
Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland

Langjaarlijkse gemiddelden voor de zand- en leemgebieden

C.R. Meinardi
C.G.J. Schotten
J.J. de Vries

Langjaarlijkse gemiddelden van het neerslagoverschot en de aanvulling van het grondwater in Nederland zijn onderzocht met behulp van metingen van de tritium-concentraties. De resultaten voor situaties met een zandige bodem kwamen overeen met de benadering van de werkelijke gewasverdamping op basis van meteorologische gegevens, gewasfactoren en een schatting van mogelijke reducties van de verdamping volgens de HELP-methode. In bepaalde gevallen bleek de aanvulling van het grondwater aanzienlijk lager te zijn dan het neerslagoverschot. Het overschot moet oppervlakkig worden afgevoerd door stroming over het maaiveld of een tussenstroming, soms in combinatie met buisdrainage. De hoeveelheid van de oppervlakkige afvoer is gerelateerd aan de grondwaterstand (kwel) en/of aan de aanwezigheid van slechtdoorlatende lagen in de ondiepe bodem. Voor gebieden met een natuurlijke vegetatie is tevens gebruik gemaakt van hydrochemische beschouwingen om een relatie te leggen tussen het neerslagoverschot en meteorologische factoren. De verschillende gegevens zijn nader uitgewerkt met behulp van Geografische Informatie Systemen hetgeen een kaart opleverde van het neerslagoverschot voor heel Nederland. Kaarten van de grondwateraanvulling en van de oppervlakkige afvoer worden gegeven in aansluitende publicaties over de klei- en veengebieden.

De afvoer van het neerslagoverschot in Nederland

Uit divers onderzoek is een discrepantie gebleken tussen het neerslagoverschot, zoals dat kan worden berekend uit waterbalansen voor grote gebieden of uit meteorologische en landbouwkundige gegevens (met gewasfactoren en schattingen van mogelijke reducties van de verdamping) en bepalingen van de aanvulling van het grondwater op basis van tracers. In een aantal van de onderzochte situaties is het aannemelijk dat een deel van het neerslagoverschot oppervlakkig af zal stromen, niet alleen in klei- en veengebieden, maar ook in zandgebieden met slecht doorlatende lagen nabij het oppervlak. De stroming vindt deels plaats als een stroming over maaiveld, deels als tussenstroming (interflow) en deels als een

C.R. Meinardi en C.G.J. Schotten zijn werkzaam bij het laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu te Bilthoven.

J.J. de Vries is werkzaam bij de Faculteit der Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit te Amsterdam.

combinatie van onverzadigde en verzadigde stroming nabij het freatisch vlak. Deze oppervlakkige stroming draagt niet bij aan de voeding van het eigenlijke grondwater en zal dus ook niet door een regionale stroming van het grondwater als basisafvoer worden afgevoerd. Dit artikel over de zand- en leem-gebieden van Nederland betreft de aanwijsbare en op algemene kaarten weergegeven eigenschappen die aan dit verschijnsel ten grondslag liggen. De effecten ervan op de oppervlakkige afstroming en de aanvulling van het grondwater kunnen worden gekwantificeerd door de resultaten van het tracer-onderzoek te vergelijken met de relatief eenvoudige methode die gebaseerd is op gewassen en meteorologische gegevens. Uit de vergelijking blijkt dat de grondwateraanvulling gelijk is aan het langjarige gemiddelde neerslagoverschot voor situaties waar een oppervlakkige afvoer ontbreekt. De eenvoudige methode levert dus een goede benadering op van het gemiddelde neerslagoverschot, zodat de waarden in kaart kunnen worden gebracht voor het landelijk gebied van Nederland. De situaties in de klei- en in de veengebieden, waar oppervlakkige afstroming van het neerslagoverschot een nog belangrijker rol speelt, komen aan de orde in twee aansluitende artikelen. In het derde artikel zullen voor Nederland kaarten gepresenteerd worden met gemiddelde waarden van de oppervlakkige afstroming en de aanvulling van het grondwater, die samen het neerslagoverschot afvoeren.

Neerslagoverschot en aanvulling van het grondwater

Bijna elk hydrologisch probleem in Nederland heeft te maken met het neerslagoverschot, dat gelijk is aan het verschil tussen neerslag en verdamping. De ontginners van 1000 jaar geleden moesten al rekening houden met het af te voeren water bij het bepalen van de slootafstanden. Een afgeleide vorm van het neerslagoverschot, uitgedrukt als maatgevende afvoer, wordt nog steeds gebruikt bij het ontwerpen van watergangen en gemalen. De voor verdamping beschikbare hoeveelheid water bepaalt verder de opbrengst van gewassen. Tegenwoordig passen boeren in droge tijden soms berekening toe om voldoende water voor de verdamping van de gewassen te verkrijgen. De neerslag die niet verdampt, is de hoeveelheid water die van nature beschikbaar is voor de grondwateraanvulling, die een belangrijke bron voor de drinkwatervoorziening is. Vanuit die optiek wordt het overschot aan neerslag ook wel de nuttige neerslag genoemd. Neerslagoverschot en aanvulling van het grondwater spelen een grote rol bij de omgevings-hydrologie die voor het natuurlijke milieu van belang is. Neerslag en verdamping bepalen de aard van de begroeiing in natuurgebieden. Het neerslagoverschot is het water waarin de door bemesting of atmosferische depositie op de bodem gebrachte stoffen oplossen, zodat bodemwater met bepaalde concentraties aan stoffen ontstaat. De opgeloste stoffen worden meegevoerd met de stroming van het water. Uiteindelijk (maar vaak niet terzelfder tijd) zullen het water en de stoffen in beken en rivieren terecht komen en tenslotte in zee.

Kunstmatige infiltratie van water vindt plaats in de bodem van de duinen waar rivierwater naar toe wordt gebracht om de aanvulling van het grondwater te vergroten. Ook in andere gebieden zijn bepalingen van het neerslagoverschot en de grondwateraanvulling niet altijd eenvoudig. De belangrijkste vorm van verdamping in veel gebieden is de transpiratie door planten waardoor water naar de atmosfeer verdwijnt. Maar ook uit een kale bodem verdampt water. Een deel van de neerslag zal uit plassen of vanaf bladeren verdampen. De hoeveelheid neerslag die door boomkruinen wordt opgevangen (interceptie) en van

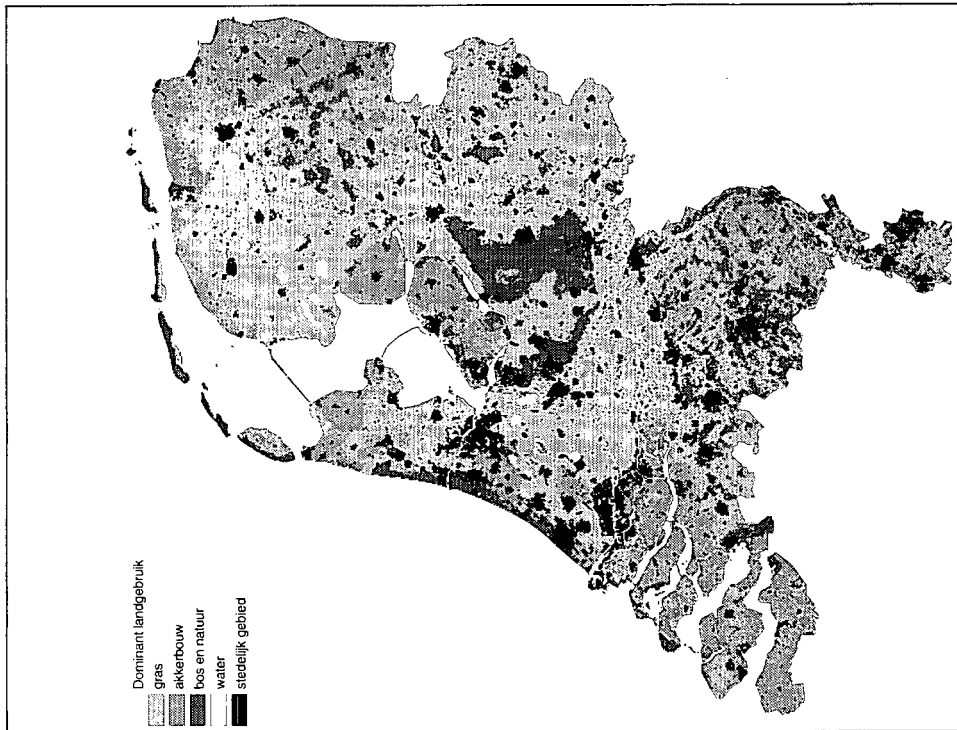
daaruit verdampt, kan honderden mm per jaar bedragen. De verschillende vormen van verdamping worden samengevat in het begrip evapotranspiratie (kortweg verdamping).

In bebouwde gebieden zal water over het verharde oppervlak afstromen naar de drainage. Een deel van de neerslag in stedelijke gebieden zal via riolen tot afvoer komen en niet door de bodem gaan. Zelfs in het vlakke Nederland kan het voorkomen dat water over het maaiveld naar de sloten stroomt, door greppels of vanuit plassen. Dit verschijnsel komt nog vaker voor in hellende gebieden. In de meeste gevallen zal de neerslag echter in de bodem dringen. Het wordt bodemwater, maar niet altijd grondwater. Een deel kan ondiep onder maaiveld afstromen. Deze afvoer wordt met tussenstroming (Engels: interflow) aangeduid. Een bijzondere vorm is de afvoer naar drainbuizen. Hoewel dit water vaak door een met water verzadigd deel van de bodem stroomt, wordt het hier niet tot het eigenlijke grondwater gerekend. Hier wordt onder grondwater het water in de bodem verstaan dat deelneemt aan een regionale stroming. De voeding van dit grondwater bestaat uit het neerslagoverschot minus de hoeveelheden die oppervlakkig tot afstroming komen. Het onderscheid tussen bodemwater en grondwater is echter niet altijd even duidelijk en bovendien kan de verdeling door menselijke ingrepen veranderen (buisdrainage). In het volgende worden waarden afgeleid voor de grondwateraanvulling en de oppervlakkige afstroming in de zand- en leem-gebieden van Nederland. De situatie in de klei- en veengebieden komt aan de orde in aansluitende artikelen.

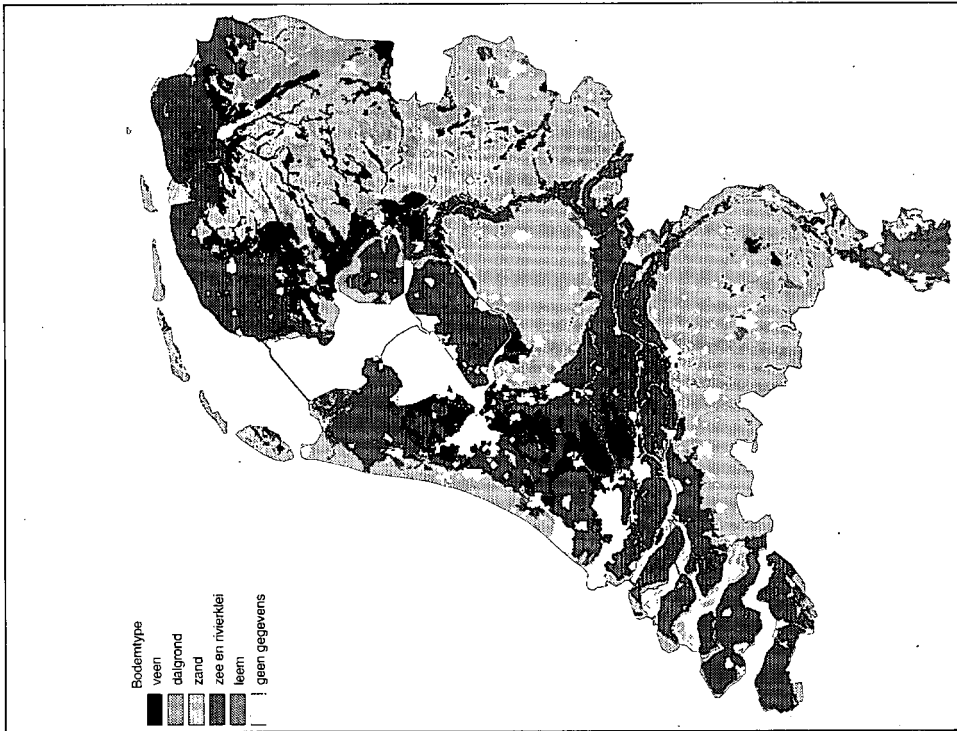
Relatie met bodem en landschap

Neerslagoverschot en aanvulling van het grondwater zijn niet overal even groot en ook niet overal aan elkaar gelijk. Vergelijk een open terrein en een gebied met een dichte vegetatie: de vegetatie bepaalt de grootte van de verdamping en daarmee van het neerslagoverschot. Ook de aard van de bodem is van belang. De afwezigheid van sloten in een groot deel van de zandgebieden geeft aan dat het gehele neerslagoverschot in de grond zal verdwijnen en dus het grondwater aanvult. Toch zijn er in het zandgebied ook zones met een dicht net van sloten, waar een deel van de neerslag niet diep in de bodem zal doordringen maar oppervlakkig zal worden afgevoerd. De oorspronkelijk kleine percelen in het kleigebied maken het mogelijk dat een groot deel van de neerslag over of door de ondiepe bodem zal afstromen naar de sloten. In het kleigebied zijn verschillen aanwezig, bijvoorbeeld tussen de zware komkleien in het gebied van de grote rivieren en de lichte zavelgronden in Zeeland. De lokale neerslag kan dieper doordringen in zavelige bodems. Voor venige bodems geldt dat het veen niet eens zou zijn ontstaan als de bodem goed doorlatend zou zijn geweest, of als de afwatering door beken of kreken geen problemen zou hebben gegeven. In veel gevallen zijn veenlagen thans aan afbraak onderhevig. De slechte doorlatendheid van de bodem of een gebrekkige afstroming zal echter nog steeds de aanvulling van het grondwater grotendeels of helemaal verhinderen.

De vegetatie is belangrijk voor het neerslagoverschot en het bodemtype bepaalt mede de aanvulling van het grondwater. Een nadere beschouwing moet op bodem en vegetatie worden gebaseerd. Hoofdtypen van het landgebruik in het landelijk gebied (figuur 1) zijn grasland, akkerbouw, bos en overige natuur. Een deel van het landelijk gebied wordt ingenomen door wegen, bebouwing en andere verharde oppervlakken, die verder buiten beschouwing worden gelaten. Een eerste indeling van de bodem (figuur 2) is in zand-, leem-, klei- en veengronden. De neerslag kan op een directe manier worden gemeten maar de evapo-



Figuur 1: Landgebruik in Nederland



Figuur 2: De bodem van Nederland

transpiratie (verdamping) niet. De verdamping kan slechts indirect worden bepaald op basis van meteorologische en bodemkundige grootheden en de aard van het gewas. Een verdere bewerking levert waarden op voor de werkelijke verdamping.

Onderzoek in de zandgebieden van Nederland

In de zandgebieden is om verschillende redenen veel hydrologisch onderzoek uitgevoerd:

Landbouw

De Nederlandse zandgronden zijn sinds anderhalve eeuw op grote schaal ontgonnen voor de landbouw. In droge zomers bleek vaak droogteschade voor te komen. Daarom is onderzoek gedaan naar de evapotranspiratie (verdamping) van gewassen onder verschillende omstandigheden. De huidige benadering is dat de verdamping van een bepaald gewas afgeleid kan worden door eerst de referentie-gewasverdamping E_r volgens Makkink (1960) te bepalen uit gemeten meteorologische grootheden (KNMI-overzichten). De E_r wordt vermenigvuldigd met specifieke gewas-factoren die per decade (10 dagen) in het groeiseizoen verschillen (CHO-TNO, KNMI, 1988). De zo berekende waarde voor de potentiële verdamping E_p geldt als de planten optimaal water aan de bodem kunnen onttrekken. Afhankelijk van de aard van de bodem en de vochttoestand zal het beschikbare bodemvocht soms niet voldoende zijn om in de behoeften van planten te voorzien. Dit leidt tot een reductie van E_p en dus een vergroting van het neerslagoverschot. Voor een gemiddelde meteorologische situatie zijn waarden voor de verwachte reductie van de verdamping opgenomen in de HELP-tabellen (Werkgroep HELP-Tabel, 1987). Daarmee wordt het mogelijk om gemiddelde waarden voor E_a (a = 'actual') te bepalen voor de diverse landbouw-gewassen en dus bij een bekende neerslag P ook voor het verschil $I_a = (P - E_a)$. Deze methodiek kan ook worden toegepast voor natuurlijke vegetaties: sommatie levert een gemiddelde waarde op voor gebieden met een gemengde vegetatie.

Drinkwatervoorziening

De ontwikkeling van de openbare drinkwatervoorziening op het platteland in het begin van de twintigste eeuw was gebaseerd op het gebruik van grondwater. In de zandgebieden mocht de onttrekking niet meer zijn dan de nuttige neerslag. Daarom was de bepaling van de nuttige neerslag met een waterbalans vaak onderdeel van geohydrologische studies. Meestal werd aangenomen dat het verschil tussen neerslag en verdamping volledig aan het grondwater ten goede kwam en dus inderdaad nuttige neerslag zou zijn. Verschillende onderzoekers (zie Thunnissen, 1987) hebben echter aannemelijk gemaakt dat ook in de zandgebieden een deel van de neerslag oppervlakkig af zal stromen.

Milieuproblematiek

De intensieve veeteelt heeft vooral in de zandgebieden sinds 1970 een grote vlucht genomen. De belasting van de bodem met kunstmest en vooral met dierlijke mest nam toe,

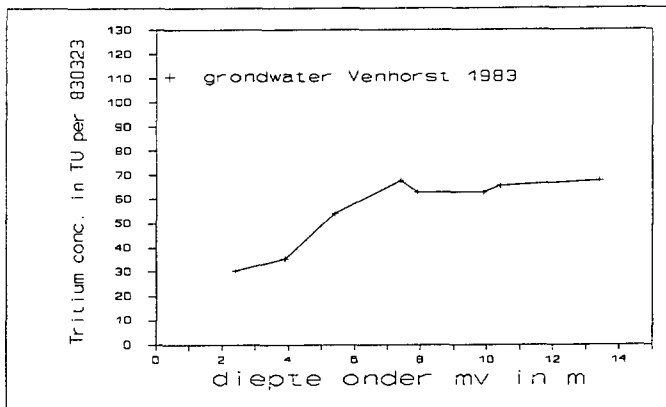
evenals het gebruik van andere chemicaliën, zoals bestrijdingsmiddelen. Het gevolg was dat thans in het grondwater en in het oppervlaktewater hoge concentraties aan nutriënten voorkomen. In het grondwater komen op veel plaatsen verhoogde concentraties aan nitraat voor en in het oppervlaktewater zijn de concentraties aan fosfaat soms hoger dan gewenst is. In het begin was het vooral nitraat dat zorgen baarde en daar is dan ook relatief veel onderzoek aan gedaan. Zowel het neerslagoverschot als de aanvulling van het grondwater waren daarbij van belang. De eerste zorgt voor een verdunning van de aanwezige nitraat en de tweede voor de snelheid van percolatie in de bodem en de diepte van doordringen van de meegevoerde stoffen.

Grondwateraanvulling en oppervlakkige afvoer in zandgebieden

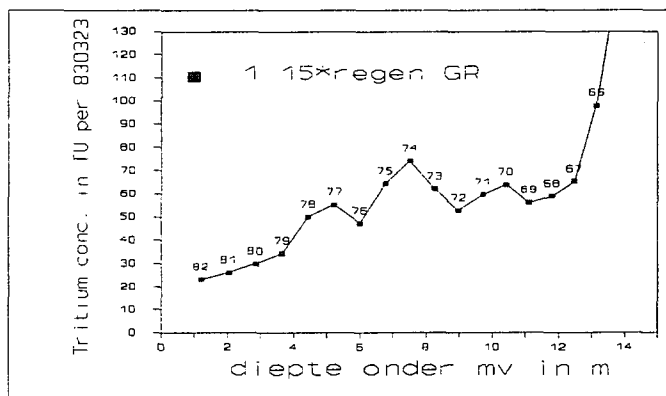
Het is soms mogelijk om waarden voor het neerslagoverschot te schatten met behulp van de samenstelling van het grondwater. Evapotranspiratie veroorzaakt indamping van de concentraties in het water en omgekeerd kan de verdamping worden berekend als de indamping bekend is. De verticale snelheid van het ondiepe grondwater kan ook worden bepaald uit waarnemingen aan de concentraties van tritium (^3H) in het grondwater. Vergelijking met de gehalten in de lokale neerslag levert een datering van het grondwater op en daarmee een snelheid van percolatie (zie figuur 3). Uit de tritium-metingen bleek dat over of aan maaiveld soms ook een zekere hoeveelheid water afstroomt, die dus niet bijdraagt aan de aanvulling van het grondwater. Deze oppervlakkige afvoer moet van het neerslagoverschot worden afgetrokken bij de bepaling van de grondwateraanvulling.

De diverse manieren om het neerslagoverschot te bepalen zijn vanuit verschillende doelstellingen ontwikkeld. De schatting van de verdamping van landbouwgewassen was gericht op de waterbehoefte van specifieke planten tijdens kort durende droge perioden in het groeiseizoen. Voor natuurlijke vegetaties zijn de schattingen ruwer. Bij de winning van grondwater werden langjarige gemiddelden van de mogelijke aanvulling onderzocht voor gebieden met een gemengde vegetatie. Voor de hoedanigheid van bodem en grondwater zijn zowel het neerslagoverschot in specifieke jaren (en soms zelfs in kortere perioden), als de langjarige aanvulling van het grondwater van belang. Dit geldt voor lokale situaties maar ook voor grotere gebieden. In het volgende zal nader worden ingegaan op de langjarige gemiddelden voor grotere gebieden.

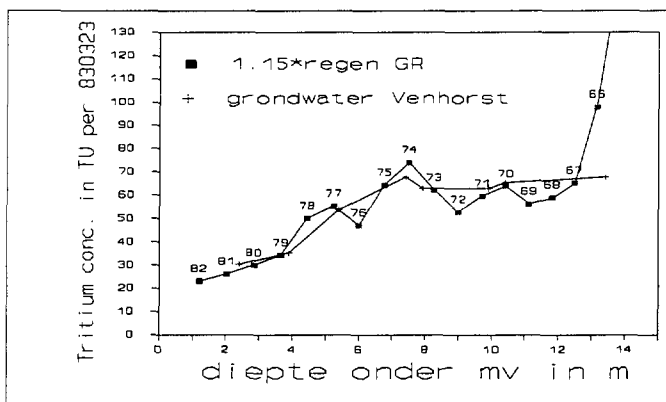
Metingen van tritium (^3H) in het grondwater zijn van grote waarde bij de bepaling van het neerslagoverschot en de grondwateraanvulling. Tritium gedraagt zich bijna als een 'ideale tracer', doordat het onderdeel is van watermolekulen. De gehalten in de neerslag, die na 1950 zijn gemeten, hebben karakteristieke waarden in de tijd die daarnaast op een bekende manier ruimtelijk variëren over Nederland. Een factor f geeft de vaste verhouding aan tussen de ^3H -concentraties in de lokale neerslag en die te Groningen (referentie), die door regionale verschillen wordt veroorzaakt. Herkenning van de neerslag-waarden als horizonten in het grondwater levert een datering op van het tijdstip van infiltratie en daarmee een bepaling van de verticale snelheden van het water in de bodem. De berekende snelheid is de volumestroom-dichtheid gedeeld door de porositeit van de bodem. Meinardi (1994) heeft vele ^3H -metingen in grondwater van zandgebieden vergeleken met concentraties in de lokale neerslag en verticale snelheden van het grondwater afgeleid. De volumestroomdicht-



Figuur 3a: ^3H in grondwater te Venhorst in 1983



Figuur 3b: ^3H in regen in de tijd en naar de diepte



Figuur 3c: Vergelijking grondwater en regen te Venhorst

heid aan maaiveld, of eigenlijk bij het freatisch vlak, moet gelijk zijn aan het neerslagoverschot minus het water dat eventueel langs het maaiveld verdwijnt. De resultaten zijn vergeleken met bepalingen gebaseerd op balansen, landbouwkundige schattingen en samenstelling van het grondwater. De porositeit van zandige bodems bleek gelijk te zijn aan $p = 0,35$ (0,40 in de duinen). Een vergelijking van de interpretaties van de tritium-metingen voor droge gronden (hoge Gt, zonder ondiepe slecht doorlatende lagen) en de waarden die afgeleid konden worden uit landbouwkundige methoden levert vaak een goede overeenstemming op.

Een voorbeeld is het grondwater te Venhorst (figuur 3), waarvan de tritiumconcentraties in 1983 op acht diepten zijn gemeten. De interpretatie van het tritiumprofiel via 'curvefitting' levert, bij $D = 60$ m (dikte aquifer), waarden op voor f en I_a (werkelijke grondwateraanvulling): $f = 1,15$; $I_a/p = 0,83$ m.a⁻¹ en dus voor $p = 0,35$ (porositeit):

$$I_a = (P - E_a) = 290 \text{ mm.a}^{-1}.$$

De benadering via neerslag en de gemiddelde potentiële verdamping van het gewas, als functie van de Referentie-gewasverdamping en een gewasfactor, levert op: $P = 740$ mm.a⁻¹ en $E_p = 500$ mm.a⁻¹ (potentiële verdamping van maïs): $I_p = (P - E_p) = 240$ mm.a⁻¹. Het verschil tussen I_a (werkelijke aanvulling) en I_p (potentieel neerslagoverschot) bedraagt gemiddeld 50 mm.a⁻¹. Volgens de HELP-tabellen mag bij een matig fijne zandgrond, met een dunne humushoudende bovengrond en Gt VI (zoals te Venhorst) een gemiddeld vochttekort van 59 mm.a⁻¹ worden verwacht, wat overeenkomt met het geconstateerde verschil. Deze waarneming wordt bevestigd door meerdere ³H-metingen in de Nederlandse zandgebieden (15 ³H-profielen en circa 150 maal twee ³H-metingen in de putten van het Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit).

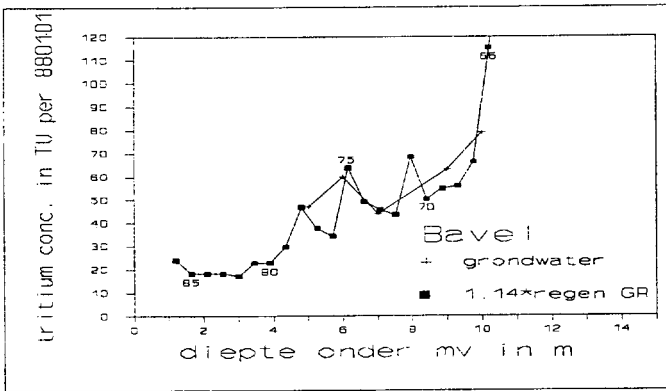
Conclusie: De bepaling van de langjaarlijks gemiddelde verdamping met de KNMI-referentie-gewasverdamping en de HELP-tabellen geeft een goede benadering van de gemiddelde werkelijke verdamping in een gebied.

In gebieden met lage Gt of met een slecht doorlatende laag in de ondiepe bodem (bijvoorbeeld de keileem in Drenthe) is de naar beneden gerichte percolatie volgens de ³H-metingen vaak (veel) kleiner dan het neerslagoverschot of zelfs afwezig. Een deel van de neerslag zal oppervlakkig afstromen en dus niet het grondwater aanvullen. De afvoer kan bestaan uit stroming van water over het maaiveld, maar vaker nog is het een drainage van een ondiepe zandige laag boven slecht doorlatende lagen. Waar zo'n situatie voorkomt, zijn in landbouwgronden vaak drainbuizen aangelegd.

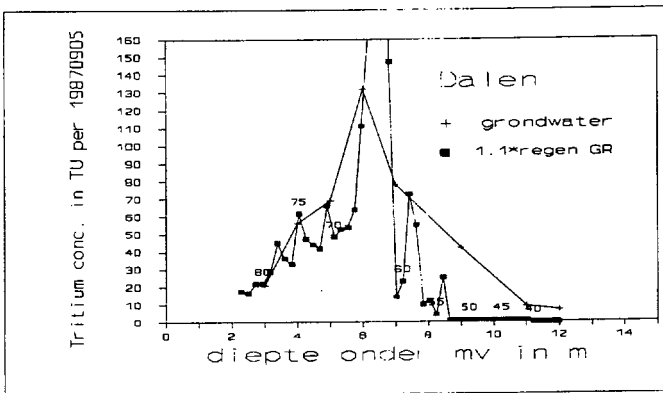
Het onderzoek op een boerderij te Bavel (Noord-Brabant) is een voorbeeld van een situatie waar onder een zandige toplaag kleilagen uit de Formatie van Kedichem aanwezig zijn op een diepte van 1 tot 4 m onder maaiveld. Bewerking van het ³H-profiel (figuur 4) levert op: $I/p = 0,44$ m.a⁻¹ en $I_a = 155$ mm.a⁻¹ ($p = 0,35$)

Het potentiële neerslagoverschot te Bavel is: $I_p = (P - E_p) = 800 - 560 = 240$ mm.a⁻¹.

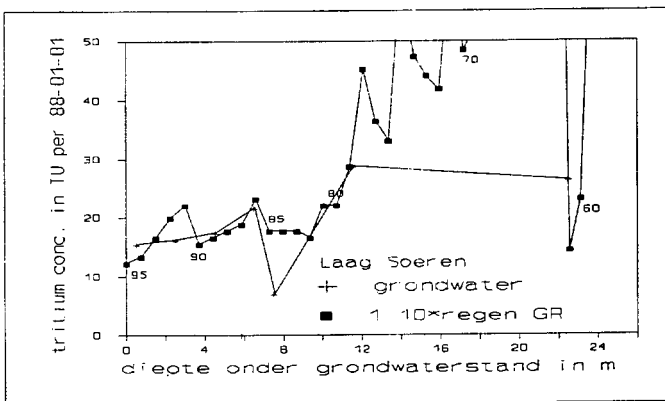
De waarde $f = 1,14$ komt overeen met de verhouding van de concentraties in de neerslag te Groningen en te Bavel. Het potentiële neerslagoverschot is (veel) hoger dan de infiltratie volgens het ³H-profiel en ook het werkelijke neerslagoverschot is groter. Dit komt doordat een deel van het neerslagoverschot gedraineerd wordt vanuit de zandige toplaag. In het desbetreffende perceel liggen inderdaad drainbuizen.



Figuur 4: ³H-profiel te Bavel



Figuur 5: ³H-profiel te Dalen



Figuur 6: ³H-profiel te Laag-Soeren

Een volgend geval, waarbij de infiltratie naar het grondwater kleiner is dan het neerslagoverschot vormt het onderzoek van een bedrijf (figuur 5) te Dalen (Dr.). Interpretatie van het ^3H -profiel levert in dit geval op: $I_a/p = 0,23 \text{ m.a}^{-1}$ en $I_a = 78 \text{ mm.a}^{-1}$ ($p = 0,35$). Het potentiële neerslagoverschot te Dalen is: $I_p = (P - E_p) = 775 - 520 = 255 \text{ mm.a}^{-1}$. In de bodem van de boerderij te Dalen is een slecht doorlatende leemlaag aanwezig op een diepte van circa 1,5 m onder maaiveld. In de zandlaag erboven zijn drainbuizen aangelegd die water afvoeren dat niet zal doordringen tot in het zandige pakket onder de leem. In de situatie voor de ontginning zal het gebied zeer drassig madeland zijn geweest. Hiermee stemt overeen dat de onderzochte boerderij in het beekdal van het Loodiep ligt, dat aan de westzijde grenst aan de Westelijke Dalerven. In dit voormalige veengebied was de mogelijkheid van waterafvoer wellicht nog iets slechter zodat aan maaiveld veengroei op kon treden. De waarde $f = 1,1$ is in overeenstemming met gegevens over de neerslag te Groningen en te Dalen.

Een situatie zoals te Bavel en te Dalen is bij drie ^3H -profielen opgemerkt en bij ongeveer 50 LMG-putten. Een verminderde infiltratie ging steeds gepaard met of een lage Gt (kwel-situatie), of een slecht doorlatende laag in de ondiepe bodem en vaak met beide. Gebieden waar een dergelijke situatie voorkomt, zijn onder andere Drenthe (keileem), Noordwest-Brabant (oude klei) en de Meierij van Den Bosch (Brabantse leem). In het oosten van de Achterhoek bestaat de bodem uit een slechts enkele meters dikke zandlaag direct onder maaiveld en daaronder tientallen meters klei.

Conclusie: Gebieden waar oppervlakkige afstroming voorkomt, hebben aanwijsbare (en op kaarten weergegeven) kenmerken, zoals Gt en bodemtype, die kunnen worden gebruikt om de grootte van de oppervlakkige afvoer te schatten.

Grondwateraanvulling in gebieden met een natuurlijke vegetatie

Naar de aanvulling van het grondwater in gebieden met een natuurlijke vegetatie is minder onderzoek gedaan dan naar het neerslagoverschot in landbouwgebieden. Deels komt dat doordat natuurlijke vegetaties zeer wisselend van karakter kunnen zijn. Bovendien treedt een extra complicatie op voor bossen doordat de verdamping van neerslag die via interceptie door de bladerkroon is opgevangen slecht bekend is. Voor de Veluwe is onderzoek gedaan naar de aanvulling van het grondwater, die in dat geval gelijk is aan het neerslagoverschot (Meinardi, 1994). Er zijn verschillende technieken gebruikt, zoals:

a Tritium-profielen

Op de Veluwe is in een aantal boringen een ^3H -profiel bepaald. Op 26 juli 1996 is een meting (figuur 6) gedaan in Laag-Soeren. De resultaten zijn voor $D = 95 \text{ m}$ en $gws = mv -3,5 \text{ m}$: $I/p = 0,76 \text{ m.a}^{-1}$; $I = 265 \text{ mm.a}^{-1}$ ($p = 0,35$).

De langjarig gemiddelde waarde van de neerslag bedraagt $P = 850 \text{ mm.a}^{-1}$, dus de werkelijke verdamping is $E_a = 585 \text{ mm.a}^{-1}$. Een vergelijking met het langjarig gemiddelde van de KNMI referentie-gewasverdamping levert op $E_a/E_r = 1,12$. Bovenstrooms van de put is een gemengd bos aanwezig met open plekken, brandgangen en soms heidevelden.

b Interpretatie van de chemische samenstelling van het sprenghwater

In 1986 zijn vrijwel alle sprenghen aan de oostrand van de Veluwe die water voerden bemonsterd. Het sprenghwater is een mengsel van grondwater met een verschillende herkomst. De monsters zijn geanalyseerd op chemische samenstelling en op tritium-concentraties (Meinardi, 1994). Uit de ^3H -concentraties volgde een verdeling van de verblijftijden in de bodem van het bemonsterde mengsel en de plaatsen van herkomst. De vegetatie op de plaats van herkomst op het tijdstip van infiltratie is geschat aan de hand van topografische kaarten (vanaf 1850). Aangenomen is verder dat de samenstelling van het grondwater volgt uit de samenstelling van de neerslag als de indamping door verdamping bekend. Omgekeerd moet dus ook gelden dat indamping en dus de verdamping, bij een gegeven neerslag, uit de gemeten concentraties kunnen worden afgeleid. Multipele regressie leverde waarden op voor de verdamping van gebieden met bos (f) en zonder bos (heide = h):

Sprenghen noordoost: $E_f = 655 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $E_f/E_r = 1,25$; $E_h = 475 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, $E_h/E_r = 0,91$;

Sprenghen zuidoost: $E_f = 660 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $E_f/E_r = 1,25$; $E_h = 595 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, $E_h/E_r = 1,14$.

Grote delen van de heidevelden in de Noord-Veluwe waren vroeger zandverstuivingen.

Conclusies: Het Veluwe-onderzoek en verder onderzoek (Meinardi, 1994) in gebieden met natuurlijke vegetatie heeft tot de volgende schattingen geleid voor de gemiddelde werkelijke verdamping over langere perioden als functie van de KNMI referentie-verdamping E_r :

lage natuurlijke vegetaties (droog): $E_a = 0,90 * E_r$;

lage natuurlijke vegetaties (nat): $E_a = 1,00 * E_r$; moerassige gebieden tot $1,25 * E_r$;

gemengd bos/dun naaldbos: $E_a = 1,10 * E_r$;

dicht aaneengesloten naaldbos: $E_a = 1,25 * E_r$; voor ieder geval apart te bepalen.

De aangegeven waarden zijn vergelijkbaar met waarden gegeven door Spieksma e.a. (1996).

De leemgebieden van Nederland

De leemgebieden nemen een beperkt areaal van Nederland in (figuur 2). De löss-plateaus in Zuid-Limburg vormen het grootste aaneengesloten gebied met leemgronden. Het ontbreken van een zichtbaar drainagestelsel in de hoge delen van dat gebied houdt in dat de aanvulling van het grondwater vrijwel gelijk zal zijn aan het neerslagoverschot. Toch treedt in delen van Zuid-Limburg, namelijk langs de steile hellingen van de plateaus oppervlakkige afstroming op in sommige natte perioden met lokaal soms zeer schadelijke gevolgen. Wat betreft de langjaarlijkse gemiddelden van het neerslagoverschot en de aanvulling van het grondwater zijn de leemgebieden echter op dezelfde manier beschouwd als de zandgronden.

Langjaarlijkse gemiddelden voor neerslagoverschot, oppervlakkige afvoer en grondwateraanvulling

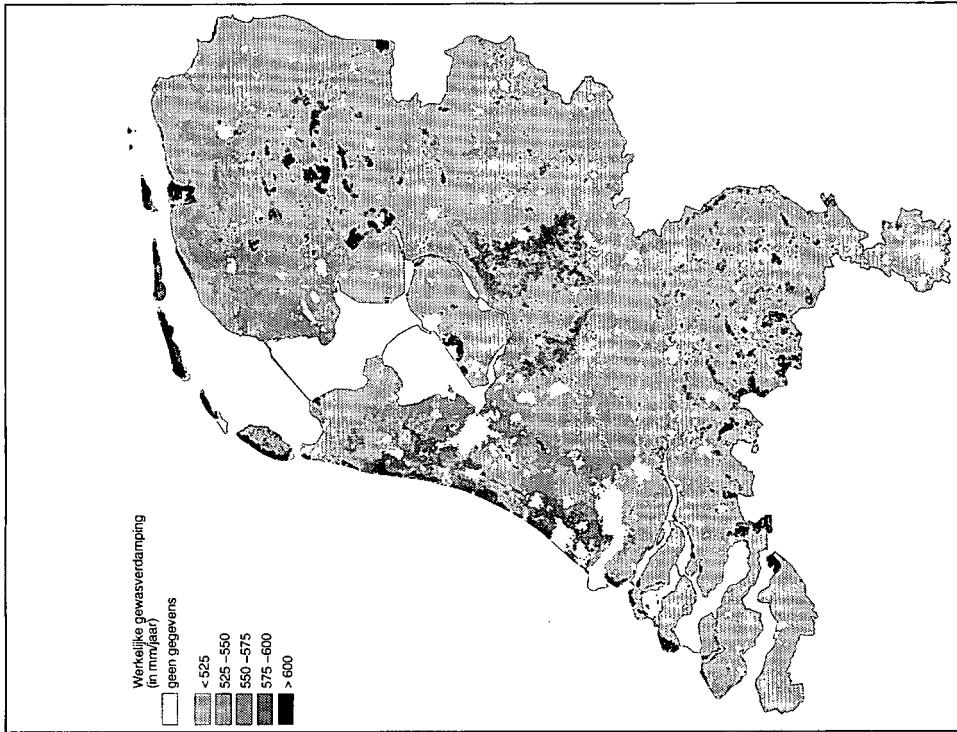
Het is, met de hiervoor getrokken conclusies, mogelijk om de beschikbare gegevens over bodem en meteorologie zodanig te bewerken dat landsdekkende kaarten kunnen worden gemaakt van langjaarlijkse gemiddelden van het neerslagoverschot en de aanvulling van het grondwater. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van Geografische Informatie Systemen (GIS), waarin gegevens over meteorologie, vegetatie en bodem zijn opgenomen. In een dergelijk GIS zijn aan deze gegevens de volgende bewerkingen uitgevoerd:

- Landgebruik in Nederland is afgeleid van LANDSAT-beelden (Thunnissen e.a., 1992). De bodemkaart 1:50000 (met inbegrip van waarden voor de grondwatertrap, Gt) is in digitale vorm beschikbaar (De Vries e.a., 1993).
- Waarden voor de langjarige gemiddelde neerslag P over 1961–1990 zijn verkregen van het KNMI (figuur 7). De gemiddelde KNMI-referentie-gewasverdamping E_r over 1961–1990 (figuur 8) is door Van den Eertwegh afgeleid uit KNMI-gegevens. Hieruit kan met de gewas-factoren een potentiële gewas-verdamping worden berekend. Gewasfactoren zijn gegeven door CHO-TNO, KNMI (1988) en door Makkink (1960). De reductie van de verdamping is gebaseerd op de HELP-tabellen en een verdere bewerking zoals beschreven in (Van Drecht e.a., 1998); De gemiddelde werkelijke verdamping E_a (figuur 9) is gelijk aan de gewasverdamping minus het vochttekort.
- De jaarwaarden voor het neerslagoverschot $I_a = (P - E_a)$ gelden voor de periode 1961–1990 (figuur 10) en voor heel Nederland, dus ook voor de klei- en veengebieden.
- De aanwezigheid van storende lagen in de ondiepe bodem is gegeven in de bodemkaart. Voor de desbetreffende gebieden is aangenomen dat de helft van het neerslagoverschot via ondiepe drainage verdwijnt. Voor kwel-situaties (gekenmerkt door lage Gt's) is een geleidelijke overgang aangenomen tussen geen aanvulling van het grondwater (Gt I en II) en een volledige afvoer door de bodem (hoge Gt's) volgens tabel I (Meinardi, 1994).
- De aanvulling van het grondwater die gelijk is aan neerslagoverschot min oppervlakkige afstroming kan nu voor het zandgebied worden vastgesteld. Een kaartbeeld zal in een volgend artikel worden gegeven na verdere uitwerking voor de klei- en veengebieden.

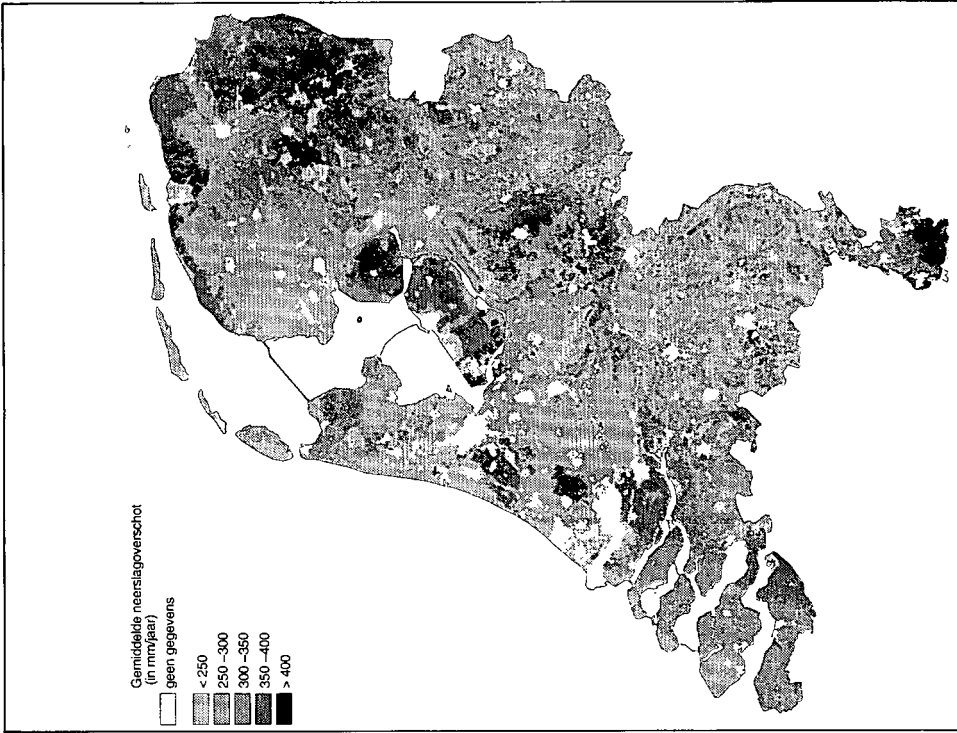
Tabel 1: Schatting van de oppervlakkige afvoer in de zandgebieden op basis van de Gt.

Gt	I	II	III	III*	IV	V	V*	VI	VII	VII*
GHG (cm)	< 25	< 25	< 25	25– 40	40– 80	< 25	25– 40	40– 80	80– 140	140– 200
GLG (cm)	< 50	50 80	80 120	80– 120	80– 120	120– 160	120– 160	120– 160	160– 220	220– 280
sf	100%	100%	50%	25%	0%	50%	25%	0%	0%	0%
bf	0%	0%	50%	75%	100%	50%	75%	100%	100%	100%

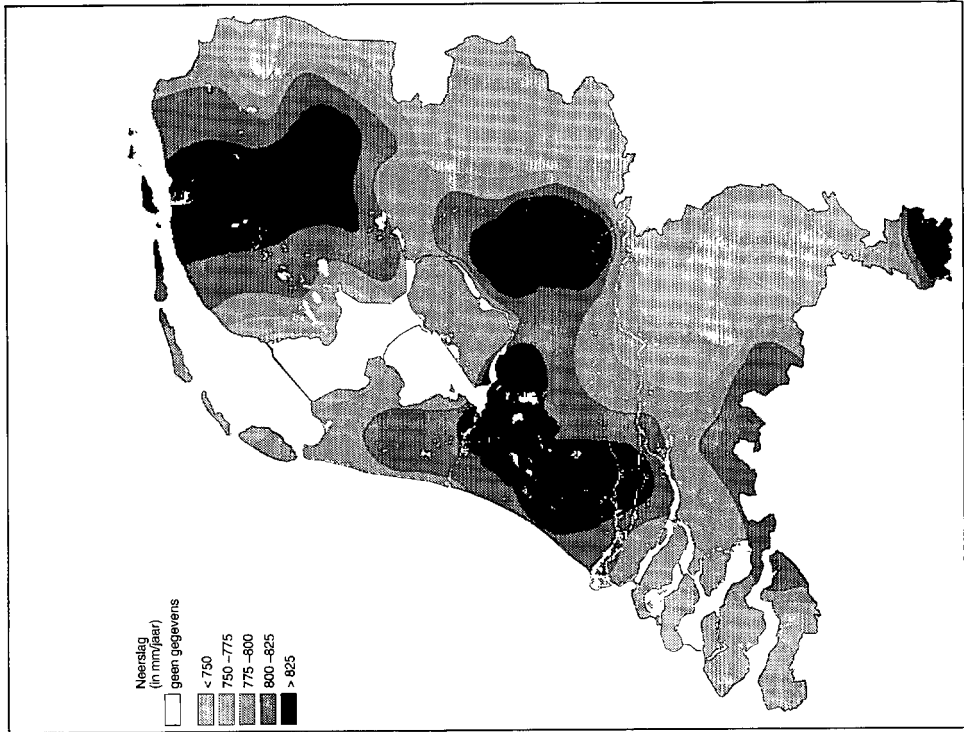
GHG = gemiddelde hoogste en GLG = gemiddelde laagste grondwaterstand (in cm onder mv); sf = oppervlakkige afvoercomponenten (overland flow en interflow, drainage) en bf = basisafvoer (grondwater) (sf en bf in % van het neerslagoverschot).



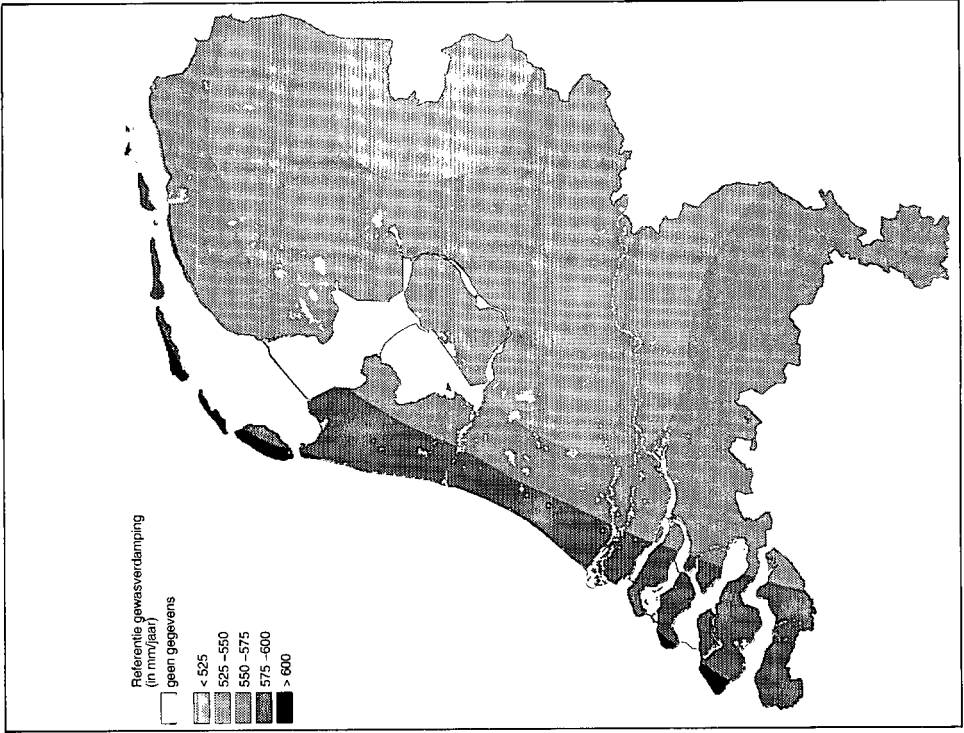
Figuur 7: Langjaarlijks gemiddelde neerslag over 1961-1990



Figuur 8: KNMI referentie-gewasverdamping over 1961-1990



Figuur 9. Gemiddelde werkelijke verdamping over 1961-1990



Figuur 10. Het gemiddelde neerslagoverschot over 1961-1990

Slotopmerkingen en verantwoording

De grootte van het neerslagoverschot en de aanvulling van het grondwater zijn onderwerpen die al lange tijd in de belangstelling staan. Aan de hier gepresenteerde resultaten is door diverse RIVM-medewerkers een grote bijdrage geleverd. Gerard van Drecht (1993; 1998) heeft als eerste kaarten gemaakt van neerslag, verdamping en het neerslagoverschot, gebaseerd op neerslag en de werkelijke verdamping, waarbij Gé van den Eertwegh, Kees van Heerden en de eerste auteur hebben meegewerkt.

Literatuur

- CHO-TNO, KNMI (1988)** Evaporation and Weather; Proceedings and Information no. 39 (red. J.C. Hooghart), CHO-TNO, Den Haag.
- Drecht, G. van (1993)** Berekening van de nitraatbelasting van het grondwater; Achtergronddocument bij de Nationale Milieuverkenning 2 1990–2010, RIVM-rapport 714901001, Bilthoven.
- Drecht, G. van en E. Schepers (1998)** Actualisering van model NLOAD voor de nitraatuitspoeling van landbouwgronden; beschrijving van model en GIS-omgeving, RIVM-rapport 711501002, Bilthoven.
- Makkink, G.F. (1960)** De verdamping uit vegetaties in verband met de formule van Penman; CHO-TNO Verslagen en Mededelingen, nr 4, pag 90–115.
- Meinardi, C.R. (1994)** Groundwater recharge and travel times in the sandy regions of the Netherlands; proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam, RIVM-rapport 715501004, RIVM, Bilthoven.
- Spieksma, J.F.M., A.J. Dolman en J.M. Schouwenaars (1996)** De parametrisatie van de verdamping in natuurterreinen in hydrologische modellen; NOV-rapport 4-2, Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging.
- Thunnissen, H.A.M. (1987)** Oppervlakte-afvoer: hoeveelheid en samenstelling; RIVM-rapport 728472003, Bilthoven.
- Thunnissen, H.A.M., R. Olthof, P. Getz en L. Vels (1992)** Grondgebruiksdatabank van Nederland met behulp van Landsat Thematic Mapper opnamen; SC-DLO-rapport 168, Winand Staring Centrum, Wageningen.
- Topografische Dienst** Diverse Topografische Kaarten van verschillende jaren (onder andere de kaart van 1850) Topografische Dienst, Emmen.
- Vries, F. de en J. Dennekomp (1993)** De bodemkaart van Nederland digitaal; SC-DLO Technisch Document 1, Winand Staring Centrum, Wageningen.
- Werkgroep HELP-Tabel (1987)** Invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie; Rapport van de Werkgroep HELP-Tabel, Mededeling Landinrichtingsdienst no. 176.