



---

# BOFEK2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland

Update bodemfysische eenhedenkaart

M. Heinen, F. Brouwer, K. Teuling, D. Walvoort



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---





---

# BOFEK2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland

Update bodemfysische eenhedenkaart

M. Heinen, F. Brouwer, K. Teuling, D. Walvoort

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van en gefinancierd door het samenwerkingsverband NHI verenigd in de Stuurgroep Regionale en Landelijke Modelinstrumentaria. Begeleiding vond plaats door de Werkgroep Onverzadigde Zone van het Programmteam NHI.

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, februari 2021

---

Gereviewd door:

Dr. J.C. van Dam, universitair hoofddocent Bodemfysica en Landbeheer, Wageningen University

Dr. J.H.M. Wösten, senior onderzoeker, team Water en Voedsel, Wageningen Environmental Research

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3056

ISSN 1566-7197

---

Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling, D. Walvoort, 2021. *BOFEK2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland; Update bodemfysische eenhedenkaart*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3056. 84 blz.; 5 fig.; 9 tab.; 28 ref.

In 2012 is de eerste bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK2012) geïntroduceerd. Op basis van de Nederlandse bodemkaart en de Staringreeks werden in totaal 72 unieke eenheden onderscheiden. Omdat de bodemkaart en de Staringreeks in 2020 zijn geüpdatet, ligt het voor de hand ook een update van BOFEK te maken: BOFEK2020. In totaal zijn 79 nieuwe BOFEK2020-eenheden vastgesteld.

In 2012 the soil physical units map of the Netherlands (BOFEK2012) was published. It was based on the soil map of the Netherlands and the database of soil physical properties, i.e., water retention and hydraulic conductivity, of 18 top soils and 18 subsoils of the Netherlands (Staring series). Since both the soil map and the Staring series were updated in 2020, there was a need to update the BOFEK as well. In total 79 BOFEK2020 units have been defined.

Trefwoorden: bodemfysische karakteristieken, bodemfysische-eenhedenkaart, bodemkaart, doorlatendheidskarakteristiek, Staringreeks, waterretentiekarakteristiek

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/541544> of op [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2021 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research). Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3056 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

---

# Inhoud

	<b>Verantwoording</b>	<b>5</b>
	<b>Woord vooraf</b>	<b>7</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
	1.1 Doel	12
<b>2</b>	<b>Werkwijze</b>	<b>13</b>
	2.1 Bodemkaart en bodemprofielen	13
	2.2 Fysische kengetallen	13
	2.2.1 KD- en C-waarde	16
	2.2.2 Opneembaar water	17
	2.2.3 Kritieke z-afstand en bijbehorend verzadigingstekort	17
	2.2.4 Kritieke flux	18
	2.2.5 Integraal waterretentiekarakteristiek	18
	2.2.6 Integraal doorlatendheidskarakteristiek	18
	2.2.7 S-index van Dexter (2004) en de P-index van Haverkamp et al. (2005)	19
	2.2.8 Bodemprofielopbouw	20
	2.2.9 Tijdstip verdampingsreductie en tijdstip stationaire infiltratie	20
	2.3 Vaststellen minimumset kengetallen	20
	2.4 Clustering	24
	2.5 Scripts	25
<b>3</b>	<b>Resultaat en discussie</b>	<b>26</b>
	3.1 Aantal clusters	26
	3.2 Evaluatie van de clustering	27
	3.3 Clusterindeling per hoofdgrondsoort	29
	3.3.1 Veengronden	29
	3.3.2 Moerige gronden	30
	3.3.3 Zandgronden	30
	3.3.4 Klei- en zavelgronden	31
	3.3.5 Leemgronden	31
	3.4 Overall BOFEK2020-tabel en BOFEK2020-kaart	32
	3.5 Verschil BOFEK2012 en BOFEK2020	33
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>34</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>36</b>
	<b>Bijlage 1 Berekening <math>{}_2F_1</math>-functie</b>	<b>38</b>
	<b>Bijlage 2 Tijdstippen verdampingsreductie en stationaire infiltratie</b>	<b>40</b>
	<b>Bijlage 3 R-scripts gebruikt bij afleiding BOFEK2020</b>	<b>43</b>
	<b>Bijlage 4 Correlatiematrix per grondsoort</b>	<b>64</b>
	<b>Bijlage 5 BOFEK2020-tabel</b>	<b>67</b>
	<b>Bijlage 6 Overeenkomst dominante profielen BOFEK2012 en BOFEK2020</b>	<b>82</b>

---

---

# Verantwoording

Rapport: 3056

Projectnummer: 5200046357

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Universitair hoofddocent Bodemfysica en Landbeheer, Wageningen University

naam: Dr. J.C. van Dam

datum: 04-01-2021

functie: Senior onderzoeker, team Water en Voedsel, Wageningen Environmental Research

naam: Dr. J.H.M. Wösten

datum: 07-12-2020

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Dr. Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 04-01-2021





---

# Woord vooraf

De aanleiding voor het afleiden van BOFEK2020 is gelegen in het feit dat zowel de bodemkaart van Nederland als de Staringreeks sinds het verschijnen van BOFEK2012 is gewijzigd. Omdat BOFEK is afgeleid van de bodemkaart en de Staringreeks is het logisch dat BOFEK dan ook wordt geüpdatet. Deze wens was opgenomen in het meerjarenplan van NHI. In mei is de opdracht verleend om BOFEK2020 af te leiden. De voortgang van de werkzaamheden werd regelmatig gecommuniceerd met de NHI-werkgroep onverzadigde zone (Jac Peerboom, Joost Heijkers, Jelle van Sijl, Jurriaan Cok; in laatste stadium ook Rob Ruijtenberg) die optrad als gedelegeerd opdrachtgever.

De start van de werkzaamheden bestond uit een interne workshop (WENR/WU) waarbij de aanpak en voorgestelde nieuwe kengetallen werden gepresenteerd en ter discussie werden gesteld. Hierbij waren aanwezig: Henk Wösten, Jos van Dam (WU), Piet Groenendijk, Mirjam Hack-ten Broeke, Ab Veldhuizen, Jan Wesseling (WU), Dennis Walvoort, Martin Mulder, Gerben Bakker, Fokke Brouwer, Kees Teuling en Marius Heinen. Ook is deze groep halverwege ingelicht over de voortgang.



---

# Samenvatting

Voor simulatiemodellen voor de waterbalans in de onverzadigde-verzadigde zone in Nederland is kennis nodig over de waterretentie- en doorlatendheidseigenschappen van de onverzadigde zone. Voorbeelden van studies met dergelijke simulatiemodellen zijn Waterwijzer Landbouw, het Landelijk Hydrologisch Model (NHI-LHM) en diverse regionale modellen van waterschappen. Hierbij worden landelijke of regionale berekeningen uitgevoerd om bijvoorbeeld droogteschades, verdamping en grondwateraanvullingen te kwantificeren en ook om waterkwaliteit te modelleren (denk aan evaluatie mestbeleid of verspreiding bestrijdingsmiddelen). Op nationale en regionale schaal is er een grote variatie aan bodems zoals beschreven in de landelijke bodemkaart (1:50 000). In principe kan voor elk bodemprofiel een simulatie worden uitgevoerd. Om het aantal berekeningen te beperken, zijn er in het verleden landelijke schematisaties van de bodemfysische kenmerken opgesteld. Tot 2012 werd de PAWN-schematisatie (24 eenheden) gebruikt. In 2012 is de eerste bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK2012) geïntroduceerd. Hierin werden 72 unieke bodemfysische eenheden onderscheiden, welke deels tot stand waren gekomen via een clustering van fysische eigenschappen en deels door groepering via bodemkundige verwantschap. De basis voor de BOFEK2012 was de Nederlandse bodemkaart (2006; 1:50 000) en de Staringreeks (versie 2001). De Staringreeks bevat gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken voor 18 bovengronden en 18 ondergronden. Elk bodemprofiel van de Nederlandse bodemkaart is beschreven in lagen waaraan deze bouwstenen zijn gekoppeld. In de afgelopen jaren is vastgesteld dat grote arealen veen- en moerige gronden zijn veranderd als gevolg van mineralisatie van het organische materiaal. Zo zijn grote oppervlaktes moerige gronden niet meer als moerig aangemerkt, maar als minerale gronden. Verder zijn in Flevoland, Noord- en Zuid-Holland zavel- en kleigronden van karakter veranderd als gevolg van verdere rijping. De Staringreeks bevat gemiddelde karakteristieken die zijn berekend uit karakteristieken van individuele monsters. Sinds 2012 worden er in het kader van de Basisregistratie Ondergrond jaarlijkse nieuwe monsters geanalyseerd. Dat betekent dat na verloop van tijd de Staringreeks opnieuw afgeleid kan worden met nieuwe, meer recente brongegevens, waardoor de gemiddeld karakteristieken zullen wijzigen. Omdat in 2020 zowel de bodemkaart van Nederland als de Staringreeks is vernieuwd, is het ook nodig om de BOFEK aan te passen: BOFEK2020.

De BOFEK-schematisatie berust op de standaardprofielen van de Nederlandse bodemkaart. Deze profielen zijn ook beschreven in termen van opbouw in Staringreeks-bouwstenen waarvan we de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken kennen. Op basis van die karakteristieken zijn voor alle standaardprofielen eenvoudige fysische kengetallen berekend. Hierbij is in eerste instantie een groot aantal fysische kengetallen gebruikt, waarna een selectie is gemaakt welke het meest onderscheidend zijn. In totaal zijn acht fysische kengetallen geselecteerd. Hiermee zijn de standaardprofielen geclusterd, waarbij profielen in hetzelfde cluster vergelijkbare fysische eigenschappen bezitten. Hierbij is onderscheid gemaakt in vijf hoofdgroepen van bodems in Nederland: veengronden, moerige gronden, zandgronden, klei- en zavelgronden en leemgronden.

Clustering betekent dat bodemprofielen in groepen verdeeld worden, waarbij de profielen binnen een groep een grote, maar niet per definitie identieke, gelijkenis vertonen. In deze studie is ervoor gekozen om het aantal clusters vast te stellen op basis van een gewenst percentage verklaarde variantie. Voor een percentage verklaarde variantie van 95% zijn in totaal 79 BOFEK2020-eenheden vastgesteld. Deze indeling, die primair is uitgevoerd op basis van fysische eigenschappen, is bodemkundig plausibel. 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. Omdat de Bodemkaart van Nederland ook opgebouwd is in termen van de standaardprofielen, is het dus mogelijk om een landelijk beeld van BOFEK2020 (clusterindeling; resultaten van simulaties) te verkrijgen.

---

De BOFEK2020-indeling is anders dan de BOFEK2012-indeling omdat: a) bij de afleiding van BOFEK2020 zijn extra bodemfysische kengetallen beschouwd ten opzichte van BOFEK2012, en na evaluatie van de fysische clusters was er geen reden om bodemprofielen van cluster te wisselen (zoals in BOFEK2012 in een aantal gevallen wel is gebeurd), b) de fysische eigenschappen zijn veranderd (Staringreeks) en c) door de verandering van de bodemkaart is het areaal van sommige profielen veranderd, zodat in enkele gevallen een profiel dat in 2012 net geen clusterhoofd werd dat nu wel is geworden of vice versa.

Nu BOFEK2020 tot stand is gekomen, rijst natuurlijk de vraag wat voor veranderingen dit tot gevolg heeft voor modelsimulaties waarbij voorheen BOFEK2012 werd gebruikt en straks BOFEK2020 zal worden gebruikt. Een dergelijke vergelijking was niet voorzien in de onderzoeksopdracht. Het advies is om een dergelijke vergelijkingsstudie op korte termijn uit te voeren. De belangrijkste verschillen die uit de modelberekeningen naar voren zullen komen, zijn voor het grootste deel te wijten aan de verandering in de bodemkaart en in de Staringreeks.

De hierboven genoemde veranderingen in de veengronden en moerige gronden, maar ook de verdere rijping van sommige zavel- en kleigronden en de verdere actualisatie van de bodemkaart en de bodemgegevens, zullen de komende jaren blijven doorgaan. Dat betekent dat over een aantal jaar de bodemkaart weer een update zal krijgen. Omdat er jaarlijks in het kader van de BRO nieuwe bodemfysische brongegevens worden verzameld, zal over een aantal jaar de Staringreeks een update ondergaan. Het is dus sterk aan te bevelen om bij een update van zowel de bodemkaart als de Staringreeks ook de BOFEK hierbij opnieuw af te leiden.

Op de webpagina <https://www.wur.nl/nl/show/Bodemfysische-Eenhedenkaart-BOFEK2020.htm> zijn de openbare bestanden van BOFEK2020 te downloaden.

---

# 1 Inleiding

In het investeringsplan 2020-2021 van NHI zijn diverse onderwerpen benoemd, waaronder een update van bodemfysische invoergegevens die nodig zijn voor modellering van onverzadigde-verzadigde bovengrond. Meer specifiek werd hier bedoeld op een update van de bestaande BOFEK2012-schematisatie (Wösten et al., 2012) en de bijbehorende metaSWAP-invoertabellen zoals die in NHI worden gebruikt (Van Walsum & Veldhuizen, 2011). De BOFEK-schematisatie wordt ook elders in agrohydrologisch onderzoek gebruikt zoals in SWAP in Waterwijzer Landbouw (Kroes et al., 2017; Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2019). De behoefte voor een update van BOFEK is het resultaat van het feit dat de basisinformatie waaruit BOFEK destijds was afgeleid, recentelijk is vernieuwd. Dat betreft de vernieuwde 1:50 000 Bodemkaart van Nederland en de vernieuwde Staringreeks (Heinen et al., 2020).

## *Waarom zijn bodemfysische gegevens belangrijk?*

Bodemfysische karakteristieken zijn cruciale inputgegevens voor de onverzadigde zone in hydrologische simulatiemodellen. Die modellen worden gebruikt om effecten van hydrologie op landbouwkundige opbrengst te berekenen of om door te rekenen wat de effecten zijn van maatregelen om grond- en oppervlaktewaterkwaliteit te verbeteren. Wanneer modelresultaten worden gebruikt voor belangrijke beslissingen in relatie tot mestbeleid, KRW, peilbesluiten of andere hydrologische maatregelen, dan is het van groot belang dat de invoergegevens van de juiste kwaliteit zijn. We noemen enkele recente voorbeelden waaruit is gebleken dat verbetering hard nodig is.

In verschillende pilotstudies en regionale toepassingen met de Waterwijzer Landbouw-tools zijn gebruikers en het ontwikkelteam in 2018 en 2019 gestuit op onverwachte resultaten voor met name de berekende droogteschade. Het betreft zowel zandgronden waar de droogteschade voor sommige bodemtypes aantoonbaar wordt onderschat als enkele zware kleigronden waar droogteschade voor de landbouw wordt overschat. De achterliggende oorzaak zijn de bodemfysische invoergegevens voor het modelinstrumentarium. Waterwijzer Landbouw is gebaseerd op o.a. het model SWAP, waarvan ook MetaSWAP is afgeleid.

Ook binnen NHI/LHM waren al eerder problemen geconstateerd voor situaties met zware klei in de ondiepe ondergrond. Aan de hand van beschikbare metingen van verdamping kon bijvoorbeeld worden vastgesteld dat het model niet in staat was om de verdamping in juli 2006 adequaat te berekenen. De oorzaak hiervoor werd gezocht in capillaire nalevering als beperkende factor en deze is direct afhankelijk van de bodemfysische kenmerken van de bodem.

Andere voorbeelden waarbij bodemfysische gegevens cruciaal zijn: berekeningen in het kader van de evaluatie mestbeleid (SWAP gekoppeld aan ANIMO), berekeningen met Waterwijzer Natuur (WWN), landsdekkende berekeningen met NHI/LHM voor waterkwaliteit en onderzoek naar bestrijdingsmiddelen (PEARL, waarvan SWAP onderdeel uitmaakt). Stoffentransport wordt voor een groot deel bepaald door de waterfluxen. Dat betekent dat de waterfluxen door de bodem correct berekend moeten worden en dat kan alleen indien de bodemfysische eigenschappen juist zijn geparаметriseerd. Een juiste inschatting van de stoffluxen betekent ook dat juiste verblijftijden in de bodem worden gesimuleerd, evenals verdamping en grondwateraanvulling en dat dus ook correcte voorspellingen gedaan kunnen worden over onder meer stofafbraakprocessen (voor nitraat bijvoorbeeld denitrificatie). Met name de grondwateraanvulling heeft direct effect op de berekende concentraties in het bovenste grondwater.

## *Over welke gegevens gaat het?*

Of en wanneer een gewas droogte ervaart, wordt vooral bepaald door de beschikbaarheid van water in de wortelzone. Die beschikbaarheid wordt onder meer bepaald door de dikte van de wortelzone, het watervasthoudend vermogen en het doorlaatvermogen van de bodem. Deze bodemfysische eigenschappen (de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken) zijn in het verleden met inmiddels verouderde data en methodes bepaald. In het kader van de Basisregistratie Ondergrond

---

(BRO) zijn de afgelopen jaren bodemfysische karakteristieken bepaald van nieuwe individuele grondmonsters. Voor landelijke of regionale toepassingen is het (door de summiere beschikbaarheid van dergelijke data) niet zinvol om met dergelijke lokale gegevens te rekenen. Daarom gebruiken we gemiddelde eigenschappen voor overeenkomstige bodemlagen: de Staringreeks (Wösten et al., 1987; 1994; 2001; Wösten, 1987; Heinen et al., 2020). In die Staringreeks worden 18 unieke bovengronden en 18 unieke ondergronden onderscheiden. Op basis van de in het kader van BRO verkregen nieuwe informatie is recentelijk een nieuwe versie van de Staringreeks opgesteld (Heinen et al., 2020) die bij eerste testen in de Waterwijzer Landbouw veel plausibeler resultaten genereert voor veelvoorkomende zandgronden. Zodoende is het plan ontstaan om deze gegevens zo snel mogelijk te ontsluiten voor alle hydrologische modellen die gebruikmaken van deze gegevens, waaronder ook het NHI.

*Is de nieuwe Staringreeks de oplossing voor alle geconstateerde problemen?*

Ook voor kleigronden zal met de verbeterde Staringreeks worden gewerkt, maar voor kleigronden is de modelmatige beschrijving van de bodemkarakteristieken met de huidige kennis en inzichten mogelijk niet adequaat. Echter, zolang nog niet is vastgesteld hoe de bodemfysische eigenschappen in dergelijke gevallen moeten worden gekwantificeerd, wordt de Staringreeks nog steeds gebruikt.

*Wat is er vernieuwd aan de bodemkaart?*

In de afgelopen jaren is vastgesteld dat grote arealen veen- en moerige gronden zijn veranderd als gevolg van mineralisatie van het organische materiaal. Zo zijn grote oppervlaktes moerige gronden niet meer als moerig aangemerkt, maar als minerale gronden. Verder zijn in Flevoland, Noord- en Zuid-Holland zavel- kleigronden van karakter veranderd als gevolg van verdere rijping.

## 1.1 Doel

Het doel van onderhavige studie is een update te maken van de bodemfysische eenhedenkaart (database) van Nederland (BOFEK2020) en nieuwe metaSWAP-invoertabellen. Hiertoe worden bodemprofielen met vergelijkbare bodemfysische (of hydrofysische) eigenschappen geclusterd. Resultaten van modelberekeningen voor de representant van zo'n cluster kunnen dan ook toegekend worden aan de overige bodemprofielen in dat cluster. Onderdeel van het onderzoek zal ook zijn een kritische beschouwing van de gebruikte fysische kengetallen bij de afleiding van BOFEK2012 en het nagaan of andere kengetallen aanvullend of beter zijn.



---

## 2 Werkwijze

De BOFEK-schematisatie berust op de standaardprofielen van de Nederlandse bodemkaart (zie paragraaf 2.1). Deze profielen zijn ook beschreven in termen van opbouw in Staringreeks-bouwstenen waarvoor we de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken kennen (Heinen et al., 2020). Op basis van die karakteristieken zijn voor alle standaardprofielen eenvoudige fysische kengetallen berekend, zoals beschreven in paragraaf 2.2. Ten slotte wordt aan de hand van die kengetallen gekeken welke het meest onderscheidend zijn (paragraaf 2.3) en welke profielen samen geclusterd kunnen worden tot de zogenaamde BOFEK-eenheden (paragraaf 0).

### 2.1 Bodemkaart en bodemprofielen

De afleiding van BOFEK2012 was gebaseerd op 315 standaardbodemprofielen waarvoor een volledige profielbeschrijving beschikbaar is (De Vries, 1999). Sommige profielen komen voor onder meerdere vormen van landgebruik (akkerbouw, grasland, bos, natuur) of hebben een speciale regionale ligging (Flevoland, kustgebied, Oost-Nederland). Voor veelvoorkomende (areaal) profielen zijn deze derhalve opgesplitst naar type landgebruik, waardoor in totaal 370 profielen beschikbaar waren. In principe worden bij de huidige afleiding deze 370 profielen beschouwd. Echter, omdat voor twee profielen de profieleigenschappen (zowel profielopbouw als fysische en chemische eigenschappen per bodemlaag) niet verschillen voor landgebruik, zijn deze duplicaten buiten beschouwing gelaten, zodat in totaal 368 bodemprofielen zijn beschouwd. De profielen hebben ieder een uniek ID-nummer, overeenkomend met bodemnummers van De Vries (1999). In geval van gelijke bodemnummers maar verschillend landgebruik is hieraan een driecijferige prefix-code toegevoegd: 901, 902, 903, 904. Hiermee is de koppeling met de bodemkaart gegarandeerd. De bodemkaart van Nederland kan worden gedownload via BRO<sup>1</sup> of PDOK<sup>2</sup> en uitleg over algemene begrippen, indelingen en de legenda staat in Steur en Heijink (1991). Bij BOFEK2012 kwam profiel Zn21 drie keer voor: bij BOFEK eenheid 302 met code 10180 (gras, bos) en bij 324 met code 10186 (bos in kustgebied). Deze zijn nu veranderd in de basis-code 10186 en voor de eerste twee profielen is dat 90110186 (gras) en 90210186 (bos) geworden.

In het basisdatabestand dat bij de afleiding van BOFEK2012 is gebruikt, zijn twee inconsistenties ontdekt: a) bodemprofiel 9020 is bij de onderliggende berekeningen toegekend aan zavel-/kleigronden, maar later toebedeeld aan de hoofdgroep leemgronden en b) voor profiel 5040 geldt het omgekeerde. We denken dat de clusterindeling na deze verschuiving niet is herhaald. Dit verklaart waarschijnlijk waarom in de tabel voor leemgronden bij BOFEK2012 het cluster groepsnummer 3 ontbreekt.

### 2.2 Fysische kengetallen

Het gedrag van water in de onverzadigde-verzadigde bovengrond wordt beschreven door de Richards-Darcy-vergelijking:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_r \quad (1)$$

Alle symbolen gebruikt in dit rapport staan toegelicht in Tabel 1. Deze stromingsvergelijking kan alleen opgelost worden indien de onderlinge relaties tussen de energietoestand van het water (waterpotentiaal of drukhoogte;  $h$ , cm), het volumetrisch watergehalte ( $\theta$ , cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) en de

---

<sup>1</sup> <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/bodemkaart-sgm/>

<sup>2</sup> <https://www.pdok.nl/-/de-bodemkaart-van-nederland-beschikbaar-bij-pdok>

doorlatendheid ( $K$ ,  $\text{cm d}^{-1}$ ) bekend zijn. Deze relaties staan bekend als de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek, respectievelijk,  $\theta(h)$  en  $K(h)$  of  $K(\theta)$ . Voor 18 bovengronden en 18 ondergronden zijn deze in Nederland beschreven door het Mualem - Van Genuchten (MvG) model. De waterretentiekarakteristiek is gegeven als (Van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

De waterdoorlatendheidskarakteristiek volgens Mualem (1976; zie ook Van Genuchten, 1980) onder de voorwaarde dat  $m = 1-1/n$  is gegeven als:

$$K(h) = K_s \frac{\left( (1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1} \right)^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{m(\lambda+2)}} \quad (3)$$

De doorlatendheid kan ook geschreven worden als functie van het watergehalte of verzadigingsgraad  $S$  volgens

$$K(S) = K_s S^\lambda \left( 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (4)$$

Op deze manier zijn de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken geformuleerd door een set van zes parameters: ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\lambda$ ,  $K_s$ ) (NB:  $m = 1-1/n$ ). Voor de 18 bovengronden en 18 ondergronden in Nederland zijn deze beschikbaar in de Staringreeks (Heinen et al., 2020).

Bij de numerieke oplossing van Eq. (1) is ook de differentiële vochtcapaciteit  $C(h)$  of  $C(\theta)$  nodig en deze is gedefinieerd als de afgeleide van de waterretentiekarakteristiek:  $C = d\theta/dh$ :

$$C(h) = \alpha m n (\theta_s + \theta_r) |\alpha h|^{n-1} (1 + |\alpha h|^n)^{-1-m} \quad (5)$$

of

$$C(S) = \alpha \frac{m}{1-m} (\theta_s + \theta_r) S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m \quad (6)$$

Bodemprofielen in Nederland zijn opgebouwd uit lagen (horizonten) waaraan een van de 18 boven- of 18 ondergronden is toegekend. Hiermee is het dus mogelijk om voor een bodemprofiel het gedrag van water met de Richards-Darcy-vergelijking te simuleren. Het aantal combinaties van bodem-gewas-grondwaterstand-klimaat is enorm groot en het aantal doelvariabelen (bijv. opbrengst, uitspoeling, droogtestress, zuurstofstress) waarin men geïnteresseerd is, zal per studie verschillen. Daarom bestaat er behoefte om het gedrag van deze profielen op een wat eenvoudigere manier fysisch te karakteriseren. Hiertoe is in BOFEK2012 een aantal fysische kengetallen gebruikt: de weerstand van het profiel voor verticale verzadigde stroming, de KD-waarde voor horizontale stroming, het makkelijk en moeilijk opneembare water uit de wortelzone (idem voor de ondergrond) en de kritieke stijghoogte met bijbehorend verzadigingstekort.

Ook bij het afleiden van BOFEK2020 zullen deze kengetallen gebruikt worden. Er is echter voor gekozen om enkele aanvullende fysische kengetallen bij aanvang toe te voegen om na te gaan of andere kengetallen aanvullend of misschien zelfs 'beter' zijn. In de volgende subparagrafen worden de gebruikte kengetallen kort beschreven, waarbij de gebruikte formuleringen zijn vermeld in Tabel 2. In alle gevallen zijn ze te berekenen op basis van de parameters van het MvG-model. In de laatste twee subparagrafen worden twee aanvullende 'kengetallen' beschouwd, die alleen zijn te verkrijgen via simulaties met numerieke modellen zoals SWAP.

**Tabel 1** Toelichting symbolen zoals gebruikt in de tekst en Tabel 2 (MvG = Mualem-Van Genuchten).

Symbool	Betekenis	Eenheid
$i$	Teller voor laagnummer	dimensieloos
$N$	Totaal aantal bodemlagen bodemprofiel	dimensieloos
$M$	Laagnummer waarin de diepte $z = 30$ cm zich bevindt	dimensieloos
$\Delta z$	Laagdikte. De som van alle laagdiktes is gelijk aan de profiel diepte (120 cm). Bij sommatie tot of vanaf $i = M$ wordt rekening gehouden met positie $z = 30$ cm.	cm
$z$	Diepte in bodemprofiel	cm
BS	Bouwsteen volgnummer in de Staringreeks (Heinen et al., 2020). Bovengronden zijn genummerd 1 t/m 18, en de ondergronden zijn genummerd 19 t/m 36.	dimensieloos
$h$	Drukhoogte	cm
$\theta$	Volumetrisch watergehalte	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$\theta_r$	Residueel volumetrisch watergehalte; parameter in MvG-vergelijkingen	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$\theta_s$	Volumetrisch watergehalte bij verzadiging; parameter in MvG-vergelijkingen	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$\theta_{-100}, \theta_{-400}, \theta_{-16000},$	$\theta(h = -100 \text{ cm}), \theta(h = -400 \text{ cm}), \theta(h = -16000 \text{ cm})$	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$n$	Vormparameter in MvG-vergelijkingen	dimensieloos
$m$	Vormparameter in MvG-vergelijkingen: $m = 1 - 1/n$	dimensieloos
$\alpha$	Vormparameter in MvG-vergelijkingen	cm <sup>-1</sup>
$\lambda$	Vormparameter in MvG-vergelijkingen	dimensieloos
$\phi$	Matric flux potential	cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>
$S_r$	Putterm in Richards-Darcy vergelijking (bijv. wortelopname)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>
$S$	Verzadingsgraad: $S = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$	
$K_s$	Doorlatendheid bij verzadiging; parameter in MvG-vergelijkingen	cm d <sup>-1</sup>
$h(\theta)$ of $\theta(h)$	Waterretentiekarakteristiek (MvG)	cm; cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$K(\theta)$ of $K(h)$	Waterdoorlatendheidskarakteristiek (MvG)	cm d <sup>-1</sup>
$C(\theta)$ of $C(h)$	Differentiële vochtcapaciteit: $C = d\theta/dh$ (afgeleide van de waterretentiekarakteristiek; MvG)	cm <sup>-1</sup>
$D(\theta)$	Diffusiviteit: $D = K/C$	cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>

**Tabel 2** Uitdrukkingen voor de lijst met fysische kengetallen zoals gebruikt bij aanvang van de afleiding van BOFEK2020. Later wordt aangegeven welke kengetallen daadwerkelijk zijn meegenomen. Toelichting symbolen staat in Tabel 1.

Symbol	Vergelijking	
KD	$KD = \sum_{i=1}^N K_{s,i} \Delta z_i$	(7)
C	$c = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i}{K_{s,i}}$	(8)
Wtrz	$Wtrz = W1rz + W2rz$	(9)
W1rz	$W1rz = \sum_{i=1}^M (\theta_{-100,i} - \theta_{-400,i}) \Delta z_i$	(10)
W2rz	$W2rz = \sum_{i=1}^M (\theta_{-400,i} - \theta_{-16000,i}) \Delta z_i$	(11)
Wtsub	$Wtsub = W1sub + W2sub$	(12)
W1sub	$W1sub = \sum_{i=M}^N (\theta_{-100,i} - \theta_{-400,i}) \Delta z_i$	(13)
W2sub	$W2sub = \sum_{i=M}^N (\theta_{-400,i} - \theta_{-16000,i}) \Delta z_i$	(14)
Zcrit1, Zcrit2	$z(h) = - \int_0^{-16000} \frac{K(h)}{K(h) + q} dh$	(15)
Vcrit1, Vcrit2	$Vcrit = \int_0^{Z_{crit}} (\theta_s - \theta(h(z))) dz + \int_{Z_{crit}}^{Z_{crit} + Z_r} (\theta_s - \theta_{-16000}) dz$	(16)
Qcrit	$- \int_0^{-16000} \frac{K(h)}{K(h) + q_{crit}} dh = 120$	(17)
IntWt	$IntWt = IntW1 + IntW2$	(18)
IntW1	$IntW1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=-100}^{h=-400} \theta(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(19)
IntW2	$IntW2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=-400}^{h=-16000} \theta(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(20)
IntW0	$IntW0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=0}^{h=-16000} \theta(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(21)
IntKt	$IntKt = IntK1 + IntK2$	(22)
IntK1	$IntK1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=-100}^{h=-400} K(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(23)
IntK2	$IntK2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=-400}^{h=-16000} K(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(24)
IntK0	$IntK0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \int_{h=0}^{h=-16000} K(h) dh \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(25)
Pindex	$P = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{\theta_{s,i} - \theta_{r,i}} \int_{\theta_{r,i}}^{\theta_{s,i}} \frac{h(\theta) C(\theta)}{\theta} d\theta \right] \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(26)
Sindex	$S = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{s,i} - \theta_{r,i}}{1 - m_i} \left( \frac{m_i}{1 + m_i} \right)^{1+m_i} \Delta z_i \quad L = \sum_{i=1}^N \Delta z_i$	(27)
Xlay	$Xlay = \sum_{i=1}^N BS_i \Delta z_i$	(28)
TE05120	Zie toelichting in tekst.	
TI10120	Zie toelichting in tekst.	

### 2.2.1 KD- en C-waarde

In de hydrologie worden bodemlagen meestal gekarakteriseerd door de KD- en de C-waarde. Deze hebben betrekking op de laagdikte en de verzadigde doorlatendheid (Eq. (7), Eq. (8)). De C-waarde (d) heeft vooral een betekenis voor verticaal transport, terwijl de KD-waarde (cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>) vooral gebruikt wordt voor horizontaal transport. Beide zijn dus gebaseerd op 1 puntwaarde, namelijk  $K_s$ , van de

bodemfysische eigenschappen. Bij het afleiden van BOFEK2012 zijn beide kengetallen in eerste instantie gebruikt, maar uiteindelijk is alleen de C-waarde meegenomen in de clusteranalyse.

### 2.2.2 Opneembaar water

De waterretentiekarakteristiek kent twee karakteristieke punten, namelijk het vochtgehalte bij veldcapaciteit ( $h = -100$  cm) en bij verwelkingspunt ( $h = -16000$  cm). Het verschil tussen beide watergehaltes wordt opneembaar water (soms beschikbaar hangwater) genoemd. Wanneer dit wordt vermenigvuldigd met een laagdikte, levert dat een waarde in cm waterkolom op. Vaak wordt onderscheid gemaakt tussen gemakkelijk en moeilijk opneembaar water, waarbij een tussenwaarde wordt berekend bij een drukhoogte van  $h = -400$  cm. Deze kengetallen (totaal (Wt), gemakkelijk (W1), moeilijk (W2); cm) zijn berekend voor de bovengrond of wortelzone ( $r_z$ ; hier gesteld op 30 cm) (Eqs. (9)-(11)) en voor de rest van het bodemprofiel (sub; 30-120 cm) (Eqs. (12)-(14)). Deze berekeningen volgen rechtstreeks uit de Van Genuchten-vergelijking (Eq. (2)).

### 2.2.3 Kritieke z-afstand en bijbehorend verzadigingstekort

De kritieke z-afstand ( $Z_{crit}$ ; cm) is een criterium om de capillaire eigenschappen van bodemprofielen te karakteriseren. Het is gedefinieerd als de afstand tussen de onderzijde wortelzone en de grondwaterspiegel, waarbij het profiel nog in staat is om een bepaalde waterflux te leveren. Hierbij wordt verondersteld dat aan de onderzijde van de wortelzone de drukhoogte gelijk is aan  $-16000$  cm. De uitdrukking voor het  $z(h)$  profiel zoals gegeven in Eq. (15) volgt uit de Darcy-vergelijking, geïntegreerd over de diepte bij een constante waterflux.

$$q = -K(h) \left( \frac{dh}{dz} + 1 \right) \quad (29)$$

Na herschrijven geeft dit

$$dz = - \frac{K(h)}{K(h) + q} dh \quad (30)$$

Deze uitdrukking wordt geïntegreerd zodat

$$\int_{z=0}^z dz = \int_{h=0}^h - \frac{K(h)}{K(h) + q} dh \quad (31)$$

Ofwel

$$z(h) = \int_{h=0}^h - \frac{K(h)}{K(h) + q} dh \quad (32)$$

Deze uitdrukking kan niet analytisch berekend of benaderd worden en moet derhalve numeriek geïntegreerd worden. Dat gebeurt door in kleine stappen in drukhoogte (bijv.  $\Delta h = 1$  cm) vanaf de onderzijde van de wortelzone (op diepte 30 cm) waar  $h = -16000$  cm naar beneden te gaan, totdat de diepte wordt bereikt waar  $h = 0$  cm.

$$z(h) = \sum - \frac{K(\bar{h})}{K(\bar{h}) + q} \Delta h \quad (33)$$

waarin  $\bar{h}$  de gemiddelde drukhoogte is over het beschouwde diepte-interval. Onderweg wordt ervoor gezorgd zo goed mogelijk de laaggrenzen te bereiken door tijdelijk de stapgrootte in  $h$  te verkleinen (dus het aantal sommaties ligt niet op voorhand vast). Dat is nodig, omdat bij een laaggrens de bijbehorende MvG-parameters veranderen die worden gebruikt bij de berekening van  $K(h)$  in Eq. (15). Indien de berekening beneden de onderzijde van het bodemprofiel geraakt, dan wordt verondersteld dat de onderste bodemlaag zich tot grotere diepte uitstrekt, zodat kritieke stijghoogtes van meer dan

90 cm kunnen worden berekend. Gelijktijdig aan deze numerieke integratie kan ook het bijbehorende verzadigingstekort ( $V_{crit}$ ; Eq. (16); cm) worden berekend. De kritieke stijghoogte en het verzadigingstekort worden berekend voor  $q = 0.1 \text{ cm d}^{-1}$  en  $q = 0.2 \text{ cm d}^{-1}$ , respectievelijk,  $Z_{crit1}$ ,  $V_{crit1}$  en  $Z_{crit}$ ,  $V_{crit2}$ .

#### 2.2.4 Kritieke flux

Omdat de kritieke z-afstand in veel gevallen betrekking heeft op slechts een deel van het bodemprofiel, is een nieuw criterium geïntroduceerd: de kritieke flux,  $Q_{crit}$ . De kritieke flux ( $\text{cm d}^{-1}$ ) is die opwaartse flux die nog door het hele profiel geleverd kan worden aan maaiveld indien de grondwaterspiegel aan de onderzijde van het bodemprofiel ligt (120 cm). Merk op dat we hier niet de onderzijde van de wortelzone als grens nemen maar maaiveld, zodat ook de bovenste horizont wordt meegenomen. De kritieke flux kan iteratief berekend worden op basis van dezelfde rekenwijze gehanteerd bij de kritieke z-afstand. Hierbij zijn als grenswaarden voor die flux de waarden 0.0001 en  $10 \text{ cm d}^{-1}$  gebruikt. De iteratieve oplossing werd verkregen via Brents methode (Press et al., 1992).

#### 2.2.5 Integraal waterretentiekarakteristiek

In paragraaf 2.2.2 is het opneembaar water behandeld, dat werd berekend als het verschil in watergehalte bij twee punten in de waterretentiekarakteristiek. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de vorm van de curve tussen deze twee punten. De vorm van de curve kan worden meegenomen door het oppervlakte onder de curve te berekenen. Dat kan uiteraard gedaan worden voor dezelfde grenswaarden van drukhoogtes zoals hierboven is gedaan (Eqs. (18)-(20)). Hier wordt aanvullend ook het oppervlakte onder de curve berekend voor het traject verzadiging tot aan verwelkingspunt (Eq. (21)).

De integraal van de Van Genuchten-waterretentiekarakteristiek (cm) kan berekend worden volgens<sup>3</sup>

$$\int \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)\theta_s}{(1 + |\alpha h|^n)^m} dh = h \left( \theta_r + (\theta_s - \theta_r) {}_2F_1 \left[ m, \frac{1}{n}, 1 + \frac{1}{n}; -|\alpha h|^n \right] \right) \quad (34)$$

waarin  ${}_2F_1[a,b,c;d]$  de hypergeometrische functie is. Deze functie kan zeer nauwkeurig berekend worden volgens de methode van Michel & Stoitsov (2008) (zie Bijlage 1). Dit is de volledige integraal, en indien deze voor een deel van de curve, bijv. tussen  $h = 0 \text{ cm}$  en  $h = -16000 \text{ cm}$ , berekend moet worden, dan volgt deze uit het verschil behorende bij de twee beschouwde drukhoogtes. De berekende integralen worden gesommeerd over alle lagen (laagdikte-gewogen).

#### 2.2.6 Integraal doorlatendheidskarakteristiek

Naast de integraal van de waterretentiekarakteristiek is ook de integraal van de doorlatendheidskarakteristiek ( $\text{cm}^2 \text{ d}^{-1}$ ) berekend voor dezelfde trajecten in drukhoogte (Eqs. (22)-(25)). De integraal voor de  $K(h)$  staat bekend als de 'matric flux potential' (Raats, 1970) en kan geschreven worden als

$$\phi = \int_{h=-h_{ref}}^h K(h) dh = \int_{\theta=-\theta_{ref}}^{\theta} D(\theta) d\theta \quad (35)$$

Deze grootheid  $\phi$  wordt gebruikt bij studies om de Richards-vergelijking (Eq. (1)) te lineariseren en het wordt gebruikt in wateropnamemodellen waarbij stroming vanuit de bulk bodem naar de wortelwand toe wordt beschreven (De Willigen & Van Noordwijk, 1987; Heinen, 2001; De Jong van Lier et al., 2008). De Jong van Lier et al. (2009) geven de volgende uitdrukking voor  $\phi$ <sup>4</sup>

$$\phi = \frac{K_s(1-m)}{\alpha(v-1)} \left( S^{1-\frac{1}{m}+\lambda} (f_1[S] + f_2[S] - 2) - S_{ref}^{1-\frac{1}{m}+\lambda} (f_1[S_{ref}] + f_2[S_{ref}] - 2) \right) \quad (36)$$

<sup>3</sup> Afgeleid m.b.v. Mathematica (Wolfram Research Inc.).

<sup>4</sup> Hun vergelijkingen [A-10] en [A-11] waren incorrect, hier verbeterd weergegeven (in overleg met de auteurs).



met

$$f_1[x] = {}_2F_1[v-1, m, v; x] \quad (37)$$

$$f_2[x] = {}_2F_1[v-1, -m, v; x] \quad (38)$$

Hierin is  $v = m(1+\lambda)$  en  ${}_2F_1[a, b, c; d]$  de hypergeometrische functie. Deze functie kan zeer nauwkeurig berekend worden volgens de methode van Michel & Stoitsov (2008) (zie Bijlage 1). De waarde voor  $h_{ref}$  waarbij  $S_{ref}$  berekend kan worden, is vrij te kiezen (bijv.  $-10^8$  cm), maar zal uiteindelijk geen rol spelen wanneer twee  $\phi$ -waarden van elkaar worden afgetrokken om de genoemde kengetallen te berekenen. De berekende integralen worden gesommeerd over alle lagen (laagdikte-gewogen).

### 2.2.7 S-index van Dexter (2004) en de P-index van Haverkamp et al. (2005)

In de literatuur worden soms indices geïntroduceerd om de fysische bodemkwaliteit (bodemgezondheid) te kwantificeren. Hier worden de S-index van Dexter (2004) en de P-index van Haverkamp et al. (2005) gebruikt.

#### S-index

Dexter (2004) stelt voor om de helling in het buigpunt van de waterretentiecurve te gebruiken als een fysische 'soil health index'. Hierbij wordt uitgegaan van de retentiecurve waarbij  $\ln(h)$  wordt gebruikt in plaats van  $h$ :  $\theta(\ln(h))$ . Voor het Mualem-Van Genuchten-model geldt:  $C = d\theta/dh$  (helling retentiecurve),  $C^* = d\theta/d\ln[h] = h \cdot d\theta/dh = h \cdot C$  (helling retentiecurve op basis van  $\ln(h)$ ). De locatie van het buigpunt (inflectiepunt; aangeduid via subscript  $_{inf}$ ) kan worden gevonden door de afgeleide van  $C^*$  gelijk te stellen aan nul:  $dC^*/d\ln[h] = h \cdot dC^*/dh = 0$ . Hieruit is af te leiden dat  $h$  in dit buigpunt gegeven wordt door:

$$h_{inf}^* = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1}{m} \right)^{1-m} \quad (39)$$

De bijbehorende helling of differentieële vochtcapaciteit is dan (dimensieloos):

$$S = C_{inf}^* = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1-m} \left( \frac{m}{1+m} \right)^{1+m} \quad (40)$$

En het bijbehorende watergehalte is dan gegeven als:

$$\theta_{inf}^* = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{m}{1+m} \right)^m \quad (41)$$

Dexter (2004) noemt  $C_{inf}^*$  de zogenaamde S-index:  $S = C_{inf}^*$  (dimensieloos). De grens tussen goede en slechte bodemstructuur ligt volgens Dexter bij  $S = 0.035$ , een  $S < 0.02$  identificeert hij met zeer slechte fysische bodemcondities (Tabel 3).

**Tabel 3** Beoordelingscriteria voor de S-index volgens Dexter & Czyz (2007).

S-index	Beoordeling
$0.050 \leq S$	zeer goed
$0.035 \leq S < 0.050$	goed
$0.020 \leq S < 0.035$	slecht
$S < 0.020$	zeer slecht

Merk op dat deze waarden iets afwijken van de waarden voor het buigpunt in de normale waterretentiekarakteristiek  $\theta(h)$ :  $h_{inf} = m^{1-m}/\alpha$ ,  $\theta_{inf} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1+m)^{-m}$ , en  $C_{inf} = \alpha(\theta_s - \theta_r)(m/(1+m))^{1+m}/(1-m)$ ; NB:  $C_{inf}^* = C_{inf}/\alpha$ . De berekende S-indices worden gesommeerd over alle lagen (laagdikte-gewogen).

## P-index

Haverkamp et al. (2005) stellen voor om een integrale eigenschap van de helling van de waterretentiecurve (dus: differentiële vochtcapaciteit) als een kenmerkende index voor een bodem te zien: de zogenaamde *P*-index (*P*; dimensieloos). Deze is gedefinieerd als de gewogen integraal van de helling van log-log versie van de waterretentiecurve:

$$P = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d(\ln(\theta))}{d(\ln(h))} d\theta = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{h(\theta)C(\theta)}{\theta} d\theta \quad (42)$$

Met behulp van Mathematica (Wolfram Research, Inc., 2015) valt af te leiden dat de oplossing gegeven kan worden als:

$$P = \begin{cases} \frac{m}{1-m^2} & \theta_r = 0 \\ \frac{m}{1-m^2} \left( (1+m)T \ln\left(1 + \frac{1}{T}\right) - m {}_2F_1\left[1, 1 + \frac{1}{m}, 2 + \frac{1}{m}; -\frac{1}{T}\right] - 1 \right) & \theta_r > 0 \end{cases} \quad (43)$$

met  $T = \frac{\theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

Hierin is  ${}_2F_1[a,b,c;d]$  de hypergeometrische functie. Deze functie kan zeer nauwkeurig berekend worden volgens de methode van Michel & Stoitsov (2008) (zie Bijlage 1; hierin staat ook toelichting over de afleiding voor de uitdrukking voor *P*). Volgens Haverkamp et al. (2005) is *P* gerelateerd aan een fractale lengte. In dat geval ligt *P* in het bereik [0,3] en in hun analyse is *P* vaak veel kleiner dan 1. De berekende *P*-indices worden gesommeerd over alle lagen (laagdikte-gewogen).

### 2.2.8 Bodemprofielopbouw

In BOFEK2012 is via een handmatige nabewerking een indeling verkregen waarbij de laagindeling van de profielen een belangrijke rol speelde. Daarom introduceren we hier een kengetal gebaseerd op de aanwezige Staringreeks bouwstenen (Eq. (28)). Voor de 18 bovengronden werd gebruikt  $BS = 1...18$ , en voor de 18 ondergronden werd gebruikt  $BS = 19...36$ .

### 2.2.9 Tijdstip verdampingsreductie en tijdstip stationaire infiltratie

Bij aanvang van de afleiding van BOFEK2020 bestond de behoefte om na te gaan of iets meer dynamisch-georiënteerde kengetallen toegevoegd konden worden aan de bovengenoemde lijst met statische kengetallen. De volgende twee tijdstippen werden voorgesteld:

- het tijdstip wanneer een bodemprofiel niet meer aan een bepaalde verdampingsvraag kan voldoen en
- het tijdstip waarop bij continue neerslag de drukhoogte aan maaiveld niet meer verandert.

Voor beide situaties geldt dat initieel de bodem in hydrostatisch evenwicht verkeert met een constante grondwaterspiegel. Deze kengetallen zijn niet rechtstreeks te berekenen uit de bodemfysische eigenschappen (zoals de kengetallen hierboven). Deze tijdstippen kunnen worden bepaald aan de hand van simulaties met SWAP (Kroes et al., 2017). Omdat later zal blijken dat deze twee tijdstippen niet worden meegenomen in de eindanalyse, wordt hier verder niet meer in detail op ingegaan. Een korte analyse van de simulatieresultaten staat in Bijlage 2.

## 2.3 Vaststellen minimumset kengetallen

In totaal zijn bij aanvang 26 kengetallen berekend voor alle bodemprofielen. Bij de afleiding van BOFEK2012 is via een zogenaamde PCA-analyse (*principal component analysis*) nagegaan welke kengetallen gelijkwaardig bijdragen in de eerste twee hoofdcomponenten van de PCA-analyse. Gelijkwaardig gedrag duidt op een hoge correlatie tussen beide kengetallen. Omdat de PCA-analyse is gestoeld op de correlatiematrix, is besloten om geen PCA-analyse uit te voeren en de analyse te

---

baseren op de correlatiematrix. Figuur 1 geeft de correlatiematrix voor alle bodemprofielen; 0 geeft de matrices voor de hoofdgrondsoorten.

Op basis van de onderlinge correlaties zijn de volgende beslissingen genomen.

- Xlay: omdat enerzijds Xlay geen fysisch kengetal is en omdat het sterk gecorreleerd is met onder andere C en de integraal van de waterretentiekarakteristiek zal Xlay verder buiten beschouwing worden gelaten.
- De twee karakteristieke tijden TE05120 en TI10120 blijken vrij sterk gecorreleerd te zijn met onder andere de integraal van de hydraulische doorlatendheidskarakteristiek en het beschikbare water in de wortelzone. Mede omdat deze twee kengetallen via SWAP-simulaties verkregen moeten worden, is derhalve besloten deze twee kengetallen verder buiten beschouwing te laten.
- De Sindex en Pindex zijn onderling sterk gecorreleerd. Omdat de Sindex betrekking heeft op slechts één positie in de waterretentiekarakteristiek en de Pindex veel meer een integraal karakter heeft, is besloten om de Sindex verder buiten beschouwing te laten.
- De C- en KD-kengetallen zijn relatief sterk gecorreleerd. In navolging van BOFEK2012 wordt ook nu KD in de verdere analyse buiten beschouwing gelaten. (NB: in de hydrologie heeft KD betekenis voor de horizontale transmissiviteit; echter de  $K_s$  die wij gebruiken, betreft de verticale doorlatendheid.)
- Vanwege de hoge correlatie tussen Wtrz en W2rz, en Wtsub en W2sub is besloten om Wtrz en Wtsub in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.
- De kengetallen IntW0, IntWt, IntW1 en IntW2 zijn onderling sterk gecorreleerd. Er is besloten om IntWt, IntW1 en IntW2 in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.
- De kengetallen IntKt, IntK1 en IntK2 zijn onderling sterk gecorreleerd. Er is besloten om IntK1 en IntK2 in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.
- De kengetallen IntK1 en Qcrit zijn vrij sterk gecorreleerd, omdat ze beide berekend worden op basis van de integraal van de doorlatendheidskarakteristiek. Er is besloten om IntK1 in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.
- Het beschikbare water in de ondergrond is voor een groot deel sterk gecorreleerd met de integraal van de waterretentiekarakteristiek (IntW0). Er is besloten om W1sub en W2sub in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.
- De kengetallen Zcrit1, Zcrit2, Vcrit1 en Vcrit2 zijn onderling sterk gecorreleerd. Er is besloten om Zcrit1, Vcrit1 en Vcrit2 in de verdere analyse buiten beschouwing te laten.

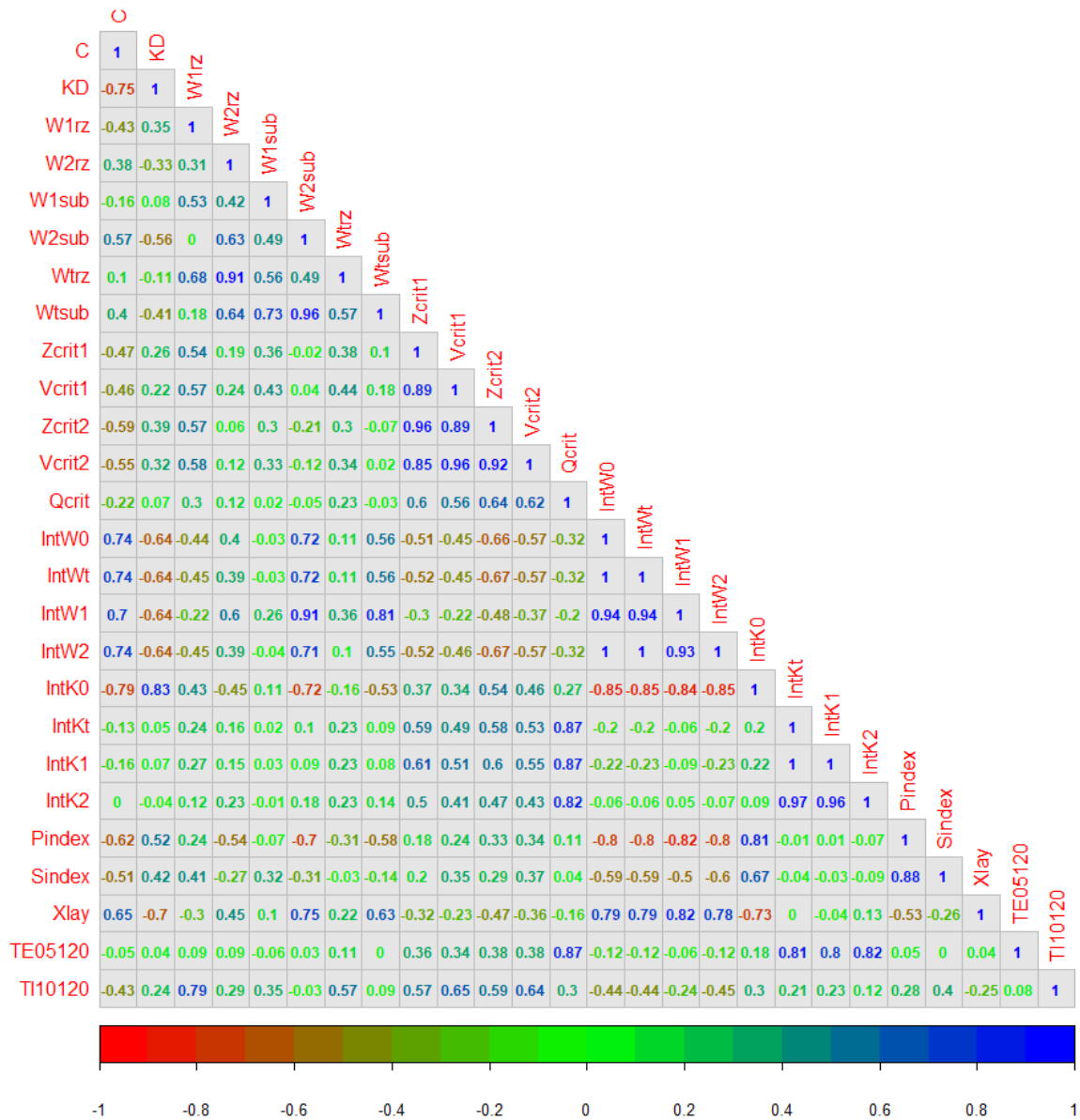
Deze analyse is voornamelijk gebaseerd op de correlaties voor alle bodemprofielen. In Bijlage 4 valt op te maken dat over het algemeen deze patronen ook te zien zijn binnen de vijf hoofdgrondsoorten.

Het is niet zo dat er vervolgens een set kengetallen resteert waarvoor alle onderlinge correlaties zeer gering zijn. In sommige gevallen blijven hogere correlaties bestaan. Dat is op zich niet heel erg verwonderlijk, omdat de kengetallen allemaal zijn berekend op basis van de parameters in het Mualem-Van Genuchten-model dat ten grondslag ligt aan deze berekeningen.

Na deze screening blijven de volgende acht kengetallen over:

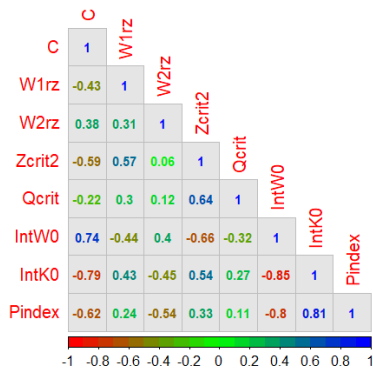
- C, W1rz, W2rz, Zcrit2, Qcrit, IntW0, IntK0, Pindex

Met deze kengetallen is de clustering (paragraaf 0) uitgevoerd. Voor de volledigheid zijn de correlatiematrices voor alle profielen en de vijf hoofdgrondsoorten voor deze acht kengetallen gegeven in Figuur 2.

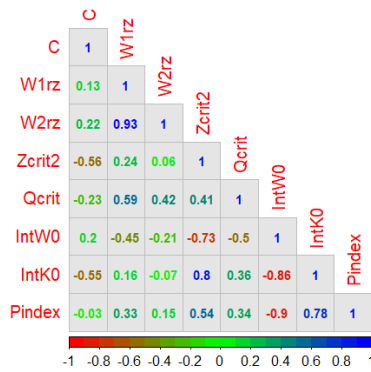


**Figuur 1** De correlatiematrix (Pearson) voor alle 26 kengetallen voor alle 368 bodemprofielen.

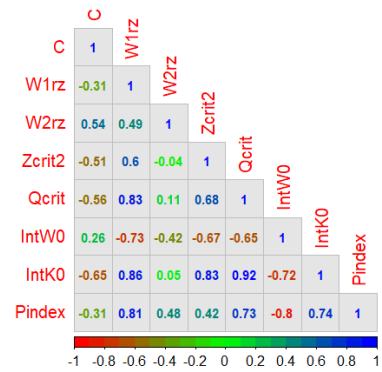
Allen



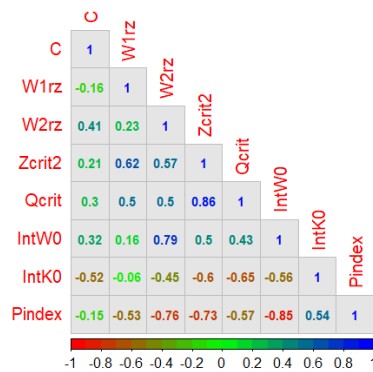
Veen



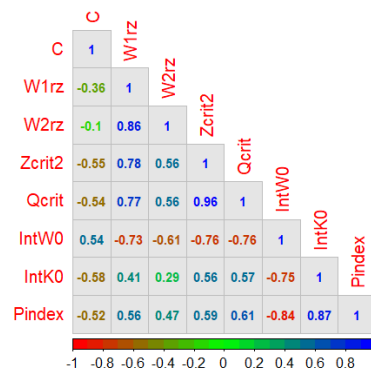
Moerig



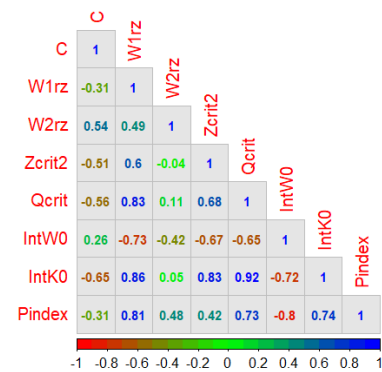
Zand



Klei-zavel

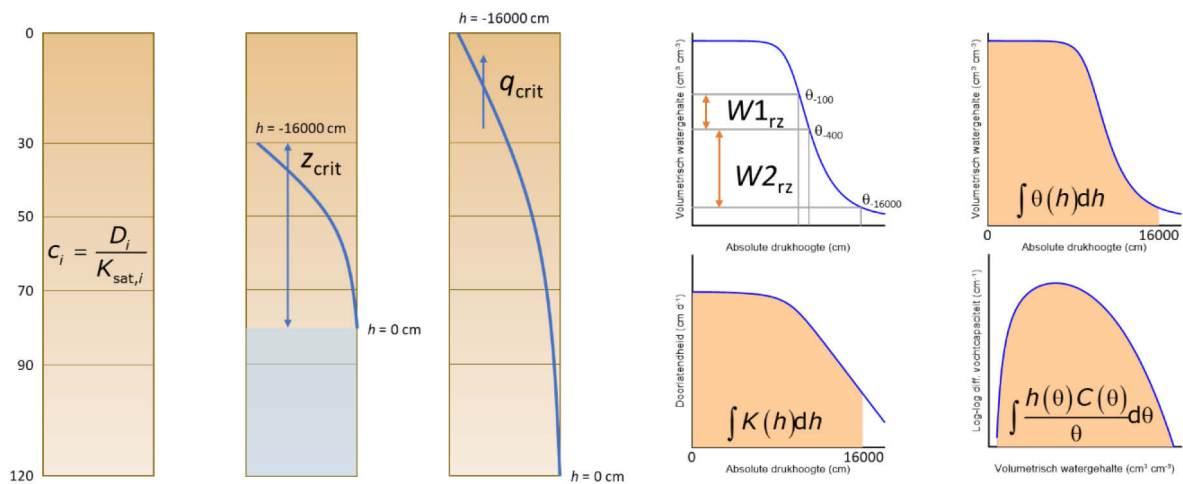


Leem



**Figuur 2** De correlatiematrix (Pearson) voor de acht geselecteerde fysische kengetallen voor alle 368 bodemprofielen en voor de profielen voor de vijf hoofdgrondsoorten.

Deze acht fysische kengetallen zijn visueel weergegeven in Figuur 3. De C-waarde betreft de gesommeerde weerstand tegen de verticale verzadigde stroming voor het gehele bodemprofiel (0-120 cm). De positie van de grondwaterspiegel onder de wortelzone waarbij een opwaartse flux van 2 mm d<sup>-1</sup> gerealiseerd kan worden, is Zcrit2. Hierbij valt op dat in alle gevallen de stroming in de wortelzone zelf niet wordt meegenomen en dat in diverse gevallen ook de stroming in het onderste deel van het bodemprofiel niet wordt meegenomen. Daarom is een nieuw kengetal geïntroduceerd, Qcrit: dit is de flux die aan de maaiveld nog gerealiseerd kan worden indien de grondwaterspiegel op 120 cm -mv staat. Het gemakkelijk en moeilijk beschikbare water (in de wortelzone) volgt uit de waterretentie-karakteristiek (zie grafiek linksboven). Bij de stroming van water in de onverzadigde bodem spelen de waterretentie-, doorlatendheid- en differentiële vochtcapaciteit-karakteristieken een grote rol. Hoewel bij beschikbaar water al naar de waterretentiekarakteristiek wordt gekeken, betreft dat slechts punt-informatie. Daarom is hier besloten om de integrale inhoud van deze karakteristieken als kengetallen te beschouwen (overige drie grafieken). De grafiek rechtsonder betreft de zogenaamde Pindex van Haverkamp et al. (2005).



**Figuur 3** Visualisatie van de acht kengetallen op basis waarvan BOFEK2020 is afgeleid. Links de profielweerstand  $C$ , kritieke stijghoogte  $Z_{crit2}$  en de kritieke flux  $Q_{crit}$ , en rechts het makkelijk en moeilijk beschikbare water (curve linksboven) en de integralen van de karakteristieken voor waterretentie (rechtsboven), doorlatendheid (linksonder) en log-log differentieële vochtcapaciteit (rechtsonder). De vier getoonde curves zijn niet op schaal.

## 2.4 Clustering

De idee van clustering is om het totaal aantal bodemprofielen (368) te reduceren tot een aantal eenheden waarbinnen profielen kunnen worden ingedeeld op basis van vergelijkbaar fysisch gedrag. Het fysieke gedrag wordt hier gekarakteriseerd in termen van de geselecteerde kengetallen. Net zoals in BOFEK2012 zullen de 368 bodemprofielen eerst ingedeeld worden in de vijf hoofdgrond-soorten: veen, moerig, zand, klei/zavel en leem (löss). Deze indeling volgt uit de bodemkaart. Via wiskundige clustering kan nagegaan worden welke profielen vergelijkbare eigenschappen bezitten en dus samen in één cluster (fysische eenheid) geplaatst kunnen worden. Clustering kan plaatsvinden op verschillende manieren en er zijn diverse beoordelingscriteria op basis waarvan een besluit genomen kan worden welk aantal clusters goed genoeg is. Een veelgebruikte clusteringstechniek is de zogenaamde  $k$ -means-methode (Hartigan & Wong, 1979; ook toegepast in BOFEK2012). Hierbij worden voor  $k$  clusters alle observaties (bodemprofielen) verdeeld over deze  $k$  clusters op basis van hun ligging ten opzichte van het centrum van elk cluster. Het aantal clusters moet door de gebruiker worden opgegeven en intern wordt vervolgens gezocht naar de ligging van de cluster-centra, zodanig dat de som van de afwijkingen tussen de observaties en de clustercentra binnen elk cluster zo klein mogelijk is. Uiteraard is deze afwijking nihil wanneer  $k$  gelijk is aan het aantal observaties en groot wanneer een gering aantal clusters wordt beschouwd. Een veelgebruikt criterium is de zogenaamde elleboog-methode, waarbij de som van de interne afwijkingen als functie van  $k$  wordt uitgezet in een grafiek (Thorndike, 1953). In sommige studies wordt dan gezocht naar een 'knikpunt' in deze relatie: vanaf het knikpunt wordt bij toenemende  $k$  de afname in variantie duidelijk minder. Dit wordt vaak toegepast om het aantal clusters zo klein mogelijk te houden. Deze elleboog-methode kan ook anders berekend worden door de afwijking (gesommeerde binnenvariantie) te normaliseren naar de totale variantie van de dataset. Hierbij wordt een maat verkregen die vergelijkbaar is met het percentage verklaarde variantie (PVA) zoals gebruikt in de statistiek. Deze maat werkt prettig, omdat deze altijd ligt in het bereik 0-100%. Uit deze relatie kan het aantal clusters  $k$  vastgesteld worden op basis van een vooraf gewenst percentage verklaarde variantie, zonder te zoeken naar een eventueel aanwezige knik in deze relatie. Uiteraard geldt nu dat hoe hoger het gewenste PVA, des te meer clusters er nodig zijn.

Een ander vaak gebruikt criterium is het zogenaamde Calinsky-Harabasz (1974) criterium, zoals ook gebruikt bij afleiding BOFEK2012. Dit criterium hebben we ook geprobeerd; echter, op basis van dit criterium (hoe hoger hoe beter) bleek dat voor enkele grondsoorten (veen, moerig, leem) juist het grootst aantal clusters gekozen diende te worden, terwijl voor andere grondsoorten (zand, klei-zavel))



---

juist het geringste aantal clusters het best was. Omdat hiervoor lastig een uniform besliscriterium vast te stellen is, hebben we dit criterium niet verder beschouwd.

## 2.5 Scripts

Bij de hierboven beschreven werkwijze zijn drie afzonderlijke stappen onderscheiden (zie ook Bijlage 3):

1. Berekenen van de fysische kengetallen voor alle 368 bodemprofielen.
2. Vaststellen van de minimumset te gebruiken fysische kengetallen.
3. De uiteindelijke clustering.

Omdat we niet vooraf zijn uitgegaan van een bekende set fysische kengetallen was de 2<sup>e</sup> stap noodzakelijk. Indien in de toekomst de hier gekozen kengetallen gebruikt gaan worden, kunnen stap 1 en 3 worden samengevoegd (direct na elkaar worden uitgevoerd).

Uitgangspunt is de beschikbaarheid van de beschrijving van de 368 bodemprofielen in termen van laagdiktes met bijbehorende Staringreeks-bouwsteencodes, en de Staringreeks 2018-parameters voor de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen uit Heinen et al. (2018). In de voorstudie was aanvullend hierbij nog een tabel beschikbaar met de resultaten voor de simulaties van de tijdstippen voor verdampingsreductie en stationaire infiltratie. Omdat deze laatste twee kengetallen niet beschouwd zijn, worden deze hier verder buiten beschouwing gelaten.

De opbouw van de tabel met profielbeschrijvingen is afgeleid uit de profielschetsen van De Vries (1999; zie voorbeeld in zijn aanhangsel 1) en de tabel met de Staringreeksparameters is gegeven in Heinen et al. (2020; hun Tabel 3). Op basis van deze twee tabellen kunnen alle fysische kengetallen berekend worden. Het R-script hiervoor is gegeven in Bijlage 3 (R Core Team, 2020). Dit script levert een uitvoerbestand op waarin per bodemprofiel alle kengetallen gegeven zijn en dat in de volgende scripts als invoer gebruikt wordt.

In de tweede stap zijn de correlaties vastgesteld tussen de kengetallen waarna deze zijn beoordeeld en vervolgens hieruit de definitieve set kengetallen is afgeleid. Het R-script is gegeven in Bijlage 3 en de uitvoer bestaat uit diverse figuren van de correlatiematrix.

Stap 3 is de uiteindelijke clustering. Deze gaat uit van de tabel met fysische kengetallen voor alle bodemprofielen. In die tabel is tevens aangegeven tot welke hoofdgrondsoort elke profiel behoort, zodat in clustering kon worden opgesplitst per hoofdgrondsoort. Het R-script is gegeven in Bijlage 3. In dit script wordt eerst voor een groot aantal clusters de relatie tussen percentage verklaarde variantie en het aantal opgelegde clusters berekend. Dit levert een figuur of tabel op met deze relaties per hoofdgrondsoort. Vervolgens moet een gewenst percentage verklaarde variantie (PVA) worden opgegeven door de gebruiker in het R-script (nu standaard PVA = 95%), waarna de feitelijke clusterindeling wordt uitgevoerd en de BOFEK2020-tabel wordt weggeschreven.

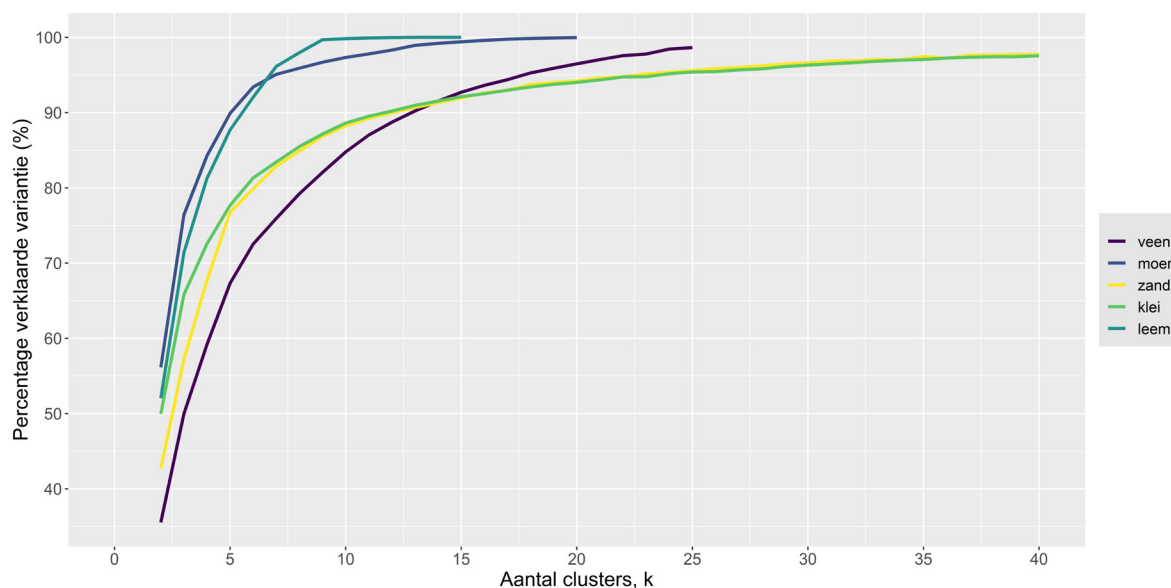
Zoals gezegd, zijn de berekeningen uitgevoerd met R. Hoewel er een R-pakket beschikbaar is voor het berekenen van de hypergeometrische functie, is hier gebruikgemaakt van een Fortran-DLL waarmee de hypergeometrische functie wordt berekend (zie Bijlage 1). Omdat er al goede ervaringen waren met deze Fortran-versie is besloten niet over te stappen op een alternatief. De berekening van de kritieke stijghoogte (numerieke integratie) bleek in de R-code zeer traag te verlopen. Daarom is besloten om de berekening van Zcrit2 te laten plaatsvinden via een Fortran-DLL, wat veel sneller bleek te gaan. Deze snelheidswinst was met name ook gunstig bij de berekening van Qcrit, omdat die iteratief gebruikmaakt van de Zcrit-routine.

Er is gebruikgemaakt van R-versie 4.0.2 (zie nadere toelichting Bijlage 3).

# 3 Resultaat en discussie

## 3.1 Aantal clusters

De clustering is uitgevoerd op vooraf gestratificeerde data: de 368 bodemprofielen zijn eerst onderverdeeld in vijf hoofdgrondsoorten: veen, moerig, zand, klei en zavel, en leem (zie ook BOFEK2012). Voor elk van deze vijf groepen is de relatie  $PVA(k)$  berekend op basis van de acht kengetallen per profiel. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4. Voor een aantal waarden van PVA is in Tabel 4 een overzicht gegeven van het aantal clusters (naar boven afgerond) dat dan per hoofdgrondsoort gevonden wordt.



**Figuur 4** Het percentage verklaarde variantie (PVA) als functie van het aantal clusters ( $k$ ) voor de vijf hoofdgrondsoorten.

**Tabel 4** Aantal benodigde clusters bij gewenst percentage verklaarde variantie (PVA) voor de vijf hoofdgrondsoorten en hun totaal.

PVA	Veen	Moerig	Zand	Klei-zavel	Leem	Totaal
70	6	3	4	4	3	20
72.5	6	3	5	4	3	21
75	7	3	5	4	3	22
77.5	7	3	5	5	4	24
80	8	3	6	6	4	27
82.5	9	4	7	7	4	31
85	10	4	8	8	5	35
87.5	11	5	9	9	5	39
90	13	5	12	12	6	48
92.5	15	6	16	16	6	59
95	18	7	23	24	7	79
97.5	22	10	36	40	8	116

Bij de afleiding van BOFEK2020 is gekozen voor een gewenste PVA van 95%, wat leidt tot een indeling van in totaal 79 BOFEK2020-clusters (eenheden). Deze keuze is vrij arbitrair. Bij de afleiding van

---

BOFEK2012 is destijds vastgesteld dat de toenmalige bestaande PAWN-indeling te grof was (24 eenheden) en dat deskundigen aangaven dat ca. 70-75 eenheden tot een werkbare situatie zou leiden. Omdat de afleiding geautomatiseerd is, kan in de toekomst eenvoudig een afgeleide BOFEK2020 worden opgesteld voor andere waarden van PVA.

Voor elk cluster is steeds één bodemprofiel aangewezen als de vertegenwoordiger voor dat cluster (dominant profiel, clusterhoofd). Dat betreft het bodemprofiel binnen dat cluster met het grootste areaal in Nederland. Uitkomsten met simulatiemodellen voor dit profiel kunnen dan achteraf toegekend worden aan de overige profielen in het bewuste cluster, zodat een landsdekkend beeld verkregen kan worden. In de volgende subparagrafen worden de clusters per hoofdgrondsoort besproken en aangegeven welk profiel als dominant is gekozen. De toekenning van de clusternummers is willekeurig en is de uitkomst van de clustering. De clustering gaat uit van initieel willekeurig (random) gekozen cluster-centra. Om het proces reproduceerbaar te maken, is de zogenaamde 'seed'-waarde voor dit random-proces in de code opgelegd.

Er zijn meerdere clusteringstechnieken naast de hier gebruikte *k*-means methode. Een alternatieve methode is een clustering waarbij het clustercentrum altijd een van de observaties moet zijn (*k*-medoids clustering of 'partitioning around medoids (PAM)'<sup>5</sup>). Deze is hier niet toegepast, omdat dan de indruk gewekt zou kunnen worden dat dit clustercentrum dan ook het representatieve profiel betreft voor dat cluster, terwijl het mogelijk een profiel is dat slechts weinig voorkomt in Nederland.

Naast deze zogenaamde harde clusteringsmethoden bestaan ook clusteringstechnieken die per observatie (bodemprofiel) een procentuele verdeling geven over alle clusters. Een observatie dat dan nog steeds overduidelijk aan één cluster wordt toegekend, krijgt daarvoor de waarde 100% tegen nul procent voor de andere clusters. Observaties die aan meerdere clusters toegekend zouden kunnen worden, krijgen daarvoor een verdeling (samen 100%). Deze zogenaamde 'fuzzy' clustering<sup>6</sup> is echter weer afhankelijk van de mate van 'fuzziness' die de gebruiker wenst te hanteren. Als alternatief kan ook bij de harde clustering vastgesteld worden wat het een-na-beste clusternummer is waar een observatie aan toegekend zou kunnen worden, zodat achteraf gezien kan worden of twee observaties toch relatief dicht bij elkaar liggen.

Het is niet het doel van dit onderzoek geweest om clusteringstechnieken te beoordelen op hun functionaliteit bij het afleiden van BOFEK2020. BOFEK2020 is afgeleid op basis van de harde *k*-means-clustering<sup>7</sup>. Tijdens de uitvoering is wel gekeken of de *k*-medoids en fuzzy *k*-means-methode andere inzichten zouden opleveren. Dat is niet het geval geweest.

## 3.2 Evaluatie van de clustering

De indeling voor PVA = 95% is beoordeeld op bodemkundige overeenkomsten van de profielindelingen in de fysische clusters. Omdat dit een expertbeoordeling betreft, kan dit op verschillende manieren ingestoken worden: ofwel puur vanuit bodemkundige aspecten een kritische beoordeling geven, ofwel de focus leggen op beoordelen of de indeling bodemkundig acceptabel is. De laatste aanpak is hier gekozen. Bij de beoordeling is gebruikgemaakt van scores in drie klassen: zeer goed, ruim voldoende en opvallend. Bodemkundig zou je misschien de ruim voldoende geclassificeerde profielen anders groeperen, maar het is logisch dat ze fysisch toch op de juiste plaats staan. De klasse opvallend geeft aan dat dit profiel bodemkundig sterk afwijkt van de rest van de profielen in dezelfde groep. In totaal zijn er van alle 368 bodemprofielen drie als opvallend aangewezen (zie hieronder) en 31 profielen als ruim voldoende. Bij deze toetsing is tevens de bodemkundige beschrijving voor het cluster vastgelegd.

---

<sup>5</sup> In R is hiervoor functie `cluster::pam` beschikbaar; bron: Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. 1987. Clustering by means of Medoids. In: Statistical Data Analysis Based on the  $L_1$ -Norm and Related Methods, edited by Y. Dodge, North-Holland, 405–416.

<sup>6</sup> Bijvoorbeeld in R via functie `cluster::fanny`; bron: Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. 1990. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley, New York.

<sup>7</sup> In R via functie `stats::kmeans`; bron: Hartigan, J. A. and Wong, M.A. 1979. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. Applied Statistics, 28, 100–108. doi: 10.2307/2346830.

---

Cluster 3005 bestaat uit eerdgronden en profiel Zn10A (vlakvaaggrond) valt hierin op, omdat dit een profiel is zonder minerale eerdlaag. Volgens de clustering op basis van de fysische kengetallen blijkt dit toch het best te passen bij dit cluster, maar dit profiel ligt wel het verst verwijderd van het clustercentrum. De overeenkomst is vooral dat al deze profielen bestaan uit (zeer) sterk lemig, (zeer) fijn zand. Voor alle profielen binnen dit cluster geldt ook dat het 2<sup>e</sup> keus-cluster voor allemaal gelijk is.

In cluster 3019 valt de aanwezigheid van profiel zgY30 (loopodzol met grof zand in ondergrond) op. Het profiel heeft een stuifzanddek (z) en bevat grind in de bovengrond (g), maar dat betekent niet dat dit automatisch als grof zand wordt aangemerkt. Aanwezigheid van grind is geen indelingscriterium voor de Staringreeks-bouwstenen. Volgens de Staringreeks-bouwsteenvolgorde past het profiel in cluster 3019; bodemkundig zou dit beter passen bij profielen uit cluster 3006.

In cluster 4007 valt profiel kMn48Cv (knippoldervaaggrond met zware ondergrond op veen) op. Bodemkundig zou dat beter passen bij de profielen in cluster 4001. Echter, de bouwvoor-zwaarte van de profielen in 4001 zijn aangemerkt als lichte klei, terwijl die voor profiel kMn48Cv zijn aangemerkt als matig zware klei, hetgeen past bij de matig zware klei bovengronden van meerdere profielen in cluster 4007.

Bij zandgronden valt op dat met name de bodemvormende processen (en het resultaat daarvan), die bij de bodemkundige indeling van de Nederlands bodemkaart een belangrijke rol spelen, nauwelijks terug te zien zijn in de fysische clusterindeling. Dat komt omdat bij de vertaling van de bodemprofielen (lagen) naar de Staringreeks-bouwstenen hier geen rekening mee gehouden wordt; immers, de Staringreeks-bouwsteenindeling is primair gericht op textuur en niet op bodemvorming.

Bij clustering forceren we dat het aantal profielen in een opgelegd aantal clusters moet worden ingedeeld. Dat betekent direct ook dat de profielen binnen een cluster verspreid zullen liggen en dus niet allemaal even dicht bij het clustercentrum. In dat geval zullen er altijd wel twijfelgevallen aangewezen kunnen worden. In deze analyse zijn drie profielen aangewezen die bodemkundig gezien in een afwijkend cluster liggen. Dat betreft slechts 0.8% van het totaal aantal profielen. Deze evaluatie geeft dus aan dat de indeling zeer plausibel is.

Er is ook een quickscan-evaluatie uitgevoerd indien de indeling voor PVA = 92.5% zou zijn gekozen. Het aantal opvallende en ruim voldoende aangemerkte profielen neemt dan toe. Bij de veengronden bijvoorbeeld worden dan twee profielen aangemerkt als opvallend. Bij de moerige gronden worden alle kWz- en kWp-profielen samengevoegd, terwijl deze bij PVA = 95% worden opgedeeld in regionale verspreiding: Flevoland versus elders. Bij leemgronden verdwijnt dan cluster 5003 (tertiaire kleigronden). De verschillen voor zand- en kleigronden zijn wat groter, omdat het totaal aantal clusters voor deze grondsoorten dan veel verandert.

### 3.3 Clusterindeling per hoofdgrondsoort

Voor de vijf hoofdgrondsoorten worden in de volgende paragrafen de clusterindelingen gegeven. Voor elk cluster wordt een omschrijving gegeven en wordt het dominante profiel (clusterhoofd) benoemd. Aan het eind van Bijlage 5 is weergegeven welke profielen voorkomen per cluster.

#### 3.3.1 Veengronden

Voor de veengronden worden 18 clusters onderscheiden, zoals omschreven in Tabel 5. De algemene omschrijving voor clusters 1008 en 1016 is identiek, vandaar de toevoeging I en II. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen van eenheden 1001-1018 omvatten gezamenlijk 56.5% van het totale areaal veengronden.

**Tabel 5** Omschrijving van de 18 clusters voor de veengronden: in de kolom bodemcode is het dominante profiel (clusterhoofd) gegeven; in de kolom areaal is het areaal voor het gehele cluster gegeven, waarbij het percentage van dit areaal van het clusterhoofdprofiel tussen haakjes is gegeven.

Cluster	Omschrijving	Bodemcode	Areaal (ha; (%))
1001	Dikke veengronden: kleiig moerige bovengrond op bos-/zeggeveen	hVc	31874 (58.6)
1002	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op zand zonder podzol	aVz	28657 (48.0)
1003	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op klei	dVk	2968 (100.0)
1004	Dunne veengronden: kleiig moerige bovengrond op veen op klei	hVk	3155 (100.0)
1005	Dunne veengronden: zandige bovengrond op veen op zand zonder podzol	iVz	8417 (98.6)
1006	Dikke veengronden: (kleiig) moerige bovengrond op veenmosveen	Vs	33301 (58.3)
1007	Dikke veengronden: zandige bovengrond op zeggeveen	iVc	1132 (88.8)
1008	Dunne veengronden: kleibovengrond op veen op zand <b>I</b>	kVz	8869 (100.0)
1009	Veenafbraakgebied (alleen in NOP)	AVk-F	37 (100.0)
1010	Dikke veengronden: moerige bovengrond op zeggeveen	Vc	8428 (76.7)
1011	Dunne veengronden: veenkoloniaal dek op veen op zand met podzol	iVp	3688 (100.0)
1012	Dikke veengronden: kleibovengrond op bos-/zeggeveen	pVc	21244 (61.8)
1013	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op zand met podzol	Vp	8353 (84.6)
1014	Dunne veengronden: zandbovengrond op veen op zand met podzol	zVp	2718 (100.0)
1015	Dikke veengronden: klei(ig) dek op veenmosveen	kVs	22399 (49.1)
1016	Dunne veengronden: kleibovengrond op veen op zand <b>II</b>	pVz	3474 (99.5)
1017	Dunne veengronden: kleiige bovengrond op veen op zand	hVz	23363 (60.7)
1018	Dikke veengronden: kleidek op bos-/zeggeveen of klei	pVb	60397 (26.7)

### 3.3.2 Moerige gronden

Voor de moerige gronden worden 7 clusters onderscheiden, zoals omschreven in Tabel 6. De algemene omschrijving voor clusters 2006 en 2007 is identiek, vandaar de toevoeging I en II. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen van eenheden 2001-2007 omvatten gezamenlijk 59.3% van het totale areaal moerige gronden.

**Tabel 6** Omschrijving van de 7 clusters voor de moerige gronden: in de kolom bodemcode is het dominante profiel (clusterhoofd) gegeven; in de kolom areaal is het areaal voor het gehele cluster gegeven, waarbij het percentage van dit areaal van het clusterhoofdprofiel tussen haakjes is gegeven.

Cluster	Omschrijving	Bodemcode	Areaal (ha)
2001	Moerige gronden met zanddek	zWp	35819 (48.0)
2002	Moerige gronden met veenkoloniaal dek	iWp	24479 (89.5)
2003	Moerige gronden met kleiondergrond	Wol	23813 (35.3)
2004	Moerige gronden met kleidek en zandondergrond (Flevoland)	kWz	1307 (65.2)
2005	Moerige gronden met kleidek en zandondergrond	kWz	16408 (50.1)
2006	Moerige gronden met moerige bovengrond I	vWz	44601 (55.1)
2007	Moerige gronden met moerige bovengrond II	vWp	19697 (88.1)

### 3.3.3 Zandgronden

Voor de zandgronden worden 23 clusters onderscheiden, zoals omschreven in Tabel 7. De algemene omschrijving is in sommige gevallen identiek, vandaar de toevoeging I-IV: 3003/3006; 3004/3016/3021; 3009/3014/3015/3019. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen van eenheden 3001-3023 omvatten gezamenlijk 48.2% van het totale areaal zandgronden.

**Tabel 7** Omschrijving van de 23 clusters voor de zandgronden: in de kolom bodemcode is het dominante profiel (clusterhoofd) gegeven; in de kolom areaal is het areaal voor het gehele cluster gegeven, waarbij het percentage van dit areaal van het clusterhoofdprofiel tussen haakjes is gegeven. Omdat sommige bodemcodes voorkomen bij verschillend landgebruik, is af en toe het landgebruik erbij vermeld (zie ook Sectie 0).

Cluster	Omschrijving	Bodemcode	Areaal (ha)
3001	Zandgronden (kalkrijk) met veenondergrond	Zn10Av	1593 (100.0)
3002	Sterk lemige zandgronden met kleidek (eerdgronden en vaaggronden in zeezand)	kpZg23	39527 (37.1)
3003	Grofzandige zandgronden I	gHd30	90124 (43.0)
3004	Sterk lemige zandgronden I	Hn23 *gras	120935 (41.3)
3005	Sterk lemige enkeerdgronden	zEZ23 *gras	95483 (46.4)
3006	Grofzandige zandgronden II	Hn30 *gras	30619 (22.5)
3007	Zwak lemige zandgronden met cultuurdek	cHn21 *gras	66671 (71.4)
3008	Zwak lemige zandgronden met oude-kleiondergrond	Hn21t	10439 (80.7)
3009	Zwak lemige zandgronden I	Hn21x	42473 (47.3)
3010	Grofzandige zandgronden met kleidek	kZn30	905 (100.0)
3011	Zwak lemige zandgronden met kleidek (vaaggronden)	kZn21	7532 (85.1)
3012	Zwak lemige enkeerdgronden	zEZ21	79432 (88.0)
3013	Zwak lemige enkeerdgronden of cultuurdek (kustregio)	EZ50A	10080 (60.7)
3014	Zwak lemige zandgronden II	Hn21 *bos	94809 (60.5)
3015	Zwak lemige zandgronden III	Hn21 *gras	335206 (55.7)
3016	Sterk lemige zandgronden II	pZg23g	20753 (39.2)
3017	Grofzandige zandgronden met kleiondergrond	pZg30r	1918 (100.0)
3018	Sterk lemige enkeerdgronden met oude-kleiondergrond	zEZ23t	4809 (83.7)
3019	Zwak lemige zandgronden IV	Zd21	167966 (33.6)
3020	Sterk lemige zandgronden met oude-kleiondergrond	pZg23t	28563 (33.1)
3021	Sterk lemige zandgronden III	pZg23 *gras	210773 (31.1)
3022	Sterk lemige zandgronden met kleidek (vaaggronden in dekzand)	fkZn23	2619 (100.0)
3023	Zwak lemige zandgronden met kleidek (podzol- en eerdgronden)	kHn21	24941 (40.5)

### 3.3.4 Klei- en zavelgronden

Voor de zandgronden worden 23 clusters onderscheiden, zoals omschreven in Tabel 7. De algemene omschrijving is in sommige gevallen identiek, vandaar de toevoeging I-III: 4003/4014; 4004/4019/4023; 4008/4012; 4009/4022/4024; 4010/4018. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen van eenheden 4001-4024 omvatten gezamenlijk 43.5% van het totale areaal klei- en zavelgronden.

**Tabel 8** Omschrijving van de 24 clusters voor de klei- en zavelgronden: in de kolom bodemcode is het dominante profiel (clusterhoofd) gegeven; in de kolom areaal is het areaal voor het gehele cluster gegeven, waarbij het percentage van dit areaal van het clusterhoofdprofiel tussen haakjes is gegeven. Omdat sommige bodemcodes voorkomen bij verschillend landgebruik, is af en toe het landgebruik erbij vermeld (zie ook Sectie 0).

Cluster	Omschrijving	Bodemcode	Areaal (ha)
4001	Knipkleigronden (zavel en lichte klei)	kMn63C	13489 (46.8)
4002	Kleigronden (klei) op veen	Mv41C	70752 (32.8)
4003	Kleigronden (klei) op homogene ondergrond (soms met veen) I	Mn35Av	54999 (44.2)
4004	Kleigronden (lichte zavel) op homogene ondergrond I	Rn15A *gras	17661 (31.1)
4005	Kleigronden (klei) met veentussenlaag of veenondergrond	Mn85Cv	6280 (55.0)
4006	Kleigronden (zavel) op veenondergrond	Mv51A	6354 (100.0)
4007	Kleigronden (zwarte klei) homogeen of op zwarte klei tussenlaag of op veen	Mn45A *gras	69721 (29.7)
4008	Kleigronden (klei) op zandondergrond I	Rn47Cp	11442 (36.0)
4009	Kleigronden (zavel) op zandondergrond I	Mn12A	27345 (66.1)
4010	Kleigronden (zwarte klei) op zwarte kleitussenlaag of zwarte kleiondergrond	Rn47C	31086 (79.8)
4011	Kleigronden (zwarte zavel) op homogene ondergrond (soms met veen) I	gMn25C *gras	44268 (34.5)
4012	Kleigronden (klei) op zandondergrond II	Mn82A	21078 (57.1)
4013	Oude kleigronden (zwarte zavel en klei)	KRn2g	4164 (83.8)
4014	Kleigronden (klei) op homogene ondergrond (soms met veen) II	Mn35A *akker	124326 (42.6)
4015	Kleigronden (zwarte klei) op veen	Rv01C	101551 (25.8)
4016	Kleigronden (zavel en lichte klei) op homogene ondergrond	Rn95A *gras	66580 (34.8)
4017	Oude kleigronden (lichte zavel op grof zand)	KRn1g	5288 (81.3)
4018	Kleigronden (zwarte zavel) op homogene ondergrond (soms met veen) II	Mn25A *akker	155899 (45.0)
4019	Kleigronden (lichte zavel) op homogene ondergrond II	Mn15A *akker	121867 (56.4)
4020	Kleigronden (zwarte zavel) op homogene ondergrond (soms met zand)	Rd90C *gras	19708 (51.9)
4021	Knipkleigronden (zwarte klei) en kleigronden met kattenklei	kMn43C	21863 (41.0)
4022	Kleigronden (zavel) op zandondergrond II	Rn52A *gras	19728 (48.8)
4023	Kleigronden (lichte zavel) op homogene ondergrond III	Mn15A *gras	34583 (53.4)
4024	Kleigronden (zavel) op zandondergrond III	Mn22A	33511 (31.1)

### 3.3.5 Leemgronden

Voor de leemgronden (löss) worden 7 clusters onderscheiden, zoals omschreven in Tabel 9. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen van eenheden 5001-5007 omvatten gezamenlijk 44.5% van het totale areaal leemgronden.

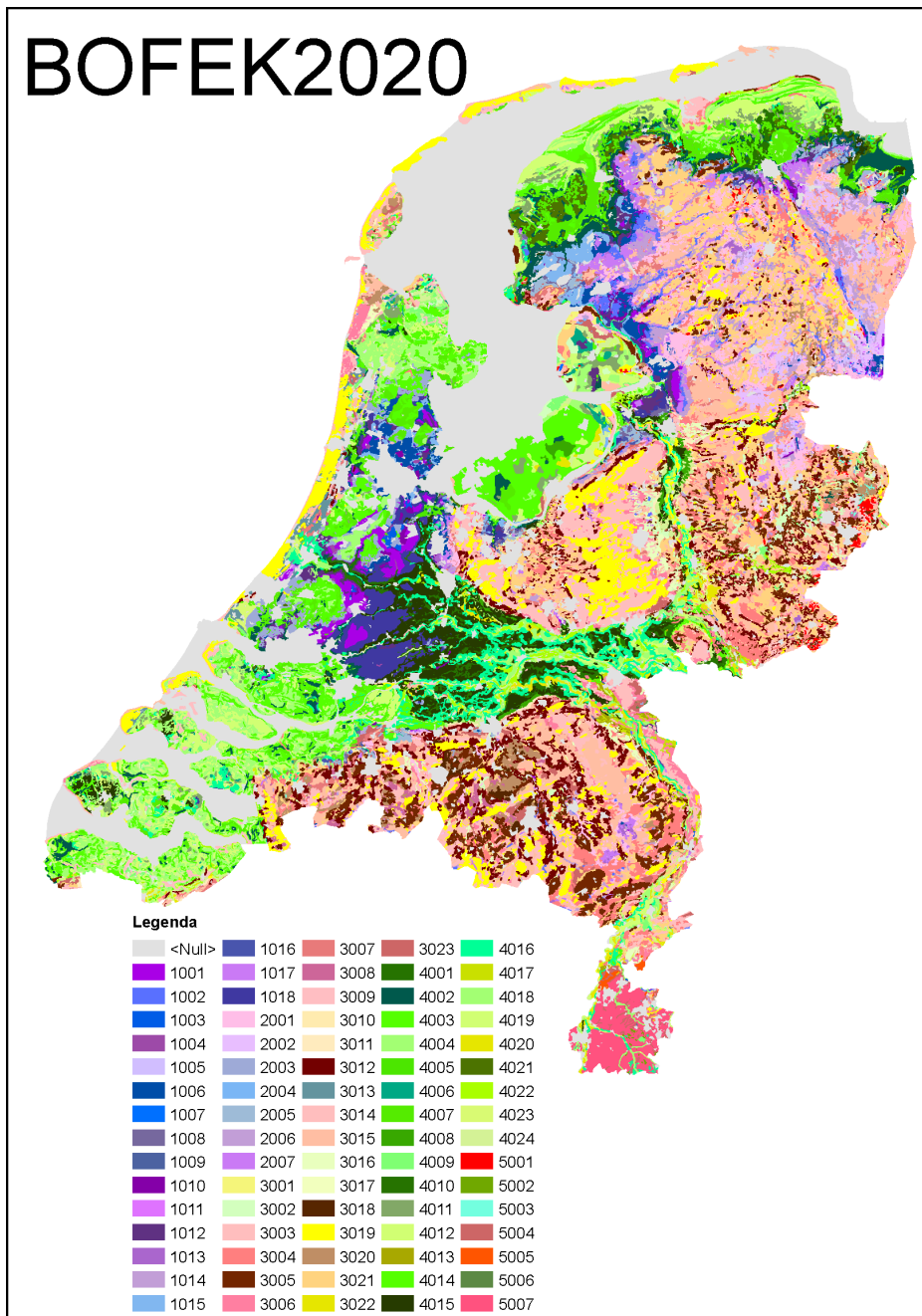
**Tabel 9** Omschrijving van de 7 clusters voor de leemgronden: in de kolom bodemcode is het dominante profiel (clusterhoofd) gegeven; in de kolom areaal is het areaal voor het gehele cluster gegeven, waarbij het percentage van dit areaal van het clusterhoofdprofiel tussen haakjes is gegeven.

Cluster	Omschrijving	Bodemcode	Areaal (ha)
5001	Keileemgronden	KX	6200 (100.0)
5002	Kalksteenverweringsgronden	KK	423 (100.0)
5003	Tertiaire kleigronden	KT	881 (100.0)
5004	Leemgronden: zandige leem zonder briklaag	Ln5	10773 (31.4)
5005	Leemgronden: zandige leem met briklaag	BLd5	2513 (65.6)
5006	Leemgronden: met esdek	EL5	212 (100.0)
5007	Leemgronden: siltige leem	Ldh6	37264 (35.3)

### 3.4 Overall BOFEK2020-tabel en BOFEK2020-kaart

In Bijlage 5 is de complete BOFEK2020-tabel gegeven. Hierin staan voor alle 368 standaardprofielen, gegroepeerd naar hoofdgrondsoorten, het clusternummer, profielnummer, bodemcode en de berekende acht fysische kengetallen C, W1rz, W2rz, Zcrit2, Qcrit, IntW0, IntK0, Pindex. De tabel is gesorteerd naar clusternummer (1001-5007) en per cluster wordt eerst het profiel gegeven van het clusterhoofd; daaronder volgen de profielen die ook tot het cluster behoren in willekeurige volgorde. In deze tabel staat verder nog vermeld uit welke Staringreeks-bouwstenen (in volgorde van voorkomen in de diepte) het profiel bestaat. Voor de clusterhoofdprofielen is de profielopbouw nader gespecificeerd in een tweede tabel in Bijlage 5. De derde tabel in Bijlage 5 geeft een opsomming van alle profielen per cluster.

De BOFEK2020-kaart is gegeven in Figuur 5. De BOFEK2020-clusterhoofdprofielen omvatten gezamenlijk 48% van het totale areaal gronden.



**Figuur 5** De BOFEK2020-kaart gebaseerd op de Bodemkaart van Nederland 2020 (1:50 000) en de Staringreeks 2018.



---

## 3.5 Verschil BOFEK2012 en BOFEK2020

De nieuwe indeling is anders dan de oude indeling. Elke BOFEK2012-eenheid en elk nieuw BOFEK2020-cluster worden vertegenwoordigd door een specifiek standaardbodemprofiel (clusterhoofd). Voor de 72 BOFEK2012-eenheden komen in BOFEK2020 46 profielen opnieuw naar voren als clusterhoofd indien PVA = 95% en 36 indien PVA = 92.5%. Bijlage 1 laat zien waar deze overeenkomsten optreden. Uiteindelijk is het niet nodig om een vertaaltabel of iets dergelijks te construeren, omdat beide BOFEK-schematisaties op zichzelf staan. Belangrijke redenen waarom er verschillen tussen BOFEK2012 en BOFEK2020 bestaan, zijn:

- a. bij de afleiding van BOFEK2020 zijn extra bodemfysische kengetallen beschouwd ten opzichte van BOFEK2012 en na evaluatie van de fysische clusters was er geen reden om bodemprofielen van cluster te wisselen (zoals in BOFEK2012 in een aantal gevallen wel is gebeurd);
- b. de fysische eigenschappen zijn veranderd (Staringreeks);
- c. door de verandering van de bodemkaart is het areaal van sommige profielen iets veranderd, zodat in enkele gevallen een profiel dat in 2012 net geen clusterhoofd werd dat nu wel is geworden of vice versa.

---

## 4 Discussie

BOFEK2020 is afgeleid op basis van de 368 standaard bodemprofielen van de Nederlandse bodemkaart. De profielopbouw van deze standaardprofielen is ook gegeven in termen van Staringreeks-bouwstenen. Op basis van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de Staringreeks-bouwstenen is het vervolgens mogelijk om fysische kengetallen voor de standaardprofielen af te leiden. Op basis van die kengetallen kan dan een clustering plaatsvinden waarbij overeenkomende profielen op basis van die fysische kengetallen bij elkaar komen in een BOFEK2020-eenheid of -cluster. In principe was de aanpak bij het afleiden van BOFEK2012 hetzelfde. Echter, bij BOFEK2020 zijn meer fysische kengetallen beschouwd en na evaluatie van de fysische clusters was er geen reden om bodemprofielen van cluster te wisselen (zoals in BOFEK2012 in een aantal gevallen wel is gebeurd). Het zal duidelijk zijn dat BOFEK2020 op veel plaatsen afwijkt van BOFEK2012. Daarom ook zijn de clusternummers aangepast (geen honderdtallen, maar duizendtallen). Op de webpagina <https://www.wur.nl/nl/show/Bodemfysische-Eenhedenkaart-BOFEK2020.htm> zijn de openbare bestanden van BOFEK2020 te downloaden.

Clustering betekent altijd dat er concessies gedaan moeten worden. Immers, er wordt geforceerd een x aantal clusters opgelegd waarin de populatie (alle 368 bodemprofielen) verdeeld moet worden. Dat zal leiden tot samenbrengen van individuele bodemprofielen die soms ogenschijnlijk vreemd overkomen. Bij de evaluatie is dat voor 3 profielen van de in totaal 368 profielen waargenomen (zie toelichting in paragraaf 3.2). Dat geeft aan dat bij de huidige keuze (PVA = 95%) de verkregen indeling dus naast fysisch ook bodemkundig plausibel is. Indien andere, bijvoorbeeld lagere, waarden voor PVA worden gehanteerd, worden in totaal minder clusters gebruikt. In dat geval wordt de kans steeds groter dat er opmerkelijke indelingen kunnen ontstaan. Voor waarden van PVA > 95% is de verwachting dat ten opzichte van de clusterindeling bij PVA = 95% clusters worden opgedeeld in meerdere clusters, zodat de nieuwe indeling nog steeds bodemkundig juist zal zijn.

In principe zijn verschillende clusterindelingen mogelijk door PVA te variëren. Het advies is om dit voorlopig nog niet te doen en eerst ervaringen op te doen met de meer fysisch georiënteerde BOFEK2020-schematisatie. Zoals eerder opgemerkt: indien het aantal clusters verandert (bijvoorbeeld minder wordt), neemt het aantal profielen dat bodemkundig lijkt af te wijken binnen een cluster toe. Dat zou dan opnieuw getoetst moeten worden door een bodemkundige.

In het verleden hebben enkele gebruikers ervaren dat er niet altijd een goede match bestond tussen de bodemkaart en de BOFEK2012-kaart. In de nieuwe versie van de bodemkaart heeft elk bodemvlak een nummer van een corresponderend afgeleid profiel, ook wel bekend onder de termen standaardprofiel of geschematiseerde profielschets. Er zijn 315 verschillende afgeleide profielen (368 indien voor sommige profielen onderscheid naar regio of landgebruik wordt gemaakt), elk uitgerust met Staringreeks-bouwstenen. BOFEK2020 heeft een unieke vertaling van al die profielen naar 79 representanten van die standaardprofielen, zodat een unieke BOFEK2020-kaart kan worden afgeleid van de bodemkaart.

Nu BOFEK2020 tot stand is gekomen, rijst natuurlijk de vraag wat voor veranderingen dit tot gevolg heeft voor modelsimulaties waarbij voorheen BOFEK2012 werd gebruikt en straks BOFEK2020 zal worden gebruikt. Een dergelijke vergelijking was niet voorzien in de onderzoeksopdracht. Het advies is om een dergelijke vergelijkingsstudie op korte termijn uit te voeren. De belangrijkste verschillen die uit de modelberekeningen naar voren zullen komen, zijn voor het grootste deel te wijten aan de verandering in de bodemkaart en in de Staringreeks. Bij Waterwijzer Landbouw hebben we ervaren dat bij gebruik van BOFEK2012-bodemprofielen in combinatie met de Staringreeks2018 (dus in plaats van Staringreeks2001) er verschillen ontstonden in gesimuleerde droogtestress, bijvoorbeeld op zandgronden: de te laag beoordeelde droogtestress in WWL 1.0.0 (BOFEK2012 + Staringreeks 2001) was voor een groot deel opgeheven in WWL 2.0.0 (BOFEK2012 profielen + Staringreeks2018). Met het verschijnen van BOFEK2020 zullen dus ook nieuwe WWL-berekeningen nodig zijn, omdat een groot

---

aantal andere standaardprofielen als BOFEK2020-eenheid is aangeduid die niet in BOFEK2012 zaten. Hetzelfde geldt voor andere modellen die gebruikmaakten van BOFEK2012.

In de inleiding is aangegeven dat veengronden en moerige gronden als gevolg van afbraak (mineralisatie van het organische materiaal) veranderen. Verder zijn in Flevoland, Noord- en Zuid-Holland zavel- kleigronden van karakter veranderd als gevolg van verdere rijping. Dat betekent dat over een aantal jaar de bodemkaart een update zal krijgen. Omdat er jaarlijks in het kader van de BRO nieuwe bodemfysische brongegevens worden verzameld, zal over een aantal jaar de Staringreeks een update ondergaan. Het is dus sterk aan te bevelen dat bij een update van zowel de bodemkaart als de Staringreeks ook de BOFEK hierbij opnieuw af te leiden. Het verwerken van veranderingen in de bodemkaart is deels handwerk. Echter, we verwachten dat de veranderingen van de bodems niet zullen leiden tot veranderingen in de beschrijving van de 368 standaardprofielen. Updates van de Staringreeks kunnen goed geautomatiseerd worden conform de werkwijze in Heinen et al. (2018); hiervoor moeten nog wel scripts vastgelegd worden. De afleiding van een nieuwe BOFEK kan volgens de in dit rapport beschreven scripts uitgevoerd worden.

---

# Literatuur

- Calinski, T. & J. Harabasz. 1974. A dendrite method for cluster analysis, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 3:1, 1-27. <https://doi.org/10.1080/03610927408827101>
- De Jong van Lier, Q., Dourado Neto, D., & Metselaar, K. 2009. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten-Mualem type soils. *Water Resources Research*, 45(2), W02422. doi:10.1029/2008wr006938
- De Jong van Lier, Q., van Dam, J.C., Metselaar, K., de Jong, R., & Duijnisveld, W.H.M. 2008. Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential Approach. *Vadose Zone Journal*, 7(3), 1065-1078. doi:10.2136/vzj2007.0083
- De Vries, F. 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Rapport 654, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- De Willigen, P., & M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. diss. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/202228>
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Dexter, A.R. & E.A. Czyz. 2007. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degradation & Development* 18: 369-381. DOI: 10.1002/ldr.779.
- Hartigan, J. A. & Wong, M.A. 1979. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28, 100-108. doi: 10.2307/2346830.
- Haverkamp, R., F.J. Leij, C. Fuentes, A. Siortino & P.J. Ross. 2005. Soil water retention: 1. Introduction of a shape index. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1881-1890.
- Heinen, M. 2001. FUSSIM2: Brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21:285-296. doi:10.1051/agro:2001124
- Heinen, M. G. Bakker, H. Wösten, 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks; update 2018. Rapport 2978, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, & P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.
- Michel, N. & M. Stoitsov. 2008. Fast computation of the Gauss hypergeometric function with all its parameters complex with application to the Pöschl-Teller-Ginocchio potential wave functions. *Computer Physics Communications* 178 (7): 535-551.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77. The art of scientific computing*, second edition. Cambridge University Press.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Raats, P.A.C. 1970. Steady infiltration from line sources and furrows. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 709-714.
- Steur, G.G.L. & W. Heijink, 1991. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Algemene begrippen en indelingen; 4<sup>e</sup> uitgave. Staring Centrum. Wageningen.
- Thorndike, R.L. 1953. Who belongs in the family? *Psychrometika* 18(4): 267-276.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 892-898.
- Van Walsum, P.E.V. & A.A. Veldhuizen. 2011. MetaSWAP\_V7\_2\_0. Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. Werkdocument 276, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/193958>
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw (M. Mulder, M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Heinen et al.). 2018. Waterwijzer Landbouw: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. Rapport 2018-48. STOWA, Amersfoort.

---

<http://www.waterwijzer.nl/Upload/waterwijzer/Publicaties/STOWA%202018-48%20WWL%20defversie.pdf>

- Wolfram Research, Inc. 2015. Mathematica, Version 10.3, Champaign, IL.
- Wösten, J.H.M. 1987. Beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks met analytische functies Stiboka rapport nummer 2019, Stiboka, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., M.H. Bannink & J. Beuving. 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. ICW-rapport 18 (STIBOKA-rapport 1932), ICW, Wageningen (herziene versie van ICW-rapport uit 1986).
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman & J. Stolte. 1994. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994. Staring Centrum Technisch Document 18, SC-DLO, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks Vernieuwde uitgave 2001. Alterra rapport 153, Alterra, Wageningen.
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers & A. Bolman. 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387, Alterra, Wageningen.

# Bijlage 1 Berekening ${}_2F_1$ -functie

Michel & Stoitsov (2008) beschrijven hoe de hypergeometrische functie  ${}_2F_1[a,b,c;d]$  zeer nauwkeurig berekend kan worden via complexe getallen. Zij hebben hun modelcode in Fortran beschikbaar gesteld via <http://cpc.cs.qub.ac.uk/summaries/AEAE> (geverifieerd: 29-10-2020). Hiervan is in het kader van dit project een DLL gemaakt zodat deze vanuit andere software kan worden aangeroepen. Hierbij hoeft de gebruiker geen rekening te houden met het aanleveren van complexe getallen.

Het bronbestand hyp\_2F1.f90 is uitgebreid met een extra subroutine die het interface vormt tussen de aanroep en de feitelijk berekening in hyp\_2F1. Omdat de functie in dit project vanuit R wordt aangeroepen, is de Fortran-code gecompileerd vanuit R via het commando

```
R CMD SHLIB hyp_2F1.f90
```

Dit levert dan de DLL hyp\_2F1.dll. Vanuit een R script kan dan  ${}_2F_1$  voor de bewuste parameters berekend worden.

*P*-index

Definitie

$$P = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d(\ln(\theta))}{d(\ln(h))} d\theta = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{h(\theta)C(\theta)}{\theta} d\theta$$

Omdat  $d(\ln(\theta)) = d\theta/\theta$  en  $d(\ln(h)) = dh/h$  en  $d\theta/dh = C$

$$P = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d(\ln(\theta))}{d(\ln(h))} d\theta = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{hd\theta}{\theta dh} d\theta = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{h(\theta)C(\theta)}{\theta} d\theta$$

Voor het gemak transformeren we  $\theta$  naar  $S = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$  zodat (NB:  $d\theta = (\theta_s - \theta_r)dS$ )

$$P = \int_0^1 \frac{h(S)C(S)}{\theta_r + (\theta_s - \theta_r)S} dS$$

Met

$$h(S) = \frac{1}{\alpha} (S^{-1/m} - 1)^{1-m}$$

en

$$C(S) = \frac{m}{1-m} \alpha (\theta_s - \theta_r) S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m$$

volgt

$$P = \frac{m}{1-m} \int_0^1 \frac{(S^{-1/m} - 1)^{1-m} S^{1/m} (1 - S^{1/m})^m}{T + S} dS, \quad \text{met } T = \frac{\theta_r}{(\theta_s - \theta_r)}$$

Voor het gemak passen we de transformatie  $y = S^{1/m}$  toe zodat (NB  $dS = my^{m-1}dy$ )

---


$$P = \frac{m^2}{1-m} \int_0^1 \frac{(y^{-1}-1)^{1-m} y^m (1-y)^m}{T+y^m} dy = \frac{m^2}{1-m} \int_0^1 \frac{y^m y^{m-1} (1-y)^m}{T+y^m} dy$$

Volgens Mathematica is de oplossing voor deze laatste uitdrukking te geven als

$$P = \frac{m}{1-m^2} \left( (1+m)T \ln \left( 1 + \frac{1}{T} \right) - m {}_2F_1 \left[ 1, 1 + \frac{1}{m}, 2 + \frac{1}{m}; -\frac{1}{T} \right] - 1 \right)$$

Voor de speciale situatie dat  $T = 0$  ( $\theta_r = 0$ ) wordt dit

$$P = \frac{m}{1-m^2}$$

## Bijlage 2 Tijdstippen verdampingsreductie en stationaire infiltratie

Naast de in de hoofdtekst genoemde fysische kengetallen, die alle gebaseerd zijn op de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken (en rechtstreeks berekenbaar zijn), zijn twee nieuwe kengetallen benoemd die zijn afgeleid voor meer dynamische omstandigheden. Het betreft:

- Het tijdstip wanneer een bodemprofiel niet meer aan een bepaalde verdampingsvraag kan voldoen;
- Het tijdstip waarop bij continue neerslag de drukhoogte aan maaiveld niet meer verandert.

Deze worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht.

### Tijdstip verdampingsreductie

Via SWAP-simulatie wordt het 120 cm bodemprofiel onderworpen aan een constante verdampingsvraag ( $E_{pot}$ ). Het profiel is initieel in hydrostatisch evenwicht met een grondwaterstand ( $G$ ). In het vooronderzoek zijn twee waarden voor  $G$  beschouwd: 60 en 10 cm -mv; en drie waarden voor  $E_{pot}$ : 2, 5 en 10 mm  $d^{-1}$ . De simulatie werd gestopt op het moment dat de maximaal mogelijke opwaartse flux aan maaiveld volgens Darcy kleiner werd berekend dan  $E_{pot}$ . Het tijdstip waarop dit gebeurde, werd bewaard. In enkele gevallen zal de Darcy maximale opwaartse flux steeds groter zijn dan  $E_{pot}$ . In dat geval werd de simulatie na 365 dagen gestopt. Tabel B2-1 geeft een overzicht van een aantal profielen waar geen tijdstip van verdampingsreductie werd verkregen.

**Tabel B2-1** Aantal profielen waarvoor geen tijdstip verdampingsreductie binnen 1 jaar werd verkregen voor combinaties met twee grondwaterstanden en drie opgelegde verdampingsfluxen.

	2 mm $d^{-1}$	5 mm $d^{-1}$	10 mm $d^{-1}$
<b>120 cm -mv</b>	99	7	6
<b>60 cm -mv</b>	247	117	78

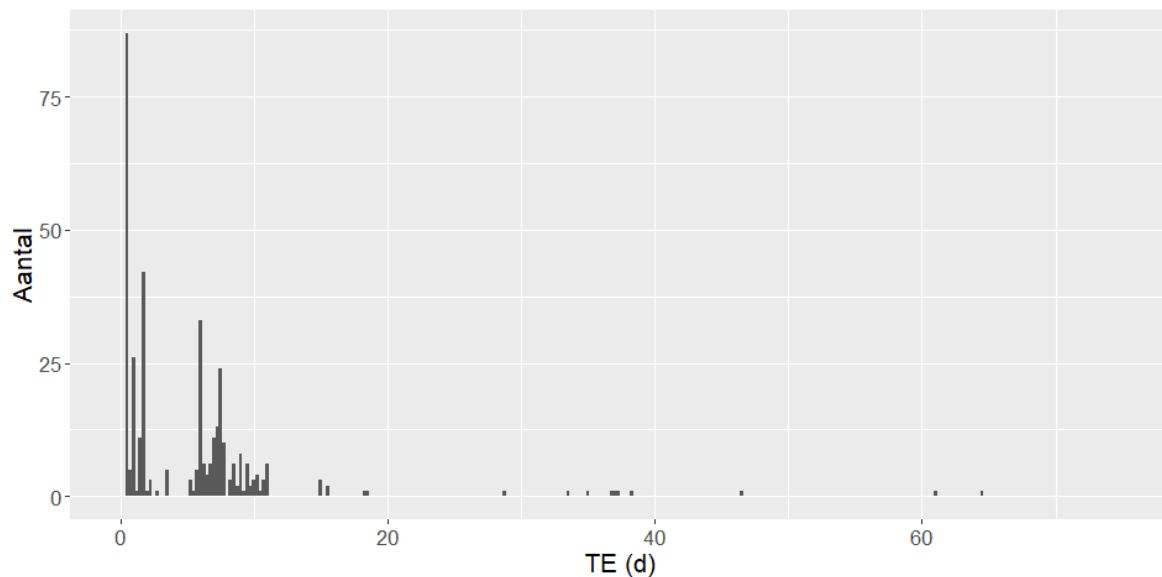
Het tijdstip verdampingsreductie was vooral toegevoegd om onderscheid te maken tussen profielen in hoe lang het profiel onder relatief droge omstandigheden nog water kon leveren; in dit geval voor verdamping aan maaiveld, maar dat zou dan ook gunstig voor gewasopname moeten zijn. Wanneer vaak voorkomt dat er geen tijdstip verdampingsreductie optreedt binnen een jaar, dan kan gesteld worden dat een dergelijke situatie (combinatie  $E_{pot}$  en  $G$ ) dus geen relevante informatie oplevert. Dat betekent dat de situaties met  $G = 60$  cm -mv en  $E_{pot} = 2$  mm  $d^{-1}$  niet beschouwd moeten worden. Blijven over de situaties met  $G = 120$  cm  $d^{-1}$  en  $E_{pot} = 5$  of 10 mm  $d^{-1}$ . Omdat de verkregen tijdstippen voor beide situaties sterk gecorreleerd zijn (0.92), kan met 1 situatie worden volstaan. Omdat  $E_{pot} = 10$  mm  $d^{-1}$  voor Nederlandse omstandigheden niet realistisch is, wordt deze dus niet beschouwd.

Tabel B2-2 geeft samenvatting van de tijdstippen en Figuur B2-1 geeft de verdeling van alle tijdstippen (exclusief  $TE = 365$  d) als een histogram met klassebreedte 0.25 d voor de situatie met  $G = 120$  cm -mv en  $E_{pot} = 5$  mm  $d^{-1}$ .

**Tabel B2-2** Samenvatting van de gesimuleerde tijdstippen verdampingsreductie.

Minimum	Q 25%	Mediaan	Gemiddelde	Q 75%	Maximum
0.066	0.646	5.353	12.214	7.455	365





**Figuur B2-1** Verdeling tijdstip verdampingsreductie voor alle 368 bodemprofielen voor de situatie met grondwaterstand op 120 cm -mv en  $E_{pot} = 5 \text{ mm d}^{-1}$ ; klassebreedte is 0.25 d, en 7 waarden bij  $TE = 365 \text{ d}$  zijn niet getoond.

### Tijdstip stationaire infiltratie

Via SWAP-simulatie wordt het 120 cm bodemprofiel onderworpen aan een constante bui (R). Het profiel is initieel in hydrostatisch evenwicht met een grondwaterstand (G). In het vooronderzoek zijn twee waarden voor G beschouwd: 60 en 10 cm -mv, en drie waarden voor R: 5, 10 en 25 mm d<sup>-1</sup>. De simulatie werd gestopt op het moment dat de drukhoogte aan maaiveld constant wordt. Het tijdstip waarop dit gebeurde, werd bewaard. In diverse gevallen zal er echter plasvorming gaan optreden. In dat geval werd de simulatie gestopt en werd het tijdstip van plasvorming gehanteerd. Tabel B2-3 geeft een overzicht van een aantal profielen waar geen tijdstip van verdampingsreductie werd verkregen.

**Tabel B2-3** Aantal profielen waar tijdstip van plasvorming werd gehanteerd; voor combinaties met twee grondwaterstanden en drie opgelegde buien.

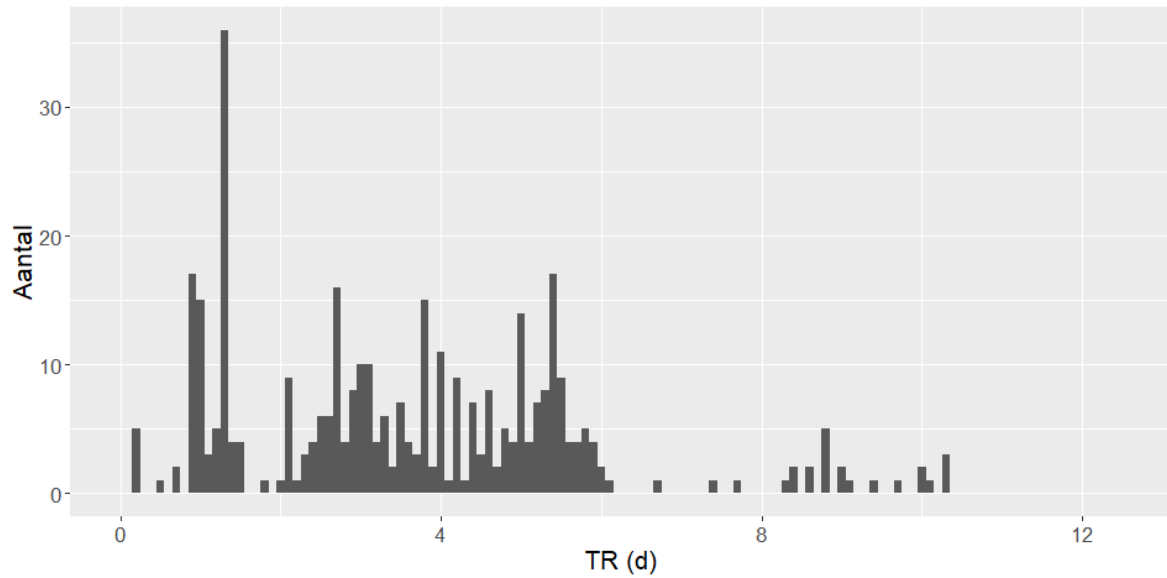
	5 mm d <sup>-1</sup>	10 mm d <sup>-1</sup>	25 mm d <sup>-1</sup>
<b>120 cm -mv</b>	5	10	207
<b>60 cm -mv</b>	5	18	222

Het tijdstip waarop stationaire infiltratie wordt gesimuleerd, is gekozen om na te gaan of profielen makkelijk dan wel moeilijk een bepaalde bui kunnen verwerken. Uiteraard geven grotere buien vaak problemen in de praktijk en zal er een groter onderscheid tussen de bodemprofielen gaan ontstaan doordat sommige profielen de bui wel kunnen verwerken en andere niet (plasvorming, oppervlakkige afvoer). Alleen bij heel lage bui-intensiteiten zal er in geen enkel profiel plasvorming ontstaan (gegeven de huidige gekozen situatie), maar dat is een minder interessante situatie. Bij heel grote buien zal er bij relatief veel profielen plasvorming optreden, maar niet bij alle. Aanvullend op genoemde simulaties is ook gekeken naar  $G = 120 \text{ cm -mv}$  en  $R = 50 \text{ mm d}^{-1}$  (ca. een bui 1x per 10 jaar): hierbij werd bij 235 profielen plasvorming gemeld en de overige 133 profielen konden die bui dus verwerken. Er zou een onrealistisch hoge bui beschouwd moeten worden om in alle profielen plasvorming te laten ontstaan. Dat is verder niet uitgezocht. Uiteraard zijn de gevonden tijdstippen bij de twee waarden voor G verschillend gegeven een bui, maar de correlatie was steeds erg groot. Dat geeft aan dat niet beide G-waarden beschouwd hoeven te worden. Hier kiezen we voor  $G = 120 \text{ cm -mv}$ . Om zoveel mogelijk tijdstippen van stationaire infiltratie in de data te hebben, kiezen we hier voor  $R$  is dan 10 mm d<sup>-1</sup> (NB De correlatie tussen de tijdstippen voor  $R = 5$  en  $R = 10 \text{ mm d}^{-1}$  was 0.71, hetgeen relatief hoog is, zodat het niet zinvol werd geacht om beide situaties te beschouwen.)

Tabel B2-4 geeft een samenvatting van de tijdstippen en Figuur B2-2 geeft de verdeling van alle tijdstippen als een histogram met klassebreedte 0.1 d voor de situatie met  $G = 120 \text{ cm -mv}$  en  $R = 10 \text{ mm d}^{-1}$ .

**Tabel B2-4** Samenvatting van de gesimuleerde tijdstippen stationaire infiltratie.

Minimum	Q 25%	Mediaan	Gemiddelde	Q 75%	Maximum
0.1986	1.723	3.458	3.617	5.041	10.291



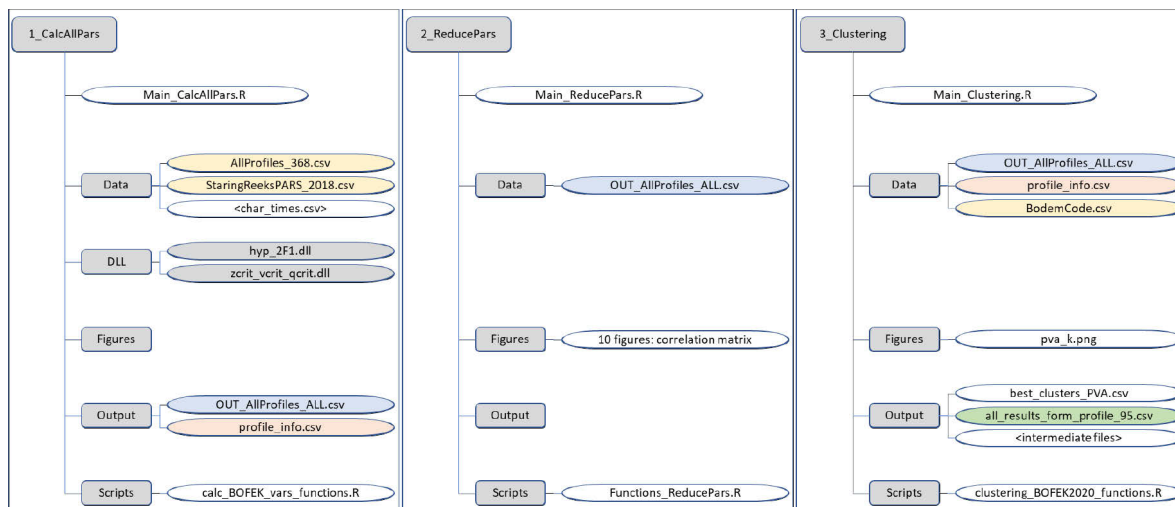
**Figuur B2-2** Verdeling tijdstip stationaire infiltratie voor alle 368 bodemprofielen voor de situatie met grondwaterstand op 120 cm -mv en  $R = 10 \text{ mm d}^{-1}$ ; klassebreedte is 0.1 d.

# Bijlage 3 R-scripts gebruikt bij afleiding BOFEK2020

Zoals aangegeven in de hoofdtekst zijn in dit onderzoek drie deelstappen onderscheiden:

1. berekenen fysische kengetallen;
2. berekenen correlatiematrix om de lijst met kengetallen te reduceren;
3. vaststellen clusterindeling.

Tussenstap 2 was nodig omdat vooraf niet was vastgesteld welke fysische kengetallen gebruikt zouden worden. Indien in de toekomst dezelfde fysische kengetallen worden gebruikt, dan kan stap 2 overgeslagen worden en kan stap 3 rechtstreeks na stap 1 worden uitgevoerd. Bij elke stap geldt een vaste folderstructuur. In de 'root' staat het R-hoofdsript en het R-script met de inhoudelijke functies staat in subfolder ./Scripts. De benodigde invoer staat in subfolder ./Data. De uitvoer wordt weggeschreven naar subfolders ./Output (tekst) en/of ./Figures (figuur). Bij stap 1 is ook een subfolder ./DLL nodig waarin een tweetal DLL's aanwezig moeten zijn, namelijk hyp\_2F1.dll en zcrit\_vcrit\_qcrit.dll. Onderstaand diagram geeft de opbouw visueel weer. Bij stap 1 staan in de folder ./Data de twee belangrijkste invoer tabellen: AllProfiles\_368.csv en StaringReeksPARS\_2018.csv. Er worden twee uitvoerbestanden aangemaakt welke handmatig naar de ./Data folders voor stappen 2 en 3 moeten worden gekopieerd: OUT\_AllProfiles\_ALL.csv en profile\_info.csv. Stap 2 staat verder op zichzelf. In Stap 3 worden de figuur ./Figures/pva\_k.png gegeven (zie Figuur 4 in hoofdtekst) en enkele hulpfiguren niet nader toegelicht in de tekst. In de folder ./Output is het bestand all\_results\_form\_profile\_95.csv de uiteindelijke BOFEK2020 tabel (zie Bijlage 5). Deze wordt ook in gereduceerde vorm gegeven en in gereduceerde vorm per hoofdgrondsoort (niet verder gebruikt).



Op de webpagina <https://www.wur.nl/nl/show/Bodemfysische-Eenhedenkaart-BOFEK2020.htm> zijn de openbare R-scripts van BOFEK2020 te downloaden.

De R-scripts zijn ontwikkeld en uitgevoerd onder R-versie 4.0.2; details over gebruikte packages staan in onderstaand tekstblok.

**R-script berekening fysische kengetallen.**

```
> devtools::session_info()
- Session info -----
  setting value
  version R version 4.0.2 (2020-06-22)
  os      Windows 10 x64
  system x86_64, mingw32
  ui      RStudio
  language (EN)
  collate English_United_States.1252
  ctype  English_United_States.1252
  tz      Europe/Berlin
  date    2020-11-30

- Packages -----
  package * version date lib source
  assertthat 0.2.1 2019-03-21 [1] CRAN (R 4.0.2)
  backports 1.2.0 2020-11-02 [1] CRAN (R 4.0.2)
  broom 0.7.2 2020-10-20 [1] CRAN (R 4.0.2)
  callr 3.5.1 2020-10-13 [1] CRAN (R 4.0.2)
  cellranger 1.1.0 2016-07-27 [1] CRAN (R 4.0.2)
  cli 2.2.0 2020-11-20 [1] CRAN (R 4.0.2)
  cluster * 2.1.0 2019-06-19 [2] CRAN (R 4.0.2)
  colorspace 2.0-0 2020-11-11 [1] CRAN (R 4.0.2)
  crayon 1.3.4 2017-09-16 [1] CRAN (R 4.0.2)
  DBI 1.1.0 2019-12-15 [1] CRAN (R 4.0.2)
  dbplyr 2.0.0 2020-11-03 [1] CRAN (R 4.0.2)
  desc 1.2.0 2018-05-01 [1] CRAN (R 4.0.2)
  devtools 2.3.2 2020-09-18 [1] CRAN (R 4.0.2)
  digest 0.6.27 2020-10-24 [1] CRAN (R 4.0.3)
  dplyr * 1.0.2 2020-08-18 [1] CRAN (R 4.0.2)
  ellipsis 0.3.1 2020-05-15 [1] CRAN (R 4.0.2)
  fansi 0.4.1 2020-01-08 [1] CRAN (R 4.0.2)
  forcats * 0.5.0 2020-03-01 [1] CRAN (R 4.0.2)
  fs 1.5.0 2020-07-31 [1] CRAN (R 4.0.2)
  generics 0.1.0 2020-10-31 [1] CRAN (R 4.0.3)
  ggplot2 * 3.3.2 2020-06-19 [1] CRAN (R 4.0.2)
  glue 1.4.2 2020-08-27 [1] CRAN (R 4.0.2)
  gtable 0.3.0 2019-03-25 [1] CRAN (R 4.0.2)
  haven 2.3.1 2020-06-01 [1] CRAN (R 4.0.2)
  hms 0.5.3 2020-01-08 [1] CRAN (R 4.0.2)
  httr 1.4.2 2020-07-20 [1] CRAN (R 4.0.2)
  jsonlite 1.7.1 2020-09-07 [1] CRAN (R 4.0.2)
  lifecycle 0.2.0 2020-03-06 [1] CRAN (R 4.0.2)
  lubridate 1.7.9.2 2020-11-13 [1] CRAN (R 4.0.2)
  magrittr 2.0.1 2020-11-17 [1] CRAN (R 4.0.3)
  memoise 1.1.0 2017-04-21 [1] CRAN (R 4.0.2)
  modelr 0.1.8 2020-05-19 [1] CRAN (R 4.0.2)
  munsell 0.5.0 2018-06-12 [1] CRAN (R 4.0.2)
  pillar 1.4.7 2020-11-20 [1] CRAN (R 4.0.2)
  pkgbuild 1.1.0 2020-07-13 [1] CRAN (R 4.0.1)
  pkgconfig 2.0.3 2019-09-22 [1] CRAN (R 4.0.2)
  pkgload 1.1.0 2020-05-29 [1] CRAN (R 4.0.2)
  prettyunits 1.1.1 2020-01-24 [1] CRAN (R 4.0.2)
  processx 3.4.4 2020-09-03 [1] CRAN (R 4.0.2)
  ps 1.4.0 2020-10-07 [1] CRAN (R 4.0.2)
  purrr * 0.3.4 2020-04-17 [1] CRAN (R 4.0.2)
  R6 2.5.0 2020-10-28 [1] CRAN (R 4.0.2)
  Rcpp 1.0.5 2020-07-06 [1] CRAN (R 4.0.2)
  readr * 1.4.0 2020-10-05 [1] CRAN (R 4.0.2)
  readxl 1.3.1 2019-03-13 [1] CRAN (R 4.0.2)
  remotes 2.2.0 2020-07-21 [1] CRAN (R 4.0.2)
  reprex 0.3.0 2019-05-16 [1] CRAN (R 4.0.2)
  rlang 0.4.9 2020-11-26 [1] CRAN (R 4.0.2)
  rprojroot 2.0.2 2020-11-15 [1] CRAN (R 4.0.2)
  rstudioapi 0.13 2020-11-12 [1] CRAN (R 4.0.2)
  rvest 0.3.6 2020-07-25 [1] CRAN (R 4.0.2)
  scales 1.1.1 2020-05-11 [1] CRAN (R 4.0.2)
  sessioninfo 1.1.1 2018-11-05 [1] CRAN (R 4.0.2)
  stringi 1.5.3 2020-09-09 [1] CRAN (R 4.0.2)
  stringr * 1.4.0 2019-02-10 [1] CRAN (R 4.0.2)
  testthat 3.0.0 2020-10-31 [1] CRAN (R 4.0.3)
  tibble * 3.0.4 2020-10-12 [1] CRAN (R 4.0.2)
  tidyr * 1.1.2 2020-08-27 [1] CRAN (R 4.0.2)
  tidyselect 1.1.0 2020-05-11 [1] CRAN (R 4.0.2)
  tidyverse * 1.3.0 2019-11-21 [1] CRAN (R 4.0.2)
  usethis 1.6.3 2020-09-17 [1] CRAN (R 4.0.2)
  vctrs 0.3.5 2020-11-17 [1] CRAN (R 4.0.3)
  withr 2.3.0 2020-09-22 [1] CRAN (R 4.0.2)
  xml2 1.3.2 2020-04-23 [1] CRAN (R 4.0.2)

[1] C:/R
[2] C:/Program Files/R/R-4.0.2/library
```

In onderstaande drie tekstblokken zijn de R-scripts gegeven. Voor elke situatie wordt eerst de main code gegeven. Onder de doorgetrokken lijn staat de code van de lokale functies die zijn gebruikt zoals die in de hoofdcode wordt geladen.

Ten slotte worden de drie basis-invoerbestanden vermeld.

**R-script berekening fysische kengetallen.**

```
# calculate BOFEK variables - all functions
#
# Functions present:
# - check_basic_folder_structure
# - calc_Table_ext
# - watcd
# - condd
# - calc_c_kd
# - calc_avwat
# - zcrit_vcrit
# - qcrit
# - f1
# - f2
# - int_wrc
# - int_hcc
# - sp_index
# - xlay

# Check presence of several folders; Data, DLL and Scripts are obligatory; others are created if not present
check_basic_folder_structure <- function() {
  folders <- c("Data", "DLL", "Documents", "Figures", "Output", "Scripts")
  # Data and Scripts MUST be present
  if (!dir.exists(folders[1])) {
    print("Folder Data must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  if (!dir.exists(folders[2])) {
    print("Folder DLL must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  if (!dir.exists(folders[6])) {
    print("Folder Script must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  for (i in 3:5) {
    if (!dir.exists(folders[i])) dir.create(folders[i])
  }
}

# For all soil profiles a summary as made coupling layer numbers - SR2018 units
calc_table_ext <- function(isp, mlay, all_profiles, isoil) {
  tab_ext <- all_profiles[, c(1, 2, 3)]
  add_names <- c("B01", "B02", "B03", "B04", "B05", "B06", "B07", "B08", "B09",
    "B10", "B11", "B12", "B13", "B14", "B15", "B16", "B17", "B18",
    "O01", "O02", "O03", "O04", "O05", "O06", "O07", "O08", "O09",
    "O10", "O11", "O12", "O13", "O14", "O15", "O16", "O17", "O18")
  tab_ext[add_names] <- ""
  for (i in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      if (isoil[i, j] > 0) {
        tab_ext[i, 3 + isoil[i, j]] <- paste0(tab_ext[i, 3 + isoil[i, j]], j)
      }
    }
    for (k in 4:39) {
      str <- tab_ext[i, k]
      il <- nchar(str)
      if (il > 3) {
        t1 <- as.numeric(substring(str, 1, 1))
        t2 <- as.numeric(substring(str, il, il))
        if ((t2 - t1 + 1) == il) tab_ext[i, k] <- paste0(t1, "_", t2)
      }
      if (nchar(tab_ext[i, k]) > 2) print(tab_ext[i, k])
    }
  }
  return(tab_ext)
}

# Water retention characteristic according to Van Genuchten (1980)
# input:
# h pressure head (cm); must be negative for unsaturated conditions
# is soil type code which equals row number in mvg
# mvg database with mvg parameters (columns) for different soil types (rows)
watcd <- function(h, is, mvg) {
  # if positive or zero pressure head then saturation
  if (h >= 0) {
    # saturated
    watcd <- mvg[is, "wcs"]
  } else {
    # compute
    wcr <- mvg[is, "wcr"]
    wcs <- mvg[is, "wcs"]
    alpha <- mvg[is, "alpha"]
    n <- mvg[is, "npar"]
    m <- 1 - 1 / n
    watcd <- (wcs - wcr) * (1 + (alpha * abs(h))^n)^(-m) + wcr
  }
  return(watcd)
}

# Hydraulic conductivity characteristic according to Mualem (1976) - Van Genuchten (1980)
# input:
# h pressure head (cm); must be negative for unsaturated conditions
# is soil type code which equals row number in mvg
# mvg database with mvg parameters (columns) for different soil types (rows)
condd <- function(h, is, mvg) {
  if (h >= 0) {
    # saturated
    condd <- mvg[is, "ksfit"]
  } else {
    # compute
    alpha <- mvg[is, "alpha"]
    n <- mvg[is, "npar"]
    m <- 1 - 1 / n
    lam <- mvg[is, "lambda"]
    ks <- mvg[is, "ksfit"]
    ah <- alpha * abs(h)
    ahn <- ah^n
    ahnm <- (1 + ahn)^m
    condd <- ks * (ahnm - ah^(n - 1))^2 / (ahnm^(lam + 2))
  }
  return(condd)
}

#-- Calculate the c- and kd-parameters
# c = SUM[dz(i)/ksat(i)] over all layers
# kd = SUM[dz(i)*ksat(i)] over all layers
calc_c_kd <- function(isp, mlay, isoil, dz, mvg, bofek_vars) {
  bofek_vars$c <- 0
  bofek_vars$kd <- 0
  for (i in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      is <- isoil[i, j]
```

```

    if (is > 0) {
      ksat <- mvg$ksfit[is]
      bofek_vars$C[i] <- bofek_vars$C[i] + dz[i, j] / ksat
      bofek_vars$KD[i] <- bofek_vars$KD[i] + dz[i, j] * ksat
    } else {
      break
    }
  }
}
return(bofek_vars)
}

#-- Available water content in root zone (1,2,12) and in subsoil (3,4,34)
calc_avwat <- function(isp, mlay, h01, h04, h16, zroot, isoil, z, dz,
                      mvg, bofek_vars) {
  bofek_vars$Wlrz <- 0
  bofek_vars$W2rz <- 0
  bofek_vars$W1sub <- 0
  bofek_vars$W2sub <- 0
  for (i in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      is <- isoil[i, j]
      if (is > 0) {
        wc01 <- watcd(h01, is, mvg)
        wc04 <- watcd(h04, is, mvg)
        wc16 <- watcd(h16, is, mvg)
        if (z[i, j] > zroot) {
          if (j == 1) {
            bofek_vars$Wlrz[i] <- (wc01 - wc04) * zroot
            bofek_vars$W2rz[i] <- (wc04 - wc16) * zroot
          } else {
            bofek_vars$Wlrz[i] <- bofek_vars$Wlrz[i] + (wc01 - wc04) * (zroot - z[i, j] - 1)
            bofek_vars$W2rz[i] <- bofek_vars$W2rz[i] + (wc04 - wc16) * (zroot - z[i, j] - 1)
          }
          break
        } else {
          bofek_vars$Wlrz[i] <- bofek_vars$Wlrz[i] + (wc01 - wc04) * dz[i, j]
          bofek_vars$W2rz[i] <- bofek_vars$W2rz[i] + (wc04 - wc16) * dz[i, j]
        }
      }
    }
  }
  # cannot in previous for-loop, because of presence of break statement
  for (j in 1:mlay) {
    is <- isoil[i, j]
    if (is > 0) {
      wc01 <- watcd(h01, is, mvg)
      wc04 <- watcd(h04, is, mvg)
      wc16 <- watcd(h16, is, mvg)
      bofek_vars$W1sub[i] <- bofek_vars$W1sub[i] + (wc01 - wc04) * dz[i, j]
      bofek_vars$W2sub[i] <- bofek_vars$W2sub[i] + (wc04 - wc16) * dz[i, j]
    }
  }
  bofek_vars$W1sub <- bofek_vars$W1sub - bofek_vars$W1rz
  bofek_vars$W2sub <- bofek_vars$W2sub - bofek_vars$W2rz

  bofek_vars$Wtrz <- bofek_vars$Wlrz + bofek_vars$W2rz
  bofek_vars$Wtsub <- bofek_vars$W1sub + bofek_vars$W2sub
  return(bofek_vars)
}

#-- zcrit and Vcrit for a given upward flux of water
zcrit_vcrit <- function(use_dll, skiptop, dh_def, flux, hfixed, mvg,
                      zroot, zlow, isp, mlay, isoil, z, dz) {
  zv <- data.frame(matrix(ncol = 2, nrow = isp))

  if (use_dll) {
    print("DLL version of zcrit and Vcrit calculation may take several seconds ...")
    # write exchange file
    fexch <- "to_zcrit_vcrit.dat"
    if (file.exists(fexch)) file.remove(fexch)
    ffrom <- "from_zcrit_vcrit.dat"
    if (file.exists(ffrom)) file.remove(ffrom)

    cat(paste(skiptop, " ", zroot, " ", zlow), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat(paste(flux, " ", dh_def, " ", hfixed), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat(paste(isp, " ", mlay, " ", nrow(mvg)), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)

    write.table(isoil[1:isp, ], file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
               quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)
    write.table(z[1:isp, ], file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
               quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)
    write.table(mvg, c(-1, -2), file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
               quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)

    # call DLL function
    dyn.load("./DLL/zcrit_vcrit_qcrit.dll")
    # must be lowercase !!!
    if (!is.loaded("zcrit_vcrit")) stop("error loading zcrit_vcrit from zcrit_vcrit_qcrit.dll")

    istat <- .Fortran("zcrit_vcrit", result = integer(1))$result
    dyn.unload("./DLL/zcrit_vcrit_qcrit.dll")

    # read results file
    zv <- read.table(ffrom)
    colnames(zv) <- c("zcrit", "vcrit")

    # remove exchange files
    if (file.exists(fexch)) file.remove(fexch)
    if (file.exists(ffrom)) file.remove(ffrom)
  } else {
    print("R version of zcrit and Vcrit calculation may take several minutes ...")
    pb <- txtProgressBar(min = 0, max = isp, style = 3)
    colnames(zv) <- c("zcrit", "vcrit")
    for (i in 1:isp) {
      setTxtProgressBar(pb, i)

      # some start values of layer and depth
      if (!skiptop) {
        j <- 1
        zmin <- 0
      } else {
        zmin <- zroot
      }
      for (j in 1:mlay) if (z[i, j] > zroot) break
    }

    # starting conditions

```

```

small <- 1.0E-12
tostop <- FALSE
sumz <- 0 # zcrit
sumv <- 0 # Vcrit
hh <- hfixed # initial h at bottom of root zone
hhlast <- hh
dh <- dh_def # default step size in h
zdepth <- z[I, j] - zmin # bottom depth of current layer
if (z[i, j] == zlow) zdepth <- 9999.99 # continue to below last supplied depth (as if last
# layer continues to great depth)

repeat {
  if (hhlast + dh >= 0) {
    # make sure last step in dh will result in hh = 0;
    # after z is calculated the computations can stop
    dh <- -hhlast
    tostop <- TRUE
  }

  # next hh and dz values
  hh <- hhlast + dh
  dz <- dh / (1 + flux / condd((hhlast + hh) * 0.5, isoil[i, j], mvg))

  if ((sumz + dz) - zdepth > small | dz > 1) {
    # don't want to pass layer boundary (or too large steps in dz): repeat with half dh
    # NB: due to non-linearity in K(h) we cannot revert to estimate dh based on known dz; so continue with
current iterations
    dh <- dh / 2
  } else {
    if (abs((sumz + dz) - zdepth) < small) {
      # very close to layer boundary: change towards new soil layer info
      j <- j + 1
      dh <- dh_def
      zdepth <- z[I, j] - zmin # bottom depth of new layer
      if (z[i, j] == zlow) zdepth <- 9999.99 # continue to below last supplied depth (as if last
# layer continues to great depth)
    }
    #print(hhlast)
    sumz <- sumz + dz
    wc <- watcd(hh, isoil[i, j], mvg)
    sumv <- sumv + (mvg[isoil[i, j], "wcs"] - wc) * dz
    hhlast <- hh # store current hh
  }
  if (tostop) break # we have reached h = 0, and final z-value (sumz) equals zcrit
} # repeat

# store result
zv[i, 1] <- sumz
zv[i, 2] <- sumv
}
}
return(zv)
}

#-- qcrit
qcrit <- function(use_dll, dh_def, fluxa, fluxb, hfixed, mvg, zroot, zlow,
  isp, mlay, isoil, z, dz) {

  zv <- data.frame(matrix(ncol = 2, nrow = isp))

  if (use_dll) {
    print("DLL version of qcrit calculation may take several tens of seconds ...")
    # write exchange file
    fexch <- "to_qcrit.dat"
    if (file.exists(fexch)) file.remove(fexch)
    ffrom <- "from_qcrit.dat"
    if (file.exists(ffrom)) file.remove(ffrom)

    cat(paste(zroot, " ", zlow), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat(paste(fluxa, " ", fluxb, " ", dh_def, " ", hfixed), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat(paste(isp, " ", mlay, " ", nrow(mvg)), file = fexch, sep = " ", append = TRUE)
    cat("\n", file = fexch, sep = " ", append = TRUE)

    write.table(isoil[1:isp, ], file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
      quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)
    write.table(z[1:isp, ], file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
      quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)
    write.table(mvg, c(-1, -2)], file = fexch, sep = " ", append = TRUE,
      quote = FALSE, row.names = FALSE, col.names = FALSE)

    # call DLL function
    dyn.load("./DLL/zcrit_vcrit_qcrit.dll")
    # must be lowercase !!!
    if (!is.loaded("qcrit")) stop("error loading qcrit from zcrit_vcrit_qcrit.dll")

    istat <- .Fortran("qcrit", result = integer(1))$result

    dyn.unload("./DLL/zcrit_vcrit_qcrit.dll")

    # read results file
    zv <- read.table(ffrom)
    colnames(zv) <- c("qcrit", "zcrit", "vcrit")

    # remove exchange files
    if (file.exists(fexch)) file.remove(fexch)
    if (file.exists(ffrom)) file.remove(ffrom)
  } else {
    print("R version of qcrit not (yet) implemented ...")
  }
  return(zv)
}

#-- help
f1 <- function(x, cm, nu) {
  # f1 <- res_hyp_2f1(-cm, nu - 1, nu, x^(1/cm))
  f1 <- .Fortran("res_hyp_2f1", a = as.double(-cm), b = as.double(nu - 1),
    c = as.double(nu), x = as.double(x^(1 / cm)),
    result = double(1))$result
}

#-- help
f2 <- function(x, cm, nu) {
  # f2 <- res_hyp_2f1(cm, nu - 1, nu, x^(1/cm))
  f2 <- .Fortran("res_hyp_2f1", a = as.double(cm), b = as.double(nu - 1),
    c = as.double(nu), x = as.double(x^(1 / cm)),
    result = double(1))$result
}

#-- Integral of water retention characteristic
int wrc <- function(zlow, h00, h01, h04, h16, isoil, dz, mvg, bofek vars) {

```

```

dyn.load("./DLL/hyp_2F1.dll")
# must be lowercase !!!
if (!is.loaded("res_hyp_2f1")) stop("error loading res_hyp_2f1 from hyp_2F1.dll")

bofek_vars$IntW0 <- 0
bofek_vars$IntWt <- 0
bofek_vars$IntW1 <- 0
bofek_vars$IntW2 <- 0
for (I in 1:isp) {
  for (j in 1:mlay) {
    if (isoil[i, j] == 0) break
    is <- isoil[i, j]
    mywcr <- mvg$wcr[is]
    mywcs <- mvg$wcs[is]
    mya <- mvg$alpha[is]
    myn <- mvg$npar[is]
    mym <- 1 - 1 / myn
    res0 <- .Fortran("res_hyp_2f1",
      a = as.double(mym), b = as.double(1 / myn),
      c = as.double(1 + 1 / myn),
      x = as.double(-(mya * abs(h00))^myn),
      result = double(1))$result
    res1 <- .Fortran("res_hyp_2f1",
      a = as.double(mym), b = as.double(1 / myn),
      c = as.double(1 + 1 / myn),
      x = as.double(-(mya * abs(h01))^myn),
      result = double(1))$result
    res2 <- .Fortran("res_hyp_2f1",
      a = as.double(mym), b = as.double(1 / myn),
      c = as.double(1 + 1 / myn),
      x = as.double(-(mya * abs(h04))^myn),
      result = double(1))$result
    res3 <- .Fortran("res_hyp_2f1",
      a = as.double(mym), b = as.double(1 / myn),
      c = as.double(1 + 1 / myn),
      x = as.double(-(mya * abs(h16))^myn),
      result = double(1))$result
    myg0 <- abs(h00) * (mywcr + (mywcs - mywcr) * res0)
    myg1 <- abs(h01) * (mywcr + (mywcs - mywcr) * res1)
    myg2 <- abs(h04) * (mywcr + (mywcs - mywcr) * res2)
    myg3 <- abs(h16) * (mywcr + (mywcs - mywcr) * res3)
    bofek_vars$IntW1[i] <- bofek_vars$IntW1[i] + (myg2 - myg1) * dz[i, j] / zlow
    bofek_vars$IntW2[i] <- bofek_vars$IntW2[i] + (myg3 - myg2) * dz[i, j] / zlow
    bofek_vars$IntWt[i] <- bofek_vars$IntWt[i] + (myg3 - myg1) * dz[i, j] / zlow
    bofek_vars$IntW0[i] <- bofek_vars$IntW0[i] + (myg3 - myg0) * dz[i, j] / zlow
  }
}
dyn.unload("./DLL/hyp_2F1.dll")
return(bofek_vars)
}

#-- Integral of hydraulic conductivity characteristic
int_hcc <- function(zlow, h00, h01, h04, h16, isoil, dz, mvg, bofek_vars) {
  dyn.load("./DLL/hyp_2F1.dll")
  # must be lowercase !!!
  if (!is.loaded("res_hyp_2f1")) stop("error loading res_hyp_2f1 from hyp_2F1.dll")

  bofek_vars$IntK0 <- 0
  bofek_vars$IntKt <- 0
  bofek_vars$IntK1 <- 0
  bofek_vars$IntK2 <- 0
  for (I in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      if (isoil[i, j] == 0) break
      is <- isoil[i, j]
      mya <- mvg$alpha[is]
      myn <- mvg$npar[is]
      mym <- 1 - 1 / myn
      myl <- mvg$lambda[is]
      myks <- mvg$ksfit[is]
      nu <- mym * (myl + 1)
      help <- myks * (1 - mym) / (mya * (nu - 1))

      # S and F at reference pressure head, here chosen to be 10^8
      sref <- (1 + (mya * 1.0E8)^myn)^(-mym)
      fref <- sref^(1 - 1 / mym + myl) * (f1(sref, mym, nu) + f2(sref, mym, nu) - 2)

      # S and phi at four selected pressure heads
      se0 <- (1 + (mya * abs(h00))^myn)^(-mym)
      se1 <- (1 + (mya * abs(h01))^myn)^(-mym)
      se2 <- (1 + (mya * abs(h04))^myn)^(-mym)
      se3 <- (1 + (mya * abs(h16))^myn)^(-mym)
      phi0 <- help * (se0^(1 - 1 / mym + myl) * (f1(se0, mym, nu) + f2(se0, mym, nu) - 2) - fref)
      phi1 <- help * (se1^(1 - 1 / mym + myl) * (f1(se1, mym, nu) + f2(se1, mym, nu) - 2) - fref)
      phi2 <- help * (se2^(1 - 1 / mym + myl) * (f1(se2, mym, nu) + f2(se2, mym, nu) - 2) - fref)
      phi3 <- help * (se3^(1 - 1 / mym + myl) * (f1(se3, mym, nu) + f2(se3, mym, nu) - 2) - fref)
      bofek_vars$IntK1[i] <- bofek_vars$IntK1[i] + (phi1 - phi2) * dz[i, j] / zlow
      bofek_vars$IntK2[i] <- bofek_vars$IntK2[i] + (phi2 - phi3) * dz[i, j] / zlow
      bofek_vars$IntKt[i] <- bofek_vars$IntKt[i] + (phi1 - phi3) * dz[i, j] / zlow
      bofek_vars$IntK0[i] <- bofek_vars$IntK0[i] + (phi0 - phi3) * dz[i, j] / zlow
    }
  }
  dyn.unload("./DLL/hyp_2F1.dll")
  return(bofek_vars)
}

#-- S- and P-index
sp_index <- function(zlow, isoil, dz, mvg, bofek_vars) {
  dyn.load("./DLL/hyp_2F1.dll")
  # must be lowercase !!!
  if (!is.loaded("res_hyp_2f1")) stop("error loading res_hyp_2f1 from hyp_2F1.dll")

  bofek_vars$Pindex <- 0
  bofek_vars$Sindex <- 0
  for (I in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      if (isoil[i, j] == 0) break
      is <- isoil[i, j]
      mywcr <- mvg$wcr[is]
      mywcs <- mvg$wcs[is]
      myn <- mvg$npar[is]
      mym <- 1 - 1 / myn
      if (mywcr > 0) {
        t <- mywcr / (mywcs - mywcr)
        t1 <- .Fortran("res_hyp_2f1", a = as.double(1), b = as.double(1 + 1 / mym),
          c = as.double(2 + 1 / mym), x = as.double(-1 / t), result = double(1))$result
        t2 <- t * log(1 + 1 / t)
        pp <- -mym / (1 - mym * mym) * ((1 + mym) * t2 - mym * t1 - 1)
      } else {
        pp <- mym / (1 - mym * mym)
      }
      ss <- (mywcs - mywcr) / (1 - mym) * (mym / (1 + mym))^(1 + mym)
      bofek_vars$Pindex[i] <- bofek_vars$Pindex[i] + pp * dz[i, j] / zlow
      bofek_vars$Sindex[i] <- bofek_vars$Sindex[i] + ss * dz[i, j] / zlow
    }
  }
}

```



```

}
}
dyn.unload("./DLL/hyp_2F1.dll")
return(bofek_vars)
}

#-- Xlay
xlay <- function(isoil, dz, bofek_vars) {
  bofek_vars$Xlay <- 0
  for (i in 1:isp) {
    for (j in 1:mlay) {
      if (isoil[i, j] > 0) {
        bofek_vars$Xlay[i] <- bofek_vars$Xlay[i] + dz[i, j] * isoil[i, j]
      } else {
        break
      }
    }
  }
  return(bofek_vars)
}
}

```

#### R-script berekening correlaties tussen de fysieke kengetallen.

```

# HEADER
#
# File: Main_ReducePars.R
# Date: 07-Oct-2020
# Created by: Marius Heinen, Wageningen Environmental Research
# Version: 1.0
#
# R version used: 4.0.2
# R packages used: corrplot (v. 0.84) (optional: factoextra)
#
# Input (./Data/):
#   csv data file with all hydro-physical properties (= output file from 1_CalcAllPars)
# Output (./Output/):
#   none
# Graphical output (./Figures/):
#   png files with correlation matrix
# Document output (./Documents/):
#   none
# Scripts (./Scripts/):
#   - Functions_ReducePars.R
# External DLL's used (./DLL/):
#   - none
#
packages <- c("corrplot")
if (length(setdiff(packages, rownames(installed.packages()))) > 0) {
  install.packages(setdiff(packages, rownames(installed.packages())))
}
library(corrplot) # For drawing colored correlation matrix (version 0.84)

# Working folder
curdir <- getwd()
setwd(curdir)

# Load local functions
source("./Scripts/Functions_ReducePars.R")

# Check basic folder structure
check_basic_folder_structure()

# Read input data
dat_inp <- read.csv("./Data/OUT_AllProfiles_ALL.csv")

# Based on all input data: plot of correlation matrix
make_plots(dat_inp, wi = 960, he = 960, te = "complete", ps = 16)

# Based on reduced set of input data: plot of correlation matrix
list_names <- append(colnames(dat_inp[, c(1:3)]),
  c("C", "W1rz", "W2rz", "Zcrit2", "Qcrit", "IntW0", "IntK0", "Pindex"))
dat_inp_2 <- dat_inp[, c(list_names)]
make_plots(dat_inp_2, wi = 480, he = 480, te = "small", ps = 20)

# Optional: PCA bi-plots based on reduced set of input data
do_pca <- FALSE
if (do_pca) {
  library(factoextra) # for PCA plots (only needed if do_PCA)
  make_PCA_plots(dat_inp_2, wi = 360, he = 360, ps = 36)
}

# END

# Functions present:
# - check_basic_folder_structure
# - make_plots
# - make_pca_plots

# Check presence of several folders; Data and Scripts are obligatory; others are created if not present
check_basic_folder_structure <- function() {
  folders <- c("Data", "Documents", "Figures", "Output", "Scripts")
  # Data and Scripts MUST be present
  if (!dir.exists(folders[1])) {
    print("Folder Data must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  if (!dir.exists(folders[5])) {
    print("Folder Script must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  for (i in 2:4) {
    if (!dir.exists(folders[i])) dir.create(folders[i])
  }
}

# Create plot of correlation matrix
make_plots <- function(dat_x, wi, he, te, ps) {

  path_fig <- "./Figures/"
  soils <- c("veen", "moer", "zand", "klei", "leem")

  # calculate (Pearson) correlation matrix between all data
  cor_mat <- cor(dat_x[, -c(1:3)])

  # draw nice colored matrix plot
  col <- colorRampPalette(c("red", "green", "blue"))(20)
  png(paste0(path_fig, "all_cor_", te, ".png"), width = wi, height = he, pointsize = ps)
  corrplot(cor_mat, method = "number", type = "lower",
    col = col, number.cex = 0.75, bg = "grey90", cl.length = 11)
}

```

```

# alternative: corrplot(cor.mat, method = "circle", type = "lower", col = col)
dev.off()

# correlation matrix per major soil type
for (i in 1:5) {

  # select subset (iHoofd)
  dat_reduced <- subset(dat_x, subset = dat_x[, "iHoofd"] == i, select = c(4:ncol(dat_x)))
  print(length(dat_reduced$C))

  # calculate correlation matrix between all data
  cor_mat <- cor(dat_reduced)

  # draw nice colored matrix
  png(paste0(path_fig, soils[i], "_cor_", te, ".png"), width = wi, height = he, pointsize = ps)
  corrplot(cor_mat, method = "number", type = "lower",
           col = col, number.cex = 0.75, bg = "grey90", cl.length = 11)
  #alternative: corrplot(cor_mat, method = "circle", type = "lower", col = col)
  dev.off()
}
}

# Optional: create PCA-plots
make_pca_plots <- function(dat_x, wi, he, ps) {

  # for all profiles
  dat_xxx <- dat_x
  res_pca <- prcomp(dat_xxx[, -c(1:3)], scale = TRUE)
  # compute PCA
  p <- fviz_pca_var(res_pca,
                  col.var = "contrib", # Color by contributions to the PC
                  gradient.cols = c("blue", "green", "red"),
                  repel = TRUE # Avoid text overlapping
  )
  png("./Figures/PCA_all.png", width = wi, height = he, pointsize = ps)
  print(p)
  dev.off()

  # for all main soil groups
  for (ii in 1:5) {
    dat_xxx <- subset(dat_x, subset = dat_x[, "iHoofd"] == ii)
    res_pca <- prcomp(dat_xxx[, -c(1:3)], scale = TRUE)
    # compute PCA
    p <- fviz_pca_var(res_pca,
                    col.var = "contrib", # Color by contributions to the PC
                    gradient.cols = c("blue", "green", "red"),
                    repel = TRUE # Avoid text overlapping
    )
    png(paste0("./Figures/PCA_", ii, ".png"), width = wi, height = he, pointsize = ps)
    print(p)
    dev.off()
  }
}
}

```

#### R-script clustering.

```

# HEADER
#
# File: Main Clustering.R
# Date: 07-OCT-2020
# Created by: Marius Heinen, Wageningen Environmental Research
# Version: 1.0
#
# R version used: 4.0.2
# R packages used: tidyverse, cluster, MASS
# NB: no check on up-to-date versions
#
# Input (./Data/):
#   csv data file with all hydro-physical properties (= output file from 1_CalcAllPars)
# Output (./Output/):
#   - best clusters PVA.csv
#   - results per major soil type (formatted and unformatted versions)
#   - results for all soil profiles (formatted and unformatted versions)
#   - results for all soil profiles including profil information (formatted)
#   - (optional: fanny output)
# Graphical output (./Figures/):
#   - png file with relationship pva versus k: pva.k.png
#   - silhouette plots per soil profile for chosen number of clusters (based on desired pva)
#   - (optional: Sammon plots per soil profile)
# Document output (./Documents/):
#   - none
# Scripts (./Scripts/):
#   - clustering_BOFEK2020_functions.R
# External DLL's used (./DLL/):
#   - none
#
packages <- c("tidyverse", "cluster")
if (length(setdiff(packages, rownames(installed.packages()))) > 0) {
  install.packages(setdiff(packages, rownames(installed.packages())))
}

library(tidyverse) # version 1.3.0; a.o. ggplot2
library(cluster)  # version 2.1.0; daisy, fanny

# source other R files
source("../Scripts/clustering_BOFEK2020_functions.R")
#check_basic_folder_structure ()

curdir <- getwd()
setwd(curdir)

# read all variables for all profiles
dat_all <- read.csv("../Data/OUT_AllProfiles_ALL.csv")

# Add BodemCode to all profiles; and move to front
bodem_code <- read.csv("../Data/BodemCode.csv")
dat_all <- merge(bodem_code, dat_all, by = "iProfile")

# for convenience: sort data by iBOFEK2012 and iProfile
dat_all <- dat_all[order(dat_all[, "iBOFEK2012"], dat_all[, "iProfile"]), ]

# Fill in the names of the variables to use in the final analysis
list_names <- c("C", "W1rz", "W2rz", "Zcrit2", "Qcrit", "IntW0", "IntK0", "Pindex")
skip_ncols <- which(colnames(dat_all) == list_names[1]) - 1

# help: names must correspond to soil type ihoofd = 1, 2, 3, 4, 5
nsoil <- 5
hoofd <- c("veen", "moer", "zand", "klei", "leem")

# subset of all variables, and for all major soil types
names_firstcols <- colnames(dat_all[, c(1:skip_ncols)])
dat <- dat_all[, c(names_firstcols, list_names)]

```

```

# Divide dat in sub-sets for all major soil types (ihoofd)
dat_list <- my_subset(dat, nsoil, hoofd)

# Manual scaling
# scaletype: 1: by mean and standard deviation; 2 by 1st and 3rd quantiles
scaletype <- 1
dat_list_scaled <- my_scaling(nsoil, dat_list, scaletype, skip_ncols, hoofd)

#--- PRE-ANALYSIS ---

# Define range of clusters per soil type used in cascade calculations
# to determine relationship pva(k)
kmin <- c(2, 2, 2, 2, 2) # minimum = 2; less than kmax
kmax <- c(25, 20, 60, 60, 15) # not exceeding number of profiles per soil type

# Do a cascade of k-means per soil type; make cascade plot and silhouette plots.
# For reproducibility: use always the same seed, maximum number of iterations allowed,
# and number of internal starts (the latter to minimize chance of finding local minima)
#
# Oct. 2020: tested with my_seed = 31415, my_iter = 100, my_nstarts = 100
# not sensitive to choice of my_seed (likely because of high value for my_nstarts)
#
my_seed <- 31415
my_max_iter <- 100
my_nstart <- 100

# Do clustering for all k values in the range [kmin..kmax] and determine
# the 'best' number of clusters base on desired percentage of variance accounted for
# NB: allowed values for pva are c(70,72.5,75,77.5,80,82.5,85,87.5,90,92.5,95)
# Oct. 2020: pva = 90 or 92.5
pva <- 95
do_all_plots <- FALSE
do_points <- FALSE
set.seed(my_seed)
kbest <- do_my_cascade_kmeans(nsoil, dat_list_scaled, skip_ncols, kmin, kmax,
                             my_max_iter, my_nstart, pva, hoofd, do_all_plots, do_points)

#--- FINAL ANALYSIS ---

# final clustering, and store results in data frames
do_sil_plots <- FALSE
dat_list <- do_clustering(nsoil, skip_ncols, dat_list, dat_list_scaled, kbest,
                        my_seed, my_max_iter, my_nstart, hoofd, do_sil_plots)

# write results
table_per_soil <- FALSE
do_write_cluster_results(dat_list, nsoil, hoofd, kbest, pva, list_names, table_per_soil, ordered = TRUE)

#--- E X T R A ---

do_sammon <- FALSE
do_fuzzy <- FALSE

# Sammon plots: 2D approximation of clustering results (in reality
# the data points are located in a multi-dimensional configuration, but
# the method of Sammon (1969) transforms (approximates) this into a 2D situation).
if (do_sammon) {
  library(MASS) # version 7.3-51.6; sammon
  do_sammon_plot(nsoil, dat_list, dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, hoofd)
}

# Fuzzy k-means
if (do_fuzzy) {
  rexp <- 1.1 # measure of fuzzyness
  do_fanny(dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, rexp, my_seed, 100 * my_max_iter, hoofd)
  rexp <- 1.5 # measure of fuzzyness
  do_fanny(dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, rexp, my_seed, 100 * my_max_iter, hoofd)
  rexp <- 2 # measure of fuzzyness
  do_fanny(dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, rexp, my_seed, 100 * my_max_iter, hoofd)
}

# END

```

---

```

# Functions used by Main_Clustering
#
# Functions present
# - check_basic_folder_structure
# - mycat (locally used)
# - myq (locally used)
# - myscaling (locally used)
# - my_subset
# - my_scaling
# - do_my_cascade_kmeans
# - do_clustering
# - do_write_cluster_results
# - do_sammon_plot (optionally called)
# - do_fanny (optionally called)

# Check presence of several folders; Data and Scripts are obligatory; others are created if not present
check_basic_folder_structure <- function() {
  folders <- c("Data", "Documents", "Figures", "Output", "Scripts")
  # Data and Scripts MUST be present
  if (!dir.exists(folders[1])) {
    print("Folder Data must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  if (!dir.exists(folders[5])) {
    print("Folder Script must be present. Please create first.")
    stop()
  }
  for (i in 2:4) {
    if (!dir.exists(folders[i])) dir.create(folders[i])
  }
}

# Help
mycat <- function(f, s) cat(s, file = f, append = TRUE, fill = TRUE)

# Determine 10, 50 and 90% quantiles
myq <- function(x) myq <- quantile(x, probs = c(0.1, 0.5, 0.9))

# Scaling: intrinsic (based on mean and standard deviation) (preferred) or via quantiles
myscaling <- function(scaletype, skip_ncols, datinp) {
  if (scaletype == 1) {
    dat_scaled <- scale(datinp[, -c(1:skip_ncols)])
  } else {
    m50 <- apply(X = datinp[, -c(1:skip_ncols)], MARGIN = 2, FUN = median)
    q <- apply(X = datinp[, -c(1:skip_ncols)], MARGIN = 2, FUN = myq)
    m25 <- q[1, ]
    m75 <- q[3, ]
    dat_scaled <- t((t(datinp[, -c(1:skip_ncols)]) - m50) / (m75 - m25))
  }
}

```

```

dat_scaled <- as.data.frame(dat_scaled)
dat_scaled <- cbind(datinp[, c(1:skip_ncols)], dat_scaled)
return(dat_scaled)
}

# Create subsets per major soil type and store in list dat_list
my_subset <- function(dat, nsoil, hoofd) {
  dat_list <- vector("list", nsoil)
  for (isoil in 1:nsoil) dat_list[[isoil]] <- subset(dat, subset = dat$Hoofd == isoil)
  names(dat_list) <- hoofd
  return(dat_list)
}

# Create scaled version of data per major soil type and store in list dat_list_scaled
my_scaling <- function(nsoil, dat_list, scaletype, skip_ncols, hoofd) {
  dat_list_scaled <- vector("list", nsoil)
  for (isoil in 1:nsoil) dat_list_scaled[[isoil]] <- myscaletype(scaletype, skip_ncols, dat_list[[isoil]])
  names(dat_list_scaled) <- hoofd
  return(dat_list_scaled)
}

# Perform k-means clustering for all major soil type for a range of clusters
# Plot result in PVA(k) plot, and determine best number of clusters based on desired PVA
# Return number of cluster belonging to pva: kbest
do_my_cascade_kmeans <- function(nsoil, dat_list_scaled, skip_ncols, kmin, kmax,
  my_max_iter, my_nstart, pva, hoofd, do_all_plots, do_points) {

  # nsoil must be 5 (perhaps no longer required)
  if (!(nsoil == 5)) {
    print("nsoil must equal 5")
    stop()
  }

  # Check legal input of pva
  pva_list <- c(70, 72.5, 75, 77.5, 80, 82.5, 85, 87.5, 90, 92.5, 95, 97.5)
  res_k <- as.data.frame(pva_list)
  colnames(res_k) <- c("pva")
  ip <- which(res_k == pva) # row number referring to pva
  if (length(ip) == 0) {
    print(paste("Illegal pva input ", pva))
    print("pva must be one of:")
    print(pva_list)
    stop()
  }

  # Create data frame for temporary results
  my_res_all <- as.data.frame(matrix(ncol = nsoil, nrow = (max(kmax) - min(kmin) + 1)))
  my_res_all$k <- seq(min(kmin), max(kmax), 1)
  my_res_ss_all <- as.data.frame(matrix(ncol = nsoil, nrow = (max(kmax) - min(kmin) + 1)))
  my_res_ss_all$k <- seq(min(kmin), max(kmax), 1)

  # Some dimensions for graphical output of silhouette plots
  wi <- c( 960, 960, 1920, 1920, 960)
  he <- c(1200, 960, 4800, 4800, 960)
  ps <- c( 16, 16, 16, 16, 16)

  # Delete old figures (if present); prevent warnings
  options(warn = -1)
  folder1 <- "./Figures/"
  fnames <- list.files(folder1, pattern = "plot_*.*)" # existing files
  file.remove(paste0(folder1, fnames)) # delete all existing files
  if (do_all_plots) {
    for (isoil in 1:nsoil) {
      folder2 <- paste0("./Figures/", hoofd[isoil], "/")
      if (!dir.exists(folder2)) dir.create(folder2) # create folder if not present
      fnames <- list.files(folder2, pattern = "cascadeKM*.*)" # existing files
      file.remove(paste0(folder2, fnames)) # delete all existing files
    }
  }
  options(warn = 0)

  # Do for all major soils
  for (isoil in 1:nsoil) {

    print(paste0("Cascade analysis for soil ", isoil))
    folder2 <- paste0("./Figures/", hoofd[isoil], "/")

    # Local scaled data for isoil
    dat_scaled <- as.matrix(dat_list_scaled[[isoil]][, -(1:skip_ncols)])

    # By making row.names equal to soil iProfile we get nicer graphing labels
    rownames(dat_scaled) <- dat_list_scaled[[isoil]]$iProfile

    # Local storage data frames for results
    my_res <- as.data.frame(matrix(ncol = 1, nrow = (max(kmax) - min(kmin) + 1)))
    my_res$k <- seq(min(kmin), max(kmax), 1)
    my_res_ss <- as.data.frame(matrix(ncol = 1, nrow = (max(kmax) - min(kmin) + 1)))
    my_res_ss$k <- seq(min(kmin), max(kmax), 1)
    nr <- nrow(my_res)

    # Do for range [kmin ... kmax] of clusters
    for (k in kmin[isoil]:kmax[isoil]) {

      # Use kmeans (base) for clustering
      my_kmeans <- kmeans(dat_scaled, centers = k, iter.max = my_max_iter, nstart = my_nstart)

      # Variances within and between clusters; used to calculate percentage variance accounted for
      tss_within <- sum(my_kmeans$withinss)
      tss_between <- my_kmeans$betweenss
      tss <- my_kmeans$totss
      # Calinski-Harabasz criterion (not used)
      ch <- (tss_between / (k - 1)) / (tss_within / (nr - k)) # nr: number of rows/observations
      # but here we use percentage variance accounted for
      my_res[k - 1, 1] <- 100 * (1 - tss_within / tss)

      # Determine mean silhouette values
      ss <- silhouette(my_kmeans$cluster, dist(dat_scaled))
      my_res_ss[k - 1, 1] <- mean(ss[, 3])

      # Make a silhouette plot per k (only if wanted via input do_all_plots)
      if (do_all_plots) {
        d <- daisy(dat_scaled)
        temp <- silhouette(my_kmeans$cluster, d)
        attributes(temp)$call <- paste("cascadeKM for soil type ", hoofd[isoil])
        rownames(temp) <- rownames(dat_scaled)
        png(paste0(folder2, "cascadeKM_silhouette_", sprintf("%02d", k), ".png"),
          width = wi[isoil], height = he[isoil], pointsize = ps[isoil])
        plot(temp, max.col = "m", cex.names = 0.8, nmax.lab = 200, do.clus.stat = TRUE)
        dev.off()
      }
    }
  }

  # Store data per soil type
  my_res_all[1:nr, isoil] <- my_res$V1

```

```

my_res_ss_all[1:nr, isoil] <- my_res_ss$V1
}

# Determine and write # of clusters for a list of fixed pva-values for all soils
for (isoil in 1:5) {
  res_k[, isoil + 1] <- as.data.frame(round(approx(x = my_res_all[, isoil],
                                                y = my_res_all$k,
                                                xout = res_k$pva)$y))
}
colnames(res_k) <- c("pva", hoofd)
res_k$tot <- rowSums(res_k[, hoofd])
write.csv(res_k, "./Output/best_clusters_PVA.csv", quote = FALSE, row.names = FALSE)

# Colors to use for plotting: per soil type
colors1 <- c("#7570B3", # purple
            "#E7298A", # pink
            "#A6761D", # brown
            "#1B9E77", # green
            "#FF0000") # red
# colors2 is taken from viridis_pal for 5 colors; colors positioned 3 and 5 are switched
colors2 <- c("#440154FF", # viridis 1; dark purple
            "#3B528BFF", # viridis 2; dark blue
            "#FDE725FF", # viridis 5; dark yellow
            "#5DC863FF", # viridis 4; dark bright green
            "#21908CFF") # viridis 3; dark blue-green

mycolor <- 2
if (mycolor == 1) {
  colors <- colors1
} else {
  colors <- colors2
}

# Plot pva(k) for all soil types, including symbol for k at pva (if wanted)
dat_fig1 <- NULL
dat_fig2 <- NULL
for (isoil in 1:nsoil) {
  dat_temp <- my_res_all[, c("k", paste0("V", isoil))]
  names(dat_temp) <- c("k", "value")
  dat_temp$cat <- isoil
  dat_fig1 <- rbind(dat_fig1, dat_temp)
  dat_temp <- res_k[ip, c("pva", hoofd[isoil])]
  names(dat_temp) <- c("value", "k")
  dat_temp$cat <- isoil
  dat_fig2 <- rbind(dat_fig2, dat_temp)
}
# Be sure that levels are ordered
dat_fig1$cat <- factor(x = dat_fig1$cat, levels = c(1:nsoil), labels = hoofd, ordered = TRUE)
dat_fig2$cat <- factor(x = dat_fig2$cat, levels = c(1:nsoil), labels = hoofd, ordered = TRUE)

# create plot p
p <- ggplot() +
  geom_line(data = dat_fig1, aes(x = k, y = value, color = factor(cat)), cex = 1.2) +
  labs(x = "Aantal clusters, k", y = "Percentage verklaarde variantie (%)") +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 40), breaks = c(seq(0, 50, 5))) +
  scale_y_continuous(breaks = c(seq(0, 100, 10))) +
  scale_color_manual(name = NULL, values = colors, guide = "legend") +
  # scale_colour_viridis_d(name = NULL, guide = "legend") +
  theme(text = element_text(size = 16),
        legend.position = "right", legend.text = element_text(size = 12),
        legend.background = element_rect(fill = "gray90"),
        legend.key = element_rect(fill = "gray90", color = NA))
if (do_points) p <- p +
  geom_point(data = dat_fig2, aes(x = k, y = value, color = factor(cat)), cex = 3)

# Save plot p
suppressWarnings(ggsave("./Figures/pva_k.png", plot = p,
                        width = 13.0, height = 6.5, dpi = 900))

# Return values as a vector
kbest <- as.vector(t(res_k[ip, c(-1)]))
return(kbest)
}

# Perform final clustering for chosen number of clusters
# Create corresponding silhouette plots
# Store best cluster number as well as second best cluster number
# Determine dominant profile (largest area) per cluster
# Append data to dat_list
do_clustering <- function(nsoil, skip_ncols, dat_list, dat_list_scaled, kbest,
                        my_seed, my_max_iter, my_nstart, hoofd, do_sil_plots) {

  # Delete old figures (if present)
  options(warn = -1)
  folder1 <- "./Figures/"
  fnames <- list.files(folder1, pattern = "cascadeKM_*.") # existing files
  file.remove(paste0(folder1, fnames)) # delete all existing files
  options(warn = 0)

  # Do for all major soils
  for (isoil in 1:nsoil) {

    # Local data
    dat <- dat_list[[isoil]]
    dat_scaled <- dat_list_scaled[[isoil]]

    # Final clustering using kbest
    set.seed(my_seed)
    myk <- kmeans(dat_scaled[, -c(1:skip_ncols)], kbest[isoil], iter.max = my_max_iter, nstart = my_nstart)

    # Store cluster number
    dat$clust1 <- as.numeric(myk$cluster)
    dat$clust1 <- dat$clust1 + isoil * 1000

    # Determine second best cluster number
    nprof <- nrow(dat)
    nvars <- ncol(myk$centers)
    my_clust_list <- as.data.frame(matrix(ncol = kbest[isoil], nrow = nprof))
    my_first <- vector(length = nprof)
    my_second <- vector(length = nprof)
    for (i in 1:nprof) {
      for (j in 1:kbest[isoil]) {
        for (k in 1:nvars) {
          mysum <- mysum + (dat_scaled[i, skip_ncols + k] - myk$centers[j, k])^2
        }
        my_clust_list[i, j] <- mysum
      }
      tmp <- as.vector(my_clust_list[i, 1:kbest[isoil]])
      tmp2 <- as.numeric(rank(tmp))
      my_clust_list[i, 1:kbest[isoil]] <- tmp2
      my_first[i] <- which(tmp2 == 1)
      my_second[i] <- which(tmp2 == 2)
    }
    # my first must be equal to myk$cluster: check
  }
}

```

```

dif <- my_first - as.numeric(myk$cluster)
if (sum(dif) != 0 | min(dif) != 0) {
  print("Unexpected error in clustering analysis")
  stop()
}
# Second best cluster number
dat$clust2 <- as.numeric(my_second)
dat$clust2 <- dat$clust2 + isoil * 1000

# Order profiles so that most dominant profile per cluster (clust1) is in front
dat$dominant <- 0
k_min <- min(dat$clust1)
k_max <- max(dat$clust1)
for (k in k_min:k_max) {
  tmp <- subset(dat, subset = dat$clust1 == k)
  tmp <- tmp[order(tmp$Areaal, decreasing = TRUE), ]
  ip <- tmp[1, "iProfile"]
  ir <- which(dat$iProfile == ip, arr.ind = TRUE)
  dat$dominant[ir[1]] <- 1
}

if (do_sil_plots) {
  # Some dimensions for graphical output of silhouette plots
  wi <- c(960, 960, 1920, 1920, 960)
  he <- c(1200, 960, 4800, 4800, 960)
  ps <- c(16, 16, 16, 16, 16)

  # Silhouette plot
  d <- daisy(dat_scaled[, -c(1:skip_ncols)])
  temp <- silhouette((myk$cluster + isoil * 1000), d)
  attributes(temp)$call <- paste0("cascadeKM for soil type ", hoofd[isoil])
  rownames(temp) <- dat_scaled$iProfile
  tmp <- dat
  tmp$ss <- temp[, 3]
  tmp <- tmp[order(tmp$clust1, -tmp$ss), ]
  np <- nrow(tmp)
  my_colors <- c(rep("grey80", np))
  idom <- which(tmp$dominant == 1, arr.ind = TRUE)
  my_colors[idom] <- "grey50"
  png(paste0("./Figures/cascadeKM_silhouette_", hoofd[isoil], "_", sprintf("%02d", kbest[isoil]), ".png"),
      width = wi[isoil], height = he[isoil], pointsize = ps[isoil])
  plot(temp, col = my_colors, max.strlen = 8, cex.names = 0.8, nmax.lab = 200, do.clus.stat = TRUE)
  dev.off()
}

# Final result: update dat_list
dat_list[[isoil]] <- dat
}

# Return update dat_list
return(dat_list)
}

# Write results to csv files
do_write_cluster_results <- function(dat_list, nsoil, hoofd, kbest, pva, list_names, table_per_soil, ordered) {

  # Delete old results
  options(warn = -1)
  folder1 <- "./Output/"
  for (i in 1:nsoil) {
    fnames <- list.files(folder1, pattern = "results_*.") # existing files
    file.remove(paste0(folder1, fnames)) # delete all existing files
  }
  options(warn = 0)

  if (table_per_soil) {
    # For all major soils
    for (isoil in 1:nsoil) {
      loc_dat <- dat_list[[isoil]]
      if (ordered) loc_dat <- loc_dat[order(loc_dat$clust1, loc_dat$iProfile), ]
      file <- paste0(folder1, "results_", hoofd[isoil], "_k", sprintf("%02d", kbest[isoil]), ".csv")
      write.csv(loc_dat, file, quote = FALSE, row.names = FALSE)
      file <- paste0(folder1, "results_formatted_", hoofd[isoil], "_k", sprintf("%02d", kbest[isoil]), ".csv")
      tmp <- loc_dat
      tmp[, list_names] <- lapply(tmp[, list_names], formatC, format = "f", digits = 4)
      write.table(tmp, file, quote = FALSE, row.names = FALSE, sep = ",")
    }
  }

  # All together
  loc_dat_all <- dat_list[[1]]
  for (isoil in 2:nsoil) loc_dat_all <- rbind(loc_dat_all, dat_list[[isoil]])

  # Write as text (.csv) output files
  if (ordered) loc_dat_all <- loc_dat_all[order(loc_dat_all$clust1, loc_dat_all$iProfile), ]
  file <- paste0(folder1, "all_results_", format(pva, digits = 3), ".csv")
  write.csv(loc_dat_all, file, quote = FALSE, row.names = FALSE)
  file <- paste0(folder1, "all_results_formatted_", format(pva, digits = 3), ".csv")
  tmp <- loc_dat_all
  tmp[, list_names] <- lapply(tmp[, list_names], formatC, format = "f", digits = 4)
  write.table(tmp, file, quote = FALSE, row.names = FALSE, sep = ",")

  # Extended output including profile sequence of Staringreeks units: BOFEK2020 table
  profile_info <- read.csv("./Data/profile_info.csv")
  profile_info <- profile_info[, -c(1, 3, 4)]
  tmp <- merge(tmp, profile_info, by = "iProfile")
  if (ordered) tmp <- tmp[order(tmp$clust1, -tmp$dominant, tmp$iProfile), ]
  file <- paste0(folder1, "all_results_form_profile_", format(pva, digits = 3), ".csv")
  write.table(tmp, file, quote = FALSE, row.names = FALSE, sep = ",", na = "")
}

#--- E X T R A ---

# A Sammon plot is an attempt to visualize the multi-dimensional data in a 2D plot
# Each data point represents a soil profile and is annotated with profile number and
# cluster number; all data within same cluster have the same color
do_sammon_plot <- function(nsoil, dat_list, dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, hoofd) {

  options(warn = -1)
  folder1 <- "./Figures/"
  fnames <- list.files(folder1, pattern = "sammon*.") # existing files
  file.remove(paste0(folder1, fnames)) # delete all existing files
  options(warn = 0)

  for (isoil in 1:5) {

    print(paste0("Sammon plot for soil ", isoil))
    dat <- dat_list[[isoil]]
    dat_scaled <- dat_list_scaled[[isoil]]
    rownames(dat_scaled) <- dat_list_scaled[[isoil]]$iProfile

    tmp <- dat_scaled
    tmp <- tmp[!duplicated(tmp[, -c(1:skip_ncols)]), ]
    xtest <- dist(tmp[, -c(1:skip_ncols)])
  }
}

```

```

ytest <- sammon(xtest, k = 2, niter = 1000, tol = 1e-6, trace = FALSE)
mydata <- as.data.frame(ytest$points)
mydata$row <- rownames(mydata)
tmp$row <- rownames(tmp)

tmp2 <- dat
tmp2$row <- as.character(tmp2$iProfile)
mydata <- merge(mydata, tmp2, by = "row")
mydata$label <- paste0(mydata$clust1, ";", mydata$row)
mydata$clust1 <- as.factor(mydata$clust1)

p <- ggplot(mydata) +
  geom_point(aes(x = V1, y = V2, color = clust1), shape = 15, cex = 3) +
  geom_text(aes(x = V1, y = V2, label = label), hjust = 0.5, vjust = 1.5, cex = 3) +
  labs(x = "Sammon dim. 1", y = "Sammon dim. 2") +
  ggtitle(hoofd[isoil]) +
  theme(text = element_text(size = 24),
        axis.text.x = element_blank(),
        axis.text.y = element_blank())

png(paste0("./Figures/sammon ", hoofd[isoil], "_k", sprintf("%02d", kbest[isoil]), ".png"),
    width = 960, height = 960, pointsize = 20)
print(p)
dev.off()
}

# Perform fuzzy k-means (optional; not used)
do_fanny <- function(dat_list_scaled, skip_ncols, kbest, rexp, my_seed, my_iter, hoofd) {

  fout <- paste0("./Output/fanny ", format(rexp, nsmall = 1), ".csv")
  if (file.exists(fout)) file.remove(fout)

  for (isoil in 1:5) {

    print(paste0("Fuzzy clustering for soil ", isoil))
    dat_scaled <- dat_list_scaled[[isoil]][, -c(1:skip_ncols)]
    rownames(dat_scaled) <- dat_list_scaled[[isoil]]$iProfile

    set.seed(my_seed)
    fan <- fanny(dat_scaled, kbest[isoil], maxit = my_iter, memb.exp = rexp)

    datf_out <- round(fan$membership * 100)
    datf_out <- cbind(dat_list_scaled[[isoil]]$iProfile, fan$clustering, datf_out)

    cat(hoofd[isoil], file = fout, append = TRUE, fill = TRUE)
    write.table(datf_out, fout, append = TRUE, quote = FALSE, col.names = FALSE, row.names = FALSE, sep = ",")
  }
}

```

Hieronder volgen de drie basis-invoerbestanden:

- AllProfiles\_368.csv
- StaringReeksPARS\_2018.csv
- BodemCode.csv

**Bronbestand profielbeschrijving (AllProfiles\_368.csv)**

Dit bestand bestaat uit 368 regels, met voor elk bodemprofiel de volgende informatie (komma-gescheiden):

- iProfile unieke profielcode volgens Bodemkaart Nederland (1 : 50 000)
- iBOFEK2012 BOFEK2012-eenheid waartoe profiel behoorde (enkel ter informatie; wordt niet gebruikt)
- iHoofd aanduiding tot welke hoofdgrondsoort het profiel behoort: 1 – veen; 2 – moerig; 3 – zand; 4 – klei/zavel; 5 – leem
- iSoilx Staringreeks bouwsteen code voor laag x (x = 1 ...9); codes 1...18 staan voor de bovengronden (B01...B18), en codes 19...36 staan voor de ondergronden (O01...O18)
- iZx diepte onderzijde laag x (x = 1...9)

Het maximumaantal lagen waaruit een profiel kan bestaan, is 9. Voor profielen waar de onderzijde (120 cm) eerder wordt bereikt, wordt voor iSoilx de waarde nul opgegeven en voor iZx de waarde 99999.

```
AllProfiles_368.csv
iProfile,iBOFEK2012,iHoofd,iSoil1,iZ1,iSoil2,iZ2,iSoil3,iZ3,iSoil4,iZ4,iSoil5,iZ5,iSoil6,iZ6,iSoil7,iZ7,iSoil8,iZ8,iSoil9,iZ9
1010,101,1,17,20,17,35,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1020,101,1,17,8,17,25,35,35,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1030,105,1,17,15,34,40,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1040,105,1,17,15,34,35,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1050,101,1,17,15,35,30,35,50,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1060,105,1,17,20,35,40,35,70,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1070,102,1,17,20,35,40,35,80,36,100,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1071,101,1,17,20,35,40,35,80,36,100,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1072,102,1,17,20,35,40,35,80,36,100,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1080,103,1,16,15,35,60,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1090,103,1,16,15,35,60,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1100,103,1,16,20,35,50,35,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1110,103,1,16,20,35,50,35,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1111,104,1,16,20,35,50,35,70,20,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1120,103,1,16,20,34,60,20,75,20,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1130,101,1,17,7,31,20,31,35,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1140,101,1,17,10,28,30,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1150,105,1,17,5,31,15,36,30,34,60,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1160,101,1,17,8,28,25,30,35,35,60,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1170,101,1,17,7,30,20,36,35,35,60,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1180,102,1,17,8,17,20,36,35,35,80,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1190,101,1,17,8,31,30,35,60,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1200,105,1,17,8,31,30,34,60,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1210,105,1,17,8,31,30,34,60,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1220,101,1,17,10,31,35,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1225,101,1,17,10,28,30,35,70,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1230,102,1,17,10,31,35,35,80,19,95,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1235,102,1,17,10,28,30,35,80,19,95,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1240,105,1,17,10,31,35,35,70,31,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1250,109,1,2,15,35,40,35,75,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1255,106,1,4,25,35,40,35,75,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1260,109,1,2,15,35,40,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1265,106,1,4,25,35,40,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1270,110,1,2,20,34,75,20,90,19,110,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1275,106,1,2,30,36,75,20,90,19,110,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1281,107,1,18,10,34,40,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1282,107,1,16,10,34,35,34,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1290,107,1,18,12,35,45,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1300,105,1,18,12,35,45,35,70,31,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1310,108,1,16,12,35,35,35,85,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1320,108,1,16,12,34,35,34,70,20,80,20,100,20,120,0,99999,0,99999,0,99999
1330,109,1,15,20,35,45,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1340,109,1,15,20,35,45,35,70,21,85,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
1350,110,1,15,20,34,55,20,70,19,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2010,202,2,9,8,9,15,29,30,36,50,22,60,20,80,19,120,0,99999,0,99999
2015,202,2,9,10,28,30,36,50,22,60,20,80,19,120,0,99999,0,99999,0,99999
2020,203,2,15,20,36,35,20,50,20,65,19,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999
2030,204,2,15,20,36,35,20,50,20,65,19,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999
2040,205,2,2,20,36,35,20,60,20,80,19,100,19,120,0,99999,0,99999,0,99999
2050,206,2,2,20,36,35,20,60,20,80,19,100,24,120,0,99999,0,99999,0,99999
2060,203,2,15,20,34,30,34,40,20,50,20,70,20,90,19,120,0,99999,0,99999
2070,204,2,15,20,34,30,34,40,20,50,20,70,20,90,24,120,0,99999,0,99999
2080,201,2,17,20,36,30,30,70,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2081,201,2,17,20,36,30,30,70,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2090,201,2,17,15,36,30,30,70,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2110,202,2,9,18,29,30,36,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2115,202,2,9,10,28,30,36,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2120,205,2,2,20,36,40,21,55,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2121,206,2,2,20,36,40,21,55,20,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2125,205,2,2,25,36,40,21,55,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2130,203,2,15,20,36,30,25,40,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2131,203,2,15,20,36,30,25,40,20,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2140,204,2,15,20,36,30,25,40,20,80,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2150,203,2,15,20,36,30,25,45,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2151,204,2,15,20,36,30,25,45,19,90,25,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
2160,203,2,15,20,36,35,21,50,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
9013010,310,3,2,25,20,40,20,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
9023010,310,3,2,12,20,35,20,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
3011,310,3,2,12,20,35,20,70,20,100,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
9013020,312,3,3,25,21,40,20,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
9023020,312,3,3,13,21,35,20,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999
```



3030,320,3,5,15,23,35,23,70,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
3040,310,3,2,25,2,40,20,60,19,80,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
3050,312,3,3,25,3,40,21,50,21,75,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
3060,319,3,3,25,3,40,21,50,21,75,21,100,24,120,0,99999,0,99999,0,99999  
3070,320,3,5,25,5,40,23,55,23,80,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9014010,304,3,2,25,20,40,20,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9034010,304,3,2,15,19,25,19,40,19,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024010,304,3,2,25,20,40,20,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4015,304,3,3,25,20,40,20,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024020,305,3,2,8,19,15,19,30,19,55,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999  
9014020,305,3,2,25,19,35,19,55,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4030,315,3,2,20,20,40,20,55,20,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4031,306,3,2,20,20,40,20,50,20,100,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4040,307,3,8,20,27,35,20,45,19,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4041,308,3,8,20,27,35,20,45,19,70,19,100,24,120,0,99999,0,99999,0,99999  
4045,307,3,8,20,27,35,20,45,19,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9014050,312,3,3,25,21,40,21,55,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9034050,312,3,3,8,21,25,21,40,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024050,312,3,3,20,21,40,21,55,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4060,312,3,3,20,21,40,21,55,20,110,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4070,315,3,3,20,21,40,21,50,20,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4071,314,3,3,20,21,40,21,50,20,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024080,320,3,5,8,23,22,23,30,23,40,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9014080,320,3,5,20,23,45,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9014090,310,3,2,25,2,40,19,60,19,75,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024090,310,3,2,25,2,40,19,60,19,75,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4100,305,3,2,25,2,40,19,55,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4110,319,3,2,25,2,35,20,55,20,70,20,100,24,120,0,99999,0,99999,0,99999  
4111,306,3,2,25,2,35,19,60,19,75,20,100,32,120,0,99999,0,99999,0,99999  
9014120,312,3,3,25,3,45,21,60,20,75,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9024120,312,3,3,25,3,40,21,60,20,75,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4121,312,3,3,25,3,45,21,60,20,75,20,105,23,120,0,99999,0,99999,0,99999  
4130,319,3,3,25,3,40,21,55,21,85,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4131,314,3,3,25,3,40,21,55,21,85,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4140,301,3,1,8,19,15,19,30,19,50,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4150,301,3,1,8,19,15,19,30,19,50,19,80,23,120,0,99999,0,99999,0,99999  
4160,320,3,5,8,23,15,23,30,23,60,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
4170,310,3,2,25,2,35,20,50,20,65,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
5010,505,5,13,20,32,50,33,80,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
5011,506,5,13,20,32,50,33,80,32,110,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
5020,507,5,14,25,33,40,33,60,33,90,33,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
5030,507,5,14,20,33,40,33,90,33,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
5040,417,4,8,25,27,40,27,55,28,90,26,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8010,311,3,2,15,2,50,2,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8012,311,3,2,15,2,50,16,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8016,327,3,1,15,1,55,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8020,317,3,3,20,3,50,3,70,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8021,311,3,3,20,3,50,3,70,20,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8022,311,3,3,20,3,50,16,70,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8030,311,3,2,25,2,60,2,75,20,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9018040,317,3,3,25,3,65,3,80,21,95,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9028040,317,3,3,25,3,65,3,80,21,95,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8041,318,3,3,25,3,65,3,80,21,100,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8050,322,3,5,25,5,70,23,85,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8060,311,3,2,25,2,75,2,90,20,105,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8061,306,3,2,25,2,75,2,85,20,100,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8070,311,3,2,25,1,75,19,90,19,105,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9018090,317,3,3,25,3,70,3,90,21,110,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9028090,317,3,3,25,3,70,3,90,21,110,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8091,317,3,3,25,3,70,2,90,20,110,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8100,319,3,3,25,3,65,20,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8101,318,3,3,25,3,60,3,75,21,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8110,322,3,5,25,5,60,23,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
8120,327,3,1,30,1,50,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9010,416,4,8,30,8,70,25,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
9020,505,5,13,25,13,60,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10010,309,3,2,20,2,30,20,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10012,305,3,2,20,2,30,20,60,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10013,315,3,2,20,2,30,20,60,20,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10014,327,3,1,20,1,30,19,60,36,100,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10016,327,3,1,20,1,30,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10020,307,3,8,15,27,35,19,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90110030,313,3,3,25,3,30,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90310030,313,3,3,15,21,30,21,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90210030,313,3,3,20,3,30,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10040,309,3,3,20,3,30,21,60,20,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10060,315,3,3,20,3,30,21,60,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10061,314,3,3,20,21,30,21,50,21,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10070,313,3,3,15,21,30,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10071,313,3,3,15,21,30,21,60,20,100,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10072,314,3,3,15,21,30,21,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10080,316,3,8,15,28,30,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10081,316,3,8,15,28,30,21,60,20,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10090,316,3,8,15,28,30,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10100,320,3,5,20,23,35,23,85,28,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10110,310,3,2,25,20,50,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10111,305,3,2,25,20,40,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10112,314,3,2,25,20,40,20,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10120,307,3,8,25,20,40,20,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10121,308,3,8,20,27,35,21,50,21,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10130,312,3,3,25,21,40,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10140,305,3,3,25,21,40,20,70,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10150,319,3,3,25,21,50,21,90,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10151,314,3,3,25,21,50,21,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10170,320,3,5,20,23,70,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90210186,302,3,1,8,19,40,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90110186,302,3,2,20,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10182,302,3,1,8,19,40,19,100,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10186,324,3,1,8,19,40,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10190,303,3,9,15,28,35,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10191,321,3,9,15,28,35,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10195,303,3,9,15,28,35,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10200,312,3,3,15,21,35,21,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10201,314,3,3,15,21,90,32,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10210,313,3,3,15,21,50,20,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10211,309,3,2,15,20,45,20,70,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10220,316,3,9,15,28,35,21,80,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10221,303,3,9,15,28,35,19,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10230,320,3,5,20,23,30,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10240,302,3,1,6,19,10,19,15,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10241,301,3,1,6,19,10,19,15,19,35,19,43,19,55,19,70,19,90,19,120  
10250,302,3,1,6,19,10,19,15,19,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10251,320,3,1,6,19,10,19,15,19,30,20,45,20,60,23,90,23,120,0,99999  
10260,320,3,5,5,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10270,302,3,2,8,20,30,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90110280,312,3,3,20,21,40,21,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90210280,312,3,3,8,21,15,21,30,21,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10281,310,3,3,20,21,40,21,70,20,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
10290,320,3,5,20,23,35,23,80,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
11010,327,3,2,20,20,30,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
11020,323,3,4,25,22,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
11021,323,3,4,25,22,70,36,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
11030,325,3,8,30,20,40,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
11031,325,3,8,30,22,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999



90116090,419,4,9,25,28,50,29,90,27,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216090,419,4,9,10,9,25,28,50,29,90,27,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16110,410,4,9,10,9,20,28,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16111,411,4,9,10,9,20,28,60,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16120,410,4,9,10,9,20,27,60,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16121,418,4,9,10,9,20,28,45,28,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16130,414,4,10,10,10,20,29,50,31,100,28,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16140,410,4,9,10,9,20,28,60,19,90,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16150,414,4,10,25,29,55,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16160,422,4,11,8,11,15,30,30,31,80,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16170,415,4,11,8,11,15,30,85,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16171,404,4,11,8,11,15,30,70,35,105,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16180,415,4,11,20,30,90,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16190,422,4,12,8,12,15,31,50,31,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16200,404,4,12,8,12,15,31,90,35,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
16201,404,4,12,8,12,15,31,50,36,70,31,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116210,417,4,8,25,27,45,28,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216210,417,4,8,25,27,45,28,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116220,419,4,9,25,28,60,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216220,419,4,9,10,9,25,28,50,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116230,416,4,8,25,27,60,26,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216230,416,4,8,25,27,40,26,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116240,418,4,9,25,28,60,28,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216240,418,4,9,25,28,60,28,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116250,416,4,8,25,27,60,26,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216250,416,4,8,25,27,60,26,80,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90116260,418,4,9,25,28,60,29,80,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
90216260,418,4,9,25,28,60,29,80,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17010,408,4,8,20,27,40,28,65,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17020,409,4,8,20,27,40,28,65,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17030,411,4,9,20,28,40,29,70,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17040,411,4,9,20,28,40,29,65,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17050,414,4,10,20,29,45,30,70,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17051,414,4,10,20,29,45,30,70,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17060,408,4,8,25,27,50,27,80,19,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17061,409,4,8,25,27,50,27,80,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17070,411,4,9,25,28,45,29,70,29,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
17071,411,4,9,25,28,45,29,80,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18010,504,5,13,25,32,90,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18020,504,5,13,25,32,90,20,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18021,506,5,13,25,32,70,32,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18030,506,5,13,25,32,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18031,505,5,13,25,32,70,21,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18040,507,5,14,25,33,60,33,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18041,506,5,14,25,33,60,33,90,23,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
18050,507,5,14,25,33,60,33,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
22010,502,5,6,15,24,40,24,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
22011,501,5,9,15,28,40,30,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999  
22020,503,5,11,25,31,45,31,120,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999,0,99999

## Bronbestand Staringreeks 2018 parameters (StaringReeksPARS\_2018.csv)

Dit bestand bestaat uit 36 regels met voor elke Staringreeks2018-bouwsteen de volgende informatie voor de Mualem-Van Genuchten (MvG) modelparameters (komma-gescheiden; Heinen et al., 2020):

- i volgnummer voor bouwstenen 1...36
- Name Naam Staringreeks bouwsteen (B01...B18, O01...O18)
- WCr residueel volumetrisch watergehalte ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
- WCs volumetrisch watergehalte bij verzadiging ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
- Alpha de vormparameter  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ )
- Npar de vormparameter  $n$  (dimensieloos; intern wordt  $m$  berekend als  $m = 1 - 1/n$ )
- Lambda vormparameter  $\lambda$  (dimensieloos)
- Ksfit de gefitte doorlatendheid bij verzadiging ( $\text{cm d}^{-1}$ )

StaringReeksPARS 2018.csv										
i	Name	WCr	WCs	Alpha	Npar	Lambda	Ksfit			
1	B01	0.02000000	0.42749391	0.02165898	1.73473668	0.98087016	31.22501566			
2	B02	0.02000000	0.43387803	0.02164487	1.34877009	7.20207718	83.24163508			
3	B03	0.02000000	0.44279037	0.01499250	1.50488028	0.13920935	19.07723673			
4	B04	0.02000000	0.46192638	0.01488005	1.39684954	0.29453599	34.88427629			
5	B05	0.01000000	0.38088059	0.04280723	1.80780022	0.02422689	63.65040270			
6	B06	0.01000000	0.38481561	0.02092272	1.24225002	-1.20013000	104.10300497			
7	B07	0.00000000	0.40058182	0.01834939	1.24827945	0.95201640	14.58232666			
8	B08	0.01000000	0.43265125	0.01047815	1.27799235	-1.91928931	3.00274059			
9	B09	0.00000000	0.42953862	0.00696387	1.26717854	-2.38705852	1.74758567			
10	B10	0.01000000	0.44811194	0.01283449	1.13525008	4.58051343	3.83228337			
11	B11	0.01000000	0.59128611	0.02162021	1.10669523	-5.54921646	6.30532049			
12	B12	0.01000000	0.52974855	0.01656167	1.09067067	-4.49358138	2.24589475			
13	B13	0.01000000	0.41608364	0.00836212	1.43702415	-1.35691308	29.83240784			
14	B14	0.01000000	0.41677442	0.00541049	1.30152771	-0.33492567	0.89502313			
15	B15	0.01000000	0.52845807	0.02373064	1.28234728	-1.47756447	87.45078892			
16	B16	0.01000000	0.78606073	0.02107196	1.27879843	-1.22093590	12.35724606			
17	B17	0.00000000	0.71862598	0.01906191	1.13665830	0.00010000	4.48373535			
18	B18	0.00000000	0.76545233	0.02046830	1.15070881	0.00010000	13.14456155			
19	O01	0.01000000	0.36584689	0.01598691	2.16275113	2.86796720	22.32215442			
20	O02	0.02000000	0.38706390	0.01608317	1.52441823	2.43966226	22.76175599			
21	O03	0.01000000	0.33981025	0.01724264	1.70339467	0.00010000	12.36681012			
22	O04	0.01000000	0.36407401	0.01364178	1.48843957	2.17939707	25.81471467			
23	O05	0.01000000	0.33670050	0.03030449	2.88750186	0.07360004	17.41850374			
24	O06	0.01000000	0.33343415	0.01595936	1.28870487	-1.00974832	32.83389870			
25	O07	0.01000000	0.51312621	0.01198516	1.15301795	-2.01328903	37.55041952			
26	O08	0.00000000	0.45375142	0.01132406	1.34596812	-0.90382318	8.64086044			
27	O09	0.00000000	0.45824566	0.00971504	1.37578384	-1.01308296	3.76662698			
28	O10	0.01000000	0.47234331	0.01004814	1.24569139	-0.79295916	2.30006721			
29	O11	0.00000000	0.44361666	0.01431555	1.12600054	2.35713901	2.12243578			
30	O12	0.01000000	0.56070265	0.00881287	1.15812806	-3.17226476	1.07972884			
31	O13	0.01000000	0.57326800	0.02785405	1.07995207	-6.09131057	9.68929074			
32	O14	0.01000000	0.39387829	0.00328777	1.61657253	0.51401193	2.49598427			
33	O15	0.01000000	0.41005808	0.00775624	1.28734271	0.00010000	2.79125069			
34	O16	0.00000000	0.88924579	0.00971073	1.36357644	-0.66464707	1.46262444			
35	O17	0.01000000	0.84863548	0.01192909	1.27153561	-1.24929996	3.40200949			
36	O18	0.01000000	0.58027825	0.01265676	1.31617171	-0.78553413	35.95127916			

## Bronbestand BodemCode.csv

Dit bestand bestaat uit 368 regels met voor elke bodemprofiel de volgende informatie:

- iProfile\_old profielnummer zoals gebruikt in BODFEK2012
- iProfile huidige profielnummer
- BodemCode bodemcode per standaard bodemprofiel (bodemkaart)
- Areaal areaal per bodemprofiel (ha)

BodemCode.csv			
iProfile_old	iProfile	BodemCode	Areaal
1010	1010	hVb	14688.23825
1020	1020	ohVb	11878.09122
1030	1030	hVs	8279.842195
1040	1040	hVsc	4184.480613
1050	1050	hVc	18683.70445
1060	1060	hVc	3155.458227
1070	1070	hVz	14171.2876
1071	1071	hVzc	1578.826003
1072	1072	hVzx	649.341909
1080	1080	aVc	1626.138669
1090	1090	faVc	333.9602879
1100	1100	aVz	13742.20359
1110	1110	faVz	5310.601397
1111	1111	faVzt	1154.603019
1120	1120	aVp	1282.66028
1130	1130	pVb	16115.66328
1140	1140	opVb	3688.287658
1150	1150	pVs	7752.473083
1160	1160	opVc	2608.718721
1170	1170	pVc	13127.68509
1180	1180	pVz	3457.934294
1190	1190	kVb	10560.5267
1200	1200	kVs	11003.91174
1210	1210	kVsc	3642.877613
1220	1220	kVc	15229.12082
1225	1225	kVc	1818.977106
1230	1230	kVz	8869.215927
1235	1235	kVz	16.36000543
1240	1240	kVc	3803.738307
1250	1250	zVz	6963.287571
1255	1255	zVz	117.8634325
1260	1260	zVc	1312.180487
1265	1265	zVc	126.3554272
1270	1270	zVp	2718.325895

1275,1275,AVk-F,37.27272681  
1281,1281,Vs,19402.45372  
1282,1282,Vs,1433.863277  
1290,1290,Vc,6468.260709  
1300,1300,dVk,2968.056714  
1310,1310,Vz,8449.906335  
1320,1320,Vp,7070.230039  
1330,1330,iVc,1005.607571  
1340,1340,iVz,8298.973827  
1350,1350,iVp,3687.634945  
2010,2010,kWp,8192.798734  
2015,2015,kWp,454.2100167  
2020,2020,vWp,17351.28409  
2030,2030,vWpx,2567.447931  
2040,2040,zWp,17182.95282  
2050,2050,zWpx,3206.791374  
2060,2060,iWp,21902.1923  
2070,2070,iWpx,2576.536236  
2080,2080,Wo,7170.133432  
2081,2081,Wg1,8238.38506  
2090,2090,Wo1,8404.090404  
2110,2110,kWz,8214.711831  
2115,2115,kWz,852.3944047  
2120,2120,zWz,13403.05834  
2121,2121,zWzx,895.7446333  
2125,2125,zWz,1130.075381  
2130,2130,vWz,24566.82778  
2131,2131,vWzg,936.6263981  
2140,2140,vWzx,2381.047636  
2150,2150,fvWz,1409.242986  
2151,2151,fvWzt,1127.7966  
2160,2160,iWz,13958.31867  
3010,9013010,Y21,1240.635311  
3010,9023010,Y21,6011.084394  
3011,3011,Y21g,2259.874786  
3020,9013020,Y23,3868.69045  
3020,9023020,Y23,2006.88008  
3030,3030,gY30,36180.7962  
3040,3040,cY21,2648.83107  
3050,3050,cY23,3627.625818  
3060,3060,cY23x,2290.854985  
3070,3070,gcY30,2520.460003  
4010,9014010,Hn21,77748.25189  
4010,9034010,Hn21,57354.25644  
4010,9024010,Hn21,186782.5653  
4015,4015,uHn21,517.356693  
4020,9024020,Hn21g,5957.100738  
4020,9014020,Hn21g,20659.89781  
4030,4030,Hn21x,20098.02302  
4031,4031,Hn21t,8426.538211  
4040,4040,kHn21,10090.23066  
4041,4041,kHn21x,1395.100253  
4045,4045,kHn21,2207.333559  
4050,9014050,Hn23,10606.24424  
4050,9034050,Hn23,5907.645086  
4050,9024050,Hn23,49912.38748  
4060,4060,Hn23g,3349.806947  
4070,4070,Hn23x,53361.8041  
4071,4071,Hn23t,6687.258877  
4080,9024080,Hn30,3149.061105  
4080,9014080,Hn30,6892.978052  
4090,9014090,cHn21,6185.33902  
4090,9024090,cHn21,47571.53486  
4100,4100,cHn21g,4210.122591  
4110,4110,cHn21x,2205.993093  
4111,4111,cHn21t,958.533503  
4120,9014120,cHn23,3579.362594  
4120,9024120,cHn23,23966.53086  
4121,4121,cHn23g,818.7519219  
4130,4130,cHn23x,19279.14608  
4131,4131,cHn23t,2376.918378  
4140,4140,Hd21,34912.11636  
4150,4150,Hd21g,5894.218649  
4160,4160,gHd30,38789.44514  
4170,4170,cHd21,2762.203737  
5010,5010,BLd5,1647.801851  
5011,5011,BLd5g,865.5269351  
5020,5020,BLd6,10760.83837  
5030,5030,BLb6,10405.30799  
5040,5040,BKd25,3553.527308  
8010,8010,EZg21,2106.494038  
8012,8012,EZg21w,1317.029611  
8016,8016,EZg21,1038.138125  
8020,8020,EZg23,4947.00665  
8021,8021,EZg23g,972.7909502  
8022,8022,EZg23w,1731.74445  
8030,8030,bEZ21,6961.704559  
8040,9018040,bEZ23,6024.402337  
8040,9028040,bEZ23,15335.33383  
8041,8041,bEZ23t,784.1142143  
8050,8050,bEZ30,4356.694154  
8060,8060,zEZ21,69863.98697  
8061,8061,zEZ21t,1289.107656  
8070,8070,zEZ21g,3147.914699  
8090,9018090,zEZ23,17415.59714  
8090,9028090,zEZ23,44261.74806  
8091,8091,zEZ23g,1341.098552  
8100,8100,zEZ23x,3833.800735  
8101,8101,zEZ23t,4024.523751  
8110,8110,zEZ30g,4413.9951  
8120,8120,EZ50A,6115.6535  
9010,9010,EK19,5560.541978  
9020,9020,EL5,212.3649756  
10010,10010,pZg21,14181.32098  
10012,10012,pZg21g,2042.938049  
10013,10013,pZg21x,906.5381498  
10014,10014,pZg21w,1186.107822  
10016,10016,pZg21,2926.601929  
10020,10020,kpZg21,5989.715133  
10030,90110030,pZg23,3726.308598  
10030,90310030,pZg23,4416.658049  
10030,90210030,pZg23,65571.61365  
10040,10040,pZg23g,8129.248597  
10060,10060,pZg23x,9016.318398  
10061,10061,pZg23t,9449.683392  
10070,10070,fpZg23,9759.833263  
10071,10071,fpZg23g,2544.679097  
10072,10072,fpZg23t,1695.009994  
10080,10080,kpZg23,14649.74291  
10081,10081,kpZg23g,2303.098261  
10090,10090,fpZg23,8277.827766  
10100,10100,pZg30r,1918.044671  
10110,10110,pZn21,32408.96992  
10111,10111,pZn21g,7224.941736

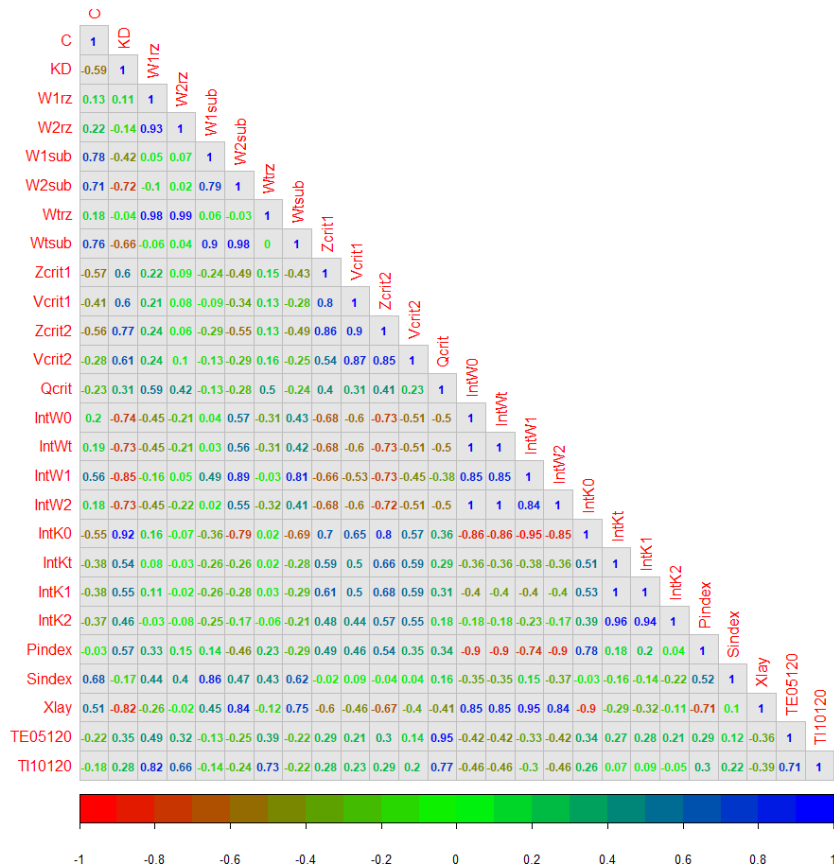
10112, 10112, pZn21t, 1053.542054  
10120, 10120, kpZn21, 1411.346357  
10121, 10121, kpZn23x, 1105.053075  
10130, 10130, pZn23, 27213.70143  
10140, 10140, pZn23g, 3634.107531  
10150, 10150, pZn23x, 3971.485683  
10151, 10151, pZn23t, 4365.247302  
10170, 10170, pZn30, 2969.594763  
10186, 90210186, Zn21, 16018.79891  
10186, 90110186, Zn21, 8180.243777  
10182, 10182, Zn21g, 625.2890834  
10186, 10186, Zn21, 5039.488416  
10190, 10190, kZn21, 6406.271539  
10191, 10191, kZn30, 904.6928823  
10195, 10195, kZn21, 93.46748365  
10200, 10200, Zn23, 9905.146714  
10201, 10201, Zn23t, 1266.038472  
10210, 10210, fZn23, 3114.232235  
10211, 10211, fZn21, 1196.969954  
10220, 10220, fkZn23, 2618.562409  
10221, 10221, fkZn21, 1031.908147  
10230, 10230, Zn30, 5410.288621  
10240, 10240, zd21, 56392.86918  
10241, 10241, zHd21, 1609.850384  
10250, 10250, zd21g, 5239.165356  
10251, 10251, zgY30, 3011.609974  
10260, 10260, zd30, 7352.356246  
10270, 10270, Zb21, 6996.693671  
10280, 90110280, Zb23, 3999.3219  
10280, 90210280, Zb23, 2772.217316  
10281, 10281, Zb23g, 941.6271284  
10290, 10290, Zb30, 4054.694984  
11010, 11010, pZg20A, 1618.224526  
11020, 11020, Zn10A, 3665.550586  
11021, 11021, Zn10Av, 1593.21753  
11030, 11030, kZn40A, 7510.573099  
11031, 11031, kZn10A, 1963.254417  
11032, 11032, kZn50A, 3846.905719  
11040, 90111040, Zn40A, 4331.024052  
11040, 90211040, Zn40A, 5419.364108  
11050, 90111050, Zn50A, 10471.80349  
11050, 90211050, Zn50A, 15859.19401  
11051, 11051, Zn50Ar, 2722.909711  
11060, 11060, Zn30A, 3764.63088  
11061, 11061, Zn30Ab, 888.017165  
11070, 11070, zd20A, 16219.23481  
11071, 11071, zd20Ab, 1186.736999  
12010, 12010, Sn13A, 3563.862909  
12011, 12011, Sn13Av, 3042.701728  
12020, 12020, kSn13A, 3717.701135  
13010, 13010, MOo02, 4300.179845  
13020, 13020, MOo05, 3952.87954  
13030, 13030, MOb72, 2001.73817  
13040, 13040, MOb75, 5429.681827  
15010, 15010, pMv51, 1858.539217  
15020, 15020, pMv81, 2357.246795  
15030, 15030, pMo50, 560.1234249  
15040, 15040, pMo80, 3416.754697  
15041, 15041, pMo80l, 213.3363227  
15050, 90115050, pMn55A, 3856.206822  
15050, 90215050, pMn55A, 14312.66904  
15051, 15051, pMn52A, 881.5135363  
15060, 90115060, pMn85A, 5645.847224  
15060, 90215060, pMn85A, 13719.90781  
15070, 15070, pMn86C, 8432.716199  
15071, 15071, pMn86Cw, 1490.847367  
15080, 15080, pMn55C, 11552.42326  
15090, 15090, pMn85C, 18839.12216  
15100, 15100, Mv51A, 6354.261086  
15101, 15101, eMv61C, 1062.879075  
15110, 15110, Mv81A, 2814.550113  
15111, 15111, eMv41C, 2557.43098  
15120, 15120, Mv61C, 7088.889968  
15130, 15130, Mv41C, 23238.35908  
15131, 15131, Mv41C1, 1694.075018  
15132, 15132, Mv41Cp, 929.1137248  
15140, 15140, Mo20A, 4274.606752  
15160, 15160, Mo80A, 3542.452663  
15170, 15170, Mo80C, 3465.066323  
15171, 15171, Mo80Cv, 1481.568515  
15180, 15180, Mn12A, 18070.5711  
15190, 15190, Mn12Ap, 7386.692689  
15200, 15200, Mn22A, 10434.3076  
15210, 15210, Mn22Ap, 4213.339128  
15220, 15220, Mn82A, 12045.04  
15230, 15230, Mn82Ap, 3950.692264  
15240, 90115240, Mn15A, 68707.96843  
15240, 90215240, Mn15A, 18475.98346  
15241, 15241, Mn15Ap, 1790.153245  
15250, 15250, Mn15Av, 3788.60148  
15251, 15251, Mn15Aw, 1998.59061  
15260, 15260, bMn15A, 5358.091113  
15270, 90115270, Mn25A, 70132.40255  
15270, 90215270, Mn25A, 24980.46082  
15280, 15280, Mn25Ap, 3107.11889  
15290, 15290, Mn25Av, 11931.80606  
15291, 15291, Mn25Aw, 1583.772689  
15300, 15300, bMn25A, 2028.729442  
15310, 15310, eMn25A, 4938.075856  
15311, 15311, eMn25Av, 486.6399875  
15320, 90115320, Mn35A, 52949.71903  
15320, 90215320, Mn35A, 32000.55878  
15330, 15330, Mn35Ap, 8048.770533  
15340, 15340, Mn35Av, 24331.80727  
15350, 15350, eMn35A, 6757.9082  
15351, 15351, eMn35Av, 1066.914104  
15360, 90115360, Mn45A, 18377.51569  
15360, 90215360, Mn45A, 20704.75528  
15361, 15361, Mn45Ap, 3692.332838  
15370, 15370, Mn52Cp, 2462.090731  
15380, 15380, Mn82Cp, 1490.758113  
15381, 15381, Mn82Cwp, 756.8072224  
15390, 15390, Mn56C, 3255.816198  
15400, 15400, Mn86C, 5396.075742  
15401, 15401, Mn86C1, 1105.97474  
15402, 15402, Mn86Cv, 10506.12909  
15403, 15403, Mn86Cwp, 989.9608207  
15410, 90115410, Mn15C, 9317.713769  
15410, 90215410, Mn15C, 3790.339409  
15411, 15411, Mn15Cw, 588.1407334  
15420, 15420, bMn15C, 7234.467257  
15430, 90115430, Mn25C, 2825.486299  
15430, 90215430, Mn25C, 6251.52252  
15431, 15431, Mn25Cw, 634.5037242

15440,15440,Mn85C,9876.068685  
15441,15441,Mn85Cv,3451.917481  
15442,15442,Mn85Cwp,1337.444775  
15450,15450,gMn53C,4549.080866  
15451,15451,gMn52C,716.2414407  
15452,15452,gMn58Cv,711.3914293  
15460,15460,gMn83C,19579.72066  
15461,15461,gMn83Cp,860.809902  
15462,15462,gMn83Cw,1346.643199  
15470,15470,gMn88C,4036.893263  
15480,15480,gMn88Cv,1889.15426  
15481,15481,gMn88Clv,829.5763575  
15490,90115490,gMn15C,3388.419092  
15490,90215490,gMn15C,3709.52431  
15500,90115500,gMn25C,2040.876721  
15500,90215500,gMn25C,15271.20213  
15510,15510,gMn85C,9979.353591  
15520,15520,kMn63C,6312.726544  
15521,15521,kMn63Cp,1175.856518  
15530,15530,kMn68C,1904.341832  
15540,15540,kMn43C,8957.419846  
15541,15541,kMn43Cp,1277.958949  
15550,15550,kMn48C,7549.608544  
15560,15560,kMn48Cv,3119.743912  
16010,16010,pRv81,3620.873321  
16020,16020,pRn59,1272.831275  
16021,16021,pRn59,1935.959503  
16030,16030,pRn86,1923.264044  
16040,16040,Rv01C,26173.70178  
16050,90116050,Rn52A,1084.169651  
16050,90216050,Rn52A,9619.213369  
16060,90116060,Rn66A,285.0024818  
16060,90216060,Rn66A,7341.48406  
16061,16061,Rn66Av,884.7460875  
16070,16070,Rn46A,2661.390434  
16080,90116080,Rn15A,776.7035202  
16080,90216080,Rn15A,5497.866575  
16090,90116090,Rn95A,3190.776734  
16090,90216090,Rn95A,23143.72279  
16110,16110,Rn62C,2535.094232  
16111,16111,Rn62Cg,552.7452668  
16120,16120,fRn62C,2934.318767  
16121,16121,fRn95C,1142.090524  
16130,16130,Rn67C,20548.54544  
16140,16140,Rn62Cp,5927.220775  
16150,16150,Rn94C,5271.75585  
16160,16160,Rn47C,24803.61541  
16170,16170,Rn47Cp,4124.142199  
16171,16171,Rn47Cwp,1486.546061  
16180,16180,bRn46C,1363.777005  
16190,16190,Rn44C,19464.83929  
16200,16200,Rn44Cv,9647.906581  
16201,16201,Rn44Cw,3085.941196  
16210,90116210,Rn15C,357.1247819  
16210,90216210,Rn15C,3687.336781  
16220,90116220,Rn95C,1970.25134  
16220,90216220,Rn95C,12030.69071  
16230,90116230,Rd10A,1374.856032  
16230,90216230,Rd10A,11661.38121  
16240,90116240,Rd90A,2149.940306  
16240,90216240,Rd90A,22447.02404  
16250,90116250,Rd10C,959.7792803  
16250,90216250,Rd10C,6364.373657  
16260,90116260,Rd90C,2223.58199  
16260,90216260,Rd90C,10224.05595  
17010,17010,KRn1,6271.656486  
17020,17020,KRn1g,4298.826407  
17030,17030,KRn2,4153.147524  
17040,17040,KRn2g,3491.275052  
17050,17050,KRn8,2869.004487  
17051,17051,KRn8g,833.1361378  
17060,17060,KRd1,5741.144151  
17061,17061,KRd1g,989.4829454  
17070,17070,KRd7,2218.440421  
17071,17071,KRd7g,672.7761765  
18010,18010,pLn5,3349.171982  
18020,18020,Ln5,3385.492973  
18021,18021,Ln5g,561.1487041  
18030,18030,Ld5g,1304.422439  
18031,18031,Ld5,2172.315908  
18040,18040,Ld6,2164.334673  
18041,18041,Ld6g,782.0510562  
18050,18050,Ldh6,13151.40069  
22010,22010,KX,6199.980197  
22011,22011,KT,881.3751246  
22020,22020,KK,423.2157417

# Bijlage 4 Correlatiematrix per grondsoort

In de hoofdtekst is aangegeven hoe op basis van de totale correlatiematrix (Pearson) voor alle bodemprofielen het aantal kengetallen is gereduceerd. In deze bijlage zijn voor de volledigheid de correlatiematrixes gegeven per hoofdgrondsoort.

## Veen









---

# Bijlage 5 BOFEK2020-tabel

Op de volgende pagina's is de BOFEK2020 gegeven. Hierin staan voor alle 368 standaardprofielen de volgende gegevens in de kolommen (van links naar rechts):

Profielinformatie:

- Profiel
- Cluster
- Bodemcode

Fysische kengetallen:

- C (d<sup>-1</sup>)
- W1rz (cm in 30 cm wortelzone)
- W2rz (cm in 30 cm wortelzone)
- Zcrit2 (cm)
- Qcrit (cm d<sup>-1</sup>)
- Intw0 (cm)
- Intk0 (cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>)
- Pindex (dimensieloos)

Bouwsteenopbouw:

Voor elk profiel is aangeduid uit welke Staringreeks-bouwstenen (B01...B18, O01...O18) deze is opgebouwd via volgnummer in laagopbouw van boven (1) naar beneden (2+). In sommige gevallen is de gegeven code meercijferig, hetgeen betekent dat meerdere lagen bestaan uit dezelfde bouwsteen. De reden dat er toch meerdere lagen worden onderscheiden, kan het gevolg zijn van afwijkende laageigenschappen. Indien meer dan 3 lagen dezelfde bouwsteencode hebben, dan is dit afgekort weergegeven; bijvoorbeeld, 2\_5 betekent dan lagen 2, 3, 4 en 5.

De profielen zijn gegroepeerd volgens clusternummer (1001 tot en met 5007), waarbij het profiel met het grootste areaal binnen het cluster (clusterhoofd) in rood is weergegeven, gevolgd door de overige profielen behorend tot hetzelfde cluster.























Cluster	Profiel	Bodem	C	W1rz	W2z	Zcrt2	Qcrt	IntW0	IntK0	Phindex	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	O01	O02	O03	O04	O05	O06	O07	O08	O09	O10	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17	O18			
4024	15370	Mn52Cp	27.253	2.894	5.418	89.040	0.144	1526.199	241.454	0.403							12										56																						
4024	16110	Rn62C	31.523	2.387	5.627	88.249	0.129	1545.337	273.790	0.426							12										4																						
4024	16111	Rn62Cg	31.523	2.387	5.627	88.249	0.129	1545.337	273.790	0.426							12										4																						
4024	16140	Rn62Cp	31.523	2.387	5.627	88.249	0.129	1545.337	273.790	0.426							12										45																						
<b>5001</b>	<b>Z2010</b>	<b>KX</b>	<b>3.342</b>	<b>2.146</b>	<b>3.747</b>	<b>200.390</b>	<b>0.609</b>	<b>1671.215</b>	<b>304.226</b>	<b>0.203</b>					<b>1</b>						<b>1</b>								<b>23</b>																				
<b>5002</b>	<b>Z2020</b>	<b>KK</b>	<b>13.770</b>	<b>1.718</b>	<b>4.241</b>	<b>22.822</b>	<b>0.022</b>	<b>6075.711</b>	<b>7.944</b>	<b>0.073</b>																																	<b>23</b>						
<b>5003</b>	<b>Z2011</b>	<b>KT</b>	<b>93.545</b>	<b>2.427</b>	<b>5.611</b>	<b>32.940</b>	<b>0.039</b>	<b>4214.652</b>	<b>14.418</b>	<b>0.152</b>							<b>1</b>											<b>3</b>																					
<b>5004</b>	<b>18020</b>	<b>Ln5</b>	<b>28.198</b>	<b>3.297</b>	<b>5.682</b>	<b>159.617</b>	<b>1.473</b>	<b>1260.952</b>	<b>359.678</b>	<b>0.354</b>											<b>1</b>						<b>3</b>																<b>2</b>						
5004	18010	pln5	29.306	3.297	5.682	175.574	1.449	1133.673	346.857	0.383											<b>1</b>																					<b>2</b>							
5004	18021	ln5g	28.602	3.297	5.682	119.811	1.504	1066.332	376.326	0.519											<b>1</b>																						<b>23</b>						
5004	18030	ld5g	28.602	3.297	5.682	119.811	1.504	1066.332	376.326	0.519											<b>1</b>													<b>4</b>															
5004	18031	ld5	22.910	3.297	5.682	156.615	1.250	988.115	351.156	0.389											<b>1</b>																					<b>2</b>							
<b>5005</b>	<b>5010</b>	<b>Bld5</b>	<b>39.463</b>	<b>3.200</b>	<b>5.955</b>	<b>148.673</b>	<b>0.389</b>	<b>1607.225</b>	<b>272.807</b>	<b>0.332</b>											<b>1</b>																							<b>24</b>	<b>3</b>				
5005	5011	Bld5g	36.031	3.200	5.955	136.975	0.397	1511.999	284.779	0.380											<b>1</b>														<b>5</b>							<b>24</b>	<b>3</b>						
<b>5006</b>	<b>9020</b>	<b>EL5</b>	<b>26.050</b>	<b>3.394</b>	<b>5.408</b>	<b>315.953</b>	<b>1.706</b>	<b>1392.623</b>	<b>527.018</b>	<b>0.346</b>																																							
<b>5007</b>	<b>18050</b>	<b>Lrh6</b>	<b>61.967</b>	<b>2.229</b>	<b>5.727</b>	<b>93.342</b>	<b>0.122</b>	<b>2400.291</b>	<b>38.860</b>	<b>0.212</b>																																							
5007	5020	Bld6	61.967	2.229	5.727	93.341	0.122	2400.291	38.860	0.212											<b>1</b>																												
5007	5030	Bld6	58.172	2.255	5.636	93.341	0.124	2393.647	39.756	0.211											<b>1</b>																												
5007	18040	Ld6	61.967	2.229	5.727	93.342	0.122	2400.291	38.860	0.212											<b>1</b>																												
5007	18041	Ld6g	52.942	2.229	5.727	104.446	0.130	1853.597	115.720	0.403											<b>1</b>																												

In onderstaande tabel zijn de beschrijvingen in termen van laagdikte (cm) en Staringreeks-  
bouwstenen (B01...B18, O01...O18) gegeven voor de clusterhoofdprofielen.

Cluster	Profiel	Bodem	Beschrijving
1001	1050	hVc	B17: 0-15, O17: 15-30, O17: 30-50, O17: 50-120
1002	1100	aVz	B16: 0-20, O17: 20-50, O17: 50-70, O02: 70-120
1003	1300	dVc	B18: 0-12, O17: 12-45, O17: 45-70, O13: 70-120
1004	1060	hVk	B17: 0-20, O17: 20-40, O17: 40-70, O12: 70-120
1005	1340	iVz	B15: 0-20, O17: 20-45, O17: 45-70, O03: 70-85, O02: 85-120
1006	1281	Vs	B18: 0-10, O16: 10-40, O16: 40-120
1007	1330	iVc	B15: 0-20, O17: 20-45, O17: 45-120
1008	1230	kVz	B17: 0-10, O13: 10-35, O17: 35-80, O01: 80-95, O01: 95-120
1009	1275	AVk-F	B02: 0-30, O18: 30-75, O02: 75-90, O01: 90-110, O01: 110-120
1010	1290	Vc	B18: 0-12, O17: 12-45, O17: 45-120
1011	1350	iVp	B15: 0-20, O16: 20-55, O02: 55-70, O01: 70-90, O01: 90-120
1012	1170	pVc	B17: 0-7, O12: 7-20, O18: 20-35, O17: 35-60, O17: 60-120
1013	1320	Vp	B16: 0-12, O16: 12-35, O16: 35-70, O02: 70-80, O02: 80-100, O02: 100-120
1014	1270	zVp	B02: 0-20, O16: 20-75, O02: 75-90, O01: 90-110, O01: 110-120
1015	1200	kVs	B17: 0-8, O13: 8-30, O16: 30-60, O16: 60-120
1016	1180	pVz	B17: 0-8, B17: 8-20, O18: 20-35, O17: 35-80, O01: 80-120
1017	1070	hVz	B17: 0-20, O17: 20-40, O17: 40-80, O18: 80-100, O02: 100-120
1018	1130	pVb	B17: 0-7, O13: 7-20, O13: 20-35, O17: 35-70, O17: 70-120
2001	2040	zWp	B02: 0-20, O18: 20-35, O02: 35-60, O02: 60-80, O01: 80-100, O01: 100-120
2002	2060	iWp	B15: 0-20, O16: 20-30, O16: 30-40, O02: 40-50, O02: 50-70, O02: 70-90, O01: 90-120
2003	2090	Wol	B17: 0-15, O18: 15-30, O12: 30-70, O12: 70-120
2004	2115	kWz	B09: 0-10, O10: 10-30, O18: 30-60, O02: 60-120
2005	2110	kWz	B09: 0-18, O11: 18-30, O18: 30-60, O02: 60-120
2006	2130	vWz	B15: 0-20, O18: 20-30, O07: 30-40, O02: 40-120
2007	2020	vWp	B15: 0-20, O18: 20-35, O02: 35-50, O02: 50-65, O01: 65-90, O01: 90-120
3001	11021	Zn10Av	B04: 0-25, O04: 25-70, O18: 70-120
3002	10080	kpZg23	B08: 0-15, O10: 15-30, O03: 30-60, O02: 60-120
3003	4160	gHd30	B05: 0-8, O05: 8-15, O05: 15-30, O05: 30-60, O05: 60-120
3004	9024050	Hn23	B03: 0-20, O03: 20-40, O03: 40-55, O02: 55-120
3005	9028090	zEZ23	B03: 0-25, B03: 25-70, B03: 70-90, O03: 90-110, O03: 110-120
3006	9014080	Hn30	B05: 0-20, O05: 20-45, O05: 45-120
3007	9024090	cHn21	B02: 0-25, B02: 25-40, O01: 40-60, O01: 60-75, O01: 75-120
3008	4031	Hn21t	B02: 0-20, O02: 20-40, O02: 40-50, O02: 50-100, O14: 100-120
3009	4030	Hn21x	B02: 0-20, O02: 20-40, O02: 40-55, O02: 55-90, O06: 90-120
3010	10191	kZn30	B09: 0-15, O10: 15-35, O05: 35-120
3011	10190	kZn21	B09: 0-15, O10: 15-35, O01: 35-120
3012	8060	zEZ21	B02: 0-25, B02: 25-75, B02: 75-90, O02: 90-105, O01: 105-120
3013	8120	EZ50A	B01: 0-30, B01: 30-50, O01: 50-120
3014	9034010	Hn21	B02: 0-15, O01: 15-25, O01: 25-40, O01: 40-60, O01: 60-120
3015	9024010	Hn21	B02: 0-25, O02: 25-40, O02: 40-60, O01: 60-120
3016	10040	pZg23g	B03: 0-20, B03: 20-30, O03: 30-60, O02: 60-90, O05: 90-120
3017	10100	pZg30r	B05: 0-20, O05: 20-35, O05: 35-85, O10: 85-120
3018	8101	zEZ23t	B03: 0-25, B03: 25-60, B03: 60-75, O03: 75-90, O14: 90-120
3019	10240	Zd21	B01: 0-6, O01: 6-10, O01: 10-15, O01: 15-120
3020	10061	pZg23t	B03: 0-20, O03: 20-30, O03: 30-50, O03: 50-90, O14: 90-120
3021	90210030	pZg23	B03: 0-20, B03: 20-30, O03: 30-60, O02: 60-120
3022	10220	fkZn23	B09: 0-15, O10: 15-35, O03: 35-80, O02: 80-120
3023	4040	kHn21	B08: 0-20, O09: 20-35, O02: 35-45, O01: 45-70, O01: 70-120
4001	15520	kMn63C	B10: 0-10, B10: 10-20, O11: 20-40, O12: 40-80, O12: 80-120
4002	15130	Mv41C	B11: 0-8, B11: 8-20, O12: 20-50, O17: 50-70, O17: 70-120
4003	15340	Mn35Av	B10: 0-10, B10: 10-25, O11: 25-70, O12: 70-100, O17: 100-120
4004	90216080	Rn15A	B08: 0-25, O09: 25-60, O10: 60-120
4005	15441	Mn85Cv	B11: 0-15, B11: 15-25, O12: 25-50, O09: 50-90, O17: 90-120
4006	15100	Mv51A	O09: 0-25, O09: 25-40, O11: 40-60, O17: 60-75, O17: 75-120
4007	90215360	Mn45A	B11: 0-15, B11: 15-25, O12: 25-70, O11: 70-90, O11: 90-120
4008	16170	Rn47Cp	B11: 0-8, B11: 8-15, O12: 15-85, O01: 85-120
4009	15180	Mn12A	B08: 0-25, O09: 25-50, O08: 50-70, O01: 70-120

Cluster	Profiel	Bodem	Beschrijving
4010	16160	Rn47C	B11: 0-8, B11: 8-15, O12: 15-30, O13: 30-80, O11: 80-120
4011	90215500	gMn25C	B09: 0-10, B09: 10-25, O10: 25-50, O10: 50-70, O10: 70-120
4012	15220	Mn82A	B10: 0-25, O11: 25-50, O09: 50-70, O01: 70-120
4013	17040	KRn2g	B09: 0-20, O10: 20-40, O11: 40-65, O05: 65-120
4014	90115320	Mn35A	B10: 0-25, O11: 25-40, O11: 40-80, O09: 80-120
4015	16040	Rv01C	B12: 0-8, B12: 8-20, O13: 20-40, O13: 40-60, O17: 60-120
4016	90216090	Rn95A	B09: 0-10, B09: 10-25, O10: 25-50, O11: 50-90, O09: 90-120
4017	17020	KRn1g	B08: 0-20, O09: 20-40, O10: 40-65, O05: 65-120
4018	90115270	Mn25A	B09: 0-25, O10: 25-50, O09: 50-120
4019	90115240	Mn15A	B08: 0-25, O09: 25-50, O08: 50-120
4020	90216260	Rd90C	B09: 0-25, O10: 25-60, O11: 60-80, O02: 80-120
4021	15540	kMn43C	B11: 0-8, B11: 8-20, O12: 20-40, O12: 40-100, O12: 100-120
4022	90216050	Rn52A	B08: 0-25, O09: 25-50, O02: 50-120
4023	90215240	Mn15A	B08: 0-15, O09: 15-25, O09: 25-50, O10: 50-80, O08: 80-120
4024	15200	Mn22A	B09: 0-25, O10: 25-50, O09: 50-70, O01: 70-120
5001	22010	KX	B06: 0-15, O06: 15-40, O06: 40-120
5002	22020	KK	B11: 0-25, O13: 25-45, O13: 45-120
5003	22011	KT	B09: 0-15, O10: 15-40, O12: 40-120
5004	18020	Ln5	B13: 0-25, O14: 25-90, O02: 90-120
5005	5010	BLd5	B13: 0-20, O14: 20-50, O15: 50-80, O14: 80-120
5006	9020	EL5	B13: 0-25, B13: 25-60, O14: 60-120
5007	18050	Ldh6	B14: 0-25, O15: 25-60, O15: 60-120

In onderstaande tabel zijn per cluster alle toegekende bodemcodes aangegeven (de eerste code per cluster is het clusterhoofd). In enkele gevallen komt een bodemcode in meerdere clusters voor; hierbij is dan onderscheid gemaakt in regio (bijv. flevo, kust, oost) of landgebruik (gras, akker, bos, natuur) zoals aangegeven via de toevoeging \*xxx.

Cluster	Alle profielen per cluster
1001	hVc, ohVb, zVc
1002	aVz, faVz, faVzt, Vz
1003	dVk
1004	hVk
1005	iVz, zVz *flevo
1006	Vs, hVs, hVsc, Vs
1007	iVc, zVc *flevo
1008	kVz
1009	AVk-F *flevo
1010	Vc, aVc, faVc
1011	iVp
1012	pVc, opVb, opVc, kVc *flevo
1013	Vp, aVp
1014	zVp
1015	kVs, pVs, kVsc
1016	pVz, kVz *flevo
1017	hVz, hVzc, hVzx, zVz
1018	pVb, hVb, kVb, kVc, kVk
2001	zWp, zWpx, zWz, zWzx, zWz *flevo
2002	iWp, iWpx
2003	Wol, Wo, Wgl
2004	kWz *flevo, kWp *flevo
2005	kWz, kWp
2006	vWz, vWpx, vWzx, fvWzt, iWz
2007	vWp, vWzg, fvWz
3001	Zn10Av
3002	kpZg23, kpZg23g, fkpZg23, kpZn23x, kZn40A, kZn10A, kSn13A
3003	gHd30, gY30, Zd30, Zn30A, Zn30Ab, Hn30 *bos
3004	Hn23 *gras, Hn23g, fpZg23, fpZg23g, pZn23, Zn23, Sn13A, Y23 *bos, Hn23 *bos, Zb23 *akker, Zb23 *bos



Cluster	Alle profielen per cluster
3005	zEZ23 *gras, EZg23, zEZ23x, Zn10A, bEZ23 *gras, zEZ23 *akker, bEZ23 *akker
3006	Hn30 *gras, gcY30, bEZ30, zEZ30g, pZn30, Zn30, Zb30
3007	cHn21 *gras, cY21, cHn21g, cHd21, EZg21, pZg21w, cHn21 *akker
3008	Hn21t, cHn21t, pZn21t
3009	Hn21x, Y21g, cHn21x, pZg21x, Y21 *akker, Y21 *bos, Zn40A *akker, Zn40A *natuur
3010	kZn30
3011	kZn21, kZn21 *flevo, fkZn21
3012	zEZ21, EZg21w, bEZ21, zEZ21t
3013	EZ50A, EZg21 *kust, pZg21 *kust
3014	Hn21 *bos, Zb21, pZg20A, Hn21g *gras, Zn21 *gras
3015	Hn21 *gras, zEZ21g, pZg21, pZg21g, pZn21, pZn21g, fZn21, Hn21 *akker, Zn50A *akker
3016	pZg23g, uHn21, pZn23g, fZn23, Zb23g, pZg23 *bos
3017	pZg30r
3018	zEZ23t, bEZ23t
3019	Zd21, Hd21, Hd21g *bos, Zn21g, Zn21 *bos, zHd21, Zd21g, zgY30, Zd20A, Zd20Ab, Hn21g, Zn21 *kust, Zn50A *natuur
3020	pZg23t, Hn23t, cHn23t, fpZg23t, pZn23t, Zn23t, Zn50Ar
3021	pZg23 *gras, cY23, cY23x, Hn23x, cHn23g, cHn23x, EZg23g, EZg23w, zEZ23g, pZg23x, pZn23x, Sn13Av, Y23 *akker, Hn23 *akker, cHn23 *gras, cHn23 *akker, pZg23 *akker
3022	fkZn23
3023	kHn21, kHn21x, kHn21 *flevo, kpZg21, kpZn21, kZn50A
4001	kMn63C, kMn68C, Rn94C
4002	Mv41C, pMv81, eMv41C, gMn83C, gMn88Cv, gMn88Clv, pRn86, Mn45A *akker
4003	Mn35Av, pMn86C, KRn8, pMn85A *gras, pMn85A *akker
4004	Rn15A *gras, BKd25, Mn15Av, Rn15A *akker, Rn15C *gras, Rn15C *akker
4005	Mn85Cv, pMn86Cw, Mn85Cwp
4006	Mv51A
4007	Mn45A *gras, pMo80, pMn85C, Mo80C, Mo80Cv, Mn86C, Mn85C, gMn58Cv, gMn83Cw, kMn48Cv, bRn46C
4008	Rn47Cp, Mn45Ap, gMn83Cp, kMn43Cp, Rn47Cwp
4009	Mn12A, pMn52A, gMn52C, pRn59 *oost, KRd1
4010	Rn47C, pRv81, Rn46A
4011	gMn25C *gras, Mn15Aw, Mn25Av, Mn25Aw, Mn15Cw, Mn25Cw, fRn95C, Mn25C *gras, gMn25C *akker, Mn25C *akker
4012	Mn82A, MOb72, Mn82Ap, Mn82Cp, Mn82Cwp, KRn8g
4013	KRn2g, KRd7g
4014	Mn35A *akker, MOb75, pMo50, Mv81A, Mo80A, Mn35Ap, eMn35A, eMn35Av, gMn85C, kMn63Cp, Mn35A *gras
4015	Rv01C, Mv41Cl, Mv41Cp, Mn86Cv, Mn86Cwp, Rn66Av, Rn67C, Rn44C, Rn44Cv, Rn44Cw, Rn66A *gras, Rn66A *akker
4016	Rn95A *gras, pMv51, eMv61C, Mv61C, eMn25A, Mn56C, gMn53C, pRn59, KRd7, Rn95A *akker, Rn95C *gras, Rn95C *akker
4017	KRn1g, KRd1g
4018	Mn25A *akker, MOo05, pMn55C, bMn25A, eMn25Av, pMn55A *gras, Rd90A *gras, pMn55A *akker, Mn25A *gras, Rd90A *akker
4019	Mn15A *akker, bMn15A, bMn15C, Mn15C *gras, gMn15C *gras, Rd10A *gras, Rd10C *gras, Mn15C *akker, gMn15C *akker, Rd10A *akker, Rd10C *akker
4020	Rd90C *gras, Mn25Ap, KRn2, Rd90C *akker
4021	kMn43C, pMo80l, Mn86Cl, gMn88C, kMn48C
4022	Rn52A *gras, MOo02, Mn15Ap, fRn62C, Rn52A *akker
4023	Mn15A *gras, EK19, Mo20A, KRn1
4024	Mn22A, Mn12Ap, Mn22Ap, Mn52Cp, Rn62C, Rn62Cg, Rn62Cp
5001	KX
5002	KK
5003	KT
5004	Ln5, pLn5, Ln5g, Ld5g, Ld5
5005	BLd5, BLd5g
5006	EL5
5007	Ldh6, BLd6, BLb6, Ld6, Ld6g

# Bijlage 6 Overeenkomst dominante profielen BOFEK2012 en BOFEK2020

Profiel	Profiel, 2012	Bodemcode	BOFEK2012-eenheid	BOFEK2020-eenheid	Overeenkomst
1050	1050	hVc	101	1001	1
1100	1100	aVz	103	1002	1
1300	1300	dVk	105	1003	0
1060	1060	hVk	105	1004	0
1340	1340	iVz	109	1005	1
1281	1281	Vs	107	1006	1
1330	1330	iVc	109	1007	0
1230	1230	kVz	102	1008	0
1275	1275	AVk-F	106	1009	0
1290	1290	Vc	107	1010	0
1350	1350	iVp	110	1011	1
1170	1170	pVc	101	1012	0
1320	1320	Vp	108	1013	0
1270	1270	zVp	110	1014	0
1200	1200	kVs	105	1015	1
1180	1180	pVz	102	1016	0
1070	1070	hVz	102	1017	1
1130	1130	pVb	101	1018	0
2040	2040	zWp	205	2001	1
2060	2060	iWp	203	2002	0
2090	2090	WoI	201	2003	0
2115	2115	kWz	202	2004	0
2110	2110	kWz	202	2005	0
2130	2130	vWz	203	2006	1
2020	2020	vWp	203	2007	0
11021	11021	Zn10Av	323	3001	0
10080	10080	kpZg23	316	3002	1
4160	4160	gHd30	320	3003	1
9024050	4050	Hn23	312	3004	1
9028090	8090	zEZ23	317	3005	1
9014080	4080	Hn30	320	3006	0
9024090	4090	cHn21	310	3007	1
4031	4031	Hn21t	306	3008	1
4030	4030	Hn21x	315	3009	0
10191	10191	kZn30	321	3010	1
10190	10190	kZn21	303	3011	1
8060	8060	zEZ21	311	3012	1
8120	8120	EZ50A	327	3013	1
9034010	4010	Hn21	304	3014	1
9024010	4010	Hn21	304	3015	1
10040	10040	pZg23g	309	3016	0
10100	10100	pZg30r	320	3017	0
8101	8101	zEZ23t	318	3018	1
10240	10240	Zd21	302	3019	1
10061	10061	pZg23t	314	3020	1
90210030	10030	pZg23	313	3021	1
10220	10220	fkZn23	316	3022	0
4040	4040	kHn21	307	3023	1
15520	15520	kMn63C	414	4001	0
15130	15130	Mv41C	405	4002	1

Profiel	Profiel, 2012	Bodemcode	BOFEK2012-eenheid	BOFEK2020-eenheid	Overeenkomst
15340	15340	Mn35Av	405	4003	0
90216080	16080	Rn15A	417	4004	0
15441	15441	Mn85Cv	405	4005	0
15100	15100	Mv51A	402	4006	1
90215360	15360	Mn45A	415	4007	1
16170	16170	Rn47Cp	415	4008	0
15180	15180	Mn12A	408	4009	1
16160	16160	Rn47C	422	4010	1
90215500	15500	gMn25C	418	4011	0
15220	15220	Mn82A	412	4012	1
17040	17040	KRn2g	411	4013	0
90115320	15320	Mn35A	421	4014	1
16040	16040	Rv01C	404	4015	1
90216090	16090	Rn95A	419	4016	1
17020	17020	KRn1g	409	4017	1
90115270	15270	Mn25A	418	4018	1
90115240	15240	Mn15A	416	4019	1
90216260	16260	Rd90C	418	4020	0
15540	15540	kMn43C	415	4021	0
90216050	16050	Rn52A	408	4022	0
90215240	15240	Mn15A	416	4023	1
15200	15200	Mn22A	410	4024	1
22010	22010	KX	502	5001	1
22020	22020	KK	503	5002	1
22011	22011	KT	501	5003	1
18020	18020	Ln5	504	5004	1
5010	5010	BLd5	505	5005	1
9020	9020	EL5	505	5006	0
18050	18050	Ldh6	507	5007	1

---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Rapport 3056  
ISSN 1566-7197

---

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.500 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.





To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AB Wageningen  
T 317 48 07 00  
[www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research)

Rapport 3056  
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.000 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

