

Onzekerheden bij het bepalen van de waarde van de freatische bergingscoëfficiënt

JAN WESSELING EN KLAAS METSELAAR

De freatische bergingscoëfficiënt van de bodem is een van de variabelen die worden gebruikt bij het (analytisch) berekenen van de stroming van water naar ontwateringsmiddelen en bij het ontwerpen daarvan. Hoewel al jaren bekend is dat de waarde van de bergingscoëfficiënt afhankelijk is van de diepte van de grondwaterstand, wordt meestal uitgegaan van een constante waarde. In dit artikel wordt eerst nagegaan hoe groot de invloed van de bergingscoëfficiënt op de berekende afvoer is. Daarna worden enkele van de belangrijkste bronnen van variatie in beeld gebracht.

Artikel

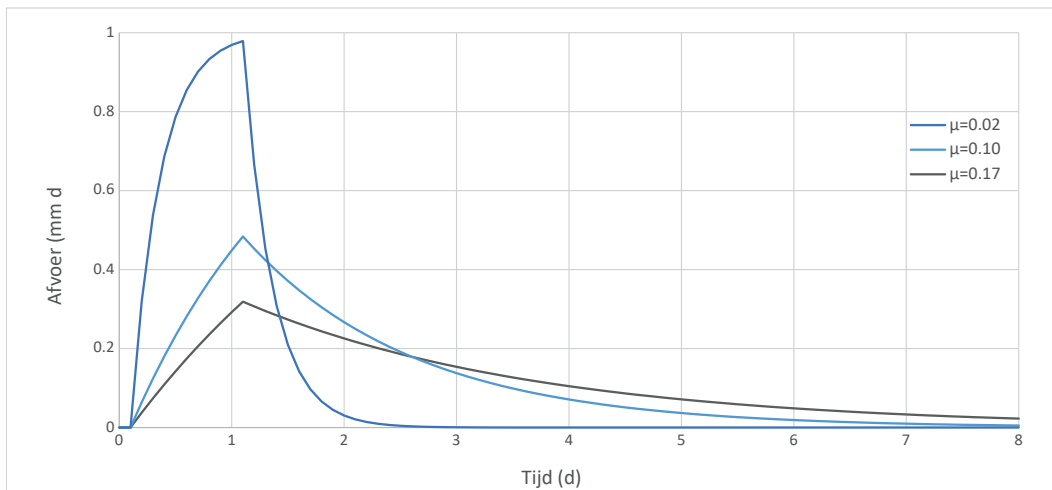
Inleiding

Bij het ontwerpen van ontwateringssystemen en het berekenen van afvoeren naar drains en sloten wordt meestal gebruikgemaakt van analytische functies. Deze functies zijn vergelijkingen met een aantal parameters die de eigenschappen van de doorstroomde bodems weergeven (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1954; De Zeeuw en Hellinga, 1958; Kraijenhoff van de Leur, 1958; Maasland, 1959; Wesseling en Wesseling, 1984). Een van deze eigenschappen is de (freatische) bergingscoëfficiënt. De waarde van de bergingscoëfficiënt in deze analyses als een constante beschouwd, hoewel hij varieert met de grondwaterstand. Wesseling (1969) leidde al relaties af tussen de ontwateringsintensiteit en de bergingscoëfficiënt voor meerdere ontwateringsdieptes. De Jager (1965) liet zien hoe de overschrijdingskans van de afvoer afhangt van de reservoircoëfficiënt j , een functie van de afstand tussen de drainagemiddelen, de bergingscoëfficiënt en de grondwateraanvulling.

Maar wat zijn belangrijke bronnen van variatie in de bergingscoëfficiënt? Om dit uit te zoeken, geven we in dit artikel eerst een voorbeeld van de invloed van de bergingscoëfficiënt op de afvoer van een enkele regenbui aan de hand van een eenvoudige en veelgebruikte formule. Daarna zullen we aan de hand van de definitie van de bergingscoëfficiënt en de bodemfysische bouwstenen van de Staringreeks laten zien welke relatie er bestaat tussen de grondwaterstand en de waarde van de bergingscoëfficiënt voor een homogeen bodemprofiel. Vervolgens doen we hetzelfde voor een heterogeen profiel, waarbij we ook de bodemfysische eigenschappen van de monsters gaan gebruiken waaruit de parameters van de bouwstenen van de Staringreeks zijn berekend. Ten slotte proberen we met eenvoudige statistische analyses de bijdrage van een aantal bodemparameters aan de variantie van de bergingscoëfficiënt te bepalen.

De invloed van de bergingscoëfficiënt op de afvoer: een voorbeeld

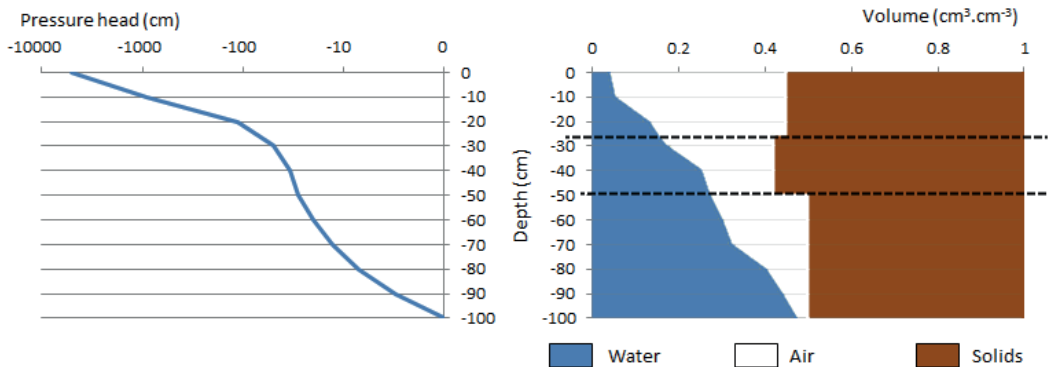
Voordat we de relatie tussen de waarde van de bergingscoëfficiënt en de diepte van het grondwater gaan bepalen, is het nuttig om uit te zoeken of het wel de moeite waard is om de hiervoor benodigde inspanning te leveren. Met andere woorden, hoe groot is de invloed van de bergingscoëfficiënt μ op de afvoer q ? Om dit te illustreren is gebruikgemaakt van de formules van (De Zeeuw, Hellinga, 1958; Cultuurtechnische vereniging, 1988). De afvoer van een drain, veroorzaakt door een bui van 10 mm die uniform over 1 dag is verdeeld (met een tijdstap van 0,1 dag), is berekend voor een homogeen bodemprofiel met een verzadigde horizontale doorlatendheid $K_h=3,2$ m.d-1, een doorstroomde diepte $D=5$ m en een afstand tussen ontwateringsmiddelen $L=50$ m. Volgens het Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische vereniging, 1988) varieert de waarde van de bergingscoëfficiënt bij zandgronden tussen 0,02 voor een beekerdgrond en 0,17 voor een enkeerdgrond. Daarom is in dit onderzoek ter illustratie gekozen voor drie waarden van de bergingscoëfficiënt, namelijk 0,02, 0,10 en 0,17. Er wordt van uitgegaan dat de waarde constant is in de tijd. Het verloop van de afvoer in de tijd, berekend met deze waarden, is weergegeven in afbeelding 1. Uit deze afbeelding komt duidelijk de invloed van μ naar voren: hoe kleiner de waarde van μ , hoe hoger de afvoer na 1 dag en hoe sneller de recessie.



Afbeelding 1 Afvoeren berekend met de formules van de Zeeuw-Hellinga (1958) voor drie verschillende waarden van de bergingscoëfficiënt μ .

De freatische bergingscoëfficiënt: wat is het en hoe wordt hij berekend?

Het bergingsvermogen van de bodem kan gedefinieerd worden als “Het volume water dat nodig is om een deel van de grond, met gegeven afmetingen en met gegeven initiële berging, in de verzadigde toestand te brengen” (Aquo, 2024). In het Cultuurtechnisch Vademecum (1988) wordt berging gedefinieerd als “Het volume water dat aanwezig is in een nader aan te geven deel van de grond”. Deze berging (V) wordt berekend bij een gegeven (constante) fluxdichtheid q (mm d^{-1}). De freatische bergingscoëfficiënt wordt dan bepaald als “Het quotiënt van de verandering in berging en de bijbehorende verandering van de stijghoogte c.q. grondwaterstand”. Om de berging te kunnen berekenen, wordt de vergelijking van Darcy omgeschreven, zodat er een vergelijking ontstaat die, indien de relatie tussen de drukhoogte h en de doorlatendheid K (cm d^{-1}) bekend is, (voor een gegeven fluxdichtheid q (cm d^{-1})) de drukhoogte h (cm) beschrijft als functie van de positie z (cm). Zie de appendix voor meer details. Een voorbeeld hiervan is gegeven in afbeelding 2 voor een (willekeurig) drielagenprofiel.



Afbeelding 2 Een voorbeeld van (links) een drukhoogteprofiel en (rechts) een vochtgehalteprofiel voor een bodemprofiel met 3 horizonten.

Met behulp van de relatie tussen vochtgehalte en drukhoogte (de pF-curve), die voor iedere bodemsoort verschilt, kan dan een vochtgehalteprofiel worden getekend. Dit is weergegeven in de rechterfiguur van afbeelding 2. Het bruine deel geeft het volume aan vaste stof weer, het blauwe deel het vochtgehalte. Hieruit kan op eenvoudige wijze het gehalte aan lucht worden bepaald voor iedere diepte. Integratie van dit gehalte over de diepte levert dan de berging of het bergingsvermogen. De bergingscoëfficiënt wordt dan bepaald als de verandering van de berging met de verandering van de grondwaterstand. Hieruit volgt dat de bergingscoëfficiënt bepaald wordt door het drukhoogteprofiel boven de grondwaterspiegel.

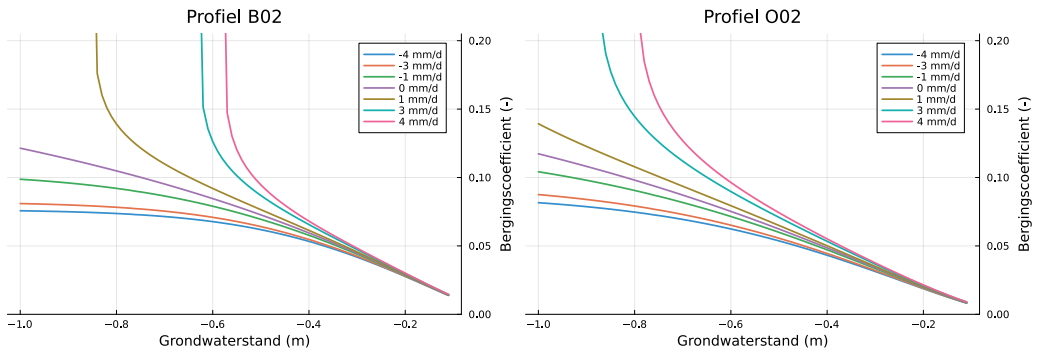
Homogene profielen

In Nederland wordt meestal de Staringreeks gebruikt als er bodemfysische gegevens nodig zijn voor hydrologische berekeningen. Deze Staringreeks bevat bodemfysische relaties voor de bodemhorizonten in Nederland. Er is een landelijke dekking voor alle bodemeenheden op de bodemkaart van Nederland (schaal 1:50 000). Hiertoe worden achttien bouwstenen voor de bovengrond en achttien bouwstenen voor de ondergrond onderscheiden. Deze zijn gebaseerd op textuur, organische-stofgehalte en afzettingsmilieu. In de eerste versie (Wösten e.a., 1987) zijn de bodemfysische relaties in tabelvorm gegeven, later (Heinen e.a., 2020; Wösten e.a., 1994, 2001) zijn de relaties gepresenteerd met parameterwaarden van de Mualem - Van Genuchten (MVG) vergelijkingen (Van Genuchten, 1980). Deze bouwstenen worden bepaald door de gegevens te combineren van alle monsters waarvan textuur, organische-stofgehalte en afzettingsmilieu overeenkomen met die van de desbetreffende bouwsteen. In Bijlage 5 van Heinen e.a. (2020) wordt voor ieder monster aangegeven voor welke bouwsteen uit de Staringreeks het is gebruikt, evenals de coördinaten van de bemonsterde plek. Dit maakt het voor de gebruiker mogelijk om een dicht bij de eigen locatie gelegen monsterlocatie te kiezen en de waarden hiervan te gebruiken, in plaats van die van de bouwsteen.

Er blijken 999 monsters te zijn gebruikt voor het bepalen van de parameters van de bouwstenen. Deze monsters zijn afkomstig van 155 locaties in Nederland. In genoemde bijlage worden ook de MVG-parameters van de individuele monsters gegeven.

Heinen e.a. (2020) raden aan om vooral de parameters van de monsters te gebruiken die na 2001 zijn geanalyseerd, omdat er toen is overgestapt naar een andere meet- en verwerkingsmethode van de bodemmonsters. Desondanks worden in ons onderzoek eerst alle beschikbare monsters in de beschouwingen betrokken, eenvoudigweg omdat er voor sommige bouwstenen van de Staringreeks geen achterliggende monsters van na 2001 beschikbaar zijn (Heinen e.a., 2020; Wesseling en Ritsema, 2020, 2022). Voor aantallen achterliggende monsters per bouwsteen wordt verwezen naar Tabel 4.1 in Wesseling en Ritsema (2020).

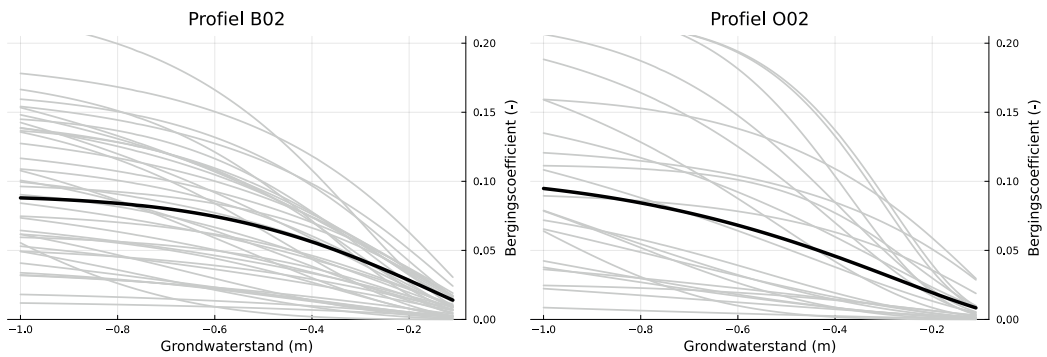
Veel voorkomende bouwstenen in Nederlandse bodems zijn B02 voor de bovengrond en O02 voor de ondergrond (beiden zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand). Afbeelding 3 toont de relatie tussen de diepte van het grondwater en de bergingscoëfficiënt voor 7 fluxdichtheden, variërend tussen een infiltratie van 4 mm d^{-1} (negatieve waarde) en een capillaire opstijging van 4 mm d^{-1} (positieve waarde). Hierbij is aangenomen dat het gehele bodemprofiel uit één bouwsteen bestaat (homogeen profiel). De afbeeldingen tonen aan dat de waarde van de bergingscoëfficiënt sterk varieert, vooral in geval van infiltratie. Om de verschillen zichtbaar te houden, zijn bergingscoëfficiënten groter dan 0,2 niet getekend.



Afbeelding 3 De bergingscoëfficiënt als functie van de grondwaterstand voor 7 fluxdichtheden en 2 bouwstenen van de Staringreeks: B02 (links) en O02 (rechts), beiden zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand.

Om ook voor de andere bouwstenen de variatie van de bergingscoëfficiënt met de grondwaterstand te onderzoeken, is voor alle 36 bouwstenen de minimale en maximale waarde van de bergingscoëfficiënt bepaald bij zeven fluxdichtheden: -4, -2, -1 mm d⁻¹ (infiltratie), 0 mm d⁻¹ (evenwicht), 1, 2 en 4 mm d⁻¹ (capillaire opstijging). Voor de grondwaterstand is het traject beschouwd tussen 0,1 m en 1 m beneden maaiveld met stapjes van 0,01 m. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1. Opvallend hierbij is de waarde $\mu=0,000$ bij een infiltratie van 4 mm d⁻¹ voor de bouwstenen B11 (bovengrond, matig zware klei), O11 (ondergrond, lichte klei) en O12 (ondergrond, matig zware klei). Dit betekent dat de bergingscoëfficiënt kleiner is dan 0,001, hetgeen wordt veroorzaakt door de lage waarden van de verzadigde doorlatendheid (K_{sat}) van de desbetreffende bouwsteen. Verder is te zien dat de hoogste waarde $\mu=0,889$ is voor bouwsteen O16 (ondergrond, oligotroof veen) bij $q=4$ mm d⁻¹. Deze (buitengewoon hoge) waarde wordt veroorzaakt door de vorm van de waterretentie-curve van het desbetreffende monster. Voor deze bouwsteen (O16), bij dezelfde fluxdichtheid, is de laagste waarde $\mu=0,022$.

Zoals vermeld worden de parameters van elke bouwsteen bepaald uit de karakteristieken van de aanwezige monsters die tot dezelfde (bodembkundige) klasse behoren. Maar hoe verhouden de bergingscoëfficiënten van de onderliggende monsters zich tot die van de bouwsteen? Om dat te onderzoeken zijn alle bergingscoëfficiënt-verlopen bepaald van de onderliggende monsters van de bouwstenen B02 en O02 voor een infiltratieflex van 2 mm d⁻¹. Deze zijn weergegeven in afbeelding 4. Hierbij valt onmiddellijk de grote spreiding van waarden op. De variatie door de onderliggende monsters is aanzienlijk groter dan de variatie die wordt veroorzaakt door de grondwaterstand. Ook wordt het duidelijk dat het verloop van de bergingscoëfficiënt met de diepte sterk kan variëren, namelijk tussen $\mu=0,014$ en $\mu=0,434$ voor B02 en tussen $\mu=0,009$ en $\mu=0,317$ voor O02.



Afbeelding 4 Het verloop van de bergingscoëfficiënt van de bouwstenen B02 (links) en O02 (rechts) afgebeeld als zwarte lijn, en dat van de onderliggende bodemmonsters als grijze lijnen.

Heterogene (meerlagen) profielen

Door Wösten e.a. (2012) zijn aan de 315 bodemeenheden behorende bij de bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks toegekend. Met een model zijn voor deze eenheden functionele kenmerken berekend. Op grond van verwantschap in functionele kenmerken zijn de 315 bodemeenheden geclusterd in 72 bodemfysische eenheden en afgebeeld in de BOdemFysische EenhedenKaart (BOFEK2012). Om deze gegevens bij modelberekeningen van water- en stoffen-transport te kunnen gebruiken, is een dataset samengesteld met informatie. Deze dataset bestaat uit 1) een GIS-bestand met de geografische verbreding van de BOFEK-eenheden in Nederland en 2) profielschetsen met de laagopbouw van het bodemprofiel tot 1,20 m beneden maaiveld. Omdat sinds het verschijnen van BOFEK in 2012 zowel de Staringreeks als de bodemkaart van Nederland zijn aangepast, zijn de standaardprofielen in 2020 opnieuw bepaald (Heinen e.a., 2021). Op basis van de karakteristieken uit de Staringreeks zijn voor alle standaardprofielen eenvoudige fysische kengetallen berekend, waarna de standaardprofielen zijn geclusterd. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat profielen in hetzelfde cluster vergelijkbare fysische eigenschappen bezitten.

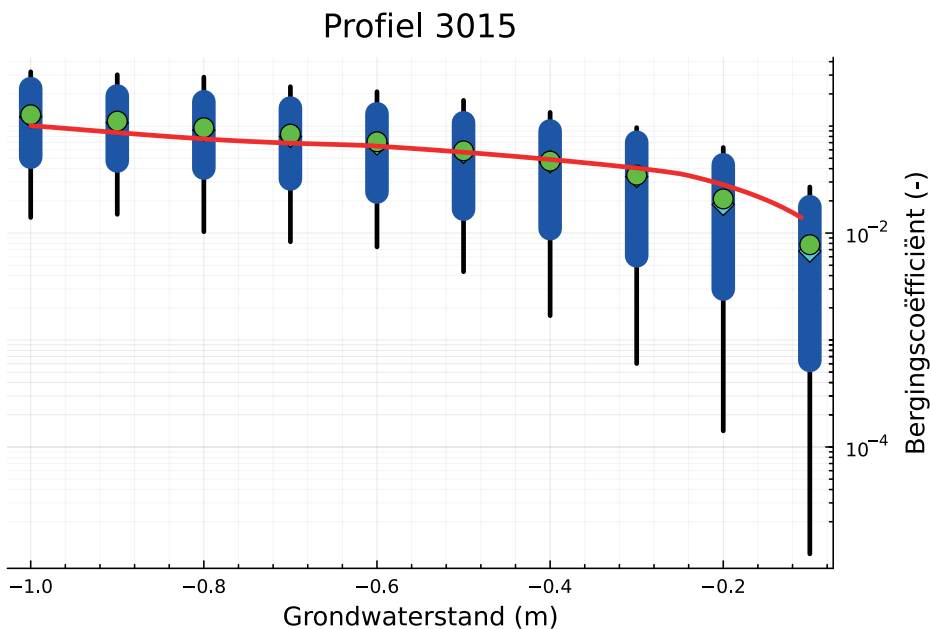
Hierbij zijn vijf hoofdgroepen van bodems in Nederland onderscheiden: veengronden, moerige gronden, zandgronden, klei- en zavelgronden en leemgronden. Om 95% van de variantie te kunnen verklaren, zijn in totaal 79 BOFEK2020-eenheden vastgesteld. Per BOFEK2020-cluster is het standaardprofiel met het grootste areaal van alle profielen binnen hetzelfde cluster aangegeven als clusterhoofd of dominant profiel waarvoor simulaties kunnen worden uitgevoerd. De verkregen resultaten kunnen dan worden toegewezen aan de overige profielen binnen hetzelfde cluster. Zie Heinen e.a. (2021) en Heinen e.a. (2022) voor meer details. De kaart van Nederland met alle eenheden is te downloaden van internet (BOFEK,2020).

In Heinen e.a. (2021) worden ook de arealen per BOFEK-eenheid gegeven. Hieruit blijkt dat het profiel met nummer 9024010 het grootste areaal heeft, namelijk 1866782 ha, gevolgd door het profiel met nummer 9014010 met 77748 ha. Daarom is ervoor gekozen om de volgende berekeningen uit te voeren met nummer 9024010. Binnen BOFEK heeft dit profiel het identificatienummer

Tabel 1 Berekende minimale en maximale bergingscoëfficiënten voor de bouwstenen van de Staringreeks bij 7 verschillende fluxdichtheden.

	Capillaire opstijging						Evenwicht			Infiltratie				
	q=4 mm d ⁻¹		q=2 mm d ⁻¹		q=1 mm d ⁻¹		q=0 mm d ⁻¹		q=1 mm d ⁻¹		q=2 mm d ⁻¹		q=4 mm d ⁻¹	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Bouwsteen														
B01	0,014	0,427	0,014	0,371	0,014	0,225	0,014	0,198	0,013	0,181	0,013	0,169	0,013	0,151
B02	0,014	0,434	0,014	0,434	0,014	0,434	0,014	0,121	0,014	0,099	0,014	0,088	0,014	0,076
B03	0,010	0,192	0,009	0,149	0,009	0,136	0,009	0,125	0,009	0,116	0,009	0,108	0,009	0,096
B04	0,010	0,145	0,010	0,125	0,010	0,117	0,010	0,110	0,009	0,104	0,009	0,099	0,009	0,090
B05	0,037	0,381	0,036	0,381	0,036	0,381	0,036	0,260	0,036	0,236	0,036	0,221	0,035	0,201
B06	0,011	0,098	0,011	0,089	0,011	0,085	0,011	0,081	0,011	0,078	0,011	0,075	0,010	0,070
B07	0,012	0,401	0,011	0,401	0,010	0,145	0,010	0,081	0,010	0,061	0,009	0,049	0,008	0,036
B08	0,009	0,433	0,007	0,433	0,006	0,112	0,006	0,062	0,005	0,039	0,004	0,026	0,003	0,013
B09	0,007	0,430	0,005	0,262	0,004	0,086	0,003	0,042	0,003	0,023	0,002	0,013	0,001	0,004
B10	0,018	0,448	0,010	0,448	0,007	0,448	0,005	0,042	0,004	0,012	0,003	0,006	0,001	0,002
B11	0,038	0,591	0,020	0,591	0,014	0,591	0,010	0,064	0,007	0,018	0,005	0,009	0,003	0,003
B12	0,530	0,530	0,054	0,530	0,017	0,530	0,006	0,042	0,002	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
B13	0,004	0,072	0,004	0,069	0,004	0,067	0,004	0,065	0,004	0,064	0,004	0,062	0,004	0,059
B14	0,007	0,417	0,004	0,417	0,003	0,123	0,002	0,034	0,002	0,014	0,001	0,006	0,000	0,001
B15	0,019	0,166	0,019	0,150	0,018	0,143	0,018	0,137	0,018	0,131	0,018	0,126	0,018	0,117
B16	0,028	0,786	0,026	0,786	0,025	0,269	0,024	0,189	0,023	0,148	0,022	0,121	0,020	0,087
B17	0,049	0,719	0,025	0,719	0,018	0,719	0,013	0,091	0,010	0,026	0,007	0,013	0,004	0,005
B18	0,024	0,765	0,020	0,765	0,018	0,765	0,016	0,111	0,015	0,063	0,014	0,044	0,011	0,026
O01	0,005	0,366	0,004	0,366	0,004	0,366	0,004	0,181	0,004	0,158	0,004	0,144	0,004	0,126
O02	0,009	0,387	0,009	0,317	0,009	0,139	0,009	0,117	0,009	0,104	0,008	0,095	0,008	0,082
O03	0,008	0,340	0,008	0,177	0,008	0,151	0,008	0,134	0,008	0,121	0,007	0,111	0,007	0,095
O04	0,007	0,192	0,007	0,116	0,007	0,104	0,007	0,095	0,007	0,088	0,006	0,082	0,006	0,073
O05	0,009	0,337	0,009	0,337	0,009	0,337	0,009	0,288	0,009	0,244	0,008	0,225	0,008	0,202
O06	0,008	0,097	0,007	0,079	0,007	0,073	0,007	0,067	0,007	0,062	0,007	0,058	0,007	0,051
O07	0,007	0,092	0,006	0,066	0,006	0,058	0,006	0,051	0,006	0,045	0,006	0,041	0,006	0,033
O08	0,008	0,208	0,007	0,118	0,007	0,097	0,007	0,082	0,007	0,071	0,006	0,062	0,006	0,048
O09	0,007	0,458	0,006	0,151	0,006	0,104	0,006	0,077	0,005	0,059	0,005	0,047	0,004	0,030
O10	0,011	0,472	0,008	0,472	0,007	0,472	0,006	0,059	0,005	0,029	0,004	0,016	0,002	0,006
O11	0,444	0,444	0,021	0,444	0,011	0,444	0,006	0,043	0,003	0,006	0,001	0,002	0,000	0,000
O12	0,043	0,561	0,015	0,561	0,009	0,561	0,005	0,045	0,002	0,006	0,001	0,001	0,000	0,000
O13	0,066	0,573	0,024	0,573	0,016	0,573	0,010	0,055	0,007	0,012	0,004	0,006	0,002	0,002
O14	0,001	0,037	0,001	0,028	0,001	0,025	0,001	0,022	0,001	0,019	0,001	0,017	0,000	0,013
O15	0,006	0,410	0,005	0,410	0,004	0,081	0,004	0,046	0,003	0,030	0,003	0,020	0,002	0,010
O16	0,022	0,889	0,016	0,889	0,013	0,729	0,011	0,146	0,009	0,075	0,007	0,043	0,004	0,015
O17	0,020	0,849	0,016	0,849	0,015	0,284	0,013	0,133	0,011	0,082	0,010	0,055	0,008	0,028
O18	0,010	0,132	0,010	0,118	0,010	0,112	0,010	0,107	0,010	0,102	0,010	0,097	0,009	0,089

(id) 3015. Bodemkundig is het een veldpodzol op leemarm of zwakleemig zand (Hn21), bestaande uit 4 horizonten met een dikte van resp. 25 cm, 15 cm, 20 cm en 60 cm. Deze horizonten hebben de bodemfysische eigenschappen toegekend gekregen van de Staringreeks-bouwstenen B02, O02, O02 en O01. Dit houdt in dat de tweede en derde horizont bodemkundig verschillen, maar dat de eigenschappen hiervan nog binnen dezelfde klasse van de Staringreeks vallen. Desondanks zijn de beide horizonten hier apart beschouwd. Als nu wordt gekeken naar alle achter elke bouwsteen liggende monsters, dan kan er een aantal mogelijke combinaties worden doorgerekend die allemaal aan de opbouw voldoen die hierboven is beschreven. Uit tabel 4.1 van Wesseling en Ritsema (2020) blijkt dat bouwsteen B02 38 achterliggende monsters heeft, bouwsteen O02 heeft er 23 en bouwsteen O01 heeft er 127. Dat betekent dat er voor grondwaterstanden die zich in de onderste horizont bevinden 38 (B02) x 23 (O02) x 23 (O02) x 127 (O01) = 2.553.954 combinaties mogelijk zijn (zie ook Wesseling en Ritsema, 2020). Om al deze combinaties door te rekenen en de resultaten te bewerken en presenteren is niet zinvol. Daarom is ervoor gekozen om maximaal 10.000 combinaties door te rekenen. Als er meer dan 10.000 mogelijkheden zijn (zoals bij het beschouwde profiel het geval is) dan worden er 10.000 combinaties 'uniform random' getrokken uit alle mogelijkheden. De bergingscoëfficiënt wordt voor elke grondwaterstand in stappen van 10 cm (tussen -10 en -100) berekend en statistisch verwerkt. De resultaten worden gegeven in afbeelding 5.



Afbeelding 5 De bergingscoëfficiënt voor een veldpodzol (profiel 3015) zoals berekend met de bouwstenen van de Staringreeks (rode lijn) en combinaties van alle achterliggende bodemonsters: minima en maxima (zwarte lijn), 5% en 95% kwantielen (blauwe staven), gemiddelden (lichtgroene cirkels) en medianen (lichtblauwe diamanten).

Om ook de verschillen bij lage bergingscoëfficiënten weer te geven, is de y-as logaritmisch weergegeven. Hierdoor heeft de lijn een andere vorm dan die in de voorgaande afbeeldingen. Opvallend is dat de mediane en de gemiddelde waarde heel dicht bij elkaar liggen, hetgeen aantoont dat de verdeling vrij symmetrisch is. In eerste instantie lijkt het erop dat het verloop van de spreiding in afbeelding 5 het omgekeerde is van die in afbeelding 4. Dit wordt veroorzaakt door het gebruik van de logaritmische y-as in afbeelding 5. Ook is het opvallend dat de spreiding sterk afneemt naarmate de grondwaterstand daalt. Voor diepe grondwaterstanden wordt de bergingscoëfficiënt onderschat door het gebruik van de Staringreeks, terwijl deze bij de hogere grondwaterstanden een overschatting geeft (vergeleken met mediane en gemiddelde waarden). Op logaritmische schaal zijn deze verschillen minimaal, maar als absolute waarde kunnen deze verschillen relatief groot worden.

Herhalen we nu bovenstaande berekeningen met alleen de monsters van na 2001, dan krijgen we een maximaal aantal mogelijke combinaties van 11 (B02) x 9 (O02) x 9 (O02) x 18 (O01) = 16038. Ook hierbij is weer uitgegaan van een maximum van 10.000 combinaties. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2. Uit deze tabel blijkt dat de mediane waarde en de gemiddelde waarde het meest verschillen op -0,4 m, namelijk 0,007, hetgeen overeenkomt met 50% van de mediane waarde.

Tabel 2 Statistische gegevens van de berekende bergingscoëfficiënten voor 10 grondwaterdiepten. Hierbij zijn alleen monsters van na 2001 gebruikt. Hierin is z_g (m) de grondwaterstand, N_c is het mogelijke aantal combinaties, N_r is het aantal doorgerekende combinaties, μ_{\min} en μ_{\max} zijn de laagst en hoogst berekende waarde, μ_{gem} en μ_{std} zijn de gemiddelde waarde en de standaardafwijking, μ_{med} is de mediaan, μ_5 en μ_{95} zijn de 5% en 95% kwantielen en μ_{star} is de waarde die is berekend met de bouwstenen van de Staringreeks.

z_g	N_c	N_r	μ_{\min}	μ_{\max}	μ_{gem}	μ_{std}	μ_{med}	μ_5	μ_{95}	μ_{star}
(m)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
-0,1	11	11	0,000	0,008	0,003	0,003	0,002	0,000	0,007	0,012
-0,2	11	11	0,000	0,027	0,009	0,008	0,005	0,001	0,023	0,028
-0,3	99	99	0,001	0,052	0,015	0,013	0,010	0,001	0,047	0,041
-0,4	891	891	0,002	0,071	0,021	0,015	0,014	0,004	0,059	0,049
-0,5	891	891	0,004	0,081	0,026	0,015	0,021	0,009	0,061	0,057
-0,6	16038	10000	0,007	0,084	0,031	0,014	0,028	0,013	0,059	0,065
-0,7	16038	10000	0,010	0,084	0,036	0,013	0,034	0,018	0,060	0,069
-0,8	16038	10000	0,011	0,102	0,042	0,014	0,040	0,022	0,066	0,076
-0,9	16038	10000	0,011	0,121	0,052	0,019	0,049	0,027	0,088	0,087
-1,0	16038	10000	0,012	0,181	0,067	0,033	0,059	0,030	0,143	0,101

De spreiding van de bergingscoëfficiënten is kleiner als alleen de monsters van na 2001 in de beschouwing worden betrokken omdat 1) het aantal monsters kleiner is en 2) er andere bepalingsmethodes zijn gebruikt.

Omdat de monsters van na 2001 niet overal op dezelfde locatie zijn gestoken, is het lastig om uit deze gegevens onmiddellijk de invloed van ‘voor’ en ‘na’ op de waarde van de bergingscoëfficiënt μ te bepalen. Desondanks hebben we getracht om deze te bepalen met behulp van lineaire regressie en het percentage verklaarde variantie. Hiertoe is de verhouding berekend tussen de regressiesom van de kwadraten en de totale som van de kwadraten (in %). Dit percentage verklaarde variantie geeft antwoord op de vraag hoe sterk het signaal van de beschouwde variabele boven de ruis van de andere factoren uitkomt. Hiertoe zijn de variabelen p_1 t/m p_4 geïntroduceerd. Deze geven aan of het beschouwde monster dat voor horizont 1 t/m 4 is gebruikt van voor of na 2001 is (resp. 0 of 1); bijvoorbeeld $p_1=0, p_2=1, p_3=0, p_4=1$: dit profiel is samengesteld uit monsters die voor (0) en na 2001 (1) zijn genomen. Ook is gekeken naar de invloed van de variabelen p_1 t/m p_4 samen (als de som: p_a). Als check op de uitwisselbaarheid is er ook gekeken op die bijdrage nog verandert als de variabele als laatste wordt toegevoegd. Er is ook gekeken naar de toename in het percentage verklaarde variantie van het model min één variabele naar het model met alle variabelen, dus als de variabele niet als eerste maar als laatste wordt toegevoegd. Dit is een check op de uitwisselbaarheid. Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd voor de fluxdichtheid (q) en de grondwaterstand (z_g), dus als toename in het percentage verklaarde variantie van het model min die ene variabele naar het model met alle variabelen. Zie Tabel 3.

Tabel 3 Percentage verklaarde variantie (in %). Percentage 1 is het percentage als de desbetreffende variabele als eerste wordt gebruikt, bij Percentage 2 wordt de variabele als laatste toegevoegd.

Variabele	Percentage 1	Percentage 2
z_g	46,6	46,5
q	4,8	4,6
p_a	4,0	3,9
p_3	1,4	1,4
p_4	1,1	1,1
p_2	0,7	0,8
p_1	0,7	0,7

Bij deze methode wordt uitgegaan van een lineaire relatie en wordt geen rekening gehouden met een eventueel niet-lineair verband tussen de μ en de variabele. Uit de waarden in de tabel komt duidelijk naar voren dat de grondwaterstand z_g de voornaamste bron van variantie is met een veel grotere waarde dan de overige variabelen. Het maakt voor de berekende waarde van de bergingscoëfficiënt vrijwel niets uit of een monster van voor of na 2001 is.

Ten slotte is voor het hiervoor besproken heterogene BOFEK-profiel 9024010 (Hn21, id=3015) een Sobol-analyse uitgevoerd (Sobol, 2001; Saltelli, 2002; Saltelli et al., 2010). Hiervoor is gebruikgemaakt van een van de standaardpakketten van Julia, GlobalSensitivityAnalysis (Rennels, 2023). Er is een analyse uitgevoerd met 6 invoerparameters, namelijk de grondwaterstand (z_g , waarde tussen -120 en -10 cm), de infiltratie fluxdichtheid (q , waarde tussen -10 en 0 mm d⁻¹) en het achterliggend monster (S_1 , waarde tussen 1 en het aantal monsters (N_s) van de bouwsteen van de Staringreeks) voor horizont 1 t/m 4. De resultaten zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4 Resultaten van de Sobol-analyse: percentages van de variantie van de bergingscoëfficiënt verklaard door variantie in variabelen.

Variabele	Percentage
z_g	74,6
S_4	30,2
q	8,0
S_3	7,9
S_1	5,2
S_2	4,4

Uit deze tabel blijkt dat de variantie van de berekende bergingscoëfficiënt voor 75% wordt bepaald door de variantie van de grondwaterstand z_g , voor 30% door de variantie van de bouwsteen van de onderste horizont, en voor 8% door de waarde van de flux q en van de bouwsteen van laag 3. De grote invloed van S_4 kan worden verklaard uit het feit dat deze het verloop van het vochtprofiel bepaalt in de hogere horizonten en dus ook de waarde van de bergingscoëfficiënt. Er is bij deze berekeningen geen rekening gehouden met eventuele correlaties tussen de variabelen: bij hoge grondwaterstanden zal de diepste horizont geen invloed hebben op de bergingscoëfficiënt omdat deze horizont dan niet bij de berekening betrokken wordt.

Conclusies

In afbeelding 1 hebben we laten zien dat dat de bergingscoëfficiënt een grote invloed heeft op het verloop van de afvoer bij ontwatering. Echter, in de praktijk wordt bij het toepassen van dit soort en andere (numerieke) modellen de waarde van de bergingscoëfficiënt constant gehouden, voornamelijk omdat het verloop van deze waarde met de grondwaterstand niet bekend is. In het hier beschreven onderzoek is (nogmaals) aangetoond dat de waarde van de bergingscoëfficiënt afhangt van de grondwaterdiepte, het type bodem en de optredende fluxdichtheid. Bij het doorgerekende heterogene profiel wordt de meeste variantie in de bergingscoëfficiënt verklaard door de variatie in grondwaterstand. Ook is aangetoond dat het gebruik van de bergingscoëfficiënt berekend uit de Staringreeks gepaard gaat met grote onzekerheden. Zo is bij de doorgerekende homogene bodems de spreiding in de bergingscoëfficiënt door de bij de Staringreeks-bouwsteen behorende monsters groter dan die verklaard door de

grondwaterstand. Aanvullend kan nog worden gezegd dat bij het toepassen van de verschillende monsters die bij een Staringreeks-bouwsteen horen, het overstappen naar een andere verwerkingsmethode (in 2001) een verwaarloosbaar effect heeft op de waarde van de bergingscoëfficiënt. Onze aanbeveling is om bij het bepalen van de bergingscoëfficiënt ten minste de afhankelijkheid van de grondwaterstand mee te nemen. Daarnaast zullen grondwaterstanden die zijn berekend op basis van een constante bergingscoëfficiënt altijd als benadering moeten worden beschouwd.

Samenvattend kan worden gezegd dat gebruik van een constante bergingscoëfficiënt moet worden afgeraden in wetenschappelijke en beleidsmatige onderzoeken daar deze alleen een grove schatting van de uitkomsten van berekeningen oplevert. Om betrouwbare resultaten te krijgen, moet de bergingscoëfficiënt als dynamische variabele worden gemodelleerd. Bij gebruik van de Staringreeks voor de bodemfysische gegevens wordt aanbevolen om een statistische analyse uit te voeren met de voor de desbetreffende bouwstenen gebruikte bodemonsters om een beeld te krijgen van de onzekerheid in de bergingscoëfficiënt.

Softwarebeschikbaarheid en overige informatie:

De in dit artikel vermelde resultaten zijn verkregen met behulp van software die is geschreven in de programmeertaal Julia versie 1.10.4, gratis verkrijgbaar op <https://julialang.org>. Voor de geïnteresseerde lezer is de software op te vragen bij de eerste auteur van dit artikel. Ook is er nog een groot aantal figuren beschikbaar met het verloop van de bergingscoëfficiënten van bodems en bouwstenen die hier niet zijn getoond.

Literatuur

Aquo (2024) <https://www.aquo.nl/index.php/Id-2e87f6c7-a120-4661-9e69-4c3d64c0d70f>

BOFEK (2020) <https://www.wur.nl/nl/show/bodemfysische-eeenhedenkaart-bofek2020.htm>

Cultuurtechnische vereniging (1988) Cultuurtechnisch Vademecum. Utrecht, 646 pag.

De Bakker, H. en J. Schelling (1966) Systeem van bodemklassificatie voor Nederland; de hogere niveaus. PUDOC, Wageningen, 217 pag.

De Jager, A.W. 1965. Hoge afvoeren van enige Nederlandse stroomgebieden. Diss. LH Wageningen, PUDOC,

De Zeeuw, J.W. en F. Hellinga (1958) Neerslag en afvoer, In: *Landbouwkundig Tijdschr.* Jrg. 70, pag 405-422.

Ernst, L.F. (1954) Het berekenen van stationaire grondwaterstromingen welke in een verticaal vlak afgebeeld kunnen worden. Rapport IV. Landbouwk. Proefstation, Groningen.

Heinen, M., G. Bakker en H. Wösten (2020) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks, update 2018; Wageningen Environmental Research, Rapport 2978, 78 pag.

- Heinen, M., F. Brouwer, C. Teuling en D. Walvoort** (2021) Bofek2020 – bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart; Wageningen Environmental Research. Report 305, 84 pag.
- Heinen, M., H.M. Mulder, G. Bakker, J.H.M. Wösten, F. Brouwer, K. Teuling en D.J.J. Walvoort** (2022) The Dutch soil physical units map: BOFEK; In: *Geoderma*, vol. 427, pag 116123.
- Hooghoudt, S.B.** (1940) Algemeene beschouwing van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen; Technical report. In: *Versl. Landbouwk. Onderz.* 40(14)B.
- Krajenhoff van de Leur, D.A.** (1958) A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient, Deel 1. In: *De Ingenieur*, vol 70, pag 87-94.
- Maasland, M.** (1959) Water table fluctuations induced by intermittent recharge. In: *J. Geoph. Res.*, vol 64, pag 549-589.
- Rennels, L.** (2023) <https://github.com/lrennels/GlobalSensitivityAnalysis.jl>
- Saltelli, A.** (2002) Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. In: *Computer Physics Communications*, vol 145, nr 2, pag 280-297, doi:10.1016/S0010-4655(02)00280-1.
- Saltelli, A., P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto en S. Tarantola** (2010) Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. In: *Computer Physics Communications*, vol 181, nr 2, pag 259-270, doi:10.1016/j.cpc.2009.09.018.
- Sobol, I. M.** (2001) Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. In: *Mathematics and Computers in Simulation*, vol 55, nr 1-3, pag 271-280, doi:10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
- Van Genuchten, M.Th.** (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils; In: *Soil Science Society of America Journal*, vol 44, nr 3, pag 892-898.
- Wesseling, J.** (1969) Bergingsfactor en drainagecriterium. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Meded. 118, 8 pag.
- Wesseling, J.G. en J. Wesseling** (1984) The influence of seepage on the depth of water tables in drainage; In: *Journal of Hydrology*, vol 73, nr 3-4, pag 289-297.
- Wesseling, J.G. en C.J. Ritsema** (2020) Resultaten van een kort onderzoek naar de legitimiteit van het gebruik van een bodemkundig classificatiesysteem voor bodemfysische eigenschappen; Wageningen Environmental Software Report 5, 56 pag, <http://www.wesw.nl/reports/05/index.php>
- Wesseling, J.G. en C.J. Ritsema** (2022) Het gebruik van een bodemkundig classificatiesysteem in de bodemfysica en agrohydrologie: een bron van onzekerheden; In: *Stromingen*, vol 28, nr 4, pag 45-58.
- Wösten, J. H. M., M. H. Bannink en J. Beuving** (1987) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks; Wageningen, Stiboka-rapport 1932, ICW-rapport 18.
- Wösten, J. H. M., G. J. Veerman en J. Stolte** (1994) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks, vernieuwde uitgave 1994; Wageningen, Staring Centrum-DLO, Technisch document 18.

Wösten, J. H. M., G. J. Veerman, W. J. M. de Groot en J. Stolte (2001) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- ondergronden in Nederland: de Staringreeks, vernieuwde uitgave 2001; Alterra, Wageningen, Rapport 153.

Wösten, J. H. M., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. R. J. Vroon, J. G. Wesseling, J. Heijkers en A. Bolman (2012) Bofek2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland; Alterra Wageningen, Rapport 2387, 88 pag.

Appendix De toegepaste vergelijkingen

De 1-dimensionale (verticale) stroming van water in de bodem kan worden beschreven met behulp van de Wet van Darcy:

$$q = -K(h) \frac{dH}{dz} = -K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right)$$

waarin q = fluxdichtheid [LT^{-1}], positief naar boven, H = stijghoogte [L], h = drukhoogte [L] en $K(h)$ = hydraulisch geleidingsvermogen [LT^{-1}] als functie van h .

Van Genuchten (1980) beschrijft de relaties tussen geleidingsvermogen en drukhoogte en die tussen drukhoogte en vochtgehalte θ [$L^3.L^{-3}$] als volgt:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

$$K = K_0 \frac{((1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1})^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{m(1+2)}}$$

met

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

waarbij K_0 = een gefit punt voor de hydraulische geleidbaarheid bij verzadiging [$L.T^{-1}$], θ_r = het residuaire vochtgehalte [$L^3.L^{-3}$], θ_s = het verzadigd vochtgehalte [$L^3.L^{-3}$], α = parameter gerelateerd aan de inverse van de drukhoogte waarbij lucht in de grond binnendringt [L^{-1}], n = maat voor de poriëngrootteverdeling [-] en l parameter waarvan de waarde meestal op 0,5 wordt gezet.

Omschrijven van Darcy's vergelijking levert (voor stationaire stroming) een vergelijking die de relatie tussen de verandering in plaats aangeeft als functie van de verandering in drukhoogte:

$$dz = - \frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

Op het niveau van het freatische grondwater is de drukhoogte 0. Als we aannemen dat de oorsprong van de verticale as ($z=0$) op het niveau van het freatische grondwater ligt, dan kan het (tijdsonafhankelijke of stationaire) drukhoogteprofiel (de relatie tussen z en h) worden berekend door de vorige vergelijking te integreren:

$$\int_0^z dz = \int_0^h -\frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

ofwel

$$z(h) = \int_0^h -\frac{dh}{1 + \frac{q}{K(h)}}$$

Deze integraal kan (voor positieve waarden van q, d.w.z. capillaire opstijging) numeriek worden berekend als

$$z(h) = \sum_{i=1}^{N_h} -\frac{\Delta h_i}{1 + \frac{q}{K\left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2}\right)}}$$

waarbij N_h = aantal integratiestappen en Δh_i = stapgrootte bij integratiestap i. Bij het berekenen van de $K(h)$ moet rekening worden gehouden met de laagopbouw van het bodemprofiel.

Voor negatieve waarden van q (infiltratie) kan er instabiliteit optreden, vooral als de waarde van $K(h)$ in de buurt van die van (de absolute waarde van) q ligt. Dan wordt immers het quotiënt -1 en zal de noemer in de vergelijking naar 0 naderen waardoor dz naar ∞ gaat. Daarom wordt, in geval van infiltratie, Darcy's vergelijking omgeschreven tot

$$dh = -\left(1 + \frac{q}{K(h)}\right) dz$$

Nu kan het drukhoogteprofiel worden berekend uit

$$\int_0^h dh = \int_0^z -\left(1 + \frac{q}{K(h)}\right) dz$$

ofwel

$$h(z) = \int_0^z -\left(1 + \frac{q}{K(h)}\right) dz$$

Deze kan numeriek worden bepaald als

$$h(z) = \sum_{i=1}^{N_z} \left(1 + \frac{q}{K\left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2}\right)}\right) \Delta z$$

waarbij de waarde van $K(h)$ iteratief wordt bepaald.

De vochtinhoud van het bodemprofiel kan worden berekend als de integraal van het vochtgehalte over de diepte:

$$V(z_g) = \int_{z_g}^0 \theta(h(z)) dz \approx \sum_{i=1}^{N_h} \theta(h_i) \Delta z_i$$

waarbij $V(z_g)$ = vochtvolume per eenheid van oppervlakte [$L^3 L^{-2} = L$] bij een grondwaterstand z_g [L]. Aangezien de relatie tussen het vochtgehalte θ [$L^3 L^{-3}$] en de drukhoogte h [L] bekend is door de zogenaamde waterretentiekarakteristiek of pF-curve, kan met behulp van bovenstaande vergelijkingen de vochtinhoud V van het bodemprofiel worden berekend bij een gegeven waarde van de fluxdichtheid q en grondwaterstand z_g . Het bergend vermogen van het bodemprofiel (V_a) is nu

het volume aan poriën dat niet met water is gevuld. Dit wordt berekend als

$$V_a(z_g) = \int_{z_g}^0 (\theta_s - \theta(z)) dz \approx \sum_{i=1}^{N_h} (\theta_s - \theta(h_i)) \Delta z_i$$

en de bergingscoëfficiënt als

$$\mu = \frac{dV_a(z_g)}{dz_g} \approx \frac{V_a(z_g - 0,5\Delta z) - V_a(z_g + 0,5\Delta z)}{\Delta z}$$

Bovenstaande vergelijkingen zijn eenvoudig aan te passen voor een heterogeen of meerlagenprofiel.

Summary Uncertainties in the Estimation of the Value of the Phreatic Storage Coefficient

The phreatic storage coefficient of the soil is one of the variables used in the (analytical) calculation of water flow to drainage systems and the design of these systems. Although it is known that the value of the storage coefficient varies with the depth of the groundwater table, it is usually assumed to be constant. In the present research we shall first investigate the influence of the storage coefficient on the (computed) value of the drainage flux. Next, the relationships between the groundwater level and the storage coefficient will be investigated for homogeneous soil profiles. This will be done using the units of the Staring Series. The relationship between the storage coefficient and the groundwater depth is obtained for the heterogeneous soil profile, which covers the largest area in The Netherlands. Finally, some statistical methods are applied to find the contribution of some soil parameters to the variation of the storage coefficient.

Auteurs

DR.IR. J.G. (JAN) WESSELING

Gastmedewerker bij Wageningen Universiteit & Research, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer (jan.wesseling@wur.nl), CEO van Wageningen Environmental Software (wesseling@wesw.nl)

DR.IR. K. (KLAAS) METSELAAR

Universitair docent bij Wageningen Universiteit & Research, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer (klaas.metselaar@wur.nl)