

Sammenligning af keramiske sugekopper og lysimetre med hensyn til udtagning af jordvæske til bestemmelse af $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentration

Comparison of porous ceramic cups and drainage lysimeters for sampling soil water $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentration

ELLY MØLLER HANSEN

Resumé

Nærværende beretning beskriver først de metode-mæssige problemer, der kan være forbundne med at benytte keramiske sugekopper. Dernæst sammenlignes $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationer og $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning på sandjord bestemt ved hjælp af keramiske sugekopper og afstrømningslysimetre. Sugkopper blev placeret i en dybde af 1,2 m i syv lysimeterkar. I indtil tre dage om ugen var sugkopperne påført et vakuum med en udgangsværdi på 0,8 bar. $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationerne i jordvæske isoleret vha. sugkopper og lysimeterdræn blev sammenlignet ca. en gang om ugen over en periode på 15 måneder. Målingerne viste sammenhæng mellem koncentrationerne i sugkopperne og koncentrationerne i drænvandet.

Ved begge metoder blev $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskningen beregnet på grundlag af afstrømningsværdier fra lysimeterkarrene. En statistisk analyse viste, at den totale $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning bestemt vha. de keramiske sugekopper ikke var statistisk forskellig fra totaludvaskningen bestemt vha. drænvand fra lysimeterkar. Det skal dog tages i betragtning, at talmaterialet er for spinkelt til at give et entydigt resultat.

Undersøgelsen lader formode, at prøveudtagning med keramiske sugekopper efter nærværende metode er egnet til isolering af jordvæske for $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskningsbestemmelser på sandjord; men der er behov for yderligere undersøgelser.

Nøgleord: $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning, $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentration, keramisk sugekop, lysimeter.

Summary

In this study the ability of porous ceramic cups to monitor nitrate-N leaching is compared with drainage lysimeters. A description of problems regarding the use of ceramic cups is included in the paper. Ceramic cups were placed within seven

drainage lysimeters packed with sand at 1.2 m below the surface of the soil. Approximately once a week a suction of 0.8 bar was applied to the extractors over, at most, three days. $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations of weekly extractions from the

ceramic cups and outflow from lysimeter tile drains were compared over a 15-month period. The measurements show coherence between concentrations in the extractors and in the tile drains.

For both methods leaching of NO_3^- -N was calculated on the basis of tile drainage from the lysimeters. NO_3^- -N leaching calculated on basis of NO_3^- -N concentrations in the ceramic cups was not statistically different from those determined

by the drainage lysimeters. Because of experimental circumstances the result is not unambiguous.

This study suggests that porous ceramic cups applied with falling suction are viable devices for extracting soil water samples for NO_3^- -N leaching studies on sandy soils, but further studies are needed.

Key words: NO_3^- -N leaching, NO_3^- -N concentration, suction cup, drainage lysimeter.

Indledning

De senere års debat om nitratforurening fra landbrugsjord har øget interessen for metoder til bestemmelse af den nitrat-mængde, der forlader planternes rodzone – dvs. udvaskes. For at bestemme udvaskningen fra et givet areal er det nødvendigt at kende mængden af vand, der strømmer fra planternes rodzone samt nitratkoncentrationen heri. Udtagning af jordvæske vha. keramiske sugekopper er en metode, der ofte benyttes ved måling af nitratkoncentrationer i jordvæske under markforhold (fx 2, 3, 32, 34, 35). Sugekopperne påføres ofte et vakuum på ca. 0,8 bar, der aftager, efterhånden som sugekopperne fyldes med vand.

Metoden er ikke rapporteret sammenlignet med andre metoder under danske forhold, og det har kun været muligt at finde få udenlandske artikler, hvor der er foretaget en sammenligning (1, 20, 22, 27, 30).

I nærværende beretning foretages en sammenligning mellem keramiske sugekopper og afstrømningslysometre, idet sugekopperne blev placeret i lysimetrene. Formålet er at sammenligne NO_3^- -N-koncentrationer og NO_3^- -N-udvaskning bestemt vha. de to metoder. Ved begge metoder foretages udvaskningsberegningerne på grundlag af målinger af mængden af afstrømmende vand fra lysimetrene. Vanskelighederne ved at bestemme afstrømningen fra et givet areal i marken vil ikke blive omtalt i beretningen.

Teoretisk baggrund

Prøveudtagning af jordvæske kan enten ske ved udtagning af jordprøver eller udtagning af vandprøver vha. sugekopper eller opsamling af drænvand. Med hensyn til udtagning af jordprøver kan

der henvises til *Djurhuus* (9), der har foretaget en sammenligning af NO_3^- -N-koncentrationer i jordprøver og jordvæske udtaget med sugekopper.

Betegnelsen lysimeter dækker over en række forskellige typer af beholdere, ved hjælp af hvilke der opsamles jordvæske. I denne beretning skelnes der mellem afstrømningslysometre (22) og opsamlingslysometre (1, 10, 14, 22). Afstrømningslysometrene indeholder en hel jordprofil. Jorden kan være påfyldt eller udtaget i naturlig lejring. Opsamlingslysometrene kan indeholde en mindre mængde jord (10, 14, 22) eller være uden indhold af jord (1). De placeres under jordoverfladen enten nedgravet (10, 22) eller indsat fra en grøft (1, 14).

Ved benyttelse af afstrømningslysometre er koncentrationsbestemmelser udtryk for flux-gennemsnitlige koncentrationer i jordvæsken. Ved udtagning af jordprøver er koncentrationsbestemmelser derimod udtryk for volumen-gennemsnitlige koncentrationer. Udtages jordvandet vha. sugekopper, er det usikkert, hvilken type koncentration der efterfølgende bestemmes i jordvandet. Den målte koncentration kan således være et udtryk for flux-gennemsnitlige koncentrationer, volumen-gennemsnitlige koncentrationer eller en vilkårlig kombination heraf (24). I det følgende skal der kort redegøres for forhold, som har indflydelse på, om vandprøver udtaget med sugekopper er repræsentative for det vand, der strømmer ud af rodzonen, dvs. om de målte koncentrationer er flux-gennemsnitlige koncentrationer.

Porestørrelse

I jorden findes porer af forskellig størrelse, form

og orientering. Store porer afdrænes ved tyngdekraftens påvirkning. Mindre porer tilbageholder vand, som planterne kan udnytte og som ikke i væsentlig grad afdrænes ved tyngdekraftens påvirkning. De mindste porer tilbageholder vand med en sådan kraft, at planterne ikke er i stand til at udnytte det. Da der ofte opgives forskellige grænser for de forskellige poreklasser, benyttes i denne forbindelse blot de relative størrelser.

Ved prøveudtagning med sugekopper efter nærværende metode vil et oprindeligt påført vakuum gå mod nul, efterhånden som sugekopperne fyldes med vand. Et højt vakuum i begyndelsen kan trække vand ud af mindre porer. Efter beregninger tilsvarende *Bennetzens* (2) vil porer med en ækvivalent diameter mindre end ca. 4 μm dog ikke kunne tømmes ved den her benyttede metode. Den udtagne prøve vil mest bestå af vand fra de større porer, da vandet heri er mindre hårdt bundet, og vandtransporten foregår med større hastighed i disse porer (16). Hvis NO_3^- -N-koncentrationen i de forskellige porestørrelser varierer, vil koncentrationen i prøven afhænge af, hvor stor en del af vandet der strømmer fra de forskellige porestørrelser.

Den relative fordeling af vand fra store og små porer i en prøve afhænger desuden af jordens vandindhold. Ved højt vandindhold i jorden suges vandet primært fra store porer, mens det ved lavt vandindhold suges fra mindre porer, da de store porer er afdrænet. Det er således vanskeligt at afgøre, hvilke porestørrelser vandet stammer fra. Risikoen for at suge vand fra porer, der ikke afdrænes naturligt, er mindst for sandjorde med relativt få små porer.

Makroporer

Revner og sprækker samt regnormegange og gamle rodkanaler er oftest større end 30 μm i diameter. De henregnes derfor ofte til den poregruppe, der kaldes makroporer. I det følgende benyttes betegnelsen makroporer om porer, der tillader vand at bevæge sig med stor hastighed gennem jorden. Det skal understreges, at porediameteren ikke er tilstrækkelig til at karakterisere makroporer i denne betydning (6).

Ved kraftig nedbør kan tilstedeværelsen af makroporer betyde, at en del af nedbøren vil strømme gennem makroporerne, uden at der opnås ligevægt med vandet i jordens øvrige porer. Disse porer kan have en anden NO_3^- -koncentration end det gennemstrømmende vand. Hvis

det hurtigtstrømmende vand ikke indgår i den opsamlede vandprøve, kan det føre til både over- og underestimering af NO_3^- -koncentrationen. Underestimering kan forekomme, hvis der umiddelbart efter NO_3^- -gødskning falder kraftig nedbør (38). Overestimering kan forekomme, når størstedelen af NO_3^- -ionerne befinder sig i de mindre porer.

Forsøg har vist, at makroporer kan have betydning for vand- og stoftransport i følgende jordtyper: velstruktureret lerjord (39), velstruktureret siltjord (25, 30, 32, 39), svagt struktureret lerjord (29) og svagt struktureret lerblandet sandjord (43). I en sandjord næsten uden aggregatdannelse blev der ikke fundet tegn på strømning i makroporer (39). Det kan dog ikke udelukkes, at makroporestrømningsfænomener kan forekomme i sandjord.

Karakteristisk for de fleste af ovennævnte forsøg er, at de er udført med en næsten vandmættet jord (29, 30, 39) eller med en jord med et vandindhold nær markkapacitet og vandet med en intensitet, der overskred jordens infiltrationskapacitet (31, 43). *Seyfried* og *Rao* (29) viste, at makroporestrømning kun kunne forventes i den undersøgte svagt strukturerede lerjord, hvis jorden var vandmættet eller meget nær vandmætning. *Quisenberry* og *Phillips* (25) viste i modsætning hertil, at vand kan strømme hurtigt gennem en siltjord, selv om jorden ikke er mættet til markkapacitet. De øverste ca. 2 cm af jorden blev dog mættet til markkapacitet.

Under normale nedbørsforhold er makroporerne ikke vandførende, men bl.a. ovennævnte forsøg viser, at de kan blive det ved høj nedbørsintensitet. Det afhænger af, om jordens infiltrationskapacitet i det øvrige jordvolumen (uden om makroporerne) overskrides (13). I forsøgene udført af *Tyler* og *Thomas* (39) og *Quisenberry* og *Phillips* (25) blev jordens infiltrationskapacitet angiveligt ikke overskredet, selv om der kunne konstateres makroporestrømning. Det skyldes formodentlig, at vandet har samlet sig i små fordybninger, således at jordens infiltrationskapacitet lokalt er blevet overskredet.

Ved traditionel pløjning ødelægges makroporerne til en vis grad. *Thomas* og *Phillips* (36) fandt dog, at makroporer kan have betydning for vandbevægelsen i pløjede jorde, da en del af eventuelle makroporer under pløjelaget stadig vil bestå.

Til trods for mange forsøg vides der ikke meget om, hvor ofte og under hvilke forhold makropo-

rer fyldes med vand (17). *Seyfried og Rao* (29) fandt for en svagt struktureret lerjord, at der sjældent faldt regn med tilstrækkelig intensitet til at mætte jordoverfladen og dermed forårsage makroporestrømning af betydning. *Omoti og Wild* (23) konkluderede på grundlag af et forsøg med en jord med talrige regnormegange, at der syntes at foregå større makroporestrømning ved vanding (5–8 mm/time) end ved naturlig nedbør i vinterperioden (gennemsnitlig 0,7–1,5 mm/time). Risiko for byger med høj intensitet er dog til stede selv ved en lav gennemsnitlig intensitet.

Immobil vand

Vand i såkaldte blinde porer eller i porer, der er afskåret fra vandet i jordens øvrige poresystem pga. luftlommer samt vand, der er bundet meget hårdt til jordpartiklerne, kaldes ofte immobil vand. Immobil vand kan ikke bevæge sig ved massestrømning og tager således ikke del i en eventuel afstrømning. Diffusion kan dog medføre transport af opløste stoffer mellem mobile og immobile regioner.

Hvis der er forskel på nitratkoncentrationen i mobil og immobil vand, vil koncentrationen i vandet, der isoleres vha. sugekopper, være afhængig af, hvor meget immobil vand der udsuges i forhold til mobil vand. Betydningen afhænger af, hvor stor forskel der er mellem $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen i det immobile og det mobile vand.

Tyler og Thomas (39) fandt i et forsøg med en næsten vandmættet sandjord, at en kaliumkloridopløsning, der blev tilført jordoverfladen, næsten fuldstændigt fortrængte den tilstedeværende jordvæske, dvs. at næsten alt vandet i jorden var mobil. *Gaudet et al.* (12) viste, at der i en sandjord ved umættet vandbevægelse kan være betydelige mængder immobil vand, samt at den relative mængde af immobil vand steg med aftagende vandindhold. Dette kan forklares ved, at der med aftagende vandindhold forekommer en stigning i andelen af luftfyldte porer. *De Smedt et al.* (8) fandt ligeledes tegn på tilstedeværelse af immobil vand i sand under umættede forhold, idet deres resultater kunne forklares med, at gennemsnitlig 36 pct. af jordvandet under umættede forhold var immobil.

Poresystemets opbygning kan tænkes at være bestemmende for, om der forekommer immobil vand under umættede forhold. Er porerne tilstrækkeligt forbundne med hinanden, kan de

store porer måske afdrænes, uden at der fremkommer immobil vand (29).

Anioneksklusion

Normalt antages det, at NO_3^- i jordvæsken bevæger sig med samme hastighed som vandet. Flere undersøgelser tyder imidlertid på, at anioner i visse tilfælde udvaskes hurtigere end forventet (33, 37, 42).

Anioneksklusion kan forklares med, at det elektriske dobbeltlag omkring lerkolloiderne og ioniseret organisk materiale bevirker, at anioner som Cl^- og NO_3^- frastødes eller ekskluderes fra dobbeltlaget, således at koncentrationen er størst i midten af porerne, hvor også vandbevægelsen er størst.

Ved lav ionkoncentration opstår der et forholdsvist tykt dobbeltlag. Dermed vil en stor del af jordvæsken ekskludere anionerne. Disse vil derfor befinde sig i det hurtigt strømmende vand i midten af porerne. *Thomas og Swoboda* (37) fandt således i et forsøg med lerjord (40 pct. ler), at den laveste Cl^- -koncentration i opløsningen medførte den hurtigste bevægelse af Cl^- -ionerne.

Det er vanskeligt at afgøre, hvor stor betydning anioneksklusion har i praksis. *Thomas og Swoboda* (37) nævner, at andre faktorer er aflignende eller større vigtighed end anioneksklusion.

Anionadsorption

I visse tilfælde har man fundet, at klorid bevæger sig langsommere gennem en jordprofil end vand indeholdende brintisotopen tritium (21). Dette skyldes tilsyneladende positivt ladede jernsesquioxider og lav kationombytningskapacitet. En uforstyrret profil viste en større kloridadsorption end en forstyrret jordprofil. Det må ifølge forfatterne skyldes, at sesquioxiderne befinder sig langs væggen i de større porer. Nitrat og klorid bliver ifølge *Scheffer og Schachtschabel* (28) praktisk talt ikke adsorberet ved normale pH-værdier.

Screening

Frastødning af ioner fra keramiske sugekopper kaldes for screening (15). Ved denne proces reduceres koncentrationen i væsken, der suges gennem sugekoppen, mens koncentrationen uden for sugekoppen øges. *Bennetzen* (3) fandt imidlertid, at $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen var næsten uændret efter passage gennem keramikopper. Dette stemmer med målinger udført af *El Bassam* (11), *Rasmussen et al.* (26) og *Wagner* (40).

Metodik

Lysimeterkar

Lysimeteranlægget består af betonkar – hvert med en kvadratisk overflade på 1 m². I de V-formede bunde er der placeret et lag vasket grus over et rør til bortledning af drænvand. Røret befinder sig i en dybde af ca. 180 cm. Jordprofilen er ca. 160 cm. I det følgende anses afstrømningen fra lysimetrene at stamme fra 160 cm's dybde. Der kan henvises til *Jensen* (18) for en yderligere beskrivelse af anlægget.

Ved forsøgets start i foråret 1988 indeholdt 3 kar (18A-20A) hedeslettesand (grovlandet jord, JB1) og 4 kar (17B-20B) morænesand (0-43 cm grovsandet jord, JB1; 43-160 cm grov lerblandet sandjord, JB3). Jorden blev nedlagt i karrene i 1974 og tilstræbt pakket til samme tæthed som i marken. Lagdeling, tekstur m.m. for disse to jordtyper fremgår af *Jensen* (18). Fra 1974-78 blev der i disse kar udført forsøg med mejerispildevand. Fra 1979-87 blev karrene ikke dyrket.

Afstrømningen igennem drænene i karrene (drænvandet) blev opsamlet i dunke og vejet én gang ugentlig – i tørre perioder dog med 14 dages mellemrum. Samtidig blev der udtaget vandprøver til bestemmelse af NO₃-N. Efter udtagning af prøverne blev disse nedfrosset for at hindre mikrobiel omsætning. Vandprøverne blev analyseret for NO₃-N vha. en spektrofotometrisk metode (5) efter forudgående tilsætning af tartrat.

Sugekopper

Til isolering af jordvæske blev der benyttet keramiske sugekopper af typen 655X01-B1M1 fra Soilmoisture Equipment Corp. i Californien. Sugekopperne har en udvendig diameter på 22 mm og en længde på 70 mm inkl. en 13 mm lang hals. Luftindtrængningsværdien er af fabrikken angivet til 1 bar (værdien angiver det tryk, der kræves for at presse luft gennem en sugekop, efter at den er blevet vandmættet (2)). Der henvises til *Djurhuus* (9) for en beskrivelse af, hvorledes sugeudstyret er konstrueret, og hvordan det blev installeret i karrene.

I hvert kar blev der nedsat tre keramiske sugekopper i hhv. 40, 80 og 120 cm's dybde. Nærværende beretning omhandler kun sugekopper nedsat i 120 cm's dybde. Sugekopperne blev vha. en håndpumpe påført et vakuum på 0,8 bar én gang om ugen – i tørre perioder dog kun hver anden uge. Tre dage efter påføring af vakuum blev sugekopperne tømt for vand og vandmængden målt.

(Samme dag blev der målt afstrømning fra karrene.) Vandprøverne blev efter udtagning behandlet på samme måde som prøverne af drænvand.

Forsøgsbehandling

Den 12.-13. april 1988 blev der sået vårbyg i alle kar. Sidst i april blev sugekopperne installeret, og prøveudtagningen begyndte den 2. maj. Kvælstofgødning i form af kalkkammonsalpeter blev tildelt den 3. maj 1988, således at to kar (nr. 20A og 17B) fik tildelt 6,0 g N/kar, to kar (19A og 18B) 12,0 g N/kar og to kar (18A og 19B) 18,0 g N/kar. Et kar (nr. 20B) fik ikke tildelt kvælstof. Karrene blev den 15. juni 1988 vandet med 30 mm. Den 18. august 1988 blev vårbyggen høstet. Herefter henlå karrene ubearbejdede, men sprøjtet mod ukrudt (glyphosat), indtil der den 3.-7. april 1989 blev udlagt et lag af småsten for at mindske fordampningen. Karrene henlå herefter uberørt indtil forsøgets ophør den 17. juli 1989.

Beregninger

Udvaskningen fra hhv. 120 cm og 160 cm blev beregnet dels på grundlag af sugekopperne, dels på grundlag af lysimeterdrænvandet. Følgende formel blev benyttet:

$$U_z = \frac{A \cdot C_z}{1000},$$

hvor

U_z = udvaskning af NO₃-N fra z cm's dybde, g/m²

A = afstrømning fra 160 cm dybde, mm

C_z = koncentration af NO₃-N i z cm's dybde, mg/l

For sugekopperne benyttedes NO₃-N-koncentrationer fra 120 cm's dybde og afstrømningsværdierne fra lysimeterdrænene. Det forudsattes der ved, at afstrømningen fra 120 cm's dybde svarede til afstrømningen fra drænene. Dette vil pga. tidsforskydning ikke altid være tilfældet (se side 60). Ved lysimetermetoden benyttedes afstrømningen fra drænene og NO₃-N-koncentrationen heri. I afstrømningsværdierne fra drænene indgår de forholdsvis små vandmængder, der er opsamlet i sugekopperne.

Sugekopperne opsamlede jordvand i den periode, der var vakuum på sugekopperne (maksimalt 3 døgn), mens drænvandet sædvanligvis blev opsamlet gennem en uge. Ved sugekopmetoden regnes derfor med gennemsnit af NO₃-N-koncentrationerne for den aktuelle måledato og den foregående måledato.

Ved den statistiske analyse betragtes totaludvaskningen – beregnet på grundlag af de to metoder – som parvise observationer. Der er foretaget en t-test af disse.

Resultater

Koncentrationsmålinger

I fig. 1–7 er bl.a. de målte koncentrationer af NO_3^- -N afbildet som funktion af tiden. Hver figur repræsenterer et kar, således at én kurve viser koncentrationen i jordvand udtaget vha. sugekopper, og en anden kurve viser koncentrationen i drænvandet fra karrene.

Der er for alle kar fremkommet et karakteristisk tidsforskuet forløb for de to kurver repræsenterende NO_3^- -N-koncentrationer i sugekop og dræn (undtaget i begyndelsen af perioden i kar nr.

20B, fig. 7). Først stiger NO_3^- -N-koncentrationen i jordvandet udtaget med sugekoppen, dernæst stiger NO_3^- -N-koncentrationen i drænvandet. Grunden til forskydningen er, at sugekop og dræn ikke befinder sig i samme dybde. En yderligere årsag til forskydningen kan være, at jorden i bunden af et lysimeterkar må være næsten vandmættet, før afdræning kan finde sted (41).

Forskydningen af de to kurver i forhold til hinanden er ikke konstant, da den afhænger af nedbørsforholdene. For kar nr. 18A-20A (hedeslette-sand) er koncentrationen i sugekopperne under de pågældende nedbørsforhold bedst korreleret med koncentrationen i drænvandet 6 uger senere ($R^2 = 0,52^{***}$). For kar nr. 17B-20B (moræne-sand) er koncentrationen i sugekopperne bedst korreleret med koncentrationen i drænvandet 5

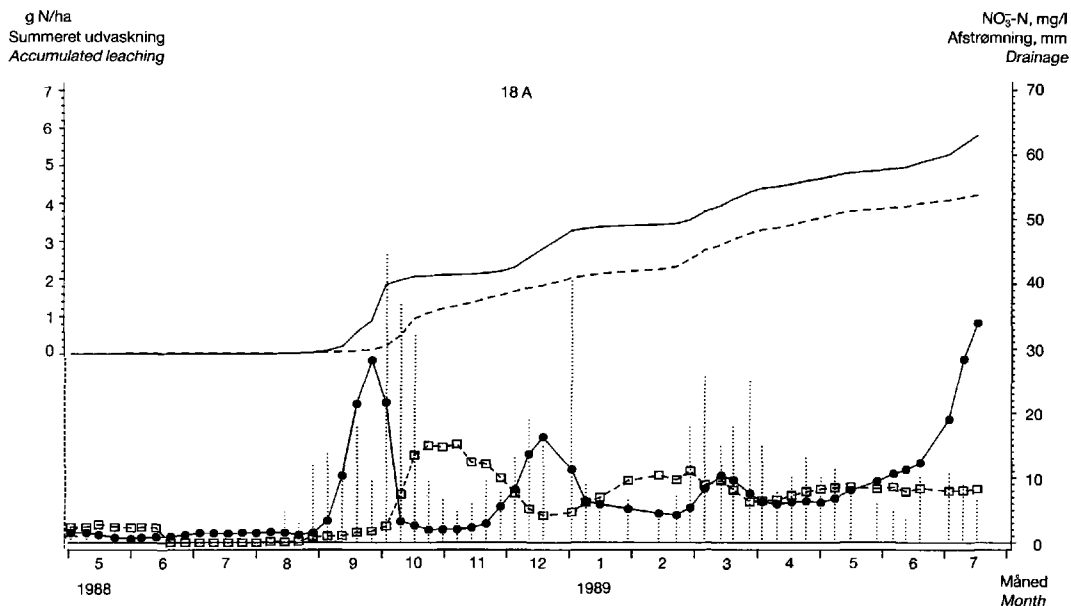


Fig. 1.

Fig. 1–7. NO_3^- -N-koncentration i jordvæske udtaget med sugecelle (120 cm's dybde) og i drænvand fra lysimeterkar (160 cm's dybde) samt summeret NO_3^- -N-udvaskning og periodisk afstrømning. Som NO_3^- -N-koncentrationen for sugekopper er benyttet gennemsnit af NO_3^- -N-koncentrationen den aktuelle måledato og den foregående måledato. Hver søjle angiver afstrømningen i perioden siden sidste måledato.

● Koncentration, sugekop; □ Koncentration, lysimeterdræn; ∴ Afstrømning; ✖ Interpoleret værdi; — Summeret udvaskning, sugekopper; --- Summeret udvaskning, lysimeterdræn.

NO_3^- -N concentration in soil water collected by a porous ceramic cup (120 cm depth) and in outflow from lysimeter tile drain (160 cm depth) plus accumulated nitrate-N leaching and periodic drainage. The NO_3^- -N concentration in the ceramic cup is average of the NO_3^- -N concentration a given date and the date for the preceding measurement. The drainage is indicated as drainage collected in the period since last collection.

● Concentration, ceramic cup; □ Concentration, lysimeter tile drain; ∴ Drainage; ✖ Interpolated value; — Accumulated leaching, ceramic cup; --- Accumulated leaching, lysimeter tile drain.

g N/ha
Sommeret udvaskning
Accumulated leaching

NO₃-N, mg/l
Afstrømning, mm
Drainage

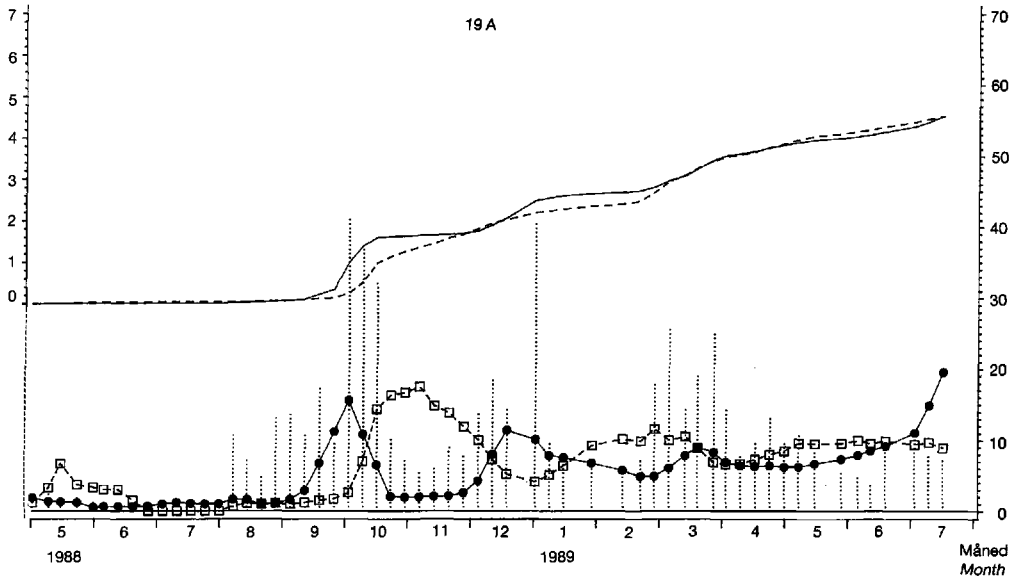


Fig. 2.

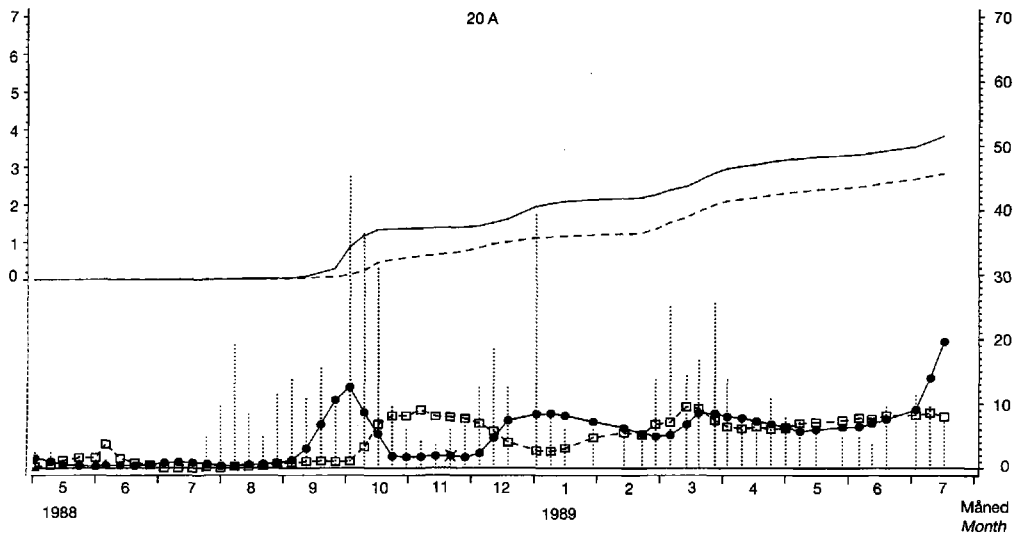


Fig. 3.

g N/ha
Summeret udvaskning
Accumulated leaching

NO₃-N, mg/l
Afstrømning, mm
Drainage

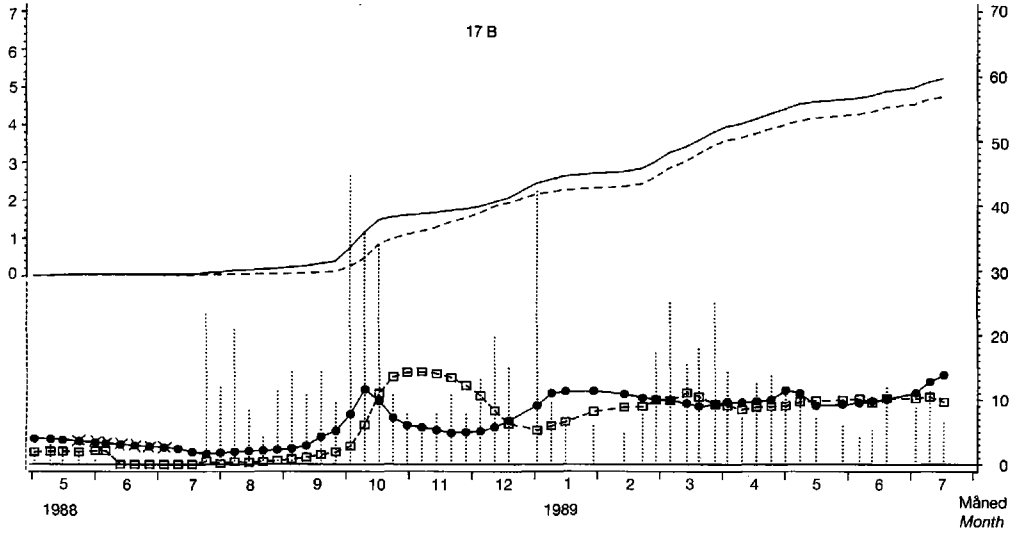


Fig. 4.

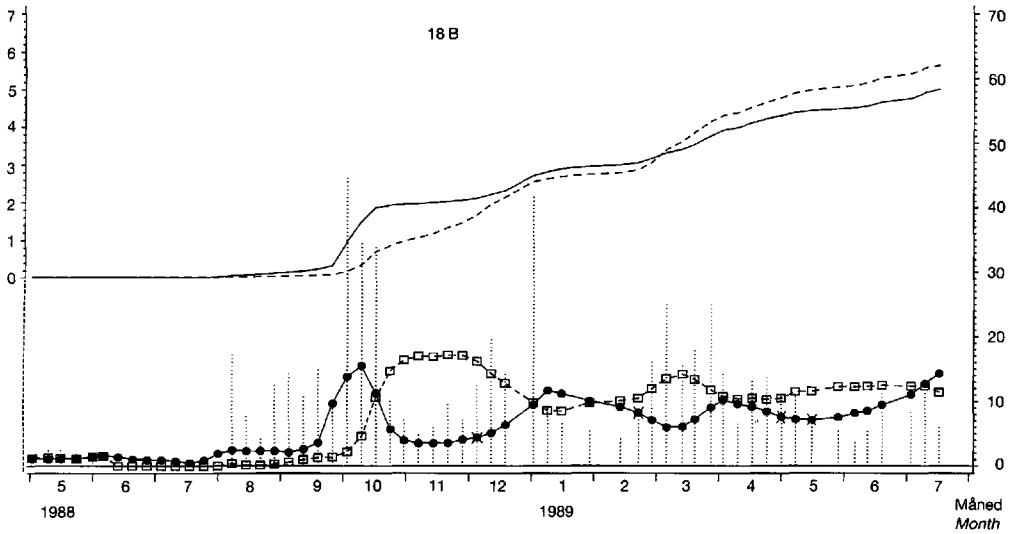


Fig. 5.

g N/ha
Summeret udvaskning
Accumulated leaching

NO₃-N, mg/l
Afstømning, mm
Drainage

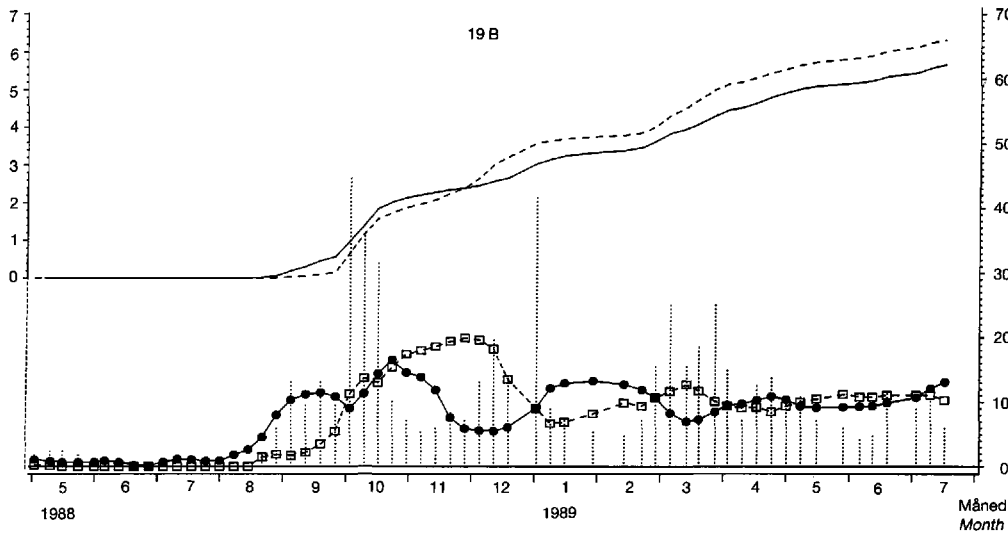


Fig. 6.

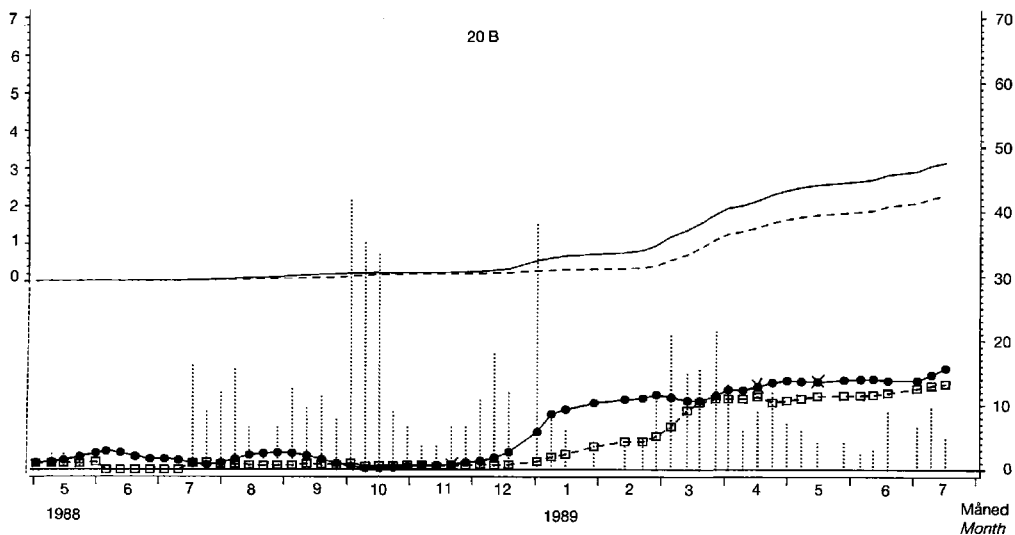


Fig. 7.

uger senere ($R^2 = 0,70^{***}$). Afstanden fra sugekop til lysimeterdræn er omtrent 0,4 m. I en undersøgelse foretaget af *Montgomery et al.* (22) fandt man på en lerblandet sandjord (loamy fine sand) en tidsforskydning på 2 måneder ved en afstand på 0,5 m mellem ekstraktorer og lysimeterdræn. Undersøgelsen blev foretaget med opsamlingslysimetre udstyret med vakuumrør (10) installeret i afstrømningslysimetre.

Udvaskning

I fig. 1–7 er yderligere afbildet den summerede $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning beregnet på grundlag af $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationerne dels i jordvand fra sugekopperne, dels i drænvand fra karrene. Ved begge beregningsmetoder er der som afstrømningsværdier benyttet afstrømning fra lysimeterdræn. Førømtalte tidsforskydning og ophobning af vand i bunden af lysimeterkarrene kan betyde, at afstrømningen fra 120 cm's dybde i et givet tidsrum ikke er lig med afstrømningen gennem lysimeterdræne i samme tidsrum. Det må formodes, at denne tidsforskydning er størst i perioder med små nedbørmængder, hvorfor betydningen heraf for udvaskningsberegningerne sandsynligvis er ringe.

For fire kar (fig. 2, 4, 5 og 7) ligger udvaskningen beregnet for sugekopper og lysimeterdræn på niveau. For to kar (fig. 1 og 3) – samt for visse af de øvrige kar – er der i perioder fremkommet stig-

ninger i udvaskningen beregnet for sugekopperne, som ikke afspejler sig fuldt ud i stigninger i udvaskningen beregnet for lysimeterdræne. Visse sugekopper har tilsyneladende mistet nogle lave koncentrationer. Som det fremgår af figurerne, er de pågældende perioder karakteriseret af stor afstrømning. En mulig årsag til forskellene kan være, at der har fundet makroporestrømning sted. Regnvand med en lav koncentration af $\text{NO}_3\text{-N}$ kan således være strømmet gennem makroporer.

Det kan ikke udelukkes, at der i perioder kan være foregået en hurtig vandtransport langs væggene i karrene. Der er dog ikke konstateret revnedannelse mellem lysimetervæg og jord.

For hvert enkelt kar er udvaskningen for hele perioden angivet i tabel 1.

En t-test viste, at det ikke kan forkastes, at totaludvaskningen beregnet på grundlag af $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen i jordvæske udtaget ved den benyttede sugekopmetode er lig med udvaskningen beregnet på grundlag af koncentrationen i afdræningsvandet fra lysimetrene ($P = 0,28$).

Diskussion

I betragtning af, at der kun indgår 7 kar i forsøget, er det uheldigt, at alle kar ikke er tilført samme gødningsmængde ved forsøgets start, samt at der indgår to forskellige jordtyper i forsøget. Det kan ikke udelukkes, at der kan være vekselvirkning

Tabel 1. $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning, g/kar, for perioden 02.05.88–17.07.89 beregnet på grundlag af jordvæske udtaget med sugekopper og på grundlag af opsamlet drænvand fra lysimeterkar. Ved begge beregningsmetoder er der som afstrømningsværdier benyttet afstrømning fra lysimeterdræn.

$\text{NO}_3\text{-N}$ leaching, g per lysimeter, 02.05.88–17.07.89, calculated on the basis of soil water collected by ceramic cups and on basis of outflow from lysimeter tile drains. For both methods leaching was calculated by means of drainage from the lysimeter tile drains.

Jordtype	Kar nr.	N-gødsning g N/kar	Sugecelle Ceramic cup	Lysimeterdræn Lysimeter tile drain	Differens Difference
Soil	Lysimeter no.	N-fertilizer g N/lysimeter	a	b	b-a
Hede- slette- sand	18A	18,0	5,8	4,2	-1,6
	19A	12,0	4,5	4,5	0,0
	20A	6,0	3,8	2,8	-1,0
Moræne- sand	17B	6,0	5,2	4,7	-0,5
	18B	12,0	5,0	5,6	0,6
	19B	18,0	5,7	6,3	0,6
	20B	0,0	3,2	2,3	-0,9
Gns., Average			4,7	4,3	

mellem metode, N-mængde og jordtype, og at disse vekselvirkninger kan udligne eventuelle forskelle mellem de to metoder ved en t-test. Resultatet af t-testen må derfor tolkes med forbehold.

I forsøget sammenlignes flux-gennemsnitlige koncentrationer (lysimeterdræn) med koncentrationer af ukendt type (sugekopper).

Djurhuus (9) har som tidligere omtalt foretaget en sammenligning af volumen-gennemsnitlige koncentrationer (jordprøver) og jordvæske udtaget med sugekopper. I undersøgelsen konkluderes det, at når jordvæske isoleres fra en grovsandet jord på et tidspunkt uden nævneværdig afstrømning, vil der ikke være signifikante forskelle mellem $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationerne i jordvæske isoleret henholdsvis vha. sugekopper og ved ekstraktion fra jordprøver. Under disse forhold afviger $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationerne i jordvæske isoleret med sugekopper således ikke signifikant fra de volumengennemsnitlige koncentrationer i jordprøverne. Undersøgelsen viser derimod ikke, om noget tilsvarende er tilfældet i perioder med afstrømning.

Ifølge *O. H. Jacobsen* (pers. medd.) tyder igangværende forsøg på, at der ved 5, 10 og 16 mm afstrømning pr. dag ikke er forskel på volumengennemsnitlige og flux-gennemsnitlige koncentrationer på grovsandet jord. Hvorvidt større afstrømningsmængder har indflydelse på forholdet, indgår ikke i forsøget.

I nærværende undersøgelse er afstrømningen hovedsagelig opgjort pr. uge. Det vides derfor ikke, om der i visse tilfælde er afstrømmet mere end 16 mm/dag.

Udenlandske forsøg

Montgomery et al. (22) placerede opsamlingslysimetre med vakuum (10) og keramiske sugekopper under markforhold på en sandblandet lerjord (sandy loam) 1,5 m under jordoverfladen. Opsamlingslysimetrene underestimerede afdræningen med 70 pct. over en femårig periode. (Afdræningen blev beregnet ud fra bl.a. neutronmålinger.) Til trods herfor var $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen gennem en toårig periode statistisk set den samme for de to metoder.

Barbee og Brown (1) har på lerblandet sandjord (loamy sand) sammenlignet keramiske sugekopper med en type opsamlingslysimetre uden vakuum. Det er ikke angivet, om vandmængden, der opsamles, er lig med den afstrømmende vandmængde. Forfatterne har forsøgt at forhindre van-

det i at løbe uden om lysimetrene, men det er formentlig ikke givet, at lysimetrene kun dræner jordsøjlen ovenover. Der kunne ikke konstateres signifikante forskelle mellem klordkoncentrationerne målt ved de to metoder.

I hver af ovennævnte undersøgelser er sammenlignet to metoder, der begge er behæftet med usikkerhed om, hvorvidt koncentrationsbestemmelserne er flux- eller volumengennemsnitlige (24).

Årsagen til, at *Montgomery et al.* (22) og *Barbee og Brown* (1) ikke kan konstatere signifikante forskelle på $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationerne, kan være, at metoderne tilfældigvis har opsamlet vand fra samme størrelse porer. Men det kan eventuelt også skyldes, at der på disse jordtyper måske ikke er forskel på de volumen- og flux-gennemsnitlige koncentrationer ved de givne afstrømningsmængder (jf. *O. H. Jacobsen* (pers. medd.) som før omtalt samt *Parker og Genuchten* (24)).

I et forsøg med intakte siltjordssøjler sammenlignede *Levin og Jackson* (20) keramiske sugekopper med afstrømningen fra søjlerne. Der blev fundet en signifikant større $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentration i drænet fra jordsøjlerne end fra sugekopperne. Det tyder ifølge forfatterne på, at der har fundet en frastødning (screening) af $\text{NO}_3\text{-N}$ sted ved sugekopperne, men det anføres, at yderligere undersøgelser er nødvendige.

Lysimeterforsøg – markforhold

Et par forhold vedrørende de benyttede lysimetre skal vurderes, før resultater herfra kan overføres til at gælde for markforhold. Først og fremmest er jorden ikke udtaget i naturlig lejring. Forstyrrelse af jorden kan både forårsage betydelige ændringer i vandbevægelse (4, 7) og stoftransport (21). Ændringerne er størst, hvis det drejer sig om en velstruktureret jord. Men ifølge *Montgomery* (22) kan også sandjorde med ringe struktur tilsyneladende være problematiske i så henseende. Sandjord, der som i nærværende forsøg har ligget i lysimeterkar i 13 år, formodes at have udviklet en struktur, der nærmer sig den naturlige.

Et andet forhold af betydning for resultatet er, om der er forekommet denitrifikation i bunden af karrerne. Der er ikke foretaget målinger, der kan afgøre, om det er tilfældet. Umiddelbart ser der ikke ud til at være foregået denitrifikation, idet man da kunne forvente, at koncentrationen i drænvandet konstant ville være lavere end i sugekopperne. Undersøgelser foretaget af *Montgomery et al.* (22) kunne ikke afsløre denitrifikation

i 2,3 m dybe kar med sandjord. Mangel på letomt sætteligt organisk stof i denne dybde kan være en forklaring på den manglende denitrifikation.

Med ovennævnte begrundelser findes det forsvaret at overføre resultatet af sammenligningen til sandjorde under markforhold.

Sandjord – lerjord

Shaffer et al. (30) har på en velstruktureret lerholdig siltjord foretaget en sammenligning mellem sugekopper og opsamlingslysimitre (modificeret udgave af *Duke* og *Haise* (10)). Det blev konkluderet, at sugekopper ikke er egnet til at opfange afstrømmende vand, når en meget strukturrig jord befinder sig under næsten vandmættede forhold. Forsøget viste, at 90 pct. af den totale afstrømning fandt sted gennem makroporer.

Barbee og *Brown* (1) fandt ligeledes, at sugekopper var ineffektive til opsamling af jordvæske i velstruktureret lerjord.

Det er sandsynligt, at problemet med makroporestrømning er større for lerjorde end for sandjorde. Alle de refererede undersøgelser med vandtransport gennem makroporer er udenlandske, og næsten alle er foretaget med velstruktureret jord (se side 53). Der savnes derfor undersøgelser over makroporestrømninger i danske jorde samt afprøvning af sugekopmetoden på mere lede jorde.

Russell og *Ewel* (27) sammenlignede sugekopper med opsamlingslysimitre (type: *Jordan* (19)) på en velstruktureret tropisk jord under to perioder med stor nedbør (326 mm den 7.–13. november 1981 og 222 mm den 22.–27. november 1981; højeste nedbørsintensitet: 21 mm/t). $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskningen bestemt vha. sugekopper var større end udvaskningen bestemt ved opsamlingslysimitre. Tilsyneladende opsamlede sugekopperne ikke det hurtigt strømmende vand i makroporerne. Ovennævnte undersøgelse samt de fleste undersøgelser angående makroporestrømning er foretaget under – for Danmark – unormale nedbørsforhold. Der savnes derfor undersøgelser over nedbørsintensitetens betydning for makroporestrømninger i danske jorde.

Konklusion

Ved sammenligning af $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationer i jordvæske udtaget vha. sugekopper og opsamlet som drænvand fra lysimitre viser resultaterne, at der er sammenhæng mellem de målte koncentrationsniveauer.

En statistisk test viser, at der ikke kan konstateres forskel på den totale $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskning beregnet på grundlag af $\text{NO}_3\text{-N}$ -koncentrationen i jordvæske udsuget ved den benyttede sugekopmetode og udvaskningen beregnet på grundlag af koncentrationen i afdræningsvandet fra lysimitrene. På grund af det relativt lille antal forsøgsheder og eventuelle vekselvirkninger mellem N -mængde, jordtype og metode skal dette resultat tolkes med forbehold. Undersøgelsen lader dog formode, at prøveudtagning med keramiske sugekopper efter nærværende metode er egnet til isolering af jordvæske for $\text{NO}_3\text{-N}$ -udvaskningsbestemmelser på sandjord, men der er behov for yderligere undersøgelser.

Litteratur

1. *Barbee, G. C. & Brown, K. W.* 1986. Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers. *Soil Sci.* 141, 149-154.
2. *Bennetzen, F.* 1978. Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 2. Teknik og metoder. *Tidsskr. Planteavl* 82, 173-189.
3. *Bennetzen, F.* 1978. Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 3. Modeller og resultater. *Tidsskr. Planteavl* 82, 191-220.
4. *Bergström, M. L.* 1987. Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.* 16, 11-18.
5. *Best, E. K.* 1976. An automated method for determining nitrate-nitrogen in soil extracts. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences* 33, 161-166.
6. *Beven, K. & Germann, P.* 1982. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resour. Res.* 18, 1311-1325.
7. *Cassel, D. K.; Krueger, T. H.; Schroer, F. W. & Norum, E. B.* 1974. Solute movement through disturbed and undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 36-40.
8. *De Smedt, F.; Wauters, F. & Sevilla, J.* 1986. Study of tracer movement through unsaturated sand. *Geoderma* 38, 223-236.
9. *Djurhuus, J.* 1990. Sammenligning af nitrat i jordvand udtaget med sugekopper og ekstraheret fra jordprøver. *Tidsskr. Planteavl* 95 (i tryk).
10. *Duke, H. R. & Haise, H. R.* 1973. Vacuum extractors to assess deep percolation losses and chemical constituents of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 963-964.
11. *El Bassam, N.* 1972. Aussagewert der chemischen Zusammensetzung einer durch Saugvorrichtung gewonnenen Bodenlösung. *Landbauforschung Völknerode* 22, 37-40.

12. *Gaudet, J. P.; Jégat, H.; Vachaud, G. & Wierenga, P. J.* 1977. Solute transfer, with exchange between mobile and stagnant water, through unsaturated sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 665-671.
13. *Germann, P. & Beven, K.* 1981. Water flow in soil macropores. I. An experimental approach. *J. Soil Sci.* 32, 1-13.
14. *Haines, B. L.; Waide, J. B. & Tood, R. L.* 1982. Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and zero-tension lysimeters: report of discrepancies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 658-661.
15. *Hansen, E. A. & Harris, A. R.* 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39, 528-536.
16. *Jacobsen, O. H.* 1989. Umættet hydraulisk ledningsevne i nogle danske jorde. Metode og jordtypekarakterisering. Statens Planteavlsvforsøg. Beretning nr. S 2030, 60 pp.
17. *Jarvis, N. J.; Leeds-Harrison, P. B. & Dosser, J. M.* 1987. The use of tension infiltrometers to assess routes and rates of infiltration in a clay soil. *J. Soil Sci.* 38, 633-640.
18. *Jensen, F.* 1982. Mineralstoffbortførsel fra græsdaekket jord i lysimeter efter tilførsel af mejerispildevand. *Tidsskr. Planteavl* 86, 193-204.
19. *Jordan, C. F.* 1968. A simple, tension-free lysimeter. *Soil Sci.* 105, 81-86.
20. *Levin, M. J. & Jackson, D. R.* 1977. A comparison of in situ extractors for sampling soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 535-536.
21. *McMahon, M. A. & Thomas, G. W.* 1974. Chloride and tritiated water flow in disturbed and undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 727-732.
22. *Montgomery, B. R.; Prunty, L. & Bauder, J. W.* 1987. Vacuum through extractors for measuring drainage and nitrate flux through sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 271-276.
23. *Omoti, U. & Wild, A.* 1979. Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching conditions: 2. Field Experiments. *Soil Sci.* 128, 98-104.
24. *Parker, J. C. & van Genuchten, M. T.* 1984. Flux-averaged concentrations in continuum approaches to solute transport. *Water Resour. Res.* 20, 866-872.
25. *Quisenberry, V. L. & Phillips, R. E.* 1976. Percolation of surface-applied water in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 484-489.
26. *Rasmussen, L.; Jørgensen, P. & Kruse, S.* 1986. Soil water samplers in ion balance studies on acidic forest soils. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* 36, 563-570.
27. *Russell, A. E. & Ewel, J. J.* 1985. Leaching from a tropical adept during big storms: A comparison of three methods. *Soil Sci.* 139, 181-189.
28. *Scheffer, F. P. & Schachtschabel, P.* 1979. Lehrbuch der Bodenkunde. 10. udg., 394 pp. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
29. *Seyfried, M. S. & Rao, P. S. C.* 1987. Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: Preferential flow effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1434-1444.
30. *Shaffer, K. A.; Fritton, D. D. & Baker, D. E.* 1979. Drainage water sampling in a wet, dual-pore soil system. *J. Environ. Qual.* 8, 241-246.
31. *Shuford, J. W.; Fritton, D. D. & Baker, D. E.* 1977. Nitrate-nitrogen and chloride movement through undisturbed field soil. *J. Environ. Qual.* 6, 255-259.
32. *Simmelsgaard, S. E.* 1985. Vandbalance og kvælstofudvaskning på 4 jordtyper. III. Kvælstofkoncentration, -udvaskning og -balance. *Tidsskr. Planteavl* 89, 101-154.
33. *Smih, S. J.* 1972. Relative rate of chloride movement in leaching of surface soils. *Soil Sci.* 114, 259-263.
34. *Søegaard, K.* 1986. Deling af kvælstofgødning til vandet byg. Statens Planteavlsvforsøg. Beretning nr. S 1859, 110 pp.
35. *Søegaard, K.* 1987. N-optagelse, N-balance og N-tyring ved deling af kvælstofgødning til vandet byg. *Tidsskr. Planteavl* 91, 133-144.
36. *Thomas, G. W. & Phillips, R. E.* 1979. Consequences of water movement in macropores. *J. Environ. Qual.* 8, 149-152.
37. *Thomas, G. W. & Swoboda, A. R.* 1970. Anion exclusion effects on chloride movement in soils. *Soil Sci.* 110, 163-166.
38. *Tyler, D. D. & Thomas, G. W.* 1977. Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under conventional and no-tillage corn. *J. Environ. Qual.* 6, 63-66.
39. *Tyler, D. D. & Thomas, G. W.* 1981. Chloride movement in undisturbed soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 459-461.
40. *Wagner, G. H.* 1962. Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. *Soil Sci.* 94, 379-386.
41. *Wallihan, E. F.* 1940. An improvement in lysimeter design. *J. Am. Soc. Agron.* 32, 395-404.
42. *Wierenga, P. J. & van Genuchten, M. T.* 1989. Solute transport through small and large unsaturated soil columns. *Ground Water* 27, 35-42.
43. *Wild, A. & Babiker, I. A.* 1976. The asymmetric leaching pattern of nitrate and chloride in a loamy sand under field conditions. *J. Soil Sci.* 27, 460-466.

Manuskript modtaget den 27. november 1990.