

hy.h. 83-22

Globale verblijftijden in de
onverzadigde zone van de
Utrechtse Heuvelrug

Ir. H.A.J. van Lanen

Gmthj - Lanen 83



rijksinstituut voor drinkwatervoorziening

hy.h. 83-22

**Globale verblijftijden in de
onverzadigde zone van de
Utrechtse Heuvelrug**

Ir. H.A.J. van Lanen

Gru. Hy. - Lanen 83A

Project: Wining en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht
Opdrachtgever: Directie Drinkwatervoorziening van het Directoraat Generaal
voor de Milieuhygiëne (VROM)



**rijksinstituut voor drinkwatervoorziening
national institute for water supply**

*hydrologische hoofdafdeling
hydrological division*



inhoudsopgave

	blz.
Lijst met bijlagen	4
Lijst met kaarten	5
1. Inleiding	6
2. Rekenmethode	7
3. Invoergegevens	18
3.1. Het neerslagoverschot	18
3.2. De dikte van de onverzadigde zone	22
3.3. Het effectieve vochtgehalte	22
4. Resultaten	25
5. Samenvatting, konklusies en aanbevelingen	29
5.1. Samenvatting	29
5.2. Konklusies	31
5.3. Aanbevelingen	32
6. Literatuur	34



lijst met bijlagen

1. Het berekende gemiddelde neerslagoverschot voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor de periode 1973 t/m 1976.
2. Het berekende neerslagoverschot voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor een jaar met groot neerslagoverschot (1974).
3. Het berekende neerslagoverschot voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor een jaar met een gering neerslagoverschot (1975).



lijst met kaarten

1. Ligging van het onderzoeksgebied en de indeling van het gebied met behulp van de neerslagpolygonen van Thiessen.
2. Bodemgebruik
3. Bodemgesteldheid
4. Dikte van de onverzadigde zone
5. De berekende verblijftijd in een grofzandige ondergrond uitgaande van het neerslagoverschot van de periode 1973 t/m 1976.
6. De berekende verblijftijd in een matig grofzandige ondergrond uitgaande van het neerslagoverschot van de periode 1973 t/m 1976.
7. De berekende verblijftijd van een matig fijnzandige ondergrond uitgaande van het neerslagoverschot van de periode 1973 t/m 1976.
8. De berekende verblijftijd in een grofzandige ondergrond uitgaande van een groot neerslagoverschot (1974).
9. De berekende verblijftijd in een grofzandige ondergrond uitgaande van een gering neerslagoverschot (1975).



1.

inleiding

In het kader van het projekt "Winning en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht" zal onder meer een aantal zogenoemde grondwaterbeschermingskaarten worden vervaardigd. Deze kaarten zullen onder andere informatie bevatten over de verblijftijd in de ondergrond van conservatieve, in water opgeloste stoffen. De eerste kaart zal een voorlopig karakter dragen. De kennis en ervaring die worden opgedaan bij het vervaardigen van de eerste kaart zullen worden gebruikt bij de opzet van het vervolg-onderzoek dat uiteindelijk moet leiden tot een definitievere grondwaterbeschermingskaart.

Het onderzoek wordt uitgevoerd in opdracht van de Directie Drinkwatervoorziening van het Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer). Ook is er betrokkenheid van de zijde van de Regionale Inspecteur voor de Hygiëne van het Milieu, de Provinciale Waterstaat van Utrecht en het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland.

Een onderdeel van de grondwaterbeschermingskaart vormt de verblijftijd van het grondwater in de onverzadigde zone van de ondergrond. Deze speelt met name een rol in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug, in verband met de grote dikte aldaar van de onverzadigde zone. In het voorliggende rapport zal hierop nader worden ingegaan. Allereerst zullen de gebruikte rekenmethode en de invoergegevens worden behandeld, waarna de resultaten worden gepresenteerd. Hierbij zal de nadruk liggen op de gevoeligheid van de grootte van de verblijftijd voor veranderingen in de invoergegevens.

Het deelonderzoek naar de verblijftijden van grondwater in de onverzadigde zone van de ondergrond is uitgevoerd door ir. H.A.J. van Lanen, die ook het voorliggende rapport samenstelde. Het gehele onderzoek naar de winning en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht staat onder leiding van ir. G.J. Heij. Bij het verzamelen en verwerken van de gegevens is assistentie verleend door ing. C.G.M. Kester en ing. H. Snelting.

Een samenvatting van dit deelonderzoek, alsmede het aangeven van de mogelijke gevolgen van de verblijftijden in de onverzadigde zone op de problematiek van de bescherming van waterwingebieden wordt gegeven door Van Lanen (1983).



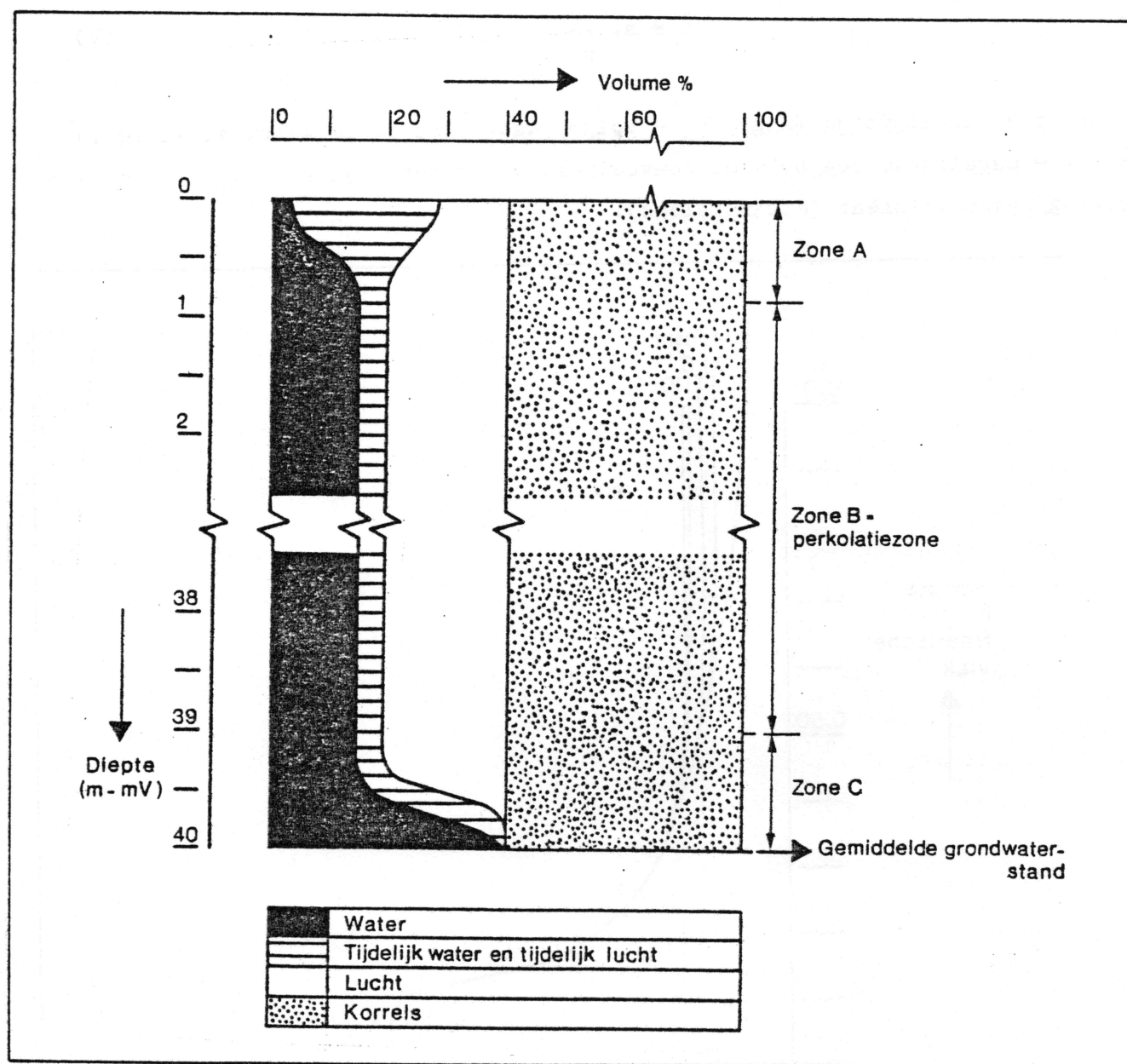
2. rekenmethode

Bij de keuze van de rekenmethode is uitgegaan van de aanname dat korte verblijftijden in eerste instantie niet van belang zijn. Dit impliceert dat gebieden met ondiepe grondwaterstanden buiten beschouwing kunnen worden gelaten, waardoor het probleem aanzienlijk eenvoudiger wordt. Op de reden hiervoor zal later in dit rapport nog worden teruggekomen.

Voor de duidelijkheid dient vooraf vermeld te worden dat de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van zandgronden niet kan worden bepaald uit de tijd die verloopt tussen het tijdstip waarop het neerslagoverschot in het najaar optreedt en het moment waarop de grondwaterstand reageert (meestal enkele maanden tot een half jaar). Het neerslagoverschot, dat in de grond infiltreert, verdringt grotendeels het daar aanwezige bodemvocht dat in het zomerhalfjaar of in het vorige winterhalfjaar is geïnfilteerd. Dit bodemvocht schuift op haar beurt daardoor iets naar beneden op. Dit opschuiven van het bodemvocht gaat, weliswaar met enige vertraging, door tot aan het freatische vlak. Hoe dieper men komt des te ouder is het bodemvocht dat opschuift. Onder aan de onverzadigde zone zal uiteindelijk soms jarenoud bodemvocht in de verzadigde zone terecht komen, hetgeen een verhoging van de grondwaterstand veroorzaakt. Het op grote diepte aanwezige water in de onverzadigde zone is dus jaren geleden aan maaiveld geïnfilteerd. Het proces in de onverzadigde zone is te vergelijken met een rangeertrein waarvan de wagons worden voortgeduwd door een locomotief. Op het moment dat de locomotief begint te duwen (optreden van het neerslagoverschot) zal het eerst de wagon vlak voor de trein in beweging komen, daarna de volgende etc. Niet lang daarna zal de verst van de locomotief verwijderde wagon in beweging worden gezet (reactie van de grondwaterstand). Het duurt echter veel langer voordat de locomotief op de plaats passeert waar de eerste wagon aanvankelijk stond (aankomst waterdeeltje). Voor een goed begrip van de bepaling van de verblijftijd in dikke tot zeer dikke onverzadigde zones is het noodzakelijk eerst een beeld te geven van de verdeling van het vochtgehalte (deel van de poriën dat met water is gevuld) met de diepte. Met het bodemvocht wordt namelijk de eventueel aanwezige verontreiniging getransporteerd. In een bodemprofiel met een diepe grondwaterspiegel treedt op een zekere diepte beneden de wortelzone



alleen maar neerwaarts gericht vochttransport op. Boven dat vlak treedt in het zomerhalfjaar opwaarts transport op ten gevolge van de wateropname door plantwortels, terwijl in het winterhalfjaar neerwaarts transport plaatsvindt als gevolg van het neerslagoverschot. De diepte van dit vlak hangt samen met de bewortelingsdiepte van de planten, de grootte van het potentieel neerslagtekort (neerslag minus potentiële verdamping) en de granulaire samenstelling van de ondergrond. Voor matig grof- en grofzandige gronden ligt dit vlak veelal op een diepte van 1 à 2 m beneden het maaiveld. De zone in de bodem waar altijd neerwaarts vochttransport plaatsvindt wordt met perkolatietzone aangeduid (figuur 1; zone B). In de perkolatietzone van zandgronden varieert het vochtgehalte slechts in beperkte mate. Wanneer daar namelijk het vochtgehalte ten gevolge van een neerslagoverschot iets groter wordt neemt het transportvermogen (de k-waarde) sterk toe. Dit komt omdat dan de grotere bodemporiën, die een geringe hydraulische weerstand hebben, met water worden gevuld. Een hoeveelheid bodemvocht kan in deze gronden dus zonder een grote toename van het vochtgehalte neerwaarts worden getransporteerd. Het vochtgehalte kan ook niet veel afnemen omdat daarvoor het transportvermogen sterk afneemt waardoor het vocht niet in neerwaartse richting kan worden afgevoerd. Het vochtgehalte in de perkolatietzone van zandgronden bevindt zich dus binnen nauwe grenzen. Dit wordt in figuur 2 geïllustreerd waar voor verschillende perkolatiesnelheden de vochtgehalteverdeling in een grofzandige ondergrond wordt gegeven (Van der Molen, 1972). De onverzadigde zone in een bodemprofiel met een diepe grondwaterstand is met betrekking tot het vochtgehalte te verdelen in 3 zones (figuur 1). De bovenste zone (zone A) is een bodemlaag met een dikte van ca. 1 à 2 m waarin afwisselend opwaarts en neerwaarts vochttransport plaatsvindt. Zone A kent met name vlak onder het maaiveld grote variaties in het vochtgehalte. Onder zone A volgt de perkolatietzone die (in zandgronden) een bij benadering konstant vochtgehalte heeft. Vlak boven het freatische vlak volgt een zone (zone C) waar het vochtgehalte toeneemt van de kostante waarde van de perkolatietzone naar het vochtgehalte bij verzadiging (poriënvolume). Deze zone is bij matig grof en grof zand ca. 50 cm dik. Bij matig fijn zand is deze iets dikker, namelijk 80 cm. Uit de zonering kan men afleiden dat de perkolatietzone in gebieden met diepe grondwaterspiegels verreweg de grootste zone is. Bij experimenten, die betrekking hebben op de bepaling van de verblijftijd, wordt de verblijftijd in de onverzadigde zone nagenoeg altijd vastgesteld voor de perkolatie- en de daaronderliggende zone (zone C). Men gebruikt daarvoor verticaal opgestelde kolommen die met een bepaalde grondsoort zijn gevuld en waarin stationair watertransport plaatsvindt. Op een bepaald



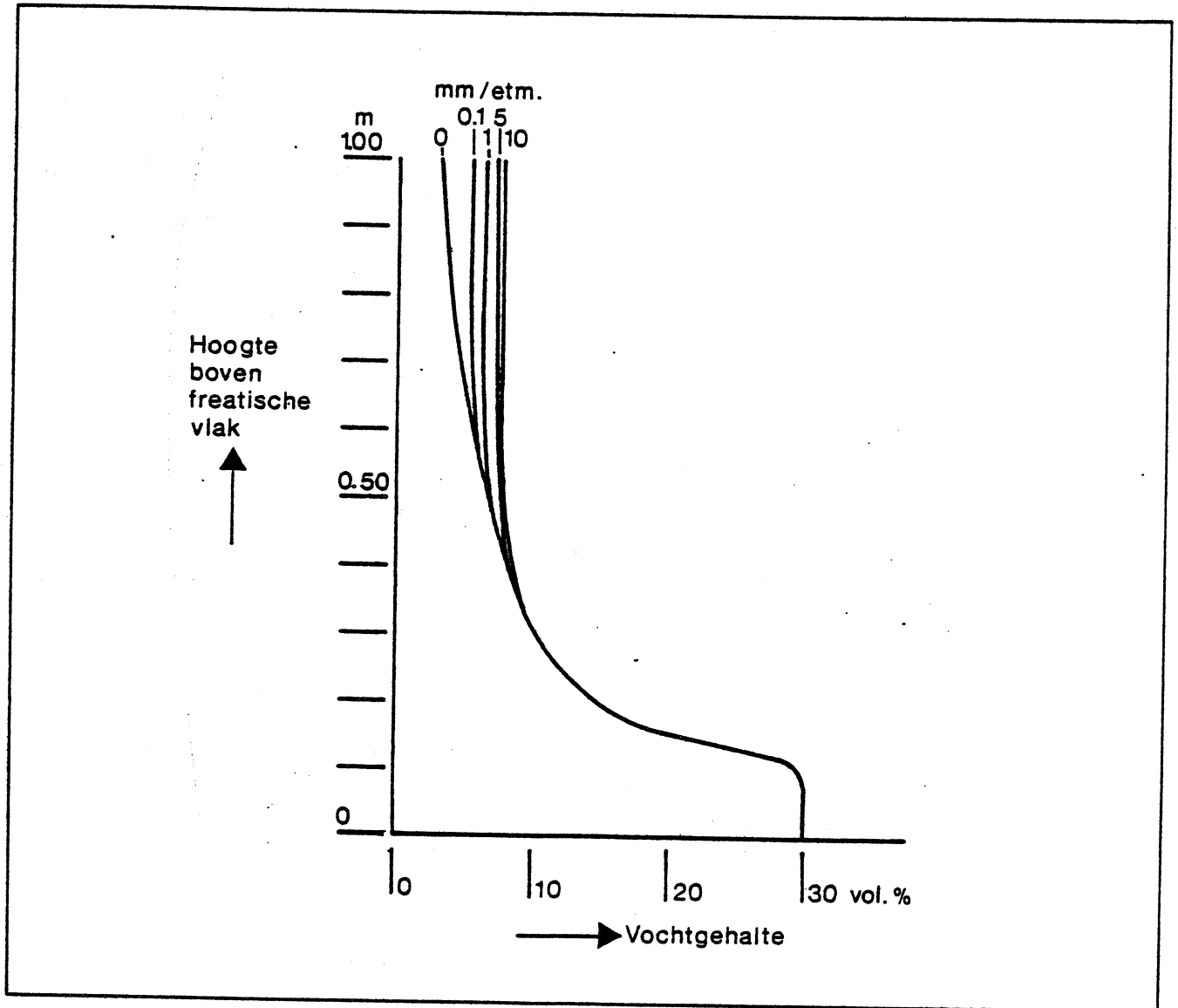
Figuur 1.

De verticale verdeling van het aandeel water, lucht en korrels in een matig grofzandige overzadigde zone.

moment wordt aan dit water aan de bovenkant van de kolom een tracer toegevoegd. De toevoeging van de tracer kan men na verloop van tijd weer staken (blokvormige toevoeging) of continu voortzetten. Aan de onderkant van de kolom wordt vervolgens de concentratie van de tracer gemeten (figuur 3). Aan de hand van dit type experimenten stellen Bouma e.a. (1983) voor om de verblijftijd in de onverzadigde zone te bepalen met de volgende vergelijking:

$$t = a \cdot \frac{V_o}{V} \quad (1)$$

waarin: t = verblijftijd (dag), V_o = volume water dat in de kolom aanwezig is (m^3), V = dagelijkse toegevoegde hoeveelheid water met tracer ($m^3 \cdot dag^{-1}$) en a = verdringingscoëfficiënt (dimensieloos).



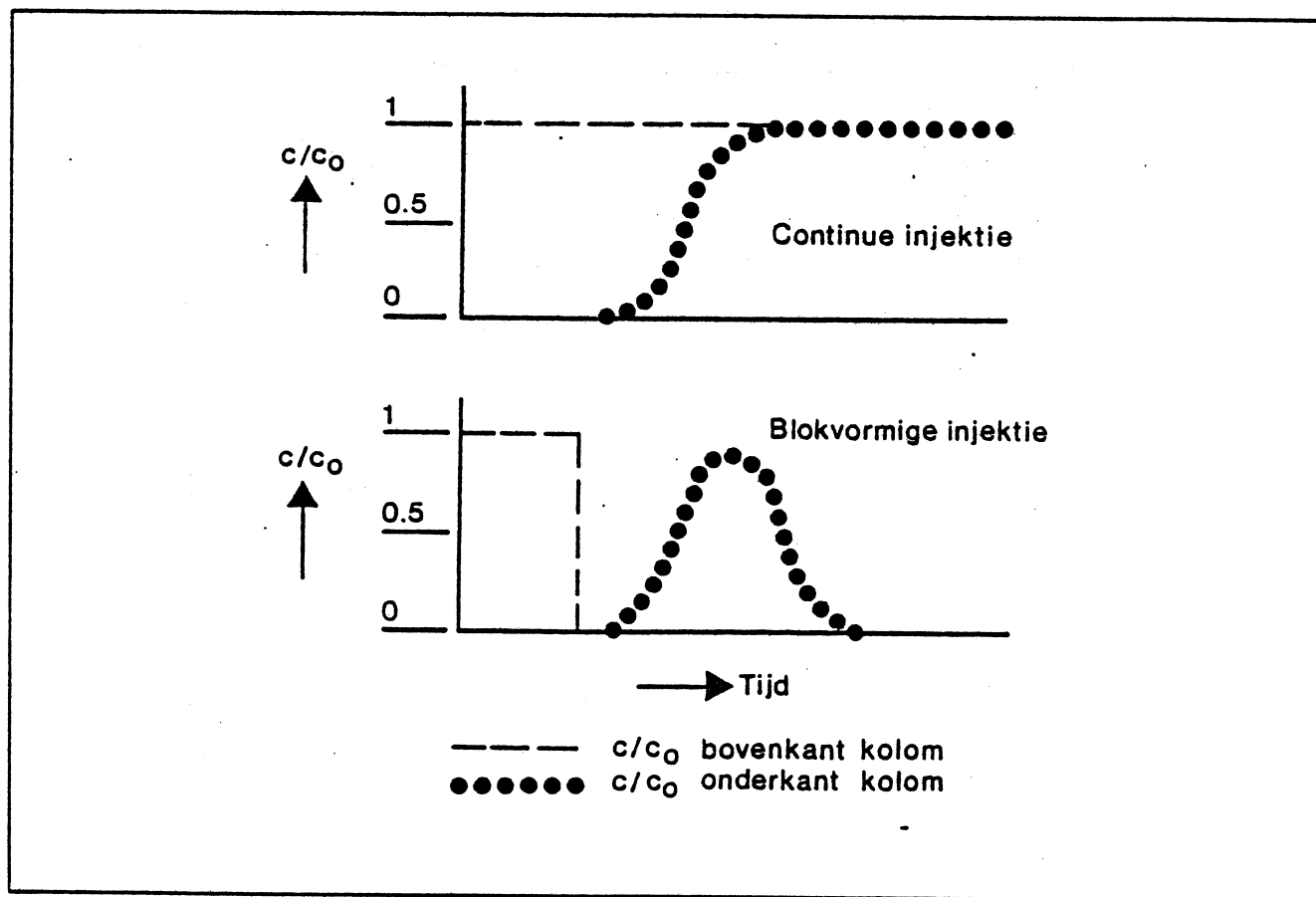
Figuur 2.

De verdeling van het vochtgehalte in een grofzandige grond voor verschillende percolatiesnelheden.

(Van der Molen, 1972).

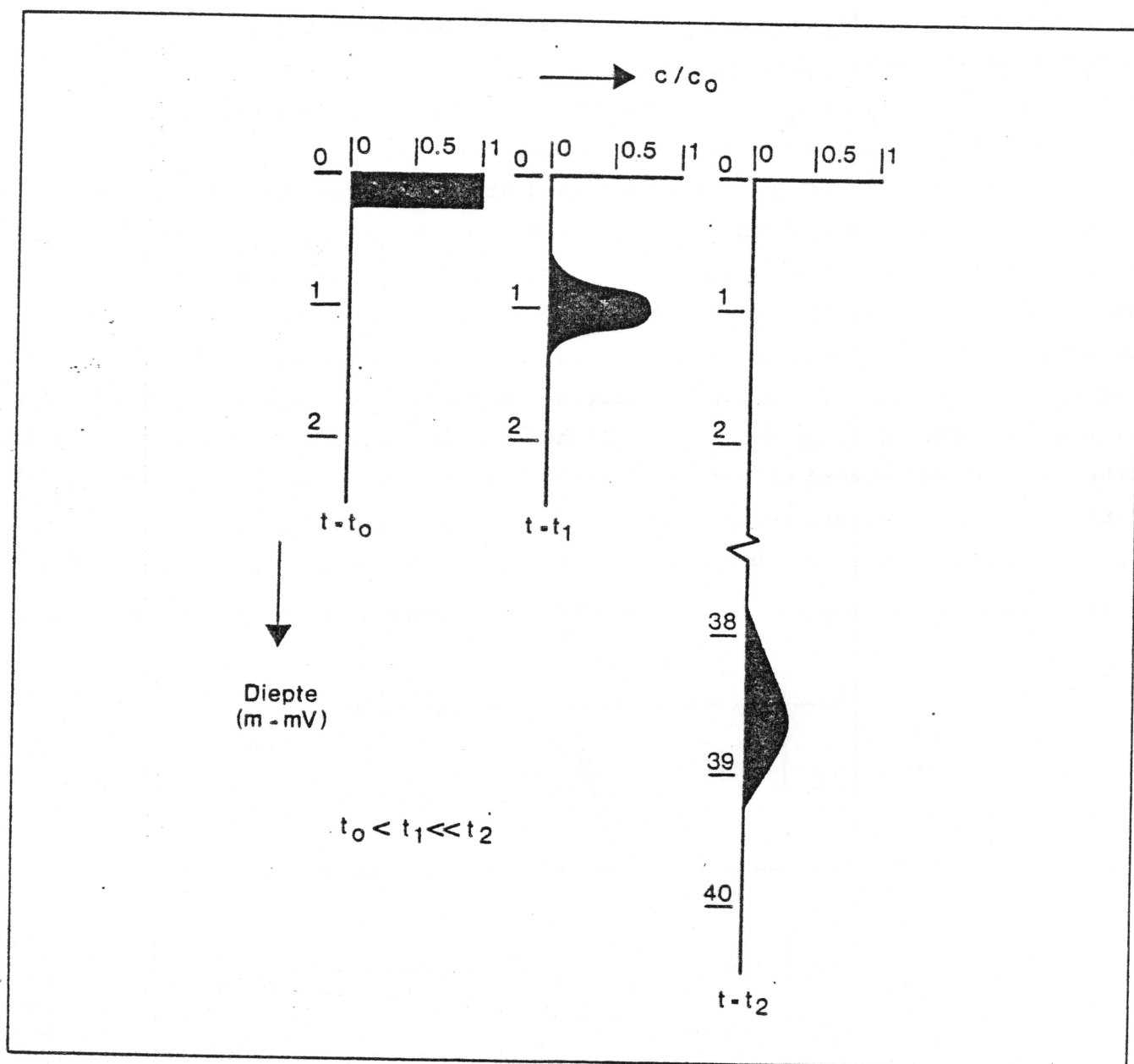
De verblijftijd, die in het vervolg van dit rapport wordt berekend met vergelijking 1, betreft de verblijftijd van een opgeloste stof die niet wordt geadsor-

beerd, niet wordt afgebroken en die geen chemische reacties aangaat. Deze stoffen worden vaak aangeduid met conservatieve stoffen. Treden die processen wel op dan neemt de verblijftijd toe. De verdringingscoëfficiënt a moet experimenteel worden bepaald. Deze hangt van een groot aantal factoren af. Zo zal bij kleigronden met macroporiën (bijv. scheuren tussen structuurelementen) de waarde voor a kleiner zijn dan bij zandgronden (Anderson en Bouma, 1977 en Bouma e.a., 1983). Ook kan de waarde van a kleiner zijn wanneer het water plotseling in een grote hoeveelheid wordt toegediend in plaats van langzaam verspreid over de gehele dag. Daarnaast hangt de waarde van de verdringingscoëfficiënt ook af van de verblijftijd waarin men is geïnteresseerd. Indien men namelijk de verblijftijd van het eerste deeltje wil weten, dat het freatische vlak bereikt (initiële doorbraak), zal men moeten uitgaan van een kleinere waarde van a dan wanneer men het tijdstip wil weten waarop de helft van de deeltjes (gemiddelde doorbraak) of alle deeltjes (volledige doorbraak) het freatische vlak hebben bereikt (figuur



Figuur 3.

Het verloop van de relatieve concentratie aan de boven- en onderkant van een kolom ten gevolge van een continue en van een blokvormige toevoeging van een tracer.



Figuur 4.

Het verloop van de relatieve concentratie van een tracer als functie van de diepte voor verschillende tijdstippen.

3). De initiële doorbraak blijkt bij zandgronden vaak op te treden wanneer 60 à 70% van de in de kolom aanwezige hoeveelheid vocht is verdrongen (Biggar en Nielsen, 1967 en Wauters, 1980). De waarde voor a bedraagt voor die situaties derhalve 0,6 à 0,7. In korte kolommen (20 cm) is voor zandgronden bij zeer grote fluxen ook wel eens een kleinere waarde voor a gevonden ($a = 0,4$; Bouma e.a., 1983 en Tyler en Thomas, 1981). De gemiddelde doorbraaktijd wordt bij zandgronden vaak gevonden wanneer bij benadering de volledige hoeveelheid vocht is



verdrongen. Met andere woorden: de maximale concentratie bij een blokvormige injectie (fig. 2) treedt op als de toegevoegde hoeveelheid water (V) gelijk is aan de hoeveelheid vocht die oorspronkelijk in de kolom aanwezig was (V_0), (Tyler en Thomas, 1981). De verdringingscoëfficiënt bedraagt voor deze situatie 1,0. De spreiding van verblijftijden neemt toe naarmate de gemiddelde verblijftijd en dus ook de afstand groter wordt (figuur 4). Dit fenomeen wordt met dispersie aangeduid. Voor uniforme, verzadigde grondwaterstroming (evenwijdige stroomlijnen), blijkt echter dat, bij het groter worden van de afstand tot het injectiepunt, de gemiddelde verblijftijd sterker toeneemt dan de spreiding van de verblijftijden (persoonlijke mededeling Uffink en Day en Forsythe, 1957). Dit impliceert dat de spreiding in verblijftijden in absolute zin wel toeneemt met de afstand maar dat, wanneer men deze deelt door de gemiddelde verblijftijd, de spreiding relatief toch minder belangrijk wordt. De relatieve fout in de schatting van de verblijftijd ten gevolge van dispersie neemt dus af naarmate de dikte van de onverzadigde zone toeneemt. Wanneer men dit ook van toepassing acht op de stroming in de onverzadigde zone is het in het geval van langere verblijftijden zeer reëel als eerste benadering uit te gaan van de gemiddelde verblijftijd. De aanname sluit ook aan bij de eerste benadering van de verblijftijden in de verzadigde zone, zoals die tot op heden gebruikelijk is.

Voor het berekenen van de gemiddelde verblijftijd in de perkolatiezone is het duidelijker om vergelijking 1 te herschrijven. De dagelijks toegevoegde hoeveelheid water V kan, wanneer men deze uitdrukt per eenheid van oppervlakte, worden vervangen door het langjarig gemiddelde neerslagoverschot. Het volume water dat in de kolom aanwezig is (V_0) is, wanneer men dit uitdrukt per eenheid van oppervlakte, gelijk aan het produkt van de dikte van de perkolatiezone en het vochtgehalte. Wanneer tenslotte voor de verdringingsfaktor a de waarde 1,0 wordt aangenomen ziet de vergelijking er als volgt uit:

$$\bar{t} = \frac{D \cdot \theta_e}{NN} \quad (2)$$

waarin:

$\bar{t}$: gemiddelde verblijftijd (dag);

NN : langjarig gemiddeld neerslagoverschot ($m \cdot dag^{-1}$);

θ_e : effectief vochtgehalte ($m^3 \cdot m^{-3}$);

D : dikte perkolatie zone (m).



Bij de toepassing van vergelijking 2 wordt uitgegaan van uitsluitend vertikaal vochttransport. Er wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met een horizontale stromingskomponent die het gevolg kan zijn van door stuwingscheef gestelde lagen die eventueel wat minder goed doorlatend zijn. Een horizontale stromingskomponent veroorzaakt langere verblijftijden.

Het effectieve vochtgehalte is de vochtinhoud van dat deel van de met vocht gevulde bodemporiën waaruit het vocht verdrongen kan worden door het neerslagoverschot. Deze grootte is moeilijk te bepalen. Als wordt aangenomen dat het vochttransport in de perkolatatiezone kan worden beschreven met de stationaire stromingsvergelijking kan een redelijke schatting worden gemaakt van de grootte van het effectieve vochtgehalte. De stromingsvergelijking ziet er als volgt uit:

$$v = -k(\psi) \left[\frac{d\psi}{dz} + 1 \right] \quad (3)$$

waarin:

- v : specifiek debiet (positief indien neerwaarts gericht; $m^3 \cdot m^{-2} \cdot dag^{-1}$);
 $k(\psi)$: doorlaatfaktor ($m \cdot dag^{-1}$);
 ψ : drukhoogte (m);
 z : plaatshoogte (m).

Bij de bepaling van de verblijftijd in de perkolatatie-zone kunnen de verschillen in drukhoogte worden verwaarloosd ($d\psi/dz \approx 0$). Vergelijking 3 gaat dan over in:

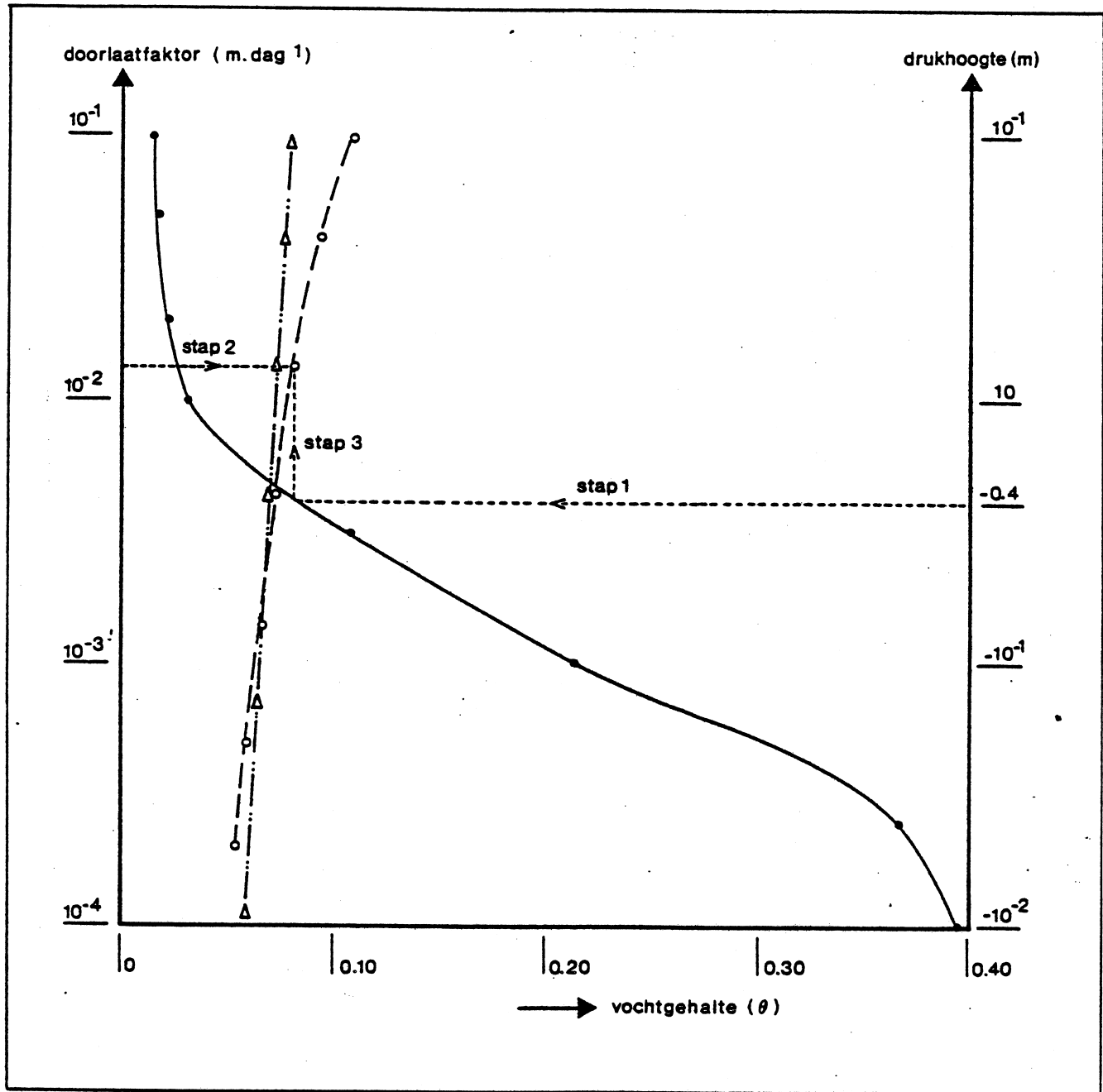
$$v = -k(\psi) \quad (4)$$

Door middel van de vocht karakteristiek (pF-kurve), die het verband aangeeft tussen de drukhoogte en het vochtgehalte, kan vergelijking 4 ook als volgt worden geschreven:

$$v = -k(\theta) \quad (5)$$

waarin:

- θ : vochtgehalte ($m^3 \cdot m^{-3}$)



Figuur 5.

Het verband tussen de drukhoogte en het vochtgehalte (●—●; vocht karakteristiek), het verband tussen de doorlaatfactor en het vochtgehalte (○—○) en het gelinealiseerde verband tussen de doorlaatfactor en het vochtgehalte (Δ—Δ).

Het specifieke debiet v in vergelijking 4 is voor een stationaire stromings-situatie gelijk aan het neerslagoverschot (NN). Als het neerslagoverschot bekend is, dan is uitgaande van vergelijking 4 de bijbehorende doorlaatfactor (k) ook bekend. Als wordt aangenomen dat er een eenduidige relatie bestaat tussen de



doorlaatfaktor (k) en het vochtgehalte (θ) is bij een bekende doorlaatfaktor (k) het bijbehorende vochtgehalte eveneens bekend. Het effectieve vochtgehalte wordt nu gelijkgesteld aan dit vochtgehalte. Er wordt dus geen rekening gehouden met een eventueel aanwezige hoeveelheid vocht die niet verdrongen kan worden (immobiel water). Voor de duidelijkheid zijn in figuur 5 de relaties die er bestaan tussen het vochtgehalte θ , de drukhoogte ψ en de doorlaatfaktor k weergegeven. Deze relaties gelden voor grof zand (Rijtema, 1969; standaardondergrond nr. 1). De vochtkarakteristiek (relatie tussen de drukhoogte en het vochtgehalte; volgetrokken lijn) is uit tabellen overgenomen. De relatie tussen de doorlaatfaktor en het vochtgehalte ($k - \theta$ relatie) moet worden gekonstrueerd. Dit gebeurt aan de hand van de vochtkarakteristiek en de relatie tussen de doorlaatfaktor en de drukhoogte ($k - \psi$ relatie) die kan worden berekend aan de hand van het concept van Rijtema (1969). Bij een drukhoogte van bijvoorbeeld -0.4 m behoort een vochtgehalte van $0.085 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Dit getal kan uit de vochtkarakteristiek worden afgeleid. Met de $k - \psi$ relatie (concept Rijtema) kan worden berekend dat de doorlaatfaktor bij een drukhoogte van -0.4 m ca. $1.35 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{dag}^{-1}$ bedraagt. Op deze wijze is dus één punt van de relatie tussen de doorlaatfaktor en het vochtgehalte ($k - \theta$) vastgelegd. Door dit een aantal malen te herhalen kan de $k - \theta$ relatie worden vastgelegd (fig. 5).

De Laat (1980) geeft aan dat voor vele toepassingen de niet-lineaire relatie tussen de doorlaatfaktor k en het vochtgehalte θ gelineariseerd kan worden. In de meeste onderzoeken is namelijk maar een deel van de $k - \theta$ relatie relevant. In het onderzoek naar de verblijftijden betreft dit het traject tussen de k -waarde van 0.5 en $2.0 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{dag}^{-1}$. Voor dit traject is de niet-lineaire $k - \theta$ relatie vervangen door een lineair verband (fig. 5). Wordt de doorlaatfaktor (k) vervangen door het neerslagoverschot (zie vergl. 5) en wordt het bijbehorende vochtgehalte aangeduid met het effectief vochtgehalte dan kan de vergelijking voor deze lijn als volgt worden geschreven:

$$\theta_e = \alpha + \beta \cdot 10 \log (NN \times 100) \quad (6)$$

waarin:

α en β : konstanten die per bodemtype verschillen.



Uit figuur 5 kan men aan de hand van deze informatie afleiden dat bij een neerslagoverschot van $1 \cdot 10^{-3} \text{ m.dag}^{-1}$ het effectief vochtgehalte ca. $0.065 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ bedraagt. Voor de berekening van de verblijftijd wordt vergl. 6 gesubstitueerd in vergl. 2 waardoor de volgende formule ontstaat:

$$\bar{t} = \frac{D \cdot (\alpha + \beta^{10} \log (NN \times 100))}{NN} \quad (7)$$

Vanwege het grote aantal berekeningen dat met vergelijking 7 moet worden uitgevoerd is een rekenprogramma geschreven in FORTRAN (RID-kodenaam: VBTOZ). Dit rekenprogramma levert uiteindelijk een kumulatieve frekwentieverdeling van de verblijftijden voor het gebied van de Utrechtse Heuvelrug.



3.

invoergegevens

De oppervlakte van de Utrechtse Heuvelrug, waarvoor de verblijftijd in de onverzadigde zone van de grond wordt bepaald, bedraagt ca. 15.500 ha. (kaart 1). Ten behoeve van de berekeningen van de stroming in de verzadigde zone is over dit gebied een netwerk van driehoekjes gelegd. De hoekpunten van de driehoeken worden knooppunten genoemd. In totaal zijn er op deze wijze 543 knooppunten onderscheiden. Voor elk van deze punten zal de gemiddelde verblijftijd worden bepaald, rekening houdend met de specifieke gebiedseigenschappen zoals die ter plaatse van het knooppunt gelden. De eigenschappen die per punt moeten worden bepaald en in het rekenprogramma moeten worden ingevoerd zijn (zie vergelijking 7): de grootte van het neerslagoverschot (NN), de dikte van de onverzadigde zone (D) en het effectieve vochtgehalte (θ_e). Hierop wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan.

3.1. het neerslagoverschot

Bij de bepaling van de grootte van het neerslagoverschot is het belangrijk te weten over welke periode deze grootheid moet worden bepaald. Bij het onderhavige onderzoek is uitgegaan van het gemiddelde neerslagoverschot in de periode 1973 t/m 1976. Voor deze periode zijn deze cijfers reeds bepaald ten behoeve van andere deelonderzoeken binnen het project "Winning en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht". De periode 1973 t/m 1976 wordt gekenmerkt door grote meteorologische verschillen. Het zomerhalfjaar van 1975 was droog en het zomerhalfjaar van 1976 extreem droog. Het winterhalfjaar van 1974 was daarentegen extreem nat. Uit een vergelijking van de 4-jaarse som van de neerslag te De Bilt met de huidige sommen van het station Utrecht (KNMI, 1957) blijkt, dat de kans dat deze som wordt onderschreden ca. 40% bedraagt. Met andere woorden: de neerslagsom over de gehele periode benadert redelijk de langjarig gemiddelde waarde, waarbij aangetekend moet worden dat deze opgebouwd is uit jaarsommen van sterk verschillende jaren. In feite moet voor het bepalen van de representativiteit van de periode 1973 t/m 1976 niet alleen naar de neerslaghoogte maar ook naar de verdamping of het neerslagoverschot worden gekeken. Van deze grootheden zijn echter geen frekwentieverdelingen voorhanden.



Het neerslagoverschot is gelijk aan het verschil tussen de neerslag en de werkelijke verdamping. De neerslag wordt gemeten op 8 stations binnen of net buiten het gebied. In tabel 1 staat aangegeven van welke neerslagstations bij het onderzoek is uitgegaan. Behalve over KNMI-stations kon ook beschikt worden over de neerslagcijfers van stations die door het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN) worden beheerd. De neerslagstations liggen op een hoogte van 10 m +N.A.P. of lager. Een uitzondering daarop vormt het neerslagstation Soesterberg dat op een hoogte van ca. 13 m +N.A.P. ligt. Dit impliceert dat geen enkel station echt hoog ligt (de hoogste heuveltoppen van de Utrechtse Heuvelrug liggen hoger dan 50 m +N.A.P.). In hoeverre in de gebruikte neerslagstations dan ook de enigszins aanwezige orografische effecten (stijgingsregens; Buishand en Velds, 1980) zijn verdiskonteerd is onduidelijk.

In tabel 1 wordt voor elk station voor de jaren 1973 t/m 1976 de neerslaghoogte gegeven. Zoals al eerder is opgemerkt varieert deze sterk van jaar tot jaar. Echter ook tussen de stations onderling bestaan grote verschillen. Met behulp van de methode van Thiessen zijn er polygonen over het gebied gelegd (kaart 1).

Tabel 1.

Overzicht van de neerslagstations en de neerslaghoogte.

station	beheerder	neerslaghoogte (mm)			
		1973	1974	1975	1976
1. Wijk bij Duurstede	KNMI	678	813	672	446
2. De Bilt	"	779	993	628	542
3. Hamersveld	"	802	951	634	571
4. Woudenberg	"	846	1014	730	553
5. Soesterberg	"	826	946	596	512
6. Soestduinen	WMN	831	1084	668	607
7. Zeist	"	731	946	622	529
8. Groenekan	"	779	993	628	544

Vervolgens is aan elk knooppunt een polygoonnummer toegekend.

De werkelijke verdamping wordt berekend uit de potentiële transpiratie, de evaporatie van interceptiewater, de neerslag en de bodemvochtleverantie (afhanke-



lijk van o.a. bodemgesteldheid en grondwaterstand). De potentiële transpiratie is afhankelijk van meteorologische gegevens, zoals de windsnelheid, de temperatuur, de relatieve zonneschijn en de relatieve vochtigheid. Daarnaast is de potentiële transpiratie ook afhankelijk van het bodemgebruik c.q. vegetatietype. In dit kader zijn de volgende bodemgebruiksvormen onderscheiden: grasland, naaldbos, akkerbouw en zandverstuiving. Voor de potentiële evaporatie van zandverstuiving is globaal de transpiratie van zeer kort gras (2 cm) genomen. Het op de Utrechtse Heuvelrug aanwezige loofbos is als naaldbos benaderd. De potentiële transpiratie van heide is ten gevolge van het ontbreken van gegevens gelijkgesteld aan die van grasland. Behalve de genoemde vormen van bodemgebruik is ook nagegaan waar bebouwing voorkomt. Op kaart 2 wordt de verbreiding gegeven van de verschillende vormen van bodemgebruik. Deze kaart is afgeleid van de topografische kaart.

De evaporatie van interceptiewater is bepaald uit een relatie tussen de bruto neerslag (neerslag boven het gewas) en de netto neerslag (neerslag die de grond bereikt). Overigens is dit proces alleen maar van belang bij naaldbos. De relatie tussen de bruto en de netto neerslag is afgeleid uit gegevens die door Ryhiner en Rijtema (1963) worden gegeven voor *Pinus Nigra*. Voor de bepaling van de grootte van de evaporatie van interceptiewater zijn dagsommen van de neerslag noodzakelijk.

Als de vraag naar water bekend is (potentiële transpiratie), het deel van de neerslag dat de grond bereikt (netto neerslag), en de bodemvocht-leverantie kan de werkelijke verdamping worden berekend. De bodemvochtleverantie is gelijk aan de hoeveelheid vocht die de wortelzone van de plant kan leveren plus de hoeveelheid die via kapillaire opstijging uit de ondergrond beschikbaar komt. De kapillaire opstijging in een grofzandige ondergrond met een diepe grondwaterstand is verwaarloosbaar klein. In dit geval is bodemvochtleverantie dus gelijk aan de hoeveelheid vocht die in de wortelzone beschikbaar is. De hoeveelheid vocht in de wortelzone kan worden bepaald uit de vochtkarakteristiek (pF-kurve) en de dikte van deze zone. Beide grootheden hangen samen met de bodemgesteldheid. In dit kader zijn 6 bodemtypen onderscheiden. Het onderscheid ertussen berust op de granulaire samenstelling van de bovengrond en de dikte van het humeuze dek. Behalve de bodemtypen is ook vastgesteld waar in het modelgebied gronden voorkomen met een grondwatertrap kleiner dan VII. Voor deze gronden, die met name aan de flanken van de Utrechtse Heuvelrug voorkomen (kaart 3) wordt de verblijftijd niet bepaald omdat de rekenmethode daar niet kan worden toegepast



(hoofdstuk 2). Ook is op de kaart aangegeven waar niet-gekarteed gebied voorkomt. Over het algemeen zijn dit gebieden met stedelijke bebouwing. Kaart 3 is ontleend aan de bodemkaart van Nederland (lit. 8).

Nadat het aantal combinaties van neerslagstation, bodemgesteldheid en bodemgebruiksvorm is vastgesteld wordt voor elke combinatie het neerslagoverschot bepaald. Voor het onderzoek zijn 62 combinaties onderscheiden. De berekening van het neerslagoverschot vindt plaats met behulp van het rekenprogramma EXRAIN waarmee met tijdstappen van 10 dagen de periode 1973 t/m 1976 is doorgerekend. Voor elke tijdstap wordt nagegaan of aan de vraag naar water (potentiële verdamping) kan worden voldaan. Aan de vraag moet worden voldaan door de neerslag en de uitdroging van de wortelzone. Deze uitdroging kent uiteraard een bovengrens waarboven een reductie van de potentiële verdamping optreedt. In die situatie is de werkelijke verdamping kleiner dan de potentiële verdamping. Als in de daaropvolgende periode de neerslag groter is dan de potentiële verdamping wordt allereerst de uitgedroogde wortelzone aangevuld. Wanneer deze echter voldoende is aangevuld treedt er perkolatie op naar de onverzadigde ondergrond. Het jaarlijks neerslagoverschot wordt nu gelijk gesteld aan de gesommeerde perkolatie over een kalenderjaar.

Het op deze wijze berekende gemiddelde neerslagoverschot in de periode 1973 t/m 1976 is voor de 62 combinaties gegeven op bijlage 1. Er blijken grote verschillen te bestaan tussen de combinaties. Verschillen van meer dan 100 mm blijken voor te komen. Over het algemeen zal het neerslagoverschot op een fijnzandige grond kleiner zijn dan op een grofzandige grond. Ook neemt het neerslagoverschot af met de toename van de dikte van het humeuze dek. Verder zal het neerslagoverschot in een gebied met naaldbos kleiner zijn dan in een landbouwgebied. Het grootste neerslagoverschot wordt aangetroffen in gebieden met zandverstuivingen. Nadat het neerslagoverschot voor de verschillende combinaties van neerslagstation, bodemgesteldheid en bodemgebruik is bepaald wordt aan elk van de 543 knooppunten één van de combinaties toegekend.

De berekeningen met het model EXRAIN zijn uitgevoerd in 1978. Sindsdien is de ontwikkeling op het gebied van de modellering van het plant-water-bodem systeem verder gegaan (Informeel Groep Verdamping, 1983). Het rekenmodel EXRAIN is nog niet aangepast aan deze nieuwe inzichten. Dit geldt met name een aanpassing van het verdampingsconcept van naaldbos. Deze aanpassing zal worden uitgevoerd in een later stadium van het project Oost-Utrecht. Ook zouden de ingevoerde neer-



slagreeksen van de verschillende neerslagstations nog eens nader moeten worden geanalyseerd.

3.2. de dikte van de onverzadigde zone

Behalve de grootte van het neerslagoverschot is ook de dikte van de onverzadigde zone van belang bij de bepaling van de verblijftijd. Uit vergelijking 7 blijkt dat de verblijftijd lineair evenredig is met de dikte van de onverzadigde zone. In feite geldt vergelijking 7 alleen maar voor de perkolatie-zone in de onverzadigde zone (hoofdstuk 2). Dat wil zeggen vanaf 1 à 2 m beneden het maaiveld tot aan het freatische vlak. Voor de bovenste 1 à 2 m zou de verblijftijd met een heel andere rekenmethodiek moeten worden bepaald (Van Drecht, 1982). In het kader van dit onderzoek, waar het om een globale schatting van de verblijftijd gaat, wordt aangenomen dat de verblijftijd in de bovenste meters ook met vergelijking 7 kan worden bepaald.

De dikte van de onverzadigde zone is bepaald uit het verschil tussen de maaiveldshoogte en het niveau van het freatische vlak. Dit is voor elk van de 543 knooppunten uitgevoerd. De hoogte van het maaiveld is geschat aan de hand van de topografische kaart (schaal 1:25.000). In gebieden met een grote gradient in de maaiveldshoogte kan dit tot fouten van enkele meters leiden. Dit geldt met name voor de steile oostflank van de Utrechtse Heuvelrug. Het niveau van het freatische vlak is afgeleid uit een isohypsenkaart. Bij de konstruktie van deze kaart is gebruik gemaakt van de stijghoogten op 28 oktober 1974. Op kaart 4 wordt de aldus bepaalde dikte van de onverzadigde zone gegeven.

3.3. het effectieve vochtgehalte

Als de grootte van het neerslagoverschot en de dikte van de onverzadigde zone alsmede het effectief vochtgehalte bekend zijn kan voor elk van de 543 knooppunten de verblijftijd worden berekend (vergl. 7). De grootte van het effectieve vochtgehalte hangt af van de bodemfysische eigenschappen van de onverzadigde ondergrond en van het neerslagoverschot. Het effectieve vochtgehalte is te benaderen met een vergelijking waarin het neerslagoverschot voorkomt en 2 konstanten die informatie geven over de bodemfysische eigenschappen (hoofdstuk 2; vergl. 6). Voor het bepalen van de bodemfysische eigenschappen uit de granulaire samenstelling kan geen gebruik gemaakt worden van de bodemkaart (kaart 3). Deze kaart geeft namelijk alleen maar informatie over de bovenste laag van de onverzadigde



zone (tot 120 cm -m.v.; met de nadruk op bovenste 40 à 80 cm). Voor het bepalen van het effectieve vochtgehalte zijn echter juist de bodemfysische eigenschappen van de laag daaronder van belang. Uit de geogenese van het gebied kan men echter wel afleiden dat het zeer waarschijnlijk is dat de textuur van de onverzadigde ondergrond, zal variëren tussen matig fijn zand en grof zand. De konstanten uit vergelijking 6 worden voor deze beide typen zand en het ertussen liggende matig grof zand gegeven in tabel 2. De konstanten zijn afgeleid op de in hoofdstuk 2 aangegeven wijze uit gegevens die Rijtema (1969) geeft voor een 20-tal standaardgronden. Daarnaast wordt in tabel 2 het traject gegeven waarbinnen het effectieve vochtgehalte ligt.

Tabel 2.

Waarden van de konstanten α en β (vergl. 6) en het bijbehorende traject van het effectieve vochtgehalte.

standaardgrond	α	β	effectief vochtgehalte* bij een neerslagoverschot** van:				
			100	200	300	400	500
1. grof zand	0.0719	0.0070	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
2. matig grof zand	0.1713	0.0217	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
2. matig fijn zand	0.2240	0.0380	0.16	0.18	0.18	0.19	0.19

* effectief vochtgehalte in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

** neerslagoverschot mm jaar⁻¹

Met uitzondering van matig fijn zand blijkt het vochtgehalte nauwelijks afhankelijk te zijn van de grootte van het neerslagoverschot. Op grond hiervan kan men konkluderen dat geen grote fouten worden geïntroduceerd indien vergl. 2 wordt toegepast met een konstant vochtgehalte. Uit tabel 2 blijkt verder dat met name grote verschillen bestaan tussen grof zand enerzijds en matig grof en matig fijn zand anderzijds. Het effectieve vochtgehalte van grof zand is een faktor 2.5 à 3 lager dan dat van de beide andere typen zand. Aangezien de verblijftijd lineair evenredig is met het effectieve vochtgehalte (zie vergl. 2) zal de verblijftijd



in grof zand aanzienlijk kleiner zijn dan in matig grof of matig fijn zand. Het effectieve vochtgehalte blijkt enigszins toe te nemen met de grootte van het neerslagoverschot. Dit heeft dus een tegengesteld effect. Een toename van het neerslagoverschot zou een evenredige afname van de verblijftijd veroorzaken als het effectieve vochtgehalte konstant zou blijven. Dit neemt echter toe met een toename van het neerslagoverschot. Daardoor is de verblijftijd niet omgekeerd evenredig met het neerslagoverschot.



4.

resultaten

In dit hoofdstuk worden de berekende verblijftijden in de onverzadigde zone van de grond gepresenteerd voor het gebied van de Utrechtse Heuvelrug. De verblijftijden zullen niet, zoals dit over het algemeen wel gebruikelijk is, worden gepresenteerd als één waarde voor een bepaalde plaats maar in de vorm van meerdere waarden. Dit hangt samen met het doel van het onderzoek. Nagegaan moest worden in welke orde van grootte de verblijftijden liggen en hoe de grootte ervan wordt beïnvloed door de gebiedseigenschappen. Uitgangspunt was dus niet een zo goed mogelijke bepaling van de gebiedseigenschappen waarna één waarde voor de verblijftijd wordt gepresenteerd, maar een schatting van het traject waarbinnen de gebiedseigenschappen liggen waarna meerdere waarden voor de verblijftijd op een en dezelfde plaats worden gegeven. In dit kader zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

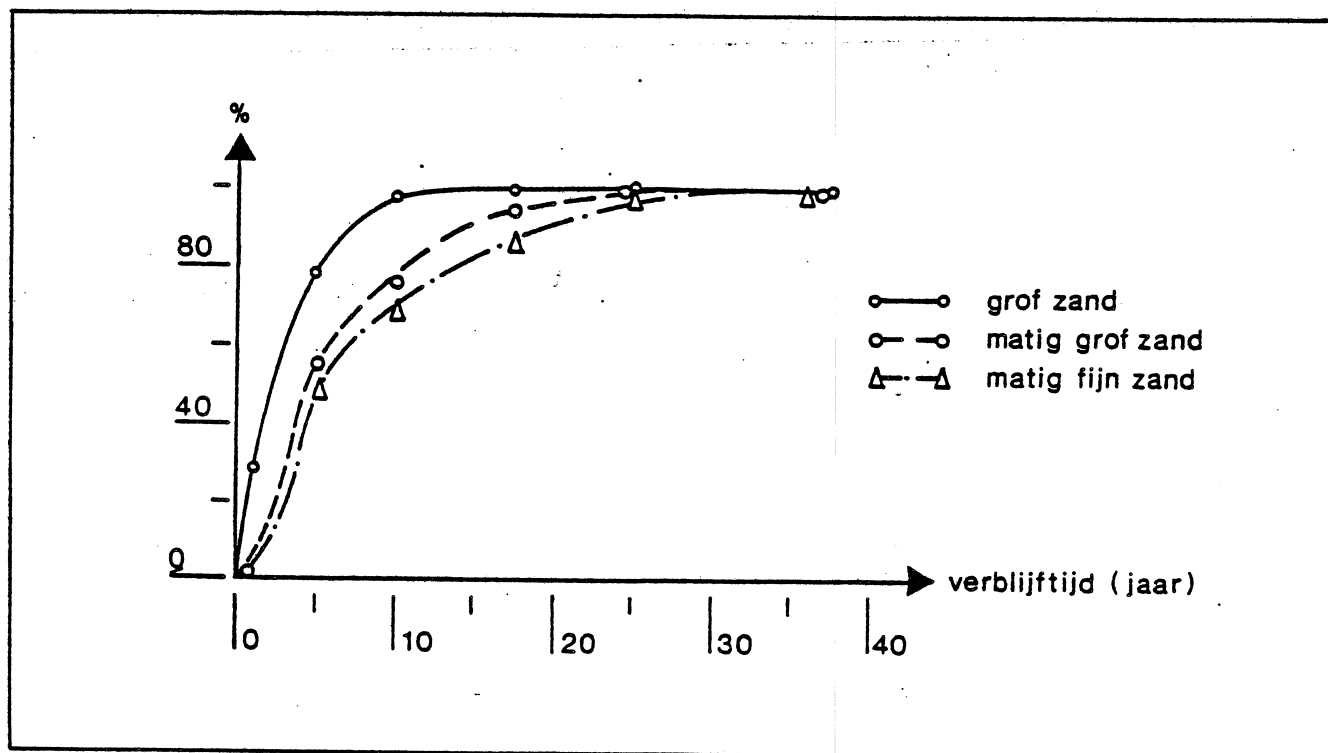
- I : Onverzadigde ondergrond in het gehele gebied bestaat uit grof zand en het neerslagoverschot is afkomstig van de periode 1973 t/m 1976.
- II : Onverzadigde ondergrond in het gehele gebied bestaat uit matig grof zand en het neerslagoverschot is afkomstig van de periode 1973 t/m 1976.
- III : Onverzadigde ondergrond in het gehele gebied bestaat uit matig fijn zand en het neerslagoverschot is afkomstig van de periode 1973 t/m 1976.
- IV : Onverzadigde ondergrond in het gehele gebied bestaat uit grof zand en uitgangspunt is een groot neerslagoverschot. Hiervoor is het neerslagoverschot van het jaar 1974 gekozen (bijlage 2).
- V : Onverzadigde ondergrond in het gehele gebied bestaat uit grof zand en het uitgangspunt is een gering neerslagoverschot. Hiervoor is het neerslagoverschot van het jaar 1975 gekozen (bijlage 3).

De berekeningen met het rekenprogramma VBTOZ (verblijftijden onverzadigde zone; oplossing vergl. 7) zijn dus 5 maal uitgevoerd. De eerste 3 berekeningen omvatten een gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de textuur van de onverzadigde ondergrond; de berekeningen IV en V een gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de grootte van het neerslagoverschot. Elke berekening levert voor elk van de 543 knooppunten van het model een waarde voor de verblijftijd op. Deze waarden zijn

in eerste instantie verwerkt in een kumulative frekwentieverdeling. In deze verdeling zijn niet de punten betrokken waarvan de verblijftijd geschat is. Dit betreft 108 punten (ca. 1500 ha) die in niet-gekarteerd gebied liggen (meestal bebouwing) of in gebieden waar de grondwaterstand ondiep beneden maaiveld voorkomt (grondwatertrap < VII). In figuur 6 is de kumulative frekwentieverdeling gegeven voor de situatie dat de ondergrond uit grof zand bestaat (I) uit matig grof zand (II) of uit matig fijn zand (III). Het betreft hier dus een gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond. In figuur 7 wordt de kumulative frekwentieverdeling uitgaande van verschillende grootten van het neerslagoverschot (I, IV en V) gegeven.

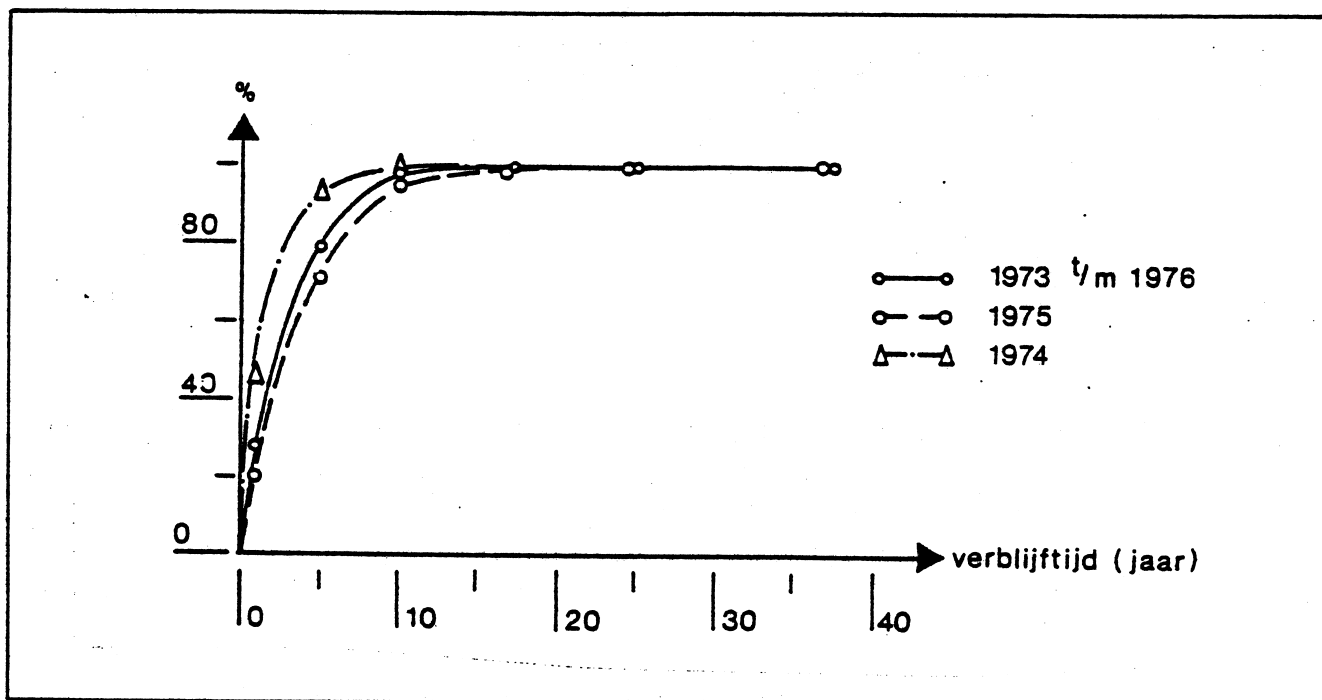
Behalve in de vorm van frekwentieverdelingen worden de berekende verblijftijden ook gegeven op kaarten. Dit is voor de exercities I t/m V gedaan op de kaarten 5 t/m 9. Met behulp van een digitizer is de oppervlakte van de verschillende kaartvlakken bepaald. De resultaten van deze bepaling staan vermeld in tabel 3.

Uit figuur 2, tabel 3 en kaart 5, 6 en 7 kan worden afgeleid, dat de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond een grote invloed heeft op de



Figuur 6.

De kumulative frekwentieverdeling van de gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone als functie van de granulaire samenstelling van de ondergrond.



Figuur 7.

De kumulatieve frekwentieverdeling van de gemiddelde verblijftijd in een grofzandige onverzadigde zone als functie van de grootte van het neerslagoverschot.

berekende verblijftijd in de onverzadigde zone. Hoe fijner de textuur van de onverzadigde ondergrond is hoe groter de verblijftijd wordt. Zo is bijvoorbeeld de oppervlakte met een verblijftijd groter dan 5 jaar, voor de situatie dat de ondergrond uit matig fijn zand bestaat, een faktor 3 groter dan voor het geval dat de ondergrond uit grof zand zou bestaan. Indien de onverzadigde ondergrond uit grof zand zou bestaan dan is het gebied met een verblijftijd groter dan 10 jaar in totaal slechts ca. 11 ha. Als echter de onverzadigde ondergrond uit matig grof of uit matig fijn zand zou bestaan dan zou 2400 à 3000 ha van het onderzoeksgebied worden ingenomen door gebieden met een verblijftijd groter dan 10 jaar. Indien de ondergrond uit matig fijn zand zou bestaan dan komen zelfs gebieden voor met een verblijftijd groter dan 25 jaar (kaart 7; 56 ha). De grote gevoeligheid van de verblijftijd voor de granulaire samenstelling wordt veroorzaakt door de grootte van het effectieve vochtgehalte (hoofdstuk 3.3).

Uit figuur 3, tabel 3 en kaart 8 en 9 kan worden afgeleid dat ook de grootte van het neerslagoverschot een vrij grote invloed heeft op de berekende verblijftijd. Als er gedurende een langere periode (bij grof zand ca. 5 jaar) een groot neerslagoverschot optreedt dan neemt de oppervlakte met een verblijftijd van 5 jaar



en groter af met een faktor 6 (vergelijk I en IV). De oppervlakte met een verblijftijd groter dan 1 jaar neemt met ca. 20% af. In het geval dat er gedurende een langere periode (bij grof zand ca. 10 jaar) een gering neerslagoverschot zou optreden neemt de verblijftijd toe. Het gebied met een verblijftijd van groter

Tabel 3.

De oppervlakte (ha.) van het gebied waar de verblijftijd groter is dan een bepaalde waarde.

verblijftijd	berekening				
	neerslagoverschot 1973 t/m 1976				
	grof I	matig grof II	matig fijn III	groot overschot IV	gering overschot V
1 jaar	7500 (54)*	11500 (82)	12100 (86)	5800 (41)	8900 (64)
2 jaar	4700 (34)	-	-	3400 (25)	5400 (39)
5 jaar	1800 (13)	4500 (32)	5100 (36)	290 (2)	2700 (19)
10 jaar	11 (0)	2400 (17)	3000 (21)	0	250 (2)
15 jaar	0	500 (3)	1600 (11)	0	0
20 jaar	0	38 (0)	400 (3)	0	0
25 jaar	0	0	56 (0)	0	9

* procentueel aandeel van totale gebied wat gekarteerd is (ca. 14.000 ha).

dan 5 jaar neemt toe van 1800 naar 2700 ha (vergelijk I en V). Ook komen er dan gebieden voor met een verblijftijd van 10 jaar en groter (kaart 9; 250 ha).

Bij de gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de grootte van het neerslagoverschot is uitgegaan van extremen. Dit is ten aanzien van de textuur van de ondergrond (I en III) veel minder het geval. De onverzadigde ondergrond zal namelijk nooit in het gehele gebied over de hele dikte dezelfde textuur hebben. De "werkelijke" verblijftijd zal op grond van de textuur van de onverzadigde ondergrond liggen tussen de waarden die op de kaarten 4, 5 en 6 worden gegeven. Op de ene plaats waar over de gehele dikte voornamelijk matig fijn zand voorkomt zal deze benaderd worden door de waarde die op kaart 7 voorkomt op de andere plaats met grof zand door de waarde op kaart 5.



5.

samenvatting, konklusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal allereerst een samenvatting worden gegeven van het onderzoek waarna de belangrijkste konklusies worden weergegeven. Tenslotte zullen nog enkele aanbevelingen worden gedaan.

5.1. samenvatting

In het voorliggende rapport wordt verslag gedaan van de eerste fase van een onderzoek naar de grootte van de verblijftijd in de onverzadigde zone van de grond in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug. Dit onderdeel had tot doel een indikatie te geven van de orde van grootte van de verblijftijd en de gevoeligheid daarvan voor veranderingen in de invoergegevens. Aan de hand van de resultaten van de eerste fase moet worden nagegaan of de verblijftijd in de onverzadigde zone een relevante grootte is in het kader van de bescherming van de grondwaterkwaliteit. Als dat inderdaad het geval is dan moet het onderzoek uit de eerste fase aangeven, welk onderzoek uitgevoerd moet worden om te komen tot een definitievere kaart met de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van de grond.

In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de rekenmethode die is gevolgd om te komen tot een schatting van de verblijftijd. De uiteindelijk afgeleide vergelijking (vergl. 7) gaat uit van een propstroom-benadering en stationair vochttransport in de onverzadigde zone van de grond uitgaande van een langjarig gemiddeld neerslagoverschot. In de vergelijking komen verder nog de dikte van de onverzadigde zone en het effectieve vochtgehalte voor. Het effectieve vochtgehalte behorende bij een bepaalde stationaire stromingssituatie wordt bepaald aan de hand van bodemfysische eigenschappen (fig. 5). De rekenmethode houdt geen rekening met het vrij complexe probleem van de verblijftijdbepaling in de bovenste 1 à 2 m van de grond. De rekenmethode mag derhalve alleen maar toegepast worden in gebieden met diepe grondwaterstanden. De verblijftijd moet geïnterpreteerd worden als de gemiddelde verblijftijd van een conservatieve stof. Er wordt dus geen rekening gehouden met dispersie, adsorptie, afbraak, chemische reacties e.d.



In hoofdstuk 3 worden de invoergegevens behandeld. Het betreft hier de grootte van het neerslagoverschot, de dikte van de onverzadigde zone en het effectieve vochtgehalte. Om tegemoet te komen aan de heterogeniteit binnen het gebied van de Utrechtse Heuvelrug zijn deze grootheden voor de 543 knooppunten van het model voor de grondwaterstroming geschat. Voor ca. 20% van de punten (10% van de oppervlakte) is geen schatting van de verblijftijd mogelijk omdat het neerslagoverschot niet te bepalen is of omdat de grondwaterstand te ondiep beneden het maaiveld voorkomt.

Het neerslagoverschot is voor de periode 1973 t/m 1976 bepaald aan de hand van het bodemgebruik, de bodemgesteldheid en de meteorologische gegevens. De periode 1973 t/m 1976 is arbitrair gekozen omdat het neerslagoverschot over deze periode reeds eerder in het kader van het projekt Oost-Utrecht was vastgesteld. Het neerslagoverschot is bepaald met een model dat de waterstroming in het bodemplant systeem beschrijft uitgaande van tijdstappen van 10 dagen. Het neerslagoverschot is met dit model berekend voor verschillende combinaties van: bodemgebruik, bodemgesteldheid en meteorologische gegevens (incl. neerslag). De aldus bepaalde waarden, die zijn vermeld in bijlage 1, 2 en 3, zijn vervolgens aan de knooppunten toegekend.

De dikte van de onverzadigde zone is bepaald aan de hand van de maaiveldshoogte (topografische kaart) en een isohypsenkaart van het freatische vlak (kaart 4). Het effectieve vochtgehalte, dat een functie is van de grootte van het neerslagoverschot, wordt voor enkele verschillende typen ondergronden gegeven in tabel 2. De resultaten van de berekeningen worden gegeven in hoofdstuk 4. In totaal zijn 5 berekeningen uitgevoerd waarvan er 3 betrekking hebben op de invloed van de textuur van de onverzadigde ondergrond op de berekende verblijftijd. De overige 2 berekeningen gaan nader in op de invloed van de grootte van het neerslagoverschot op de verblijftijd. Er wordt geen kaart of tabel gepresenteerd met de verblijftijd omdat de uitkomst van in feite elk van de 6 berekeningen of combinaties daarvan mogelijk is.

De berekende verblijftijden van de gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de textuur van de onverzadigde ondergrond worden gegeven op kaart 5, 6 en 7 en in de vorm van een kumulatieve frekwentieverdeling in figuur 6. De oppervlakte van gebieden met een verblijftijd groter dan een bepaalde waarde wordt gegeven in tabel 3. De invloed van de grootte van het neerslagoverschot op de berekende verblijftijden kan men afleiden uit tabel 3 en kaart 5, 8 en 9 en uit de kumulatieve frekwentieverdeling in figuur 7.



5.2. konklusies

De eerste fase van het onderzoek naar de grootte van de verblijftijd in de onverzadigde zone van de grond voor het gebied van de Utrechtse Heuvelrug leidt tot de volgende konklusies:

- Uit de gehanteerde rekenmethode (vergl. 2 en 7) volgt dat de verblijftijd recht evenredig is met de dikte van de onverzadigde zone en de grootte van het effectieve vochtgehalte. Vanwege de samenhang tussen het effectieve vochtgehalte en het neerslagoverschot is de verblijftijd vrijwel omgekeerd evenredig met de grootte van het neerslagoverschot (paragraaf 3.3.)
- Bij de bepaling van de grootte van het neerslagoverschot moet in ieder geval rekening worden gehouden met de verschillen in neerslag op de Utrechtse Heuvelrug en de verschillen in bodemgebruik c.q. vegetatie. De bodemgesteldheid heeft met name in droge jaren invloed op de grootte van het neerslagoverschot.
- De berekende verblijftijd in de onverzadigde zone blijkt in zeer sterke mate te worden beïnvloed door het vochtgehalte in de onverzadigde ondergrond. Dit vochtgehalte hangt in zandgronden sterk samen met de textuur van de ondergrond. Zo neemt bijvoorbeeld het aandeel van het gebied waar de verblijftijd groter is dan 10 jaar toe van nagenoeg niets tot ca. 20% indien in plaats van grof zand wordt uitgegaan van matig fijn zand (tabel 3 en kaart 5 en 7). De grote gevoeligheid wordt veroorzaakt door de samenhang tussen de granulaire samenstelling en het effectieve vochtgehalte.
- De berekende verblijftijd in de onverzadigde zone wordt ook beïnvloed door de grootte van het neerslagoverschot indien dit over een langere periode afwijkt van de gemiddelde waarde. Bij een groot neerslagoverschot neemt het aandeel van het gebied waar de verblijftijd groter is dan 5 jaar af van 13 naar 2%. Bij een gering neerslagoverschot treedt het tegenovergestelde op. Daar neemt dit aandeel van het gebied toe van 13 naar 19% (tabel 3).
- De granulaire samenstelling van de onverzadigde zone van de grond heeft een grotere invloed op de berekende verblijftijd dan het neerslagoverschot. Bij de



gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de grootte van het neerslagoverschot is uitgegaan van extremen terwijl bij de gevoeligheidsanalyse ten aanzien van de textuur van de ondergrond uitgegaan is van granulaire samenstellingen die waarschijnlijk voorkomen.

- Bij de bescherming van waterwingebieden in gebieden als de Utrechtse Heuvelrug zal in sommige gevallen ten aanzien van de gebruiksbepkeringen binnen de beschermingszone rekening kunnen worden gehouden met de verblijftijd in de onverzadigde zone van de grond. Deze bedraagt namelijk soms meer dan 10 en incidenteel wel eens 25 jaar.

5.3. aanbevelingen

Tot slot kunnen voor de uit te voeren 2e fase van het onderzoek naar de verblijftijden in de onverzadigde zone de volgende aanbevelingen worden gedaan.

- Bepaling van het effectieve vochtgehalte in het veld en korreleren met de granulaire samenstelling. Bepaling moet gebeuren in de perkolatiezone.
- Omdat er een duidelijk verband bestaat tussen het effectieve vochtgehalte en de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond moet worden gezien welke beschikbare boorgegevens in dit verband bruikbaar zijn. Met behulp van statistische technieken kan vervolgens een beeld worden gegeven van de ruimtelijke verbreiding van de textuur, eventueel met de diepte. Noodzakelijke aanvulling van de gegevens kan bijvoorbeeld worden verkregen door het uitvoeren van een serie handboringen.
- Nagaan of het gemiddelde neerslagoverschot in de periode 1973 t/m 1976 voldoende representatief is voor een langjarig gemiddelde waarde.
- Berekening van het neerslagoverschot herhalen als de daarvoor gebruikte rekenmethodiek (EXRAIN) aangepast is aan de recente ontwikkelingen op het gebied van de modellering van het verdampingsproces.
- De in dit rapport gepresenteerde rekenmethodiek steeksproefgewijs kontroleren met een voor dit doel qua model-concept betere, maar tijdrovendere methodiek (Van Drecht, 1982). Hierbij kan aan het volgende worden gedacht:



- neerslagoverschotgegevens van lange reeks van kalenderjaren in plaats van langjarig gemiddelde;
 - bepaling van de diepte van de uitdrogingszone c.q. de bovenkant van de perkolatiezone;
 - toetsing van het concept van het effectieve vochtgehalte en dan met name voor matig fijne zandgronden;
 - bepaling van de verblijftijd in de bovenste 1 à 2 m van de onverzadigde zone rekening houdend met de periodieke uitdroging en herbevochting alsmede het moment waarop een bepaalde verontreiniging op het maaiveld terecht komt (winter- of zomerhalfjaar);
 - invloed van dispersie en eventueel adsorptie of afbraak op de berekende verblijftijd.
-
- Aan de hand van de granulaire samenstelling en de geogenese (ondermeer stuw-
wing) van het gebied nagaan of het concept van vertikaal transport overal opgaat.
 - Bepaling van het neerslagoverschot in het bebouwde gebied, dit mede in relatie tot de aard van de bebouwing.
 - Verifikatie van het modelconcept door het uitvoeren van kolomproeven in het laboratorium. Tevens moet worden nagegaan welke veldexperimenten er mogelijk zijn.



6.

literatuur

1. ANDERSON, J.L. and J. BOUMA, 1977
Water movement through pedal soils. II: Unsaturated flow.
Soil Sci Soc. Am. J. 41: 419-423.
2. BIGGAR, J.W. and D.R. NIELSEN 1967.
Miscible displacement and leaching phenomenon. Irrigation of agriculture
land.
Agromony 11, ASA Madison, Wisconsin, 254-274.
3. BOUMA, J., C. BELMANS, L.W. DEKKER and W.J.M. JEURISSEN, 1983.
Assessing the suitability of soils with macropores for subsurface liquid
waste disposal.
J. of Envir. Qual. Vol. 12, No. 3, pg. 305-311.
4. BUISSHAND, T.A. en C.A. VELDS, 1980
Neerslag en verdamping. Klimaat van Nederland 1. K.N.M.I. De Bilt.
5. DAY, P.R. and W.H. FORSYTHE, 1957.
Hydronamic dispersion of solutes in the soil moisture stream. Soil Sei. Soc.
Am. Proc. 21: 477-480.
6. DRECHT, G. VAN, 1982
Model voor het niet-stationaire transport van water en een opgeloste stof in
een kolom grond (model ONZAT).
RID-mededeling (in voorbereiding).
7. INFORMELE GROEP VERDAMPING, 1983
Eindrapport van de Informele Groep Verdamping.
Dienst Waterbeheer Gelderland, Arnhem (in voorbereiding).
8. KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT, 1957
Frekwenties van k-daagse neerslagsommen op Nederlandse stations. Deel 4:
Utrecht.
K.N.M.I.-rapport De Bilt.



9. LAAT, P.J.M. De, 1980
Model for unsaturated flow above a shallow water-table applied to a regional sub-surface flow problem.
Agric. Resch. Rep. 895, Wageningen.
10. LANEN, H.A.J. van, 1983
Verblijftijd in de onverzadigde zone van zandgronden in gebieden met diepe grondwaterspiegels.
H₂O (in voorbereiding).
11. RYHINER, A.H. en P.E. RIJTEMA, 1963
Berekening van de gemiddelde grootte van de verdamping van naalddhout (Pinus Nigra, austriaca, "L) volgens de methode McIlroy.
I.C.W.-stencil 129/0863/30.
12. RIJTEMA, P.E., 1969
Soil moisture forecasting
I.C.W.-nota 513.
13. STICHTING VOOR BODEMKARTERING
Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50000
- kaartblad 32-West Amersfoort
- kaartblad 39-West Rhenen.
14. TYLER, D.D. and G.W. Thomas, 1981
Chloride movement in undisturbed soil columns.
Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 459-461.
15. WAUTERS, F., 1980.
Experimentele studie van de stroming van een pollutant in een kunstmatige zandbodem.
Afstudeerwerk, Fakulteit der Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit Brussel.



bijlagen



Bijlage 1.

Het berekende gemiddelde neerslagoverschot (mm jaar^{-1}) voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor de periode 1973 t/m 1976.

Neerslagstation P.S. Groenekan

bodemgebruik/vegetatie	dun [*] cultuurdek		matig dik [*] cultuurdek		dik [*] cultuurdek	
	grof ^{**}	fijn ^{**}	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				343		342
• naaldbos		290		255		228
• zandverstuiving						
• akkerbouw						361

Neerslagstation P.S. Soestduinen

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland		413	425	401		399
• naaldbos	358	343	336	310	313	282
• zandverstuiving		511				
• akkerbouw			443		428	418

Neerslagstation De Bilt

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				339		339
• naaldbos		286		251		224
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

* dun, matig dik en dik cultuurdek; respektievelijk < 30, 30-50 en > 50 cm

** grof en fijn: respektievelijk grof en fijn zand

Bijlage 1. (vervolg)Neerslagstation Soesterberg

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	380	293	369			
• naaldbos	307					
• zandverstuiving	456					
• akkerbouw						

Neerslagstation Hamersveld

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	316	302			270	239
• naaldbos						
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation P.S. Zeist

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	364	330		319		317
• naaldbos	284	269		235		206
• zandverstuiving						
• akkerbouw		346		358		

*Bijlage 1. (vervolg)*Neerslagstation Woudenberg

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	427			384		
• naaldbos	344	329	322	295		267
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation Wijk bij Duurstede

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland						258
• naaldbos	227	212				165
• zandverstuiving						
• akkerbouw						275

**Bijlage 2.**

Het berekende neerslagoverschot (mm jaar^{-1}) voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor een jaar met een groot neerslagoverschot (1974).

Neerslagstation P.S. Groenekan

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				529		529
• naaldbos		465		432		407
• zandverstuiving						
• akkerbouw						543

Neerslagstation P.S. Soestduinen

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland		626	641	615		614
• naaldbos	555	537	535	505	516	484
• zandverstuiving		737				
• akkerbouw			630		631	616

Neerslagstation De Bilt

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				529		529
• naaldbos		465		432		407
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

*Bijlage 2. (vervolg)*Neerslagstation Soesterberg

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	544	528	545			
• naaldbos	468	452				
• zandverstuiving	647					
• akkerbouw						

Neerslagstation Hamersveld

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland						
• naaldbos	472	455			428	395
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation P.S. Zeist

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	532	498		487		487
• naaldbos	447	431		397		372
• zandverstuiving						
• akkerbouw		506		529		

*Bijlage 2. (vervolg)*Neerslagstation Woudenberg

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	602			558		
• naaldbos	509	493	489	459		436
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation Wijk bij Duurstede

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland						397
• naaldbos	353	340				276
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

**Bijlage 3.**

Het berekende neerslagoverschot (mm jaar^{-1}) voor verschillende combinaties neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid voor een jaar met een gering neerslagoverschot (1975).

Neerslagstation P.S. Groenekan

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				258		255
• naaldbos		206		172		145
• zandverstuiving						
• akkerbouw						273

Neerslagstation P.S. Soestduinen

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland		337	347	325		323
• naaldbos	285	271	261	237	236	207
• zandverstuiving		417				
• akkerbouw			355		350	336

Neerslagstation De Bilt

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland				258		255
• naaldbos		206		172		146
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

*Bijlage 3. (vervolg)*Neerslagstation Soesterberg

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	295	274	284			
• naaldbos	224	211				
• zandverstuiving	358					
• akkerbouw						

Neerslagstation Hamersveld

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland						
• naaldbos	231	218			183	157
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation P.S. Zeist

bodengebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	310	276		265		262
• naaldbos	232	218		184		153
• zandverstuiving						
• akkerbouw		278		309		

*Bijlage 3. (vervolg)*Neerslagstation Woudenberg

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland	371			329		
• naaldbos	287	274	263	239		209
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

Neerslagstation Wijk bij Duurstede

bodemgebruik/vegetatie	dun cultuurdek		matig dik cultuurdek		dik cultuurdek	
	grof	fijn	grof	fijn	grof	fijn
• grasland						
• naaldbos	179	160				127
• zandverstuiving						
• akkerbouw						

