

In Nederlandse zandformaties zijn het doorstroomde en het totale porievolume aan elkaar gelijk

1. Inleiding

Welk deel van het porievolume van de grond wordt door het grondwater doorstroomd? Zelfs geohydrologen uit de praktijk blijken nogal eens met onduidelijke ideeën hierover rond te lopen. Wordt hun gevraagd hoe groot het doorstroomde porievolume is van grondwatervoerende lagen die in de Nederlandse bodem wijd verbreid zijn en een totale porositeit van ongeveer 40 % hebben, dan verkrijgt men vaak een antwoord tussen de 15 en de 30 %. Een duidelijke motivatie voor deze lage waarden



IR. TH. N. OLSTHOORN
KIWA

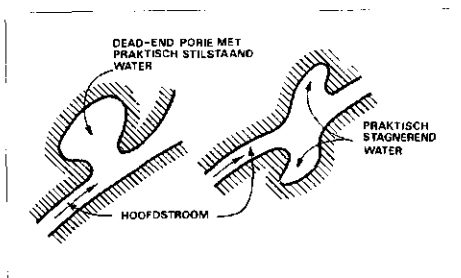
blijft dan achterwege.

Toch is voor een juiste voorstelling van wat zich in de bodem afspeelt een goed begrip van het doorstroomde porievolume belangrijk. Dit doorstroomde porievolume heeft immers een directe invloed op de snelheid waarmee een verontreiniging door het grondwater wordt meegevoerd. De gemiddelde snelheid van het stromende grondwater is hiermee namelijk omgekeerd evenredig.

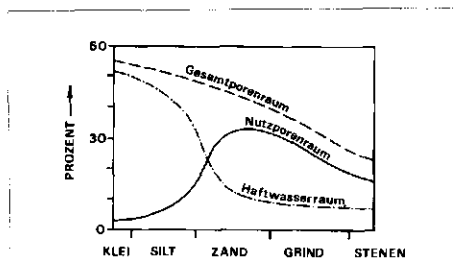
In het navolgende worden bovengenoemde lage cijfers ontzenuwd. Om tot een juiste voorstelling van zaken te komen, zijn zoveel mogelijk gegevens bijeen gebracht die op dit onderwerp betrekking hebben.

2. Spraakverwarring rond het begrip effectieve porositeit

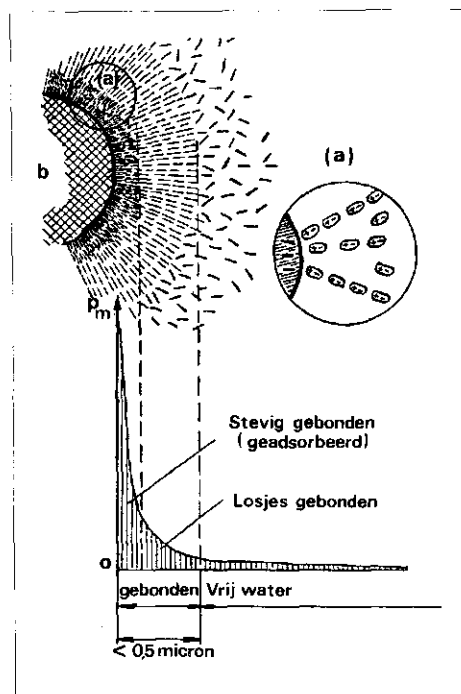
In de literatuur komt een groot aantal woorden voor dat verband houdt met de porositeit van de bodem. Men kan hierbij denken aan begrippen als: totale porositeit, effectieve porositeit, veldcapaciteit, verwelkingspunt, 'specific yield', bergingscoëfficiënt, nuttige porositeit en nog veel meer. Het is moeilijk om alle bestaande begrippen nauwkeurig uit elkaar te houden. Daarom is het ook niet verbazingwekkend dat in het verleden rond het begrip effectieve porositeit ernstige misverstanden zijn ontstaan. Het begrip effectieve porositeit wordt nu juist in die twee verschillende betekenissen gebruikt die ik hier wil scheiden: namelijk bergend porievolume en doorstroomd porievolume. (Voor de duidelijkheid zij hier opgemerkt dat zowel met porievolume als met porositeit de verhouding wordt bedoeld tussen het volume open ruimte in de grond en het totale volume van de grond.)



Afb. 1 - Dead-end Poriën (uit Bear, 1972).



Afb. 2 - Haftwasser (uit Richter en Lillich, 1975).



Afb. 3 - Hygroscopisch gebonden water (uit Poluborinova-Kochina, 1962).

Volgens Meinzer (1923) is de 'effective porosity' een algemeen begrip voor het quotiënt van het volume vloeistof dat onder bepaalde hydraulische condities uit een volume tevoren met deze vloeistof verzadigde grond stroomt, en het volume van de verzadigde grond.

Meinzer geeft geen nadere specificatie van deze hydraulische condities. Hij laat doelbewust in het midden of nu het volume water bedoeld wordt dat bij grondwaterstandsverlaging vrijkomt (bergcoëfficiënt) dan wel het volume water dat stromend

grondwater onder blijvend verzadigde condities uit een volume grond verdringt (het doorstroomde porievolume).

Het is waarschijnlijk dat deze definitie tot de aangeduide spraakverwarring heeft bijgedragen, temeer daar men bijna altijd op buitenlandse literatuur is aangewezen. De begrippen werden hierin wel gebruikt maar niet steeds opnieuw nauwkeurig gedefinieerd. Deze buitenlandse literatuur heeft bovendien vaak betrekking op formaties die voor Nederland nauwelijks of in het geheel niet relevant zijn. Veelal bestaan de beschreven bodems uit zandsteen, waarin de korrels dus in meerdere of mindere mate zijn verkit. Hierdoor kan een aanzienlijk deel van de poriën geheel of gedeeltelijk afgesloten zijn (dead end pores, afb. 1) waardoor deze niet of nauwelijks doorstroomd worden. De effectieve porositeit is dan uiteraard wel beduidend kleiner dan de totale porositeit. In de Nederlandse formaties is dit praktisch ondenkbaar. Toch kan dergelijke literatuur ook bij ons de gedachte hebben gevoerd dat effectief en totaal porievolume behoorlijk verschillen. Dit temeer daar de Duitse literatuur de verwarring nog vergroot met het begrip 'Haftwasser' (afb. 2).

'Haftwasser' is water dat in de grond achterblijft bij verlaging van het grondwateroppervlak tot beneden het beschouwde niveau. Om deze reden kan het grondwater in de verzadigde bodemzone worden onderscheiden in 'Haftwasser' en 'Grundwasser'. Het is echter niet zo dat 'Haftwasser' in de verzadigde bodemzone op de een of andere manier vast zou zitten of dat men een fysische grens tussen 'Haftwasser' en 'Grundwasser' zou kunnen aanwijzen. 'Haftwasser' stroomt niet zo goed als het andere grondwater, het vertegenwoordigt slechts het deel van het grondwater dat achterblijft bij grondwaterstandsverlaging. Als zodanig is het dus slechts een reken-grootheid. Daarmee is duidelijk dat het deel dat wel vrijkomt bij de verlaging van de grondwaterstand omgerekend wordt tot 'effektive oder Nutzporosität' (Richter und Lillich, 1975).

'Haftwasser' heeft dus geen betekenis onder verzadigde omstandigheden; het kan alleen maar in de onverzadigde bodemzone achterblijven, doordat zich in allerlei hoekjes en nauwe poriën nieuwe oppervlakjes vormen waarvan de oppervlaktespanning het water, tegen de 'wil' van de zwaartekracht in, op zijn plaats kan houden. Deze oppervlakken zijn in de verzadigde bodemzone nu eenmaal niet aanwezig zodat daar, fysisch gezien, geen 'Haftwasser' bestaat.

Toch wordt in bepaalde literatuur (Poluborinova Kochina, 1961) wel degelijk

onderscheid gemaakt tussen grondwater dat vrij stroomt onder invloed van stijghoogteverschillen en grondwater dat, ook in de verzadigde zône, gebonden is. Dat is het zgn. hygroscopische water, bestaande uit watermoleculen die door Van der Waalskrachten aan het korreloppervlak vastzitten (afb. 3). Zoals berekend kan worden, betreft het hier in praktische gevallen slechts een verwaarloosbaar klein percentage van het totale grondwater en is hiervan geen invloed merkbaar op het doorstroomde porievolume (zie § 5).

De ingewikkelde definities mogen ertoe geleid hebben dat men vaak ten onrechte bergingscoëfficiënt en doorstromend poriënvolume, beide onder de vlag 'effectieve porositeit', door elkaar heeft gehaald en aan elkaar gelijk heeft gesteld. Dit zal nog in de hand gewerkt zijn doordat het doorstroomde porievolume nauwelijks in de praktijk gemeten kan worden, terwijl de bergingscoëfficiënt uit iedere elementaire niet stationaire pompproof rolt.

Het is echter eenvoudig in te zien dat beide begrippen niets met elkaar uitstaande hebben. Bij freatisch water wordt de bergingscoëfficiënt volledig bepaald door de eigenschappen van de bovenste zandlagen van het watervoerend pakket. Het doorstroomde poriënvolume daarentegen wordt vastgelegd door de eigenschappen van het gehele pakket. Waar de bovenste laag van het watervoerend pakket opgebouwd is uit fijn materiaal zal de bergingscoëfficiënt laag zijn ongeacht de diepere lagen.

Een dergelijke situatie komt vaak voor waar zich eolische afzettingen (dekzanden) aan het oppervlak bevinden. Ontbreken op een andere plaats de fijne dekzanden, doch reiken de grovere lagen tot aan maaiveld dan is de bergingscoëfficiënt ineens veel groter terwijl het eigenlijke watervoerend pakket uit hetzelfde materiaal kan bestaan.

3. Enige meningen en metingen uit de literatuur en de praktijk

Hoe denken buitenlandse hydrologen over effectieve porositeit? In de literatuur is hierover soms wat te vinden. Zo is in Israël (Mercado en Havelly, 1966) een experiment gedaan waarbij van een watervoerende laag zowel de bergingscoëfficiënt als het doorstroomde porievolume zijn bepaald. De eerste bleek 13 % en de laatste 34 % te bedragen. De auteurs merken hierbij op dat men in het verleden meende dat de bergingscoëfficiënt (storativity) van pakketten met freatisch water en de porositeit ongeveer aan elkaar gelijk zijn.

Dit resultaat mag hiertoe geleid hebben dat in recentere Israëlsche literatuur de porositeit wordt gebruikt in formules voor de berekening van de verplaatsingssnelheid

van vloeistoffen door poreuze media (Bear, 1973).

Men wijst nog uitsluitend op een verlaging van het doorstroomde porievolume door de in bepaalde formaties aanwezige geheel of grotendeels afgesloten poriën ('dead end pores' afb. 1).

In een Duits artikel (Seiler, 1975) worden duidelijke verschillen genoemd tussen de totale porositeit enerzijds en de getallen voor doorstroomd porievolume, spontaan ontwaterbaar en spontaan opvulbaar porievolume anderzijds. Het betreft hier gegevens uit een vlakte in Beieren, die opgebouwd is uit een ongeconsolideerd mengsel van alle gradaties tussen fijn zand, en grind met korrels van 20 mm. De totale porositeit is 25 % maar in tegenstelling tot wat men zou verwachten zijn de overige genoemde grootheden alle ongeveer gelijk en variëren tussen de 6 en 18 %.

De gegevens uit dat artikel zijn te gering om de oorzaak van deze lage waarden voor

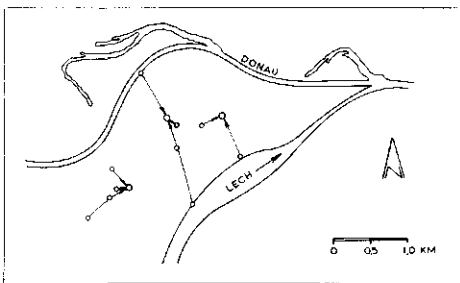
het doorstroomde porievolume na te kunnen gaan.

Meer informatie over dit verschijnsel geeft een artikel waaruit Seiler een aantal waarden voor het doorstroomde porievolume heeft overgenomen (Heinrichsdorf, 1970). Heinrichsdorf leidt een formule af voor de berekening van het doorstroomde porievolume ('wirksamer Porenraum'). Bij analyse van zijn formule bleek de auteur een cirkelredenering te hebben toegepast. Hij kan hiermee onmogelijk het doorstroomde porievolume hebben berekend zonder te weten hoe groot de werkelijke snelheid van het grondwater is. Het is dan ook niet duidelijk waar de auteur zijn getallen vandaan heeft. Op grond hiervan lijkt het verstandig vooralsnog een vraagteken bij de opgegeven getallen te plaatsen.

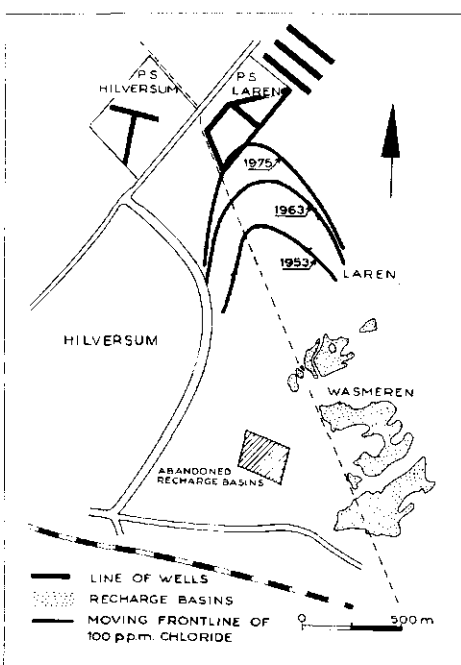
Ellis e.a. (1968) uit Australië getuigen vroeger ook van de veronderstelling te zijn uitgegaan dat de bergingscoëfficiënt ('specific yield, sometimes also called effective porosity') en het doorstroomde porievolume gelijk zijn. Zij vragen zich echter terrecht af of deze 'specific yield' wel de juiste grootheid is om de verplaatsingssnelheid van het grondwater mee uit te rekenen en of niet wat anders, bijv. de totale porositeit hiervoor moet worden gebruikt. Met onderzoek aan met zand gevulde kolommen tonen zij het verschil tussen beide grootheden duidelijk aan (zie § 4). In een tweede artikel over dit onderzoek (Wiebenga e.a. 1970) wordt het vraagstuk nog eens duidelijk uit de doeken gedaan: 'The Dupuit-Forchheimer assumption states that the ratio of specific flow rate to average flow velocity is equal to porosity, but it is not specified whether true porosity or void ratio or specific yield, also called effective porosity, is meant'.

Deze auteurs hielden zich dus met precies hetzelfde probleem bezig als hier aan de orde is. (Overigens blijkt uit de zin tevens dat de spraakverwarring omtrent bergingscoëfficiënt (specific yield) en effectieve porositeit ook in Engelstalige literatuur heerst. Specific yield mag wel in het algemeen door effectieve porositeit worden vervangen maar niet omgekeerd.) De auteurs beschrijven hun 48 proeven met met zand gevulde kolommen en komen tot de slotsom dat invulling van de totale porositeit in de formule voor de berekening van de snelheid van het grondwater tot goede uitkomsten leidt (zie § 4).

Een interessant Duits praktijkvoorbeeld is het volgende: van een strook land gelegen tussen de rivieren Donau en Lech bij Neurenberg is in een tiental raaien het doorstroomde porievolume met radioactieve tracers gemeten (Drost e.a., 1974) (zie afb. 4). Men vond 21 % voor deze uit zand en grind bestaande formatie en dit



Afb. 4 - Overzicht van de tracerproeven tussen de Donau en de Lech bij Neurenberg (uit Drost e.a. 1974).



Afb. 5 - Oprukken van het sinds 1875 in de 'Wasmeren' geïnfilteerde rioolwater naar de drinkwaterpompstations (uit Cremers en Van den Akker, 1976).

was tevens de waarde van de totale porositeit die met grondmechanische proeven was bepaald.

Een interessant praktijkvoorbeeld voor Nederland betreft het oprukken van bij Hilversum in de 'Wasmeren' geïnfilteerd rioolwater in de richting van het pompstation 'Westerveld' van Gemeentewaterleidingen van Amsterdam en de pompstations 'Laren I' en 'Laren II' van het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (Cremers en Van den Akker, 1976, afb. 5). Sinds 1875 wordt in de zgn. Wasmeren, die op 1500 m van de genoemde pompstations zijn gelegen, rioolwater geïnfilteerd. Dit resulteert nu in een verhoogd zoutgehalte in het door de genoemde pompstations gewonnen water. De ondergrondse stroming tussen de Wasmeren en de pompstations is met een geavanceerd stromingsmodel (Van den Akker, 1975) nagebootst, waarbij rekening is gehouden met de natuurlijke hydrologische situatie en de ontwikkelingen die sinds 1875 hebben plaatsgevonden (stichting van pompstations en de groei van onttrekking en infiltratie). Men heeft de berekeningsresultaten zeer goed met de veldmetingen in overeenstemming kunnen brengen door voor het doorstroomd porievolume de waarde 0,40 te gebruiken. Hieruit blijkt dat ook bij stroming in de praktijk over grotere afstanden de totale porositeit en het doorstroomd porievolume niet wezenlijk in grootte verschillen. Het totale porievolume van de formaties waaruit in Nederland zoet water wordt gewonnen varieert namelijk binnen zeer nauwe grenzen rond de 38 % (Fahmy, 1961). Een uitzondering hierop vormt Zuid-Limburg.

4. Enige laboratoriumexperimenten

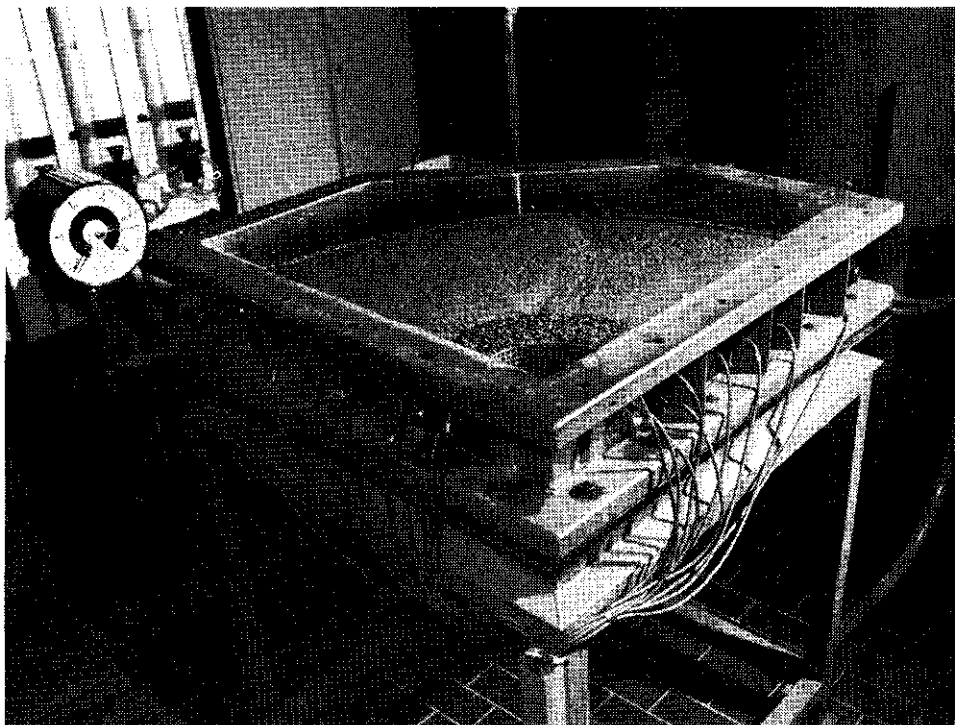
Nahgang (1965) beschrijft de proeven die hij uitvoerde in een 1,6 m hoog met zand gevuld model van de formatie rond een put. Het model was een sectie van 45° met een radius van 2 m.

Door meting van stroombanen kon hij zowel in grof zand als in fijn zand het doorstroomde porievolume bepalen (zie tabel I).

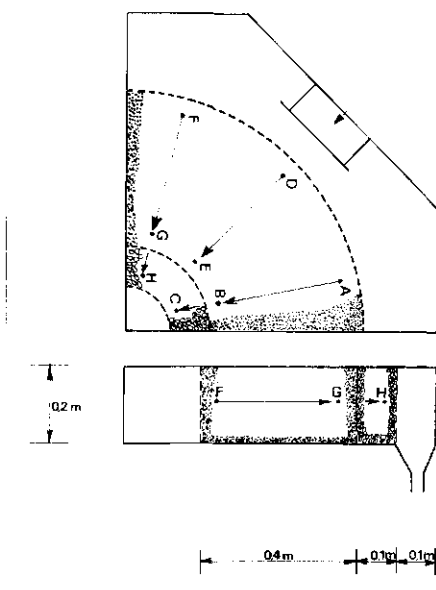
TABEL I - Gemeten totaal en doorstroomd porievolume (uit Nahgang 1965.)

| | d_{10} (mm) | totale porositeit (%) | doorstroomde poriën (%) |
|-----------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| grof zand | 1,0 | 32,7 | 36,4 |
| fijn zand | 0,32 | 35,2 | 35,9 |

Het doorstroomd porievolume lijkt groter dan het totale. Men moet echter bedenken dat het totale porievolume is gebaseerd op de totale hoeveelheid zand die in het model zat. Het doorstroomd porievolume is



Afb. 6 - Het KIWA-putmodel.



Afb. 7 - Injectie en waarnemingspunten bij de porositeitsmetingen in het KIWA-putmodel.

gebaseerd op één bepaalde stroomlijn en geeft dus de lokale porositeit, die gemakkelijk iets van de gemiddelde waarde kan afwijken.

Ellis e.a. (1968) gebruikten kolommen gevuld met zand en een radioactieve tracer (bromide 82) om de bergingscoëfficiënt en de totale porositeit met het doorstroomde porievolume te vergelijken (zie tabel II).

Wiebenga e.a. (1970) komen tot dezelfde resultaten in de tweede publikatie over dit onderzoek.

TABEL II - Gemeten waarde van totale porositeit, het doorstroomde porievolume en de bergingscoëfficiënt. (Uit Ellis e.a., 1968.)

| korrelgrootte van het ge- bruikte zand (mm) | tot. porositeit % | doorstroomd porievolume % | bergings- coëfficiënt % |
|--|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1,68—1,08 | 44 | 44—48 | 38 |
| 0,85—1,41 | 42 | 41—50 | 36 |
| 0,39—0,55 | 41 | 39—46 | 35 |
| 0,09—0,30 | 38 | 36—45 | 28 |

Verder zij gewezen op het vooral sinds 1960 uitgevoerde dispersie-onderzoek (onder andere Nielson and Biggar, 1961). Bij dit onderzoek is het normaal dat de gemiddelde doorbraaktijd van de aan het water in de proefkolommen toegevoegde tracer overeenkomt met het totale porievolume van het zand in de kolommen.

Ook het KIWA heeft onderzoek uitgevoerd op dit gebied. Hierbij is gebruik gemaakt van een putmodel. (Zie voor een gedetailleerde beschrijving van dit model KIWA-mededeling 45, Kobus e.a., 1976.)

Het model dat gevuld was met Veluwezand (afb. 9) stelt een formatiesectie voor van 90° met de put in het hoekpunt (afb. 6). De hoogte van het zandbed dat het formatiemateriaal voorstelt bedroeg 20 cm en de buitenradius 59 cm. De diameter van de put was 10 cm waaromheen zich een 10 cm dikke omstorting bevond. Terwijl leidingwater van buiten door de formatie radiaal op de put afstroomde werd in de formatie op plaatsen A en F 20 cc zoutoplossing geïnjecteerd (afb. 7). De aankomst van dit zout op de plaatsen C en H werd waarge-

nomen door de uit deze tappunten lopende waterstroompjes door een doorstroomgeleidingsmeter te voeren die was aangesloten op een schrijver. Het resultaat van de metingen is weergegeven in de tabel III.

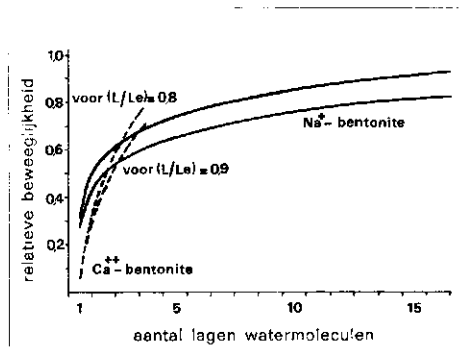
TABEL III - Metingen van het doorstroomd porievolume (effectieve porositeit) met het KIWA-putmodel, dat gevuld was met Veluwezand (afb. 9). De totale porositeit was met behulp van een trilnaald verlaagd tot 31,3 %. Het volume van de formatie tussen injectie- en waarnemingspunt bedroeg 51,8 l.

| stroom-lijn | debiet (l/h) | aantal injecties | gem. reistijd (sec) | effectieve porositeit (%) |
|-------------|--------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| AC | 157 | 4 | 371 | 31,3 ± 0,22 |
| FH | 157 | 4 | 360 | 30,3 ± 0,17 |
| AC | 2800 | 3 | 22,5 | 33,8 ± 0,6 |
| FH | 2800 | 3 | 22,5 | 34,4 ± 0,3 |

Ten einde de metingen ook bij een zeer lage snelheid van het door de formatie stromende water te kunnen uitvoeren zijn elektroden op geringe onderlinge afstand in het zand gestoken op de plaatsen B, F en G. Op deze wijze kon het geleidingsvermogen worden gemeten zonder dat continu een stroompje water moest worden afgetapt. Zelfs een stroompje van enkele milliliters per minuut zou bij deze lage debieten het stroombeeld geheel hebben verstoord. Wel moest deze proef hierdoor worden uitgevoerd zonder het deksel dat zich anders altijd op het model bevond. Het water was tijdens deze proef dus freatisch. Het formatiezand bleef door de capillaire werking echter geheel verzadigd hetgeen impliceert dat de watersnelheden over de volledige formatiedikte dezelfde waren. (Dit is onder andere aangetoond door Bertsch e.a. (1970).) De meetresultaten tonen dan ook generlei beïnvloeding door de afwezigheid van het deksel (tabel IV).

TABEL IV - Metingen van het doorstroomd porievolume (effectieve porositeit) met het KIWA-putmodel, dat gevuld was met Veluwezand (afb. 10). De totale porositeit was met behulp van een trilnaald verlaagd tot 30,5 %. Waarneming van het geleidingsvermogen geschiedde aan in het zand gestoken elektroden. Het model was tijdens de proef geopend (freatisch water).

| stroom-lijn | formatie volume tussen injectieput en waarnemingspunt (l) | debiet (l/h) | reistijd (sec) | effectieve porositeit (%) |
|-------------|---|--------------|----------------|---------------------------|
| AB | 45,8 | 15,10 | 3372 | 30,9 |
| FG | 45,8 | 15,49 | 3281 | 30,5 |
| FG | 45,8 | 14,88 | 3751 | 33,9 |
| FG | 45,8 | 12,79 | 4121 | 31,9 |
| FG | 45,8 | 19,97 | 2712 | 32,8 |
| DE | 45,6 | 16,82 | 2867 | 29,4 |
| DE | 45,6 | 18,50 | 2662 | 30,0 |
| DE | 45,6 | 17,21 | 2805 | 29,4 |
| DE | 45,6 | 17,18 | 2823 | 29,6 |



Afb. 8 - Beweglijkheid van DOH-moleculen (D = deuterium) in elke afzonderlijke laag watermoleculen ten opzichte van de beweeglijkheid van DOH-moleculen op grote afstand van het bentoniet-opervlak (uit Kemper e.a., 1964).

De metingen die in het KIWA-laboratorium met het putmodel zijn uitgevoerd zijn in overeenstemming met de elders gevonden resultaten en veldmetingen.

5. De invloed van het water dat aan de bodemkorrels is geadsorbeerd

Hierna wordt voorgerekend dat geadsorbeerd water geen praktische invloed op de grootte van het doorstroomde porievolume kan uitoefenen. Volgens Polubarinova Kochina (1962) is de laag watermoleculen die aan de zandkorrels is geadsorbeerd zo'n 0,5 micron dik. Kemper e.a. (1964) komen voor bentonietklei tot de conclusie dat de gebondenheid van het water zeer snel afneemt met de afstand tot het oppervlak van de kleideeltjes en dat deze na een laag ter dikte van 6 à 16 watermoleculen verwaarloosbaar klein geworden is (afb. 8). Deze dikte van 6 à 16 watermoleculen ofwel 20 à 50 Å wordt bepaald door de dikte van de elektrische dubbellaag bij het korreloppervlak. Deze wordt op haar beurt weer beheerst door de aard en de concentratie van de in het water voorkomende ionen. In elk geval kunnen de

opgegeven getallen dienen om de gedachte te bepalen ten aanzien van de dikte van de laag watermoleculen die aan de bodemkorrels is geadsorbeerd en de hoeveelheid water die zich daardoor aan de stroming onttrekt. Wat is nu het verschil tussen de totale en de effectieve porositeit dat door dit verschijnsel wordt teweeggebracht? Stel wij hebben grond met een specifiek oppervlak S (dat wil zeggen het totale oppervlak van de korrels die zich in 1 m³ grond bevinden bedraagt S m²). De porositeit bedraagt p. Dus het volume van de korrels die zich in 1 m³ bevinden bedraagt (1-p) m³. Dit volume nu wordt schijnbaar vergroot doordat zich op elke korrel een laagje water ter dikte δ afzet. Het totale volume geadsorbeerd water per m³ grond bedraagt derhalve S · δ. Het totaal volume vast materiaal per m³ grond neemt dus schijnbaar toe tot (1-p) + S · δ. Het porievolume per m³ grond neemt dus schijnbaar af tot p - S · δ, hetgeen gelijk is aan de effectieve porositeit, in de betekenis van doorstroomd porievolume:

$$\mu = p - S \cdot \delta \tag{1}$$

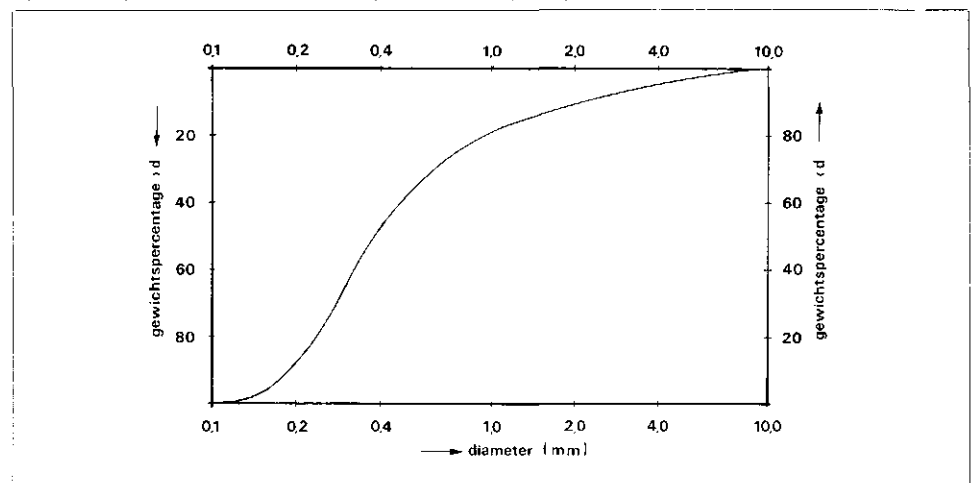
Het wordt duidelijker als S wordt uitgedrukt in de diameter van een gemiddelde korrel, die zodanig is gekozen, dat het volume en het totale oppervlak van de grond hetzelfde blijven als de grondkorrels door bolvormige korrels met deze diameter worden vervangen. Stel dat zich n korrels in een m³ grond bevinden. Het volume vast materiaal in een m³ grond bedraagt dan:

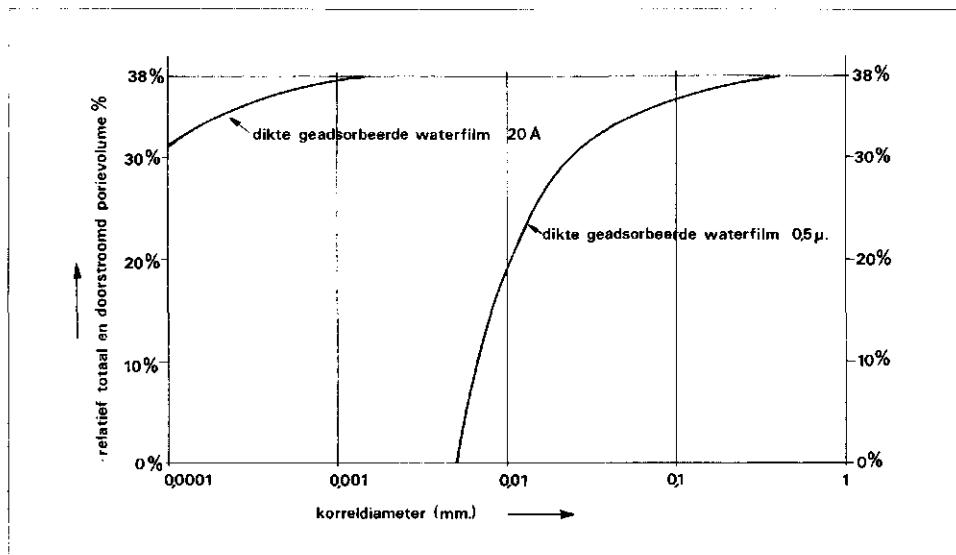
$$(1-p) = n \frac{\pi d^3}{6}$$

en het oppervlak van het vaste materiaal in deze m³ grond bedraagt:
S = n · π d²
zodat:

$$S = (1-p) \cdot \frac{6}{d} \tag{2}$$

Afb. 9 - Zeejkromme van Veluwezand (uit Kobus e.a., 1976).





Afb. 10 - Theoretisch berekend doorstroomd porievolume bij 38 % totale porositeit in afhankelijkheid van de fijnheid van het formatiemateriaal (weergegeven door uniforme bolvormige korrels met diameter d) voor twee diktes ($0,5 \mu \times 20 \text{ \AA}$) van de laag watermoleculen die aan de korrels is geadsorbeerd.

(2) en (1) levert voor het doorstroomd porievolume het volgende verband op:

$$\mu = p - 6(1-p) \cdot \frac{\delta}{d} \quad (3)$$

Volgens Fahmy (1961) bedraagt de totale porositeit van de Nederlandse formaties gemiddeld 38 %. Ingevuld in (3) kan met de uiterste waarden voor δ (namelijk 20 \AA en $0,5 \mu\text{m}$) het verband tussen de effectieve porositeit en de korreldiameter worden berekend (zie afb. 10). Uit deze afbeelding blijkt dat adsorptie van water aan de bodempartikels voor de praktijk van de grondwaterwinning en -bescherming verwaarloosd mag worden.

Alleen in de slijbfractie is een merkbare beïnvloeding van het doorstroomd porievolume mogelijk. Slib verlaagt de doorlatendheid van de formatie echter reeds zodanig (Fahmy, 1961), dat een slijbhoudende formatie voor de waterwinning niet of nauwelijks in aanmerking komt.

6. Conclusie en samenvatting

De onduidelijkheid die onder Nederlandse geohydrologen geconstateerd kan worden ten aanzien van hun ideeën omtrent de grootte van het doorstroomde porievolume van zandformaties, blijkt ook in het buitenland voor te komen. Het begrip effectief porievolume (of effectieve porositeit) wordt zowel voor de bergingscoëfficiënt (of bergend porievolume) als voor het doorstroomde porievolume gebruikt. Dit heeft waarschijnlijk tot gevolg gehad dat ook het begrip doorstroomd porievolume ten onrechte met het begrip bergend porievolume gelijk is gesteld. Mogelijk is dit nog in de hand gewerkt door de relatieve

eenvoud van de bepaling van het bergend porievolume en de complicaties die met de meting van het doorstroomd porievolume zijn gemoeid. Het bergend porievolume is een stuk kleiner dan het totale porievolume. Bovenstaande verwarring tussen bergend en doorstroomd porievolume verklaart hiermee tevens de lage waarden die doorgaans voor het doorstroomde porievolume werden gehanteerd.

De gelijkstelling van doorstroomd en totaal porievolume geldt niet in formaties waarin de zandkorrels onderling verkit zijn. In zulke formaties kunnen poriën geheel of gedeeltelijk zijn afgesloten, waardoor het doorstroomde porievolume daadwerkelijk een stuk kleiner kan zijn dan het totale. Wel geldt het bovenstaande voor Nederland, waar de formaties, waaruit zoet water wordt onttrokken, praktisch altijd bestaan uit een losse stapeling van zand- en grindkorrels met een totale porositeit van om en nabij de 38 %.

Literatuur

- Akker, C. v. d. *Toelichting bij het rekenprogramma FLOP-1*. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening; mededeling 75-3. 's-Gravenhage 1975.
- Bear, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier; New York, London, Amsterdam 1972, 764 pp.
- Bertsch, W., Puschmann, H. und Schwille, F. *Migration radioaktiver Nuklide in porösen Medien*. Z. deutsch. geol. Ges.; Sonderheft Hydrogeol. Hydrogeochem. Hannover 1970, pp. 193-207.
- Cremers, G. J. M. en Akker, C. v. d. *Modelonderzoek naar de invloed van de infiltratie in de Wasmeren op de onttrekkingen in de pompstations Laren 1 en 2 en Westerveld*. Gemeentewaterleidingen, afd. Productie, onderafd. Hydrologisch Onderzoek, Amsterdam 1976, 63 pp.
- Drost, W., Moser, H., Neumaier, F. and Ruart, W.

Isotope Methods in Groundwater Hydrology. Eurisotop Office Information and Documentation Service 61. Wien 1964.

Ellis, W. R., Kevi, L. and Wiebenga, W. A. *The Investigation of Water Flow through Porous Mediums by means of Radiotracers*. Water Resources Research 4 (1968) 2, p. 413-416.

Fahmy, M. J. *The influence of Clay Particles on the Hydraulic Conductivity of Sandy Soils*. Thesis, Wageningen 1961.

Heinrichsdorf, F. *Umwandlung von Grundwasserspiegelständen in Abflüsse*. Die Wasserwirtschaft 5 (1970), pp. 161-167.

Kemper, W. D., Maasland, D. E. L. and Porter, L. K. *Mobility of Water Adjacent to Mineral Surfaces*. Soil Sci. Soc. Proc. 1964, pp. 164-167.

Kobus, E. J. M., Olsthoorn, T. N., Tuinzaad, H. en Vogel, A. N. G. de. *Omstoringen van waterwinningsputten en het maximaal toelaatbare putdebit*. KIWA-mededeling nr. 45, Rijswijk, 1976.

Meinzer, O. E. *Outline of Groundwater Hydrology; with Definitions*. USGS Water Supply Paper 494, 1923, ± 30 pp.

Mercado, A. and Havelly, E. *Determining the Average Porosity and Permeability of a Stratified Aquifer with the Aid of Radioactive Tracers*. Water Resources Research 2 (1966) 3, p. 525-531.

Nahrgang, G. *Ueber die Anströmung von Vertikalbrunnen mit freier Oberfläche in einformig homogenem sowie im geschichteten Grundwasserleiter*. Schriftenreihe des Deutschen Arbeitskreises Wasserforschung e.V. (DAW) Heft 6. Erich Schmidt Verlag, Berlin/Bielefeld/München, 1965.

Nielson, D. R. and Biggar, J. W. *Miscible Displacement in Soils: I. Experimental Information*. Soil Sci. Soc. Proc. 25 (1961) 1, pp. 1-5.

Polubarinova-Kochina, P. Ya. *Theory of Ground Water Movement*. Princeton University Press; Princeton/New Jersey, 1962, 613 pp.

Richter, W. und Lillich, W. *Abriss der Geo-hydrologie*. Nägels und Obermiller, Stuttgart 1975; 281 pp.

Seiler, K. P. *Nutzbare Hohlräumvolumen, auffüllbares Hohlräumvolumen und Speicherkoeffizient*. BBR 1975, pp. 363-365.

Wiebenga, W. A., Ellis, W. R. and Kevi, L. *Empirical Relations in Properties of Unconsolidated Quartz Sands and Silts Pertaining to Water Flow*. Water Resources Research 6 (1970) 4, pp. 1154-1161.

