BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Rapport nr. 2046

VERSPREIDING, OORZAKEN, GEVOLGEN EN VERBETERINGSMOGELIJKHEDEN VAN WATERAFSTOTENDE GRONDEN IN NEDERLAND

L.W. Dekker

Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, 1988

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0309 0855

24 NOV. 1988

JSN 288025*

INHOUD Blz.

	WOORD VOORAF	8
1	INLEIDING	9
2	BEPALING EN CLASSIFICATIE VAN DE MATE VAN WATERAFSTOTENDHEID	12
3	DE ONDERZOCHTE GRONDEN	15
4	VASTLEGGING VEN PREFERENTE BANEN EN VASTSTELLING VAN VARIABILITEIT IN BODEMVOCHTGEHALTE	18
5	RESULTATEN EN DISCUSSIE	24
5.1	Verspreiding van waterafstotende gronden in Nederland	24
5.2	Verbreiding van waterafstotende gronden in de omgeving van Ouddorp	25
5.3	Invloed bodemgebruik en lutumgehalte op mate van waterafstotendheid en dikte van waterafstotende lagen	28
5.4	Waterafstotende gronden in de wijde omgeving van Arnhem	32
5.5	Preferente banen en verschillen in vochtgehalte	40
5.6	Verbeteringsmogelijkheden van waterafstotende gronden	45
6	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	47
	LITERATUUR	49
	TABELLEN	
1	Classificatie en benaming van de mate van waterafstotendheid	14
2	Bodemeenheid en bodemgebruik van de 273 onderzochte bodemprofielen binnen een straal van 50 km rondom Arnhem	17
3	Indeling van de bovengrond van de onderzochte profielen naar de mate van waterafstotendheid	23
4	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van B2-horizonten van diverse podzolgronden, ingedeeld naar het percentage organische stof	24
5	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij percelen met verschillende cultuurtoestand in de omgeving van Ouddorp op Goeree	27
6	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 15 cm diepte bij komkleigrasland	30
7	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij vlakvaaggronden in de polders Zijpe en Callantsoog met een zeer kleiarme, kleiarme en kleiige graslandbovengrond	31

Blz.		
8	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij vlakvaaggronden in de polders Zijpe en Callantsoog met een zeer kleiarme, kleiarme en kleiige bouwlandbovengrond	32
9	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bos, buntgras + heide, en onbegroeide gedeelten van duinvaaggronden	35
10	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland en grasland van bruine enkeerdgronden	36
11	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, grasland en bos van zwarte enkeerdgronden	38
12	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, grasland en heide, en bos van holtpodzolgronden	39
13	Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, heide en bos van haarpodzolgronden	40
14	Vochtgehalten van 3-8 cm diepte bij droge en natte plekken op 16 verschillende lokaties in de Westduinen bij Ouddorp op 29 maart 1988.	44
15	Variatie in vochtgehalte in waterafstotende kleilagen in grasland in de Prins Alexander Polder, Polder Nieuwkoop en Yerseke Moer in het voorjaar van 1987.	45
16	Gemiddelde mate van waterafstotendheid op 5-10 cm diepte bij een aantal bodemeenheden met verschillend bodemgebruik	48
	FOTO'S	
1	Bij het meten van de mate van waterafstotendheid zijn steeds drie druppels gedemineraliseerd water op het droge bodemmateriaal gelegd en is de tijd gemeten waarin de druppels geheel zijn verdwenen	13
2	Links op de foto goed bevochtigbare grond: waterdruppelpenetratietijd < 1 sec.; contacthoek 0°; stabiel bevochtigingsfront. Rechts op de foto extreem waterafstotende grond: waterdruppelpenetratietijd > 3600 sec.; contacthoek > 90°; instabiel bevochtigingsfront	18
3	Onregelmatige bevochtiging in bouwland met een zeer sterk waterafstotende bovengrond in de omgeving van Ouddorp. De foto van dit profiel werd eind augustus 1986 gemaakt na een aantal regenachtige dagen, voorafgegaan door een droge periode van enkele weken	19
4	Zichtbaar gemaakte stroombanen in een waterafstotende bovengrond op een diepte van 12 cm	21

Blz.

5 Zichtbaar gemaakte stroonbanen in de ondergrond van een waterafstotende grond op een diepte van 75 cm 21
6 Stuifzandgebied met duinvaaggronden bij Rheden 35

AFBEELDINGEN

1 De contacthoek tussen water en bodem hangt samen met de mate van waterafstotendheid. Voor de meting ervan kunnen waterdruppels op een droog, vlak grondoppervlak worden aangebracht 12
2 Verspreiding van goed bevochtigbare en van waterafstotende bovengronden in Nederland 22
3 Indeling van de gronden in de omgeving van Ouddorp naar de mate van waterafstotendheid van de bovengrond 25
4 Waterdruppelpenetratietijd van monsters uit lagen tot 70 cm diepte uit vlakvaaggronden. De monsters zijn genomen uit percelen met een verschillende cultuurtoestand in de omgeving van Ouddorp. Links uit een huisperceel en een veldperceel met een kalkloze, kleiarme zandbovengrond, beide in gebruik als bouwland. Rechts uit graslandpercelen met respectievelijk een kalkrijke, kleiige bovengrond en een kalkloze, kleiarme bovengrond 26
5 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid bij lagen tot 69 cm diepte bij 200 proefplekken in een niet-uitgemijnd oorspronkelijk graslandperceel met vlakvaaggronden te Ouddorp op Goeree 28
6 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid bij lagen tot 100 cm diepte bij 64 proefplekken in acht bospercelen op zandgrond 29
7 Verspreiding van duinvaaggronden met een zeer sterk tot extreem waterafstotende bovenlaag in het gebied ten noordwesten van Arnhem en ten zuidwesten van Apeldoorn 33
8 Verspreiding van bruine en zwarte enkeerdgronden in het gebied ten zuiden van Kootwijk en Deventer. De bruine enkeerdgronden in zowel gras- als bouwland hebben steeds een goed bevochtigbare bovengrond. De zwarte enkeerdgronden in grasland hebben een sterk waterafstotende bovengrond en die in bouwland een goed bevochtigbare tot matig waterafstotende bovengrond 37
9 Mate van waterafstotendheid in de bovenste 10 cm bij haarpodzolgronden, holtpodzolgronden, loopodzolgronden, beekeerdgronden en vlakvaaggronden, gelegen in bos, grasland en bouwland 41
10 Vochtgehalten gemeten in vijfvoud in bouwland van een sterk waterafstotende vlakvaaggrond in de om-

		Blz.
	geving van Ouddorp. Links de vochttoestand op 25 augustus 1986 (na 18 mm neerslag sinds 18 augustus). Rechts de vochttoestand op 29 augustus (na 40 mm neerslag sinds 25 augustus)	42
11	Vochtgehalten gemeten in vijfvoud in grasland op 16 september 1986. Links een vlakvaaggrond met een zeer sterk waterafstotende kalkkloze, kleiarme bovengrond. Rechts een vlakvaaggrond met een kalkrijke, kleiige, goed bevochtigbare bovengrond	
12	Variatie in vochtgehalte op 15-20 cm diepte in een oorspronkelijk niet afgegraven perceel met natuurlijke grasvegetatie in de omgeving van Ouddorp op 24 mei 1988. Voor de vochtbepalingen zijn over een afstand van 550 cm 100 volumemonsters van 100 cm^3 genomen	43 44

WOORD VOORAF

In opdracht van de Afdeling Milieu Onderzoek van de KEMA te Arnhem, stelde de afdeling Bodemfysica en Hydrologie van de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA) een onderzoek in naar de verspreiding van waterafstotende gronden in Nederland. De poederkoolgestookte centrales in Nederland produceren momenteel aanzienlijke hoeveelheden vliegas. Een alternatieve toepassingsmogelijkheid voor vliegas in Nederland kan misschien gevonden worden in het gebruik ervan ten behoeve van de bodemverbetering van waterafstotende gronden. In de literatuur is bekend dat vliegas het vochtleverend vermogen van waterafstotende gronden duidelijk kan verbeteren. Maar niet alleen de fysische, ook de chemische eigenschappen van de bodem kunnen blijkens een literatuuronderzoek met vliegas worden verbeterd. In de context van deze studie is daar géén onderzoek naar verricht; evenmin geldt dit voor de mogelijk als negatief te beoordelen chemische eigenschappen van vliegas. Vervolgonderzoek op dit terrein is noodzakelijk en wordt hierin als zodanig voorzien door de opdrachtgever.

Bij dit onderzoek werd met behulp van de waterdruppelpenetratietijd (WDPT-test op droge grondmonsters) de mate van waterafstotendheid bepaald. Hiervoor werden grondmonsters gebruikt, die verspreid door het gehele land zijn genomen en aanwezig zijn in het grondmonsterarchief van STIBOKA. Bovendien zijn in een aantal gebieden veldverkenningen en gerichte grondbemonsteringen uitgevoerd, om het verband van de waterafstotendheid met de bodemgesteldheid en het bodemgebruik te onderzoeken.

Speciaal in de wijde omgeving van Arnhem zijn gronden i.v.m. de waterafstotendheid onderzocht. Dit om een eventuele keuze te kunnen maken uit waterafstotende gronden in verband met verder onderzoek naar de verbeteringsmogelijkheden.

Het veld- en laboratoriumwerk werd gedeeltelijk uitgevoerd door de stagiaire van de Bijzondere Hogere Landbouwschool te Leeuwarden M. v.d. Berg; het overige deel door L.W. Dekker van de afdeling Bodemfysica en Hydrologie van STIBOKA die ook de rapportage verzorgde.

De Directeur,

Drs. R.F. van de Weg

1 INLEIDING

Sommige zand-, klei- en veengronden nemen, nadat ze sterk zijn uitgedroogd, moeilijk water op. Het wordt niet of nauwelijks door de bovengrond opgenomen en stroomt via preferente banen af naar de ondergrond, of vloeit in geaccidenteerde terreinen over het waterafstotende oppervlak naar lagere plekken. Bij extreme waterafstotendheid kan de bovengrond zelfs na een maandenlang neerslagoverschot plaatselijk nog droog zijn.

Of een grond waterafstotend is, kan worden vastgesteld met de waterdruppelpenetratietijd-test (WDPT-test). Een druppel gedemineraliseerd water wordt op een luchtdroog monster gebracht en vervolgens wordt de tijd gemeten die nodig is om de druppel te absorberen. Bij goed bevochtigbare gronden verdwijnt de druppel direct; bij waterafstotende gronden blijft de bolvormige druppel langere tijd op het grondoppervlak staan.

Waterafstotende gronden komen op veel plaatsen in de wereld onder verschillende klimatologische omstandigheden voor, zoals in Rusland, Schotland, Engeland, Frankrijk, Spanje, Alaska, Egypte, Israel, Japan, India, Nigeria, Mali, Canada, Niew-Zeeland, Australië en in verscheidene staten van Amerika (DeBano, 1981; Jamison, 1969; en Rietveld, 1978).

Waterafstotende gronden worden meestal gevonden onder een goed ontwikkelde vegetatie, die kan variëren van natuurlijke bos-, struik- of heidebegroeiing tot gecultiveerde, verbeterde graslanden (Bond and Harris, 1964). In de Verenigde Staten komen waterafstotende gronden voor in bossen, gebieden met heide en struiken, grasland, golfvelden en landbouwgronden (DeBano, 1981). Een duidelijk verband tussen vegetatietype en waterafstotendheid van de grond werd beschreven door Van 't Woudt (1959).

De mate van waterafstotendheid varieert sterk, hoewel de door het afbranden van de vegetatie veroorzaakte waterafstotendheid over het algemeen het ernstigst is (Singer and Ugolini, 1976). Bond (1964) merkt op dat waterafstotendheid van de grond varieert onder verschillende plantensoorten, maar dat ook verschillende bodemschimmels onder de verschillende vegetaties voorkomen.

Veel onderzoekers hebben gerapporteerd dat waterafstotendheid van gronden wordt veroorzaakt door de organische stoffractie, maar de oorsprong van de actieve componenten kan verschillen van grond tot grond. Sommige onderzoekers vonden dat waterafstotendheid werd veroorzaakt door microbiologische activiteit van schimmels (fungi) en/of algen (Bond, 1969; Jex et al., 1985; Rietveld, 1978; Savage, 1969; en Savage et al., 1969). Andere onderzoekers verbonden het voorkomen van waterafstotendheid aan de aanwezigheid van gehumificeerde plantenresten, die als huidjes rond de zandkorrels voorkomen (DeBano et al., 1967; Mc Ghie and Posner, 1980; NaKaya, 1982; Nakaya et al., 1977; en Roberts and Carbon, 1971 en 1972). De waterafstotend-

heid is voor een deel te verklaren door de aanwezigheid van humuszuren (Adhikari and Chakrabarti, 1976; Chen and Schnitzer, 1978; Miller and Wilkinson, 1977; Roberts and Carbon, 1972; Singer and Ugolini, 1976; Tschapek et al., 1973; Tschapek and Wasowski, 1976; en Tschapek, 1984). Niet alle humuszuren produceren echter waterafstotendheid en bovendien speelt de oriëntatie van het organische materiaal een belangrijke rol voor het al of niet waterafstotend zijn van een grond (Savage et al., 1969; en Ma'shum and Farmer, 1985). Uit recent onderzoek in Australië aan extracten met behulp van chromatografische en spectrografische technieken, blijkt dat de hydrofobe materialen van de waterafstotende gronden bestaan uit uitgebreide polymethyleenkettingen, inclusief vetzuren en esters (Ma'shum et al., 1988). In Nederland is moeilijke bevochtiging vooral bekend van sommige veenbovengronden in Overijssel en in het Hollands-Utrechtse veenweidegebied (Bennema en Van der Woerdt, 1952 en 1954; Domingo en Maurer, 1949; Domingo 1950; Dekker, 1983; Kloosterhuis, 1958; Markus, 1984; Pleijter en Van Wallenburg, 1981; Stichting voor Bodemkartering, 1969, 1970 en 1972; Van Wallenburg, 1976; Van der Woerdt, 1960; en Veenenbos, 1951). Na een bepaalde mate van uitdroging verdwijnt bij deze gronden zowel bij beregening als bij natuurlijke neerslag een deel van het water via de scheuren naar de ondergrond, zonder de bewortelde laag goed te bevochtigen. Sommige restveengronden zijn zo waterafstotend, dat ze zelfs in een zeer natte herfst en winter niet geheel herstellen (Dekker, 1985). Hoewel op verscheidene plaatsen in Nederland warerafstotende zandgronden voorkomen is dit in de literatuur niet of nauwelijks beschreven. In het duingebied van Voorne zijn moeilijk bevochtigbare zandgronden gesignaleerd door Vos (1984); Rutin (1983) en Klijn (1981). Ze namen ernstige watererosie waar in het duingebied van Noordwijkerhout, respectievelijk het gehele Nederlandse duingebied, onder meer veroorzaakt door de aanwezigheid van een humeuze, waterafstotende zandlaag in de bovengrond. Donk et al. (1983) vermelden waterafstotende zandgronden in het duingebied ten zuiden van Bergen, Vos en Van Wallenburg (1988) in het duingebied tussen Noordwijk en Zandvoort, terwijl Dekker (1985) wijst op de waterafstotende grassportvelden op duinzand in de omgeving van Den Haag.

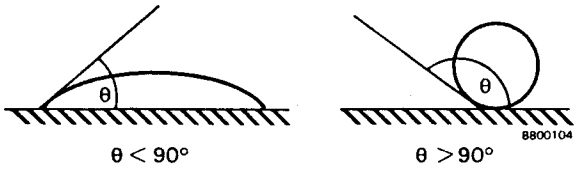
Omdat waterafstotendheid een belangrijke invloed heeft op de waterbeweging in de grond zijn er veel studies in het laboratorium en in het veld uitgevoerd om de wetmatigheden van de stroming van water in waterafstotende gronden na te gaan (Albert and Köhn, 1926; Jamison, 1945; Hendrickx et al., 1988a en 1988b; en Meeuwig, 1971). DeBano (1975 en 1981) en Letey et al. (1975) geven een overzicht van verschillende onderzoeksresultaten en concluderen: 1) infiltratiesnelheden zijn in waterafstotende gronden lager dan in goed bevochtigbare gronden, 2) bevochtigingspatronen zijn in waterafstotende gronden onregelmatig en incompleet, en 3) waterafstotendheid heeft zijn grootste effect in droge gronden. Door de geringe infiltratie treedt bij waterafstotende gronden makkelijk runoff en erosie op. Door de onregelmatige bevochtiging kiemen zaden onregelmatig en slecht, en zijn de opbrengsten van de gewassen laag. De

onregelmatige bevochtiging met preferente stroombanen in de waterafstotende zandgronden kan ook verklaard worden met behulp van de theorie van instabiele bevochtigingsfronten (Glass et al., 1987; Hill and Parlange, 1972; Philip 1975a en 1975b; Parlange and Hill, 1976; Raats, 1973; en Starr et al., 1978). Het fenomeen van preferente stroombanen in waterafstotende gronden kan een snel transport van pesticiden, insecticiden en kunstmeststoffen, enz. naar het grondwater tot gevolg hebben (Hendrickx et al., 1988a en 1988b).

Het doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is een inzicht te verkrijgen in de verspreiding van de waterafstotende gronden in Nederland: het nagaan van de mate van waterafstotendheid, de dikte van de lagen en verbanden met de bodemgesteldheid, en het bodemgebruik. Voor eventuele verdere onderzoekingen naar de verbeteringsmogelijkheden van waterafstotende gronden, bijvoorbeeld door de aanwending van vliegas, zijn gronden onderzocht in de wijde omgeving van Arnhem.

2 BEPALING EN CLASSIFICATIE VAN DE MATE VAN WATERAFSTOTENDHEID

De contacthoek tussen water en grond wordt bepaald door de mate van waterafstotendheid van de grond (afb. 1).



Afb. 1 De contacthoek tussen water en bodem hangt samen met de mate van waterafstotendheid. Voor de meting ervan kunnen waterdruppels op een droog, vlak grondoppervlak worden aangebracht.

Een goed bevochtigbare grond heeft een grote oppervlaktespanning en daarmee een kleine contacthoek van < 90° met water; een waterafstotende grond heeft een geringe oppervlaktespanning en daarmee een grote contacthoek van > 90° met water.

Door verscheidene onderzoekers zijn capillaire opstijgingsmethoden en horizontale en verticale infiltratiemethoden gebruikt, om de contacthoek te kunnen berekenen en daarmee een classificatie te verkrijgen van de waterafstotendheid (Letey et al., 1962a en 1962b; Emerson and Bond, 1963; en Hammond and Yuan, 1969). Het zijn over het algemeen tamelijk tijdrovende methoden en daarom minder geschikt voor het doen van een groot aantal bepalingen.

Voor het onderzoek is dan ook gekozen voor de eenvoudigste en meest gebruikte methode voor het classificeren van de mate van waterafstotendheid, de waterdruppelpenetratietijd (WDPT)-test, die is beschreven door DeBano (1969) en Letey et al. (1975). Drie druppels gedemineraliseerd water worden op een vlak gemaakt oppervlak van een luchtdroog monster geplaatst en de tijd wordt gemeten tot de druppels geheel zijn verdwenen (foto 1).

Theoretisch zou bij een contacthoek van meer dan 90° een waterdruppel op het oppervlak blijven staan tot hij volledig verdampt is; bij een contacthoek van minder dan 90° zouden capillaire krachten het water de grond intrekken (DeBano, 1981). In feite is het onderscheid tussen een goed bevochtigbare grond (contacthoek minder dan 90°) en een waterafstotende grond (contacthoek meer dan 90°) niet zo eenvoudig, omdat waterafstotendheid in de meeste gevallen tijdsafhankelijk is. Dat betekent dat de contacthoek van de waterdruppel zal veranderen in de tijd en de waterdruppel, hoewel niet onmiddellijk geabsorbeerd, het monster op een later moment binnendringt. Sommige waterafstotende gronden hebben bevochtigbare minerale delen en organisch materiaal dat naar de waterdruppel zal bewegen, zodat de druppel in de grond penetreert. Deze complicaties hebben geleid

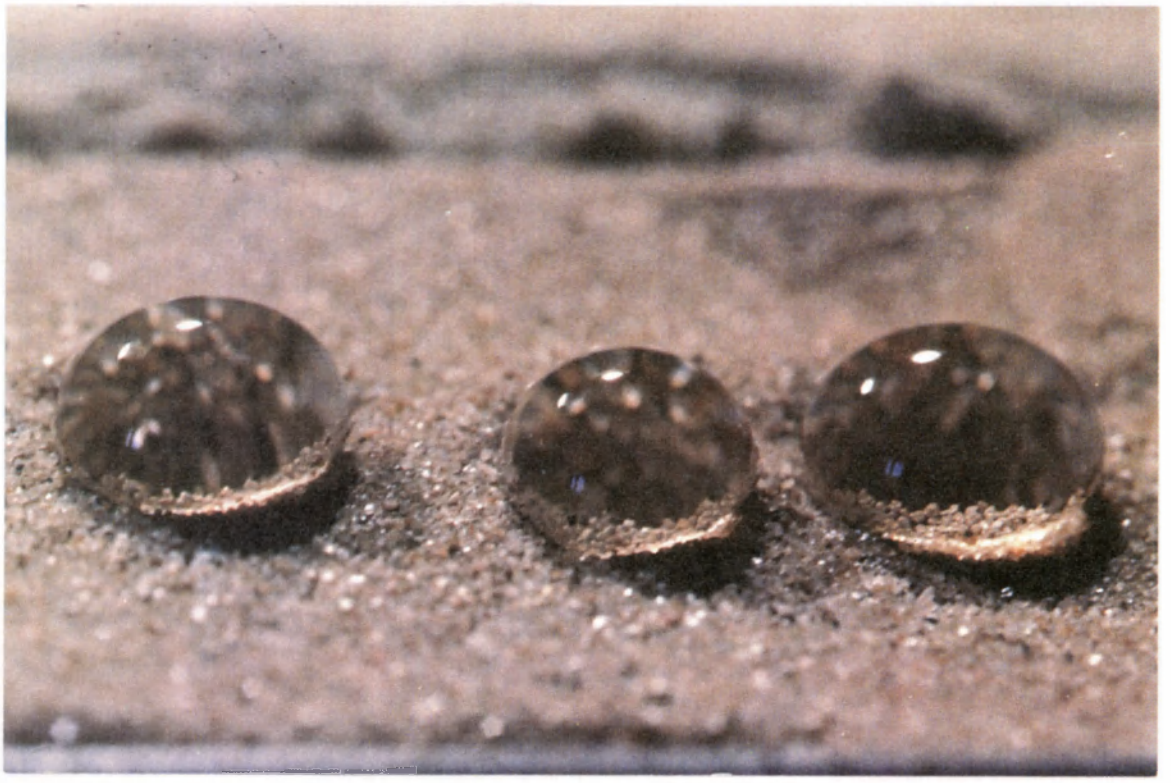


Foto 1 Bij het meten van de mate van waterafstotendheid zijn steeds drie druppels gedemineraliseerd water op het droge bodemmateriaal gelegd en is de tijd gemeten waarin de druppels geheel zijn verdwenen.

tot het min of meer arbitrair vaststellen van tijdsgrenzen bij de classificatie van gronden in goed bevochtigbare en waterafstotende. Onderzoekers vonden dat druppels die langer dan 5 seconden bleven staan, de penetratie van water gewoonlijk verscheidene minuten ophielden en dus als waterafstotende gronden konden worden geclassificeerd (Krammes and DeBano, 1965).

In het algemeen wordt een grond dan ook als waterafstotend beschouwd als de WDPT meer bedraagt dan 5 sec. (Bond and Harris, 1964; Krammes and DeBano, 1965; Watson and Letey, 1970; Miller and Letey, 1975; Adhikari and Chakrabarti, 1976; DeBano, 1981; en Richardson, 1984). Gronden met een WDPT van meer dan 60 sec. worden door Holzhey (1969) en Adams et al. (1969) sterk waterafstotend en door Mc Ghie en Posner (1980) als gronden met een stabiele waterafstotendheid beschouwd. Gronden met een WDPT van meer dan 600 sec. zijn indicatief voor extreme waterafstotendheid (DeBano, 1981; en Richardson, 1984). Waterafstotendheid hangt ook af van de mate van uitdroging. Volgens Nakaya (1982) is een grond waterafstotend boven een vochtspanning van pF 3,0 en volgens Scholl (1971) en Nakaya (1982) is de grond het sterkst waterafstotend of het meest resistent tegen bevochtiging boven pF 4,2.

Wij maten de WDPT tot 3600 sec. op monsters die gedurende meer

dan drie dagen waren gedroogd bij 60 °C. De WDPT-test werd toegepast, nadat de monsters tenminste twee dagen uit de oven waren om ze in evenwicht te laten komen met de luchtvochtigheid in het laboratorium. Mc Ghie en Posner (1980) lieten een verband zien tussen de WDPT en de contacthoek, waarbij bleek dat waarden van meer dan 3600 sec. indicatief zijn voor een contacthoek groter dan 100°. Bij de door ons gemaakte indeling (classificatie en benaming van de mate van waterafstotendheid) is met de door de diverse onderzoekers genoemde grenswaarden rekening gehouden (tabel 1).

Tabel 1 Classificatie en benaming van de mate van waterafstotendheid.

Waterdruppelpenetratietijd (sec.)	Benaming
< 5	goed bevochtigbaar; niet waterafstotend
5- 60	matig waterafstotend
60- 600	sterk waterafstotend
600-3600	zeer sterk waterafstotend
> 3600	extreem waterafstotend

3 DE ONDERZOCHTE GRONDEN

Hoewel veel tuinders, landbouwers en particuliere tuiniers in Nederland uit eigen ervaring weten dat na een langdurig droge periode hun grond een waterafstotend gedrag vertoont, is hierover in de Nederlands literatuur maar weinig bekend. Het is merkwaardig, dat er in Nederland nauwelijks onderzoek is verricht naar een verklaring voor dit verschijnsel, naar de verbreiding en mate van waterafstotendheid van de gronden en naar de gevolgen ervan op de waterstroming in de grond en daarmee het opgeloste stoffentransport en de vochtvoorziening van de gewassen.

Om een snelle indruk te verkrijgen van de verbreiding van waterafstotende gronden in Nederland is in 1987 op de bij STIBOKA aanwezige grondmonsters, die uit diverse gebieden afkomstig zijn, de WDPT-test toegepast. Het gebruik van deze grondmonsters heeft als voordeel dat tevens het verband van de waterafstotendheid met het organische-stofgehalte, het kalkgehalte, de bodemhorizont en het bodemgebruik kan worden bestudeerd. Jammer is echter dat meestal niet alle lagen in het profiel zijn bemonsterd en dat de monsters afkomstig zijn uit lagen met sterk uiteenlopende dikte. Vooral de toplaag, die i.v.m. het onderzoek naar de waterafstotendheid zo belangrijk is, ontbreekt vaak bij de bemonsteringen.

De als gevolg van een diepere grondwaterstand toegenomen schade aan tuin- en akkerbouwgewassen op waterafstotende duinzandgronden in de omgeving van Ouddorp en Goeree was aanleiding voor een nader onderzoek naar de mate van waterafstotendheid in dit gebied (Dekkers et al., 1986). Als vervolg op dit onderzoek zijn gronden met verschillende cultuurtoestand in dit gebied op de mate en diepte van waterafstotendheid onderzocht. Het betreft oorspronkelijk niet-afgegraven percelen, uitgemijnde percelen, bekleide percelen en omgezette percelen. Met behulp van de onderzoeksgegevens was het mogelijk een kaart voor deze omgeving te maken met een indeling in waterafstotendheidsklassen.

In het komklei-graslandgebied in de Tielerwaard zijn op dertig plekken grondmonsters van de bovenste lagen genomen voor het nagaan van de invloed van het bodemgebruik op de mate van waterafstotendheid.

In acht bospercelen op zandgronden in het midden en oosten van het land, waar de afdeling Bodemchemie van STIBOKA onderzoek verricht i.v.m. de zure regenproblematiek, zijn telkens op acht plekken monsters uit lagen tot 100 cm diepte op waterafstotendheid onderzocht.

Ter vergelijking van de duinzandgronden in de omgeving van Ouddorp zijn ook duinzandgronden onderzocht in de polders De Zijpe en Callantsoog. In deze polders is vooral de invloed van het bodemgebruik, grasland en bouwland, en de invloed van het lutumgehalte van het zand op de mate van waterafstotendheid bestudeerd.

Voor de bepaling van de waterafstotendheid zijn in de wijde omgeving van Arnhem op 273 plaatsen grondmonsters genomen tot een diepte van 50 cm met intervallen van 10 cm. Bij gronden onder bos, heide, buntgras en gras zijn in de bovenste 10 cm vaak twee lagen van 5 cm dikte bemonsterd. Bij deze inventarisatie is gebruik gemaakt van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, de bladen 32O, 33W, 33O, 39O, 40W en 4OO (Stichting voor Bodemkartering, 1965; 1973; 1975; en 1979). De keuzebepaling van de plekken is selectief. Zo zijn geen monsters genomen in gebieden met relatief hoge grondwaterstanden (Gt II, III en V). Aangenomen wordt dat de gevolgen van eventuele waterafstotendheid bij deze gronden minder ernstig zullen zijn. Zeer veel plekken zijn bemonsterd in de duinvaaggronden, voornamelijk met bos en buntgras op stuifzanden, en in het gras- en bouwland van de bruine en zwarte enkeerdgronden (tabel 2). Zoals uit deze tabel blijkt zijn ook veel plekken onderzocht met haarpodzolgronden en holtpodzolgronden in bos en bouwland. De waarnemingen zijn bij deze gronden echter incidenteel en onregelmatig over de kaartvlakken verdeeld, zodat het niet mogelijk is een verantwoord kaartvlakkenbeeld van de resultaten te geven. Dit was wel mogelijk voor de onderzochte duinvaaggronden, bruine en zwarte enkeerdgronden.

Tabel 2 Bodemeenheid en bodemgebruik van de 273 onderzochte bodemprofielen binnen een straal van 50 km rondom Arnhem.

Bodemeenheid	Code	Aantal profielen	Aantal profielen in:					
			bos	heide	bunt-gras	gras-land	bouw-land	onbe-groeid
BRUINE ENKEERDGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	bEZ21	9	-	-	-	2	7	-
lemig fijn zand	bEZ23	53	-	-	-	17	36	-
grof zand	bEZ30	10	-	-	-	2	8	-
ZWARTE ENKEERDGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	zEZ21	49	-	-	-	15	34	-
lemig fijn zand	zEZ23	9	-	-	-	4	5	-
grof zand	zEZ30	21	1	-	-	2	18	-
DUINVAAGGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	Zd21	45	29	3	10	-	-	3
HAARPODZOLGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	Hd21	20	11	5	-	-	4	-
grof zand	Hd30	18	5	2	-	-	11	-
HOLTPODZOLGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	Y21	6	2	1	-	-	3	-
grof zand	Y30	23	10	-	-	4	9	-
LOOPODZOLGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	cY21	1	1	-	-	-	-	-
grof zand	cY30	5	-	-	-	1	4	-
VLAKVAAGGRONDEN:								
leemarm en zwak lemig	Zn21	1	1	-	-	-	-	-
BEEKEERDGRONDEN:								
lemig fijn zand	pZg23	2	-	-	-	-	2	-
OOIVAAGGRONDEN:								
lichte zavel	Rd10C	1	-	-	-	-	1	-
Totaal		273	60	11	10	47	142	3

4 VASTLEGGING VAN PREFERENTE BANEN EN VASTSTELLING VAN VARIABILITEIT IN BODEMVOCHTGEHALTE

Zoals eerder vermeld, hebben goed bevochtigbare gronden een stabiel bevochtigingsfront en waterafstotende gronden een instabiel bevochtigingsfront (foto 2). Na uitdroging komen in

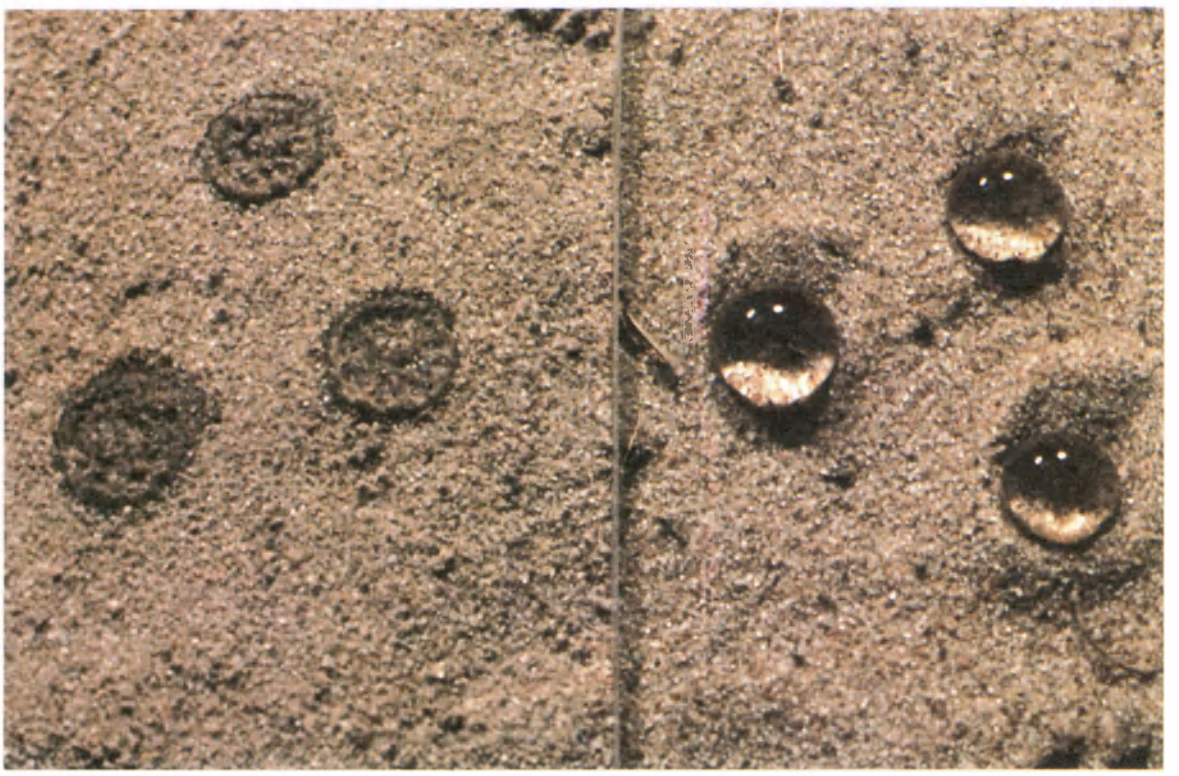


Foto 2 Links op de foto goed bevochtigbare grond; waterdruppelpenetratietijd < 1 sec; contacthoek 0°; stabiel bevochtigingsfront. Rechts op de foto extreem waterafstotende grond; waterdruppelpenetratietijd > 3600 sec; contacthoek > 90°; instabiel bevochtigingsfront.

een waterafstotende grond daarom preferente vochtbanen naast droge bodemgedeelten voor (foto 3). De profielkuil op de foto is gegraven in een perceel waar voor het tweede jaar winterrogge werd geteeld, omdat dit gewas nog een redelijk goede opbrengst geeft; vanwege de onregelmatige en slechte bevochtiging van de bovengrond laten de opbrengsten van veel andere gewassen sterk te wensen over. Bij waterafstotende gronden komen dan ook vaak grote verschillen in vochtgehalte voor. In augustus en september 1986 zijn op een aantal plekken in de omgeving van Ouddorp in meer en minder waterafstotende gronden vochtbemonsteringen uitgevoerd. In de profielkuilen zijn tot een diepte van 70 cm, met intervallen van 5 cm, monsters in vijfvoud genomen op een onderlinge afstand van 30 cm. Aan deze monsters is tevens de waterafstotendheid bepaald.



Foto 3 Onregelmatige bevochtiging in bouwland met een zeer sterk waterafstotende bovengrond in de omgeving van Ouddorp. De foto van dit profiel werd eind augustus 1986 gemaakt na een aantal regenachtige dagen, voorafgegaan door een droge periode van enkele weken.

Sommige zand-, klei- en veengronden zijn zo waterafstotend, dat zelfs na een natte herfst en winter nog stuifdroge en gortdroge gedeelte in de bovengrond voorkomen. In het voorjaar van 1987 zijn in zavel-, klei- en venige kleibovengronden in de Prins Alexander Polder en Polder Nieuwkoop en in Yerseke Moer tot een diepte van 30 cm monsters in tienvoud genomen, op een onderlinge afstand van 20 cm, ter bepaling van het volumepercentage vocht en de mate van waterafstotendheid. Op 29 maart 1988 zijn, nadat sinds oktober 1987 ruim 500 mm water was gevallen, vochtbemonsteringen uitgevoerd in de eeuwenoude graslanden van de Westduinen in de omgeving van Ouddorp. Op 16 plekken zijn vochtmonsters verzameld op een diepte van 3-8 cm - mv. Steeds is op een plek een monster genomen in een vochtige preferente baan en in het tussenliggende droge gedeelte. In 1988 zijn ook een aantal malen vochtbemonsteringen in honderdvoud in diverse lagen van een oorspronkelijk niet-uitgemijnd graslandperceel in Ouddorp uitgevoerd. In de vijf lagen zijn de ringmonsters met een inhoud van 100 cm^3 steeds aansluitend genomen over een afstand van 5,5 meter.

Maar ook in vochtige gronden kunnen preferente stroombanen voorkomen. Samen met de vakgroep Cultuurtechniek van de Landbouwuniversiteit is een nieuwe techniek ontwikkeld om de aanwezigheid van preferente banen in onder meer waterafstotende gronden aan te tonen (Van Ommen et al., 1988). Methyleenblauw,

dat bij klei- en veengronden wordt gebruikt om stroming van water door scheuren en wormgangen aan te tonen, kan bij zandgronden niet gebruikt worden omdat het te sterk geabsorbeerd wordt door de grondmassa.

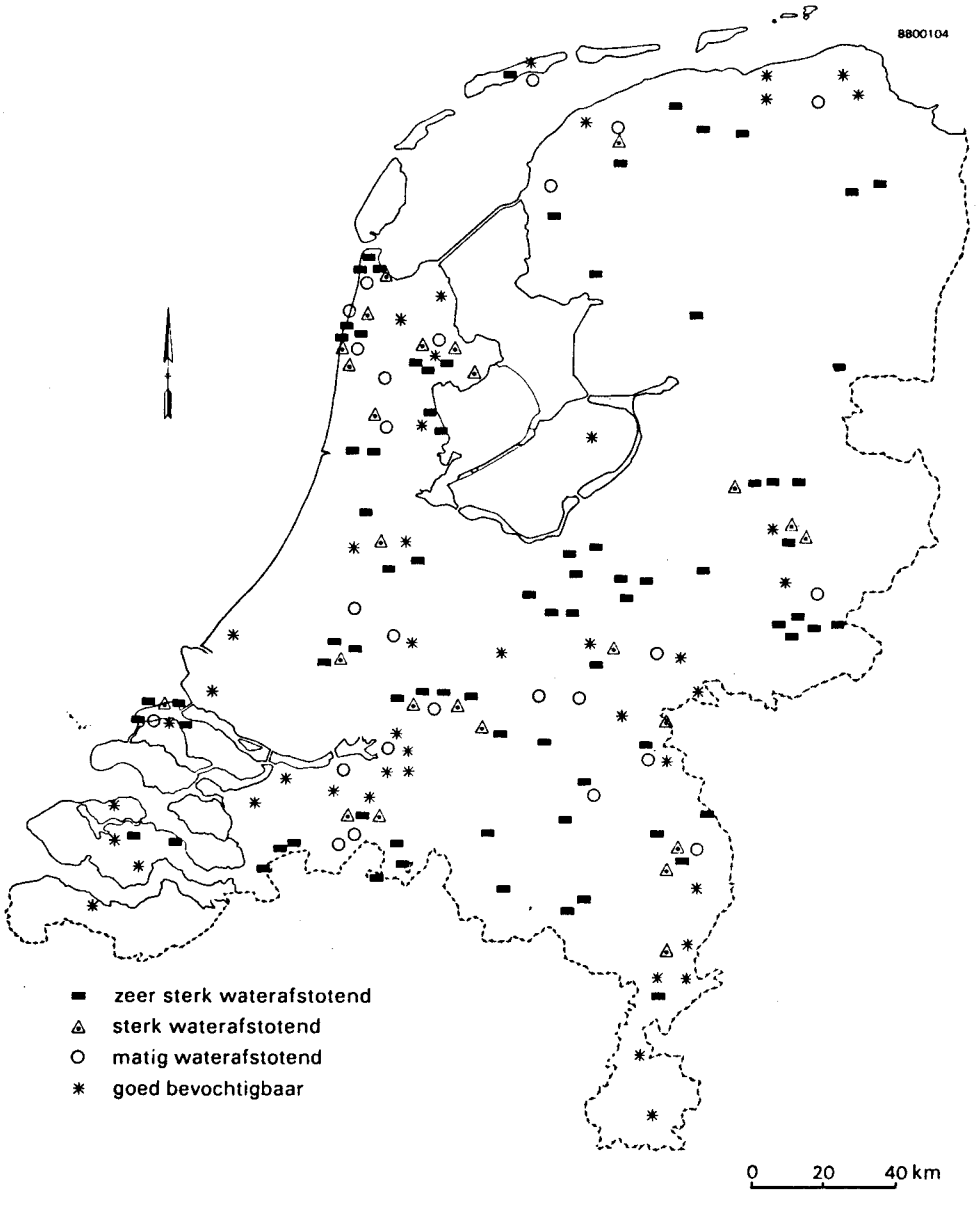
Daarom is gekozen voor de tracer kaliumjodide, dat evenals chloride en bromide gemakkelijk met het water mee door de grond stroomt. Op een waterafstotende grond hebben we op plekken van 1 m^2 steeds 100 mm van deze kaliumjodide-oplossing (10 g/l) toegediend met een geringe intensiteit, zodat geen water op het oppervlak kwam te staan. Na toediening van de oplossing werden de plekken met plastic afgedekt en na enkele dagen laag voor laag uitgegraven. Ieder horizontaal blootgelegd oppervlak werd bepoederd met een zeer dun laagje droge zetmeel. Nadat de dunne laag zetmeel door de bodemoplossing was bevochtigd, werd het oppervlak besproeid met een nevel chloorbleekmiddel. Op plekken waar jodium aanwezig was, werd het hierdoor geoxydeerd, waardoor op deze plekken een intens donkerblauwe kleur ontstond. Daarmee worden de preferente stroombanen van de oplossing zichtbaar gemaakt. De kleurpatronen zijn gefotografeerd (foto's 4 en 5) en daarna is met de Quantimet het oppervlak gemeten dat door de stroombanen werd gebruikt. Door preferente stroming komen opgeloste stoffen bij waterafstotende gronden eerder in het grondwater dan bij goed bevochtigbare gronden. In november 1986 hebben Hendrickx et al. (1988a en 1988b) een proef gestart in de omgeving van Ouddorp, waarbij kaliumbromide is gesproeid op een waterafstotende en op een goed bevochtigbare grond. Bij de bemonstering op 17 december 1986, na 120 mm neerslag, was de bromideconcentratie in de grond onder het grondwaterniveau bij de waterafstotende grond 6 tot 13 keer hoger dan bij die van de goed bevochtigbare grond. Op de resultaten van de jodiumkleurproeven en bromideproeven zal bij de resultaten in dit rapport niet worden teruggekomen. Voor deze resultaten wordt verwezen naar de uitvoerige publicaties hierover (Van Ommen et al., 1988; en Hendrickx et al., 1988a en 1988b).



Foto 4 Zichtbaar gemaakte stroombanen in een waterafstotende bovengrond op een diepte van 12 cm.



Foto 5 Zichtbaar gemaakte stroombanen in de ondergrond van een waterafstotende grond op een diepte van 75 cm.



Afb. 2 Verspreiding van goed bevochtigbare en van waterafstotende bovengronden in Nederland

Tabel 3 Indeling van de bovengrond van de onderzochte profielen naar de mate van waterafstotendheid

Bodemeenheid	Goed bevochtigbaar	Matig waterafstotend	Sterk waterafstotend	Zeer sterk tot extreem waterafstotend
VEENGRONDEN				
Koopveengronden	-	-	-	10
Weideveengronden	-	-	-	2
Aarveengronden	-	-	-	1
ZANDGRONDEN				
Enkeerdgronden	-	1	-	16
Beekeerdgronden	3	-	3	10
Gooreerdgronden	-	1	2	2
Haarpodzolgronden	-	-	-	9
Laarpodzolgronden	-	-	-	7
Veldpodzolgronden	-	-	3	19
Holtpodzolgronden	1	1	1	7
Horstpodzolgronden	1	-	-	-
Dampodzolgronden	-	-	-	1
Moerpodzolgronden	-	-	-	1
Loopodzolgronden	-	-	-	1
Kamppodzolgronden	-	-	-	2
Rooibrikgronden	-	-	1	-
Vlakvaaggronden	4	1	2	6
Vorstvaaggronden	3	-	-	1
Duinvaaggronden	-	-	-	4
KLEIGRONDEN				
Krijteerdgronden	1	-	-	-
Plaseerdgronden	-	-	-	1
Woudeerdgronden	-	1	2	3
Leekeerdgronden	1	-	3	2
Tuineerdgronden	2	-	4	-
Tochteerdgronden	2	1	-	2
Kuilbrikgronden	2	-	-	-
Bergbrikgronden	1	-	-	-
Slikvaaggronden	1	-	-	-
Nesvaaggronden	2	-	-	-
Poldervaaggronden	32	3	1	4
Ooivaaggronden	7	1	-	-

5 RESULTATEN EN DISCUSSIE

5.1 Verspreiding van waterafstotende gronden in Nederland

De mate van waterafstotendheid van de bovengrondmonsters, die verspreid door het gehele land zijn genomen en aanwezig zijn in het grondmonsterarchief van STIBOKA, en van andere grondmonsterplekken, is weergegeven in afbeelding 2. Voor de bepaling van de mate van waterafstotendheid is steeds de middelste van de drie WDPT-metingen genomen. Uit afbeelding 2 blijkt dat overal in het land wel waterafstotende bovengronden voorkomen. Opvallend is dat goed bevochtigbare en zeer sterk waterafstotende bovengronden zeer dicht bij elkaar kunnen voorkomen. Deze verschillen in waterafstotendheid hangen onder meer samen met verschillen in bodemgebruik en verschillen in bodemgesteldheid. Vooral gronden die onder bos of heide liggen en gronden die als grasland in gebruik zijn, hebben vaak zeer sterk waterafstotende bovengronden. Bij tuinbouw- en bouwlandpercelen is de waterafstotendheid over het algemeen minder sterk.

Waterafstotendheid komt voor bij bovengronden van zowel zand-, klei- als veengronden. In tabel 3 is de mate van waterafstotendheid gegeven, die met de WDPT-test werd vastgesteld bij de bovengrond van 206 grondmonsters die in het archief van STIBOKA aanwezig zijn. Alle onderzochte veengronden hadden een zeer sterk waterafstotende bovengrond. Zoals in tabel 3 is te zien, komen ook bij de zandgronden nogal eens zeer sterk waterafstotende bovengronden voor. Bij de kleigronden overwegen de goed bevochtigbare bovengronden.

Bij de podzolgronden bleken alle 22 aanwezige grondmonsters uit de uitspoelingshorizont, de A2-horizont, matig tot sterk waterafstotend te zijn. Van de 74 onderzochte inspoelingshorizonten, of B2-horizonten, waren er 18 extreem waterafstotend, 31 matig tot zeer sterk waterafstotend en 25 goed bevochtigbaar (tabel 4). Vooral B-horizonten met een hoger organischestofgehalte bleken vooral sterker waterafstotend te zijn.

Tabel 4 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van B2-horizonten van diverse podzolgronden, ingedeeld naar het percentage organische stof

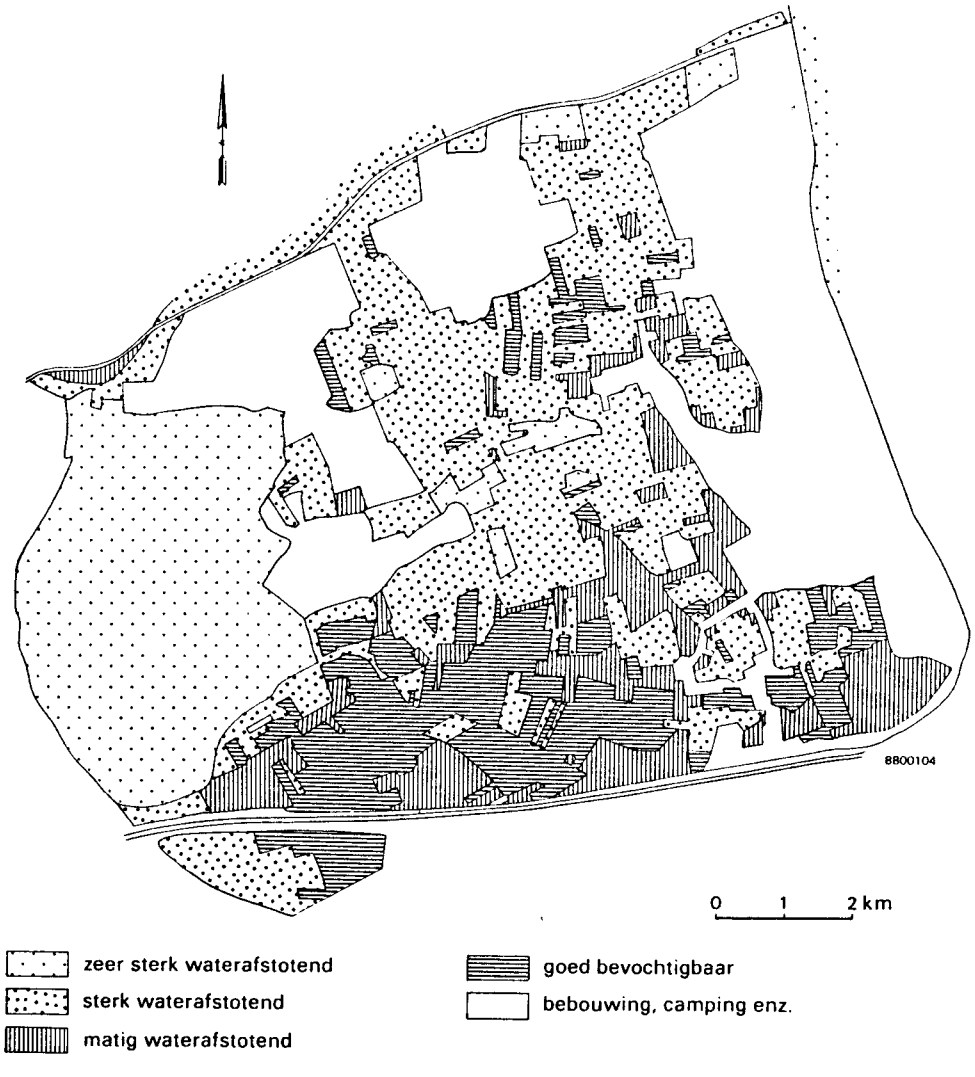
Percentage org.stof	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
	< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
0- 2	12*	3	1	1	3
2- 4	11	3*	7	1	5
4- 6	2	2	3	4*	5
6-14	-	-	1	5*	5

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

Van het buitenland is bekend dat in Wisconsin in Amerika sterk waterafstotende B2h-horizonten voorkomen (Richardson and Hole, 1978). In het veld kunnen met behulp van de WDPT-test zelfs vaak B2h-horizonten worden onderscheiden van B2-horizonten volgens Richardson (1984).

5.2 Verbreiding van waterafstotende gronden in de omgeving van Ouddorp

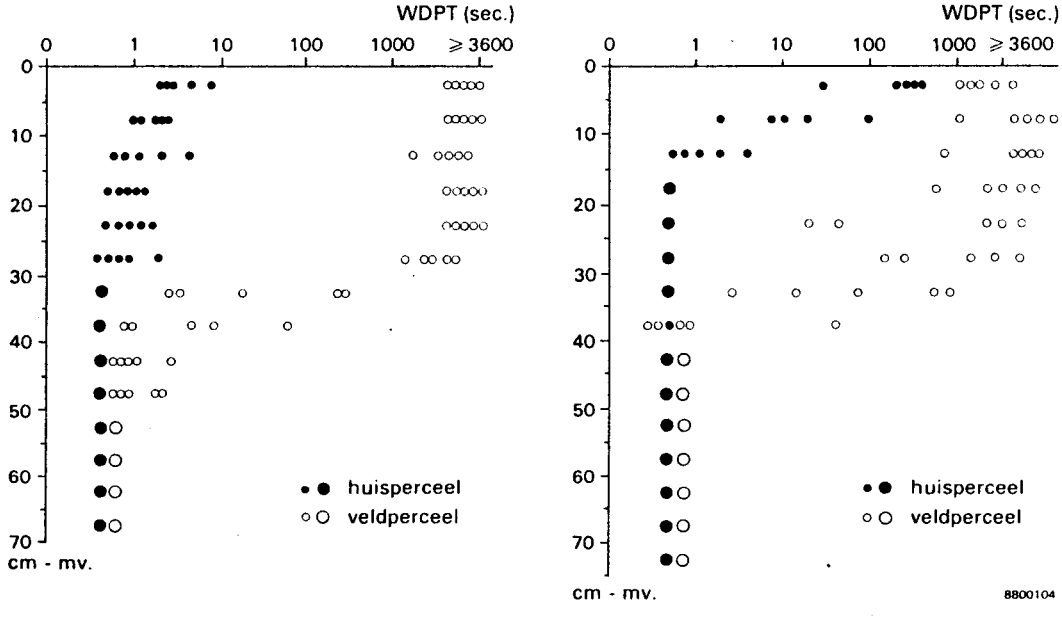
In de omgeving van Ouddorp (Goeree) is met behulp van de bodemkaart een kaart samengesteld met de mate van waterafstotendheid (afb. 3). Hiertoe zijn monsters genomen van oorspronkelijke (niet-afgegraven) percelen, uitgemijnde percelen, bekleide en



Afb. 3 Indeling van de gronden in de omgeving van Ouddorp naar de mate van waterafstotendheid van de bovengrond.

omgezette percelen, en is de mate van waterafstotendheid bepaald met de WDPT-test. De oorspronkelijke percelen hebben een zeer sterk tot extreem waterafstotende bovengrond; de waterdruppels blijven vaak meer dan één uur staan. De uitgemijnde percelen zijn sterk waterafstotend; de druppels blijven tenminste één minuut staan. Goed bevochtigbaar zijn de omgezette percelen, waarbij kalkrijke zavel en klei uit de ondergrond op het zand zijn gebracht, en de zandpercelen die zijn verbeterd met kalkrijk, kleirijk materiaal dat van elders is aangevoerd. Deze laatste gronden hebben nu vaak een bovengrond met ca. 5% lutum.

Zoals in tabel 5 is te zien, zijn alle monsters die in de uitgemijnde, bekleide percelen en in de omgezette percelen zijn genomen, goed bevochtigbaar. Huispercelen, dat zijn percelen die dichter bij de huizen liggen en vermoedelijk door bemesting een wat hoger humusgehalte van betere kwaliteit hebben, zijn over het algemeen wat minder waterafstotend dan de normaal uitgemijnde percelen, althans als ze beide in bouwland liggen. De bovenste 10 à 20 cm van zowel de huispercelen als veldpercelen zijn zeer sterk waterafstotend als ze in gras liggen (tabel 5). Het verschil in WDPT tussen 5 monsters uit een veldperceel en 5 monsters uit een huisperceel is weergegeven in afbeelding 4, linker figuur; beide percelen waren als bouwland in gebruik.



Afb. 4 Waterdruppelpenetratietijd van monsters uit lagen tot 70 cm diepte uit vlakvaaggronden. De monsters zijn genomen uit percelen met een veschillende cultuurtoestand in de omgeving van Ouddorp. Links uit een huisperceel en een veldperceel met een kalkloze, kleiarme zandbovengrond, beide in gebruik als bouwland. Rechts uit graslandpercelen met respectievelijk een kalkrijk, kleiige bovengrond en een kalkloze, kleiarme bovengrond (kleine cirkel is één meting; grote cirkel is vijf metingen).

Tabel 5 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij percelen met verschillende cultuurtoestand in de omgeving van Ouddorp op Goeree

Cultuurtoestand	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Niet-uitgemijnd	0- 5	-	-	-	6	39*
oorspronkelijk gras-	5-10	-	-	1	6	38*
land (n=45)	10-20	-	-	6	6	33*
	20-30	-	3	9	13*	20
	30-40	3	9	12	12*	9
	40-50	14	7	11*	7	6
Uitgemijnd	0- 5	-	-	3	7*	5
normaal	5-10	-	-	6	4*	5
grasland	10-20	1	2	6*	4	2
(n=15)	20-30	2	5	3*	5	-
	30-40	10*	4	1	-	-
	40-50	14*	-	1	-	-
Uitgemijnd	0-10	2	14*	7	4	3
normaal	10-20	4	8	7*	8	3
bouwland	20-30	6	6	10*	7	1
(n=30)	30-40	14	8*	7	1	-
	40-50	24*	3	3	-	-
Uitgemijnd	0- 5	-	-	-	5*	-
huisperceel	5-10	-	-	-	4*	1
grasland	10-20	-	-	-	5*	-
(n=5)	20-30	-	-	3*	2	-
	30-40	-	-	4*	1	-
	40-50	2	1*	1	1	-
Uitgemijnd	0-10	18	18*	4	-	-
huisperceel	10-20	16	17*	7	-	-
houwland	20-30	17	16*	7	-	-
(n=40)	30-40	29*	9	2	-	-
	40-50	39*	-	1	-	-
Uitgemijnd	0-10	45*	-	-	-	-
bekleid	10-20	45*	-	-	-	-
bouwland	20-30	43*	2	-	-	-
(n=45)	30-40	45*	-	-	-	-
	40-50	45*	-	-	-	-
Omgezette	0-10	50*	-	-	-	-
percelen	10-20	50*	-	-	-	-
(n=50)	20-30	50*	-	-	-	-

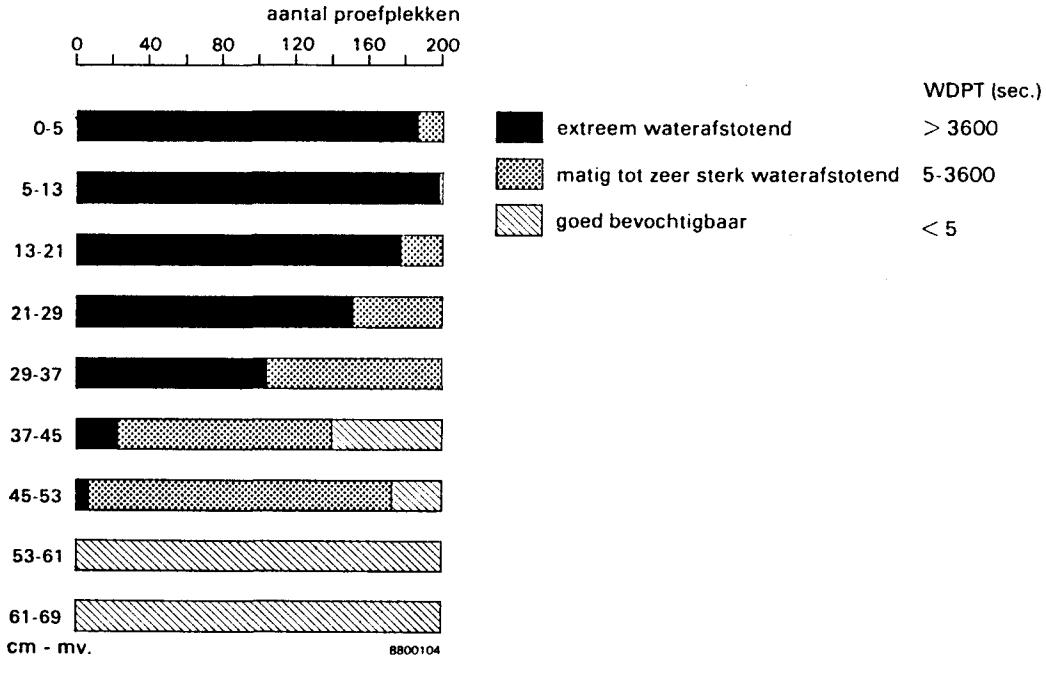
* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

In de rechter figuur is de waterafstotendheid weergegeven van 5 monsters uit een bekleid perceel en een normaal veldperceel; beide percelen hebben een grasvegetatie. Duidelijk is te zien dat bovenin het met kalkrijke klei verbeterde perceel de waterafstotendheid alweer begint; uit een test met zoutzuur bleek ook duidelijk dat bovenin het kalkgehalte sterk is teruggelopen.

In een oorspronkelijk perceel met natuurlijke grasvegetatie in de omgeving van Ouddorp bemonsterden we de laag van 0 tot 5 cm en vervolgens steeds aansluitende 8 cm dikke zandlagen tot een diepte van 69 cm bij tweehonderd profielen met behulp van de grondkolommencylinder. De bovenste lagen tot 21 cm diepte zijn praktisch altijd extreem waterafstotend; matig tot zeer sterke waterafstotendheid kwam over het algemeen voor tot 53 cm diepte en dieper was de zandondergrond steeds goed bevochtigbaar, zoals in afbeelding 5 goed is te zien. De profielen waren steeds kalkloos tot 75 cm diepte en bestaan geheel uit uiterst kleiarm (< 3 % lutum) matig fijn duinzand. De humusrijke bovenlaag is slechts 9 cm dik; eronder komt uiterst humusarm (< ½% organische stof) zand voor.

5.3 Invloed bodemgebruik en lutumgehalte op mate van waterafstotendheid en dikte van waterafstotende lagen

Hoewel waterafstotendheid een oppervlakte-fenomeen is, verschilt de dikte van de waterafstotende laag in verschillende

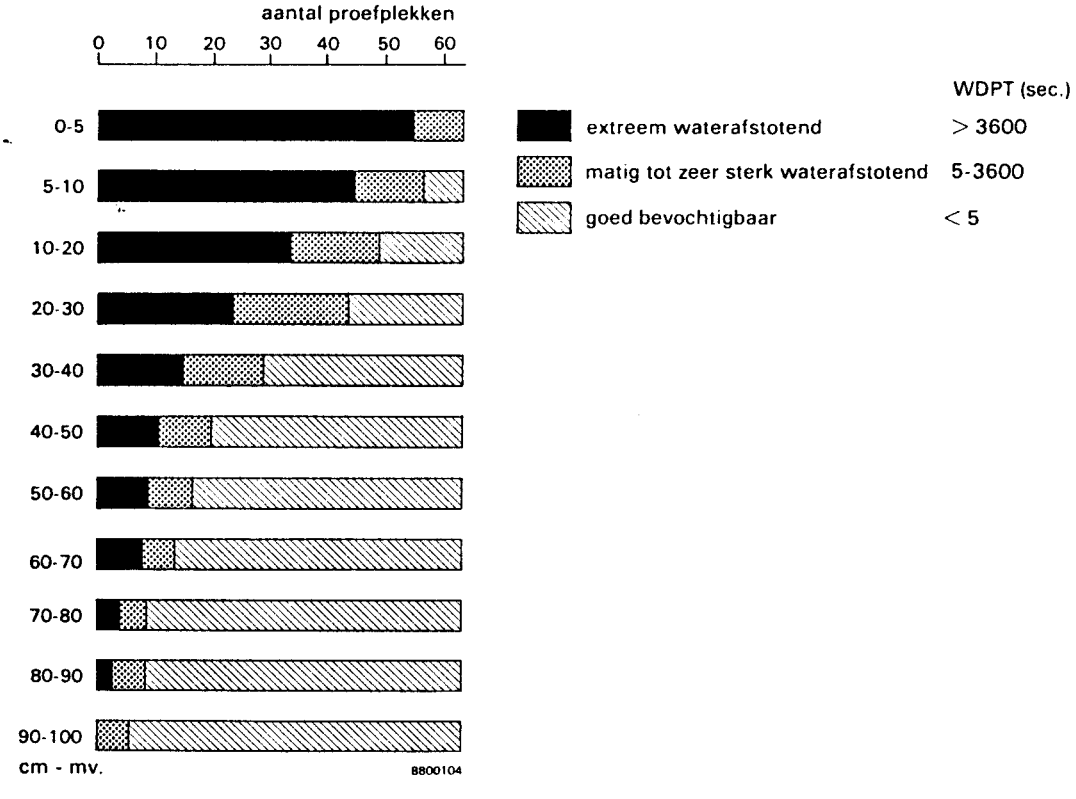


Afb. 5 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid bij lagen tot 69 cm diepte bij 200 proefplekken in een niet-uitgemijnd oorspronkelijk graslandperceel met vlakvaaggronden te Ouddorp op Goeree.

delen van de wereld. Men onderscheidt oppervlaktekorsten, dunne lagen en dikke lagen.

In de woestijngronden van Australië zijn waterafstotende oppervlaktekorsten van fungi en algen (voornamelijk Cyanophyceae) aangetroffen van 3-6 mm dikte (Bond and Harris, 1964). Ook in Mali komt in grote gebieden een 2-5 mm dikke waterafstotende oppervlaktekorst voor van algen van de familie Cyanophyceae (Rietveld, 1978). Dunne waterafstotende lagen, variërend in dikte van 5-10 cm, komen vaak voor onder een strooisellaag van enkele centimeters dikte in bosgebieden (Rietveld, 1978). Onder citrusvruchten in Florida vond Jamison (1969) waterafstotende lagen variërend van 2,5-30 cm diepte. Meeuwig (1971) en Mc Ghie (1980) vermelden extreme waterafstotendheid tot 15 cm diepte en matige waterafstotendheid tot 45 cm diepte. Echt dikke lagen van het maaiveld tot soms meer dan 60 cm diepte zijn gerapporteerd door Bond (1964 en 1969).

Zoals in afbeelding 6 is te zien, komt in de acht onderzochte Nederlandse bospercelen extreme waterafstotendheid voor op praktisch alle 64 proefplekken in de bovenste laag van 0-5 cm diepte. De mate van waterafstotendheid neemt duidelijk met de diepte af, maar in een enkel geval komt zelfs tot 90 cm diepte nog extreme waterafstotendheid voor. Dit is het gevolg van de eertijds diepe bewerking in sommige bospercelen, waardoor waterafstotend humeus materiaal uit de bovenlagen tot in de diepe ondergrond is gemengd.



Afb. 6 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid bij lagen tot 100 cm diepte bij 64 proefplekken in acht bospercelen op zandgrond.

Zoals in tabel 6 is te zien, is waterafstotendheid bij komkleigronden die in gras liggen, een echt oppervlakteverschijnsel. De bovenste 5 cm zijn meestal sterk waterafstotend, maar de

Tabel 6 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 15 cm diepte bij komkleigrasland (n=30)

Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
	< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
0 - 2,5	1	2	19*	8	-
2,5- 5	4	9	11*	6	-
5 -10	15	6*	9	-	-
10 -15	23*	5	1	1	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

laag van 10 tot 15 cm diepte is meestal al goed bevochtigbaar. Hoewel dit niet geverifieerd is, nemen we aan dat de zware komkleigronden in bouwland goed bevochtigbaar zijn.

Waterafstotende gronden komen verspreid door het hele westelijk deel van de USA voor onder een reeks van vegetatietypen van zowel bomen als struiken (DeBano, 1969). In Australië zijn grote zandvlakten ontgonnen en in gebruik genomen voor grasproduktie, waarbij de grond gewoonlijk lange tijd niet mechanisch verstoord wordt (Bond, 1969). Onder deze omstandigheden is waterafstotendheid een algemeen fenomeen over hele gebieden. Gronden voor tarwe in gebruik waren echter minder waterafstotend door de regelmatige grondbewerking (Bond, 1969). King (1981) vermeldt dat in natuurlijke bebost gebied overal waterafstotende bovenlagen worden aangetroffen; gedurende het ontginnen van deze gronden verdwijnt de waterafstotendheid, maar neemt weer toe als het land beplant wordt. Extreme waterafstotendheid werd dan ook waargenomen in 15 jaar oude lucerneweiden (King, 1981).

Bij grasland op kalkloze duin- en zeezandgronden in de polders de Zijpe en Callantsoog blijkt het lutumgehalte in de bovengrond een belangrijke rol te spelen bij de mate van waterafstotendheid. Bij een zeer kleiarme (< 3 % lutum) bovengrond is de bovenste 5 cm extreem waterafstotend en de laag van 5-30 cm zeer sterk waterafstotend, terwijl tot 50 cm diepte nog matig waterafstotend zand voorkomt (tabel 7). Zandgronden met een kleiarme (3-5% lutum) bovengrond hebben een zeer sterk waterafstotende toplaag en zijn sterk wateraf-stotend tot 20 cm diepte, terwijl ze op 30 cm diepte meestal al goed bevochtigbaar zijn. Zandgronden met een kleiige (5-8% lutum) bovengrond zijn bovenin zeer sterk waterafstotend, maar binnen 20 cm al matig waterafstotend, terwijl ze na 20 cm vrijwel steeds goed bevochtigbaar zijn.

Zoals uit tabel 8 blijkt, neemt de waterafstotendheid bij gebruik voor bouwland drastisch af en is het profiel ongeacht het lutumgehalte van het zand in de bovengrond steeds tot 40

Tabel 7 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij vlakvaaggronden in de polders Zijpe en Callantsoog met een zeer kleiarme, kleiarme en kleiige graslandbovengrond.

Lutumgehalte bovengrond	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
zeer kleiarm	0- 5	-	-	-	9	21*
< 3 % lutum	5-10	-	-	4	12*	14
(n=30)	10-20	-	1	6	14*	9
	20-30	2	3	9	12*	4
	30-40	7	4	10*	9	-
	40-50	11	7*	10	1	1
kleiarm	0- 5	-	-	6	17*	2
3-5% lutum	5-10	-	2	14*	8	1
(n=25)	10-20	3	6	9*	7	-
	20-30	9	5*	6	4	1
	30-40	18*	3	2	1	1
	40-50	21*	2	1	-	1
kleiig	0- 5	2	1	7	8*	7
5-8% lutum	5-10	4	8	10*	2	-
(n=25)	10-20	12	4*	7	2	-
	20-30	16*	6	2	1	-
	30-40	20*	2	3	-	-
	40-50	22*	3	-	-	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

cm, of meer dan 50 cm diepte matig waterafstotend. Dit komt door de diepe grondbewerking in deze gronden. Vooral de zeer kleiarme gronden zijn in verband met de bloembollenteelt vaak tot 55 à 65 cm diepte doorgeploegd.

Ook uit de literatuur blijkt dat er vaak een verband wordt gezien tussen de mate van waterafstotendheid en het lutumgehalte van de grond. Waterafstotende gronden in de Sierra Nevada hebben steeds minder dan 4,5% lutum (Meeuwig, 1971). Volgens Bond en Harris (1964) bevatten de waterafstotende gronden in West-Australië, Zuid-Australië en West-Victoria over het algemeen minder dan 5% lutum. Bond (1969) legt de grens voor grote graslandgebieden in Australië op 7% lutum en Holzhey (1969) zelfs op 10%. Maar er komen in West-Australië ook waterafstotende zwaardere gronden met meer dan 20% lutum, tot soms zelfs 30% lutum voor (Mc Ghie and Posner, 1980; en Holzhey, 1969).

Bij citrusvruchten in het deltagebied van de Nijl in Egypte namen Hartman et al. (1976) sterke waterafstotende gronden waar met een lutumgehalte van 35%, een $CaCO_3$-percentage van 8 en een organische-stofgehalte van 5%, terwijl de pH/KCl 7,5 was.

In Nederland is door Domingo en Maurer (1949), Domingo (1950) en Veenenbos (1951) gewezen op het voorkomen van venige kleien en rodoornachtige kleien, die hydrofoob ofwel waterafstotend zijn.

Tabel 8 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij vlakvaaggronden in de polders Zijpe en Callantsoog met een zeer kleiarme, kleiarme en kleiige bouwlandbovengrond

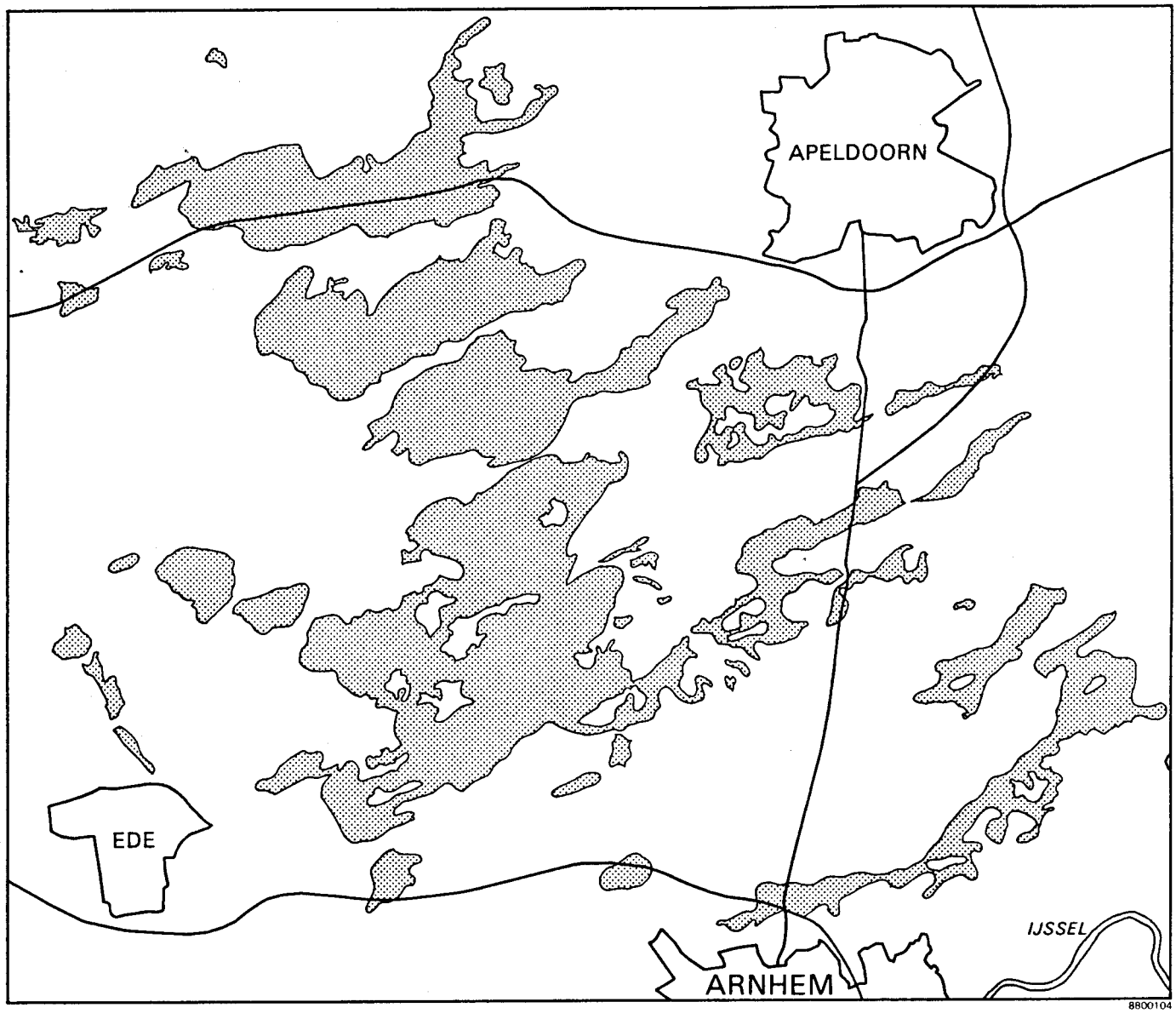
Lutumgehalte bovengrond	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
zeer kleiarm	0-10	2	8*	6	-	-
< 3 % lutum	10-20	3	8*	5	-	-
(n=16)	20-30	2	8*	5	1	-
	30-40	3	9*	4	-	-
	40-50	6	8*	2	-	-
kleiarm	0-10	6	10*	5	1	-
3-5% lutum	10-20	5	8*	8	1	-
(n=22)	20-30	5	12*	5	-	-
	30-40	6	9*	6	1	-
	40-50	11	5*	4	2	-
kleiig	0-10	4	4*	2	1	-
5-8% lutum	10-20	2	6*	2	1	-
(n=11)	20-30	4	5*	1	1	-
	30-40	4	6*	1	-	-
	40-50	7*	3	1	-	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

5.4 Waterafstotende gronden in de wijde omgeving van Arnhem

Duinvaaggronden zijn zandgronden met een weinig donkere (vage), humushoudende bovengrond en met ijzerhuidjes onder de eventueel aanwezig A1-horizont (De Bakker en Schelling, 1966). Ze worden in het onderzochte gebied in hoog boven het grondwater gelegen stuifzanden, ontstaan door verstuiving van dekzanden, gevonden. Het zijn steeds leemarme en zwak lemige fijne zandgronden (eenheid Zd21). Ze komen voornamelijk in grote, aaneengesloten complexen voor, zoals in het Kootwijkerzand, Het Harskampsche Zand, het Otterlosche Zand en het Oud-Reemsterzand (afb. 7). Kenmerkend voor deze gronden is het onrustige reliëf met de soms zeer steile stuifduinen (foto 6, pag. 40). Sommige delen zijn geheel onbegroeid, andere hebben een heidevegetatie of zijn bebost. Op de kale duinen ontbreekt nog elk spoor van bodemvorming. Op de begroeide gronden is een zeer dunne, uiterst humusarme tot zeer humusarme A1 aanwezig. Het gehele stuifzandpakket bestaat uit uiterst humusarm, leemarm, matig fijn zand.

Het onbegroeide zand zonder bodemvorming is goed bevochtigbaar (tabel 9). Een zeer dunne, 5 tot maximaal 10 cm dikke, zeer sterk waterafstotende oppervlaktelaag komt voor bij de ten dele met korstmossen, bladmossen, buntgras en heide begroeide duinvaaggronden. Op 10 cm diepte is het zand bij deze vegetaties meestal al goed bevochtigbaar (tabel 9). Bij de duinvaaggronden onder bos komt in de bovenste 5 cm meestal extreme waterafstotendheid voor. De waterafstotendheid neemt met de diepte af en



Afb. 7 Verspreiding van duinvaaggronden met een zeer sterk tot extreem waterafstotende bovenlaag in het gebied ten noordwesten van Arnhem en ten zuidwesten van Apeldoorn.

op 30 cm diepte is het zand meestal goed bevochtigbaar. Een enkele maal werd bij rommelige profielen, met tot op grotere diepte wat organisch materiaal in het profiel, tot meer dan 50 cm diepte zeer sterke waterafstotendheid vastgesteld.

De 45 onderzochte profielen van de duinvaaggronden zijn goed verspreid genomen, zodat afbeelding 7 een representatief beeld geeft van zandgronden met een relatief dunne, zeer sterk tot extreem waterafstotende bovenlaag.

Enkeerdgronden zijn ontstaan door eeuwenlange bemesting met zandhoudende potstalmest. In de potstal werden heideplaggen, grasplaggen en bosstrooisel gebruikt als strooisel, waarmee

vaak ook enig zand werd aangevoerd. Ook werd aan de mest wel zand toegevoegd, dat speciaal voor dat doel soms in grote hoeveelheden werd gewonnen. In het algemeen ontstond door toepassing van de genoemde materialen een grijsbruin, donkergrijs of zwart ophogingsdek. Op grond van de kleur van het opgebrachte dek worden ze onderscheiden in bruin en zwart (De Bakker en Schelling, 1966). Voorts worden ze nog onderverdeeld naar het leemgehalte en de grofheid van het zand. De herkomst van de bruine kleur van genoemde gronden is niet met zekerheid bekend; er is waarschijnlijk ten dele bemest met kleihoudende, bruine plaggen uit de uiterwaarden. De plaggen voor de bemesting van een paar kleine perceeltjes bruin oud bouwland in de Gelderse Vallei komen mogelijk van de lemige beekeerdgronden, die in deze omgeving eveneens een bruine kleur hebben. Aangenomen wordt dat de zwarte bovengrond vooral is ontstaan door het gebruik van heideplaggen in de potstal. Het organischestofgehalte van de bruine bovengronden is in de regel duidelijk lager dan dat van de zwarte.

De bruine enkeerdgronden zijn zandgronden met een meer dan 50 cm dikke bovengrond. Ze komen veel minder voor dan de zwarte enkeerdgronden en wel voornamelijk langs de grote beekdalen in Overijssel en de Achterhoek. Het humusgehalte van het dek vertoont een geringe variatie (3-5%); de C/N-verhouding is voor pleistocene zandgronden laag (12-15). De textuur van het dek is vaak aan de zware kant: sterk lemig, soms zeer sterk lemig, vaak kleiig zand. Het relatief hoge lutumgehalte is te danken aan het gebruik van kleiplaggen bij de bemesting van de oude bouwlanden (Pijls, 1948). Dergelijke gronden worden tot de zandgronden gerekend omdat ze vaak over minder dan 40 cm lutumrijk zijn en/of een lutumgehalte hebben dat slechts weinig boven de 8% ligt. Bij bruine enkeerdgronden met een laag leemgehalte zou meer bosstrooisel in de zandmest zijn gebruikt (Pijls, 1948). Domhof (1953) stelt echter: "het is niet duidelijk welk strooiselmateriaal is gebruikt".

Er komen veel overgangen van bruine naar zwarte enkeerdgronden voor. Alleen de duidelijk bruine zijn als zodanig onderscheiden. Daartoe moet in het mestdek binnen 25 cm een laag van ten minste 10 cm dikte beginnen die voldoet aan bepaalde kleureisen (Stichting voor Bodemkartering, 1965).

De zwarte enkeerdgronden zijn zandgronden met een dikke zwarte A1, die dikker is dan 50 cm. Het "zwart" van de A1 is in veel gevallen zeer donkergrijs tot zeer donker grijsbruin. Uitgesproken zwarte bovengronden komen weinig voor. De donkere kleur is waarschijnlijk een gevolg van het opbrengen van plaggenmateriaal van gronden waarin een humuspodzol was ontwikkeld (Stichting voor Bodemkarteirng, 1975). Het humusgehalte kan uiteenlopen van 4-10%. De C/N-verbouding is 16-20. De zwarte humus wordt ongunstiger beoordeeld dan de bruine. Vooral in droge toestand ziet de bovengrond er loodzandachtig uit; bij regen schift deze in grijze korrels en pikkige, gliedeachtige humus (De Bakker en Schelling, 1966).



Foto 6 Stuifzandgebied met duinvaaggronden bij Rheden

Tabel 9 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bos, buntgras en heide, en onbegroeide gedeelten van duinvaaggronden

Gebruik + code bodem-eenheid	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bos	0- 5	-	2	3	6	18*
Zd21	5-10	2	3	2	11*	11
(n=29)	10-20	2	7	7*	5	8
	20-30	11	8*	5	-	5
	30-40	19*	5	3	-	2
	40-50	21*	4	2	2	-
Buntgras +	0- 5	-	3	3	4*	3
heide	5-10	4	5*	-	2	2
Zd21	10-20	7*	4	1	-	1
(n=13)	20-30	12*	-	1	-	-
	30-40	13*	-	-	-	-
	40-50	13*	-	-	-	-
Onbegroeid	0- 5	2*	1	-	-	-
Zd21	5-10	2*	1	-	-	-
(n=3)	10-20	2*	1	-	-	-
	20-30	3*	-	-	-	-
	30-40	2*	1	-	-	-
	40-50	3*	-	-	-	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

De bruine enkeerdgronden blijken bij gebruik als bouwland vrijwel altijd goed bevochtigbaar te zijn. Bij gebruik als grasland komt soms in de bovenste 10 cm matige tot sterke waterafstotendheid voor (tabel 10).

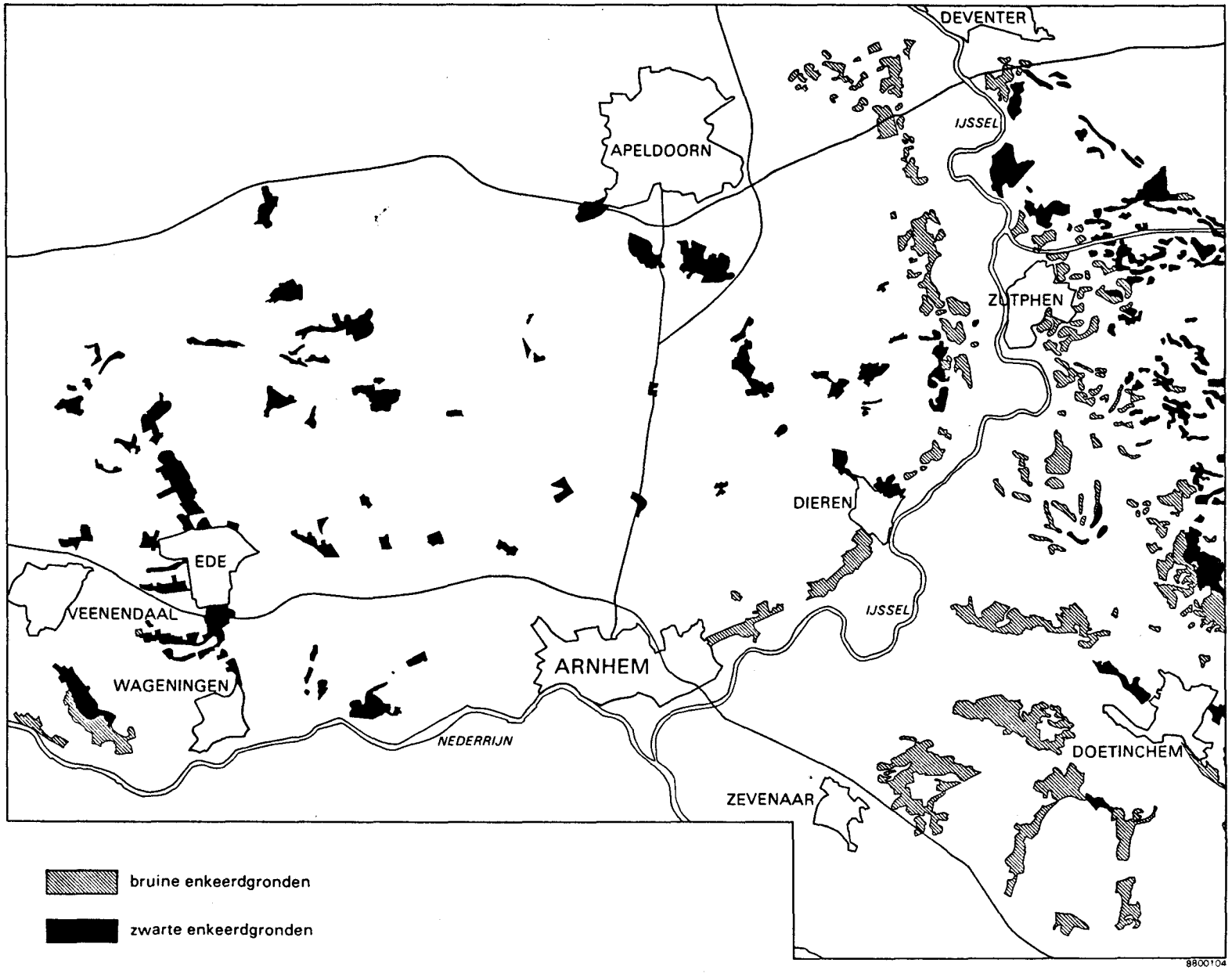
Tabel 10 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland en grasland van bruine enkeerdgronden

Gebruik + code bodem-eenheid	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bouwland	0-10	6*	1	-	-	-
bEZ21	10-20	6*	1	-	-	-
(n=7)	20-30	6*	1	-	-	-
	30-40	7*	-	-	-	-
	40-50	7*	-	-	-	-
Bouwland	0-10	34*	2	-	-	-
bEZ23	10-20	34*	2	-	-	-
(n=36)	20-30	36*	-	-	-	-
	30-40	36*	-	-	-	-
	40-50	36*	-	-	-	-
Bouwland	0-10	7*	1	-	-	-
bEZ30	10-20	7*	1	-	-	-
(n=8)	20-30	7*	1	-	-	-
	30-40	8*	-	-	-	-
	40-50	8*	-	-	-	-
Grasland	0- 5	12*	7	1	-	1
bEZ23 +	5-10	17*	2	2	-	-
bEZ30	10-20	21*	-	-	-	-
(n=21)	20-30	21*	-	-	-	-
	30-40	21*	-	-	-	-
	40-50	21*	-	-	-	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

Zoals uit tabel 11 blijkt, komt bij de zwarte enkeerdgronden een grote variatie in waterafstotendheid voor. Er komen heel wat goed bevochtigbare bovengronden voor, terwijl ze in een enkel geval extreem waterafstotend zijn. De bouwlanden hebben over het algemeen een matig waterafstotende bovengrond tot 20 cm diepte, en dieper een goed bevochtigbare laag. De graslanden hebben meestal een sterk waterafstotende bovenlaag tot 30 cm diepte en daaronder een matig waterafstotende laag tot 40 cm diepte (tabel 11). De verbreiding van de goed bevochtigbare bruine enkeerdgronden en de in meer of mindere mate waterafstotende zwarte enkeerdgronden is weergegeven in afbeelding 8.

Podzolgronden hebben een inspoelings (B-horizont), waarin organische stof al dan niet samen met ijzer- en aluminiumverbindingen is opgehoopt. Het moedermateriaal van de podzolgronden bestaat uit kalkloos zand met een gering gehalte verweerbare mineralen. De verschillen in mineralogische rijkdom zijn vermoede-



Afb. 8 Verspreiding van bruine en zwarte enkeerdgronden in het gebied ten zuiden van Kootwijk en Deventer. De bruine enkeerdgronden in zowel gras- als bouwland hebben steeds een goed bevochtigbare bovengrond.
De zwarte enkeerdgronden in grasland hebben een sterk waterafstotende bovengrond en die in bouwland een goed bevochtigbare tot matig waterafstotende bovengrond

Tabel 11 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, grasland en bos van zwarte enkeerdgronden

Gebruik + code bodem-eenheid	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bouwland	0-10	13	18	1	1	1
zEZ21	10-20	11	17*	5	-	1
(n=34)	20-30	18*	10	4	1	1
	30-40	20*	9	3	-	2
	40-50	20*	10	2	-	2
Bouwland	0-10	3*	2	-	-	-
zEZ23	10-20	3*	1	1	-	-
(n=5)	20-30	3*	2	-	-	-
	30-40	3*	1	1	-	-
	40-50	3*	2	-	-	-
Bouwland	0-10	8	10*	-	-	-
zEZ30	10-20	6	12*	-	-	-
(n=18)	20-30	12*	6	-	-	-
	30-40	12*	6	-	-	-
	40-50	12*	6	-	-	-
Grasland en	0- 5	1	8	8*	5	-
bos	5-10	3	8	6*	5	-
zEZ21,	10-20	3	6	9*	4	-
zEZ23,	20-30	7	5*	7	2	1
zEZ30	30-40	11	4*	4	2	1
(n=22)	40-50	13*	4	2	-	3

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

lijk de oorzaak van de vorming van twee soorten podzolgronden: de Moderpodzolgronden (Y) en de Humuspodzolgronden (H). Moderpodzolgronden vindt men in mineralogisch rijke zanden met diepe grondwaterstanden. Ze hebben een duidelijke podzol-B-horizont, waarvan de organische stof overwegend uit moder bestaat, die intensief gemengd is met de minerale delen. Moder gaat steeds samen met de aanwezigheid van ijzer als huidjes op de zandkorrels en als fijn "stof" tussen de kwartskorrels. In moderpodzolen zijn de overgangen tussen de verschillende horizonten meestal zeer geleidelijk. Een uitgesproken loodzandlaag (A2-horizont) ontbreekt vaak.

Bij de verspreid in de omgeving van Arnhem bemonsterde profielen hebben de holtpodzolgronden (moderpodzolen) in bouwland een matig waterafstotende bovengrond van ca. 30 cm dikte op een goed bevochtigbare ondergrond (tabel 12).

Bij de holtpodzolgronden in grasland, heide en bos is de bovenste 5 cm meestal extreem waterafstotend en neemt de waterafstotendheid met de diepte geleidelijk af. Op 20-30 cm diepte begint meestal al de goed bevochtigbare ondergrond.

De humuspodzolgronden zijn ontstaan in arm moedermateriaal. De organische stof in de duidelijke podzol-B-horizont is amorf en

Tabel 12 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, grasland en heide, en bos van holtpodzolgronden

Gebruik + code bodemeenheid	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bouwland	0-10	6	2*	2	2	-
Y21 en	10-20	4	5*	1	2	-
Y30	20-30	5	4*	1	2	-
(n=12)	30-40	10*	2	-	-	-
	40-50	12*	-	-	-	-
Grasland en	0- 5	-	1	1	-	3*
heide	5-10	-	1	2	1*	1
Y21 en	10-20	1	-	2*	-	2
Y30	20-30	2	-	2*	1	-
(n=5)	30-40	4*	-	1	-	-
	40-50	5*	-	-	-	-
Bos	0- 5	-	-	1	3	8*
Y21 en	5-10	-	2	4	1*	5
Y30	10-20	4	1	2*	4	1
(n=12)	20-30	7*	-	3	1	1
	30-40	9*	1	-	1	1
	40-50	10*	1	1	-	-

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

ligt als huidjes op de zandkorrels en verbindt deze korrels door bruggetjes. Vaak zijn ook de poriën geheel of gedeeltelijk met amorfe humus gevuld. De haarpodzolgronden zijn humuspodzolgronden met ijzerhuidjes die onder droge omstandigheden bij diepe grondwaterstanden zijn gevormd. In de bovenste 5-10 cm van de B-horizont heeft meestal een sterke verrijking met amorfe humus plaatsgevonden, de zgn. B2h-horizont. Het zand van de C-horizont heeft een geelblonde kleur, wat wijst op de aanwezigheid van ijzerhuidjes op de zandkorrels. Vaak komt onder de A1-horizont een grijze loodzandlaag (A2-horizont) voor.

In de omgeving van Arnhem hebben de haarpodzolgronden in bouwland een goed bevochtigbare tot matig waterafstotende bovengrond (tabel 13). Bij gebruik als heide komt in de bovenste 5 cm zeer sterke tot extreme waterafstotendheid voor, die daarna met de diepte afneemt, waarbij de grond op 20-30 cm diepte goed bevochtigbaar wordt. Bij gebruik als bos komt in de bovenste 10 cm van het profiel zeer sterke tot extreme waterafstotendheid voor. De waterafstotendheid neemt met de diepte af, maar gaat tot een grotere diepte door dan bij de gronden in heide (tabel 13).

In afbeelding 9 is de mate van waterafstotendheid in de bovenste 10 cm van o.a. de holtpodzolgronden en haarpodzolgronden bij verschillend bodemgebruik voor de onderzochte profielen weergegeven. Duidelijk blijkt de betere bevochtigbaarheid van de gronden bij gebruik als bouwland.

Tabel 13 Frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van lagen tot 50 cm diepte bij bouwland, heide en bos van haarpodzolgronden

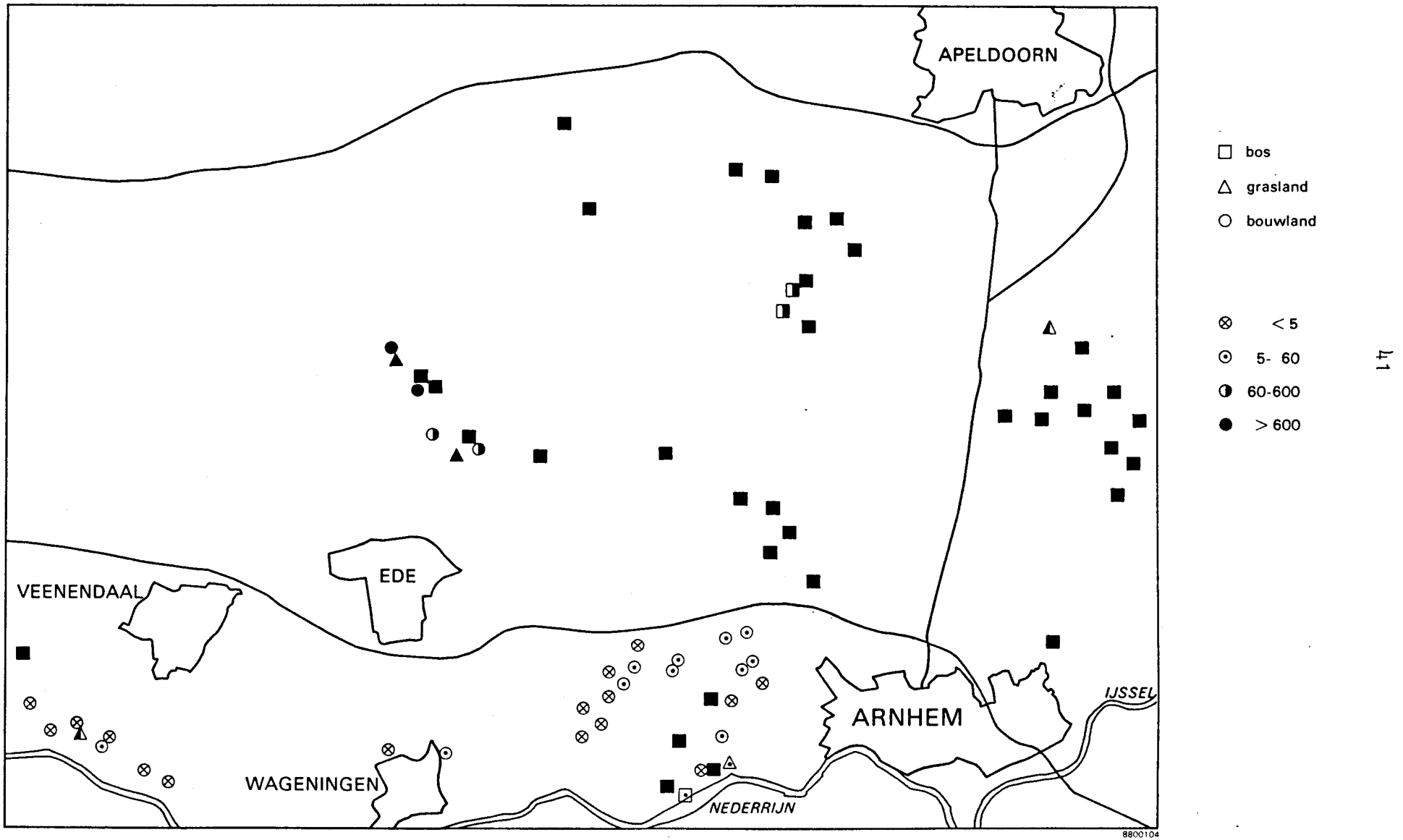
Gebruik + code bodem-eenheid	Diepte cm - mv.	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bouwland	0-10	7	8*	-	-	-
Hd21 en	10-20	5	8*	2	-	-
Hd30	20-30	8*	5	2	-	-
(n=15)	30-40	11*	4	-	-	-
	40-50	15*	-	-	-	-
Heide	0- 5	-	-	-	3	4*
Hd21 en	5-10	-	-	1	4*	2
Hd30	10-20	-	3	1*	1	2
(n=7)	20-30	4*	2	-	1	-
	30-40	7*	-	-	-	-
	40-50	7*	-	-	-	-
Bos	0- 5	-	-	1	6	9*
Hd21 en	5-10	-	-	4	4	8*
Hd30	10-20	-	1	1	7*	7
(n=16)	20-30	2	2	2	4*	6
	30-40	7	1	2*	4	2
	40-50	9*	2	2	2	1

* Klasse met de mediaan van de WDPT-metingen

5.5 Preferente banen en verschillen in vochtgehalte

Verschillende onderzoekers hebben gewezen op de grote verschillen in vochtgehalte op korte afstand in het veld. Mc Ghie en Posner (1980) nemen aan dat het onregelmatig "patchy" voorkomen het gevolg is van verschillen in huidige of eertijdse verschillen in plantengroei. Soms wordt gewezen op de invloed van minidepressies, stroming langs stenen en via aanwezige gangen, kanalen en scheuren (Van 't Woudt, 1959; en Krammes and DeBano, 1965). Vaak wordt de aanzienlijke variatie in vochtgehalte verklaard met discontinuiteiten in de waterafstotende laag ten gevolge van het plaatselijk voorkomen van een geringe waterafstotendheid, of zelfs het ontbreken ervan (Bond, 1964; DeBano, 1975; Jamison, 1969; en Meeuwig, 1971). Door genoemde onderzoekers zijn echter nauwelijks experimenten uitgevoerd om het verband tussen het bodemvochtgehalte en de mate van waterafstotendheid aan te tonen.

In waterafstotende gronden komt, zoals eerder beschreven, een instabiel bevochtigingsfront voor, waardoor als de grond uitgedroogd is geweest, bij regen preferente vochtbanen ontstaan (zie ook foto 3). In zandgronden in Ouddorp blijken deze preferente stroombanen o.a. samen te hangen met de dichtheid van de grond en de mate van waterafstotendheid. Bij een grotere dichtheid



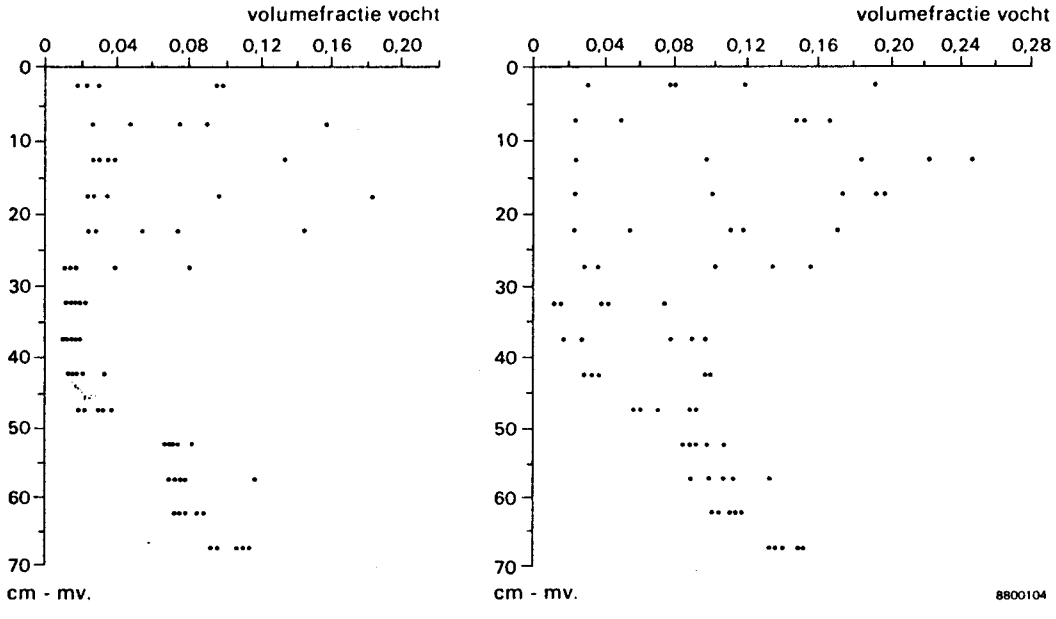
Afb. 9 Mate van waterafstotendheid in de bovenste 10 cm bij haarpodzolgronden, holtpodzolgronden, loopodzolgronden, beekeerdgronden en vlakvaaggronden, gelegen in bos, grasland en bouwland

van de grond en bij een geringe waterafstotendheid zijn hogere volumepercentages vocht vastgesteld (Hendrickx et al., 1988b).

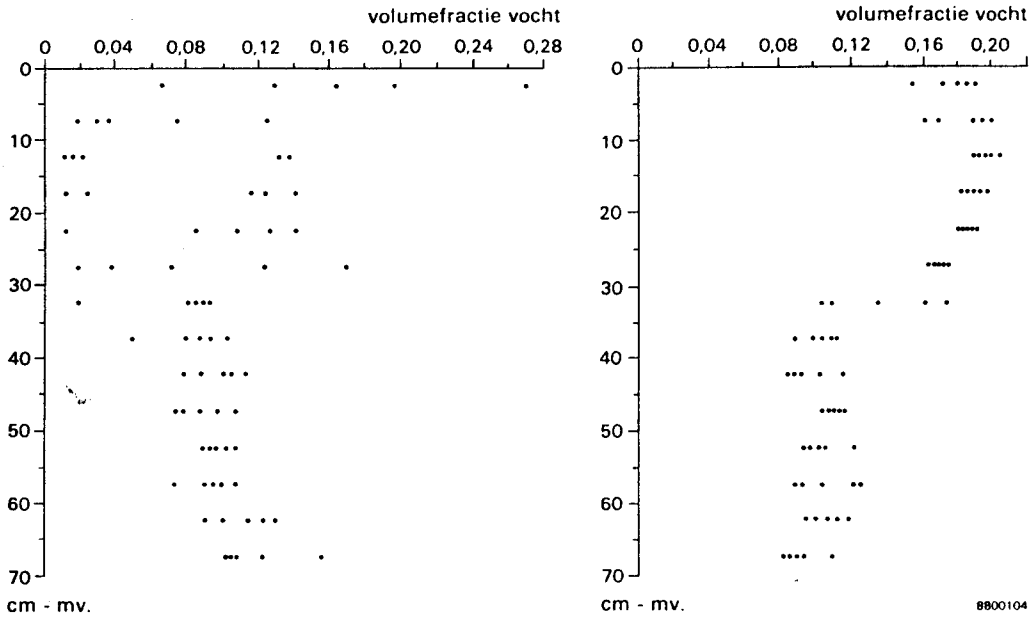
In een bouwlandperceel in de omgeving van Ouddorp met een zeer sterk tot extreem waterafstotende bovenlaag (bovengrond en deel ondergrond) van ca. 45 cm hebben we in augustus 1986 een aantal vochtbemonsteringen gedaan. In de linker figuur van afbeelding 10 is de vochttoestand van het profiel op 25 augustus weergegeven. In de voorafgaande week was in totaal 18 mm water gevallen.

Opvallend is de nog droge laag met minder dan 3% vocht op een diepte van 30-50 cm. Voorts valt de grote variatie in vochtgehalte op van de bovenste 30 cm. Het vochtgehalte loopt hierbij uiteen van 2-18%, duidelijk verbandhoudend met de onregelmatige aanwezigheid van preferente stroombanen. In de rechterfiguur is de vochttoestand van 29 augustus weergegeven, nadat er sinds 25 augustus nog ruim 40 mm neerslag was gevallen. De preferente stroombanen zijn nu kennelijk ook op een diepte van 30-50 cm aanwezig. De variatie in het vochtgehalte op 15 cm diepte is extreem. Vlak naast elkaar komt droog zand met slechts 2% vocht naast zand met 25% vocht (ofwel 12 keer zo hoog) voor.

Op 16 september 1986 hebben we twee profielkuilen op vocht bemonsterd in twee graslandpercelen in Ouddorp. Sinds 29 augustus was er nog eens ruim 50 mm neerslag gevallen (afb. 11). In de linker figuur is de vochttoestand weergegeven van een wateraf-



Afb. 10 Vochtgehalten gemeten in vijfvoud in bouwland van een sterk waterafstotende vlakvaaggrond in de omgeving van Ouddorp. Links de vochttoestand op 25 augustus 1986 (na 18 mm neerslag sinds 18 augustus). Rechts de vochttoestand op 29 augustus (na 40 mm neerslag sinds 18 augustus).

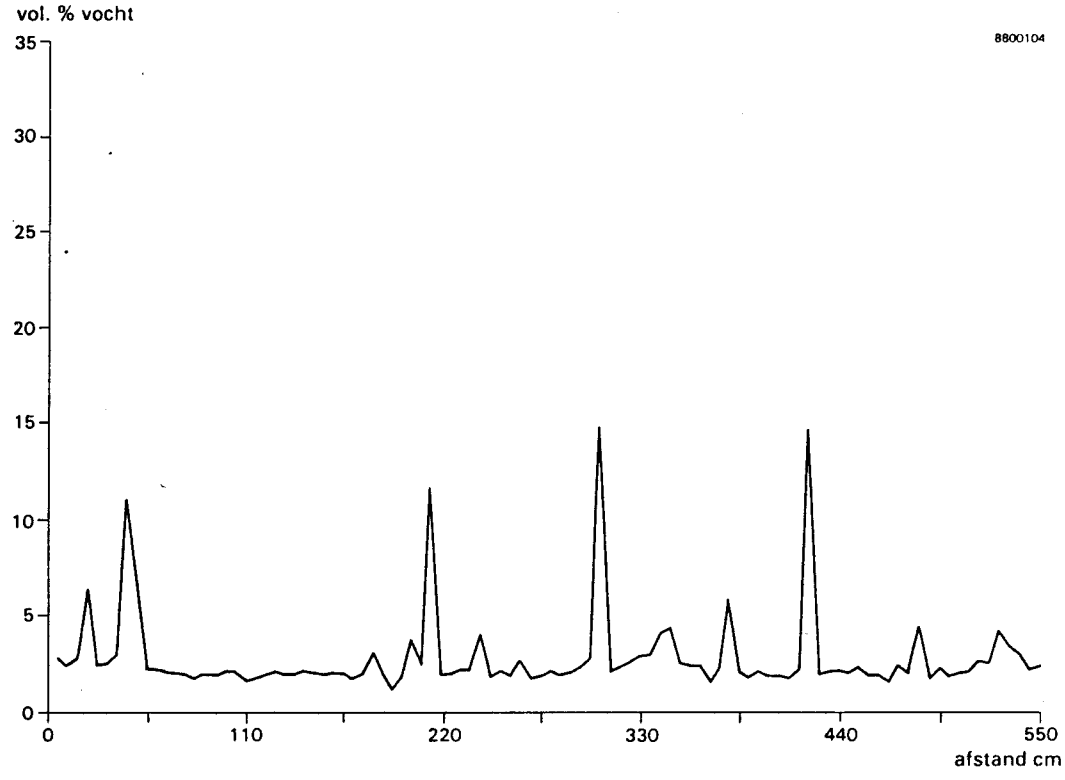


Afb. 11 Vochtgehalten gemeten in vijfvoud in grasland op 16 september 1986. Links een vlakvaaggrond met een zeer sterk waterafstotende kalkloze, kleiarme bovengrond. Rechts een vlakvaaggrond met een kalkrijke, kleiige, goed bevochtigbare bovengrond.

stotende, kalkloze, kleiarme zandgrond. Plaatselijk heeft de bovenste 35 cm slechts 2% vocht; de grote variatie in vochtgehalte in de bovenste 35 cm is weer opvallend. Dit in tegenstelling tot de variatie in de bovenlaag van het ernaast gelegen graslandperceel. Dit perceel is eertijds verbeterd met kalkrijke klei, die door de bovengrond is gemengd. De bovengrond bevat nu ca. 5% lutum en is kalkrijk en goed bevochtigbaar. Zoals in de rechterfiguur is te zien, is het vochtgehalte in de bovengrond aanzienlijk hoger en is de variatie gering. Dit laatste komt omdat bij deze grond normale frontstroming optreedt en preferente stroombanen ontbreken.

Een grote variatie in vochtgehalte werd ook vastgesteld in een extreem waterafstotend perceel met oorspronkelijke grasvegetatie in Ouddorp op 24 mei 1988 (afb. 12). De grond was in deze laag uitgedroogd tot een volumepercentage vocht van ca. 2%. Doordat de neerslag in de preferente stroombanen is getransporteerd, zijn plaatselijk hogere vochtgehalten tot ca. 15% gemeten.

Sommige gronden zijn zo waterafstotend dat ze zelfs na een natte herfst en natte winter niet herstellen. Een duidelijk voorbeeld hiervan werd gevonden in de Westduinen bij Ouddorp. Op 29 maart 1988 hebben we hier vochtbemonsteringen uitgevoerd op droge en natte plekken. De natte plekken waren concentrisch met een diameter van 5 tot 10 cm; de verhouding tussen natte en droge gedeelten was ongeveer fifty-fifty. Zoals in tabel 14 is te zien varieerde het vochtgehalte in het droge zand van



Afb. 12 Variatie in vochtgehalte op 15-20 cm diepte in een oorspronkelijk niet afgegraven perceel met natuurlijke grasvegetatie in de omgeving van Ouddorp op 24 mei 1988. Voor de vochtbepalingen zijn over een afstand van 550 cm 100 volumemonsters van 100 cm^3 genomen.

Tabel 14 Vochtgehalten van 3-8 cm diepte bij droge en natte plekken op 16 verschillende lokaties in de Westduinen bij Ouddorp op 29 maart 1988.

Droge plekken				Natte plekken			
plek	vol.% vocht	plek	vol.% vocht	plek	vol.% vocht	plek	vol.% vocht
1D	1,20	9D	1,58	1N	8,50	9N	13,48
2D	0,82	10D	1,40	2N	10,15	10N	6,70
3D	1,11	11D	1,33	3N	7,49	11N	6,66
4D	0,72	12D	2,05	4N	10,52	12N	9,72
5D	1,12	13D	0,73	5N	9,02	13N	9,57
6D	0,76	14D	0,67	6N	8,90	14N	7,26
7D	0,85	15D	1,68	7N	10,31	15N	7,38
8D	0,78	16D	1,55	8N	11,46	16N	7,98
gemiddeld vol.% vocht 1,15				gemiddeld vol.% vocht 9,07			
standaardafwijking 0,40				standaardafwijking 1,87			

0,67-2,05% en bij de natte plekken van 6,66-13,48%. Een groot deel van het zand is dus droog gebleven, ondanks dat sinds oktober 1987 meer dan 500 mm neerslag was gevallen. Maar er ko-

men in Nederland ook klei- en veengronden voor, die zo waterafstotend zijn dat ze 's winters niet geheel herstellen. Dit blijkt ook duidelijk uit de gemeten vochtgehalten in het voorjaar van 1987 in gronden in de Prins Alexander Polder, Polder Nieuwkoop en Yerseke Moer (tabel 15).

Tabel 15 Variatie in vochtgehalte in waterafstotende kleilagen in grasland in de Prins Alexander Polder, Polder Nieuwkoop en Yerseke Moer in het voorjaar van 1987.

Plaats	Diepte cm - mv.	WDPT	Volumepercentage vocht van 10 metingen			
			gemiddelde waarde	laagste waarde	hoogste waarde	standaardafwijking
Pr.Alex.Polder	10-15	2300	49,2	41,5	64,9	7,99
Pr.Alex.Polder	20-25	2010	47,6	39,7	57,2	5,64
Polder Nieuwkoop	20-25	9	43,3	38,0	50,0	3,39
Yerseke Moer	20-25	70	26,9	15,6	33,9	5,39
Yerseke Moer	20-25	450	29,7	24,0	37,7	4,62

5.6 Verbeteringsmogelijkheden van waterafstotende gronden

In de omgeving van Ouddorp zijn de waterafstotende zandgronden verbeterd door het mengen van kalkrijke zavel en klei, die van elders werd aangevoerd, door de bovengrond. Ook zijn gronden verbeterd door het omzetten, waarbij kalkrijke zavel en klei uit de ondergrond naar boven is gehaald en het waterafstotende zand naar de ondergrond. Volgens Van 't Woudt (1959) zijn waterafstotende gronden te verbeteren door bekalking. Volgens hem wordt de waterafstotendheid van zandgronden geheel opgeheven door het mengen van 5 ton kalk per ha in de bovenste 15 cm. In Australië bleken leemarme, grove zandgronden met ernstige waterafstotende eigenschappen met 2 à 5% (gewicht) vliegas goed te verbeteren; "dry bodies" die in de onbehandelde objecten voorkwamen, ontbraken in de behandelde objecten en de hoeveelheid beschikbaar vocht nam duidelijk toe (Roberts, 1966). Ook Campbell et al. (1983) en Aitken et al. (1984) wijzen op de goede eigenschappen die vliegas heeft voor de verbetering van de hoeveelheid beschikbaar vocht bij grove zandgronden. Bovendien bevat vliegas een matige tot grote hoevelheid voor de plant beschikbaar Ca, Mg en S (Aitken et al., 1984). Het agrarisch gebruik van deze vliegas zal echter afhangen van de mogelijkheid tot verwijdering van de excessief hoge hoeveelheden boron en selenium door uitspoeling of verwering (Aitken et al., 1984; Campbell et al., 1983).

Jamison (1945) wees op het verbeteren van waterafstotende grond door het mengen ervan met goed bevochtigbaar zand uit de ondergrond. Op de bouwlandpercelen is dit vermoedelijk in Nederland min of meer het geval, terwijl dit bij de zandgronden in bijvoorbeeld De Zijpe en Callantsoog door de daar diep voorkomende grondbewerking in verband met de bloembollenteelt, in optima

forma gebeurt. Bewerking van de grond na de eerste regen na een droge periode blijkt zeer gunstig te werken op de verdere regelmatige bevochtiging van de grond (Domingo, 1950; Roberts and Carbon, 1972; en Jamison, 1969). Ervaringen van grondgebruikers op waterafstotende zandgronden in Goeree-Overflakkee en Voorne-Putten sluiten hier geheel bij aan.

6 SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Veel zand-, klei- en veengronden in Nederland nemen, nadat ze sterk zijn uitgedroogd, moeilijk regen- en beregeningswater op. Er komen echter grote verschillen in mate van waterafstotendheid voor. Dit kan worden nagegaan met behulp van de WDPT-test. Hierbij worden drie druppels water op een droog grondmonster gebracht en de tijd van volledige penetratie gemeten.

Om ene indruk te verkrijgen van de verbreiding van waterafstotende gronden in Nederland is de WDPT-test toegepast op een groot aantal bij STIBOKA aanwezige grondmonsters. Hieruit bleek dat overal in Nederland wel waterafstotende gronden voorkomen en dat goed bevochtigbare gronden en zeer sterk waterafstotende gronden zeer dicht bij elkaar kunnen voorkomen. Van de omgeving van Ouddorp werd een kaart samengesteld met de mate van waterafstotendheid. Hierbij bleek dat de oorspronkelijke percelen met een natuurlijke vegetatie extreem waterafstotend zijn en bekleide en omgezette percelen goed bevochtigbaar.

Verschillen in waterafstotendheid hangen onder meer samen met het bodemgebruik en met de bodemgesteldheid. Zandgronden in heide, gras en bos hebben meestal een extreem waterafstotende toplaag, terwijl de waterafstotendheid bij bouwland veel geringer is. Dit bleek onder meer uit een onderzoek in de wijde omgeving van Arnhem. In dit gebied bleek ook dat de bruine enkeerdgronden goed bevochtigbaar zijn, terwijl de zwarte enkeerdgronden in meer of mindere mate waterafstotend zijn. Ook hierbij speelt het bodemgebruik weer een belangrijke ro. Een korte samenvatting van de waterafstotendheid geeft tabel 16. Niet alleen bovengronden, maar ook ondergronden kunnen extreem waterafstotend zijn. Zo werden in Ouddorp in zand uit de ondergrond met minder dan ¼% organische stof WDPT-test-tijden gevonden van meer dan één uur. Bij de podzolgronden zijn de uitspoelingshorizonten altijd waterafstotend; de B2H is meer waterafstotend naarmate het humusgehalte hoger is en de B2-horizont kan goed bevochtigbaar tot extreem waterafstotend zijn.

Het traditionele beeld van homogene infiltratie, zoals toegepast in computersimulatiemodellen, komt in veel van de bestudeerde gronden niet voor. De bevochtiging is vaak onregelmatig met duidelijk preferente stroombanen. Gebleken is dat hiermee de grote verschillen in bodemvocht kunnen worden verklaard. Door deze preferente banen kunnen pesticiden, insecticiden en meststoffen versneld in het grondwater terechtkomen.

Diepte bewerkingen en het toevoegen van kalkrijke klei of vliegas aan de bovengrond zijn mogelijkheden tot verbetering van de waterafstotende gronden.

Naar schatting komt bij meer dan 75% van onze cultuurgronden een matig tot extreem en bij meer dan 95% van onze natuurgebieden een sterk tot extreem waterafstotende bovengrond voor.

Tabel 16 Gemiddelde mate van waterafstotendheid op 5-10 cm diepte bij een aantal bodemeenheden met verschillend bodemgebruik.

Bodemeenheid	Bodemgebruik	Waterdruppelpenetratietijd (sec.)				
		< 5	5-60	60-600	600-3600	> 3600
Bruine enkeerdgrond	bouwland	X				
Bruine enkeerdgrond	grasland	X				
Duinvaaggrond	onbegroeid	X				
Duinvaaggrond	buntgras		X			
Vlakvaaggrond Ouddorp	bouwland		X			
Vlakvaaggrond Zijpe	bouwland		X			
Holtpodzolgrond	bouwland		X			
Haarpodzolgrond	bouwland		X			
Zwarte enkeerdgrond	bouwland		X			
Zwarte enkeerdgrond	grasland			X		
Vlakvaaggrond (3-8% lu) Zijpe	grasland			X		
Vlakvaaggrond (< 3% lu) Zijpe	grasland				X	
Vlakvaaggrond (< 3% lu) Ouddorp	grasland				X	
Duinvaaggrond	bos				X	
Holtpodzolgrond	heide				X	
Holtpodzolgrond	bos				X	
Haarpodzolgrond	heide				X	
Haarpodzolgrond	bos				X	
Vlakvaaggrond Ouddorp	oorspronkelijk veg.					X

LITERATUUR

Adams, Susan, B.R. Strain and M.S. Adams, 1969. Water repellent soils and annual plant cover in a desert scrub community of southern California. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 289-296.

Adhikari, M. and G. Chakrabarti, 1976. Contribution of natural and microbial humic acids to water repellency in soil. J. Indian Soc. Soil Sci. 24: 217-219.

Aitken, R.L., D.J. Campbell and L.C. Bell, 1984. Properties of Australian fly ashes relevant to their agronomic utilization. Aust. J. Soil. Res. 22: 443-453.

Albert, R. and M. Köhn, 1926. Untersuchungen über Benetzungswiderstand von Sandböden. Mitteilungen der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft 2: 146-153.

Bakker, H. de en J. Schelling, 1966. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland. De hogere niveaus. Pudoc, Wageningen.

Bennema, J. en D. van der Woerdt, 1952. Ingedroogde veengronden. Oorzaak, verbreiding en verbetering. Landbouwgids 1952: 207-209.

Bennema, J. en D. van der Woerdt, 1954. Verdrogende veengronden in West-Nederland, deel II. De veldbodemkundige oorzaken van de verdroging; verbreiding en eigenschappen van de verdroogde veengronden.

Bond, R.D., 1964. The influence of the microflora on the physical properties of soils. II. Field studies on water repellent sands. Aust. J. Soil Res. 2: 123-131.

Bond, R.D., 1969. Factors responsible for water repellence of soils. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 259-264.

Bond, R.D. and J.R. Harris, 1964. The influence of the microflora on physical properties of soils. I. Effects associated with filamentous algae and fungi. Aust. J. Soil Res. 2: 111-122.

Campbell, D.J., W.E. Fox, R.L. Aitken and L.C. Bell, 1983. Physical characteristics of sands amended with fly ash. Aust. J. Soil Res. 21: 147-154.

Chen, Y. and M. Schnitzer, 1978. The surface tension of aqueous solutions of soil humic substances. Soil Sci. 125: 7-15.

DeBano, L.F., 1969. Water movement in water repellent soils. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 61-89.

DeBano, L.F., 1969. Water repellent soils: a worldwide concern in management of soil and vegetation. Agric. Sci. Rev. 7: 11-18.

DeBano, L.F., 1975. Infiltration, evaporation and water movement as related to water repellency. In: Stewart and Stelly (Eds.), Soil Conditioners, SSSA Special Publ. no. 7: 155-164.

DeBano, L.F., 1981. Water repellent soils: a state of the art. Gen. Tech. Rep. PSW-46. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station: 21 pp.

DeBano, L.F., J.F. Osborn, J.S. Krammes and J. Letey, 1967. Soil wettability and wetting agents .... our current knowledge of the problem. U.S. Forest. Serr. Res. Paper P.S.W. 43, Berkeley, California, USA.

Dekker, L.W., 1983. Effectiviteit van het beregenen van moeilijk bevochtigbare veengronden. Cultuurtechn. Tijdschr. 22, 6: 369-375.

Dekker, L.W., 1985. Opname van water in moeilijk bevochtigbare zand- en veengronden. Cult. Tijdschr. 25(2): 121-132.

Dekkers, J.M.J., L.W. Dekker en A.F. van Holst, 1986. Waterwingebied Goedereede (Ouddorp). Onderzoek naar de bodemkundig-bodemfysische eigenschappen en de mate van hydrofobie. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, rapport 1897, 61 blz.

Domhof, J., 1953. Strooiselwinning voor potstallen in verband met profielopbouw van heide- en oude bouwlanden. Boor en Spade 6, 192-203.

Domingo, W.R. 1950. Een onderzoek van onomkeerbaar (irreversibel) ingedroogde, moeilijk te bevochtigen gronden. Landbouwkundig Tijdschrift 62: 252-260.

Domingo, W.R. en J. Maurer, 1949. Bijdrage tot de kennis van onomkeerbaar (irreversibel) ingedroogde, moeilijk te bevochtigen gronden. Rapp. Bodemk. Afd. Directie Wieringermeer (Noord-Oostpolderwerken) Kampen.

Donk v.d. F., G. v. Eijsden en F. Wessel, 1983. Verschillen in water repellency in een duingebied. In: Factoren van erosiegevoeligheid van semie-aride bodems. Rapport 6 van het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam.

Emerson, W.W. and R.D. Bond, 1963. The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. Aust. J. Soil Res. 1:9-16.

Glass, R.J., J.Y. Parlange and T.S. Steenhuis, 1987. Water infiltration in layered soils where a fine textured layer overlays a coarse sand. Int. Confer. for Infiltration Develop. and Applic., Hawaii, pp. 7.

Hammond, L.C. and T.L. Yuan, 1969. Methods of measuring waterrepellency of soils. In: Proc. of the Symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 49-60.

Hartman, R., H. Verplancke and B.C. Bishay, 1976. Study of the water repellency of soils under citrustrees in Egypt, and means of improvement. Meded. Fac. Landbouw. Rijksuniv. Gent 41 (1): 201-209.

Hendrickx, J.M.H., L.W. Dekker, M.H. Bannink and H.C. van Ommen, 1988a. Significance of soil survey for agrohydrological studies. Agric. Water Managem. (in press).

Hendrickx, J.M.H., L.W. Dekker, E.J. van Zuilen and O.H. Boersma, 1988b. Water and solute movement through a water repellent sand soil with grasscover. Contribution for international conference and workshop on validation of flow and transport models for the unsaturated zone, Ruidoso, New Mexico, USA: 131-146.

Hill, D.E. and J.Y. Parlange, 1972. Wetting front instability in layered soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 697-702.

Holzhey, C.S., 1969. Soil morphological relationships and water repellence. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 281-288.

Jex, G.W., B.H. Bleabley., D.H. Hubbell and Munroll, 1985. High humidity-induced increase in water repellency in some sandy soils. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 49: 1177-1182.

Jamison, V.C., 1942. The slow reversible drying of sandy surface soils beneath citrus trees in central Florida. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 7: 36-41.

Jamison, V.C., 1945. The penetration of irrigation and rain water into sandy soils of Central Florida. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 10: 25-29.

Jamison, V.C., 1969. Wetting resistance under citrus trees in Florida. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA: 9-15.

King, P.M., 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. Austr. J. Soil Res. 19: 275-285.

Kloosterhuis, J.L., 1958. Beschrijving van de verdrogende veenpolders in westelijk Nederland, rapport 492. Stichting voor bodemkartering, Wageningen.

Klijn, J.A., 1981. Nederlandse kustduinen; geomorfologie en bodems. Pudoc, Wageningen.

Krammes, J.S. and L.F. DeBano, 1965. Soil wettability: a neglected factor in watershed management. Water Resour. Res. 1: 283-286.

Letey, J., J. Osborn and R.E. Pelishek, 1962a. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. Soil Sci. 93: 149-153.

Letey, J., J. Osborn and R.E. Pelishek, 1962b. The influence of the watersolid contact angle on water movement in soil. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. 3: 75-81.

Letey, J., J.F. Osborn and N. Valoras, 1975. Soil water repellency and the use of nonionic surfactants. Calif. Water Res. Center, Contribution 154, pp. 85.

Markus, W.C., 1984. Bodemkaart van Nederland schaal 1 : 50 000, toelichting bij kaartblad 38 West, Gorinchem. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Ma'shum, M. and V.C. Farmer, 1985. Origin and assessment of water-repellency of a sandy South Australian soil. Australian Journal of Soil Research 23: 623-626.

Ma'shum, M., M.E. Tate, G.P. Jones and J.M. Oades, 1988. Extraction and characterization of water-repellent materials from Australian soils. Journal of Soil Science 39: 99-110.

Mc Ghie, D.A., 1980. The contribution of the mallet hill surface to runoff and erosion in the Narrogin region of Western Australia. Aust. J. Soil Res. 18: 299-307.

Mc Ghie, D.A. and A.M. Posner, 1980. Water repellency of a heavy-textured Western Australia surface soil. Aust. J. Soil Res. 18: 309-323.

Meeuwig, R.O., 1971. Infiltration and water repellency in granitic soils. USDA Forest Service, Research Paper INT-111, Ogden, Utah 84401, 20 pp.

Miller, W.W. and J. Letey, 1975. Distribution of nonionic surfactants in soil columns following application and leaching. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 17-22.

Miller, R.H. and J.F. Wilkinson, 1977. Nature of the organic coating on sand grains of nonwettable golf greens. Soil Sci. Soc. Amer. J. 41: 1203-1204.

Nakaya, Norio., Satoru Motomura and Hajime Yoki, 1977. Some aspects of water repellency of soils. Soil Sci. Plant Nutr. 23: 409-415.

Nakaya, N., 1982. Water repellency of soils. J.A.R.Q. Vol. 16 (1): 24-28.

Pape, J.C., 1972. Oude bouwlandgronden in Nederland. Boor en Spade 18, 85-119.

Parlange, J.Y. and D.E. Hill, 1976. Theoretical analysis of wetting front instability in soils. Soil Sci. 122: 236-239.

Philip, J.R., 1975a. Stability analysis of infiltration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 1042-1049.

Philip, J.R., 1975b. The growth of disturbances in unstable infiltration flows. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 1049-1053.

Pleijter, G. en C. van Wallenburg, 1981. Ruilverkavelingsgebied Bodegraven-Noord. Bodemgesteldheid en bodemgeschiktheid. Rapport 1453, deel I en II. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Pijls, F.W.G., 1948. Een gedetailleerde bodemkartering van de gemeente Didam. 's Gravenhage. Verslagen Landb. Onderz. 54.1 Serie: De bodemkartering van Nederland, dl I, Diss. Wageningen.

Raats, P.A.C., 1973. Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37: 681-685.

Richardson, J.L., 1984. Field observation and measurement of water repellency for soil surveyors. Soil Surv. Horiz. 25: 32-36.

Richardson, J.L. and F.D. Hole, 1978. Influence of vegetation on wate repellency in selected western Wisconsin soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42: 465-467.

Rietveld, J.J., 1978. Soil non-wettability and its relevance as a contributing factor to surface runoff on sandy dune soils in Mali. Report of project "Production primaire au Sahel", Agric. Univ., Wageningen, The Netherlands.

Roberts, F.J., 1966. The effects of sand type and fine particle amendments on the emergence and growth of subterranean clover (Trifolium subterraneum L.) with particular reference to water relations. Aust. J. Agric. Res., 17: 657-672.

Roberts, F.J. and B.A. Carbon, 1971. Water repellence in sandy soils of south-western Australia: I. Some studies related to field occurrence. Fld. Stn. Rec. Div. Pl. Ind. CSIRO (Aust.) 10: 13-20.

Roberts, F.J. and B.A. Carbon, 1972. Warter repellence in sandy soils of wouth-western Australia. II. Some chemical characteristics of hydrophobic skins. Aust. J. Soil Res. 10: 35-42.

Rutin, J., 1983. Erosional processes on a coastal sand dune, De Blink Noordwijkerhout, The Netherlands, 144 pp.
Savage, S.M., 1969. Contribution of some soil fungi to water repellency in soil materials. Proc. of the symp. on water repellent soils. Riverside, California, USA, 241-257.
Savage, S.M., J.P. Martin and J. Letey, 1969. Contribution of some soil fungi to natural and heat-induced water repellency in sand. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33: 405-409.
Scholl, David G., 1971. Soil wettability in Utah juniper stands. Soil Sci. Soc. Amer. proc. 35: 344-345.
Singer, M.J. and F.C. Ugolini, 1976. Hydrophobicity in the soils of Findley Lake, Washington. For. Sci. 22: 54-58.
Starr, J.L., H.C. De Roo, C.R. Frink and J.Y. Parlange, 1978. Leaching characteristics of a layered field soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 386-391.
Stichting voor Bodemkartering, 1965. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 32 Oost Amersfoort, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1969. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 31 West Utrecht, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1970. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 31 Oost Utrecht, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1972. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 37 Oost Rotterdam, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1973. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 39 West Rhenen en 39 Oost Rhenen, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1975. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 40 West Arnhem en 40 Oost Arnhem, Wageningen.
Stichting voor Bodemkartering, 1979. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 33 West Apeldoorn en 33 Oost Apeldoorn, Wageningen.
Tschapek, M., 1984. Criteria for determining the hydrophility-hydrophobicity of soils. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 147, 2: 137-149.
Tschapek, M. and C. Wasowski, 1976. The surface activity of humic acid. Geoch. et Cosmoch. Acta 40: 1343-1345.
Tschapek, M., G. Pozzo Ardizzi and S.G. de Bussetti, 1973. Wettability of humic acid and its salts. Z.f. Pflanzenernährung und Bodenk. 135: 16-31.
Van Ommen, H.C., L.W. Dekker, R. Dijksma, J. Hulshof and W.H. van der Molen, 1988. A new technique for evaluating the presence of preferential flow paths in non-structured soils (in press).
Van 't Woudt and Bessel D., 1959. Particle coatings affecting the wettability of soils. J. Geophys. Res. 64: 263-267.
Veenenbos, J.S., 1951. Verdrogingsverschijnselen in het Randgebied van de Noordoostpolder. Boor en Spade 4: 129-138.

Vos, G.A., 1984. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij kaartblad 37 West, Rotterdam. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Vos, G.A. en C. van Wallenburg, 1989. Duinzandgronden met hydrofobe eigenschappen in het duingebied tussen Noordwijk en Zandvoort. Landinrichting (in voorbereiding).

Wallenburg, C. van, 1976. Moeilijk bevochtbare humushoudende bovengronden van klei- en veengrasland. Rapport 1325. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Watson, C.L. and J. Letey, 1970. Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 841-844.

Woerdt, D. van der 1960. De verbetering van verdroogde veengronden. In S.B. Hooghoudt, D. van der Woerdt, J. Bennema en H. van Dijk: Verdrogende veengronden in West-Nederland. Versl. Landbouwk. Onderz. 66.23. Pudoc, Wageningen, blz. 199-256.