

# Het gebruik van een bodemkundig classificatiesysteem in de bodemfysica en agro-hydrologie: een bron van onzekerheden

JAN WESSELING EN COEN RITSEMA

*Voor het uitvoeren van modelberekeningen met betrekking tot de grondwaterstroming in de onverzadigde bodem is kennis van de bodemfysische karakteristieken (pF-curve en doorlatendheid) vereist. Hiervoor wordt in Nederland gewoonlijk de Staringreeks gebruikt. Deze is gebaseerd op de bodemkaart 1:50000. Met behulp van de Staringreeks is de Bodemfysische Eenheden Kaart (BOFEK) ontwikkeld voor toepassingen op landelijke schaal. Maar is een dergelijk classificatiesysteem wel geschikt voor accurate modelberekeningen? Dat hebben we onderzocht aan de hand van een paar eenvoudige voorbeelden.*

Artikel

## Inleiding

De afgelopen decennia zijn er veel regionale en landelijke studies uitgevoerd waarbij de stroming in de onverzadigde bodem een rol speelt, zoals studies naar het risico van oppervlakkige afvoer (Massop e.a., 2014), het bergend vermogen van de bodem of naar uitspoeling van zware metalen uit landbouw-bodems (Bonten, 2009), nitraten (Van der Salm e.a., 2008) en fosfaten en pesticiden (Kruijne e.a., 2004). Regelmatig worden de uitkomsten van deze studies gebruikt voor het bepalen van beleidsmaatregelen. In de meeste gevallen worden er berekeningen uitgevoerd met numerieke modellen. Hierbij spelen een aantal (meestal niet vermelde) onzekerheden een rol: variabiliteit in de meteorologische gegevens, onzekerheid in de randvoorwaarden (drainage en kwel/wegzijing), heterogeniteit en anisotropie, zwel/krimp, scheurvorming, en vele andere.

Voor berekeningen in Nederland wordt in het algemeen gebruik gemaakt van de bodemfysische relaties uit de Staringreeks. Deze bevat de relaties tussen het vochtgehalte  $\theta$  en de drukhoogte  $h$  (de waterretentiekarakteristiek of pF-curve) en die tussen de drukhoogte  $h$  en het hydraulisch geleidingsvermogen  $K$  (de doorlatendheidscurve) voor een groot bereik van drukhoogtes. Voor deze reeks is uitgegaan van de textuur-terminologie van het systeem voor bodemclassificatie (De Bakker en Schelling, 1966) zoals toegepast bij de bodemkaart 1:50.000. Naar dit systeem zal verder worden gerefereerd als "de bodemkaart". De Staringreeks is beschreven door Wösten e.a. (1987, 1994, 2001) en Heinen e.a. (2020). Ook wordt er gebruik gemaakt van de landelijke schematisatie van de bodem van Nederland, de BOFEK-profielen, zoals gegeven in Wösten e.a. (2012) en Heinen e.a. (2021). Deze profielen zijn gedefinieerd door het clusteren van

een groot aantal bodems aan de hand van hydrologische kenmerken die berekend worden met behulp van de bodemfysische kenmerken uit de Staringreeks. In 2009 is al aangetoond dat het groeperen van bodemmonsters op basis van textuur en organische stof alleen (zoals in de Staringreeks wordt gedaan), tot onbevredigende resultaten kan leiden (Wesseling, 2009, Hoofdstuk 3). Deze auteur toont al aan dat er geen significante (hydrologische) verschillen zitten tussen de verschillende bouwstenen van de Staringreeks en dat er betere criteria nodig zijn voor het groeperen van individuele monster in (significant verschillende) bodemfysische klassen. In de genoemde publicatie wordt al aangeraden om de resultaten van de individuele monsters te gebruiken, niet die van de "gemiddelde" curves (Wesseling, 2009, Hoofdstuk 3).

In de rapporten over de Staringreeks (Wösten e.a. (2001), hoofdstuk 4 en 5; Heinen e.a. (2020), pag. 27) worden richtlijnen voor het gebruik van de data gegeven. Ook wordt er na het afleiden van de nieuwe BOFEK-2020 gegevens ingegaan op de onzekerheid en de verschillen tussen de verschillende versies (Heinen e.a. (2021), pag. 34).

Zowel de Staringreeks als BOFEK worden gebruikt voor (agro-)hydrologische berekeningen op vrijwel elke schaal. Er is echter geen onderzoek bekend waarbij de uitkomsten van berekeningen met de parameters van deze "bouwstenen" worden vergeleken met de uitkomsten van berekeningen met gemeten parameters.

Het huidige artikel is gebaseerd op het rapport van Wesseling en Ritsema (2022) waarin aan de hand van een paar eenvoudige voorbeelden wordt onderzocht wat de effecten zijn van het gebruik van de gemiddelde pF- en doorlatendheidscurves uit de Staringreeks en de gronden uit de BOFEK op de uitkomsten van berekeningen. Er wordt ook getracht antwoord te geven op de vraag of het classificatiesysteem van De Bakker en Schelling (1966) zoals toegepast voor de bodemkaart 1:50.000 wel mag worden gebruikt voor het classificeren van de bodemfysische eigenschappen, zoals in de Staringreeks is gedaan.

## **Materiaal en methoden**

### ***De Staringreeks***

De 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 bovengronden en achttien bouwstenen voor de ondergrond onderscheiden, gebaseerd op textuur, organische stof gehalte en afzettingmethode. 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 behulp van de Muallem - Van Genuchten (MVG) vergelijkingen (Van Genuchten, 1980). Deze bouwstenen worden bepaald door de gegevens van alle monsters waarvan textuur, organische-stof gehalte en afzettingmilieu overeenkomen met die van de desbetreffende bouwsteen te combineren. 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 plek waar het vandaan komt. Dit maakt het voor de gebruiker mogelijk om een dichtbij de eigen locatie gelegen monsterlocatie te kiezen en de waarden hiervan te gebruiken in plaats van die van de bouwsteen. Hieruit blijkt dat er 999 monsters zijn gebruikt voor het bepalen van de parameters van de bouwstenen.

Deze monsters zijn afkomstig van 155 locaties in Nederland (Afbeelding 1). In genoemde bijlage worden ook de MVG-parameters van de individuele monsters gegeven.



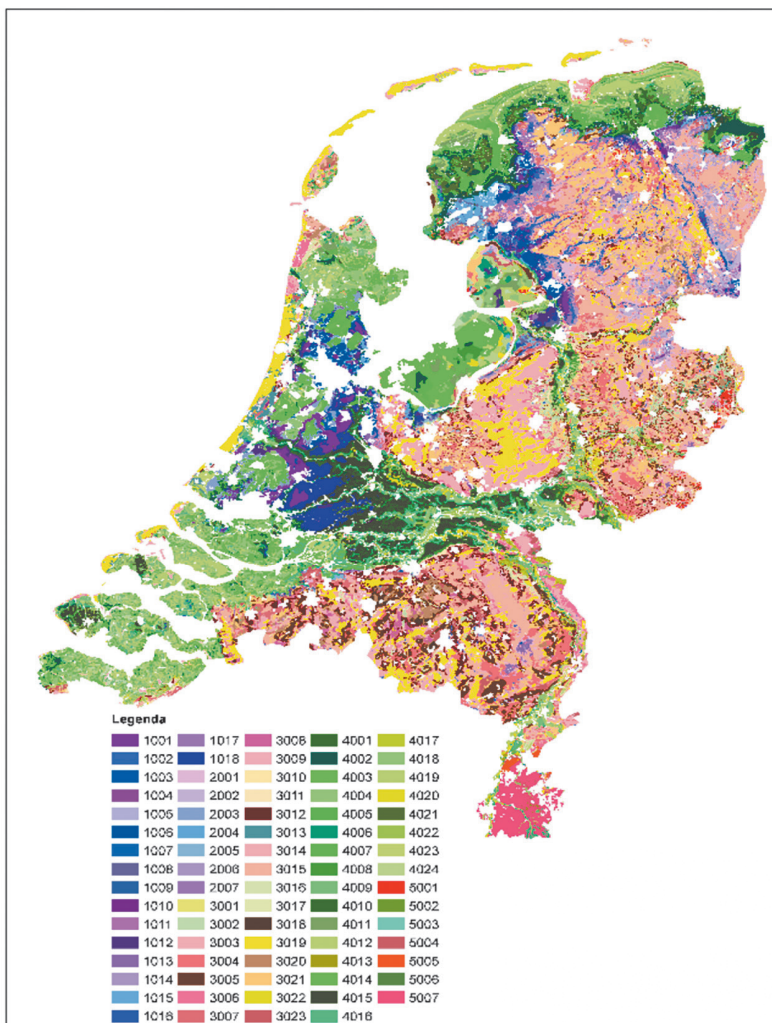
**Afbeelding 1** Locaties van de monsters die zijn gebruikt voor het bepalen van de Muallem – Van Genuchten (MVG) parameters van de bouwstenen uit de Staringreeks (afgeleid van Bijlage 5 in Heinen e.a. (2020))

Na de update van de Staringreeks in 2001 (Wösten e.a., 2001) zijn de meetmethode en de verwerkingsmethode voor het bepalen van de bodemfysische eigenschappen vernieuwd. Daarom wordt er in Heinen e.a. (2020) een gewichtsfactor gebruikt waardoor de nieuwe monsters zwaarder meewegen dan de oudere. Indien er voor een bouwsteen meer dan 10 monsters van na 2001 zijn worden de monsters van voor 2001 niet meegenomen bij het bepalen van de eigenschappen van de bouwsteen.

### **BOFEK**

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 bij modelberekeningen van water- en stoffentransport in de bodem deze gegevens te kunnen gebruiken is een dataset samengesteld met informatie. Deze dataset bestaat uit 1) een GIS-bestand met de geografische verbreiding 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 veranderd, zijn de standaardprofielen in 2020 opnieuw be-

paald (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, waarbij ervan wordt 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 aangewezen 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 (Afbeelding 2) is te downloaden van internet.



Afbeelding 2 De bodemfysische eenheden kaart (BOFEK) van Nederland (Heinen e.a., 2021)

## Resultaten van berekeningen en discussie

Om het effect van de clustering op de resultaten van modelberekeningen te kunnen bepalen is het nodig om te weten hoeveel monsters er per bouwsteen zijn gebruikt in de Staringreeks. Deze aantallen zijn gegeven in Tabel 4.1 van Wesseling en Ritsema (2022). Hieruit blijkt dat het aantal monsters varieert tussen 8 voor zeer lichte zavel (bovengrond B07) en 127 voor leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (ondergrond O01). Voor de monsters van na 2001 varieert het aantal van 0 (bovengronden B11, B15, B18; ondergronden O07 en O08) tot 18 (ondergronden O01 en O05). In totaal zijn er 999 monsters aanwezig, waarvan er 167 na 2001 zijn geanalyseerd.

Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (bouwsteen B02)

Om een indruk te krijgen van de locaties waarop een monster van een bepaalde bouwsteen is gemeten en op welke plaatsen deze bouwsteen volgens BOFEK voorkomt is gekeken naar zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand uit de bovengrond. Er zijn 38 monsters beschikbaar die tot deze categorie horen (Tabel 4.1 in Wesseling en Ritsema (2022)). Zie afbeelding 3. Een aantal van deze monsters is gestoken op dezelfde locatie, zodat er maar 11 locaties overblijven. Vervolgens is aan de hand van de tabel in Appendix 5 uit Heinen e.a. (2021) uitgezocht welke BOFEK-eenheden deze bouwsteen als eerste (bovenste) laag hebben en zijn deze locaties ook weergegeven in Afbeelding 3.



**Afbeelding 3** De locaties van de monsters waaruit de bodemfysische eigenschappen van zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (bouwsteen B02) zijn afgeleid, waarbij onderscheid is gemaakt tussen monsters van voor 2001 (groene sterretjes) en na 2001 (rode stippen). In oranje zijn de plaatsen weergegeven waar volgens de BOFEK kaart B02 als bovenste laag is te vinden

Dit houdt in dat de bodemfysische kenmerken van de bovenste bodemlaag voor alle oranje gebieden in deze kaart gelijk zijn en bepaald uit de kenmerken van de monsters van de locaties die zijn weergegeven op de linker kaart. Zo heeft

een monster uit het midden van Overijssel invloed op de parameters van de bovenste laag van bodems langs de kust van Zuid-Holland.

### Twee profielen uit Abbenes

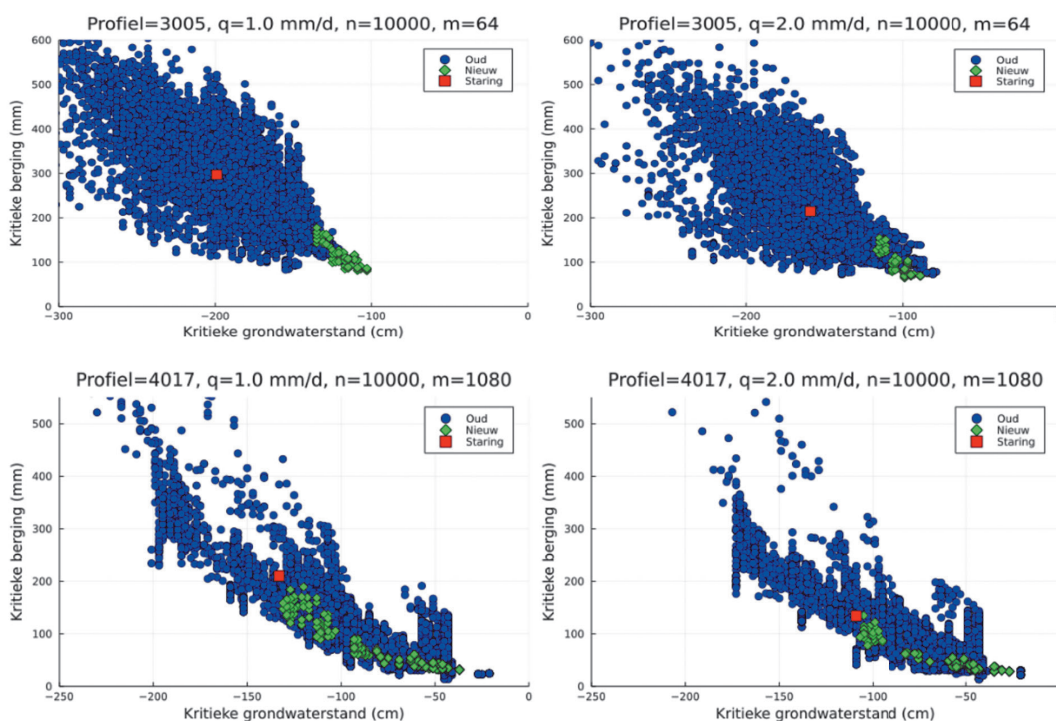
Voor een achttal profielen uit het gebied rond Abbenes (gemeente Haarlemmermeer) zijn de spreiding van zowel het bergingsvermogen als de kritieke berging en de kritieke grondwaterstand berekend (Wesseling en Ritsema, 2022). Hierbij is de kritieke z-afstand gedefinieerd als de maximale afstand tussen de onderzijde van de (effectieve) wortelzone en het freatisch grondwaterniveau waarbij, gegeven een bepaalde omhooggerichte flux, de drukhoogte aan de onderzijde van de wortelzone  $-16000$  cm (pF 4.2, het verwelkingspunt voor de meeste planten) is. De kritieke grondwaterstand is de corresponderende positie van het freatisch vlak. Het kritieke bergingsvermogen is het bergingsvermogen dat correspondeert met het aldus verkregen drukhoogteprofiel. In deze paragraaf zullen de kritieke grondwaterstand en de kritieke berging van twee BOFEK-profielen (nummers 3005 en 4017) bij een stationaire capillaire opstijging van één en twee  $\text{mm d}^{-1}$  worden gepresenteerd. De laagopbouw van deze profielen is gegeven in Tabel 1. Uit deze tabel blijkt dat in profiel 4003 de bovenste twee lagen zijn geclassificeerd als zijnde bouwsteen B10. Dat wil zeggen dat er bodemkundig onderscheid is gemaakt tussen deze lagen maar dat wordt aangenomen dat ze bodemfysisch identiek zijn. Zoals reeds eerder vermeld worden de eigenschappen van de Staringreeks-bouwstenen bepaald door het middelen van de waarden van de aparte monsters. Om te onderzoeken wat het effect is van deze middeling op de berekende kritieke z-waarde en de kritieke berging is voor de profielen in Tabel 1 gerekend met combinaties van de bij de klassen horende monsters.

**Tabel 1** De lagen van BOFEK-profielen 3005 en 4017 met de toegekende bouwstenen uit de Staringreeks

Laag	Dikte (cm)	Bouwsteen	Laag	Dikte (cm)	Bouwsteen
<b>3005</b>			<b>4017</b>		
1	25	B03	1	20	B08
2	45	B03	2	20	O09
3	20	B03	3	25	O10
4	20	O03	4	55	O05
5	10	O03			

Het aantal mogelijke combinaties van monsters van voor en na 2001 is te berekenen uit Tabel 1 en Tabel 4.1 uit Wesseling en Ritsema (2022). Als beide groepen monsters samen worden beschouwd is het aantal voor profiel 3005  $18 (B03) \times 18 (B03) \times 18 (B03) \times 24 (O03) \times 24 (O03) = 3.359.232$  en voor profiel 4017  $47 (B08) \times 33 (O09) \times 30 (O10) \times 35 (O05) = 1.628.550$ . Dit zijn enorme aantallen combinaties. Om een indruk te krijgen van de invloed van deze combinaties is er gerekend voor slechts 10.000 combinaties die random zijn getrokken uit de verzameling. Als alleen de monsters van na 2001 worden

betrokken bij de berekeningen, dan wordt het aantal combinaties voor profiel 3005  $4 (B03) \times 4 (B03) \times 4 (B03) \times 1 (O03) \times 1 (O03) = 64$  en bij profiel 4017  $4 (B08) \times 3 (O09) \times 5 (O10) \times 18 (O05) = 1080$ . De resultaten zijn weergegeven in Afbeelding 4. Voor profiel 3005 is voor beide fluxdichtheden duidelijk te zien dat de spreiding wordt verkleind bij het gebruik van alleen de monsters van na 2001. Opvallend is wel dat de resultaten van de berekeningen met de Staringreeks ver buiten die van de resultaten met de monsters van na 2001 liggen. In dit geval kan de kleinere spreiding van de resultaten met de monsters van na 2001 mede worden veroorzaakt doordat er bij de monsters van na 2001 maar 1 monster is dat bijdraagt aan de gegevens van de onderste laag (bouwsteen O03). Bij profiel 4017 ligt de kritieke grondwaterstand die berekend wordt met de Staringreeks net buiten de groene puntenzwerm, hetgeen betekent dat deze door de Staringreeks wordt overschat.



**Afbeelding 4** De kritieke grondwaterstand en kritieke berging voor de BOFEK-profielen 3005 (bovenste rij) en 4017 (onderste rij) voor capillaire opstijging van 1 mm d<sup>-1</sup> (links) en 2 mm d<sup>-1</sup> (rechts), berekend met 10000 combinaties van alle monsters (blauw), de monsters van na 2001 (groen) en met de bouwstenen van de Staringreeks (rood)

### Aardappels in Kattendijke

In 2022 is er in Nederland 163.059 ha aan aardappelen verbouwd (CBS, 2022). Het simuleren van de groei van aardappels gebeurt al meer dan 35 jaar (zie o.a. Van Wijk e.a., 1988). Een van de grote aardappelteeltgebieden ligt in Zeeland. Om ook hier de invloed van de gekozen bodemparameters te onderzoeken is gekeken naar een perceel net ten zuidwesten van Kattendijke (Walcheren) met coördinaten  $x=55420$ ,  $y=393329$  volgens het Rijksdriehoekstelsel. Volgens de

BOFEK-kaart (Heinen e.a., 2021) heeft het bodemprofiel de BOFEK-code 4011. De profielopbouw is gegeven in Tabel 2. Bij dit rekenvoorbeeld zijn alleen de monsters van na 2001 in de beschouwing betrokken. De gewasgroei is gesimuleerd met de gedetailleerde gewasgroeimodule van het model Swap (Kroes e.a., 2017). Er is gerekend met de standaard invoerparameters voor aardappels. Aangezien het gaat om de verschillen die door de bodemfysische parameters worden veroorzaakt, heeft er geen calibratie van de aardappelopbrengst plaatsgevonden. Hierdoor kunnen de opbrengsten afwijken van de werkelijke opbrengst. Uit Tabel 2 blijkt dat er  $6 \times 6 \times 5 \times 5 \times 5 = 4500$  combinaties mogelijk zijn. Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van de meteorologische gegevens van KNMI-station 310 (Vlissingen) voor de jaren 1980 - 2020 (41 jaar). Er is aangenomen dat er geen kwel of wegzijging optreedt.

**Tabel 2** De laagopbouw van de bodem in Kattendijke

Laag	Dikte (cm)	Staringbouwsteen	Monsters
1	110	Bovengrond, B09	6
2	115	Bovengrond, B09	6
3	125	Ondergrond, O10	5
4	120	Ondergrond, O10	5
5	130	Ondergrond, O10	5

Ten behoeve van de ontwatering is uitgegaan van een tweevoudig ontwateringssysteem. Het eerste systeem bestaat uit drainbuizen die op 60 cm beneden maaiveld liggen en een weerstand van 100 dagen hebben. Infiltratie vanuit de drains treedt niet op. Het tweede systeem bestaat uit sloten met een constant waterniveau van 90 cm beneden maaiveld en een weerstand van 800 d. Infiltratie vanuit de sloten is mogelijk met dezelfde weerstand.

Een kenmerk van de hydrologische gebieds-situatie dat in de jaren 60 - 80 van de vorige eeuw veel werd gebruikt was de overschrijdingsduur  $\tau$ . Dit is het aantal dagen per jaar dat de grondwaterstand hoger is dan een bepaalde waarde. In de hier gepresenteerde resultaten zal deze waarde worden gebruikt voor grondwaterstanden van -10, -30, -50, -75 en -100 cm. Het aantal dagen wordt gepresenteerd als gemiddelde over de 41 beschouwde jaren. De resultaten van de simulaties staan in Tabel 3. Voor een gedetailleerde bespreking van deze resultaten kan worden verwezen naar Wesseling en Ritsema (2022). Het meest opvallend is dat de productiecijfers die met de Staringreeks worden berekend veel hoger zijn dan de uitkomsten van de individuele monsters:  $9823,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$  tegen een gemiddelde van  $6076,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$  is een verschil van 61%! Het gemiddelde aantal dagen per jaar dat de grondwaterstand hoger is dan -100 cm ( $\tau_{-100}$ ) is 271,4 voor de monsters en 205,7 voor de Staringreeks. Dat impliceert dat de grondwaterstand die wordt berekend met de monsters hoger is dan die berekend met de Staringreeks, hetgeen in overeenstemming is met de cijfers in de eerste drie rijen van de tabel. Hetzelfde geldt voor  $\tau_{-75}$ . Daarboven is het omgekeerde het geval. Dat houdt in dat de bovenste 50 cm van het profiel natter is wanneer de berekeningen met de Staringreeks worden uitgevoerd dan het gemiddelde met de individuele monsters. Dit is tevens de verklaring voor het grote verschil in actuele gewasverdamping en aardappelproductie.

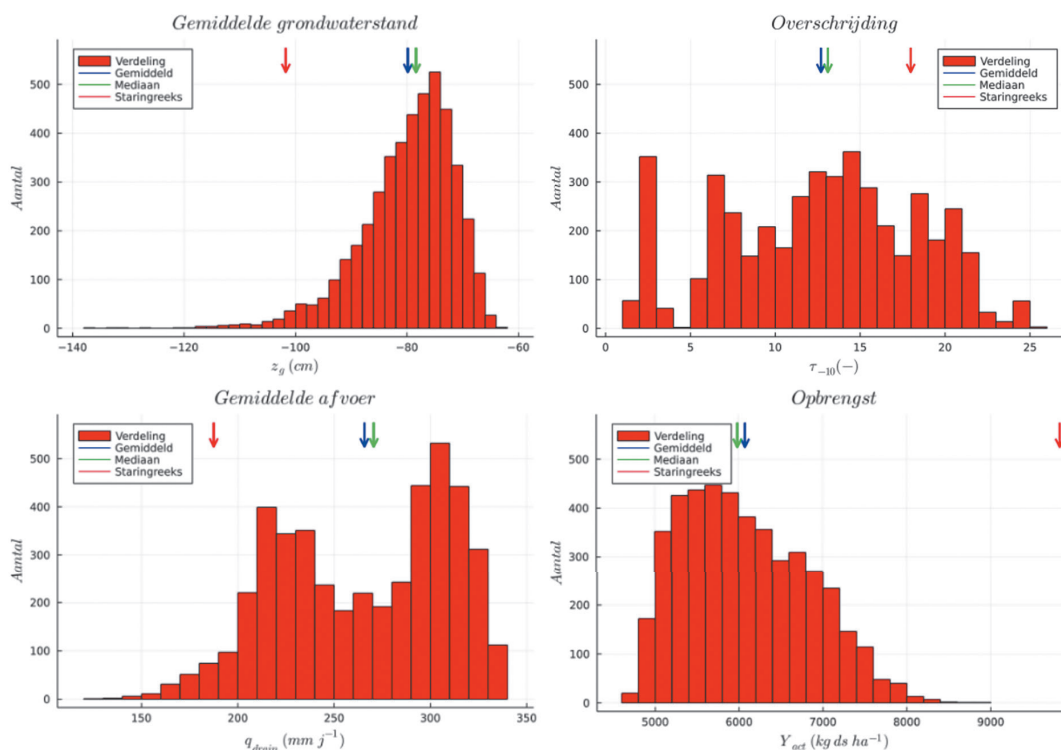


**Tabel 3** Resultaten van de simulaties van de groei van aardappels in Kattendijke gedurende de periode 1980-2020 ( $N_j = 41$ ). Aantal doorgerkende combinaties van bodemfysische eenheden ( $N_c$ ) = 4500. Het zijn gemiddelden over de 41 jaar.  $z_g^{min}$  = minimale grondwaterdiepte (cm),  $z_g^{max}$  = maximale grondwaterdiepte (cm),  $z_g^{ave}$  = gemiddelde grondwaterstand (cm),  $q_{drain}$  = hoeveelheid water naar ontwateringssysteem ( $mm\ j^{-1}$ ),  $E_p^p$  = potentiële plantverdamping ( $mm\ j^{-1}$ ),  $E_p^a$  = werkelijke plantverdamping ( $mm\ j^{-1}$ ),  $E_s^p$  = potentiële bodemverdamping ( $mm\ j^{-1}$ ),  $E_s^a$  = werkelijke bodemverdamping ( $mm\ j^{-1}$ ),  $Y_{act}$  = werkelijke drogestofopbrengst ( $kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$ ),  $Y_{act}^{min}$  = laagste werkelijke drogestofopbrengst ( $kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$ ),  $Y_{act}^{max}$  = hoogste werkelijke drogestofopbrengst ( $kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$ ),  $\tau_x$  = aantal dagen per jaar met een grondwaterstand hoger dan  $x$ . Hierbij is  $\mu$  de gemiddelde waarden en  $\sigma$  de standaardafwijking

Variabele	minimum	maximum	$\mu$	$\sigma$	Mediaan	5%	95%	Staring
<b>Grondwater en afvoer</b>								
$z_g^{min}$	-285,6	-110,9	-161,8	26,1	-159,6	-214,1	123,1	-226,5
$z_g^{max}$	1,0	2,2	1,8	0,4	2,0	1,0	2,0	1,3
$z_g^{ave}$	-136,9	-63,6	-79,9	8,4	-78,4	-95,3	-69,0	-101,8
$q_{drain}$	129,2	339,6	265,7	44,2	270,6	195,2	325,3	187,5
<b>Verdamping</b>								
$E_p^p$	251,4	322,4	283,7	12,0	283,5	262,3	306,6	340,2
$E_p^a$	131,7	249,2	171,2	19,9	168,8	142,7	206,5	281,0
$E_s^p$	411,6	471,4	445,6	11,2	445,3	426,4	463,2	397,4
$E_s^a$	204,0	269,9	237,2	18,7	233,9	212,3	266,6	211,2
<b>Aardappelproductie</b>								
$Y_{act}$	4639,0	8887,5	6076,2	749,7	5985,6	5016,1	7400,3	9823,3
$Y_{act}^{min}$	483,0	4764,0	1541,8	767,0	1281,0	648,9	2974,1	4163,0
$Y_{act}^{max}$	8652,0	11530,0	10037,7	629,7	10013,0	9078,0	11052,0	13409,0
<b>Overschrijdingsduur</b>								
$\tau_{-10}$	1,2	25,0	12,7	5,7	13,1	2,4	21,1	18,0
$\tau_{-20}$	1,2	27,9	14,6	6,7	15,0	2,8	24,9	19,2
$\tau_{-30}$	1,6	31,0	17,3	7,3	17,8	4,4	28,5	24,5
$\tau_{-40}$	6,4	36,2	24,0	5,8	24,2	14,3	32,3	42,7
$\tau_{-50}$	13,4	79,4	44,7	14,1	42,2	25,0	71,3	81,5
$\tau_{-75}$	96,0	307,5	200,7	30,3	201,6	152,0	249,6	182,2
$\tau_{-100}$	171,4	356,9	271,4	28,4	272,2	233,6	319,2	205,7

Om inzicht te krijgen in de verdeling van de berekende waarden zijn deze geplot voor de gemiddelde grondwaterstand, de gemiddelde (netto) afvoer naar de ontwateringsmiddelen, de overschrijding van de grondwaterstand van -10 cm en de aardappelproductie. Deze zijn weergegeven in Afbeelding 5. De gemiddelde grondwaterstand toont een scheve normale verdeling. Opvallend is wel dat de gemiddelde en mediane waarde niet boven de klasse liggen die het meest voorkomt. De waarde die met de Staringreeks is berekend ligt een heel stuk verder naar links in het lage deel van de curve. Bij de verdeling van  $\tau_{-10}$  is geen duidelijk patroon te herkennen. Ook hier is het grote verschil tussen de waarde die is berekend met de Staringreeks en de gemiddelde en mediane waarde heel duidelijk zichtbaar. De frequentieverdeling van de gemiddelde (netto) afvoer naar de ontwateringsmiddelen heeft een bimodale vorm. Dit kan liggen aan het feit dat er is gewerkt met een dubbel ontwateringssysteem. De

gemiddelde en mediane waarde van de afvoer liggen in het lagere stuk tussen de twee toppen, de waarde die is berekend met de Staringreeks ligt aanzienlijk verder naar links in de afbeelding. De afbeelding met de verdeling van de gewasopbrengsten toont weer een scheve normale verdeling. Zoals reeds in Tabel 3 te zien was, is de opbrengst die met de Staringreeks is berekend veel hoger dan die met de aparte monsters kon worden berekend.



**Afbeelding 5** De verdeling van de berekende grondwaterstand, overschrijdingsduur, afvoer en aardappelopbrengst voor Kattendijke ( $N_c = 4500$ )

Wat betekent dit nu in de praktijk? Stel het grondwater bevat 2 mg opgeloste stof per liter. Dan zou er per jaar en per  $m^2$  volgens de berekeningen met de Staringreeks  $187,5 \times 2 = 375$  mg van die stof naar het oppervlaktewater stromen. Als werkelijk gemeten bodemfysische parameters zouden worden gebruikt, dan kan deze hoeveelheid variëren tussen  $129,2 \times 2 = 258.4$  en  $339.6 \times 2 = 679.2$  mg stof, ofwel 31% minder of 81% meer dan berekend met de Staringreeks. Vooral op lokale schaal kan dit voor bepaalde beleidsmaatregelen een enorm verschil maken!

## Opmerkingen, aanbevelingen en conclusies

Uit de resultaten van de hier beschreven berekeningen (samen met de andere voorbeelden uit Wesseling en Ritsema (2022)) kunnen de volgende aanbevelingen en conclusies worden gedestilleerd:

- De waarden die in dit artikel worden gepresenteerd gelden alleen voor de gebruikte combinatie van bodemprofiel, meteorologische gegevens en randvoorwaarden.

- Bij de hier gepresenteerde resultaten is ervan uitgegaan dat alle andere invoerparameters hetzelfde blijven. Het gaat hier alleen om de invloed van het clusteren van bodemfysische eigenschappen (Staringreeks) en profielen (BOFEK). In een eerdere studie is door Wesseling e.a. (1998) gevonden dat de meteorologische invoer en andere randvoorwaarden een grotere invloed op de resultaten van Swap-berekeningen hebben dan de bodemfysische parameters. In die studie is echter alleen gekeken naar de individuele MVG-parameters, niet naar mogelijke combinaties. De resultaten van de huidige studie mogen dan ook niet worden vergeleken met die welke zijn gepresenteerd door Wesseling e.a. (1998).
- In het kader van de Basisregistratie Ondergrond (BRO) is het aantal bodemonsters waarvan de bodemfysische relaties bekend is de afgelopen jaren snel toegenomen. Om een nog grotere landelijke dekking en betrouwbaarheid te krijgen moeten op korte termijn 1) betere en snellere meetmethodes (voor in het veld en in het laboratorium) worden ontwikkeld en 2) meer monsters worden doorgemeten om een grotere betrouwbaarheid te krijgen.
- Een deel van de combinaties van monsters die in dit onderzoek zijn gebruikt zal in werkelijkheid niet voorkomen (voor zover op dit ogenblik bekend).
- Een mogelijke oorzaak van de grote spreiding van de kritieke berging en z-waarde is de enorme spreiding in het "droge" deel van de  $K(h)$ -relatie. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het beperkte meetbereik van de tensiometers (tot max. -800 cm drukhoogte) bij de toegepaste verdampingsmethode. Hierdoor wordt het "droge" deel niet gemeten maar a.h.w. geëxtrapolerd uit de gemeten gegevens. Het verdient daarom aanbeveling om 1) het meetbereik uit te breiden door polymeertensiometers te gebruiken (met een bereik tot -16000 cm) in plaats van de gebruikelijke keramische tensiometers en 2) te onderzoeken of er methodes zijn die de relaties beter beschrijven.
- De BOFEK-profielen mogen niet worden gebruikt op punt- of perceel schaal zonder dat er een betrouwbaarheidsinterval van de resultaten wordt meegegeven. Dit zal voor sommige gebruikers moeilijkheden opleveren maar is essentieel voor de geloofwaardigheid van de resultaten. Indien aanwezig moet bij berekeningen op punt- en perceel schaal met gemeten  $h(\theta)$  en  $K(h)$ -relaties worden gewerkt in plaats van met de bouwstenen van de Staringreeks.
- Als wordt gerekend met de bouwstenen van de Staringreeks moet altijd worden nagegaan hoe groot de variatie is die wordt veroorzaakt door het midden van de curves. Pas als deze variatie aantoonbaar klein is mag er direct met de Staringreeks-bouwstenen worden gerekend.
- Hoewel ook Heinen e.a. (2020) en Wösten e.a. (2001) de grote variatie van de karakteristieken van de monsters beschrijven die bijdragen aan een bouwsteen van de Staringreeks, wordt hier bij de uitgevoerde landelijke studies geen aandacht aan besteed, hetgeen tot grote verschillen tussen berekende en werkelijke waarden van gewasopbrengsten en stoffentransport kan leiden.
- Een groter aantal monsters per klasse zal leiden tot een grotere nauwkeurigheid van de waarden van de bouwsteen van de Staringreeks. Echter, ook de spreiding van de individuele waardes kan toenemen.

Als eindconclusie kan worden gesteld dat het gebruik van de bodemkundige classificatie voor bodemfysische eigenschappen grote onzekerheden met zich meebrengt en dringend moet worden herzien.

## Software beschikbaarheid

Het hier gebruikte numerieke model Swap kan gratis worden gedownload bij de WUR (<http://swap.wur.nl>). De gebruikte software voor de analyses is geschreven in Julia en kan bij de eerste auteur worden verkregen.

## Dankwoord

De auteurs bedanken Dr. Jos van Dam voor zijn constructieve opmerkingen na het doorlezen van het achterliggende rapport en Dr. Marius Heinen voor zijn suggesties voor verbeteringen aan de eerste versie van dit artikel.

## Literatuur

- Bonten, L.** (2009) Uitspoeling van zware metalen uit landbouwbodems; toetsing van modelberekeningen middels veldmetingen; Wageningen, Alterra, Rapport 1863, 66 pag.
- CBS (2022)** Akkerbouwgewassen; voorlopige en definitieve oogstraming. <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/84296NED?q=aardappel>
- De Bakker, H. en J. Schelling** (1966) Systeem van bodemklassificatie voor Nederland; de hogere niveaus. PUDOC, Wageningen, 217 pag.
- Heinen, M., G. Bakker en H. Wösten** (2020) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staring-reeks, 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.
- Kroes, J., J. van Dam, R. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R. Hendriks, H. Mulder, I. Supit en P. van Walsum** (2017) Swap version 4; theory description and user manual; Wageningen Environmental Research, Report 2780.
- Kruijne, R., A. Tiktak, D. van Kraalingen, J. Boesten en A. van der Linden** (2004) Pesticide leaching to the groundwater in drinking water abstraction areas; analysis with the geoparl model; Wageningen, Alterra, Report 1041. 66 pag.
- Massop, H. Th. L., J. Clement en C. Schuiling** (2014) Plassen op het land; een landsdekkende kaart van potentiële risicolocaties voor oppervlakkige afspoeling; Wageningen, Alterra, Rapport 2546, 86 pag.
- Van Dam, J., P. Groenendijk, R. Hendriks en J. Kroes** (2008) Advances of modelling water flow in variably saturated soils with Swap; In: *Vadose Zone Journal*, vol 7 nr 2, pag 640–653.
- Van der Salm, C., T. Hoogland en D. Walvoort** (2008) Verkenning van de mogelijkheden voor de ontwikkeling van een metamodel voor de uitspoeling van stikstof uit landbouwgronden, Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur en Milieu, WOt-werkdocument 110, 72 pag.
- 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.

- Van Wijk, A. L. M., R. A. Feddes, J. G. Wesseling en J. Buitendijk** (1988) Effecten van grondsoort en ontwatering op de opbrengst van akkerbouwgewassen; Wageningen, I.C.W. Rapport 31 (nieuwe serie).
- Wesseling, J. G., J. G. Kroes en K. Metselaar** (1988) Global sensitivity and analysis of the soil-water-atmosphere-plant (Swap) model; Wageningen, Staring Centrum, Report 160.
- Wesseling, J. G.** (2009), Soil physical data and modeling soil moisture flow; Wageningen Unversiteit, Ph.D. thesis, 178 pag.
- 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 Rapport 5, 56 pag, <http://www.wesw.nl/reports/05/index.php>
- 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.

### **Summary Uncertainties caused by the application of a classification system from soil science in soil physics and agro-hydrology**

*To perform calculations with models concerning the flow of water in the unsaturated zone of the soil, knowledge is required about the soil physical properties (soil moisture retention curve and hydraulic conductivity) of that soil. In the Netherlands researchers generally use the Staring-series for this purpose. The series contains the soil-physical parameters of 36 different soil types, based on the soil map 1:50000. These parameters were applied as well when the Soil Physical Units Map (BOFEK) was developed. But how reliable is such a classification system? We tried to answer that question by performing some computations, both for steady-state and transient situations. This paper presents a few of the obtained results. The main conclusions are i) it is not allowed to apply the BOFEK—profiles at a local or regional scale without presenting the confidence interval; ii) if the units of the Staringseries are applied, one should always check the magnitude of the variation caused by averaging the curve obtained from the separate samples: only if it is shown this variation is negligible small, the units of the Staringseries may be applied directly; iii) to obtain a larger coverage and reliability of the soil physical properties, both better and faster (laboratory and field) measuring methods should be developed and more soil*

*samples should be measured. Our final conclusion is that the use of the present classification system implies large risks of inaccuracy and urgently requires a review.*

## **Auteurs**

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

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

PROF.DR. C.J. (COEN) RITSEMA

Leerstoelhouder bij Wageningen Universiteit & Research, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer ([coen.ritsema@wur.nl](mailto:coen.ritsema@wur.nl))