
Preferente stroming en vochtpatronen in waterafstotende zavel-, klei- en veengronden

Louis W. Dekker
Coen J. Ritsema

Meststoffen en andere chemicaliën blijken vaak sneller in het grondwater terecht te komen dan modellen voorspellen (Steenhuis e.a., 1995). De meeste van deze modellen zijn namelijk gebaseerd op de veronderstelling dat de bodem homogeen is, het water in de onverzadigde zone verticaal infiltreert en het vochtfront evenwijdig is aan het bodemoppervlak. In werkelijkheid stroomt het water vaak via preferente stroombanen door de bodem. Preferente stroming heeft diverse oorzaken en kan in nagenoeg alle gronden optreden.

In dit artikel wordt naar voren gebracht dat regenwater zich in zavel-, klei- en veengronden niet alleen snel naar de ondergrond verplaatst door scheuren en gangen, maar dat ook een ongelijkmatige bevochtiging van de bovengrond plaatsvindt, waardoor vochtpatronen in de matrix van deze gronden ontstaan.

Inleiding

In klei- en veengronden ontstaan bij uitdroging krimp-scheuren. Water en opgeloste stoffen kunnen zich via deze scheuren naar de ondergrond verplaatsen (Bouma en Dekker, 1978; Dekker 1983). Vooral ondiep grondwater en, als er drains aanwezig zijn, oppervlaktewater hebben door preferente stroming een vergrote kans op verontreiniging.

Ook in veel zandgronden komt preferente stroming voor (Ritsema en Dekker, 1994b, 1995; Dekker en Ritsema, 1994a, 1996a). In deze gronden treedt preferente stroming vooral op door instabiele vochtfronten, veroorzaakt door waterafstotendheid van de bodem of door een toename van de hydraulische doorlatendheid met de diepte (Ritsema en Dekker, 1994a, 1996; Ritsema e.a., 1996). Plaatselijk wordt het horizontale vochtfront doorbroken en ontstaan verticale natte banen in de droge zandondergrond.

Recentelijk stelden we ook natte banen vast in de matrix van droge waterafstotende zavel-, klei- en veengronden (Dekker en Ritsema, 1995, 1996b, 1996c).

L.W. Dekker en C.J. Ritsema zijn werkzaam bij: Afdeling Bodemfysische Transportverschijnselen, DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO), Postbus 125, 6700 AC Wageningen, Tel: (0317) 474267/6, Fax: (0317) 424812, E-mail: l.w.dekker@sc.dlo.nl/c.j.ritsema@sc.dlo.nl

Bemonsteringen en bepalingen

Voor het nagaan van de variatie in bodemvochtgehalte op korte afstand hebben we op diverse plekken in zavel-, klei- en veengronden op verschillende diepten grondmonsters genomen in ringen met een inhoud van 100 cm³. Op iedere diepte werden minimaal 25 monsters, vrijwel aaneensluitend naast elkaar genomen. In het laboratorium zijn de veldvochtige grondmonsters gewogen. Daarna zijn de monsters getest op hun actuele waterafstotendheid met de water drop penetration time (WDPT-) test (Dekker en Ritsema, 1994b). Hierbij worden drie druppels water op het monster aangebracht en de tijd waarin ze penetreren, gemeten. De grond is goed bevochtigbaar als de druppels binnen 5 seconden verdwijnen, en waterafstotend als ze langer dan 5 seconden blijven staan. De monsters zijn daarna gedroogd om hun volumetrisch vochtgehalte te bepalen. Vervolgens is in een geconditioneerd laboratorium, met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 50%, de mate van potentiële waterafstotendheid van de gedroogde monsters gemeten met de WDPT-test. In dit artikel wordt een voorbeeld van de actuele en de potentiële waterafstotendheid gegeven van zavelmonsters uit Yerseke Moer.

In het rivierengebied hebben we monsters uit de bovengrond van komkleigronden genomen om de mate van waterafstotendheid te bepalen. Voor het nagaan van de invloed van het bodemgebruik op de waterafstotendheid, hebben we zowel grasland- als bouwlandpercelen in de bemonstering betrokken.

In Friesland hebben we in veengebieden met ondiep voorkomende spalterveenlagen monsters genomen uit de graslandbovengrond om de waterafstotendheid ervan te bepalen.

In Broek in Waterland en Joure is de snelheid van wateropname gemeten aan enkele veldvochtige monsters uit veengronden. De monsters werden in het laboratorium op een keramische plaat opgesteld. Aan de onderzijde van de monsters werd een constante waterdruk van -2,5 cm aangebracht. De experimentele opstelling was zo geconstrueerd, dat iedere vochttoename van 0,2 vol% automatisch werd geregistreerd.

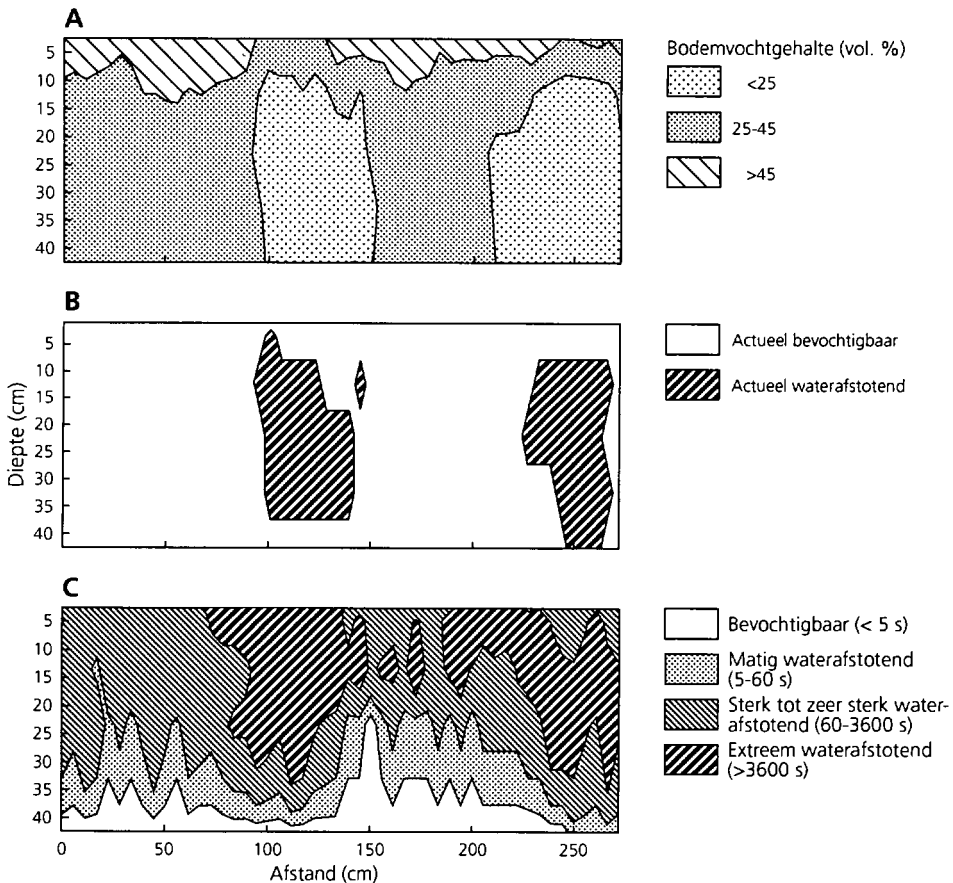


Figuur 1: Droge gedeelten in een zware zavelgrond in Yerseke Moer op 22 maart 1993, na een zeer regenrijke winterperiode. De uitgraving is 20 cm diep.

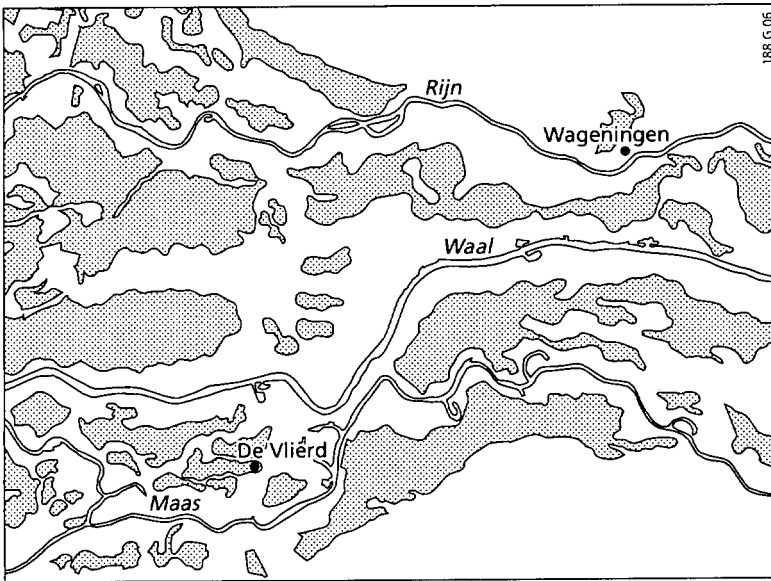
Moeilijk bevochtigbare zavelgronden

In Yerseke Moer onderzochten we een in gras gelegen zavelgrond, die na een droge periode moeilijk en zeer onregelmatig te bevochtigen is (Dekker en Ritsema, 1995). Het lutumgehalte van de bovengrond bedraagt ca. 20% en het organische stofgehalte in de bovenste centimeters varieert van ca. 15% tot ca. 5% op 20 cm diepte. De ondergrond bestaat tot meer dan 80 cm diepte uit humusarme zware zavel met een lutumgehalte van ca. 22%. In totaal hebben we deze grond zes keer bemonsterd in de periode tussen 25 maart 1991 en 23 februari 1993. Bij alle zes bemonsteringen stelden we grote verschillen vast in het bodemvochtgehalte op korte afstand. Na een zeer natte winterperiode, met meer dan 500 mm neerslag, troffen we in maart 1993 plaatselijk nog stofdroge grond aan (figuur 1), die tijdens het graven zelfs nog stooft. De waterdruppels die we op dit droge materiaal aanbrachten, bleven er minutenlang op staan.

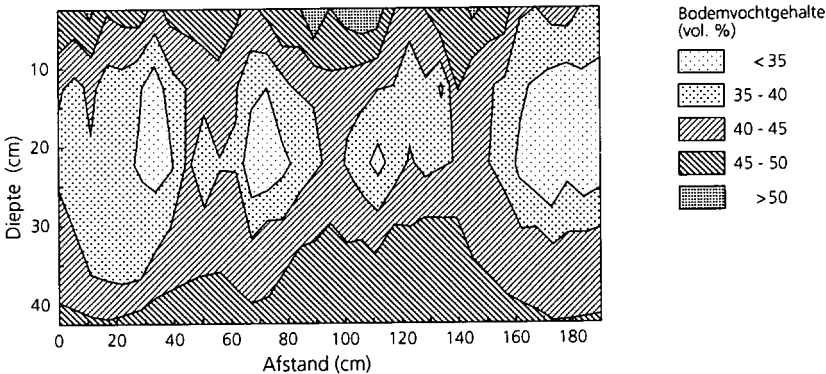
De grond was plaatselijk ook droog en waterafstotend op 15 januari 1993, zoals te zien is in figuur 2. Uit deze figuur blijkt tevens dat de droge plekken corresponderen met potentieel extreem waterafstotende zavelgedeelten en de vochtige banen met gedeelten, die potentieel gering waterafstotend zijn.



Figuur 2: Dwarsdoorsneden van de zware zavelgrond in Yerseke Moer met het bodemvochtgehalte (A), de actuele waterafstotendheid (B), beide op 15 januari 1993, en de mate van potentiële waterafstotendheid (C).



Figuur 3: Verbreiding van waterafstotende zware komkleigronden in het gebied van de rivieren Rijn, Waal en Maas.



Figuur 4: Dwarsdoorsnede met vochtgehalten zware komkleigrond op proefboerderij De Vlierd bij Zaltbommel op 11 oktober 1993.

Bevochtigbaarheid komkleigronden

Zware komkleigronden liggen meestal in gras, hoewel sommige percelen tijdelijk als bouwland, voornamelijk voor snijmaïsteelt, worden gebruikt. Praktisch alle monsters van 0–5 cm diepte, verspreid genomen op 102 plekken grasland in het komkleigebied (figuur 3), vertoonden een matige tot extreme waterafstotendheid. Iets meer dan de helft van de monsters op dezelfde plekken genomen, op dieptes van 10–15 cm en 20–25 cm, was matig tot extreem waterafstotend, terwijl de overige monsters op deze dieptes goed bevochtigbaar waren. De waterafstotendheid neemt dus met de diepte af. Op 30–35 cm was nog slechts een kwart van de monsters waterafstotend. De waterafstotendheid werd gemeten op de buitenkant

van de klei-aggregaatjes. Bij het verpulveren van deze structurelementjes bleek duidelijk dat de aggregaatjes inwendig veel minder of zelfs helemaal niet waterafstotend waren. De waterafstotendheid hangt samen met een organische coating op de aggregaatjes en prisma's. Graswortels, die in deze kleigronden vooral tussen en niet in de structurelementen groeien, zijn ongetwijfeld de bron van deze organische coating. Overigens stelden we vast, dat de droge, dode graswortels zelf ook waterafstotend zijn.

Verspreid over het komkleigebied, zoals dat is weergegeven in figuur 3, werden op 30 bouwlandpercelen monsters genomen op dieptes van 0–10 cm, 10–20 cm en 30–40 cm. De monsters van drie percelen die pas een jaar in bouwland lagen, waren matig waterafstotend. Alle monsters van de andere 27 percelen, die al langer als bouwland gebruikt werden, waren goed bevochtigbaar. De verdwijning van waterafstotendheid van de komklei bij gebruik als bouwland, is enerzijds toe te schrijven aan oxidatie van de waterafstotende organische stof en anderzijds aan de openbreking van de prisma's en kleinere structurelementen door de machinale bewerkingen van de grond.

Hoewel waterafstotendheid een algemeen verschijnsel is in frequent uitdrogende oppervlaktelagen van gronden, wordt het vaak niet als zodanig herkend (Dekker en Jungerius, 1990). Dit geldt ook voor de komkleigronden. In de afgelopen twintig jaar is namelijk regelmatig onderzoek gedaan naar het transport van water en opgeloste stoffen in deze zwellende en krimpende zware kleigronden (o.a. Bouma e.a., 1981; Dekker en Bouma, 1984; Bronswijk e.a., 1990), maar desondanks is pas onlangs de waterafstotendheid van deze gronden vastgesteld en de invloed ervan op het vochttransport naar voren gebracht (Dekker en Ritsema, 1996b).

Vochtbanen in komkleigrond

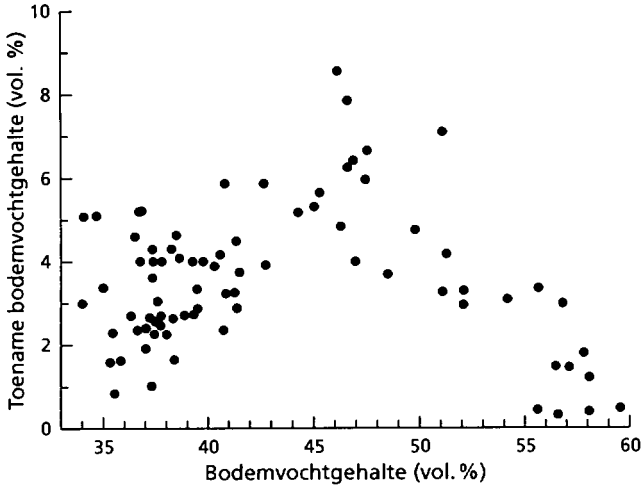
In een graslandperceel op komkleigrond van proefboerderij De Vlierd bij Zaltbommel, hebben we tussen 31 augustus 1993 en 22 december 1994 tien keer een vochtbemonstering uitgevoerd (Dekker en Ritsema, 1996b). Telkens werden op dieptes van 0–5 cm, 10–15 cm, 20–25 cm en 30–35 cm, 35 monsters (100 cm³) naast elkaar genomen over een afstand van 195 cm. Het verschil tussen het laagste en het hoogste vochtgehalte was in alle bemonsterde bodemlagen zeer groot. Vlak naast elkaar werden vochtverschillen van soms wel 28 vol% gemeten.

Figuur 4 toont de ruimtelijke vochtverdeling van de komkleigrond op 11 oktober 1993. Tussen 10 en 25 cm diepte kwamen enerzijds droge kleigedeelten voor met minder dan 35 vol% vocht, anderzijds vingervormige vochtpatronen met een vochtgehalte van 40–45 vol%.

Vochtopname komkleibovengrond

Als de bovengrond van de komklei droog is, stroomt een groot deel van het water van natuurlijke neerslag en kunstmatige beregening door de krimpscheuren naar de ondergrond (Bouma en Dekker, 1978). Uit kolom- en veldexperimenten is gebleken dat door deze preferente stroming ook een groot deel van de toegediende meststoffen snel kan uitspoelen naar grond- en oppervlaktewater (Dekker en Bouma, 1984).

Bouma e.a. (1981) en Dekker en Bouma (1984) maten preferente stroming in komkleigronden aan ongestoorde grondkolommen. Deze kolommen, met een hoogte van 20 cm en een diameter van 20 cm, werden gesneden uit de bovengrond van komkleigrasland en ge-



Figuur 5: Verband tussen het initiële vochtgehalte van kolommen komkleibovengrond en de toename van het vochtgehalte bij beregening met ca. 25 mm water.



Figuur 6: Verbreiding van waterafstotende en moeilijk bevochtigbare venige klei- en kleilige veengronden en plaatsen van onderzoek.



Figuur 7: Onregelmatige grasgroei in een moeilijk bevochtigbare veengrond met ongelijkmatige ligging en daardoor grote verschillen in bevochtiging, in de omgeving van Bodegraven na de eerste maaisnede in mei 1990.



Figuur 8: Het schaltverschijnsel in optima forma (Foto Stiboka R33-57).

plaatst in cilinders. Ze werden op trechters geplaatst onder de baan van het sproeiwater van een haspelinstallatie en voor en na de beregening gewogen om de massavermeerdering te bepalen. Het doorlopende water werd via de trechters opgevangen en de hoeveelheid gemeten. Op het eind van de proef werd de grond uit de cilinders gedroogd en werden de vochtgehalten van de grond tijdens de beregening uitgerekend. Van de eertijds beregende kolommen kregen 78 stuks ca. 25 mm water. Figuur 5 laat het verband zien tussen het initiële vochtgehalte van deze 78 kolommen en de toename ervan in vochtgehalte, onder invloed van de regengift van 25 mm. De wateropname is gering in het vochttraject 34–42 vol%, matig tussen 42 en 52 vol% en het neemt af tussen 52 en 60 vol%. De wanden van veel prisma's en aggregaten waren ongetwijfeld initieel waterafstotend bij de kolommen met minder dan 42 vol% vocht, waardoor een snelle stroming van water werd geïnduceerd via het netwerk van scheurtjes tussen de kleiaggregaten. De toename in vochtgehalte na beregening varieerde van 1 tot 5 vol%, overeenkomend met 2 tot 10 mm van het toegediende water, terwijl de rest van de 25 mm door preferente stroming verloren ging. Een optimaal (maar toch nog slecht) resultaat van bevochtiging werd gevonden bij vochtgehalten tussen 42 en 52 vol%. Bij deze vochtgehalten waren de prisma's en aggregaten niet waterafstotend, waardoor 7 tot 17 mm van het toegediende water kon worden geabsorbeerd. Preferente stroming nam toe en de wateropname verminderde bij hogere vochtgehalten. Beregening van komkleigronden blijkt dus het meest effectief en efficiënt te zijn als de bovengrond nog niet te ver is uitgedroogd en de wanden van de structuurelementen nog niet waterafstotend zijn. Ook bij een te natte bovengrond raakt men veel beregeningswater door preferente stroming kwijt. Een optimale vochttoestand van de 20 cm dikke bovengrond, waarbij het minste water van de beregening en de minste meststoffen verloren gaan, ligt dan ook in het vochttraject van 42 tot 52 vol%.

Waterafstotende veengronden en hun verbreiding

Veel bovengronden in de veenweidegebieden zijn na een bepaalde mate van uitdroging moeilijk te bevochtigen. Daardoor verdwijnt bij beregening en bij natuurlijke neerslag een deel van het water via de scheuren naar de ondergrond, zonder de bewortelde laag goed te bevochtigen (Dekker, 1983). Eenmaal uitgedroogde veenbovengronden zijn waterafstotend en kunnen zelfs na overvloedige neerslag zeer droog blijven.

De voormalige Stiboka en het huidige DLO-Staring Centrum hebben moeilijk bevochtigbare veengronden op verschillende bodemkaarten, met verschillende schaal, aangegeven. Figuur 6 geeft een overzicht van de verbreiding en verspreiding van deze gronden in Nederland, die in totaal ca. 120.000 ha beslaan.

Op vijf plaatsen, verspreid voorkomend in Noord-Holland, Zuid-Holland en Utrecht, werden grote aantallen monsters genomen uit de bovenste decimeters van deze moeilijk bevochtigbare veengronden. Met de WDPT-test bleken alle monsters na droging sterk tot extreem waterafstotend te zijn (Dekker en Ritsema, 1996c).

Kleine hoogteverschillen van slechts 20 cm kunnen grote gevolgen hebben voor de bevochtiging van moeilijk bevochtigbare veengronden. Zo werden in de omgeving van Bodegraven veengronden waargenomen, waarbij hoogteverschillen van slechts 20 cm samenhangen met grote verschillen in vochtgehalte van de veenbovengrond (figuur 7). In Friesland zijn voor het nagaan van de waterafstotendheid, op 110 plekken, verspreid over de veengronden met een spalerverveenlaag, uit de bovengrond van het grasland mon-

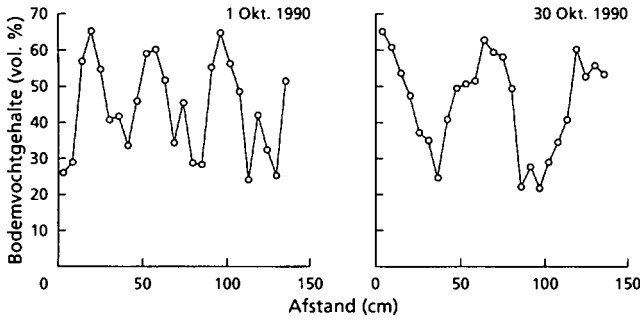
sters genomen op 0–5, 5–10 en 10–15 cm diepte. De bovenste 5 cm was op alle plekken waterafstotend, meestal sterk tot zeer sterk en soms zelfs extreem. Op een diepte van 5 cm nam de waterafstotendheid af, hoewel op een groot aantal plekken tussen 5 en 15 cm nog steeds sterke tot extreme waterafstotendheid werd vastgesteld.

Het schalterverschijnsel

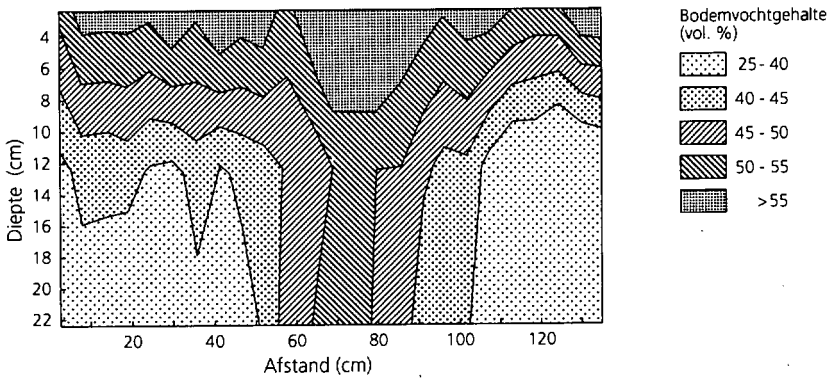
Een bijzonder verschijnsel dat samengaat met de verdroging en de moeilijke bevochtiging van dunne klei-op-veengronden, is het schalter- of spalterverschijnsel. Het spalterveen gaat vaak, maar niet altijd, samen met een bulterig maaiveld; men zegt dan, dat de weide 'schalterig' is. Het ontstaat doordat fijn gelaagd spalterveen (een soort veenmosveen) bij verdroging een netwerk van wijde ondergrondse scheuren vormt waarin het kleidek door het vee wordt weggetrapt. Zwelt de grond in natte perioden weer op, dan moet de veenmassa naar boven uitwijken en de bultvorming is begonnen. Zoals Sjollema (1912) en Rauwerda en Kramer (1921) al hebben beschreven, vertoont het land dan een zeer groot aantal kleine heuveltjes, door even zoveel dalen afgewisseld (figuur 8). De droge, opgeperste schalterbulten verdrogen zeer sterk, terwijl de klei in de scheuren vochtig blijft. In droge perioden kan het gras op de heuveltjes verdord en rood zijn, terwijl het gras in de dalen of slenken nog fris groen is (Sjollema, 1912). De diameter van de heuveltjes en het hoogteverschil tussen de heuveltjes en de gleuven variëren van perceel tot perceel. Heuveltjes met een diameter van 2 m en een hoogteverschil van 20 cm zijn nogal eens aangetroffen (Sjollema, 1912). Wijnbergen (1949) noemt hoogteverschillen van 25 à 30 cm, terwijl volgens Cnossen (1971) bij dikke spalterveenlagen na een droge zomer hoogteverschillen van wel 50 cm kunnen ontstaan.

Het spalterveen begint vaak onder de venige of humeuze kleibovengrond op een diepte van 20 à 40 cm en gaat meestal dieper over in veenmosveen. De dikte van het spalterveen varieert van plek tot plek en van gebied tot gebied. Op de bodemkaart van Nederland schaal 1: 50 000 is het voorkomen ervan aangegeven met de toevoeging ...c, als onder de A1-horizont een laag spalterveen (*Sphagnum cuspidatum*) voorkomt met een dikte van ten minste 5 cm.

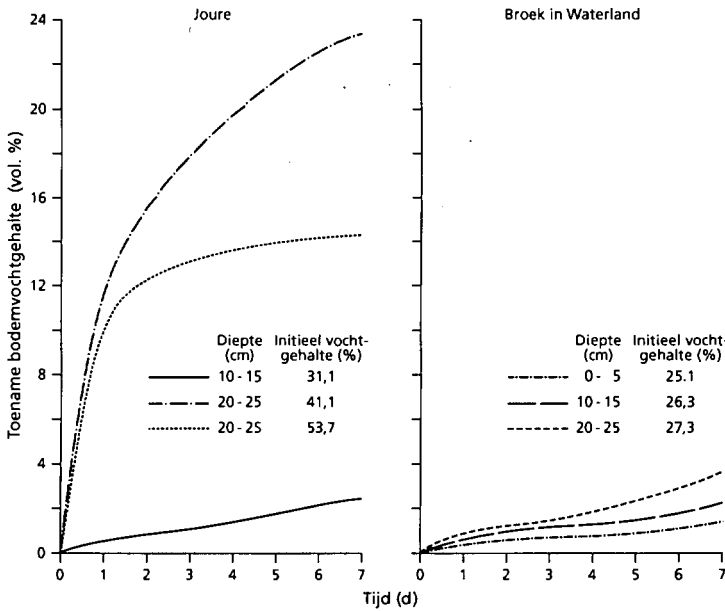
Door de compacte en platerige samenstelling heeft het spalterveen een geringe doorlatendheid voor water en laat het zich moeilijk doorwortelen. Dit heeft tot gevolg dat in een droge periode in de zomer de bovengrond sterk door de wortels kan worden drooggetrokken en dat bovendien de capillaire aanvoer van water uit het grondwater gering is. Als het bovenste gedeelte van het spalterveen uitdroogt, dan stopt deze opwaartse waterbeweging geheel. De heuveltjes drogen dan uit en de grasgroei staat stil. In de slenken rondom de heuveltjes ontbreekt het platige spalterveen en is het kleidek dikker, onder andere door de in de scheuren getrapte kleiwig. Deze kleilaag heeft een grotere vochtvoorraad en blijft langdurig, eventueel via het vochtige veen in de ondergrond, in contact met het grondwater. Er vindt dus als het ware preferente capillaire opstijging plaats. Door de betere vochtvoorziening blijft het gras in droge perioden in de slenken rondom de schalterkoppen dan ook groen en doorgroeien. Bovendien stroomt het regenwater na een droge periode, mede door de waterafstotendheid van de bovengrond, over het oppervlak van de heuveltjes naar de slenken. In dit geval zorgen de slenken en de scheuren in het spalterveen dus voor preferente stroming van het regenwater naar het grondwater. Het is dan ook niet verwonderlijk



Figuur 9: Bodemvochtgehalte op 3-8 cm diepte in veenbovengrond Wilnis op 1 en 30 oktober 1990.



Figuur 10: Dwarsdoorsnede met vochtgehalten veenbovengrond Broek in Waterland op 2 maart 1992.



Figuur 11: Toename vochtgehalte veldvochtige veenmonsters met een drukhoogte van -2,5 cm aan de onderzijde van de monsters, gedurende een week.

dat op de heuveltjes nogal eens droogteresistente en in de slenken vochtminnende grassen worden aangetroffen.

De laatste decennia zijn enkele duizenden hectaren spalterveengronden in Friesland verbeterd, door het breken van het spalterveen, het egaliseren van het maaiveld en het opnieuw inzaaien van het grasland.

Variatie vochtgehalte en vochtbanen in veengronden

We hebben de variatie in vochtgehalte op korte afstand op zes plekken in de moeilijk bevochtigbare veenbovengronden diverse malen gemeten in de jaren 1990 t/m 1992. Het vochtgehalte varieerde sterk op alle diepten op alle plekken en op alle dagen van bemonstering en vaak werden onregelmatige vochtpatronen vastgesteld (Dekker en Ritsema, 1996c).

Figuur 9 laat de variatie in vochtgehalte zien in de oppervlaktelaag van 3–8 cm diepte in een moeilijk bevochtigbare veengrond in Wilnis op 1 en op 30 oktober 1990. In de week voor de bemonstering was 68 mm regen gevallen en tussen 1 en 30 oktober nog eens 55 mm. Zoals uit figuur 9 blijkt, varieerde het vochtgehalte sterk en kwamen op korte afstand vochtgehalten voor van zowel 25 vol% als 65 vol%.

Figuur 10 laat een dwarsdoorsnede zien van de vochtgehalten in de bovengrond van een moeilijk bevochtigbare veengrond in Broek in Waterland op 2 maart 1992. In het centrum van de doorsnede is een vochtbaan aanwezig met een vochtgehalte van 50–55 vol%, terwijl op dezelfde diepte ook droge gedeelten voorkomen met een vochtgehalte van slechts 25–40 vol%.

Bevochtigingssnelheid veenmonsters

Er bestaan grote verschillen in snelheid van bevochtiging tussen bevochtigbare en waterafstotende veengronden. De bevochtiging gaat snel in bevochtigbaar veen, terwijl in actueel waterafstotend veen de bevochtiging een zeer langzaam proces kan zijn. Figuur 11 laat zien dat de toename in vochtgehalte van veldvochtige veenmonsters sterk kan verschillen. Bij de actueel waterafstotende monsters met initiële vochtgehalten tussen 25,1 en 31,1 vol% leidde de vochtopname gedurende een week slechts tot een toename in bodemvochtgehalte van 1,4 tot 3,6 vol%. In tegenstelling hiermee was de toename van het bevochtigbare monster uit Joure, met een initieel vochtgehalte van 41,1 vol%, in dezelfde periode 23,2 vol%. De bevochtiging van het andere bevochtigbare monster uit Joure was ook zeer snel, maar de wateropname verminderde na een dag, omdat het monster toen het evenwichtsvochtgehalte bereikte.

Uitleiding

Veel bovengronden van veengronden zijn waterafstotend als ze tot een zekere mate zijn uitgedroogd. Ze absorberen dan moeizaam water, wat is geïllustreerd met metingen van de bevochtigingssnelheid.

Ook de in gras gelegen zware komkleigronden blijken waterafstotend te zijn als ze droog zijn. Het zijn vooral de wanden van de structurelementen, de prisma's en kleinere aggre-gaatjes, die bij droogte waterafstotend zijn.

Zowel in zware komkleigronden als in veengronden kan regen en beregeningswater snel door krimpscheuren worden afgevoerd naar de ondergrond. Uit het onderzoek in deze gronden bleek echter, dat preferente stroming zich hiertoe niet beperkt: ook onregelmatige, vingervormige bevochtigingspatronen werden namelijk vastgesteld in de matrix van deze gronden. Deze typische vochtpatronen veroorzaken grote verschillen in bodemvochtgehalte op korte afstand.

Literatuur

- Bouma, J. en L.W. Dekker (1978)** A case study on infiltration into dry clay soil, I Morphological observations; in: *Geoderma* 20, pag 27–40.
- Bouma, J., L.W. Dekker en C.J. Muilwijk (1981)** A field method for measuring short-circuiting in clay soils; in: *Journal of Hydrology* 52, pag 347–354.
- Bronswijk, J.J.B., L.W. Dekker en C.J. Ritsema (1990)** Preferent transport van water en opgeloste stoffen in de Nederlandse bodem: meer regel dan uitzondering?; in: *H₂O*, jrg 23, nummer 22, pag 594–597 en 619.
- Cnossen, J. (1971)** De bodem van Friesland. Toelichting bij blad 2 van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1: 200 000; Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, 132 pag.
- Dekker, L.W. (1983)** Effectiviteit van het beregenen van moeilijk bevochtigbare veengronden; in: *Cultuurtechnisch Tijdschrift*, jrg 22, nr 6, pag 369–375.
- Dekker, L.W. en J. Bouma (1984)** Nitrogen leaching during sprinkler irrigation of a Dutch clay soil; in: *Agric. Water Management* 9, pag 37–45.
- Dekker, L.W. en P.D. Jungerius (1990)** Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands; in: *Catena Suppl.* 18, pag 173–183.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1994a)** Fingered flow: The creator of sand columns in dune and beach sands; in: *Earth Surface Processes and Landforms* 19, pag 153–164.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1994b)** How water moves in a water repellent sandy soil, 1, Potential and actual water repellency; in: *Water Resources Research*, jrg 30, pag 2507–2517.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1995)** Fingerlike wetting patterns in two water-repellent loam soils; in: *J. Environ. Qual.* 24, pag 324–333.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1996a)** Uneven moisture patterns in water repellent soils; in: *Geoderma* 70, pag 87–99.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1996b)** Preferential flow paths in a water repellent clay soil with grass cover; in: *Water Resources Research*, jrg 32, pag 1239–1249.
- Dekker, L.W. en C.J. Ritsema (1996c)** Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils; in: *Catena* (in druk).
- Rauwerda, A. en M. Kramer (1921)** Afwatering en watervoorziening van Friesland uit een landbouwkundig oogpunt, I; in: *Friesch Landbouwblad* 19, 14 Mei 1921.
- Ritsema, C.J. en L.W. Dekker (1994a)** Soil moisture and dry bulk density patterns in bare dune sands; in: *Journal of Hydrology* 154, pag 107–131.
- Ritsema, C.J. en L.W. Dekker (1994b)** How water moves in a water repellent sandy soil, 2, Dynamics of fingered flow; in: *Water Resources Research*, jrg 30, pag 2519–2531.
- Ritsema, C.J. en L.W. Dekker (1995)** Distribution flow: A general process in the top layer of water repellent soils; in: *Water Resources Research*, jrg 31, pag 1187–1200.

- Ritsema, C.J. en L.W. Dekker (1996)** Water repellency and its role in forming preferred flow paths in soils; in: *Austr. J. of Soil Res.* 34, pag 475–487.
- Ritsema, C.J., T.S. Steenhuis, J.Y. Parlange en L.W. Dekker (1996)** Predicted and observed finger diameters in field soils; in: *Geoderma* 70, pag 185–196.
- Sjollema, B. (1912)** Over de schaltergronden en hun ontstaan; in: *Cultura* 24, pag 358–359.
- Steenhuis, T.S., L.W. Dekker, J.Y. Parlange en C.J. Ritsema (1995)** Hoe snelle stroming door preferente banen het grondwater kan verontreinigen; in: *H₂O*, jrg 28, nr 4, pag 118–121.
- Wijnbergen, E. (1949)** Verbetering van Schaltergronden; in: *Tijdschr. Ned. Heidemij.* 60, pag 374–376.

