

NN31545.1628

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

ICW nota 1628
juli 1985

II



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

EEN ORIENTERENDE STUDIE NAAR HET VOLUMEVERANDERINGSPROCES
IN ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

ir. J.J.B. Bronswijk



0000 0460 6162

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

15m 231265*

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. NOMENCLATUUR	2
3. GEBRUIK, PROBLEMEN EN VERBETERING	4
4. FYSISCH PROCESEN IN ZWELLEND EN KRIMPENDE GRONDEN	7
4.1. De relatie tussen vochtgehalte en volumegewicht	7
4.2. Infiltratie en evaporatie	12
5. METHODEN TER BEPALING VAN BODEMFYSISCH EIGENSCHAPPEN	17
5.1. Inleiding	17
5.2. Het gebruik van standaardmethoden in zwellende en krimpde gronden	17
5.2.1. Volumegewicht en vochtgehalte	17
5.2.2. Vocht- en doorlatendheidskarakteristiek	20
5.3. Het meten van zwel- en krimpeigenschappen	23
5.3.1. Inleiding	23
5.3.2. SARAN-methode	24
5.3.3. Radioactieve methoden	25
5.3.4. Veldmethoden	26
5.3.5. Overige methoden	27
6. ENKELE ORIËTERENDE EXPERIMENTEN MET BETREKKING TOT HET KRIMPGEDRAG VAN BOMMELERWAARD-KOMKLEI	27
6.1. De krimpkarakteristiek	27
6.2. Geometrie van het krimpproces	29
7. TOEKOMSTIG ONDERZOEK	30
LITERATUUR	33

1. INLEIDING

Kleigronden behoren tot de potentieel hoog produktieve gronden van de aarde. De chemische bodemvruchtbaarheid is over het algemeen goed en de bodems komen op grote schaal voor in klimaatgebieden waar landbouw goed mogelijk is. De fysische eigenschappen veroorzaken echter nogal wat problemen. Wateroverlast, moeilijkheden bij bewerking, vertrapping en verdroging zijn enkele redenen waarom de optimale produktie, zeker in ontwikkelingslanden, vaak niet wordt gehaald.

Veel van genoemde problemen hangen samen met de specifieke eigenschappen van de in kleigronden aanwezige kleimineralen. Deze mineralen veroorzaken de zwel- en krimpverschijnselen die van grote invloed zijn op de vochthuishouding. In droge toestand vertonen kleigronden namelijk scheuren aan het maaiveld, de infiltratiecapaciteit is dan zeer hoog, de bewerking moeilijk door hardheid en dichtheid van de aggregaten. In natte toestand kunnen de scheuren volkomen dichtgezwollen zijn, de infiltratiecapaciteit is dan zeer gering, de kans op plasvorming en vertrapping groot, het erosiegevaar aanzienlijk (in hellende gebieden) en bewerking onmogelijk.

Voor verbetering van zware kleigronden is meer kennis nodig. Drainage is soms succesvol gebleken, ook teelt- en grondbewerkingsmaatregelen hebben af en toe effect gehad. Een groot probleem is echter dat veel fysische processen in zwellende en krimpende gronden nog onbegrepen zijn, waardoor het ontwikkelen van een verbeteringsmethode en het voorspellen van haar effecten belemmerd wordt. De ver ontwikkelde bodemfysica van rigide (= volume vaste) gronden is niet zonder meer toepasbaar op kleigronden. Dit heeft een aantal redenen. Als gevolg van volumeveranderingen zijn kleibodemeigenschappen voortdurend aan verandering onderhevig. De driedimensionale scheurvorming veroorzaakt een enorme variabiliteit in de bodem zowel naar plaats als diepte. De waterbeweging blijkt behalve door zwaartekracht-

en matrixpotentiaal ook bepaald te worden door de op zekere diepte heersende last van bovenliggende lagen (de 'overburdenpotential'). En naast de problemen met de ontwikkeling van fysische theorieën, blijkt ook de toetsing van zulke theorieën in het veld een moeilijke zaak, omdat zelfs de bepaling van eenvoudige parameters als volumevochtgehalte, volumegewicht, etc., in zwellende-krimpnde gronden al veel problemen met zich meebrengt.

In deze nota wordt een overzicht gegeven van de volume-veranderingsprocessen in zware kleigronden en de betekenis van deze processen voor het gedrag van de gronden in het laboratorium en in het veld. De hoofdstukken 3, 4, 5 bevatten een literatuuroverzicht over dit onderwerp. In hoofdstuk 6 wordt verslag gedaan van enkele oriënterende experimenten naar het zwel-krimp gedrag van Nederlandse komklei. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 enkele aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

De invloed van belasting op het volumeveranderingsproces, die tot uitdrukking komt in de zogenaamde 'overburden potential', en het optreden van hysteresis, worden voorlopig slechts summier behandeld, in de toekomst zal hier meer aandacht aan worden geschonken.

Veel van de behandelde aspecten in deze nota zullen in het algemeen op alle zwellende en krimpnde gronden van toepassing zijn, bijvoorbeeld ook voor veengronden. Omdat de eigen experimenten die beschreven zijn, betrekking hebben op zware kleigrond, is de nadruk op de bespreking van de eigenschappen van kleigronden komen te liggen.

2. NOMENCLATUUR

In dit hoofdstuk zijn enkele opmerkingen met betrekking tot de soms verwarrende naamgeving van kleigronden opgenomen. In Nederland is de indeling der niet-eolische afzettingen gebaseerd op het lutumgehalte (de fractie $< 2 \mu\text{m}$). Kleigronden zijn in deze indeling gronden met meer dan 25% lutum (DE BAKKER en SCHELLING, 1966). Zware kleien bevatten meer dan 35% lutum. Veel voorkomende kleimineralen als illiet en moutmorilloniet vallen wat afmeting betreft over het algemeen in de lutumfractie, echter niet alle deeltjes in de lutumfractie zijn kleimineralen. Volgens BREEUWSMA (1984) bestaat de lutumfractie van Nederlandse kleigronden voor ongeveer 85% uit kleimineralen.

Additionele informatie over mineralogische samenstelling van de lutumfractie is nuttig om inzicht te krijgen in de te verwachten zwel- en krimpverschijnselen.

Met de term komklei worden de zware rivierklei-afzettingen in de laagste delen, de kommen, van het rivierenlandschap aangeduid. Knip-, knik-, pik- of poelklei zijn respectievelijk de Friese, Groningse, West-Friese en Zeeuwse benamingen voor de in rustig milieu afgezette zware zeekleigronden met vaak ongunstige fysische eigenschappen. Binnen de kom- en knip-kleien vinden we de zwaarste kleigronden van Nederland.

In het Nederlandse bodemclassificatiesysteem (DE BAKKER en SCHELLING, 1966), worden de rivier- en zeekleigronden benoemd als vaaggronden. De niet gehomogeniseerde, gerijpte kleigronden, waartoe ook de meeste kom- en knipkleigronden behoren, worden geclassificeerd als polder-vaaggronden.

De naam Vertisol komt voor in het Amerikaanse bodemclassificatiesysteem (Soil Survey Staff, 1975). Vertisols zijn gronden met meer dan 30% klei die gedurende een periode van het jaar scheuren van maaiveld tot 50 cm diepte bevatten. Daarnaast moeten er specifieke kenmerken als slickensides, gilgai of wigvormige structuur elementen aanwezig zijn die een gevolg zijn van het cyclisch volumeveranderingsproces van de grondmassa.

Ook binnen het Soil Map of the World classificatiesysteem (FAO, 1975) komt de orde der Vertisols voor. De definitie komt ongeveer overeen met de Amerikaanse.

Nederlandse zware kleigronden (en andere fluviatiele klei-afzettingen in b.v. zuid-oost Europa en zuid-oost Azië) vallen niet binnen de orde der Vertisols omdat ze meestal geen der vereiste specifieke kenmerken bezitten. De kom- en knipkleigronden vallen op grond van hun geringe ouderdom en proefiel-ontwikkeling binnen het Amerikaanse classificatiesysteem in de orde der Entisols. Daarbinnen worden ze meestal geclassificeerd als Typic Fluvaquent.

Alle vertisols zijn dus zware kleigronden, niet alle zware kleigronden zijn vertisols.

3. GEBRUIK, PROBLEMEN EN VERBETERING

In Nederland worden zware kleigronden voornamelijk gebruikt als grasland. Dit heeft een aantal oorzaken. Door de aanwezigheid van veel en grote kluiten is het rooien van bloembollen en aardappelen niet mogelijk. Daarnaast leveren de gronden te veel tarra voor de verbouw van suikerbieten. Voor veel andere akkerbouwgewassen geldt echter, dat de teelt op zware kleigronden in principe mogelijk is. Zo bedrijft men op sommige plaatsen in Noord-Groningen van oudsher akkerbouw (granen, koolzaad) op zware gronden. De problemen die zich hierbij voordoen liggen op het gebied van de vochthuishouding. In natte toestand treedt wateroverlast en plasvorming op en zijn zware kleien kleverig, makkelijk te versmeren en moeilijk te bewerken. In droge toestand zijn deze gronden erg hard, zodat ook dan grondbewerking moeilijk is. Het vochttraject waarover succesvol kan worden bewerkt is erg kort en wordt in lente en herfst snel doorlopen. Verder laat in natte perioden de zuurstofvoorziening en in droge perioden de watervoorziening te wensen over. Ondanks deze problemen zijn redelijke graanopbrengsten haalbaar maar vanwege de ongeschiktheid voor aardappelen, suikerbieten en bloembollen, is het commercieel meestal aantrekkelijker kleigronden te exploiteren als grasland dan als bouwland.

In het verleden is meerdere malen geprobeerd kom- en knipklei meer geschikt te maken voor bouwland. Experimenten met diepploegen (KUIPERS et al, 1967), bezanden (HIDDING, 1965) en bekalken (KUIPERS et al, 1967) hadden tot doel de structuur en de doorlatendheid van de bodem te verbeteren. De resultaten van deze proefneming vielen (zeker voor de zwaarste kleigronden) in het algemeen tegen òf de bewerking bleek te duur. Om genoemde redenen liggen zware kleigronden ook tegenwoordig voor het merendeel onder grasland.

Toch brengt ook het gebruik als weide de nodige problemen met zich mee. Als gevolg van de soms zeer natte omstandigheden in het voorjaar komt de grasgroei laat op gang en door plasvorming is de kwaliteit van de zode vaak slecht. Gedurende de zomer wordt vaak een stilstand in de grasgroei waargenomen onder invloed van verdroging. In het najaar treedt wederom snel plasvorming op wat problemen geeft met vertrapping van de grasmat en mogelijk structuurbederf, zodat het vee vaak eerder moet worden opgesteld dan op andere gronden.

Naast genoemde problemen met vertrapping door vee is ook het berijden met machines gedurende grote delen van het jaar onmogelijk op straffe van spoorvorming en structuurbederf (REID and PARKISON, 1981).

Omdat vele van bovenstaande problemen nauw samenhangen met wateroverlast is het niet verwonderlijk dat men geprobeerd heeft zware kleigronden te verbeteren door drainage. Hoewel vanuit de praktijk getwijfeld werd aan de mogelijkheid deze gronden succesvol te draineren blijkt drainage goede resultaten te geven. In het Friese knipkleigebied was men van oudsher sceptisch over het nut van drainage. Dit bleek niet terecht. Op drainageproefvelden werd duidelijk dat drains op 1 m diepte en 30 m drainafstand een gunstig effect op de ontwatering hadden en beter voldeden dan de traditionele greppels (LD Friesland, 1977 en 1979). Ook in komkleigebieden blijkt drainage wel degelijk te kunnen werken.

De redenen voor de discrepantie tussen twijfels uit de praktijk en proefresultaten zijn de volgende:

- Hoewel men vroeger zware kleigronden als zeer slecht doorlatend beschouwde was dit niet altijd terecht. VAN HOORN (1960) berekende doorlatendheden met grote infiltrometers (2 x 0,25 m). De aldus verkregen verzadigde doorlatendheden waren veel groter dan de traditionele boorgatenmethode-resultaten. Het bleek dat wormgangen en krimpscheuren de verzadigde doorlatendheid van zware kleigronden bepalen. Bij het gebruik van de boorgatenmethode worden deze macroporiën echter dichtgesmeerd zodat zeer lage niet reële K_{verz} -waarden het gevolg zijn.
- Als gevolg van drainage treedt een blijvende verbetering in structuur en doorlatendheid van zware kleigronden op. Enerzijds komt dit door het feit dat er meer krimpscheuren ontstaan die verder open blijven, anderzijds (vooral in knipklei) door een toenemende wormenpopulatie (DEKKER en BOUMA, 1978).

Dat toch op veel graslandpercelen de vochthuishouding nog steeds slecht is blijkt mede te wijten aan de slechte toestand van de drains. BOELENS et al (1976) schatten op basis van enquêtes dat in de Bommelerwaard-Oost 80% van de drainage niet functioneert. In de Tielerwaard-West is dit 45%. De redenen hiervoor zijn fouten bij de aanleg (drains niet in de goed doorlatende laag, te grote drainafstanden, inklappen van plastic drainbuizen) en vooral het gebrekkige onderhoud (niet doorspuiten, defecte eindbuizen).

Maatregelen gericht op het verbeteren van de vochthuishouding en het voorkomen van plasvorming zijn onder andere:

- zorgdragen voor het goed werken van de aanwezige drains (doorspuiten!)
- laag slootpeil (te laag levert echter problemen met beregenen in de zomer)
- verstandig beregenen (b.v. niet te laat in de zomer, zodat het bergend vermogen voor herfstregens zo groot mogelijk is).

Ook buiten Nederland komen uitgestrekte gebieden zware kleigronden voor. Zo werd het totale areaal vertisolen op aarde door DUDAL (1965) geschat op 257 miljoen ha. Australië, India en Soedan nemen hiervan 170 miljoen ha voor hun rekening. De meest voorkomende gewassen op deze gronden zijn: katoen, suikerriet, rijst, tarwe, mais, sorghum en gras. Potentieel zijn zeer hoge produkties mogelijk, in de praktijk doen zich nogal wat problemen voor (zie b.v. KAMPEN, 1982).

Voor de natte zware kleigronden zoals die bijvoorbeeld voorkomen in Roemenië, Tsjecho-Slowakije, Bulgarije, Engeland en Frankrijk gelden dezelfde problemen als reeds genoemd bij de bespreking van Nederlandse kleigronden. Een bijkomend probleem in hellende gebieden is het erosiegevaar; door de lage infiltratiesnelheid van een gezwollen kleibodem is de oppervlakkige afstroming groot.

In de drogere kleigebieden zijn de problemen die optreden van geheel andere aard. De groundbewerking en teeltmethoden in deze gebieden moeten erop gericht zijn het (weinige) water dat er valt optimaal te benutten. Dit houdt in het algemeen in dat de grond bewerkt is en de scheuren open moeten zijn op het moment van water-toediening. In niet-geïrrigeerde zware-kleigronden levert de bewerking van de droge bodem grote problemen. In India wordt naar schatting slechts een kwart tot een derde van het beschikbare regenwater benut omdat het de boeren niet lukt in de droge tijd voor de regens hun bodem te bewerken (ICRISAT, 1981).

Ook tijdens de groei van het gewas kan men proberen het beschikbare water optimaal te benutten. SWARTZ (1966) experimenteerde met 'missed row planting'. Door in een tarweperceel elke ± 5 meter een kale strook van $\pm 20-40$ cm breedte te creëren ontstonden in deze kale strook brede en diepe krimpscheuren die langer open bleven staan en

meer water konden bergen dan de scheuren in een volledig bedekt bodemoppervlak. De verklaring voor dit verschijnsel ligt in het feit, dat scheurvorming onder invloed van verdamping plaatsvindt op de zwakste plek in de bodem. In een grond met natte (onbeplante) en droge (beplante) delen zullen de krimpscheuren dus ontstaan in de onbeplante stroken.

In geïrrigeerde landbouw (b.v. de Gezira in Soedan) wordt een diepe bevochtiging verkregen door middel van bassinbevloeiing van de gescheurde kleigrond. Zodra de scheuren zijn dichtgezwollen neemt de infiltratiesnelheid sterk af en kunnen tevens problemen ontstaan met de zuurstofvoorziening van de plantenwortels. Het is dan ook zaak vóór de volgende watergift de scheuren eerst open te laten gaan (FARBROTHER, 1970 en 1972 en LOVEDAY, 1964).

Behalve in de landbouw hebben zwellende en krimpende kleigronden dankzij hun speciale eigenschappen ook in de civiel-techniek voor grote problemen gezorgd. Zonder hier dieper op in te gaan worden als voorbeelden genoemd: het golven van wegen, het bewegen van funderingen van gebouwen, het breken van pijpleidingen enz. Zie bijvoorbeeld YONG en WARKENTIN (1966).

4. FYSISCHE PROCESSEN IN ZWELLEND EN KRIMPENDE GRONDEN

4.1. De relatie tussen vochtgehalte en volumegewicht

Bij verdamping van water uit een zware kleibodem treedt krimp op. De bodemaggregaten nemen af in volume en er ontstaan krimpscheuren en maaiveldsdalingen. Omdat vooral de aanwezigheid van krimpscheuren een enorme invloed heeft op het gedrag van een zware kleigrond, is het van groot belang te weten hoe vochtgehalteveranderingen in dit type bodem samenhangen met zwel- en krimpverschijnselen.

Bij het beschouwen van vochtgehalteveranderingen in zware kleigronden is de definitie van vochtgehalte en porositeit als volumefractie van het totale bodemvolume minder geschikt, omdat het totale bodemvolume aan variatie onderhevig is. In veel gevallen is het beter te rekenen met de parameters e : poriënverhouding, en v : vochtverhouding.

$$e = \frac{\text{volume poriën}}{\text{volume vaste fase}}$$

$$v = \frac{\text{volume water}}{\text{volume vaste fase}}$$

Men onderscheidt 4 fasen in het uitdrogingsproces van een klei (HAINES, 1923; PHILIP, 1969a, YONG and WARKENTIN, 1966, YULE and RITCHIE, 1980):

1. Structuurkrimp (structural shrinkage): $\frac{de}{d\vartheta} = 0$

Bij uitdrogen van een veldbodem worden grote scheuren tussen de aggregaten gelegd. Als gevolg hiervan kunnen de aggregaten een enigszins dichtere stapeling aannemen. Over het algemeen zijn de optredende volumeveranderingen zeer klein en te verwaarlozen.

2. Evenredige of normale krimp (normal shrinkage): $\frac{de}{d\vartheta} = 1$

Het vochtverlies (in volume-eenheden) is gelijk aan de volumeverandering, er treedt geen lucht in de poriën.

3. Rest krimp (residual shrinkage): $0 < \frac{de}{d\vartheta} < 1$

Het bodemvolume wordt nog kleiner. Het vochtverlies is groter dan de volumeverandering, er vindt luchtintrede plaats.

4. Nul krimp (no shrinkage): $\frac{de}{d\vartheta} = 0$

De bodemdeeltjes hebben hun dichtste oriëntatie bereikt. Bij verder waternverlies blijft het aggregaatvolume constant. Vochtverlies is gelijk aan luchtgehaltetoename.

De eerste fase treedt alleen op in sterk geaggregeerde veldbodems en ongestoorde kolommen onder zeer natte omstandigheden. De tweede, derde en vierde fase vinden we in het veld en tevens bij experimenten met kluiten en gestoorde ringmonsters. YULE and RITCHIE (1980) vonden bij experimenten met een Texas Vertisol dat van de totale 5 cm waterverlies, $\frac{1}{2}$ cm structuur, 3 cm evenredige en $1\frac{1}{2}$ cm rest-krimp tot gevolg had.

Een goede manier om het verdampings-volumeveranderingsproces van een kleibodem weer te geven is de krimp-karakteristiek, waarin de poriënverhouding van een bodem wordt uitgezet tegen de vochtverhouding. De verschillende fasen in het uitdrogingsproces komen in zo'n karakteristiek duidelijk naar voren (fig. 1).

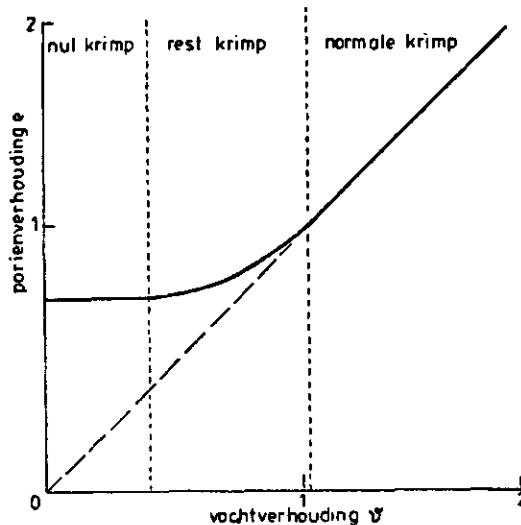


Fig. 1. De krimpkarakteristiek

Vochtverhouding = volume vocht/volume vaste fase

Poriënverhouding = volume poriën/volume vaste fase

Bij de bepaling van de krimpkarakteristiek treedt een probleem op met betrekking tot de definiëring van het bodemvolume waarop de grafiek van toepassing is. Een voorbeeld zal dit duidelijk maken:

STROOSNIJDER (1976) geeft een overzicht van diverse krimpkarakteristieken van zware kleigronden waaronder een hypothetische volgens PHILIP (1971) en een experimenteel bepaalde volgens GROENEVELT (1974). Deze krimpkarakteristieken zijn weergegeven in figuren 2a en 2b. Merk op dat de twee grafieken volkomen van elkaar verschillen.

Nadere bestudering leert dat in het hypothetische geval van Philip de situatie is geschetst voor een ongescheurde grond, gedacht kan worden aan een krimpende kluit. De door Groenevelt gemeten $e(v)$ relatie heeft betrekking op poriënverhouding inclusief scheurvolumen, inherent aan de door hem gebruikte radio-actieve methode (zie par. 5.3.3.). Op het moment dat scheurvorming optreedt begint e van v af te wijken. De klei-aggregaten blijven dan nog lange tijd verzadigd.

Een eenvoudige berekening toont aan dat een hypothetische kleigrond, waarvan de aggregaten een krimpkarakteristiek hebben volgens fig. 3a, de krimpkarakteristiek van fig. 3b vertoont als scheurvolumen in e wordt opgenomen.

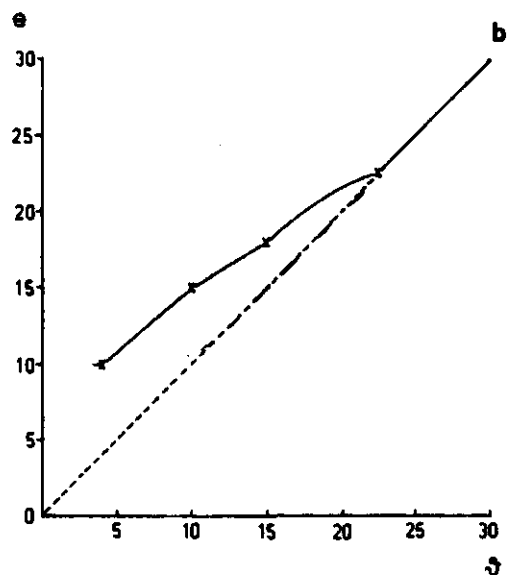
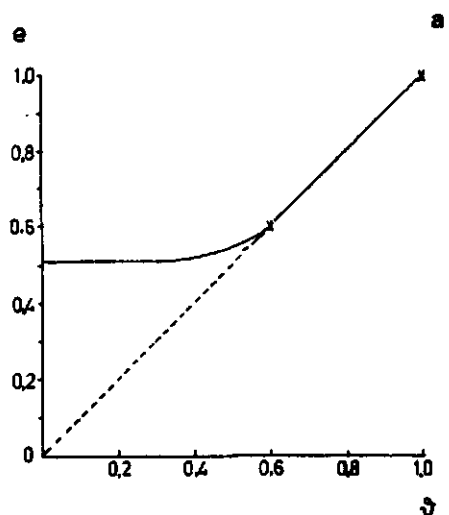


Fig. 2. De krimp karakteristiek zoals gebruikt in PHILIP (1971) (2a) en GROENEVELT (1974) (2b)

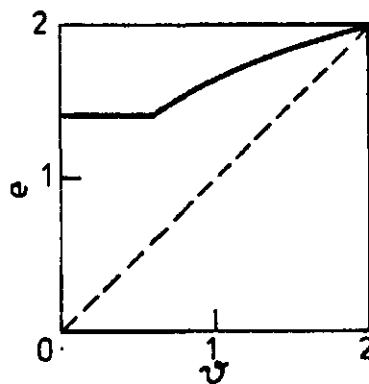
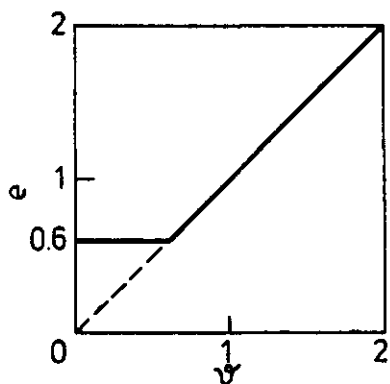


Fig. 3. Krimp karakteristieken van een hypothetische kleigrond
 3a: Krimp karakteristiek van matrix of aggregaten
 3b: Krimp karakteristiek van dezelfde grond wanneer scheurvolume in poriënvolume wordt opgenomen, zoals dat onder andere bij radioactieve bepalingen van e gebeurt

De ogenschijnlijke tegenspraak tussen de twee krimp karakteristieken uit fig. 2a en 2b wordt dus veroorzaakt door de definitie van het begrip poriën.

Men kan zich afvragen welke krimp karakteristiek nu de meeste informatie geeft. Uit fig. 3a is direct te zien dat tussen $v = 2,0$ en $v = 0,6$ (wat overeenkomt met $\theta = 66,7$, respectievelijk $\theta = 37,5$ volume-percenten) alle vochtverlies van de bodem wordt omgezet in scheurvorming

en oppervlakedaling. Uit een krimpkarakteristiek zoals die van fig. 3b valt niet af te leiden of er al dan niet lucht in de bodemmatrix treedt of dat scheurvorming en oppervlakedaling optreedt.

Zoals reeds eerder opgemerkt is juist de scheiding tussen luchtintrede in de aggregaatporiën en scheurvorming allesoverheersend, zeker voor veldbodems, en daarom is het beter de krimpkarakteristiek te definiëren overeenkomstig figuren 2a en 3a, e en φ hebben dan betrekking op de aggregaten of op de bodemmatrix tussen de scheuren. Uitgaande van een bekend beginvolume van de totale bodem (inclusief scheuren) is de verwachte scheurvorming en oppervlakedaling als gevolg van verdamping dan eenvoudig uit deze karakteristiek af te leiden.

In hoofdstuk 6 wordt verslag gedaan van de bepaling van de krimpkarakteristiek van Bommelerwaard-komklei.

Als met behulp van metingen aan aggregaten is vastgesteld wat het totale volumeverlies is onder invloed van verdamping luidt de volgende vraag: komt deze volumeverandering tot uiting in veranderingen in maaiveldshoogte, of in scheurvolumen, of in een combinatie van deze twee? De invloed van scheuren op de hydrologie van kleigronden is een volkomen andere dan die van maaiveldszakking zodat deze vraag zeer relevant is.

BERNDT and COUGHLAN (1977), YULE and RITCHIE (1980), YONG and WARKENTIN (1966) en anderen melden dat voor gerijpte, stabiele gronden het krimpproces nagenoeg drie-dimensionaal en isotroop is. Voor ongerijpte gronden (waterrijke mariene sedimenten, IJsselmeerpolders) is de krimp in eerste instantie één-dimensionaal (irreversibele klink). Bij verdergaande rijping vindt drie-dimensionale isotrope krimp plaats en treedt dus scheurvorming op (REINIERSCHE, 1983). Algemeen geldt voor de krimp ΔV van een kubusvormig bodemelement met volume V en ribbe Z waarbij de verticale lengte van het bodemelement met ΔZ afneemt:

$$\frac{Z-\Delta Z}{Z} = \left(\frac{V-\Delta V}{V}\right)^{\frac{1}{r_s}}$$

r_s is een dimensieloze geometrie factor

voor één-dimensionale zakking : $r_s = 1$

voor drie-dimensionale isotrope krimp: $r_s = 3$

De resultaten van enige oriënterende experimenten met betrekking tot de geometrie van het zwel-krimp proces zijn te vinden in hoofdstuk 6.

4.2. Infiltratie en evaporatie

In de eerste helft van de jaren '70 heeft een aantal bodemkundigen zich uitgebreid bezig gehouden met de bestudering van transportprocessen in zwellende en krimpende kleien. In de meeste gevallen werden infiltratie-experimenten uitgevoerd met behulp van 'ideale kleien' zoals bijvoorbeeld verzadigde bentonietpasta's. Interessante resultaten van deze experimenten waren:

- ook in zwellende materialen is de cumulatieve infiltratie evenredig met de wortel uit de tijd (geen zwaartekracht).
 $I_{cum} = s\sqrt{t}$, s = sorptivity (in verzadigde bentoniet is dan tevens de volumeverandering evenredig met \sqrt{t}). (SMILES, 1974, PHILIP en SMILES, 1969 en STROOSNIJDER, 1976);
- de infiltratie- respectievelijk evaporatiesnelheid is zeer langzaam (orde van grootte: enkele mm/dag);
- de invloed van de zwaartekracht op het infiltratieproces is kleiner dan bij niet-zwellende gronden. De reden hiervan is dat de afname van de zwaartekrachtpotentialaal met de diepte wordt 'teggengewerkt' door een toename van de overburden potentialaal (potentialaal veroorzaakt door de last der bovenliggende lagen). Als het effect van de overburden potentialaal groter is dan de zwaartekracht (in zeer natte omstandigheden) kan de infiltratie in een zwellende grond worden vergeleken met capillaire opstijging in niet-zwellende gronden (PHILIP, 1969c, SMILES en ROSENTHAL, 1968 en SMILES en HARVEY, 1973);
- infiltratie-zwel is een sneller voortschrijdend proces dan verdamping-krimp (PHILIP, 1968 en PHILIP en SMILES, 1969).

Hoewel veel van bovenstaande artikelen (zie bijvoorbeeld PHILIP, 1968b) beschouwingen bevatten over de vermeende implicaties van de gevonden laboratoriumresultaten voor praktijksituaties, is van een werkelijke toetsing in het veld geen sprake. De resultaten van één-dimensionale infiltratie-experimenten in ongescheurde verzadigde bentonietpasta's blijken moeilijk uit te breiden naar praktijksituaties. Het optreden van scheurvorming heeft zo'n overheersende invloed op het infiltratieproces in zware kleigronden dat de vochttransportprocessen in de bodemmatrix (die in principe beschreven zouden moeten worden met de eerder genoemde theorieën) in eerste instantie van minder belang zijn.

De eveneens in de eerste helft van de 70-er jaren verschenen artikelen van bijvoorbeeld BLAKE et al. (1973), RITCHIE en ADAMS (1974) en RITCHIE et al. (1972), over veldexperimenten met betrekking tot infiltratie en evaporatie in zware kleigronden hebben dan ook nauwelijks raakvlakken met de laboratoriumexperimenten en zijn grotendeels empirisch van aard.

Alvorens een overzicht te geven van de resultaten van genoemde veldexperimenten zullen we een overzicht geven van het infiltratieproces in een gescheurde kleigrond.

In fig. 4 is dit proces schematisch weergegeven.

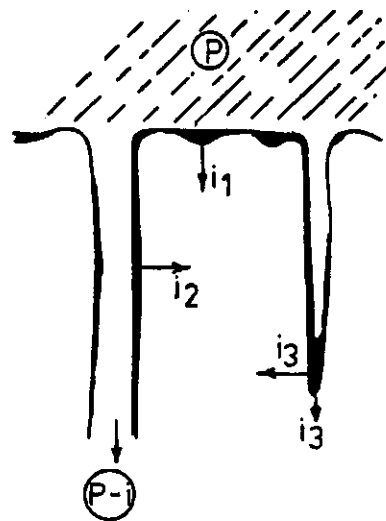


Fig. 4. Infiltratieprocessen in gescheurde kleigrond

In een niet gescheurde zandgrond zal regenval aan het bodemoppervlak infiltreren. Het al aanwezige water wordt daarbij naar beneden geduwd. De bovenlaag wordt bevochtigd tot verzadiging en er ontstaat een scherp vochtfront. In gescheurde gronden komt slechts een deel van het regenwater aan het oppervlak tot infiltratie. Door de lage infiltratiecapaciteit van de kleibodem treedt al snel plaatselijk (daar waar geen scheuren zijn) plasvorming op. Bij een volledig vlak maaiveld zal bijna momentaan water in de scheuren stromen, bij een bewerkt maaiveld treedt eerst enige oppervlakteberging op. Zodra het regenwater door de verticale scheuren omlaag stroomt vindt horizontale infiltratie in de scheurwanden plaats. Een deel van het water stroomt naar diepere lagen en komt uiteindelijk op de bodem van de scheur terecht. Bij voortgaande regenval kan de scheur vollopen. Dit verschijnsel is wel bypass-flow of kortsluiting genoemd.

Er is veel onderzoek gedaan naar de relatieve grootte van de verschillende infiltratietermen. Uit veldwerk van BLAKE et al. (1973) bleek dat van de 5 cm tritium houdend water op een droge kleigrond $\pm 50\%$ in de bovenste 20 cm van het profiel terecht kwam. De resterende 50% werd teruggevonden tot op 1 m diepte. In een homogene ongescheurde grond met hetzelfde beginvochtgehalte en even grote porositeit zou alle tritium-water in de bovenste 15 à 20 cm terecht zijn gekomen. Het ging om een bodem met scheuren van slechts ± 2 mm breedte. De wanden van de scheuren hadden een significant hoger tritiumgehalte dan het centrum van de matrix. Horizontale infiltratie vanuit scheuren en wormgangen werd ook aangetoond door GERMANN et al. (1984) in infiltratie-experimenten met ongestoorde grondkolommen (Bromide als tracer). Zij vonden ook dat bij toenemende regenvalintensiteiten, de relatieve hoeveelheid bromide in de bovenste 2,5 cm afnam en er meer bromide in diepere lagen terecht kwam. Soortgelijke resultaten zijn ook gevonden door BOUMA et al. (1978, 1981). Bij regenvalintensiteiten van 18,6 en 22,8 mm/h verdween respectievelijk 36% en 47% van het toegevoerde water beneden de bovenste 20 cm van een gescheurde kleigrond. Het blijkt, dat als gevolg van de hogere regenval-intensiteiten, de infiltratiecapaciteit van de bodemmatrix eerder wordt overschreden waardoor sneller plasvorming optreedt en meer water door de scheuren naar de ondergrond verdwijnt.

Wat grootte van de horizontale infiltratie uit de scheuren betreft merken HOOGMOED en BOUMA (1982) op dat deze infiltratie relatief klein is als men het totale scheurwandoppervlak in beschouwing neemt. Uit kleurstof-infiltratie-experimenten blijkt dat het water in de scheuren smalle verticale banden volgt, die slechts een klein deel van het totale scheurwandoppervlak beslaan. Ook GERMANN et al. (1984) rapporteren dat slechts een deel van het totale scheur- of wormgatoppervlak aan de horizontale infiltratie meedoet. Deze resultaten gelden voor onverzadigde stroming onder invloed van regenval. Als de scheuren volledig met water zijn gevuld is de situatie uiteraard anders. Dan neemt het gehele scheurwandoppervlak deel aan de infiltratie, zodat de horizontale infiltratie aanzienlijk is. Hierover later meer. De grootte van de oppervlakte-infiltratie is afhankelijk van de regenvalintensiteit en het matrix vochtgehalte. In droge perioden zal de initiële infiltratiecapaciteit van het oppervlak groot zijn, zodat plasvorming en infiltratie in de scheuren later optreden. Daar

tegenover staat dat de scheuren in een droge bodem groter en talrijker zijn, zodat de flux door de scheuren kan toenemen. In een natte bodem zal de infiltratiecapaciteit aan het oppervlak afnemen en zal ook het scheurvolume klein zijn. Toch blijven ook in een gezwollen verzadigde kleigrond de scheuren grote invloed houden. RITCHIE et al. (1972) vonden in een langdurig verzadigde kleibodem (HOUSTON BLACK CLAY) dat het watertransport nog steeds langs preferente stroombanen plaatsvond en dat het intra-aggregaat vochtgehalte geen rol van betekenis speelde. Ook BOUMA (1984) concludeert dat in een Nederlandse komklei de bestaande scheuren niet volkomen dichtzwellen en hun grote invloed op het infiltratieproces blijven uitoefenen.

Wanneer door regenval of irrigatie, al dan niet in combinatie met hoge grondwaterstanden, de scheuren uiteindelijk geheel met water zijn gevuld kan een waterlaag op het bodemoppervlak ontstaan. In dat geval gaat de horizontale infiltratie een grote rol spelen. In katoengebieden van de Soedan worden vertisolen met brede krimp-scheuren geïrrigeerd door middel van bassinbevoeiing. Als gevolg van horizontale infiltratie vanuit de scheuren is snelle bevochtiging van de bodemmatrix mogelijk waar dat door enkel verticale oppervlakte infiltratie onmogelijk zou zijn (FARBROTHER, 1970 en 1972).

In de praktijk kunnen de gevolgen van scheurvorming op infiltratie zowel positief als negatief worden gewaardeerd. Verlies van water (en eventueel opgeloste voedingsstoffen, kunstmest) naar diepere, voor plantenwortels onbereikbare lagen, als gevolg van bypass-flow is uiteraard ongewenst. Verder kunnen verontreinigingen in gescheurde gronden zeer diep infiltreren en eventueel het grondwater bereiken. Positief wordt gewaardeerd het feit dat plasvorming door scheurvorming wordt tegengegaan. Zolang de scheuren nog niet met water gevuld zijn zullen de plantenwortels geen problemen met hun zuurstofvoorziening krijgen. Het gunstige effect van scheurvorming op diepe bevochtiging onder bassinirrigatie is reeds genoemd.

Mens en natuur kunnen de effecten van scheurvorming op infiltratie beïnvloeden. Door grondbewerking kan het oppervlakte reliëf vergroot worden waardoor berging en infiltratie van water aan het bodemoppervlak toeneemt en de bypass-flow afneemt (HOOGMOED en BOUMA, 1982). Daarnaast heeft een mulch laag aan het bodemoppervlak (op natuurlijke wijze of door middel van grondbewerking verkregen) tot gevolg dat de scheuren onder de mulch laag geen water meer bevatten tijdens regenval zodat bypass-flow geminimaliseerd wordt (STIRK, 1954).

Tenslotte nog enkele opmerkingen over het effect van verticale scheurvorming op bodemevaporatie. Hoewel dit effect relatief aanzienlijk is (t.o.v. de totale evaporatie) zijn de praktische implicaties veel minder belangrijk dan in het geval van infiltratie, omdat de absolute grootte van de evaporatie uit een kaal bodemoppervlak zeer klein is. RITCHIE en ADAMS (1974) melden dat in HOUSTON BLACK CLAY met scheuren van 5 - 7 cm breedte en 60 - 90 cm diepte van een totale evaporatie van gemiddeld 0,74 mm/dag, 0,60 mm/dag uit de krimp-scheuren afkomstig was.

Als mogelijke verklaring wordt gegeven dat grond aan het scheuroppervlak natter is en dus een hoger geleidingsvermogen heeft dan grond aan het bodemoppervlak. Daarnaast zou de verdamping groter zijn door de turbulentie van lucht in de scheuren (zie fig. 5).

De invloed van horizontale scheuren op evaporatie wordt behandeld in par. 5.2.2.

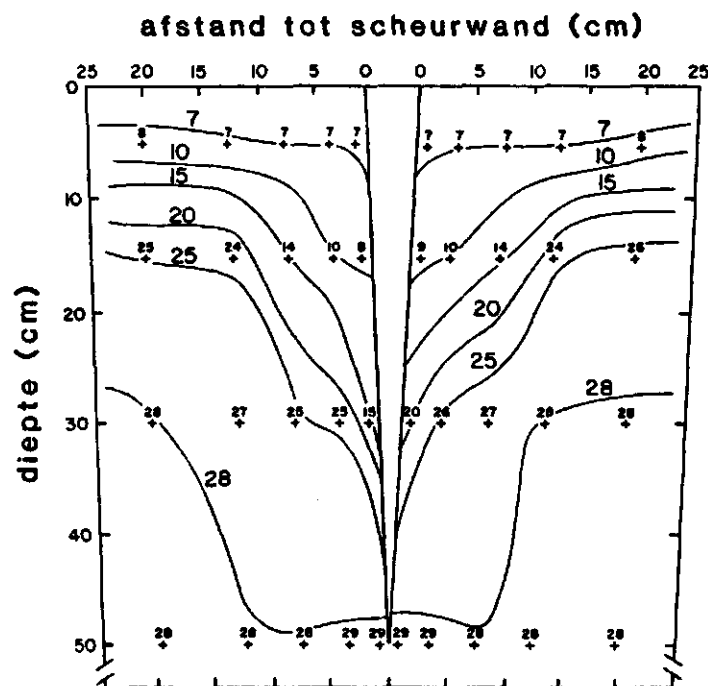


Fig. 5. Gewichtsvochtgehalteverdeling in de nabijheid van een krimp-scheur na langdurige verdamping (naar RITCHIE en ADAMS, 1974)

5. METHODEN TER BEPALING VAN BODEMFYSISCH EIGENSCHAPPEN

5.1. In l e i d i n g

Bij een bespreking van methoden ter bepaling van bodemfysische eigenschappen van zware kleigronden kan men onderscheid maken tussen standaardmethoden voor rigide gronden, toegepast op zwellende-krimpende gronden en methoden die enkel in gebruik zijn bij zwellende en krimpende gronden.

Tot de eerste groep behoren onder andere de bepalingen van droog volumegegewicht, vochtgehalte, vochtspanning, doorlatendheid- en vocht-karakteristiek. In een rigide grond waar het bodemvolume constant blijft, zijn voor de meting van deze eigenschappen diverse standaardmethoden beschikbaar. In zwellende en krimpende gronden blijken veel van deze methoden de nodige problemen op te leveren. Wat is het volume vochtgehalte van een 100 cm^3 ringmonster als na enkele dagen op de pF-bak de grondcilinder los staat van de ringwand en nog slechts een volume van 80 cm^3 bezit? Hoe groot is het volumegegewicht van een veld-bodem als van 2 gestoken ringen de ene een scheur bevat en de andere niet? Dit soort vragen en mogelijke oplossingen en alternatieven vormen het onderwerp van paragraaf 5.2.

In paragraaf 5.3 wordt nader ingegaan op de specifieke voor zwellende en krimpende gronden in gebruik zijnde methoden die tot doel hebben informatie te verschaffen over het volumeveranderingsproces. De nadruk zal hierbij liggen op de bepaling van de krimp-karakteristiek, die bepalend zijn voor onder andere infiltratiecapaciteit.

5.2. H e t g e b r u i k v a n s t a n d a a r d m e t h o d e n i n z w e l l e n d e e n k r i m p e n d e g r o n d e n

5.2.1. Volumegegewicht en vochtgehalte

Als gevolg van de optredende volumeveranderingen blijken zelfs eenvoudige begrippen als volumegegewicht en volume-vochtgehalte in een zware kleigrond voor de nodige verwarring te zorgen. Enerzijds wordt dit veroorzaakt doordat tijdens een laboratorium meting waarbij het vochtgehalte verandert, tevens het volume en dus de dichtheid verandert. Anderzijds komt dit doordat ook de eigenschappen van een zware klei in het veld continu aan veranderingen onderhevig zijn. Zo zal bijvoorbeeld het droge volumegegewicht in een natte periode kleiner zijn dan in een droge.

In laboratoriumexperimenten vonden BERNDT en COUGHLAN (1977), dat tijdens het grootste deel van het verdampingsproces de bodemmatrix verzadigd bleef en dat de matrix-bulkdichtheid toeneemt volgens de evenredige krimplijn. Toen zij deze laboratoriumgegevens in het veld wilde verifiëren door middel van het nemen van ringmonsters in een krimpende kleigrond kreeg men de resultaten van fig. 6.

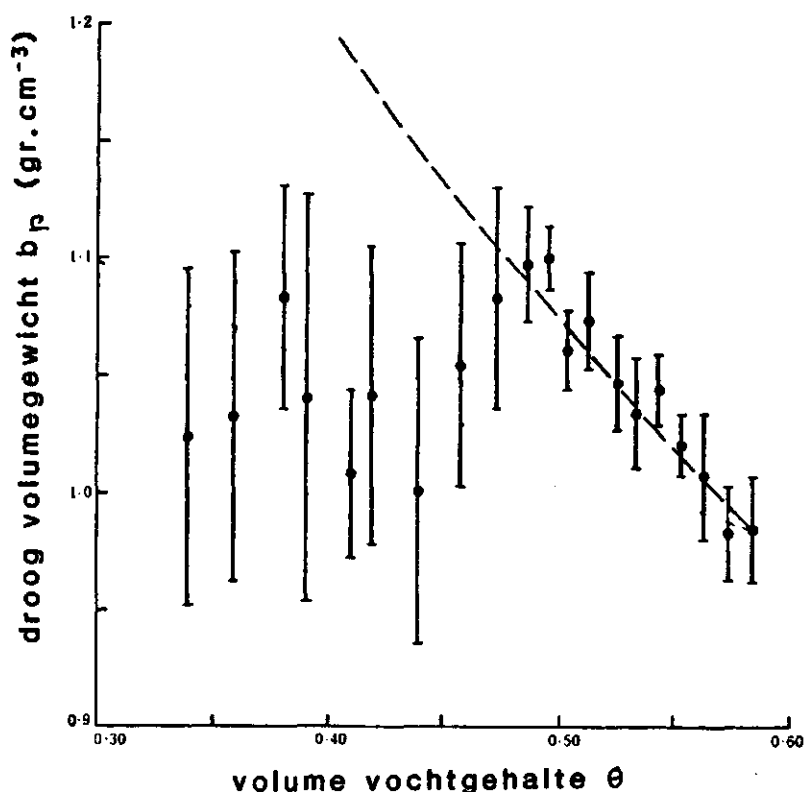


Fig. 6. Gemiddelde waarden en 95% betrouwbaarheidsintervallen van droge volumegewichten bij verschillende bodemvolumevochtgehalten.

Resultaten verkregen met behulp van ringmonsters gestoken in het veld.

----- = normale krimp van aggregaten (BERNDT en COUGHLAN, 1977)

De discrepantie tussen laboratorium en veldmetingen kan verklaard worden door de wijze waarop het droge volumegewicht is bepaald. Bij een hoog vochtgehalte bevat de grond nog slechts weinig scheuren. De ringmonsters zullen voor het merendeel geen scheuren bevatten en dus zullen de volumegewichten in de buurt van de evenredige krimplijn liggen. Bij uitdroging gaat de grond op meer plaatsen scheuren wat

resulteert in:

- a) grotere variabiliteit in de waarnemingen:
- b) eerst een afname van het droge volumegewicht (als de scheuren talrijker worden) en later een gelijkblijven of een lichte stijging (onder invloed van zakking).

Had men in plaats van ringmonsters kluiten genomen, dan was ook in het veld de evenredige krimplijn gevonden. Deze en andere problemen met betrekking tot het overdragen van laboratoriumresultaten naar veldsituaties kunnen op 2 manieren worden opgelost:

- 1) het nemen van zodanig grote monsters, dat een representatief bodemvolume (met een redelijk aantal scheuren) wordt verkregen. Bij een breed scheurenpatroon kan dit resulteren in monsters ter grootte van enkele m³. De bepaalde volumegewichten en -vochtgehalten zijn dan inclusief scheurvolumen;
- 2) het nemen van kluitmonsters of van ringmonsters in de matrix tussen de scheuren. De gemeten eigenschappen zijn matrixeigenschappen exclusief scheuren.

Het voordeel van de eerste aanpak is dat de verkregen gegevens rechtstreeks van toepassing zijn op veldsituaties. Dergelijke grote monsters kunnen soms ook gebruikt worden voor K_{verz} bepalingen (zie volgende paragraaf).

Het grote nadeel van methode 1 is echter dat hij geen inzicht geeft in de aard van het zwel-krimp proces. Het ontstaan van een verticale scheur en het leeglopen van microporiën in de kluiten zijn niet te onderscheiden; er wordt slechts een totale porositeit gemeten. Juist dat onderscheid tussen micro- en macroporiën is van overheersend belang in de hydrologie van zware kleigronden.

De tweede methode geeft een beter inzicht in de volume-veranderingen als gevolg van zwel en krimp. Daarnaast zijn de monsters kleiner en beter hanteerbaar. Met behulp van het oorspronkelijke scheurvolumen en de krimpkarakteristiek van de kluiten kan aan de hand van vochtgehalten het scheurvolumen berekend worden; er wordt echter geen informatie verkregen over het aantal scheuren, de afmetingen en de oriëntatie.

Een combinatie van methode 1 en 2 geeft informatie over vochtgehalten en dichtheden van kluiten, het stadium van het cyclische

zwellen en krimp proces waarin de bodem verkeert, het totale scheurvolume tussen de aggregaten en de eigenschappen (bijv. K_{verz}) die het gevolg zijn van de rangschikking van kluiten en scheuren op het moment van waarnemen.

5.2.2. Vocht- en doorlatendheidskarakteristiek

Beperken we ons tot de problemen bij het bepalen van bovenstaande relaties als gevolg van zwellen- en krimpprocessen, dan hangen deze nauw samen met de in de vorige paragraaf besproken aspecten. Bij de bepaling van vocht- en doorlatendheidskarakteristieken met behulp van pF-bakken, verdampingsmethode (WIND, 1969; BOELS et al, 1978) of heteluchtmethode (ARYA et al, 1975) verandert het volume van de grondcilinder in het ringmonster. Meestal worden deze veranderingen verwaarloosd, enerzijds omdat ze soms nauwelijks waarneembaar zijn, anderzijds omdat geen goede correctiemethode bekend is.

De invloed van krimp op de bepaling van de vocht- en doorlatendheidskarakteristiek wordt duidelijk in het volgende voorbeeld:

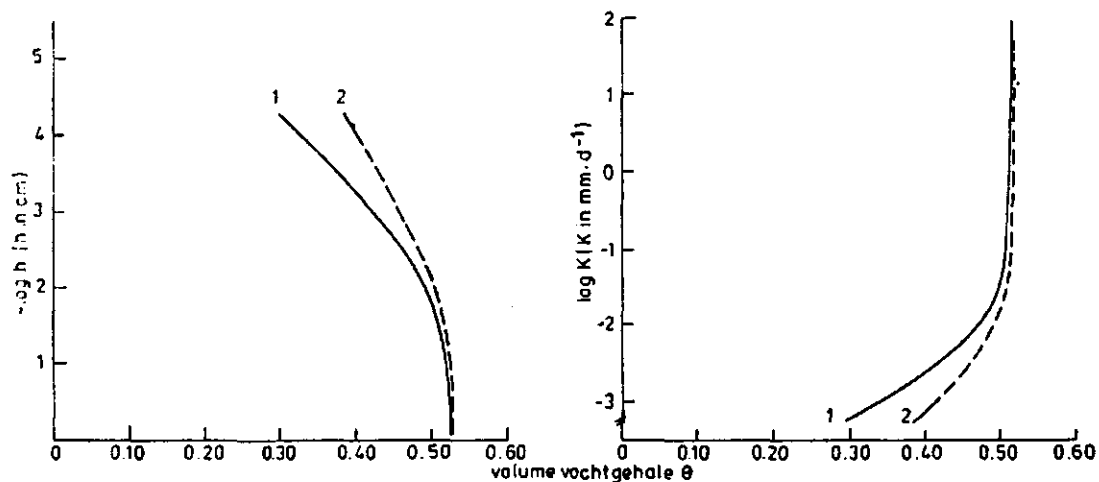


Fig. 7. Effect van volumeveranderingen op de bepaling van vocht- en doorlatendheidskarakteristieken.

- hypothetische curves. Volumevochtgehalte berekend op basis van oorspronkelijke ringvolume (standaardprocedure)
- - - - - aangepaste curves waarbij volumevochtgehaltes zijn gecorrigeerd met behulp van de krimpkarakteristiek uit fig. 8.

Lijn 2 geeft de eigenschappen van de bodemmatrix op de juiste wijze weer

In fig. 7a is een hypothetische $k(\theta)$ relatie van een zware klei-grond weergegeven (bijvoorbeeld bepaald op de pF-bak). Tussen $h = 0$ en $h = -1000$ cm zijn de volumevochtgehalten berekend op basis van het oorspronkelijke grondvolume (= ringvolume). Voor waarden beneden $h = -1000$ cm is gebruik gemaakt van persen en is het volumevochtgehalte berekend als produkt van gewichtsvochtgehalte en droog volumegewicht, dit laatste berekend op grond van het oorspronkelijke droogvolumegewicht. Dit is een veel gebruikte standaardprocedure voor het bepalen van de vocht karakteristiek. Met behulp van de gemeten krimp karakteristiek uit fig. 8 kunnen we de volumevochtgehalten omrekenen naar matrix-volumevochtgehalten. De $h(\theta)$ relatie die dan ontstaat is eveneens weergegeven in fig. 7a. Dit voorbeeld maakt duidelijk dat men zich bij het gebruik van een pF-curve goed moet realiseren hoe de gegeven parameters gedefinieerd zijn.

De bepaling van de $k(\theta)$ relatie heeft met identieke problemen te maken (fig. 7b). Daarnaast doen zich problemen voor bij de definitie van het begrip: verzadigd. We kunnen de methoden ter bepaling van de verzadigde doorlatendheid K_{verz} weer verdelen in 2 groepen:

- 1) Macromethoden. K_{verz} wordt gemeten aan een groot monster inclusief scheuren (Kubusmethode, b.v. BOUMA, 1977; BEUVING, 1984, infiltratiemethoden in het veld, b.v. RITCHIE et al., 1972).
- 2) Micromethoden. K_{verz} wordt op traditionele wijze met behulp van kleine ringmonsters bepaald. Dit levert een waarde van de matrix-doorlatendheid (mits zich geen continue scheuren in het ringmonster bevinden) exclusief scheurvolumen. Ook de boorgatenmethode waarbij de grote poriën en scheuren dichtgesmeerd worden is tot deze methoden te rekenen.

De tweede methode levert zeer lage niet representatieve waarden als men bijvoorbeeld drainage afstanden wil berekenen. Verder is de variabiliteit zo groot dat aan het nut van dergelijke K_{verz} bepalingen getwijfeld moet worden (SCHILFGAARDE, 1970).

Anderzijds kan bij een modelbeschouwing waarbij horizontale infiltratie van water vanuit scheuren naar bodemmatrix een rol speelt, de K_{verz} -waarde van de matrix wel van belang zijn (HOOGMOED en BOUMA, 1982). Ook in situaties waarbij de scheuren met water gevuld zijn (b.v. irrigatie door middel van bassinbevoeiing) wordt het vochttransport beschreven door de verzadigde doorlatendheid van de bodemmatrix exclusief scheuren.

De 1e methode ter bepaling van K_{verz} in gescheurde gronden wordt tegenwoordig veel toegepast en levert goede representatieve waarden. Een probleem is echter dat de verzadigde doorlatendheid van een zware kleigrond geen uniforme waarde bezit. Vanwege de dynamiek van de scheurvorming zal $K_{verz,winter}$ kleiner zijn dan $K_{verz,zomer}$. Meestal bepaalt men K_{verz} in het vroege voorjaar, zodat de gevonden waarde een ondergrens is. Een ander probleem wordt mogelijk gevormd door het dichtzwellen van scheuren tijdens de meting waardoor K_{verz} geleidelijk afneemt.

Resultaten van RITCHIE et al (1972) tonen aan, dat na 20 dagen verzadigde infiltratie in gescheurde Black Houston Clay K_{verz} niet significant kleiner wordt. Het zal van de snelheid van het zwelproces afhangen of in andere bodemtypen K_{verz} tijdens de meting wèl afneemt.

Wat het onverzadigde deel van de $k(\theta)$ relatie betreft, kan men bij kleine vochtspanningen gebruik maken van de korstenmethode ($h = 0$ tot $h = \pm 15$ cm) (BOUMA et al., 1983). De al genoemde voor- en nadelen die het werken met grote monsters met zich meebrengt blijven van kracht. Bij grotere vochtspanningen gaat men vaak over op hete-luchtmethode (ARYA et al., 1975) of de verdampingsmethode (WIND, 1969; BOELS et al., 1978). Omdat grote scheuren en poriën geen rol meer spelen in het vochttransportproces kan nu wèl gebruik worden gemaakt van kleinere monsters (b.v. 100 cm^3 ringen). De problemen met betrekking tot definiëring van het volumetrisch vochtgehalte blijven onverminderd gelden.

Een nog niet eerder genoemd probleem vormt mogelijk het ontstaan van horizontale scheuren die een barriere vormen voor opwaarts onverzadigd vochttransport.

Om de mate van horizontale scheuring vast te stellen paste BOUMA (1984) een kleuringstechniek toe. Door middel van infiltratie van een methyleenblauw-oplossing in een gekantelde grond-kubus worden de horizontale scheuren gekleurd. Een correctiefactor voor onverzadigde opwaartse stroming kan dan worden berekend als functie van het gekleurde scheuoppervlak. Vervolgens wordt de $K(h)$ -relatie (hete luchtmethode) aangepast tot een gecorrigeerde curve.

BEUVING (1984) vond voor 3 zware kleigronden met behulp van de verdampingsmethode ook bij hoge vochtspanning K -waarden die overeenkomen met Bouma's gecorrigeerde curve. Gebruik van de eenvoudige verdampingsmethode lijkt te prefereren boven de hete luchtmethode. Of de reductie in K moet worden toegeschreven aan horizontale scheuring is mogelijk maar niet bewezen.

5.3. Het meten van zwel- en krimpeigenschappen

5.3.1. Inleiding

Om een zware kleigrond volledig te kunnen karakteriseren is kennis van de zwel- en krimpeigenschappen van zo'n bodem noodzakelijk. Een veel gebruikte parameter is de zogenaamde Coefficient of Linear Extensibility (COLE). Voor een kubusvormig monster is deze COLE-waarde gedefinieerd als:

$$\text{COLE} = \frac{L_n - L_d}{L_d}$$

L_n = lengte van nat monster

L_d = lengte van droog monster

Maakt men gebruik van onregelmatig gevormde monsters (b.v. aggregaten) dan kan de COLE-waarde berekend worden met:

$$\text{COLE} = \sqrt[3]{\frac{V_n}{V_d}} - 1$$

V_n = volume nat monster

V_d = volume droog monster

Zware komkleigronden in Nederland hebben COLE-waarden van 0,12 - 0,20 (zie hoofdstuk 6).

De COLE-waarde geeft informatie over 2 punten van de krimpkarakteristiek. We zijn echter niet alleen geïnteresseerd in het begin- en eindvolume van een krimpend monster, maar ook in de manier waarop de weg tussen deze 2 punten wordt afgelegd. Gebeurt dit door middel van normale krimp of door rest-krimp? Voor de beantwoording van deze vragen moeten we de gehele krimpkarakteristiek bepalen. Er zijn diverse methoden ontwikkeld om een kleigrond, een klei-aggregaat, een ongestoorde grondcilinder of een kunstmatig gepakte kolom te volgen in zijn proces van vochtopname, -verlies en volumeverandering. In de komende paragrafen zullen enkele van deze methoden met hun mogelijkheden en voor- en nadelen nader worden besproken.

5.3.2. SARAN-methode

Voor het bepalen van volumegewichten van kluiten wordt vaak gebruik gemaakt van een coating waarmee het monster wordt bedekt om onder-water-weging mogelijk te maken. Parafine is hierbij een veel gebruikt middel. Een alternatieve coating werd door BRASHER et al. (1966) naar voren gebracht. Zij maakten gebruik van de SARAN F220 hars. Het blijkt dat deze kunsthars ook uitstekend te gebruiken is om de krimpkaracteristiek van kleiaggregaten te bepalen. In tegenstelling tot bijvoorbeeld parafine vormt SARAN een elastische coating die goed contact met het aggregaat blijft houden en tevens waterdampdoorlatend en waterondoorlatend is. Tijdens het krimpproces kunnen de vochtgehalteveranderingen gevolgd worden door middel van wegen en de volumeveranderingen door het bepalen van de opwaartse kracht door middel van onderwater wegen.

De SARAN F310 (de moderne versie van de F220) hars is een poeder dat in methyl-ethylketon wordt opgelost in een gewichtsverhouding van 1:4 tot 1:8, afhankelijk van de gewenste viscositeit. De verzadigde aggregaten worden in de harsoplossing gedompeld en gedroogd. Eventueel kunnen meerdere harslagen over elkaar worden aangebracht wat de stevigheid bevordert maar de verdampingssnelheid doet afnemen. Het aggregaat wordt vervolgens gedurende enkele weken aan verdamping blootgesteld. In deze periode moet 4-8 keer het gewicht en het volume worden bepaald. Na afloop van deze periode kan het monster (inclusief SARAN) in de oven gedroogd worden en is het mogelijk het eindvolume en drooggewicht te bepalen. Hierna kan de krimpkaracteristiek worden geconstrueerd. In principe is het tevens mogelijk om droge monsters te volgen in hun zwelproces. Hiervoor moet een plakje van de coating worden afgehaald waarna het monster bijvoorbeeld op een pF-bak vocht kan opnemen. Voor elke onder-water-weging wordt een extra harslaag aangebracht, die na de weging weer wordt weggesneden. Op deze manier kan de krimpkaracteristiek ook van vochtspanningswaarden worden voorzien. Bij het zwellen van de kluiten is het mogelijk dat de SARAN coating niet elastisch genoeg is en de zwel tegengaat (TUNNY, 1970). Met behulp van een plasticizer (bijvoorbeeld dibutyl phtalaat) is dit mogelijk te verhelpen.

De bepaling van de krimpkaracteristiek van Bonmelerwaard komklei met de SARAN-methode komt aan de orde in par. 6.1.

5.3.3. Radioactieve methoden

In rigide gronden is de afzwakking van γ -straling door een grondkolom afhankelijk van het vochtgehalte en kan de mate van afzwakking gebruikt worden om het vochtgehalte van de bodem te bepalen. Deze methode is zowel in het laboratorium als in het veld bruikbaar (GURR, 1962, REGINATO en VAN BAVEL, 1964 en FEDDES, 1971).

In zwellende en krimpemde gronden verandert onder invloed van infiltratie en evaporatie niet alleen het vochtgehalte maar tevens de bulkdichtheid van de bodem. Om beide veranderingen gelijktijdig te kunnen waarnemen maakt men gebruik van een zogenaamde "Dual gamma scanner" waarbij twee γ -bronnen (^{137}Cs en ^{241}Am) en twee detectoren worden gebruikt. Met zo'n opstelling kunnen vochttransportprocessen in grondkolommen van 10-15 cm diameter worden gevolgd (BRIDGE en COLLIS-GEORGE, 1973, GROENEVELT, 1974, STROOSNIJDER en DE SWART, 1974). Het vochtgehalte en de bulkdichtheid kunnen berekend worden volgens (COREY et al., 1971):

$$p = \frac{\mu_{w,Am} \ln(I/I_0)_{cs} - \mu_{w,cs} \ln(I/I_0)_{Am}}{\mu_{w,cs} \mu_{s,Am}^x - \mu_{s,cs} \mu_{w,Am}^x}$$

$$g = \frac{\mu_{s,cs} \ln(I/I_0)_{Am} - \mu_{s,Am} \ln(I/I_0)_{cs}}{\mu_{w,cs} \mu_{s,Am}^x - \mu_{s,cs} \mu_{w,Am}^x}$$

waarin:

- I = stralingsintensiteit na passage door grondcilinder (s^{-1})
- I_0 = stralingsintensiteit na passage door lege cilinder (s^{-1})
- μ_s, μ_w = massa afzwakkingscoëfficiënten voor droge grond en water ($cm^2 g^{-1}$)
- p = bulkdichtheid ($g cm^{-1}$)
- g = gewichtsvochtgehalte ($g cm^{-3}$)
- x = dikte van het monster (cm)

Voor de bestudering van infiltratieprocessen in verzadigde bentoniet-pasta's is deze methode zeer geschikt. Zodra er echter scheuren in het monster ontstaan doen zich problemen voor omdat met behulp van deze methode de gemiddelde dichtheid wordt gemeten van een plakje grond van enkele mm dikte met een oppervlakte ter grootte van de diameter van de kolom. Dit heeft tot gevolg dat als de dichtheid van een zware klei-kolom toeneemt onder vorming van een brede

scheur langs de cilinderwand, dit niet met behulp van de Dual gamma scanner geregistreerd kan worden. Immers, als geen zakking optreedt blijft de hoeveelheid vaste fase per diepte-increment gelijk.

De met behulp van deze methoden verkregen krimpkarakteristieken vertonen dan ook een volkomen ander beeld dan de SARAN-krimpkarakteristieken (vergelijk fig. 3a en 3b).

Concluderend kan gezegd worden dat de Dual gamma scanner een prima mogelijkheid biedt de vochttransportprocessen in niet gescheurde klei-kolommen te bestuderen. Zodra echter scheuren optreden is de bruikbaarheid, zeker als men geïnteresseerd is in dichtheidsveranderingen en scheurvolumes, beperkt.

5.3.4. Veldmethoden

Er bestaan geen standaardmethoden om de volumeveranderingen in een zware kleibodem onder veldomstandigheden te meten. Men heeft gebruik gemaakt van grondankers op verschillende diepten (JAMISON en THOMPSON, 1967) of van nauwkeurige meetnaalden ter bepaling van oppervlakte-daling en -stijging (YAALON en KALMAR, 1972). Deze methoden bepalen slechts de verticale bodembewegingen. Onder aanname van isotropie van het zwel- en krimpproces is een schatting te maken van de totale volumeverandering die dan eventueel weer te koppelen is aan vochtgehalte veranderingen.

In een later stadium hebben YAALON en KALMAR (1984) ook het totale scheurvolumen bepaald door het meten van scheurdieptes met een dunne naaldsonde. ZEIN EL ABEDINE en ROBINSON (1971) hebben een soortgelijke methode toegepast. Een nadeel van zo'n methode is dat geen zekerheid bestaat dat alle scheuren in de meting betrokken zijn en vooral kleine scheuren over het hoofd worden gezien.

Een andere veldmethode bestaat uit het infiltreren gipsoplossingen in een bodem, waarna het scheurvolumen bepaald kan worden, eventueel met behulp van een image-analyzer (BOUMA en WÜSTEN, 1984 en MACKIE et al., 1984).

Tenslotte is het mogelijk kluit-bulkdichtheden te vergelijken met grote-ring-bulkdichtheden en aldus het interaggregaatvolumen te berekenen (HALLAIRE, 1984).

Deze laatste methoden hebben als nadeel dat ze destructief zijn en dat de volumeveranderingen niet aan één en hetzelfde monster kunnen worden waargenomen. Over het algemeen zijn slechts sporadisch gegevens bekend over de relatie vochtgehalteverandering-volumeverandering van veldbodems.

5.3.5. Overige methoden

Naast de reeds genoemde methoden zijn diverse onderzoekers zeer inventief geweest in het ontwikkelen van experimenten ter bepaling van vochtgehalte-volume relaties van zware kleigronden.

HAINES (1923) dompelde klei-aggregaten in kwik-baden (kwik infiltreert niet in het aggregaat) en berekende uit de kwikverplaatsing het aggregaatvolume. Bij diverse firma's is een standaardinstrumentarium verkrijgbaar dat nog van dit principe gebruik maakt.

STIRK (1954) sneed klei-aggregaten in twee delen. Aan het ene deel werd het vochtgehalte gravimetrisch bepaald. Van het andere deel werd het volume gemeten door het monster met kerosine te verzadigen en vervolgens in een pyknometer door middel van waterverplaatsing het kluitvolume te bepalen.

Het nadeel van deze methoden is dat ze destructief zijn en grote aantallen monsters vergen om een representatieve krimp karakteristiek te kunnen bepalen.

Een niet destructieve methode werd ontwikkeld door CRONEY et al. (1958). Zij maten de afmetingen van een kubusvormig monster met behulp van projectie van de schaduw op een filmscherm.

Volumeveranderingen kunnen ook worden bepaald door het aanbrengen van merktekens op grote klei-aggregaten en de afstanden tussen de merktekens te meten.

Tenslotte is het mogelijk verzadigde ongescheurde grondcilinders te drogen. Hierbij zal scheuring optreden langs de cilinderwand terwijl de klei-matrix nagenoeg niet scheurt. Door de omtrek en de hoogte van de losstaande kleikolom te meten (BERNDT en COUGHLAN, 1977) of door de scheur tussen grond en cilinderwand met zand of glasparels te vullen (HALLAIRE, 1984) kunnen de volumeveranderingen onder invloed van infiltratie en evaporatie worden gemeten.

6. ENKELE ORIENTERENDE EXPERIMENTEN MET BETREKKING TOT HET KRIMPGEDRAG VAN BOMMELERWAARD-KOMKLEI

6.1. D e k r i m p k a r a k t e r i s t i e k

Met behulp van de SARAN-methode zie par. 5.3.3) is de krimp karakteristiek van Bommelerwaard-komklei bepaald. De monsters zijn afkomstig van

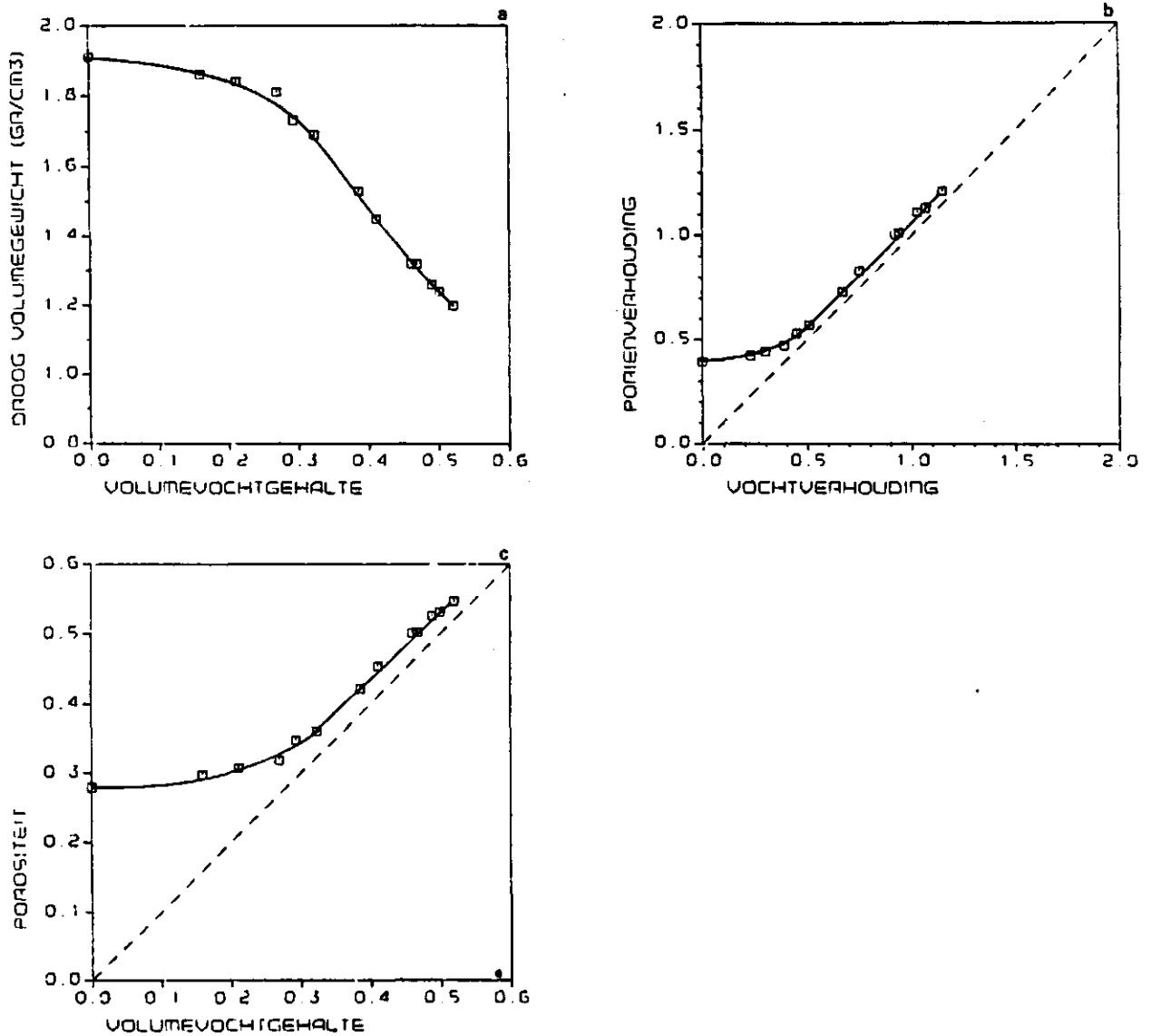


Fig. 8. Krimp karakteristiek van Bommelerwaard komklei. Diepte: 50 cm.
Meting is uitgevoerd aan kluiten met behulp van SARAN-methode

50 cm diepte. Het gehalte < 2 μm is 65%, de dichtheid van de vaste fase 2,68 gr/cm^3 . De bepaling is verricht aan 2 kluiten, respectievelijk 32 en 56 cm^3 groot. Monsternamen vond plaats op 4 december 1984. Na 2 weken op de pF-bak bij pF0 te hebben gestaan zijn de monsters in hars gedompeld. Wegen en onderwaterwegen vond plaats op 18/12, 19/12, 20/12, 24/12, 28/12, 2/1 en 3/1. In fig. 8a, 8b en 8c zijn de resultaten op 3 verschillende wijzen uitgezet. Uit deze figuren komt duidelijk naar voren dat de bemonsterde komklei sterke krimp vertoont, waarbij het volumegewicht der kluiten oploopt van 1,2 tot 1,9 gr/cm^3 .

Hoewel de $e(\vartheta)$ relatie niet samenvalt met de $e = \vartheta$ lijn, is de krimp toch grotendeels evenredig. Het feit dat ook bij hoge vochtgehaltes nog lucht in de aggregaten aanwezig is, terwijl wel evenredige krimp optreedt, wordt vaker waargenomen (YONG & WARKENTIN, 1966).

Het grootste deel van de totale krimp vindt plaats bij relatief hoge volumevochtgehaltes (25-50%) zoals die gedurende een groot deel van het jaar in Nederlandse komkleigronden voorkomen. In dit vochttraject kunnen we de beschouwde komkleigrond opvatten als een stapeling van nagenoeg verzadigde kluiten die tijdens het evapotranspiratieproces in volume afnemen. Hierbij blijft de geringe hoeveelheid lucht in de kluiten constant. De volumeafname van de kluiten zelf is gelijk aan de toename van het luchtvolume tussen de kluiten. Op macroschaal wordt dit proces zichtbaar als scheurvorming en oppervlaktedaling.

6.2. G e o m e t r i e v a n h e t k r i m p p r o c e s

Zoals reeds eerder opgemerkt is het van belang te weten of de totale volumeverandering van de klei-aggregaten wordt omgezet in scheurvorming of oppervlaktedaling dan wel een combinatie van die twee.

Voor cilindervormige bodemelementen geldt evenals voor kubusvormige:

$$\frac{z-\Delta z}{z} = \left(\frac{v-\Delta v}{v}\right)^{\frac{1}{r}} s$$

Zie ook paragraaf 4.1.

Ringmonsters van 5 x 5 cm werden in december gestoken. Er waren geen scheuren zichtbaar in het monster. Na weging vond ovendroging plaats. De volumeverandering werd bepaald door fijn zand met bekende pakkingsdichtheid in de scheur langs de wand van het ringmonster te gieten, de ring op te vullen tot de rand en aldus het totale volumeverlies te meten (ΔV). Meting van de oppervlaktedaling leverde ΔZ . De resultaten zijn vermeld in tabel 1.

De voorzichtige conclusie mag luiden dat het krimproces in Bommelerwaard komklei 3-dimensionaal isotroop verloopt.

Tabel 1. Geometrie van de krimp van ringmonsters in het vochtgehalte-traject: bijna verzadigd-ovendroog. De waarden zijn gemiddelden van drie monsters

Diepte (cm)	Veldvocht- gehalte (cm^3/cm^3)	Droog volume- gewicht, veld (g/cm^3)	Droog volume- gewicht, ovendroog (g/cm^3)	r_s
1- 6	0,55	1,01	1,58	3,2
10-15	0,52	1,11	1,79	3,1
20-25	0,52	1,06	1,83	3,5
30-35	0,48	1,28	1,91	2,9
45-50	0,51	1,26	1,88	3,1
70-75	0,56	1,16	1,81	3,3

7. TOEKOMSTIG ONDERZOEK

Deze nota toont aan, dat het volumeveranderingsproces en de aanwezigheid van krimpscheuren van grote invloed is op de vochthuishouding van zwellende en krimpende gronden, en daarmee op de bewerkbaarheid, de plasvorming, het vertrappingsgevaar etc.

Er is reeds veel onderzoek uitgevoerd naar de kwantificering van relaties tussen scheurgrootte en -patroon en de processen van infiltratie en evaporatie, en verder onderzoek zal zeker noodzakelijk zijn. Een praktische toepassing van dit type relaties, bijvoorbeeld in simulatiemodellen, is echter enkel mogelijk als men tevens inzicht

heeft in de veranderingen in scheurgrootte en -patroon, zoals die gedurende het jaar in het veld optreden. Daarom zal in verder onderzoek naar het gedrag van zwellende en krimpende gronden de nadruk allereerst worden gelegd op het dynamische karakter van deze gronden. Vragen die hierbij aan de orde komen zijn:

- 1) Hoe verandert het scheurvolumen en scheurpatroon gedurende het jaar? Zijn er perioden waarin de scheuren helemaal gesloten zijn?
- 2) Is het verloop van het scheurvormingsproces zoals het in het veld optreedt, te voorspellen en te simuleren? Hoe is de vochthuishouding van een scheurende kleigrond gedurende lange tijd te simuleren?
- 3) Zijn scheurgrootte en scheurpatroon te beïnvloeden om zodoende vochthuishouding, bewerkbaarheid, plasvorming, vertrappingsgevaar en dergelijke te beïnvloeden?

De behandeling van deze 3 vragen zal de komende jaren centraal staan in het onderzoek van de afdeling Bodemfysica naar zwellende en krimpende gronden.

Voor beantwoording van vraag 1 zullen kolom- en veldexperimenten worden uitgevoerd, waarbij naast waterbalanstermen ook scheurvolumen en maaiveldsligging gemeten worden. Totaal scheurvolumen, gedefinieerd als ruimte tussen de bodemaggregaten, zal worden berekend door het vergelijken van kluit-volumedichtheden en grote ring-volumedichtheden. Verticale wijzigingen in bodemlaagdikte zullen met behulp van zakplaatjes worden gemeten.

Bij de behandeling van vraag 2 zal het vochtregime gekoppeld moeten worden aan het zwellen en krimpen van de kleigrondmatrix. Hierbij zal de krimpkarakteristiek een centrale rol spelen. Met behulp van de SARAN-methode zullen krimpkarakteristieken worden bepaald aan kluiten van verschillende zware kleigronden. In eerste instantie zal geprobeerd worden het scheurvormings- en oppervlaktedalingsproces te simuleren; de gegevens verkregen bij 1 kunnen ter verificatie worden gebruikt. Met behulp van uit de literatuur bekende en zelf te bepalen relaties tussen scheurvolumen enerzijds en infiltratie, doorlatendheid, evaporatie en berging anderzijds, kunnen vervolgens bestaande modellen worden aangepast en nieuwe worden ontwikkeld om de vochthuishouding van scheurende gronden over lange tijdsreeksen te kunnen voorspellen.

Vraag 3 tenslotte is de meest interessante maar ook het moeilijkst te beantwoorden. Van diverse factoren is reeds kwalitatief bekend dat ze het scheurvormingsproces beïnvloeden, te denken valt onder andere

aan het gunstige effect dat een goede drainage op de doorlatendheid en de ontwatering van zware kleigronden heeft. Naast een meer kwantitatieve benadering van de scheurvorming als gevolg van drainage zal ook aandacht worden geschonken aan factoren als bijvoorbeeld beregening, teeltkundige maatregelen en grondbewerking. Voor een zinvolle behandeling van vraag 3 zullen allereerst bevredigende antwoorden op de vragen 1 en 2 moeten worden gegeven.

Het onderzoek zal zich in eerste instantie richten op de Nederlandse kom- en knipkleigronden. Metingen zullen worden uitgevoerd in de Bommelerwaard. Het grote belang van zwel- en krimpprocessen in de evaluatie van irrigatiemogelijkheden in gescheurde droge kleigronden en drainagemogelijkheden in waterverzadigde gezwollen kleigronden, maakt een latere uitbreiding van het onderzoek naar gebieden buiten Nederland zinvol.

LITERATUUR

- ARYA, L.M., D.A. FARREL and G.R. BLAKE, 1975. A field study of soil water depletion patterns in precense of growing soybean roots. I. Determination of hydraulic properties of the soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 424-430
- BAKKER, H. DE en J. SCHELLING, 1966. Systeem van Bodemclassificatie voor Nederland; de hogere niveaus, PUDOC, Wageningen
- BERNDT, R.J. and K.J. COUGHLAN, 1977. The nature of changes in Bulk Density with water content in a cracking clay. Aust. J. Soil Res. 15: 27-37
- BEUVING, J., 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel-, klei- en veengronden. ICW-rapport 10, 26 pagina's
- BLAKE, G., E. SCHLICHTING and K. ZIMMERMAN, 1973. Water recharge in a soil with shrinkage cracks. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37: 669-672
- BOELENS, H., A.K. BOT en T. TAMMENS, 1976. Het functioneren van drainage in de komgronden van de Tielerwaard-W. en Bommelerwaard-O. Afstudeerscriptie, HBCS Velp
- BOELS, D., J.B.H.M. VAN GILS, G.J. VEERMAN and K.E. WIT, 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. 126: 191-199
- BOUMA, J., L.W. DEKKER and C.J. MUILWLJK, 1981. A field method for measuring shortcircuiting in clay soils. J. of Hydrol. 52: 347-354
- _____ 1984. Using soil morphology to develop measurement methods and simulation techniques for water movement in heavy clay soils. in: BOUMA, J. and P.A.C. RAATS (1984), Proc. ISSS Symp. on water and solute movement in heavy clay soils: 298-315, ILRI, Wageningen
- _____ , L.W. DEKKER and J.H.M. WOSTEN, 1978. A case study on infiltration into dry clay soil II: Physical measurments. Geoderma 20: 41-51
- _____ and L.W. DEKKER, 1983. Nieuwe fysische meetmethoden bij waterbeweging in kleigronden. Landb.kundig tijdschr. 95:26-29

- BOUMA, J., 1977. Soil Survey and the study of water in unsaturated soil. Paper 13, Soil Survey Institute, Wageningen, 107 pp.
- _____ and J.H.M. WOSTEN, 1984. Characterizing ponded infiltration in a dry cracked clay soil. J. of Hydrology vol. 69
- BRASHER, B.R., D.P. FRANZMEIER et al., 1966. Use of Saran Resin to coat natural soil clods for bulk density and water retention measurements. Soil Science 101, 108
- BREEUWSMA, A., 1984. Kleimineralogische en chemische karakteristieken van zeeklei, rivierklei en beekklei. STIBOKA-rapport no. 1869.
- BRIDGE, B.J. and H. COLLIS-GEORGE, 1973. A dual source gamma ray traversing mechanism suitable for the non-destructive simultaneous measurement of bulk density and water content in columns of swelling soil. Aust. J. Soil Res. 11: 83-92
- COREY, J.C., S.F. PETERSON and M.A. WAKAT, 1971. Measurement of attenuation of caesium-137 and americium-241 gamma rays for soil density and water content determination. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35: 215-219
- CRONEY, D., J.D. COLEMAN and W.P.M. BLACK, 1958. Movement and distribution of water in soil in relation to Highway Design and Performance in: Water and its conduction in soils, Highway Res. Board, Washington D.C. Spec. Report 40: 226-252
- DEKKER, L.W. en J. BOUMA, 1978. De invloed van drainage en verbeterde ontwatering op de verticale verzadigde doorlatendheid van komklei: en krimpkleigronden. Stiboka Rapport no. 1416
- DUDAL, R. (ed.) 1965. Dark clay soils of tropical and subtropical regions. FAO, Rome 17/923
- FAO, 1975. Soil map of the world. Unesco, Paris
- FARBROTHER, H.G., 1970. Investigations into the irrigation practices of the South-Gezira. The pattern of soil moisture changes under irrigated cotton. In: Cotton Growth in Gezira environment. A symposium to mark the 50th anniversary of the Gezira Research Station
- _____ 1972. Field behaviour of Gezira Clay under irrigation. Cott. Gr. Rev. 49: 1-27
- FEDDES, R.A., 1971. Water, heat and Crop growth. Proefschrift, Landbouw-Hogeschool, Wageningen
- GERMANN, P.F., W.M. EDWARDS and L.B. OWENS, 1984. Profiles of Bromide and increased Soil Moisture after infiltration into soils with macropores. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 237-244

- GURR, C.G., 1962. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil. *Soil Sci.* 94: 224-229
- HAINES, W.B., 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil. *J. Agric. Sci., Camb.* 13: 296-311
- HALLAIRE, V., 1984. Evolution of crack Networks during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops. In: Bouma, J. and P.A.C. Raats (eds). *Proc. ISSS Symp. on water and solute movement in heavy clay soils: 49-54.* ILRI, Wageningen
- HIDDING, A.P., 1965. Untersuchungen zur beeinflussung schwerer Tonböden durch kulturtechnische Masznahmen. *Wissensch. Zeitschr. Univ. Jena* 14,3
- HOOGMOED, W.B. and J. BOUMA, 1980. A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 458-461
- HOORN, J.W. VAN, 1960. Grondwaterstroming in komgrond en de bepaling van enige hydrologische grootheden in verband met het ontwateringssysteem. *Diss. L.H., Wageningen*
- ICRISAT, 1981. Improving the management of India's deep black soils. 17/915
- JAMISON, V.C. and G.A. THOMPSON, 1967. Layer thickness changes in a clay-rich soil in relation to soil water content changes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 441-444
- KAMPEN, J., 1982. An approach to improved productivity on deep Vertisols. *ICRISAT information Bulletin*, no. 11. 29/720
- KUIPERS, S.R., H. HEERINGA en K. DE VRIES, 1967. Verbetering van knipkleigrasland. *Rijkslandbouwconsulentschap voor zuid-west Friesland. Gestencilde mededelingen* no. 19
- LANDINRICHTINGSINSTITUUT PROV. DIR. FRIESLAND, 1977. Kleigrasstand onderzoek in Friesland. Resultaten tot en met 1976, Leeuwarden
- _____ 1979. Kleigraslandonderzoek in Friesland (II). Resultaten over de jaren 1977-1978, Leeuwarden
- LOVEDAY, J., 1964. A study of the relationships between the yield of irrigated lucerne and the properties of some grey and brown soils of heavy texture in South-West New South Wales. *Aust. J. Soil Res.*, 2: 96-110

- MACKIE, L.A., C.F. MULLINS and E.A. FITZPATRICK, 1984. Structural changes in two clay soils under contrasting systems of management. In: J. Bouma and P.A.C. Raats (1984). Proc. ISSS. Symp. on water and solute movement in heavy clay soils: 71-77, ILRI, Wageningen
- PHILIP, J.R., 1969 a,b. Moisture equilibrium in the vertical in swelling soils I Basic Theory a
II Applications b
Aust. J. Soil Res. 7: 99-141
- _____ 1971. Hydrology of swelling soils. In: T. Talsma en J.R. Philip (eds). Salinity and water use. Macmillan, London p. 95-107
- _____ and D.E. SMILES, 1969. Kinetics of sorption and volume change in three component systems. Aust. J. Soil Res. 7: 1-19
- _____ 1969. Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soils. Water Resource. Res. 5: 1070-1077
- _____ 1968. Kinetics of sorption and volume change in clay-colloid pastes. Aust. J. Soil Res. 6: 249-267
- REGINATO, R.J. and C.H.M. VAN BAVEL, 1964. Soil water measurement with gamma attenuation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28: 721-724
- REID, F. and R. PARKINSON, 1981. Too wet, too dry: clay soil problems. Soil and Water, vol. 9, 402: 7-9
- RIJNIERSCE, K., 1983. Een model voor de simulatie van het Fysisch rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders. Proefschrift, Pudoc Wageningen
- RITCHIE, J.T. and J.E. ADAMS, 1974. Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 38: 131-134
- _____ D.E. KISSEL and E. BURNETT, 1972. Water movement in undisturbed swelling clay soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36: 874-879
- SCHILFGAARDE, J. VAN, 1970. Theory of flow to drains. In: V.T. Chow (ed.) Advan. Hydrosci. 6: 43-106. Agricultural Press, New York
- SMILES, D.E. and A.G. HARVEY, 1973. Measurement of moisture diffusivity of wet swelling systems. Soil Sci. 116: 391-399
- _____ and M.J. ROSENTHAL, 1968. The movement of water in swelling materials. Aust. J. Soil Res. 6: 237-248
- _____ 1974. Infiltration into a swelling material. Soil Sci. 117: 140-147

- SOIL SURVEY STAFF, 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Cons. Service, U.S.D.A. Handbook no. 436, 750 pp.
- STIRK, G.B., 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. Aust. J. Agric. Res. 5: 279-290
- STROOSNIJDER, L., 1976. Infiltratie en herverdeling van water in grond. Proefschrift, Pudoc Wageningen
- _____ and J.G. DE SWART, 1974. Column scanning with simultaneous use of 241 Am and 137 Cs gamma radiation. Soil Sci. 118: 61-69
- SWARTZ, G.L., 1966. Modification of the cracking pattern on a black earth of the Darling Downs, Queensland. Qld. J. Agric. & Am. Sc. 23: 279-285
- TUNNY, J., 1970. The influence of SARAN resin coatings on swelling of natural soil clods. Soil Sci. 109: 254-256
- WIND, G.P., 1969. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: Water in the unsaturated zone. Symp. 1966 Proc. UNESCO/IASH: 181-191
- YAALON, D.H. and D. KALMAR, 1972. Vertical movement in an undisturbed soil: continuous measurement of swelling and shrinkage with a sensitive apparatus. Geoderma 8: 231-240
- YAALON, D.H. and D. KALMAR, 1984. Extent and dynamics of cracking in a heavy clay soil with xeric moisture regime. In: Bouma, J. and P.A.C. Raats (eds). Proc. of the ISSS symp. on water and solute movement in heavy clay soils: 45-48. ILRI, Wageningen
- YONG, R.N. and B.P. WARKENTIN, 1966. Introduction to soil behaviour Macmillan, New York. 17/383
- YULE, D.F. and J.T. RITCHIE, 1980. Soil shrinkage relationships of Texas. Vertisols: I: small cores. II: large cores. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 1285-1295
- ZEIN EL ABEDINE, A. and G.H. ROBINSON, 1971. A study on cracking in some vertisols of the Sudan. Geoderma 5: 229-241