
Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland

Deel 2: De ontwatering van de kleigronden

C.R. Meinardi
G.A.P.H van den Eertwegh
C.G.J. Schotten

Onderzoek op 19 boerderijen in het zeekleigebied aan het water dat door drainbuizen wordt afgevoerd, leverde gegevens op over de hydrologische eigenschappen van de bodem. Geofysisch onderzoek gaf aan dat de afvoer van het neerslagoverschot plaats vond in een zoete top-laag van 2 tot 4 m dik als de dikte van de afdekkende kleilaag meer is dan 4 m. Bij een geringere dikte werd het grondwater in de zandige lagen eronder aangevuld zodanig dat ruwweg de helft van het neerslagoverschot doordringt tot een diepte van ongeveer 10 tot 20 m in gevallen dat het kleidek minder dan 1 m dik is. Onderzoek naar de mogelijke bronnen van drinkwater in de Over-Betuwe toonde aan dat het grondwater in de aquifers onder de afdekkende kleilaag vrijwel volledig uit rivierwater bestond dat in omliggende gebieden in de bodem is geïnfiltrerd. Grondwatermodellering voor benedenstroomse kleigebieden leverde op dat verticale stijghoogteverschillen, als gevolg van verschillen in polderpeil of van ont-trekkingen, een aanvulling veroorzaken van het grondwater in de onder het kleidek liggende aquifer. Met een GIS samengestelde kaarten van het neerslagoverschot, de grondwateraan-vulling en de oppervlakkige afvoer voor heel Nederland zijn opgenomen in begeleidende publicaties over de zand- en veengebieden.

Hydrologisch onderzoek van kleigronden

Waterstaatsingenieurs waren de eersten die in Nederland waterbalansen opstelden voor kleigebieden. Dit gebeurde ter bepaling van het neerslagoverschot en de hoeveelheid kwel in de drooggelegde Haarlemmermeer (Elink Sterk, 1897). De resultaten zouden in een moderne studie niet misstaan: De gevonden waarden voor neerslag, verdamping en kwel stemmen overeen met de huidige inzichten. Daarna is lange tijd geen uitvoerig onderzoek meer gedaan naar de aanvulling van het grondwater in kleigebieden. Voor de bepaling van de capaciteit van poldergemalen was de frequentie van voorkomen van regenval in korte perioden (k-daagse regensommen) van meer belang. Verder bleek agrohydrologisch onderzoek voor kleigronden minder hard nodig te zijn dan voor zandgronden. De ervaring had geleerd dat de droogteschade bij klei meestal minder groot was. Bovendien bleek het lastig te zijn om gedetailleerd onderzoek te doen aan kleiige bodems. Voor het meten van de

De auteurs zijn werkzaam bij het Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu te Bilthoven.

eigenschappen van water in kleilagen zijn bijzondere instrumenten nodig en daarnaast vormt de representativiteit van de metingen een probleem.

De openbare drinkwatervoorziening kon het zoute en brakke grondwater in een groot deel van het zeekleigebied niet gebruiken. Ook de winning van drinkwater vormde dus geen reden om onderzoek in die gebieden te doen. Het grondwater onder rivierklei is vaak wel zoet en dat wordt op grote schaal gebruikt als bron voor drinkwater, zelfs in het westen van Nederland waar het grondwater in gebieden naast de rivier brak is. Dit type waterwinning is vaak gebaseerd op oeverinfiltratie (Meinardi en Grakist, 1982). De aanvulling van het grondwater bestaat voor een groot deel uit de horizontale toestroming van water dat in het rivierbed is ingezegen en op grotere diepte soms ook uit grondwater dat van veraf is toegestroomd. De aanvulling door lokale neerslag speelt geen rol van betekenis. Tenslotte is er lange tijd ook nauwelijks onderzoek opgezet vanuit de omgevingshydrologie. De milieuproblemen als gevolg van een diffuse belasting aan maaiveld waren veel ernstiger in de zandgebieden van Nederland. Tegenwoordig krijgen de kwaliteit van bodem en water in de kleigebieden meer aandacht omdat is gebleken dat ook daar waardevolle landschappen kunnen worden aangetast door veranderingen in de kwaliteit van het water. Het neerslagoverschot en de aanvulling van het grondwater in de kleigebieden zijn dus wel belangrijk, maar er is betrekkelijk weinig onderzoek aan gedaan.

Verschillende kleigronden in Nederland

Er bestaat een groot onderscheid tussen de diverse gebieden met kleiige bodems in Nederland (figuur 1), maar voor hydrologisch onderzoek is een grove schematisering, zoals hierna gegeven, vaak wel voldoende.

Zeeklei langs de huidige kust in het noorden en zuidwesten

De zeeklei in een zone langs de huidige kust is afgezet tijdens relatief recente transgressies van de zee. Het toen gevormde patroon van geulen, kwelderwallen en kwelderplaten is nog herkenbaar in het huidige landschap. In de opbouw van de bodem is veel ruimtelijke variatie aanwezig. Zware kleigronden worden afgewisseld met zavelige en zelfs zandige bodems. De variatie is in het zuidwestelijk gebied, dat onderdeel is van de estuaria, sterker dan in het noorden waar de bodem gevormd is in een waddenzee in een tamelijk rustige omgeving. In het zuidwesten komen vroegere beddingen van kreken en rivieren voor waar de bodem vrijwel volledig zandig is tot relatief grote diepte. Voor de grootte van het neerslagoverschot maakt dit niet veel uit, maar de aanvulling van het grondwater en de verblijftijden in de bodem kunnen wel variëren.

Zeeklei in landinwaartse gebieden

De zeeklei meer landinwaarts is meestal langer geleden afgezet en vaak ook onder minder stormachtige omstandigheden. De klei is meestal zwaarder en homogener van opbouw dan nabij de kust. Daar komt bij dat het land na de terugtrekking van de zee lange tijd heeft droog gelegen, waardoor verschillen in niveau werden afgevlakt en zich een relatief dichte (moeras)vegetatie kon ontwikkelen. In de woldstreken van Groningen en de Friese Wouden

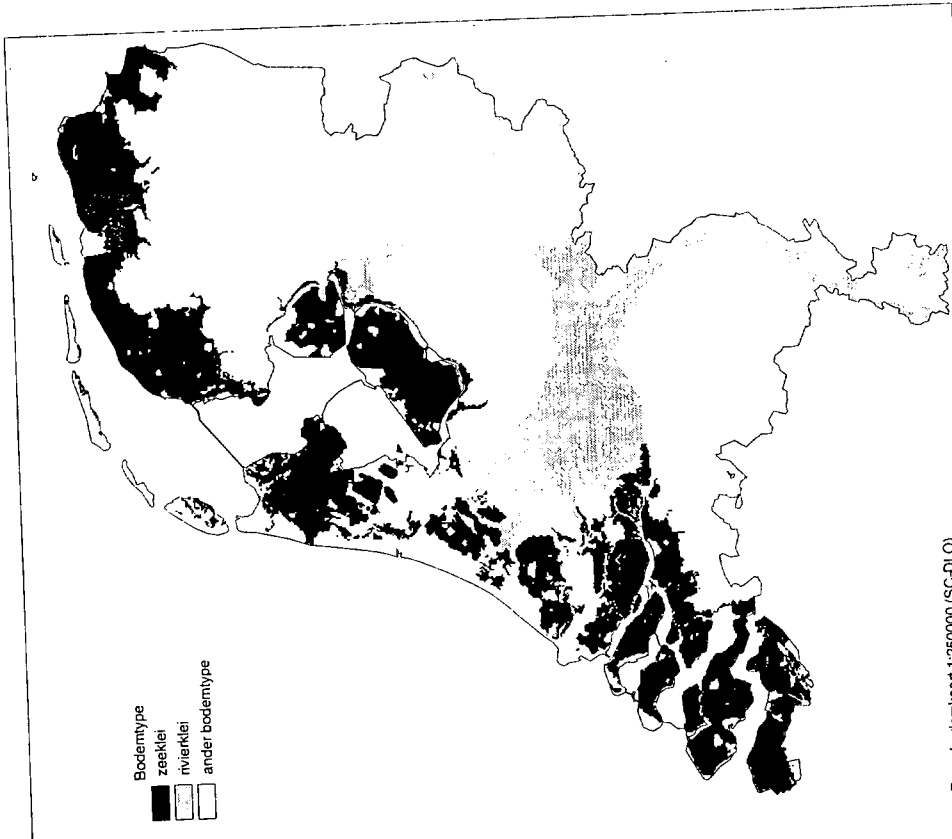
is een veendek ontstaan dat na de ontginning is verdwenen. In de kalkarme toplaag is vaak nog organisch materiaal aanwezig dat de eigenschappen van de klei beïnvloedt. Een ander voorbeeld vormt de zeeklei in de bodem van de droogmakerijen van Holland. In de kommen en in andere lage delen van het landschap van de kustvlakte is duizenden jaren geleden veengroei begonnen die heeft geleid tot enkele meters dikke veenpakketten. Het veen is in de Middeleeuwen eerst ontgonnen voor de landbouw en enige eeuwen daarna afgegraven en weggebaggerd, zodat plassen ontstonden. Die plassen zijn vanaf de zeventiende eeuw drooggemaakt en de weer voor de dag gekomen kleiige bodems zijn opnieuw in cultuur gebracht. De bodem bevat plaatselijk nog veel organisch materiaal. Maar ook in de bodems van deze droogmakerijen zijn soms voormalige geulen te traceren, die door veen en klei met veel organische componenten zijn gevuld.

De bodem van de IJsselmeerpolders

De droogmakerijen in het IJsselmeer hebben een bijzondere bodem. Het gebied is lange tijd een moerassig merengebied geweest op de overgang van zandige (nabij de Veluwe) naar kleiige ondergronden. In die periode is veen afgezet, dat is verspoeld na de vorming van de Zuiderzee. Deze zee heeft dunne kleilagen afgezet met daarin veel organisch materiaal. Na de drooglegging in deze eeuw is in de bodems van de nieuwe polders een relatief sterke scheurvorming (Groen, 1997) opgetreden. De grote scheuren in de toplaag van de bodem veroorzaken een versnelde toestroming naar de drainbuizen die voor de landbouw zijn gelegd. Door de situatie dat een dunne kleilaag op een zandige ondergrond ligt, bij een laag niveau van het maaiveld, kan de toestroming van kwelwater relatief groot zijn. De kwel kan afkomstig zijn van een regionale stroming, maar het kan ook dijkskwel zijn. Bij een dunne en/of goed doorlatende toplaag kan het lokale neerslagoverschot relatief diep de bodem indringen. Ook dit grondwater zal ergens anders in de polders als kwelwater weer voor de dag komen.

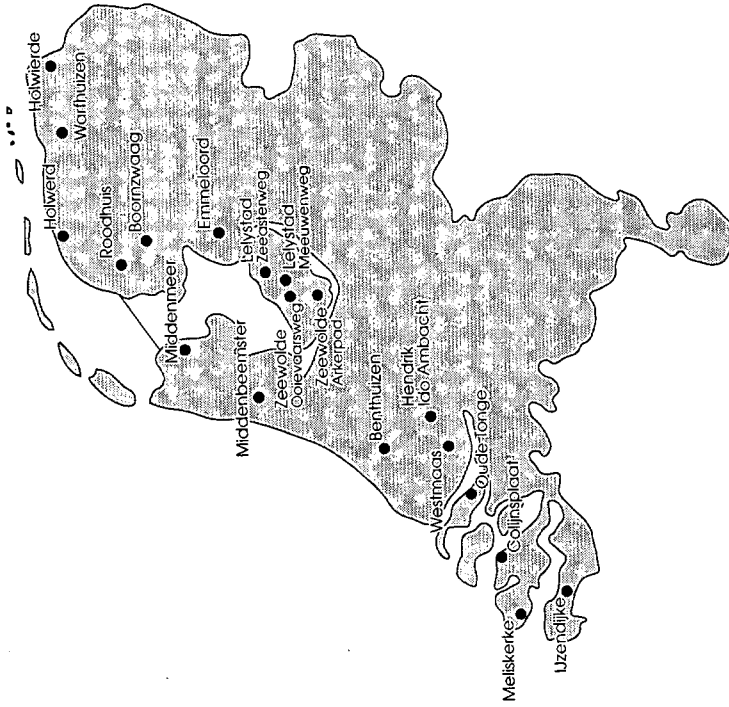
Rivierklei in de bovenstroomse gebieden

Vanaf de punten waar de grote rivieren Nederland binnenkomen tot aan de Holocene kustvlakte stromen ze door dalen waarin rivierklei is afgezet. In de bodems zijn grote verschillen aanwezig. Vroegere en huidige rivierlopen liggen in stroomgordels met een lichte en soms zelfs zandige bodem (Weerts, 1996). Tussen de stroomgordels zijn lagere kommen gevormd waarin zware kleien zijn afgezet. De hoge stroomgordels zijn al vroeg in de geschiedenis voor de landbouw gebruikt en er zijn dorpen op ontstaan. De drassige kommen zijn lang woeste grond gebleven; soms waren ze als griendland in gebruik. Tegenwoordig liggen ze veelal in gras. Door de kleiige toplaag van het gebied kan het neerslagoverschot moeilijk de grond indringen en een groot deel zal oppervlakkig moeten afstromen. In delen van stroomgordels met een zandige bodem kan de lokale neerslag wel diep in de bodem doordringen. Plaatselijk moet ook een diffuse kwel worden afgevoerd van grondwater dat vanuit de omringende gebieden is toegestroomd. Een vrije afwatering van de sloten en weteringen op de rivieren is bijna nergens (meer) mogelijk. Na de bedijkingen is het rivierpeil nog hoger geworden in vergelijking tot de polderpeilen. Afwateringskanalen monden vaak ver benedenstrooms uit.



Bron: bodemkaart 1:250000 (SC-DLO)

Figuur 1: Kleibodems in Nederland



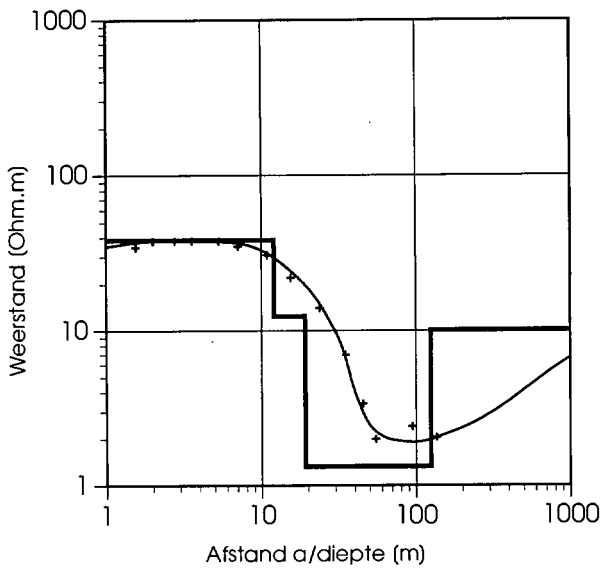
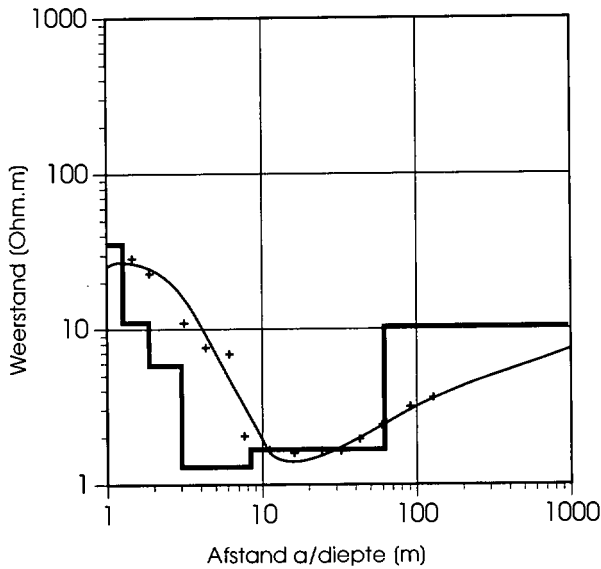
Figuur 2: Onderzochte boerderijen in het zeekleigebied

In het westelijk deel van de provincie Utrecht en in Zuid-Holland liggen de beddingen van de grote rivieren ook in stroomgordels. In het landschap zijn daarnaast verlaten rivierlopen te herkennen zoals de Oude Rijn en de Hollandse IJssel. De beddingen zelf hebben vaak een zandige bodem, maar ernaast is vooral klei afgezet en er is veen gevormd. Huidige en voormalige rivieren en hun oeverlanden liggen als hoge terrassen in het landschap. Ook vroegere veenstromen (Amstel, Gouwe) hebben een hogere ligging doordat het veen van de oevers minder geschikt was voor de winning van turf (De Bakker, 1982). Deze hogere stroken land zijn gebieden waar water inzigt dat het grondwater aanvult dat daarna naar diepere polders stroomt en weer opwelt. Vanuit de beddingen van de rivieren infiltreert water omdat het waterpeil in de rivieren relatief hoog is en de bodem zandig. In diepere aquifers van de kustvlakte is op sommige plaatsen zoet grondwater aanwezig dat uit de zandgebieden (ook de duinen) is toegestroomd en dat diffuus kwelt in vooral de droogmakerijen. Overigens is het grondwater vaak brak en bijna stagnant.

Het onderzoek aan drainwater in het zeeleigebied

Waarnemingsfilters in kleilagen kunnen vaak niet worden afgepompt omdat de bodem te weinig water levert. De stroming van water in kleilagen is onregelmatig door verschillen in doorlatendheid. Een deel van het water kan snel door macroporiën (scheuren) stromen en zal daardoor weinig contact hebben met de vaste bodem. Binnen de grote aggregaten van de klei is water aanwezig dat bijna niet stroomt en dat soms alleen via diffusie uitwisseling heeft met de rest van de bodem. Scheurvorming in klei is een proces dat vooral een rol speelt bij lagen die onder water zijn gevormd en die daarna zijn drooggelegd. Bij afzetting in water zal de klei een losse structuur krijgen. Door ontwatering neemt de waterdruk af en de korreldruk neemt toe. Dit heeft samendrukking van de grond tot gevolg die zich, behalve in zetting van het maaiveld, ook uit in scheuren tussen kleinere en grotere aggregaten (de scheuren zijn in de IJsselmeerpolders soms in de orde van centimeters breed). Het proces wordt versterkt door buisdrainage, die immers ook een verbetering van de ontwatering tot gevolg heeft. De scheurvorming zal het sterkst zijn als de ontwatering relatief diep is zoals in de IJsselmeerpolders, maar ook bij de komkleien in het riviereengebied. De onder drogere omstandigheden afgezette kwelderklei nabij de kust zal minder sterk zijn gescheurd, hoewel een betere drainage ook hier tot (vermoedelijk relatief kleinere) scheuren kan leiden.

Het ligt voor de hand om gebruik te maken van drainbuizen bij onderzoek naar de aanvulling van het grondwater in kleilagen. In veel, maar niet in alle gevallen, zal het neerslagoverschot immers vrijwel volledig door de buizen worden afgevoerd. De afvoer kan worden gemeten. Het is ook eenvoudig om monsters te nemen, waarvan de analyse iets kan zeggen over de lotgevallen van het water. De interpretatie is lastig doordat de drainafvoer vrijwel altijd een mengsel is van water dat verschillende verblijftijden in de bodem heeft gehad. Het RIVM heeft onderzoek uitgevoerd (Meinardi en Van den Eertwegh, 1995; 1997) aan de uitspoeling van meststoffen in het zeeleigebied van Nederland dat gebaseerd was op metingen aan drainwater. Bij het onderzoek omvatte metingen zijn 19 boerderijen van Holwierde in Groningen tot IJzendijke in Zeeuws-Vlaanderen bekeken (figuur 2).



Figuur 3: Verschillen in geoëlektrische metingen bij de boerderij in Colijnsplaat

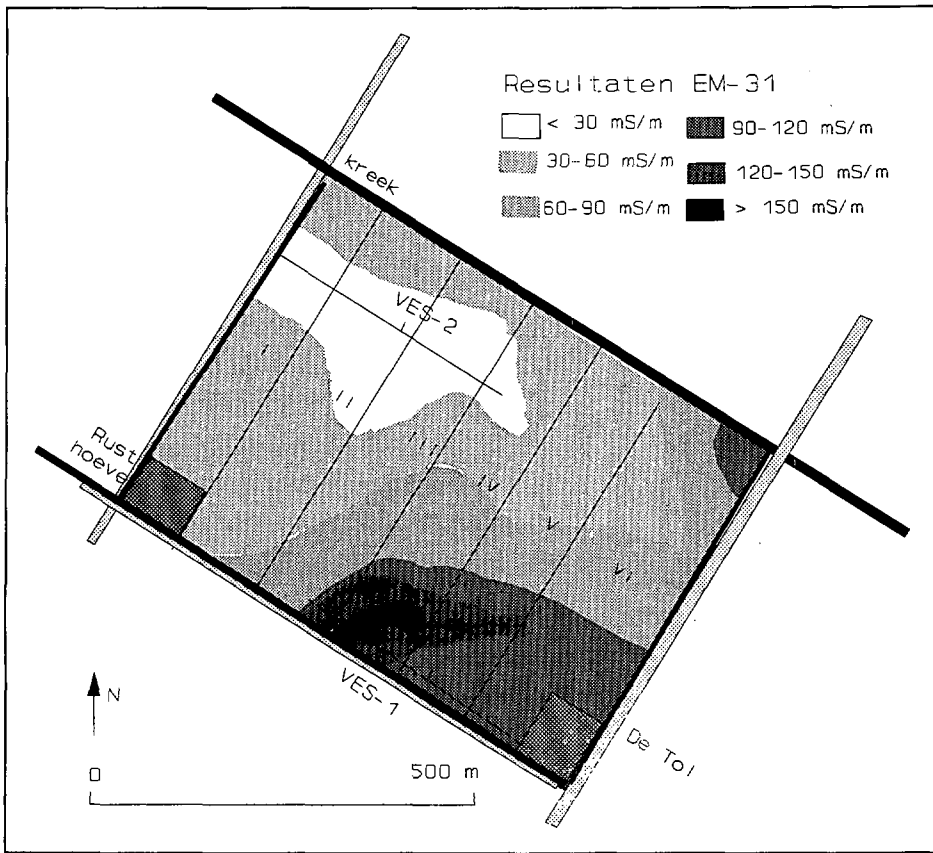
Het neerslagoverschot werd berekend uit lokale metingen en gegevens van het KNMI over de neerslag en berekeningen van de werkelijke verdamping op basis van de KNMI referentie-gewasverdamping en gewasfactoren volgens CHO-TNO, KNMI (1989). Mogelijke verdampingsreducties zijn afgeleid uit de HELP-tabellen. Tenminste tweemaal is een serie monsters van het drainwater bij iedere boerderij genomen en geanalyseerd. Verder is gedetailleerd onderzoek gedaan aan het drainwater van een boerderij in Flevoland en een bedrijf op Noord-Beveland, waar continu de afvoer en de samenstelling van het water van enkele drains zijn gemeten gedurende twee seizoenen.

De ontwateringsdiepte van zeelei

De geofysische metingen (Telford e.a., 1976) op 18 boerderijen leverden interessante resultaten op als het grondwater zout of brak is en alleen de toplaag zoet water bevat. De zoete laag geeft de dikte van de ontwaterde zone aan. Het is onwaarschijnlijk dat de zoete neerslag deze duidelijk herkenbare overgang passeert. Per bedrijf is meestal één geo-elektrische meting (VES) uitgevoerd en zijn vele electromagnetische metingen met een EM-31-instrument gedaan. De EM-31-metingen gaven aan in hoeverre de bodem vergelijkbaar was met de situatie ter plaatse van de VES. Vooral in Zeeland waren soms grote verschillen aanwezig. Een voorbeeld is de boerderij te Colijnsplaat. Te Colijnsplaat zijn twee VES-metingen uitgevoerd op korte afstand van elkaar (figuur 3). Ook is een EM-kartering (figuur 4) van het kavel gemaakt.

De lagen met relatief hogere weerstanden in de eerste VES-meting (figuur 3a) geven aan dat de ontwaterde laag ter plaatse ca. 3 m dik is, maar wel uit klei is opgebouwd. De situatie in de omgeving van VES-1 is zodanig dat het lokale overschot aan neerslag slechts enkele meters diep komt en vanuit die toplaag door de drains en de bodem naar de sloten wordt gevoerd. De diepe lagen bevatten zout grondwater zoals volgt uit de lage weerstanden. Uit de EM-metingen (figuur 4) blijkt dat er elders op het kavel een zone ligt met relatief lage waarden voor de geleidbaarheid. In die zone is een tweede VES-meting (figuur 3b) geplaatst, die uitwijst dat het grondwater tot een diepte van ongeveer 20 m waarschijnlijk zoet is. Kenmerken van deze zone zijn een iets verhoogde ligging van het maaiveld en een zandige toplaag. Bij VES-2 heeft vroeger waarschijnlijk een rivier gelegen die zandige lagen heeft afgezet, waardoor het mogelijk is dat een deel van het neerslagoverschot diep de bodem kan indringen. Een situatie zoals te Colijnsplaat, waarbij op een deel van het kavel een vele meters diepe lens met zoet grondwater is aangetroffen, is ook elders in Zeeland aanwezig. Vaak zal het hierbij gaan om stroomgordels van rivieren of kreken met relatief goed doorlatende bodems. De meest voorkomende situatie in de rest van het zeeleigebied zijn gevallen, zoals beschreven voor de bodem bij VES-1, waar de door het neerslagoverschot doorstroomde laag slechts enkele meters dik is.

De resultaten van de geofysische metingen die zijn uitgevoerd op 18 boerderijen in het zeeleigebied zijn weergegeven in tabel 1. De volledig zoete toplaag blijkt overwegend een dikte tussen 2 en 4 meter te hebben. Voor de bepaling van de dikte van de ontwaterde laag moet vaak een overgangszone tot de zoute lagen worden meegerekend. Uit tabel 1 blijkt dat de ontwaterde toplaag (in gevallen dat de dikte uit de metingen kan worden afgeleid) gemiddeld 3,5 m dik is, met een relatief geringe spreiding rond dat gemiddelde. Aan de oostzijde en in het centrum van Flevoland ligt een dunne kleilaag boven een zandige laag waaruit zoet water toestroomt. Met de gebruikte methoden is geen onderscheid te maken tussen de lokale neerslag en het zoete kwelwater. In dergelijke situaties kan een deel van het neerslagoverschot de bodem indringen, zodat dit water het diepere grondwater voedt. Het grondwater zal vooral naar de sloten en tochten (met een lager peil) stromen en daarna verder worden afgevoerd. De drains zullen overwegend lokale neerslag afvoeren, die vooral de bovenste meters van de bodem is gepasseerd.



Figuur 4: EM-31 data Colijnsplaat

Tabel 1: De diepte van de ontwaterde laag volgens de VES-metingen

	Dikte geheel zoete laag	Diepte zoete laag	Weerstand zoete laag	Opmerkingen
Holwierde	2,8 m	4,0 - 17,5 m	2,5 Ω m	
Warfhuizen	3,8 m	4,5 - 16 m	1,1 Ω m	
Holwerd	2,5 m	3,5 - 19 m	2,4 Ω m	
Roodhuis	2,4 m	2,4 - 4,5 m	3 Ω m	diepere lagen kleilig
Boornzwaag	—	—	—	zout grondwater afwezig
Emmeloord	—	—	—	zout grondwater afwezig
Zeeasterweg OFI	1,6 m	1,6 - 4 m	1,5 Ω m	diepere lagen kleilig
Meeuwenweg OFI	1,0 m	1,0 - 80 m	13 Ω m	brakke kwelstroming
Oolevaarsweg ZFI	—	—	—	zout grondwater afwezig
Arkerpad ZFI	—	—	—	zout grondwater afwezig
Middenmeer	3,0 m	3,0 - 28 m	2,8 Ω m	
Middenbeemster	—	—	—	zout grondwater afwezig
Benthuizen	—	—	—	zout grondwater afwezig
Westmaas	3,2 m	3,2 - 11 m	6 Ω m	diepere lagen licht brak
Oude Tonge	2,5 m	2,5 - 12 m	1,75 Ω m	
Colijnsplaat-1	1,9 m	3,0 - 65 m	1,5 Ω m	dieper zandpakket brak
Colijnsplaat-2	12 m	20 - 110 m	1,1 Ω m	dieper zandpakket brak
Meliskerke	2,4 m	3,4 - 5 m	2 Ω m	dieper zandpakket brak
Ijzendijke*	10 m	10 - 40 m	1,5 Ω m	dieper zandpakket brak

* VES Ijzendijke is niet representatief voor het gehele kavel van de boerderij

In enkele gevallen is geen zout grondwater aanwezig in de bodem. De oorzaak kan zijn dat de omgeving in het geologische verleden minder sterk onder mariene invloed heeft gestaan (Boornzwaag). Soms ook wordt een omhoog gerichte zoete stroming vermoed (Emmeloord, Meeuwenweg en Ooievaarsweg).

Conclusie: De ontwaterde diepte is ongeveer 3,5 m voor bodems die bovenin voor meer dan 4 m uit kleiige lagen bestaan.

Gedetailleerd onderzoek naar de waterbalans van kleiige bodems

Op twee boerderijen in het zeekeiigebied werd gedurende enkele drainage seizoenen de afvoer door de drains en door de ontvangende sloot continu gemeten, namelijk te Oost-Flevoland (Meeuwenweg) en te Colijnsplaat (figuur 2). Uit het onderzoek volgde dat behalve door de drains ook langs andere wegen water moet worden afgevoerd. De extra afvoer zal vooral stroming via de bodem zijn. Kenmerken van afvoer over het maaiveld (greppels en erosiegeultjes) zijn in beide gevallen nauwelijks waargenomen.

a Meeuwenweg

Op een bedrijf aan de Meeuwenweg is de afvoer van drie drains continu gemeten in het seizoen 92/93 (Brongers e.a., 1996) en van eveneens drie drains op een ander perceel in 93/94. De drains zijn 150 m lang en ze liggen op een onderlinge afstand van 48 m. Beide proefvelden hebben een grootte van $150 \times 152 \text{ m}^2$. De drains liggen onder een verhang van 1:1000 op een diepte van 1 m onder maaiveld in een kleilaag die tot ca. mv $-1,20 \text{ m}$ reikt. De watergehalten in de bodem zijn op verschillende plaatsen en diepten (tot mv $-1,30 \text{ m}$) gemeten met TDR-sensoren (Time Domain Reflectometry) (De Vos, 1997). De neerslag is gemeten met lokale regenmeters. De verdamping van het gewas (aardappelen) is geschat aan de hand van de KNMI referentie-gewasverdamping gemeten te Lelystad en gewas-factoren per decade. De waterbalansen van de proefvelden over een hydrologisch jaar zijn:

	1992 - 1993	1993 - 1994
Neerslag (lokale regenmeters)	P = 645 mm	P = 1065 mm
Verdamping (berekend, KNMI/HELP)	$E_G = 305 \text{ mm}$	$E_G = 410 \text{ mm}$
Drainafvoer (aftap-installatie)	Q = 180 mm	Q = 470 mm
Bergingsverandering (TDR-metingen)	dS = 120 mm	dS = 110 mm
Afvoer niet via drains (sluitpost)	ND = 40 mm	ND = 75 mm

De drains hebben nauwelijks kwelwater afgevoerd in de meetperioden, zoals bleek uit de samenstelling van het drainwater. Uit de waterbalansen volgt dat in 92/93 ca. 20% en in 93/94 ca. 15% van de afvoer niet via de drains is gegaan. De waarden zijn wellicht iets hoger doordat de neerslag is onderschat (regenmeter op mv $+40 \text{ cm}$). Ook de afvoer van de sloot waarop de drains uitkomen is gemeten. De afvoeren waren gering. Vermoedelijk is water vanuit de sloot door de zandige bodem en dus niet via de meetstuw naar de nabij liggende Vogeltocht gestroomd. Daarnaast is het mogelijk dat delen van het land water afvoeren dat niet via de drains gaat, maar dat door de bodem naar de Vogeltocht stroomt.

b Colijnsplaat

Het onderzoek te Colijnsplaat (Van den Eertwegh en Meinardi, 1997) is vergelijkbaar met dat aan de Meeuwenweg (continue afvoermeting in vier drains en in de sloot; TDR bodemvochtbepalingen). De drains zijn 275 m lang. Ze liggen op afstanden van 12 m op een diepte van mv – ca. 1 m in een kleilaag met een dikte van minder dan 0,5 m tot meer dan 2 m. De ontwaterde strook heeft een oppervlak van 13200 m² bij de metingen in de seizoenen 94/95 en 95/96. Het slootpeil ligt enkele decimeters onder de mondingen van de drains. In het droge jaar 95/96 (geringe neerslag, hoge referentie-gewasverdamping, teelt van winter-tarwe, geringe verdampingsreductie) is een capillaire opstijging vanuit de onderliggende zandlaag benodigd om de waterbalans sluitend te krijgen. De opstijging wordt gevoed door een toestroming van grondwater (lokale kwel). Uit de waterbalansen volgt dat in 94/95 ca. 30% en in 95/96 ca. 57% van de af te voeren hoeveelheid water niet via de drains gaat maar door de bodem naar de sloten stroomt.

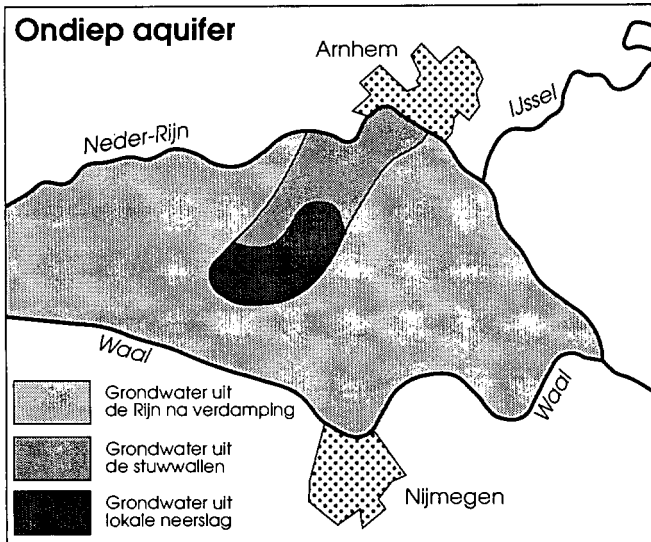
Waterbalansen over een hydrologisch voor de twee meetjaren zijn:

	1994 - 1995	1995 - 1996
Neerslag (lokaal en KNMI stations)	P = 910 mm	P = 590 mm
Verdamping (berekend, KNMI/HELP)	E ₀ = 435 mm	E ₀ = 555 mm
Drainafvoer (aftap-installatie)	Q = 350 mm	Q = 150 mm
Kwel (berekend)	CO = 25 mm	CO = 290 mm
Bergingsverandering (TDR-metingen)	dS = 10 mm	dS = 5 mm
Afvoer niet via drains (sluitpost)	ND = 150 mm	ND = 195 mm

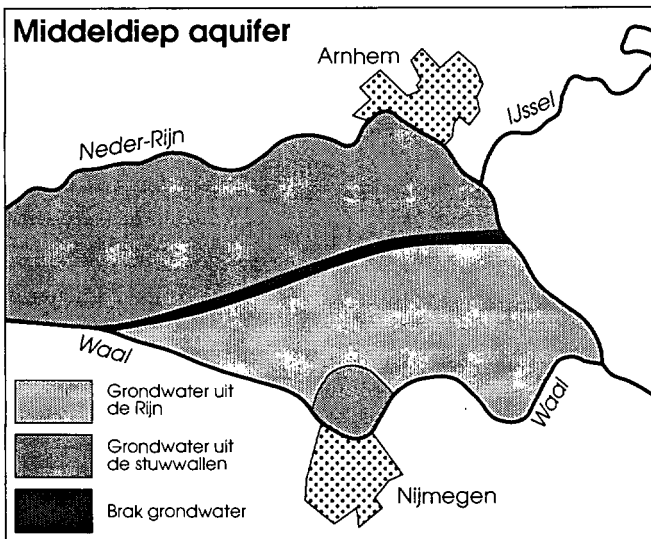
Conclusie: Bij een kleige toplaag die maar een meter dik is, zal ongeveer de helft van het neerslagoverschot niet via de drains worden afgevoerd.

Onderzoek in een bovenstrooms rivierkleigebied: de Over-Betuwe

In de jaren '70 is onderzoek uitgevoerd in de Over-Betuwe (Meinardi, 1983) als voorbereiding voor de stichting van twee grote winplaatsen voor grondwater. Het grondwater bevindt zich in drie watervoerende pakketten. De bovenste aquifer, van bovenpleistocene zanden met een grote doorlatendheid, wordt afgedekt door holocene afzettingen van ongeveer 8 m dik die voornamelijk uit kleilagen bestaan. Hierin zijn stroomgordels met meer zandige bodems en komkleien te onderscheiden. De stroomgordels liggen vooral in de zuidelijke helft van het gebied. Een scheidende laag (Formatie van Kedichem) op een diepte van ca. NAP –30 m, die alleen ontbreekt ten noorden van Elst, ligt boven de tweede aquifer. Onderpleistocene kleige afzettingen vormen een tweede scheidende laag vanaf ca. NAP –80 m, waaronder zich een diepe aquifer bevindt die opgebouwd is uit onder-pleistocene en tertiaire afzettingen. De stroming van het grondwater is in grote lijnen van oost naar west, met de rivier mee, maar in het noorden is ook een noord-zuid gerichte component aanwezig. De herkomst van het grondwater kon worden onderscheiden door duidelijke verschillen in de chemische samenstelling (Meinardi, 1983) en de concentraties aan natuurlijke isotopen van het grondwater (figuur 5).



Figuur 5a: Grondwater van NAP - 0 - 25 m



Figuur 5b: Grondwater van NAP - 30 - 70 m

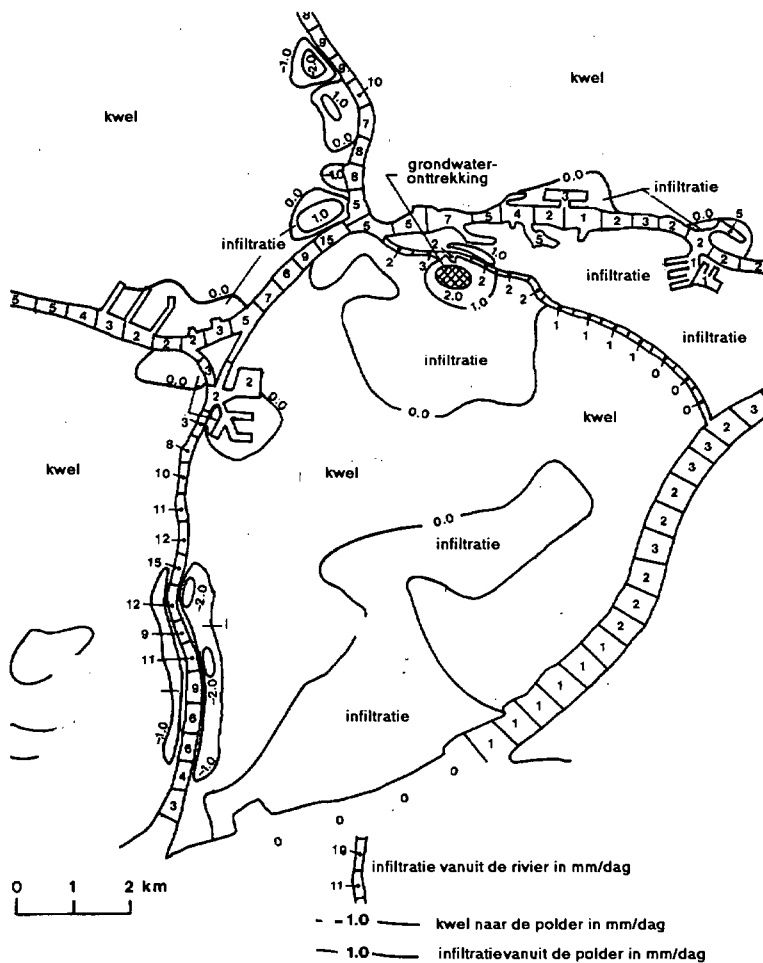
Uit figuur 5 kan het volgende beeld worden afgeleid van de aanvulling van het grondwater op verschillende diepten in de bodem:

- De bovenste aquifer bevat overwegend Rijnwater van voor 1870 dat onderhevig is geweest aan verdamping (figuur 5a). Infiltratie heeft vermoedelijk plaatsgevonden in de uiterwaarden tussen Lobith en Wageningen nadat overstromingswater deels was verdamppt. In een zone ten noorden van Elst is kwelwater van de Veluwe aanwezig. Lokale neerslag komt tot infiltratie op de hoogste en meest zandige delen van stroomgordels.
- De middeldiepe aquifer is aan de noordzijde gevuld met grondwater afkomstig van de Veluwe (figuur 5b). Aan de zuidzijde is het water gelijk aan Rijnwater uit vroeger tijden, dat waarschijnlijk (ver) bovenstrooms vanuit het rivierbed is gepercoleerd.

- Het grondwater in de diepe aquifer wordt aan de noordzijde aangevuld door een horizontale toestroming van grondwater dat op de Veluwe is ingezegen. Het grondwater aan de zuidzijde is het oude Rijnwater en brakker/zouter dan in de middeldiepe aquifer.

Het grondwater van de Over-Betuwe bestaat voor een groot deel uit water dat van elders is toegestroomd. Er is verschil tussen water dat van de Veluwe afkomstig is, Rijnwater (ingedampt) dat in de uiterwaarden rond de Betuwe is geïnfiltreerd en Rijnwater dat vanuit de bedding tot infiltratie is gekomen. De gebieden met een zandige bodem waar de lokale neerslag het grondwater aanvult zijn relatief klein. In alle overige gebieden met een meer kleiige bodem zal vrijwel het gehele neerslagoverschot oppervlakkig worden afgevoerd.

Conclusie: In het bovenstroomse rivierkleigebied bestaat het grondwater overwegend uit van elders toegestroomd water, maar in zavelige bodems met zandige ondergrond kan lokale neerslag naar de diepere bodem infiltreren.



Figuur 6: Kwel en inzijing bij Dordrecht in mm per dag

Onderzoek in een benedenstrooms rivierkleigebied: het Eiland van Dordrecht

Onderzoek van het Eiland van Dordrecht (Meinardi en Heij, 1978) gaf aan dat het water in de bovenste aquifer vanuit omringende rivieren en moerassen (De Biesbosch) afkomstig is. De aard van het water bleek uit de samenstelling en uit concentraties van de isotoop ^{18}O (Rijnwater bevat lagere concentraties dan Nederlandse neerslag door een zuidelijker herkomst). Bij de grondwaterwinplaats was verschil aanwezig tussen putten naast de rivier en de andere putten. Uit de putten bij de rivier wordt door de bodem toegestroomd rivierwater gepompt en uit de andere putten ook grondwater dat lokaal is ingezegen.

De stroming van het grondwater is nagebootst in een model. De peilen in de polders en in de omringende rivieren zijn bij benadering constant gehouden. Het was verder mogelijk waarden te schatten voor de doorlatendheid van de Holocene deklaag en de bovenste aquifer. Een resultaat van het model is de bepaling van de grootte en de richting van de verticale stroming van het grondwater door de deklaag. Voor een situatie zonder winplaats blijkt dat alleen in de zuidelijke polder infiltratie voorkomt van gemiddeld circa 0,1 mm per dag. De infiltratie is een gevolg van stijghoogten in de aquifer die lager zijn dan het polderpeil doordat de naastgelegen polders een dieper peil handhaven. De infiltratie is veel minder dan het neerslagoverschot. Elders heerst een kwelsituatie. Bij het wel invoeren van de grootte van de waterwinning verandert de situatie (figuur 6) drastisch in de zin dat rond de waterwinplaats ook een gebied met (grote) infiltratie ontstaat. Deze infiltratie is groter dan het lokale neerslagoverschot. Er moet dus oppervlaktewater van elders toestromen. De waterbalansen van het grondwater in het Eiland van Dordrecht zijn volgens het model.

Tabel 2: Gemiddelde waterbalansen van de aquifers onder het Eiland van Dordrecht

	In		Uit		
	Zonder/met onttrekking (m^3/dag)		Zonder/met onttrekking (m^3/dag)		
Infiltratie uit rivieren	10700	17900	Kwel	15200	12400
Infiltratie Holl.Biesbosch	300	4200	Onttrekkingen	0	3000
Infiltratie zuidelijke polder	900	900	Drinkwaterwinning	0	11000
Infiltratie bij pompputten	0	3400			
Totaal in	15200	26400	Totaal uit	15200	26400

Uit de situatie van het Eiland van Dordrecht blijkt dat bij verschillen in polderpeil water zal infiltreren vanuit de hoge polders. Het lokale grondwater kan eveneens door infiltratie worden gevoed als door onttrekkingen het peil in het grondwater wordt verlaagd.

Conclusie: Het grondwater in benedenstroomse riviergebieden wordt aangevuld door toestroming door de bodem van water uit naastliggende rivierbeddingen en hun oeverlanden. Aanvulling van grondwater door lokale infiltratie in de polders vindt plaats als het peil van het grondwater is verlaagd door verschillen in polderpeilen of door onttrekkingen.

De afvoer van het neerslagoverschot in geheel Nederland

De grootte van het gemiddelde neerslagoverschot in geheel Nederland, afgeleid uit meteorologische gegevens, vegetatie en bodemkenmerken is gegeven in Meinardi e.a. (1998). Mogelijke componenten van de afvoer zijn stroming over het maaiveld (surface runoff), tussenstroming in de toplaag van de bodem (interflow), inclusief de afvoer door buizen en stroming in het diepere grondwater (base flow). Oppervlakkige componenten van afvoer, zoals de stroming over maaiveld en door de toplaag van de bodem, zijn met de beschikbare gegevens niet van elkaar te onderscheiden en ook overigens is daaraan weinig onderzoek gedaan. De verhouding tussen oppervlakkige afvoer en afvoer door het grondwater kan veranderen als gevolg van verbeteringen in de ontwatering. De aanleg van buizendrainage heeft de afvoer van overtollig water door greppels of vanuit plassen sterk doen verminderen. De tijdelijke of permanente aanwezigheid van goed onderhouden greppels, vooral in grasland en ook in percelen die door buizen worden gedraineerd, wijst echter op het nog steeds voorkomen van afvoer over het maaiveld.

Oppervlakkige afvoer in zandgebieden treedt op in beekdalen (kwel) als de Gt laag is en bij slecht doorlatende lagen in de ondiepe bodem. Kleigebieden zullen wat betreft de afvoer van het neerslagoverschot op een zelfde manier reageren als veengebieden. Beide grondsoorten zijn relatief slecht doorlatend en ze komen vaak samen voor. Een venige toplaag zal vaak op kleilagen liggen en verder zijn in klei soms ook veenlagen aanwezig. De verdeling over de oppervlakkige afvoer en een afvoer door de diepere bodem zal afhankelijk zijn van de dikte van de klei- en/of veenlaag. De ontwaterde laag boven in dikke kleilagen heeft meestal een dikte van minder dan 4 m, zoals uit tabel 1 blijkt. Het is daarom redelijk te veronderstellen dat de aanvulling van het grondwater onder de kleilaag vrijwel nul zal zijn als de laag dikker is dan 4 m. Uit het gedetailleerde onderzoek aan de Meeuwenweg en te Colijnsplaat is gebleken dat de stroming naar de sloten, die niet via de drains gaat, circa 50% bedraagt in gevallen dat de kleilaag ongeveer 1 m dik is. Deze hoeveelheid water is gelijk aan de aanvulling van het diepere grondwater (de basisafvoer). De overige 50% van het neerslagoverschot wordt oppervlakkig afgevoerd. Voor veenlagen geldt een zelfde verdeling. In de klei- en veengebieden van Utrecht en Zuid-Holland geldt vaak een andere situatie. Als de polderpeilen op korte afstand vele meters verschillen, dan kan toch kwel (in de lage polder) en infiltratie (in de hoge polder) optreden, die het grondwater in diepere lagen beïnvloeden.

Voor het overzicht van de afvoer van het neerslagoverschot in Nederland is onderscheid gemaakt tussen de zand- en leemgebieden, de zeeklei- en bovenstroomse rivierkleigebieden en de klei- en veengebieden in laag-Nederland. Meinardi e.a. (1998) geven een schatting van de verdeling tussen oppervlakkige afvoercomponenten en basisafvoer voor zandige bodems. Voor de zeeklei- en de bovenstroomse rivierkleigebieden is aangehouden dat de aanvulling van het diepere grondwater voor kleiige en venige bodems gelijk is aan 50% van het neerslagoverschot indien volgens de Bodemkaart van Nederland de diepere bodem zandig is. Indien ook de diepere bodem uit klei bestaat wordt aangehouden dat 100% van het neerslagoverschot oppervlakkig wordt afgevoerd en dus dat de aanvulling van het diepere grondwater door de lokale neerslag gelijk is aan nul. De bodemkaart 1:50000 geeft de gebieden aan waar op minder dan ca. 1 m onder maaiveld een zandlaag is aangetroffen onder de klei of het veen. De klei- en veengebieden in Utrecht, Noord- en Zuid-Holland

komen apart aan de orde in een volgend artikel over de veengebieden van Nederland. Daarin is ook een landsdekkend beeld van de waarden van de langjaarlijks gemiddelde waarden van de oppervlakkige afvoer voor geheel Nederland, met inbegrip van de zand- en veengebieden, opgenomen (Meinardi en Schotten, 1999).

Literatuur

- Bakker, H. de (1982)** Soils and their geography; in: De Bakker en Van den Berg (red) Proceedings symposium on peat lands below sea level; ILRI publicatie 30, Wageningen.
- Brongers, I., K.P. Groen, G.A.P.H. van den Eertwegh en C.R. Meinardi (1996)** Emissie van bestrijdingsmiddelen en nutriënten naar het oppervlaktewater via drainage; Flevovericht nr.384, RWS, Dir. IJsselmeergebied, Lelystad; RIVM Bilthoven.
- CHO-TNO, KNMI (1988)** Evaporation and Weather; Verslagen en Mededelingen nr 39, (red J.C. Hooghart), CHO-TNO, Den Haag.
- Eertwegh, G.A.P.H. van den en C.R. Meinardi (1997)** Onderzoek aan drainwater in de kleigebieden van Nederland: Metingen en resultaten van het 2de fase onderzoek te Colijnsplaat; RIVM-rapport no. 7149008, Bilthoven.
- Elink Sterk, A. (1897/98)** Over regen, verdamping en kwel in de Haarlemmermeerpolder; in: *Tijdschrift Koninklijk Inst. Ing.*, pag 63–75.
- Groen, K.P. (1997)** Pesticide leaching in polders: Field and model studies on cracked clays and loamy sands; proefschrift LU Wageningen.
- ICW (1976)** Hydrologie en waterkwaliteit van Midden West-Nederland; Regionale Studies no. 9, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Meinardi, C.R. (1983)** Groundwater recharge in the Rhine Fluvial Plain; in: *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, jrg/nr 134, pag 581–611.
- Meinardi, C.R. en C.G.J. Schotten (1999)** De afwatering van veengebieden: oppervlakkige afvoer en grondwateraanvulling in Nederland; ter publicatie aangeboden aan *Stromingen*.
- Meinardi, C.R. en G.A.P.H. van den Eertwegh (1995)** Onderzoek aan drainwater in de kleigebieden van Nederland; RIVM-rapporten no. 7149007 en no. 714801013.
- Meinardi, C.R. en G.J. Heij (1976)** Stroming en samenstelling van zoet grondwater in een West-Nederlands poldergebied (Eiland van Dordrecht); RID-mededeling 78-2, Den Haag.
- Meinardi, C.R. en G.J. Grakist (1985)** Hydrology of bank groundwater withdrawals in the Netherlands; in: *Journal of Hydrology*, nr 78, pag 151–163.
- Meinardi, C.R., J.J. de Vries en C.G.J. Schotten (1998)** Neerslagoverschot en grondwateraanvulling in Nederland: de zand- en leemgebieden; in: *Stromingen*, jrg 4, nr 3, pag 27–41.
- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff en D.A. Keys (1976)** Applied Geophysics; Cambridge University Press, Cambridge.
- Vos, J.A. de (1997)** Water flow and nutrient transport in a layered silt loam clay; proefschrift LU Wageningen.
- Weerts, H.J.T. (1996)** Complex Confining Layers: Architecture and hydraulic properties of Holocene and Late Weichselian deposits in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands; proefschrift Universiteit Utrecht.

Sterk water

In de zeventiende eeuw waren rondtrekkende artiesten geen onbekend fenomeen. Zo verdiende in Frankrijk een man – hij luisterde naar de naam Jean Royen – zijn geld als ‘waterspuier’.

Jean kon ongehoorde hoeveelheden water drinken. Zo dronk hij gedurende lange tijd achter elkaar vele kruiken water leeg, tot groot plezier van de rond hem op het dorpsplein verzamelde menigte.

Maar daar bleef het niet bij.

Wanneer het gejoel van het in eenvoudige kledij gehulde volk het luiden van de tot kerkgang nodende klokken overstemde, liet de man hetzelfde water uit zijn mond spuiten en dat hield hij niet even vol; nee, het duurde wel “zoo lang als tweehonderd schreeden ofte wel den duur van den eenenvijftigsten Psalm uit den Bijbel”.

Hij was in het ganse land een gevierd persoon.

MudV