

# Transport af vand og pesticider i opsprækket moræneler

Af Peter Gravesen, Knud Erik S. Klint, Ole Stig Jacobsen, William G. Harrar, Gitte Felding, Peter Jørgensen, Inge Fomsgaard og Niels H. Spliid

Undersøgelser af transport af vand og pesticider gennem den umættede zone i moræneler fra jordoverfladen til grundvandsspejlet har stor betydning for vurdering af morænelers beskyttende egenskaber overfor forurening af grundvandet. Det er kendt fra undersøgelser i Danmark og udlandet, at moræneler indeholder større hulrum i form af sprækker, ormegange og rodgange (kaldet makroporer), som har betydning for transportforholdene. I Danmark er der i moræneler fundet forureningsholdige sprækker, som når mere end 9 m ned under jordoverfladen.

Dansk moræneler indeholder mindst 12-14 % ler samt et varierende indhold af silt, sand, grus, sten og blokke. Porer i moræneler findes dels som mikroporer i hele jordartens finkornede grundmasse (matrix), dels som makroporer. Transport i matrix i den umættede zone over grundvandsspejlet foregår relativt langsomt, mens forsøg viser, at transport i makroporerne kan foregå overordentligt hurtigt, f.eks. under voldsomme regnskyl.

For at bidrage til at udrede de komplicerede strømningsforhold i moræneler over grundvandsspejlet, og for at skaffe indblik i den transport af pesticider, der eventuelt foregår, er der foretaget undersøgelser på to lokaliteter på Sjælland: Flakkebjerg og Havdrup.

## Flakkebjerg

Ved Flakkebjerg var formålet at undersøge transport til 3,5 m dybde gennem dyrket pløjelag og moræneler. For at skaffe grundlag for det videre arbejde med transportforholdene blev der udviklet en metodik til karakterisering og kvantificering af makroporerne. Ved Flakkebjerg opmålte sprækker og andre makroporer til 5,5 m dybde i to 9 x 13 m store udgravninger. Makroporedata er sammenstillet med oplysninger om morænelerets geokemi og sammensætning til en makro-

poremodel (Fig. 1). Modellen demonstrerer en opdeling i tre zoner med lodrette fryse/tø-sprækker, ormegange og rodgange ned til ca. 2 m under terrænet, lodrette og vandrette glaciale sprækker fra 2 til 4,5 m og nederst store lodrette sprækker, som antages at forsette ned til et sandlag 12 m under jordoverfladen.

## Vandstrømning ved pumpe- og sporstofforsøg

For yderligere at bidrage til forståelsen af vandstrømning gennem moræneleret blev der etableret en række borer og på Flakkebjerg-lokaliteten. Pumpeforsøg viser, at den samlede vandledningsevne (hydrauliske ledningsevne) falder markant med dybden fra  $10^{-5}$  m/s indenfor de øverste 3 m til  $10^{-9}$  m/s under 4,5 m dybde. Resultaterne indikerer, at moræneleret er opsprækket helt fra jordoverfladen ned til sandlaget, og at ændringen i den samlede

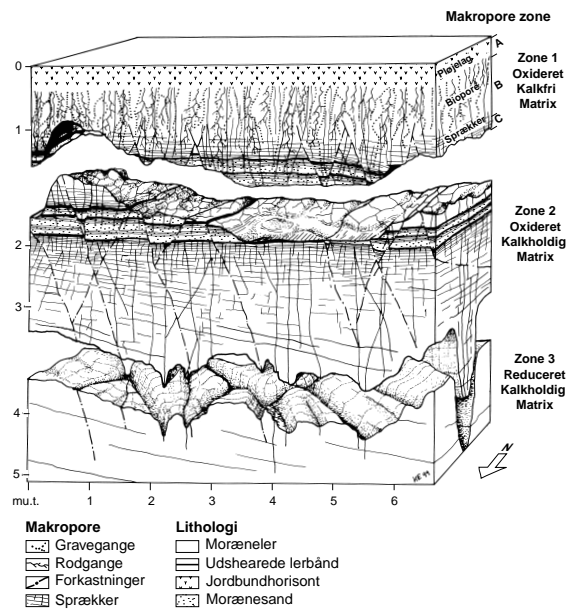


Fig. 1. Makroporemodel for jordbund og moræneler fra Flakkebjerg: Zone 1 (1-2 m tyk) består af jordbund og iltet, forvitret moræneler, som indeholder ormegange, rodgange, lodrette sprækker (dannet ved fryse/tø-processer) og vandrette sprækker. Zone 2 (1,5-3 m tyk) består af iltet moræneler med vandrette og lodrette sprækker dannet ved fryse/tø-virksomhed eller ved påvirkninger som skyldes gletscheris. Zone 3 (6-8 m tyk) består af reduceret moræneler med sprækker dannet ved isens påvirkning. (Efter Klint & Gravesen, 1999 i Nordic Hydrology vol. 30).

hydrauliske ledningsevne skyldes større afstand mellem sprækkerne med dybden.

Vandtransporten i moræneleret er undersøgt med bromidsporstof omkring en specialindrettet boring. Bromid blev påført i et lille udgravet 2 x 2 m bassin, og den vandrette og lodrette transport blev overvåget over 2 år. Resultaterne viste, at en stor bromidholdig vandmængde bevægede sig nedad med ca. 1 m/år. Horisontalt gik transporten hurtigere med 10 m/år i den øverste zone og 5 m/år i den mellemste zone. Små koncentrationer af bromid blev allerede observeret den første forsøgsdag i 7,25 m dybde indikerende en meget hurtig sprække-transport nedad. Grundvandsstanden varierer med årstiden som resultat af nettonedbør og regnvejrshændelser med høj intensitet. Pumpe- og sporstof-forsøgene viser, at de vandrette og lodrette transporthastigheder opnår maksimumsværdier i løbet af vinteren, hvor grundvandsspejlet ligger nær terræn (0,5 til 1,0 m dybde). Disse forhold indikeres også af markforsøgene. I løbet af sommeren synker vandspejlet til mellem 3 og 4,5 m dybde, og både vandrette og lodrette transport-hastigheder antager minimumsværdier.

### **Transportforsøg til 3,5 m dybde under almindelige markforhold**

Omkring de to udgravninger på Flakkebjerg blev udlagt otte forsøgsflader med intakt muldlag over moræneleret. I december 1998 udvandedes med bromid. Vandprøver fra prøvetagere placeret i 1,2, 2,5 og 3,5 m dybde under forsøgsfladerne blev derefter analyseret for uorganisk kemi og bromid samt aldersbestemt. Nedbørsmængden var i 1999 stor, og grundvandsspejlet stod aldrig lavere end 1,2 m under terræn. Trods den store nedsivning blev der ikke før i april 1999 målt en stigning i bromidindholdet i 1,2 m dybde i tre prøvetagere, mens der ved afslutningen af måleperioden i december 1999 kun var én prøvetager i 2,5 m, der viste en let forhøjet bromidværdi. Sammenligner man med aldersbestemmelserne er der en overensstemmelse hermed, idet vandet i 2,5 m er fra 10 til 15 år gammelt i gennemsnit.

### **Isoproturon og glyphosat under almindelige markforhold**

På forsøgsfladerne udførtes nedvaskningsforsøg med tre forskellige pesticider under markforhold. I september 1998 blev der sprøjtet med glyphosat mod ukrudt i stubmark. Herefter blev der sået vinterhvede, og i december 1998 blev der behandlet med pendimethalin og isoproturon.

Gennem 1999 blev der udtaget prøver til analyse for de tre pesticider fra alle prøvetagere. I perioden frem til august 1999 var der kun seks tilfælde af målelige mængder af isoproturon og dets nedbrydningsprodukter. I august måned optræder isoproturon i næsten alle de øverste prøvetagere, og specielt et nedbrydningsprodukt findes i en række prøvetagere, som samler vand fra matrix, men i oktober synes koncentrationerne at dale. Dette tyder på et kompliceret udvasknings- og nedbrydningsforløb, hvor isoproturon ikke udvaskes særlig hurtigt, og hvor nedbrydningsprodukterne optræder i jorden op til 9 måneder efter sprøjtning og i koncentrationer over grænseværdien for drikkevand.

For glyphosat viser der sig samme tidsmæssige forløb, idet glyphosat findes i de øverste prøvetagningsfiltre op til et år efter udsprøjtningen og sammen med nedbrydningsproduktet AMPA. Koncentrationerne af glyphosat er dog i alle tilfælde mindre end grænseværdien.

### **Isoproturon transport i lysimeterforsøg**

Der blev udtaget to 1,1 m tykke uforstyrrede morænelersjordsøjler til lysimeterforsøg. Et lysimeter er en dobbelt beholder af rustfrit stål, hvori jordsøjlerne bliver placeret. Gennem bunden opsamles det vand, som har bevæget sig gennem jordsøjlen.

Jordbunden blev i to år behandlet efter almindelig landbrugspraksis som den omliggende jord, og der blev sprøjtet med bromid og isoproturon i oktober 1997. Den udsprøjtede mængde isoproturon var radioaktiv mærket ( $^{14}\text{C}$ -isoproturon), idet udvaskningen af  $^{14}\text{C}$ , der stammede fra isoproturon, dermed løbende kunne følges.

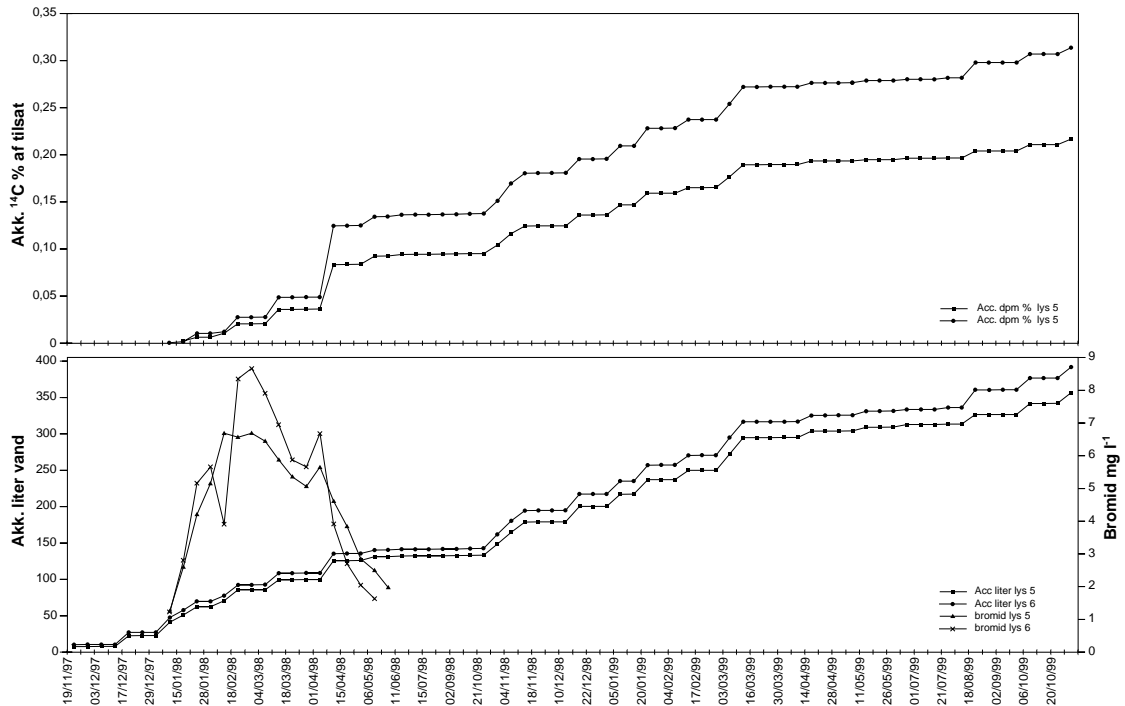


Fig. 2. Lysimeterforsøg med jordbund og moræneler fra Flakkebjerg. De nederste kurver viser udvaskning af vand og bromid fra to lysimetre (lys 5 og lys 6). De øverste kurver viser det gennemvaskede  $^{14}\text{C}$  fra  $^{14}\text{C}$ -Isoproturon (tilsat mængde 63,5 mg).

Resultaterne fra udvaskningen af  $^{14}\text{C}$  og den udvaskede vandmængde ses i Fig. 2. Forekomsten af bromid i udvaskningsvandet allerede efter en udvaskning på kun 50 liter tyder på, at der har været makroporestrømning i lysimetrene. Udvasningen af  $^{14}\text{C}$  følger nøje udvasningen af vandet, idet de største mængder udvaskes om vinteren, mens der stort set ikke udvaskes noget om sommeren. Den akkumulerede mængde  $^{14}\text{C}$  kan være isoproturon, nedbrydningsprodukter af isoproturon samt  $^{14}\text{CO}_2$ , såfremt isoproturon er totalt mineraliseret. Der kan desuden være tale om  $^{14}\text{C}$  indbygget i opløste humussyrer eller bundet til kolloide partikler. Kemiske analyser blev udført af alle de vandprøver, hvor radioaktivitetsmængden svarede til eller lå over detektionsgrænsen for isoproturon eller dets nedbrydningsprodukter. Analyserne viste, at der kun blev udvasket mindre mængder af isoproturon og nedbrydningsprodukterne, idet der i to prøver fandtes indhold af et nedbrydningsprodukt på henholdsvis  $0,03 \mu\text{g l}^{-1}$  og  $0,02 \mu\text{g l}^{-1}$ , mens der i én prøve fandtes et indhold af isoproturon på  $0,02 \mu\text{g l}^{-1}$ .

### Observationer fra Flakkebjerg

Såvel markforsøgene, lysimeterforsøgene som pumpeforsøgene fra Flakkebjerg viser sammensatte strømningsforhold i moræneler med makroporestrømning i både vandret og lodret retning. Med høj grundvandsstand er den horisontale transport dominerende, men meget store hastigheder i lodret retning er registreret gennem dybe sprækker. Transporthastighederne, der er målt i forsøgene, afhænger af, om der er tale om almindelige markforhold eller om overjorden er fjernet.

Der er påvist nedvaskning af isoproturon (over grænseværdien) og glyphosat (under grænseværdien) gennem de øverste 1,2 m til det øverste grundvand som følge af makroporestrømning. Der er målt opholdstider på op mod et år for pesticiderne eller deres nedbrydningsprodukter.

### Havdrup

Ved Havdrup var formålet at undersøge transporten gennem dybe sprækker i moræneler. Der blev her etableret to  $40 \text{ m}^2$  store forsøgsfelter, hvor de øverste 3 m bestående af muld og moræneler blev afgraved.

### Sporstofforsøg i dybe sprækker fra 3 til 5 m under terræn

Transport af stof gennem moræneler blev undersøgt ved at infiltrere bromid og farvesporstof, og samtidig måle strømmingen gennem felterne. Transporttiden målt som den tid der gik fra sporstoftilsætningen til stofferne blev målt i monitoringsboringerne cirka 2 m under forsøgsfeltet. Ved naturlig strømningshastighed og -retning skete der gennembrud af sporstofferne efter nogle få dage. Gennembruddet var ujævnt fordelt i forsøgsfelterne. I enkelte af borerne nåede den maximale gennembrudskoncentration cirka 30% af den tilsatte koncentration.

Ud fra fordelingen af farvesporstof kunne det konstateres, at strømmingen var foregået i snævre vertikale kanaler, der konsekvent følger de primære sprækker. Kanalerne omfattede ca. 10% af den samlede vandrette sprækkelængde, og strømmingen i kanalerne udgjorde ca. 95% af den samlede lodrette strømning gennem moræneleret. Under naturlige forhold vil middelstrømningshastighederne i kanalerne være ca. 100-300 m/dag, men hastighederne vil lokalt kunne komme op på flere km/dag (målt med søjleforsøg). Ved Havdrup kunne kanalerne via farvesporstoffet følges ned til et sandlag ca. 5 m under terræn. Der er påvist tilsvarende kanaler i sprækkerne ved Flakkebjerg og på andre danske morænelers lokaliteter ned til mindst 6 m dybde. Ud fra kanalerne form vurderes det, at trærodde spiller en væsentlig rolle for deres dannelse.

### Transport af mechlorprop (MCP) og metsulfuron ved feltforsøg

Gennembrudskurverne for pesticiderne MCPP og metsulfuron viser samme hurtige ankomst som for bromid ved Havdrup (Fig. 3). De normaliserede koncentrationer for pesticiderne er 10-90% af værdierne for bromid. Boringerne med høje pesticid- og bromid-koncentrationer er sammenfaldende og kan via farvesporstoffet korreleres til sprækkekanalerne, der som tidligere nævnt leder ca. 95% af den lodrette strømning i moræneleret. Udover transporten i sprækkekanalerne er der

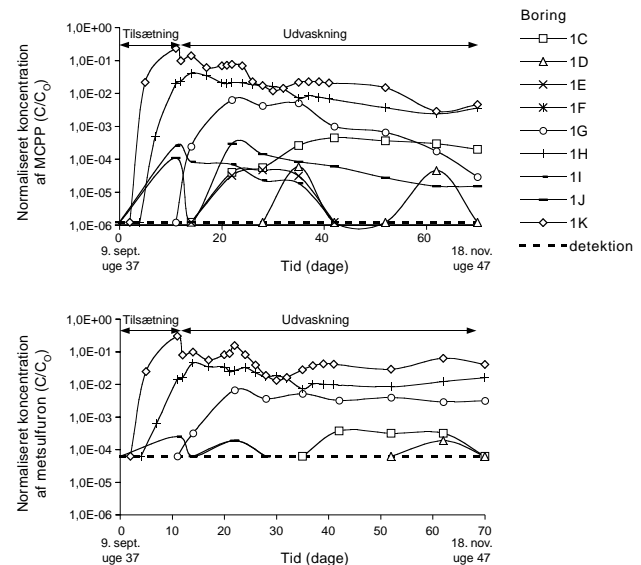


Fig. 3. Gennembrud af metsulfuron og MCPP i borerne ved sprækkestransport i dybe sprækker ved Havdrup ved et 70 dages forsøg.

også målt svage pesticid-gennembrud fra nogle af sprækkerne uden kanaler. I disse sprækker er der imidlertid hverken målt bromid eller farvesporstof. Den primære årsag hertil er formentlig, at detektionsgrænsen for pesticiderne er flere størrelsesordere lavere end for bromid og farvesporstof, som dermed må forventes at have været tilstede i mængder under deres respektive detektionsgrænser. De høje gennembrudskoncentrationer indikerer, at der indenfor forsøgets tidsramme ikke er sket væsentlig nedbrydning eller sorption af pesticiderne.

### Observationer fra Havdrup

Ved Havdrup, hvor de øverste 3 m af pløjelag og moræneler var fjernet, er der ved makroporestrømmingen i de dybe sprækker målt høje hastigheder og hurtige gennembrud af MCPP og metsulfuron til et underliggende sandlag. Transporten sker i kanaler, der formodes at være forårsaget af trærodde. Kanalerne følger de primære sprækker, og 95 % af den lodrette transport antages at foregå i kanalerne.