is het aandeel van het meest recente water kleiner en de bijdrage van het oudere water groter (de samenstelling is meer constant);

Vergelijking 1 bestaat uit twee delen, waarvan het eerste deel (de bovenste regel) de invloed beschrijft van de toevoer van het meest recente water en het tweede deel (de onderste regel) de gemiddelde toevoer van water en stoffen naar de drains representeert van een belasting aan maaiveld gedurende de verschillende jaren voor het beschouwde tijdstip t . De gemiddelde bijdragen volgen uit (Bruggeman, 1999) voor een doorstroomde diepte van 2,5m, die is afgeleid uit het uitgevoerde geofysische onderzoek (Meinardi en Van den Eertwegh, 1995). Deze gemiddelde bijdrage (onderste regel) neemt af in de tijd als gevolg van een even grote toename van het meest recente water (de bovenste regel in vergelijking 1). De vergelijking is gebruikt als de kleilagen dikker zijn dan 3,5 m (onverzadigde plus verzadigde zone). Volgens het geofysisch onderzoek komen ook situaties voor waarin de kleilaag dunner is of nagenoeg ontbreekt. In zulke gevallen zullen diepere lagen worden doorstroomd en zullen de bijdragen van ouder water groter zijn. In die situatie kan een aangepaste verdeling worden gebruikt (door de waarde van r aan te passen in de formule). Die oplossing komt hier niet verder ter sprake.

Met vergelijking 1 wordt tot uitdrukking gebracht dat de bijdragen van de twee meest recente jaren lineair toenemen in het beschouwde winterseizoen, maar wel verschillend. Deze toename wordt gecompenseerd door een even grote afname van de bijdragen uit eerdere jaren. De gesommeerde bijdrage over het beschouwde seizoen (180 dagen) in het meest recente jaar is circa 27% en die uit het één na laatste jaar circa 32,5%. De per jaar wisselende grootte van het neerslagoverschot (de factoren b_i) komt tot uitdrukking in verschillende concentraties voor de diverse jaren. Verschillende hoeveelheden van de afvoer van het water per jaar worden verder niet tot uitdrukking gebracht in de concentraties van het drainwater; de onderlinge verhoudingen worden door de jaren heen constant gehouden. De hiermee geïntroduceerde fout is evenredig met de verschillen in $\log(b_i)$ en daarom relatief klein.

Voor gevallen waarin sprake is van een in de tijd constante afgifte van massa (kg) door de bodem als enige bron voor de concentraties in het drainwater geldt dat de factoren a_i ($i = 1 \dots 4$) gelijk zijn. De waargenomen concentraties zullen echter niet constant zijn omdat ook het weer invloed heeft als gevolg van een variabele verdunning door per jaar wisselende hoeveelheden van het neerslagoverschot. De waarden van het lokale neerslagoverschot zijn per jaar voor de onderzochte boerderijen bepaald uit gegevens van het KNMI en de geteelde gewassen, waaruit een gewasfactor is afgeleid (Meinardi en Van den Eertwegh, 1997). Er is rekening gehouden met mogelijke reducties van de verdamping als gevolg van vochttekorten in droge jaren op basis van de HELP-Tabellen (Werkgroep Help, 1987). Deze benadering levert waarden op voor b_i ($i = 1 \dots 4$). Het gedrag van een conservatieve tracer kan worden bepaald door de met vergelijking 1 berekende waarden te normeren naar de

gemiddelde waarde. In figuur 2 is de vergelijking in beeld gebracht voor het gedrag van een conservatieve stof ('weer') en de genormeerde concentraties van chloride en magnesium. De met 'weer' aangeduide lijn is de eveneens genormeerde uitkomst van vergelijking 1. (1) voor een constante toevoer ($a_1 \dots a_4 = C$) van een conservatieve stof.



Figuur 2: Vergelijking van de weersinvloed met het gedrag van Cl⁻ en Mg²⁺

Uit de vergelijking volgt een goede overeenstemming tussen de berekende concentraties van 'weer' en de in het drainwater gemeten concentraties van Cl⁻ en Mg²⁺. De 'weer'lijn geeft de invloed aan van het relatief droge jaar 1993 en het relatief natte jaar 1994. Het is duidelijk dat er ook binnen de beschouwde seizoenen nog fluctuaties optreden. Vergelijking 1 is echter niet gemaakt om fluctuaties binnen een seizoen te beschrijven. Verdere uitwerking is vooreerst niet nodig want die fluctuaties blijken relatief gering te zijn (figuur 1).

In het geval van perceel 3 te Holwierde zijn er dus tenminste 26 meetwaarden die zich bij goede benadering conservatief gedragen. De andere percelen en de andere boerderijen leveren eveneens een groot aantal meetwaarden op die aan dezelfde voorwaarde voldoen. Deze opmerking leidt tot de mogelijkheid om de verdeling van de verblijftijden in de bodem in het door de drains afgevoerde water (de getalswaarden voor a_i in vergelijking 1) nader te bepalen met behulp van de gemeten concentraties.

Toepassing van multiële regressie om de verblijftijdverdeling te bepalen

Voor een toepassing van multiële regressie is een algemene vorm van Vgl.1 gekozen voor zich conservatief gedragende stoffen als basis voor verdere bewerking:

$$c(t) = A_p * \left\{ (p/b_0 + q/b_1) * rt/180 \right. \\ \left. + (0,15/b_0 + 0,30/b_1 + 0,15/b_2 + 0,10/b_3 + 0,30/b_4) * (1 - rt/180) \right\} \quad (2)$$

In vergelijking 2 zijn $c(t)$, t en b_i ($i = 1 \dots 4$) variabelen met bekende waarden en zijn A_p , r , p en q de onbekende constanten. Voor de getalswaarden in de onderste regel (0,15 etc.) zijn de vaste waarden volgens Bruggeman (1999) genomen. Het verschil met vergelijking 1 is dat hierna voor de tijd t (in dagen) geldt dat $t = 0$ op 1 januari. Deze transformatie maakt het mogelijk om gemiddelde jaarwaarden voor b_i te nemen, maar heeft verder geen betekenis. Vanwege de water- en de stoffenbalans moet gelden: $p + q = 1$, dus $q = (1 - p)$. De term A_p , die een in de tijd constante afgifte van stoffen door de bodem representeert, heeft een index p gekregen om aan te geven dat de waarden per perceel dezelfde zijn, maar dat ze

voor andere locaties verschillend kunnen zijn. De waarden van A_p zullen bij benadering gelijk zijn voor de concentraties van één bepaalde conservatieve stof op een gegeven locatie. Om de verdeling van de afvoer nader te bepalen ligt het voor de hand om opnieuw genormeerde waarden te gebruiken (figuur 2). Daarbij is verondersteld dat de genormeerde waarden worden veroorzaakt door een onbekende belasting A_1 , die als eigenschap heeft dat de afgevoerde concentraties $c(t)$ gemiddeld gelijk zijn aan $c = 1$. De waarde van A_1 is daarmee in eerste benadering dezelfde voor alle opgeloste stoffen van mariene oorsprong in een reeks waarnemingen van één bedrijf. Die zal op andere locaties kunnen verschillen doordat de aanwezigheid van mariene zouten in de basislaag op verschillende locaties niet dezelfde zal zijn. De waarden van $c(t)$ zijn per bedrijf alleen afhankelijk van de specifieke verdunning door de neerslag. Vergelijking (2) kan worden geschreven als:

$$c(t) = K * t_1 + L * t_2 + M \quad (3)$$

met de constanten:

$$K = A_1 * p * r$$

$$L = A_1 * r$$

$$M = A_1$$

en de variabelen:

$$t_1 = t * ((1/b_0 - 1/b_1) - 1/b_1)$$

$$t_2 = t * ((1/b_1 - (0,15/b_0 + 0,30/b_1 + 0,15/b_2 + 0,10/b_3 + 0,30/b_4))$$

In vergelijking 3 staan evenveel onafhankelijke variabelen als er te bepalen constanten zijn en dus is toepassing van multiële regressie mogelijk. Bij elke waarde van $c(t)$ horen gegeven waarden van t_1 en t_2 . De methode van de kleinste kwadraten levert waarden voor K , L en M op. Deze factoren bestaan uit een combinatie van de oorspronkelijke factoren. De regressie zal moeten worden toegepast op een selectie van de beschikbare data. Dit kunnen de waarnemingen van meerdere percelen van één bedrijf zijn. Voor meerdere boerderijen geldt de benadering niet omdat daarbij A_1 niet meer constant hoeft te zijn. De gevallen waar de drains water afvoeren vanuit een zandlaag die onder een dunne kleilaag ligt, moeten worden onderscheiden omdat die een andere vorm van de formule vereisen. Daarnaast zijn situaties aan te wijzen waarin de drainafvoer voor een aanzienlijk deel bestaat uit kwelwater vanuit diepere pakketten. Daarvoor geldt de eenvoudige benadering niet. Op grond van het hydrologisch onderzoek kan echter een selectie worden gemaakt waarvoor de benadering wel opgaat. Ook bij de gemaakte selectie blijven er nog ruim voldoende data over om multiële regressie toe te kunnen passen. Uit de gevonden waarden voor K , L en M volgen de gezochte constanten.

4 Beschikbare gegevens

De meetgegevens en andere data (neerslag en verdamping zijn steeds lokaal bepaald) die beschikbaar zijn voor een bewerking kunnen als volgt worden samengevat:

- Holwierde (Gr), 4 percelen, verschillende gewassen, per perceel 13 monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94
- Holwerd (Fr), 6 percelen, verschillende gewassen, per perceel 7 monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94

- Emmeloord (NOP), 4 percelen, verschillende gewassen, per perceel meerdere monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94, aanwijzingen voor optreden van kwel;
- Zeeasterweg(O-FI),), 4 percelen, verschillende gewassen, per perceel meerdere monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94, aanwijzingen voor optreden van kwel;
- Meeuwenweg (O-FI),), 3 percelen, verschillende gewassen, per perceel meerdere monsterdatums verdeeld over 92/93 tot 94/95, aanwijzingen voor optreden van kwel;
- Arkerpad(Z-FI),), 5 percelen, verschillende gewassen, per perceel meerdere monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94, aanwijzingen voor optreden van kwel;
- Middenmeer (W-meer), 5 percelen, verschillende gewassen, per perceel meerdere monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94, aanwijzingen voor optreden van kwel;
- IJzendijke (Zld), 6 percelen, verschillende gewassen, per perceel 7 monsterdatums verdeeld over 92/93 en 93/94

Gegevens van Holwierde, Holwerd en IJzendijke zijn integraal gebruikt voor een analyse met multi-pele regressie, waarbij de verdeling van de jaarafvoeren (p), de door de bodem afgegeven hoeveelheid (A_1) en de relatieve hoeveelheden van het 'jonge' water (r) nader worden bepaald met behulp van de gemeten concentraties van Cl^- en Mg^{2+} . De multi-pele correlatie-coëfficiënt R kan eveneens worden bepaald. Uitwerking met behulp van multi-pele correlatie levert de resultaten van tabel 1 op.

Tabel 1: Multiple regressie vergelijking 2, waarden voor A_1 , p , r en R (n = aantal waarnemingen)

	n	A_1	p	$(1 - p)$	r	R	Opmerkingen
Holwierde	51	0,30	0,53	0,47	0,63	0,48	Cl^- and Mg^{2+} ; alle percelen;
Holwerd	42	0,35	0,32	0,68	0,77	0,28	alleen Mg^{2+} ; alle 6 percelen;
IJzendijke	35	0,25	0,45	0,55	0,87	0,38	alleen Cl^- ; 5 perc. (excl. p3).

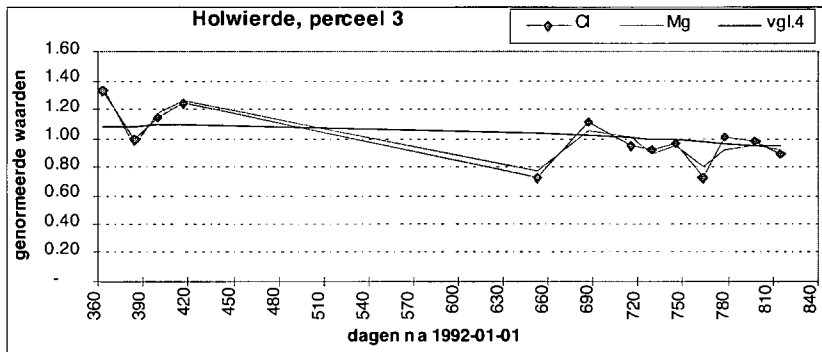
Uit de combinatie van de waarden van n en R blijkt dat er voor alle drie boerderijen een significante correlatie aanwezig is op het 95% niveau (Wijvekatte, 1986). Overigens moet wel worden opgemerkt dat correlatie soms moeilijkheden oplevert, namelijk bij Holwerd als de waarden voor Cl^- worden mee beschouwd en bij IJzendijke die voor Mg^{2+} . In zulke gevallen is wel een correlatie mogelijk, maar worden fysisch onwaarschijnlijke resultaten berekend (waarden voor r en /of p niet tussen 0 en 1). De vergelijking voor de boerderij te Holwierde (figuur 3) wordt met de waarden uit tabel 1:

$$c(t) = 0,30 * [(0,53 / b_0 + 0,47 / b_1) * 0,63 t / 180 + (0,15 / b_0 + 0,3 / b_1 + 0,15 / b_2 + 0,1 / b_3 + 0,3 / b_4) * (1 - 0,63t / 180)] \quad (4)$$

met bekende waarden voor b_0 , b_1 , b_2 , b_3 en b_4 (meteorologie).

Tabel 1 geeft aan dat de bijdragen van het meest recente jaar voor bemonstering relatief groot zijn en toenemen in de tijd. Deze conclusie stemt overeen met de experimenten aan drainagewater waarbij bromide als tracer werd gebruikt (Bronswijk e.a., 1995 en Groen, 1997). De toename van de bijdrage van het voorafgaande (b_1) jaar is minder groot (de toename aangeduid door het eerste deel van vergelijking 4 wordt grotendeels teniet gedaan

door de afname in het tweede deel). Variërende waarden voor de dimensieloze massaflux A_1 komen overeen met verschillende meteorologische omstandigheden op de boerderijen (in IJzendijke was het droger dan in Holwierde). De werkelijke hoeveelheden van de constante massaflux die door diepere lagen wordt afgegeven aan het drainagewater volgen uit de gemeten concentraties en de waarde van A_1 . De gemiddelde concentraties voor Cl^- van 179 mg.l^{-1} en voor Mg^{2+} van 42 mg.l^{-1} in het drainagewater van perceel 3 in Holwierde resulteren bijvoorbeeld in een afgevoerde massa voor Cl^- en Mg^{2+} van respectievelijk 537 and $126 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$.



Figuur 3: Uitwerking van de multipole correlatie te Holwierde

Discussie

In het voorgaande heb ik naar mijn mening aannemelijk gemaakt dat mariene zouten, die nog in diepere lagen van de zeeklei aanwezig zijn, de grootste bron vormen van de zouten in het drainagewater van de boerderijen in het zeekleigebied. De meststoffen (N en P) zijn echter uit bemesting afkomstig. De fluctuaties in de concentraties die tijdens een seizoen optreden kunnen met de gepresenteerde methode niet worden verklaard, maar wel de trend in de gemeten waarden die een gevolg is van verschillen in het neerslagoverschot. De fluctuaties tijdens een seizoen zijn relatief klein ten opzichte van de gemiddelde waarden. Uit de opgestelde vergelijking volgt een schatting voor de bijdragen van de voorafgaande jaren aan de door de drains op een bepaald moment afgevoerde hoeveelheden water en stoffen. Een nog belangrijker conclusie is dat de uitspoeling van verbindingen afkomstig van bemesting hiermee ook kan worden geschat door voor stikstof (N) bijvoorbeeld de jaarlijkse toestroming van N_0 , N_1 , N_2 , N_3 en N_4 ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) naar het grondwater in vergelijking 2 te substitueren. De uit de correlatie gevonden waarden voor de jaarlijkse bijdragen aan de drainafvoer moeten in dezelfde vergelijking worden ingevuld. Deze aspecten zullen verder worden uitgewerkt in een volgend artikel.

Literatuur

Bronswijk J.J.B, W. Hamminga en K. Oostindie (1995) Field-scale solute transport in a heavy clay soil; in: *Water Resources Research*, vol 31, no 3, pag 517–526.

- Bruggeman (1999)** Analytical solutions of geohydrological problems; Elsevier, Amsterdam.
- CHO-TNO, KNMI (1988)** Evaporation and Weather; in: J.C.Hooghart (red) *Proceedings and Information no 39*, CHO-TNO, Delft.
- Ernst (1973)** De bepaling van de transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zone; ICW Nota 755, Alterra, Wageningen.
- Groen, K.P. (1997)** Pesticide leaching in polders: Field and model studies on cracked clays and loamy sands; proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen.
- Meinardi, C.R. en G.A.P.H. van den Eertwegh (1995, 1997)** Onderzoek aan drainwater in de kleigebieden van Nederland; RIVM-rapporten 7149007 en 714801013.
- Ommen, H.C. van (1988)** Transport from diffuse sources of contamination and its application to a coupled unsaturated-saturated system; proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen.
- Volker, A. (1961)** Source of brackish groundwater in Pleistocene formations beneath the Dutch polderland; in: *Economic Geology* **56**, pag 1045–1057.
- Vos, J.A. de (1997)** Water flow and nutrient transport in a layered silt loam clay; proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen.
- Werkgroep HELP (1987)** De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie; Mededelingen Landinrichtingsdienst, nr 176.
- Wijvekate (1986)** Verklarende statistiek, Aula-pocket 39.