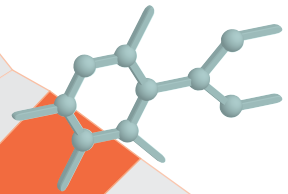
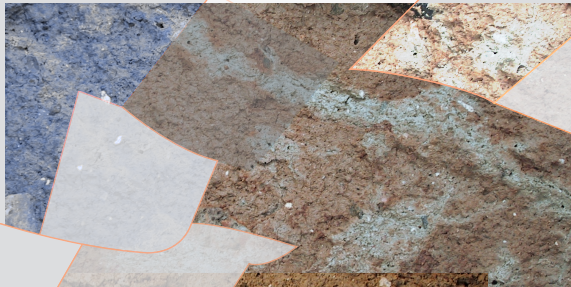
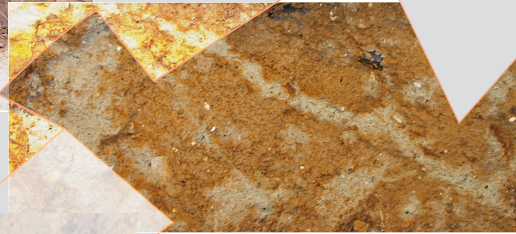


Afprøvning af undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af et zoneringskoncept for danske lerjorde: Statusrapport

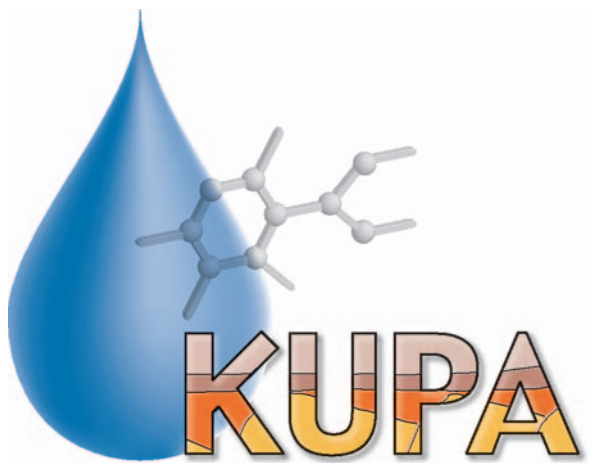


Redaktion: Vibeke Ernstsén
Omslag: Kristian Rasmussen
Forsidefotos: Vibeke Ernstsén
Oplag: 100
Udgivelsesår: 2004

ISBN 87-7871-142-8

© Miljøministeriet
Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, GEUS
Øster Voldgade 10,
DK-1350 København K
Telefon: 38 14 20 00
Telefax: 38 14 20 50
E-post: geus@geus.dk
Internet: www.geus.dk

**Afprøvning af undersøgelsesmetoder med henblik på
etablering af et zoneringskoncept for danske lerjorde:
Statusrapport**



Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Miljøministeriet

Danmarks JordbrugsForskning
Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri



Indhold

Forord

Sammendrag	6
Feltlokaliteter	6
Pedologiske og geologiske forhold på feltlokaliteterne	6
Resultater vedrørende de hydrauliske forhold i moræneler	11
Resultater vedrørende mineralisering af pesticider i moræneler.....	17
Resultater vedrørende sorption af pesticider i moræneler	20
Konklusion	25

Bilag 1. Undersøgelse af de pedologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør af *Søren Torp (DJF)*

Bilag 2. Undersøgelse af de geologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør af *Knud Erik S. Klint (GEUS)*

Bilag 3. Geologisk variabilitet bestemt ved cone penetration testing (CPT) af *Bertel Nilsson (GEUS)* og *Ditte Lykkesborg Petersen (Geologisk Institut, Københavns Universitet)*

Bilag 4. Geofysiske undersøgelser ved Højstrup, Mammen og Grundfør af *Ingelise Møller (GEUS)* og *Mogens H. Greve (DJF)*

Bilag 5. Hydrauliske undersøgelser – laboratorieforsøg af *Bo Vangsø Iversen (DJF)* og *Ole Hørbye Jacobsen (DJF)*

Bilag 6. Transient infiltration (flux) og sprækketransmissivitet for moræneler af *William G. Harrar (GEUS)*

Bilag 7. Flouriserende tracere til kortlægning af hydrauliske aktive strømningsveje i moræneler ved Gjorslev af *Annette Rosenbom (GEUS)*

Bilag 8. Tracerforsøg med Sulforhodamin B og bromid til kortlægning af hydraulisk aktive strømningsveje af *Ole Hørbye Jacobsen (DJF)* og *Bo Vangsø Iversen (DJF)*

Bilag 9. Udvekslingskoefficienter mellem makroporer og jordmatrix af *Hubert de Jonge (DJF)*, *Ole Hørbye Jacobsen (DJF)* og *Bo Vangsø Iversen (DJF)*

Bilag 10. Naturlig dræning og grundvandsdannelse af *Bjarne Hansen (DJF)*, *Svend Elsnab Olesen (DJF)* og *Vibeke Ernsten (GEUS)*

Bilag 11. Geologi, geokemi, mineralogi og sorption af pesticider i unge lerholdige sedimenter af *Vibeke Ernsten (GEUS)* og *Per Rosenberg (GEUS)*

Bilag 12. Undersøgelse af mikrobiologi samt mineralisering og sorption af pesticider i et lerjordsprofil ved Højstrup, Stevns af *Ole Stig Jacobsen (GEUS)*, *Lars Elsgaard (DJF)* og *Finn Pilgaard Vinther (DJF)*

Forord

I forbindelse med gennemførelsen af Vandmiljøplan II og Drikkevandsudvalgets betænkning fra 1997 fik amterne ved L 56 26/6 1998 om ændring af lov om vandforsyning m.v., samt lov om miljøbeskyttelse og lov om planlægning, til opgave at udpege de områder, som er særligt følsomme for bestemte typer af forurening samt at prioritere den indsats, der skal gennemføres i disse områder for at beskytte vandressourcen. Dette skal ske på baggrund af en detailkortlægning, som amterne skal gennemføre.

I Drikkevandsudvalgets betænkning blev det vurderet, at der ikke forelå et tilstrækkeligt videngrundlag til at gennemføre en sådan kortlægning, og at arbejdet med at udarbejde en vejledning om kortlægningen baseret på faglige, geologiske kriterier skulle gives høj prioritet.

På denne baggrund søgte og fik Miljø- og Energiministeriet, 22. februar 2000, Finansudvalgets tilslutning til at disponere midler i årene 2000-2003 til at etablere det nødvendige videngrundlag vedrørende risikoen for udvaskning af pesticider på sandede jorde og muligheden for at zonere på dette grundlag, samt til at afklare om det metodisk vil være muligt at etablere et analogt videngrundlag og kortlægningsmulighed for lerjorde.

Opgaven med at etablere dette videngrundlag blev givet til Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) og Dansk JordbrugsForskning (DJF) i fællesskab.

Nærværende rapport beskriver de undersøgelser der blev iværksat samt de resultater der følgende foreligger for en vurdering af mulighederne for en fremtidig zonering af lerjorde.

De gennemførte undersøgelser fokusere på de parametre, der anses af største betydning for en beskrivelse og kortlægning af pesticiders skæbne når det bevæger sig fra jordoverfladen og ned til et dybereliggende grundvandsmagasin. Undersøgelserne blev planlagt til at tilvejebringe oplysninger om mineralisering, sorption og transportmæssige forhold i lerlaget, fra overfladen og ned til grundvandsmagasinet.

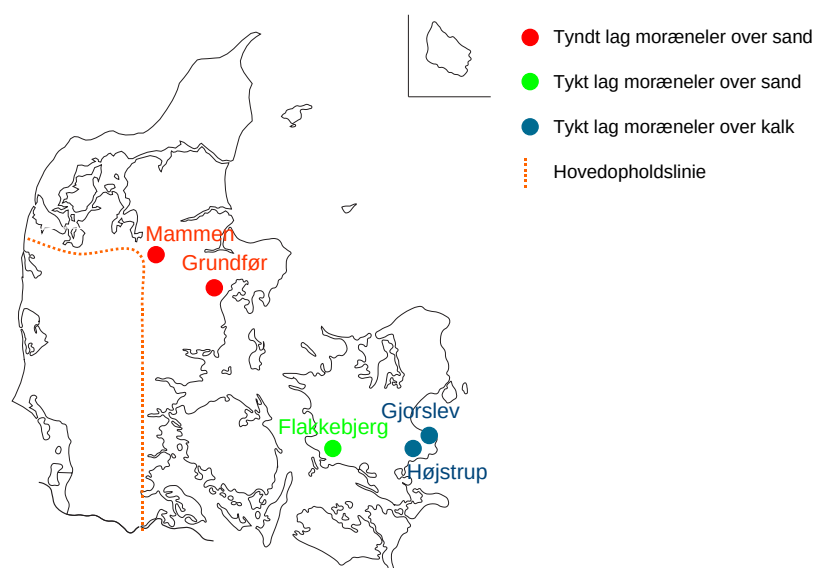
Efter sammendraget, hvori hovedresultaterne sammenstilles med henblik på en vurdering af de fremtidige muligheder for en zonering, følger 12 bilag med en udførlig beskrivelse af de enkelte delundersøgelser og deres resultater. Således beskrives i bilag 1 de pedologiske (jordbundsmæssige) undersøgelser, bilag 2, 3, 4 og 11 geologiske aspekter, inkl. områdernes geologiske opbygning, udbredelse af makroporer og geologisk variabilitet, bilag 5-10 undersøgelser af lerjordes hydrauliske og hydrologiske egenskaber, bilag 11 undersøgelser af lers geokemiske og mineralogiske egenskaber i relation til sorption af pesticider og bilag 12 undersøgelser af jordbundens mikrobiologiske forhold i relation til mineralisering og sorption af pesticider.

Sammendrag

Feltlokaliteter

Til brug for de planlagte undersøgelser blev fire feltlokaliteter valgt ud med henblik på forskellige undersøgelser. De to sjællandske lokaliteter, der er placeret ved henholdsvis Gjorslev og Højstrup på Stevns er karakteriseret ved forholdsvis tykke (ca. 10 meter) lag af moræneler over kalk, mens de to jyske lokaliteter ved Mammen og Grundfør, er karakteriseret ved forholdsvis tynde (< 5 meter) lag af moræneler over sand.

Ud over de fire lokaliteter er der anvendt måleresultater fra udstyr, der allerede var etableret ved Flakkebjerg, syd for Slagelse, i forbindelse med udviklingen og verifikationen af en metode til beskrivelse af morænelers hydrauliske egenskaber. Ved Flakkebjerg er morænelerslaget omkring 12 meter tykt og ligger her oven på et sekundært grundvandsmagasin bestående af smeltevandssand.



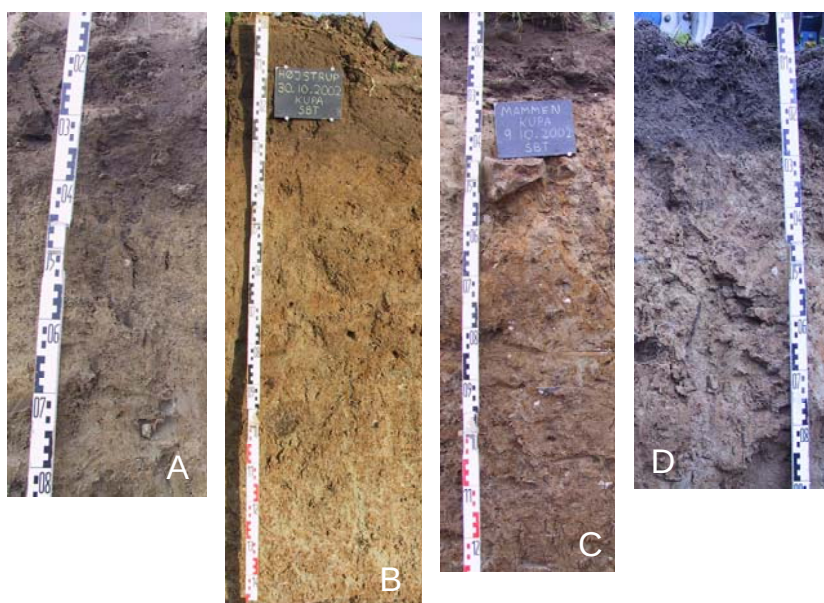
Figur 1. Feltundersøgelserne er gennemført på 5 lokaliteter, Mammen, Grundfør, Flakkebjerg, Gjorslev og Højstrup.

Pedologiske og geologiske forhold på feltlokaliteterne

Pedologiske forhold

Ved Gjorslev og Højstrup er jordbundsdannelsen domineret af tre hovedprocesser; kalkudvaskning, forbruning og landbrugsmæssig praksis ved tilførsel af kalk. Jordene her klassificeres efter det danske klassifikationssystem som Typibrunjorde, som følge af tilstedeværelse af en forbrunet horisont (Bv-horisont), der får sin farve fra bl.a. jernoxider der beindes

i metal-organiske komplekser med humusstoffer, figur 2. Denne horisont har nogenlunde samme udbredelse på de to lokaliteter og findes typisk udbredt i dybden 26 cm til 85 cm hvorefter C-horisonten følger. Det øverste lag ned til dybder fra 80 til 170 cm fremstår i dag kalkfrie og med lavere pH-værdier end de efterfølgende kalkrige horisonter. Hyppig tilførsel af kalk i forbindelse med opdyrkningen af arealet indebærer dog forhøjede pH-værdier i de overfladenære horisonter. Sammensætningen af baser betyder at basemætningen er målt til minimum 90%. Samtidig med dannelsen af kalkfrie forhold i de øverste jordlag på de to lokaliteter iagttages en begyndende mobilisering af kolloide partikler og dermed dannelsen af en lerberiget horisont (den såkaldte Bt-horisont). Ved Højstrup begynder de for pseudogleyen karakteristiske farvemønstre i Bv-horisonten og fortsætter ned i C-horisonten til bunden af profilet i 150 cm dybde. Ved Gjorslev findes farvemønstrene dybere og findes her beskrevet fra 115 og ned til bunden af profilet i 180 cm.



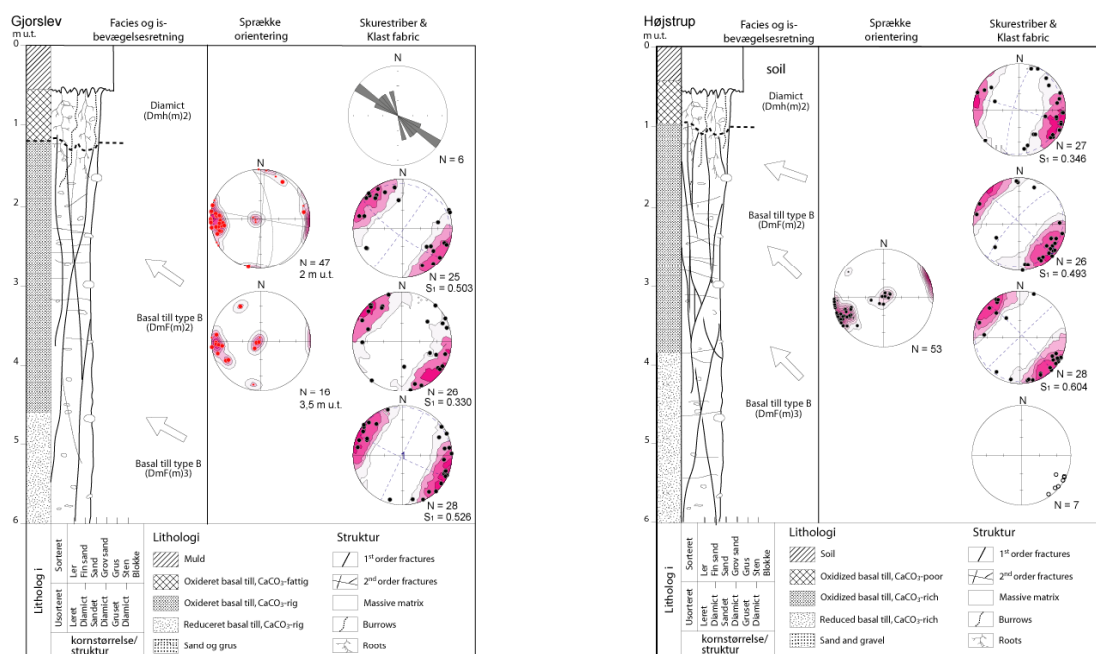
Figur 2. Jordbundsprofiler fra Gjorslev (A), Højstrup (B), Mammen (C) og Grundfør (D). Jordtypen på lokaliteterne er efter det danske klassifikationssystem bestemt til kalkholdig pseudogleyet Typibrunjord ved Gjorslev, pseudogleyet Typibrunjord ved Højstrup, pseudogleyet Typilessive ved Mammen og pseudogleyet Degralessive ved Grundfør. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 1.

Ved Mammen er jordbundsudviklingen i lerlaget mere fremskreden end ved Gjorslev og Højstrup. Placeringen tæt på hovedopholdslinien bevirker at de jordbundsdannende processer har virket gennem længere tid. Hertil kommer en formodentlig lavere naturlig bufferkapacitet (bl.a. kalk) samt en øget vandgennemstrømning gennem lerlaget sammenlignet med de sjællandske lokaliteter. Jordbunden her er klassificeret som en Typilessive, der foruden kalkudvaskning og forbruning også indebærer en lernedvaskning og dannelse af en veludviklet lerberiget Bt-horisont, figur 2. Udvasningen af kalk og forholdvis lave pH-værdier virker fremmede for denne proces. Desuden findes i dybden 27 cm til 65 cm en veludviklet hård horisont (en fragipan), der er fremkommet som følge af processer i forbindelse med frost-tø og fugt-udtørring under sidste del af istiden.

Ved Grundfør er jordbundsudviklingen ligeledes mere fremskreden end for de sjællandske lokaliteter og minder mere om den der allerede er beskrevet for Mammen. Jorden er klassificeret som en Degralessive med en usammenhængende fragipandannelse i dybdeintervallet fra 50 cm til 100 cm og en begyndende nedbrydning af den lerholdige horisont (beskrevet ved benævnelsen glossic), figur 2. Desuden viser farvemønstrene at lokaliteten er præget af pseudogley i dybden fra 40 cm og ned til bunden af profilen, svarende til 150 cm.

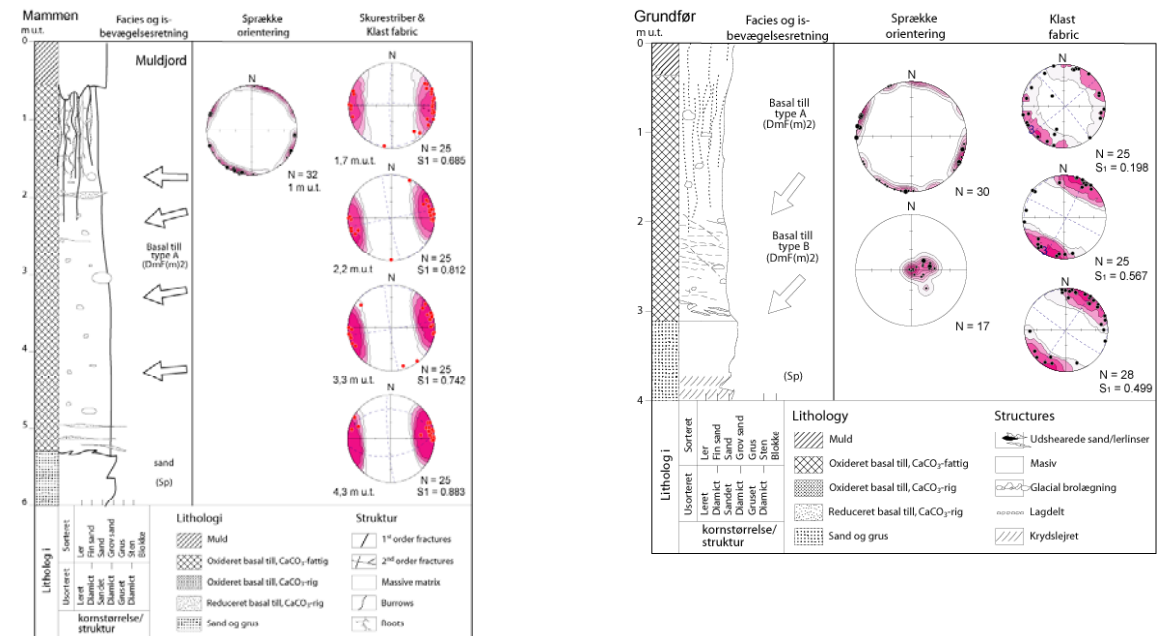
Geologiske forhold på lokal og markskala

Lokaliteterne Gjorslev og Højstrup på Stevns, er beliggende i et område domineret af en udstrakt bølget moræneflade karakteriseret ved et 7 til 15 meter tykt lag moræneler direkte overlejrende primært opsprækket bryozokalk, figur 3. Denne type moræneflade er karakteristisk for det meste af det sydøstlige Sjælland. Morænelersfladen er meget ensartet og plan - stort set kun afbrudt af mindre lavninger ned imod Trykkevælde å – og udgør et klassisk bundmoræneområde. Moræneleren er begge steder klassificeret som en basal till (type B), der blev aflejret i forbindelse med det Ungbaltiske fremstød.



Figur 3. Lithologisk log med sprække og klast fabric data fra Gjorslev (til venstre) og Højstrup (til højre). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 2.

Lokaliteterne ved Mammen og Grundfør er begge beliggende på en bølget morænelersflade og er karakteriseret ved tynde (< 5 meter) lerlag overlejrende smeltevandssand/-grus. Området ved Mammen er stærkt præget af store smeltevandssdale og tunneldale, der gennemskærer morænefladen ud mod Weichsel-isens hovedopholdsline på den midtjyske højderyg. De højtliggende områder, der i dag ligger mellem de store dale og som fremstår som bakker, udgøres af erosionsrester fra den gamle overflade. Området ved Mammen er karakteristisk for det meste af Østjylland, op til Vendsyssel, men kendes ikke andre steder i Danmark. Moræneleren her består af en basal till (type A), der menes afsat af en aktiv gletcher med retning fra øst mod vest i den sidste del af hovedfremstødet i Weichsel, figur 4.



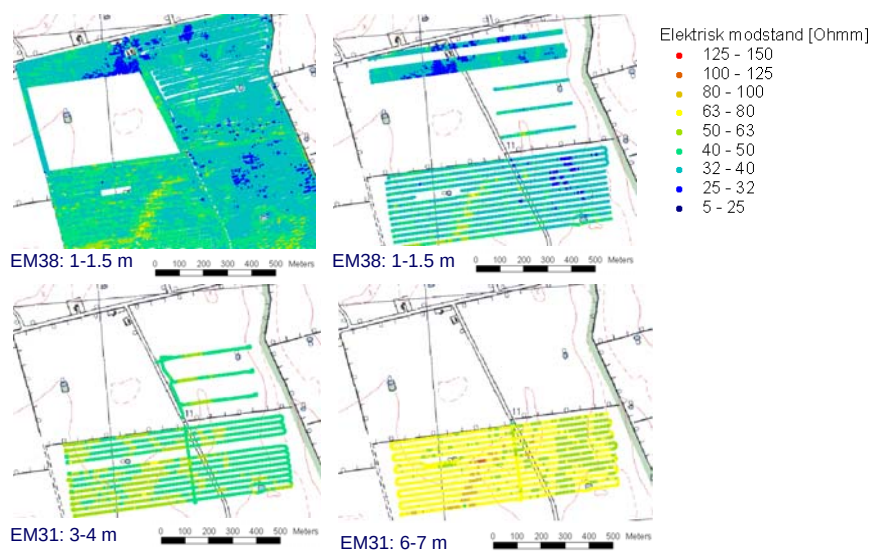
Figur 4. Lithologisk log med sprække og klast fabrik data fra Mammen (til venstre) og Grundfør (til højre). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 2.

Geofysiske opskaleringstenikker - EM 38, EM31 og slæbegeoelektrik

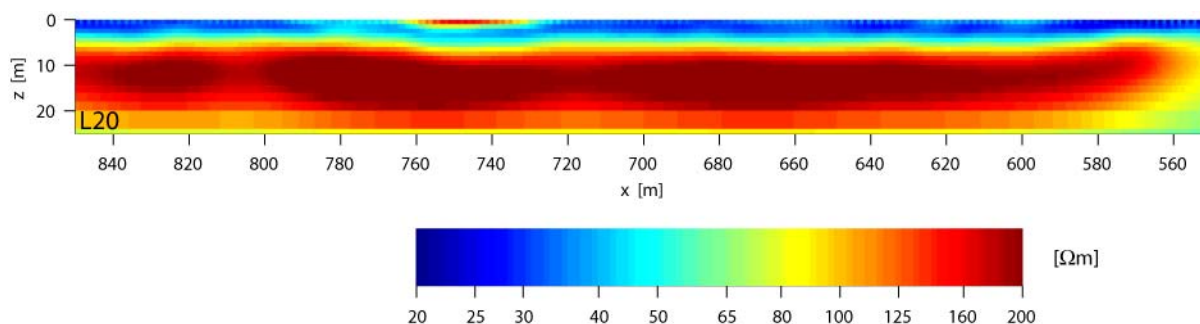
Resultaterne fra den enkelte lokalitet (punktobservation) lader sig brede ud til større arealer ved brug af geofysiske metoder. EM38 metoden med en indtrængningsdybde på 1-1,5 meter gør denne metode egnet til kortlægning af den horisontale udbredelse af inhomogeniteter der stort set har kontakt med jordoverfladen, figur 5 og 6. EM31 metoden vil, bestemt af den valgte opstilling, gøre det muligt at foretage en kortlægning af den horisontale udbredelse af inhomogeniteter ned til maksimalt 5-7 meters dybde, figur 6. Begge metoder bidrager kun i ringe omfang til en kortlægning af inhomogeniteternes vertikale udbredelse. En sådanne kortlægning kan opnås ved brug af slæbegeoelektrikmetoden, hvis det drejer sig om større inhomogeniteter med en betydelig tykkelse og udstrækning. Ligeledes vil den slæbegeoelektriske metode kunne anvendes i forbindelse med en kvantitativ bestemmelse af moræneaflejringens tykkelse i områder hvor den samlede tykkelse ikke overstiger 10-15 meter, figur 7.



Figur 5. EM38 data fra Højstrup (til venstre) og Mammen (til højre). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 4.



Figur 6. De to øverste figurer viser EM38 data og de to nederste figurer viser EM31 data indsamlet ved Højstrup. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 4.



Figur 7. Udsnit af tolkningsresultat for slæbegeoelektrik ved Højstrup. De blå-turkise farver viser udbredelsen af moræneler og de rød-orange farver viser henholdsvis sand i overfladen og udbredelsen af den underliggende kalk. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 4.

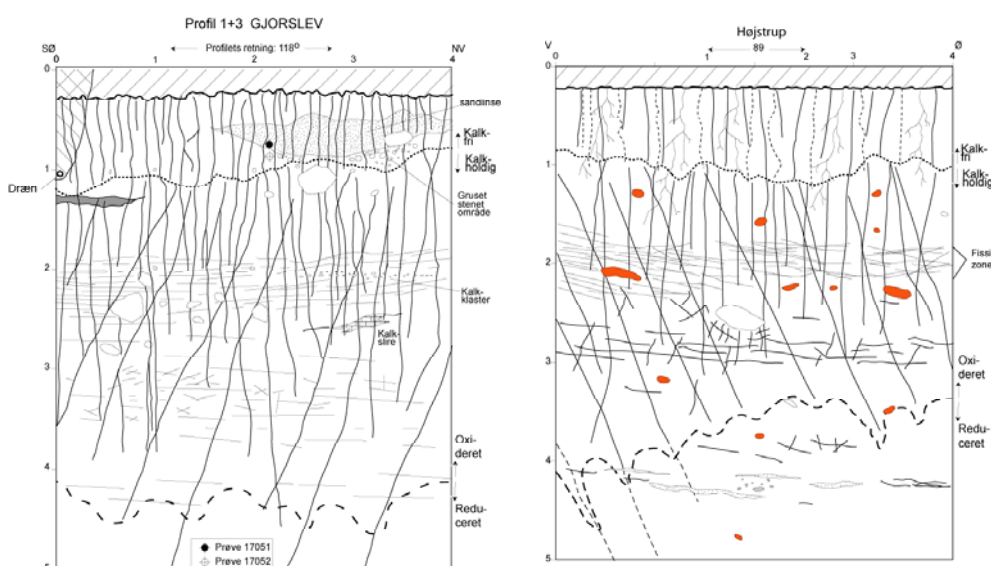
Resultater vedrørende de hydrauliske forhold i moræneler

Kortlægning af makroporer og inhomogeniteter

Som supplement til den generelle beskrivelse af de geologiske forhold blev der ligeledes foretaget en beskrivelse af fordelingen af makroporer (bl.a. biopore, tørke og tektoniske sprækker) på de fire feltlokaliteter.

Opmålinger ved Gjorslev og Højstrup viste at der indenfor den øverste meter fandtes mange rod og regnormegange, figur 8. I 75 cm dybde, i et antal svarende til 300-500 pr. m², og for dybdeintervallet 1-1.4 meter i et stadig aftagende antal. I de øverste 2 meter forekommer desuden vertikale udtørringssprækker. Dertil kommer et system bestående af system 1 og system 2 sprækker. System 1 sprækker er systematisk orienterede og stejlt hældende der findes i to meters dybde med en indbyrdes afstand på ca. 10 cm, hvorefter afstanden stiger til ca. 50 cm i 4 meters dybde og 1.5 meters i 5 meters dybde. System 2 sprækker er subhorisontale sprækker med varierende afstand. Ved Gjorslev er der specielt mange subhorisontale sprækker i dybden 1.8-3.5 meter hvor de optræder med en afstand på 1-4 cm, hvorefter afstanden tiltager til 4-10 cm i 3.5-4 meters dybde hvorefter lerlaget bliver stort set massivt. Ved Højstrup er optræder de subhorisontale sprækker med 1-4 cm afstand i dybden 1.8-2.3 meter, hvorefter afstanden øges til 2-8 cm i 2.3-3.7 meter. Under denne dybde beskrives lerlaget som massivt.

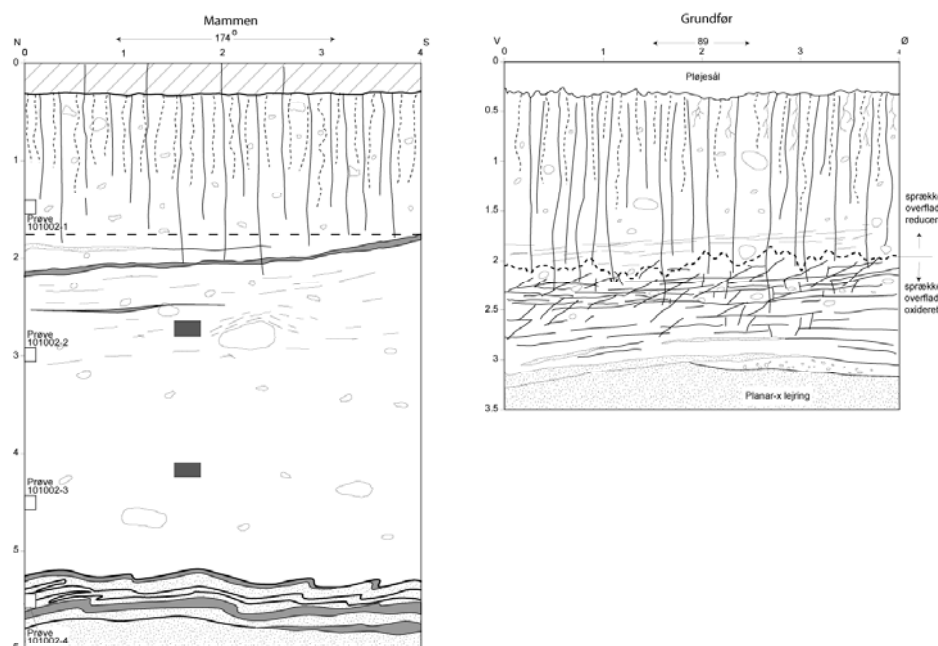
Ved Mammen findes talrige udtørringssprækker med til 2 meter under terræen, figur 9. Udtørringssprækkerne optræder i polygoner med typisk diameter på 15-20 cm, hvoraf nogle tolkes som værende dannet i perioder med permafrost. På overfladen af udtørringssprækkerne findes ned til ca. 1.5 meters dybde store regnormegange med en indbyrdes afstand på ca. 10 cm. Der er ikke beskrevet system 1 eller 2 sprækker på denne lokalitet og dette skydes antagelig et højt porevandstryk under isen på det tidspunkt da den stod helt fremme ved hovedopholdslinien.



Figur 8. Makroporefordeling i profil fra Gjorslev (til venstre) og Højstrup (til højre). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 2.

Ved Grundfør findes et stort antal regnorme- og rodgange ned til 1.5 meters dybde, figur 9. Antallet i 75 cm dybde er bestemt til 100-300 pr. m², og er således lavere end i tilsvarende dybde på de to sjællandske lokaliteter. Dertil kommer et betydeligt antal udtørringssprækker, der optræder i polygoner, og som når ned til 2 meters dybde. Fra 2 meters dybde findes subhorizontale sprækker og glacialtektoniske lavthældende sprækker, hvor udbredelsen af sidstnævnte sprækketype begrænses af lerlagets tykkelse.

Sammenlignet med tidligere opmålinger, der primært er foretaget på Sjælland, Falster og Fyn, viser de nye data fra Mammen og Grundfør, at disse lokaliteter er karakteriseret ved en anderledes fordeling af makroporer, figur 10. Det er især manglen på dybe sprækker der antyder at de hydrauliske forhold her kan være væsentlig forskellige fra de der har været beskrevet fra andre lokaliteter.

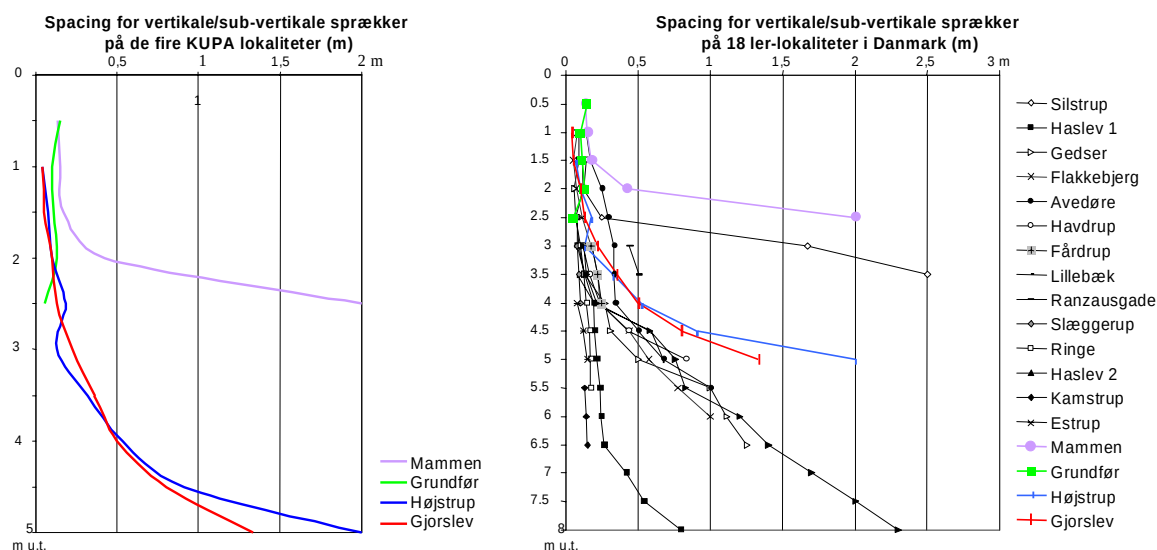


Figur 9. Makroporefordeling i profil fra Mammen (til venstre) og Grundfør (til højre). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 2.

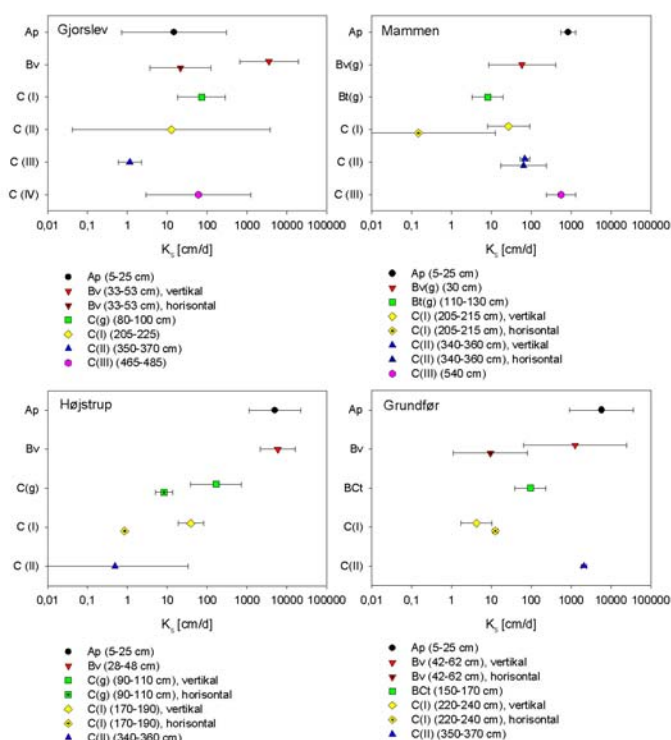
Supplerende målinger af den mættede hydrauliske ledningsevne lader sig i høj grad forklare ved den her beskrevne fordeling af sprækker. For prøver fra Mammen, hvor der kun findes få dybe sprækker er de målte værdier for vertikalt og horisontalt udtagne kolonneprøver meget ens, figur 11. For prøver udtaget ved Grundfør blev der målt en større mættet strømningshastighed for horisontale kolonneprøver end for vertikale kolonneprøver, der ligeledes var karakteriseret ved et stort antal horisontale sprækker, figur 11.

Foruden forekomsten af makroporer kan inhomogeniteter bestående af mere grovkornede sedimenter (bl.a. sand og grus) ligeledes spille en væsentlig rolle for vandets strømningsmønster i moræner. Med anvendelsen af Cone Penetration Testing (CPT) metoden til kortlægning af sandlinsers forekomst ned til en dybde af 8-10 meter viste det sig muligt at identificere ganske tynde sand- og grus, figur 12. Den efterfølgende tolkning og anvendelse af geostatistiske metoder af de indsamlede data fra et 50*100 meter stort område ved Højstrup viste, at det med metoden var muligt at beskrive sammenhængende strømnings-

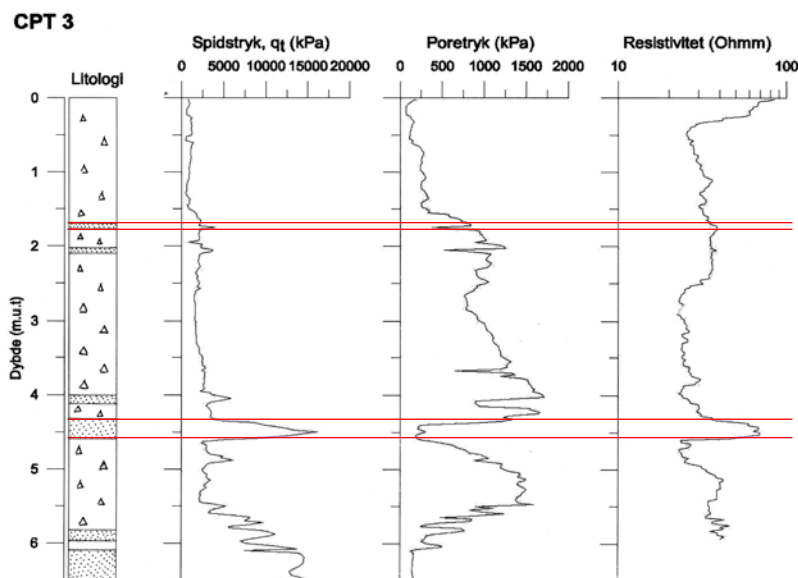
veje gennem morænelerslaget samt at beskrive fysiske heterogeniteter og geologisk variabilitet i dette lag, figur 13.



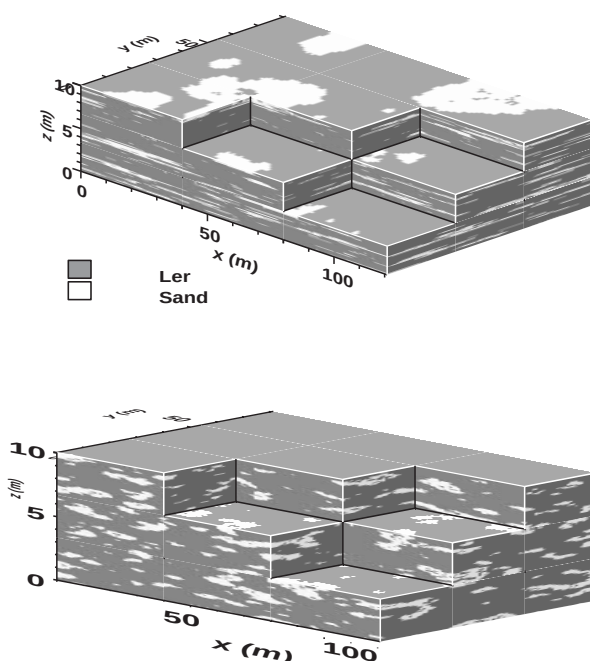
Figur 10. Variation af gennemsnitlig afstand imellem sprækker (spacing) i forskellig dybde på de fire målte feltlokaliteter samt på andre 18 danske ler-lokaliteter. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 2.



Figur 11. Mættet hydraulisk ledningsevne (K_s) målt på store kolonner med undtagelse af Bv(g)- og C(III)-horisonten ved Mammen, hvor der blev målt på små retentionsringe. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 5.



Figur 12. Et eksempel på logmønstre for de tre CPT parametre (spidstryk, poretryk og resistivitet), hvor sandlag (eksempler ses afgrænset ved røde streger) er tolket som indslag i en overvejende lerpræget litologisk profil. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 4.

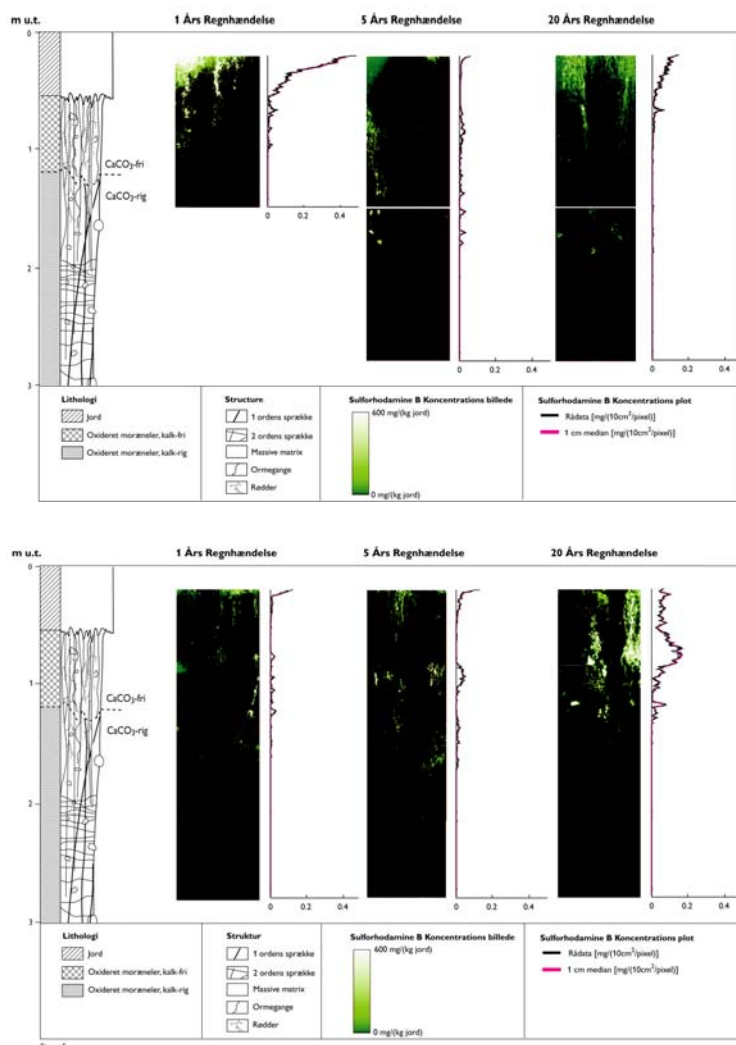


Figur 13. Konditioneret simulering af sandlinser i morænelersdække ved Højstrup. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 4.

Tracerforsøg til kortlægning af det nedsivende vands transportveje

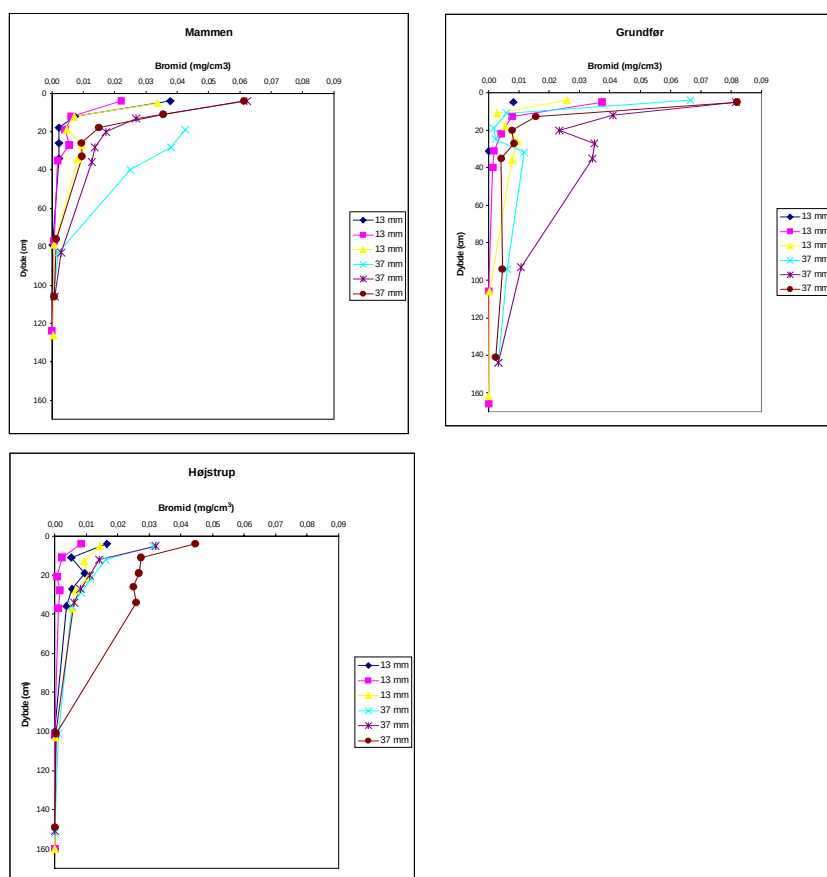
Ved Gjorslev gennemførtes tracerforsøg på to forskellige tider af året, hvor undersøgelserne i august/september repræsenterede det tidspunkt af året hvor jorden regnes for mest udtørret og oktober/november det tidspunkt hvor jorden forventes at være mere vandmættet. I forsøgene blev der, over 100 minutter, tilført en vandig opløsning med en blanding af

to tracere (Acid Yellow 7 og Sulforhodamin B) til parceller hvorfra topjorden (Ap-horisonten) var nænsomt blevet fjernet. Tracerblandingen blev tilført med forskellig intensiteter svarende til én 1 års-, 5 års- og 20 årshændelse. Hovedresultaterne af opmålingen af de to tracere ved en avanceret fototeknik og med efterfølgende billedbehandling viste, at samtlige ormegange bidrager til udbredelsen af tracer i den tørre jord, mens det i den våde jord kun er de ormegange, der føres videre i en sprække, der bidrager til transporten af tracer, figur 14. I sommersituationen ophobes tracer i bunden af de ormegange, der ikke har kontakt til en sprække. Desuden viste resultaterne, at det primært er ormegangene, der er afgørende for vandtransporten i de øverste 1.2 meter. De to valgte tracers egenskaber viste sig i øvrigt også afgørende for hvorledes det blev transporteret og udbredt. Acid Yellow 7 blev registreret til større dybde (>2.8 meter) end for Sulforhodamin B (<1.5 meter) og transporten af Acid Yellow 7 ses ligeledes i højere grad følger en stempel strømning, en tendens der øges med stigende intensitet.



Figur 14. Koncentrationsprofiler for Sulforhodamine B for 1, 5 og 20 års hændelser tilfor våd jord (øverste figur) og tør jord (nederste figur). For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 7.

Ved de resterende tre feltlokaliteter blev der gennemført tracerforsøg en gang (oktober) i løbet af året. Tilførslen skete under brug af det ved Gjorslev anvendte doseringsudstyr og med en tracerblandingen bestående af Sulforhodamin B og kaliumbromid, der blev tilført parceller uden topjord, ved intensiteter svarende til én 1 års- og 20 årshændelse. Den visuelle kortlægning af farvetraceren viste sig at være endog meget vanskelig og blev derfor ikke fundet egnet til at kvantificere mængden af aktive strømningsveje i de undersøgte profiler. Fordelingen af bromid viste en maksimums-nedtrængningdybde på omkring 40 cm for Mammen og Højstrup og omkring 100 cm ved Grundfær, figur 15. Ved Grundfær svarer nedtrængningsdybden for bromid nogenlunde til den maksimale dybde for udbredelsen af bioporer, hvilket ikke er tilfældet for Mammen og Højstrup. Det vil derfor være nødvendigt at frembringe supplerende data for at vurdere bioporernes rolle for transporten af bromid på disse lokaliteter. En stigende intensitet syntes ikke at påvirke nedtrængningsdybden, hvorimod der spores en tendens til at koncentrationen af bromid i den aktive del af profilen øges ved stigende intensitet.

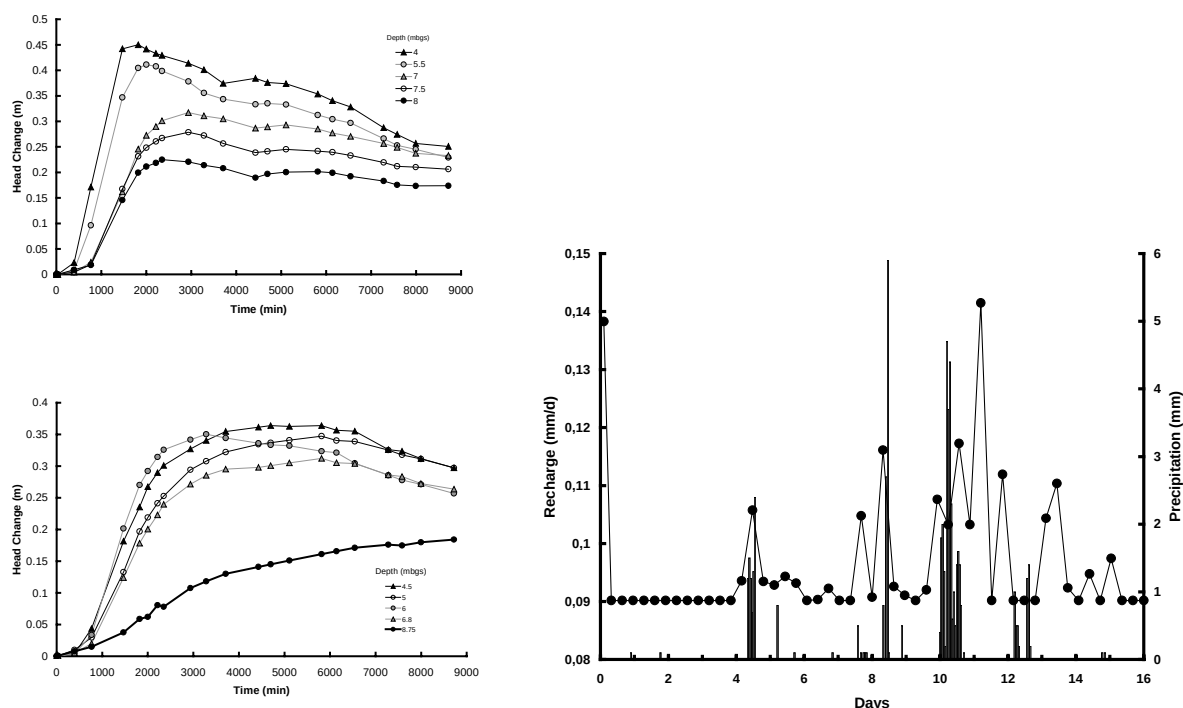


Figur 15. Indhold af bromid i forskellige dybder i tre profilvægge efter vanding med henholdsvis 13 mm og 37 mm bromidopløsning over 100 minutter. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 8.

Beregninger af hydrauliske parametre på basis af målinger af vandspejlets beliggenhed

Analyser af målinger af vandspejlets naturlige fluktuationer i forskellige niveauer i morænelerslaget ved Flakkebjerg viste det muligt at beregne dybden af sprækkesystemerne samt at fremskaffe oplysninger for morænelerslaget egenskaber, herunder sprækketrans-

missiviteten og de hydrauliske matrixegenskaber, figur 16. Sidstnævnte to parametre er vigtige input i forbindelsen med modelleringen af vandets strømningsveje ned til det underliggende grundvandsmagasin, figur 16.



Figur 16. Figuren til venstre viser trykvariationer i moræneler ved Flakkebjerg. Den øverste del af figuren til venstre viser hurtige respons i piezometre med kontakt til sprækker og den nederste del af figuren til venstre viser ændringer i piezometre installeret i matrix. Figuren til højre viser simuleret infiltration til den øverste del af grundvandsmagasinet og den målte nedbør. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 6.

Resultater vedrørende mineralisering af pesticider i moræneler

Mikrobiologisk potentiale

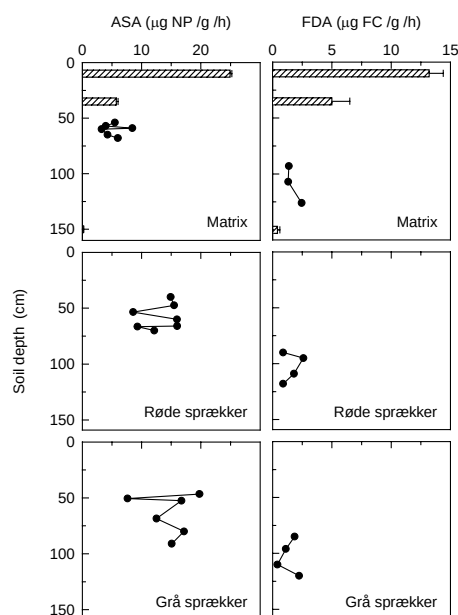
Det mikrobiologisk potentiale samt mineraliseringsforsøg blev gennemført på dels bulkprøver, udtaget i og under pløjelaget ned til 1,55 m dybde, dels på intakte sedimentprøver.

Antallet af bakterier, bestemt på to rige medier (R2Agar og Petrifilm), er omkring 10^7 CFU g^{-1} i pløjelaget og aftager til omkring 10^3 CFU g^{-1} i 1,55 meters dybde, tabel 1. Samtidig ses den mikrobielle aktivitet, bestemt ved henholdsvis aarylsulfatase aktivitet (ASA) og fluorescein diacetat hydrolyse (FDA), at aftage med dybden og udgør i 1,55 meter kun 3 % af den aktivitet, der blev målt i pløjelaget. Den mikrobielle biomasse aftager ligeledes markant med dybden. Den er ved substrat-induceret respiration bestemt til $312 \mu g C g^{-1}$ i pløjelaget hvorefter den aftager til $< 50 \mu g C g^{-1}$ i prøverne fra 35-45 cm og 150-155 cm. Analyserne viste endvidere at den mikrobielle diversitet, og dermed den potentielle mikrobielle substratudnyttelse, er uændret i alle tre dybder, med et Shannon-Weaver index på omkring 3, tabel 1.

Tabel 1. Data om mikrobiologi (R2A-agar og Petrifilm), mikrobiel aktivitet (ASA og FDA), biomasse og mikrobiel diversitet ved Shannon-Weaver indexet (H') i bulkprøver fra Højstrup. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 12.

Dybde (cm)	R2A-agar (CFU g ⁻¹)	Petrifilm (CFU g ⁻¹)	ASA (μg NP g ⁻¹ h ⁻¹)	FDA (μg FC g ⁻¹ h ⁻¹)	Biomasse (μg C g ⁻¹)	Diversitet (H')
10	6.5 10 ⁶	2.1 10 ⁷	24.9 ± 0.3	13.6 ± 1.2	312 ± 30	3.1 ± 0.1
35	2.1 10 ⁴	7.2 10 ⁴	5.7 ± 0.3	5.0 ± 1.5	<50	2.6 ± 0.2
150	2.5 10 ³	4.6 10 ³	<0.5	<0.5	<50	2.8 ± 0.1

Supplerende undersøgelser af den mikrobielle aktivitet (ASA) i sprækkemateriale udtaget i dybdeintervallet 40-100 cm viste en generelt højere mikrobiel aktivitet i sprækkematerialet (7-20 μg NP g⁻¹ time⁻¹) sammenlignet med materiale fra matrix (2-10 NP g⁻¹ time⁻¹), figur 17. En tilsvarende forskel kunne ikke erkendes ved måling af FDA, figur 17.

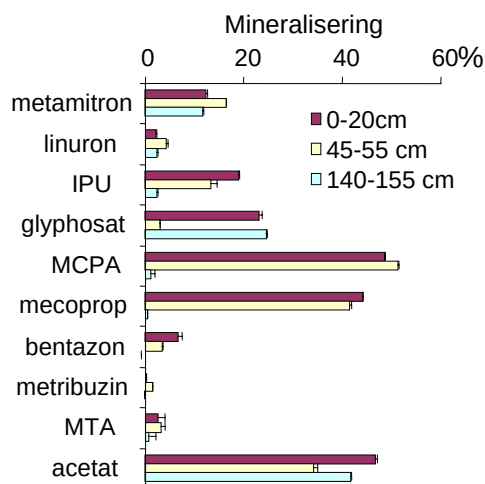


Figur 17. Mikrobiel aktivitet i prøver af matrix-jord og makropore-jord fra Højstrup. Skraverede søjler viser aktiviteten i bulk-prøver fra 0, 35 og 150 cm's dybde. ASA, aarylsulfatase aktivitet; FDA, fluorescein diacetat hydrolyse; NP, nitrophenol; FC, fluorescein. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 12.

Mineraliseringsforsøg

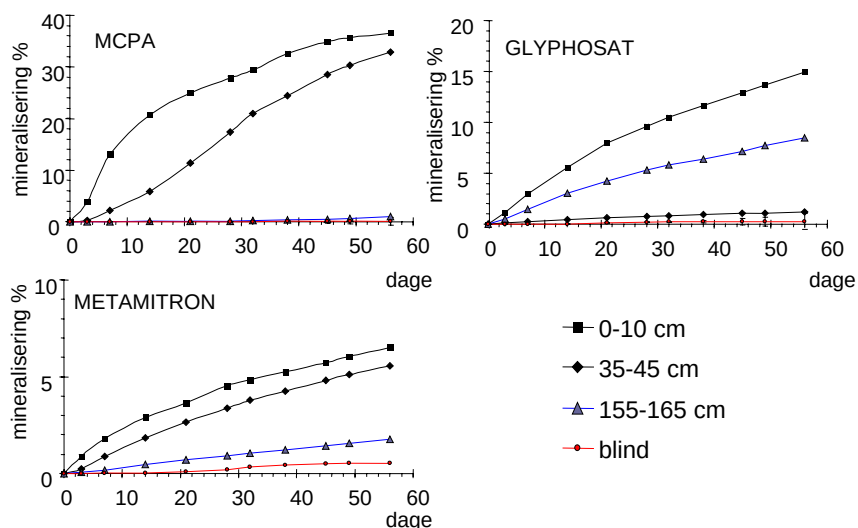
Mineraliseringsforsøg blev gennemført over 60 dage med bulkprøver fra pløjelaget, 35-45 cm og 150-155 cm og 9 forskellige stoffer (bentazon, glyphosat, isoproturon, linuron, MCPA, mecoprop, metamitron, metribuzin, og MTA), figur 18. Disse forsøg viste den største mineralisering for phenoxysyrerne (mecoprop og MCPA) i de to øverste dybder, mens mineraliseringspotentialet stort set ikke var tilstede i den dybeste prøve. Mineraliseringspotentialet for isoproturon er mindre end for phenoxysyrerne, men følger den samme fordeling med dybden. Mineraliseringspotentialet for metamitron svarer i alle tre dybder nogenlunde til det der blev målt i de to øverste dybder for isoproturon. Mineraliseringspotentialet for bentazon, metribuzin, linuron og MTA er ikke tilstede i nogen af de undersøgte dybder.

Glyphosat mineraliseres om end mineralisering er ringe i prøven udtaget umiddelbart under pløjelaget.



Figur 18. Mineralisering i % efter 60 dage af 9 pesticider udført på bulkprøver. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 12.

Mineraliseringen af MCPA, metamitron og glyphosat over 56 dage i intakte prøver viste mineraliseringspotentialer som netop beskrevet for bulkprøver fra de tilsvarende dybder, figur 19. For MCPA og glyphosat var mineraliseringsraten i prøven fra pløjelaget sammenlignelig med den for bulkprøverne, mens mineraliseringsraten for glyphosat i prøven fra 155-165 cm og for metamitron var lavere end for tilsvarende bulkprøver.

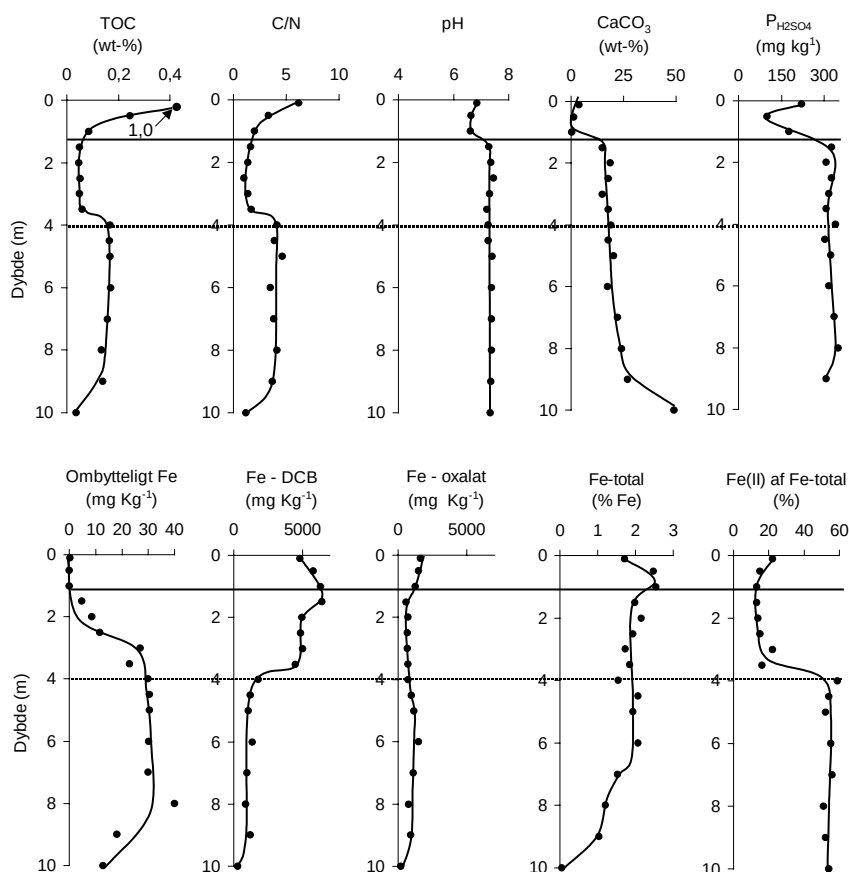


Figur 19. Mineralisering i % efter 56 dage af 3 pesticider udført på intakte prøver. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 12.

Resultater vedrørende sorption af pesticider i moræneler

Geokemiske og mineralogiske forhold

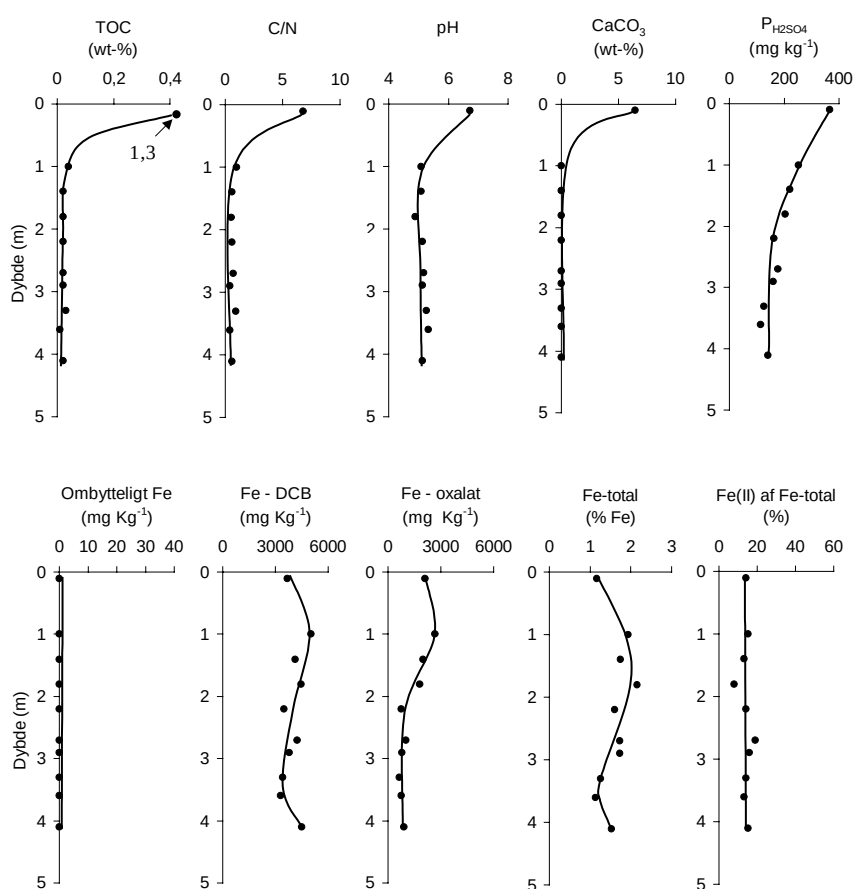
På hver af de sjællandske lokaliteter, Gjorslev og Højstrup, findes tre overordnede geokemiske miljøer, figur 20. Den første zone fremstår iltet og kalkfri, den næste zone er iltet og kalkholdig og den tredje zone, der findes umiddelbart under redoxgrænsen, er kalkholdig og reduceret. På begge lokaliteter er den første zone omkring 1 meter dyb og den næste zone når ned til 4 meter ved Gjorslev og 3.5 meter ved Højstrup. Supplerende boringer ved Højstrup langs et 700 meter langt profil, viste at udbredelsen af den iltede og kalkrige zone varierede med en meter, med tykkelser ned til mellem 2.6 meter og 3.5 meter under terrænet. Disse variationer på morænelersfladen afspejler bl.a. forskellige i det oprindelige indhold af reducerende stoffer og mængden af nedsivende vand efter istiden på det pågældende sted. Udbredelsen af de to øvre zoner ligner meget den, der kendes fra andre sjællandske og fynske lokaliteter. Ved Gjorslev indeholder den nedre del af den reducerede zone et stadig stigende mængde kalk, hvorfor mange af de målte egenskaber i stigende grad kommer til at ligne dem for den underliggende kalk, figur 20.



Figur 20. Geokemiske parametre med TOC, C/N, pH_{CaCl₂}, CaCO₃, P_{H₂SO₄} (øverst) og forskellige former af jern (nederst) bestemt på bulkprøver fra Gjorslev. Udbredelsen af den kalkfrie zone (1,5 meter) og redoxgrænsen (4 meter) er markeret. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 11.

Den begyndende iltning af det oprindelige reducerede moræneler har bl.a. konsekvenser for fordelingen af forskellige former af jern idet iltningen bevirker at ferrojern omdannes til forskellige former af ferrijern, figur 20.

På de jyske lokaliteter, Mammen og Grundfjør, findes kun en geokemisk zone, svarende til den øverste iltede og kalkfrie zone på de to sjællandske lokaliteter, figur 21. Til sammenligning med de sjællandske lokaliteter, betyder 1) bedre dræningsmuligheder grundet det underliggende sandlag, 2) en længere isfri periode samt 3) et lavere oprindeligt indhold af kalk på disse jyske lokaliteter, at zonen er dybere her og er udbredt til hele det øvre lerlag. En effektiv udnyttelse af det oprindelige indhold af reducerende stoffer ses ved bl.a. et lavt indhold af ombytteligt ferrojern samt ved det lave forhold mellem Fe(II) og Fe-total. Forbruget i bufferkapacitet kan erkendes ved markant lavere pH-værdier under pløjelaget ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: ca. 5) end det oprindelige hvilket ville svare til det der typisk måles på de sjællandske lokaliteter ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: ca. 7).



Figur 21. Geokemiske parametre med TOC, C/N, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, CaCO_3 , $\text{P}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ (øverst) og forskellige former af jern (nederst) bestemt på bulkprøver fra Mammen. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 11.

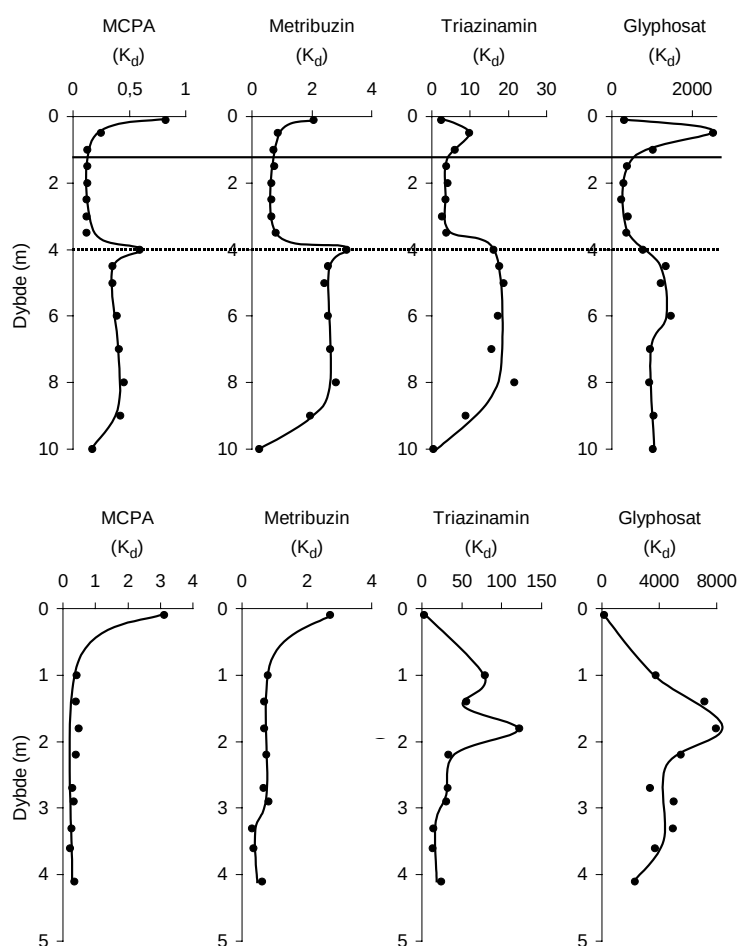
Sorption af pesticider

Sorptionen af de tre pesticider MCPA, metribuzin og glyphosat samt et omdannelsesproduktet methyltriazinamin afspejler i høj grad fordelingen af pløjelag samt forskellige geokemiske miljøer med forskellige egenskaber, figur 22. For MCPA er sorptionen forholdsvis høj i pløjelaget, hvor den ved Gjorslev er bestemt ved en k_d -værdi på 0.8 og på de to jyske

lokaliteter ved en K_d -værdi på omkring 3. På alle lokaliteter varierer sorptionen i den iltede zonen mellem 0.1 og 0.4, hvor den i den reducerede zone er bestemt til mellem 0.4 og 0.7.

Sorptionen for metribuzin viser ligeledes høje værdier for pløjelaget med k_d -værdier på 2.1-2.7, hvorefter sorptionen aftager i resten af den iltede zone til k_d -værdier mellem 0.2 og 0.8. Under redoxgrænsen stiger k_d -værdien til mellem 2.5 og 3.2 ved Gjorslev, hvor den ved Højstrup varierer mellem 0.6 og 1.2.

Sorptionen af glyphosat er forholdsvis lav i pløjelaget (k_d -værdier: 153-345) hvorefter sorptionen på de sjællandske lokaliteter stiger markant indenfor den øverste halve meter til en k_d -værdi på omkring 2500. I resten af den iltede zone er k_d -værdien på disse lokaliteter omkring 300, hvorefter sorptionen stiger i den reducerede zone til en k_d -værdi på 1000-1400, bl.a. bestemt ved indholdet af kalk. På de jyske lokaliteter stiger sorptionen ligeledes markant under pløjelaget, til typiske k_d -værdier på omkring 5000, for størstedelen af lerlaget. I de diatomé-holdige prøver ved Mammen var sorptionen endog højere.



Figur 22.. Sorption (K_d) af MCPA, metribuzin, methyltriazinamin og glyphosat bestemt på bulkprøver fra Gjorslev (øverst) og Mammen (nederst). For Gjorslev er udbredelsen af den kalkfrie zone (1,5 meter) og redoxgrænsen (4 meter) er markeret. For en mere detaljeret beskrivelse samt K_d værdier for Højstrup og Grunddør, se bilag 11.

For methyltriazin var sorptionen ligeledes lavere i pløjelaget end i resten af den iltede zone. På de sjællandske lokaliteter betød det en stigning fra en k_d -værdi på 2 i pløjelaget til mellem 3 og 9 i den iltede zone og 11-17 i den reducerede zone. På de jyske lokaliteter varierede k_d -værdien mellem 3 og 11 i pløjelaget og typisk mellem 14 og 59 i den følgende del af den iltede zone. En højere sorption blev målt i de diatome-holdige sedimenter ved Mammen (k_d -værdi: 56-122) og lidt lavere sorption i bunden af morænelerslaget ved Grundfør (k_d -værdi: 9).

En multivariat korrelationsanalyse af data fra Gjorslev og Mammen blev brugt for en beskrivelse af de parametre, der er afgørende for sorptionen af de her nævnte fire stoffer, tabel 2. På baggrund af det foreliggende datamateriale viste sig muligt at relatere sorptionen af glyphosat til i alt 11 parametre som tilsammen forklare 89 % af den fundne variation i K_d . Sorptionen af glyphosat viste sig stærkt knyttet til indholdet af finsand, frie jernoxider ($\text{Fe}_{\text{oxalat}}$) samt det specifikke overfladeareal, der alle ved stigende indhold virker til en øget sorption. Derimod tyder korrelationsanalysen på at stigende pH-værdi i jordlagene samt stigende indholdet af frie manganoxider (Mn_{CBD}) og phosphor ($\text{P}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$) virker til en mindsket sorption af glyphosat.

Tabel 2. Parametre af betydning for sorption (K_d) af glyphosat, MCPA, methribuzin og methyltriazinamin samt forklarings-% bestemt ved korrelationsanalyse. Værdien af parameteren er følgende: +:0-0,1; ++:0,1-0,2; +++:>0,2; -: 0; --: -0,1- -0,2 og ---:>-0,2. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 11.

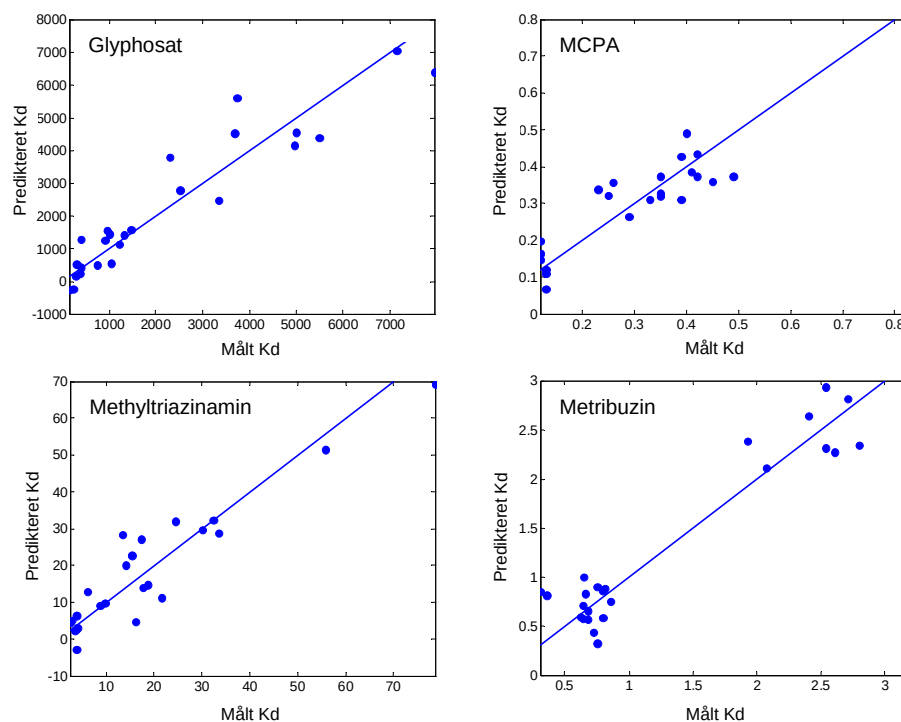
Parameter	Glyphosat	MCPA	Metribuzin	Methyltriazinamin
Specifikt overfladeareal	++	--		+++
Finsand	+++	++		
TOC	--	+++	+++	
N_{total}	-	+++		
$\text{P}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$	--			
$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	---	--		---
$\text{Fe}_{\text{oxalat}}$	+++	+++		+++
Fe_{CBD}			---	
Fe(II)	+	+++	+++	
Fe_{total}	-	--		
$\text{Mn}_{\text{oxalat}}$		---		
Mn_{CBD}	---			
CEC	-	--		---
Variation forklaret ved de her viste parametre (%)	89	86	87	89

Sorptionen af MCPA kan forklares med 86 % ved inddragelse af i alt 10 parametre. Det er især organisk stof (TOC), N_{total} , $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$, Fe(II) samt i lidt mindre grad også finsand der bidrager til en stigende sorption af MCPA ved stigende indhold mens stigende pH-værdi, stigende indhold af manganoxid ($\text{Mn}_{\text{oxalat}}$) og stigende specifikt overfladeareal bidrager til aftagende sorption. Den negative korrelation til overfladearealet er i god overensstemmelse

med den positive korrelation til TOC, idet det organiske indhold bedrager til dannelse af aggregater, hvorved det samlede ydre overfladeareal – som her målt – aftager.

Sorptionen af methribuzin synes knyttet til langt færre parametre, idet der ved blot 3 parametre opnås en forklaring i den målte sorption på 87 %. Her er det indholdet af organisk stof samt indholdet af ferrojern, der er ved øgede indhold bidrager til en sorption af methribuzin mens stigende indhold af jernoxider (Fe_{CBD}) bidrager til aftagende sorption af methribuzin. Sorptionen af methyltriazinamin lader sig beskrive for 89 % ved i alt fire parametre, hvor det specifikke overfladeareal samt indholdet af frie jernoxider ($\text{Fe}_{\text{oxalat}}$) bidrager til øget sorption, hvorimod stigende pH-værdi i jordlagene samt stigende CEC-værdier mindsker sorptionen af methyltriazinamin.

Ved korrelationsanalysen er den målte sorption (K_d) for de fire stoffer sammenholdt med den predikterede værdi, figur 23. For samtlige stoffer viste der sig en god overensstemmelse mellem målte og predikterede værdier. Således var der for glyphosat en god spredning indenfor de målte værdier, hvilke også viste sig at være tilfældet for methyltriazinamin, hvor dog en enkelt værdi på over 100 blev taget ud af datasættet. Denne værdi var repræsentativ for en prøve med høj indhold af diatomé-jord. Datasættet for MCPA har en tendens til at være opdelt i tre grupper, repræsenterende meget lave, mellem og høje K_d værdier, hvor antallet af observationer er markant større for de to første grupper end for den sidste gruppe. Udbredelsesretningen for den midterste gruppe viste imidlertid at regressionsmodellen, overordnet set, er generelt gældende indenfor det viste variationsområde. Datasættet for metribuzin viser samme tendens til gruppering, med forholdsvis lave og høje værdier, men til trods for dette repræsenterer datasættet en god overensstemmelse mellem de målt og predikterede værdier.



Figur 23.. Måle og predikterede K_d værdier for glyphosat, MCPA, methyltriazinamin og metribuzin. For en mere detaljeret beskrivelse, se bilag 11.

Konklusion

I projektet er der afprøvet en række metoder til fremskaffelse af data, som er relevante for vurderingen af lerjordens følsomhed overfor udvaskning af pesticid gennem den umættede zone til grundvandet. Resultaterne demonstrerer at der kan skaffes data, som er egnede til at indgå i en analyse af omsætning (mineralisering), tilbageholdelse (sorption) og transport af pesticider i tilknytning til de to domæner (matrix og makroporer) der karakteriserer lerjorde. Det har desuden vist sig at nogle datatyper der er indsamlet på et begrænset areal, med kendte og afprøvede metoder, kan udbredes til at repræsentere større geografiske områder. Resultaterne af de hidtidige undersøgelser viser imidlertid også, at det kan være væsentligt at fremskaffe sammenhørende værdier for de to domæner, makroporer og matrix, for at kunne vurdere lerjordens samlede følsomhed, idet der normalt er betydelige forskelle på de to domæners egenskaber vedrørende transport, omsætning og tilbageholdelse af pesticider, og dermed i risikoen for belastning af det dybereliggende grundvand. For de undersøgte geologiske lerjorde har den geografiske placering vist sig af betydning for ikke blot udviklingen i makroporer, men også for de pedologiske, mineralogiske og geokemiske forhold i lerlaget.

Samlet vurderes det således muligt at tilvejebringe det nødvendige grundlag for at udvikle et zoneringskoncept for særligt pesticidfølsomme lerjorde. Det skal dog bemærkes at arbejdet ikke er afsluttet, og der er behov for at arbejde videre med problematikkerne omkring danske lerjorde.

1. Undersøgelser af de pedologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør

Søren Torp (DJF)

1.1 Indledning

En nøjagtig beskrivelse af de pedologiske forhold er af stor betydning i arbejdet med at kortlægge pesticiders nedbrydning og transport, i jordlagene. Det er kendt at den største og primære nedbrydning af pesticider hovedsagelig er afhængig af forhold i de øverste jordlag (Walker, 2003).

Den pedologiske beskrivelse omfatter registrering af og prøvetagning fra de forskellige jordbundshorisonter i den aktuelle jordbund. Ved at prøvetagningen sker efter en pedologisk inddeling af jordlagene, sikres en repræsentativ prøvetagning fra jordbundshorisonterne. I modsætning hertil vil en traditionel prøvetagning efter dybde ofte være tilfældig og ikke sikre repræsentativiteten. Den grundige beskrivelse sikrer et godt input ved arbejdet med opsætningen af modellerne. Når modelleringen efterfølgende skal vurderes kan man søge tilbage til den pedologiske beskrivelse for at finde forklaringer på resultatet.

I arbejdet med de første lerlokaliteter er det valgt at lave en beskrivelse af de pedologiske forhold som har samme omfang som den der tidligere blev anvendt i sanddelen i KUPA-projektet (Barlebo, 2002a). Med den grundige pedologiske beskrivelse på lokaliteterne fås et sammenligningsgrundlag til eksisterende databaser over danske jorder. Det er således muligt at vurdere bl.a. repræsentativitet for jordbundsforholdene i det videre arbejde med opskaleringen.

Den pedologiske beskrivelse og analyse omfatter en registrering af de parametre, som har stor betydning for pesticid udvaskningen, såsom; tekstur, humusindhold, pH, makroporeindhold, jordstruktur, redoxforhold og ombyttelige brint ioner.

Dette arbejde er allerede foretaget på sandjordslokaliteterne, men det er mindst ligeså vigtigt på lerjorder hvor makroporeflow, sprækker, lernedslemning, bioaktivitet i de øverste jordlag kan være yderst forskellig fra jordart til jordart indenfor de forskellige landskabselementer.

I det følgende beskrives jordbundsforholdene på de fire udvalgte lerlokaliteter Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør. Der findes et beskrivelsesskema for hver lokalitet hvori feltbeskrivelsen af jordbundshorisonterne plus en del overordnede oplysninger er anført. Fra hver lokalitet findes desuden profilskitser over jordbundshorisonter fra to profilvægge optegnet nedtil ca. 170 cms dybde over en givet strækning. Jordbundsprofilerne er forsøgt fotograferet i digital udgave hvilket muliggør at billederne kan splejses til et langt sammenhængende oversigtsbillede. Dette er lykkedes på de fleste lokaliteter, men ikke i andre og nogen steder kun delvist. Herud over indeholder kapitlerne også tabeller med analysere-

sultaterne fra de fysiske og kemiske analyser udført på laboratoriet. Analyserne er gennemført som beskrevet i Barlebo (2002b)

1.2 Gjorslev lokaliteten

Feltarbejdet ved Gjorslev på Stevns blev udført den 22. august 2002. Der blev optegnet i alt 2 x 700 cm pedologiske horisonter i de øverste jordlag, figur 1.1 og 1.2 samt som vist i figur 1.3 og 1.5. Jorden er efter det danske system (Madsen 1985) klassificeret som en kalkholdig pseudogley Typibrunjord pga. tilstedeværelsen af en diagnostisk Bv-horisont, tabel 1.1. Efter FAO systemet (FAO, 1998) klassificeres jorden som en Haplic Phaeozem pga. sin høje basemætning.

1.2.1 Jordbundsudvikling

Jordbundsudviklingen i denne lerholdige jord er domineret af tre hovedprocesser; kalkudvaskning, forbruning og landbrugsdrift. Desuden er der tegn på en begyndende, svagt udviklet lernedvaskning.

På figur 1.1 og 1.2 kan grænsen for karbonatudvaskning følges som overgrænsen for C(g)-horisonten. Som det ses på figurene varierer dybden til den karbonatholdige horisont fra ca. 80 cm og til 170 cms dybde. Jordbundshistorisk antages det at råjorden efter at den sidste is var smeltet bort for ca. 10.000 år siden har været karbonatholdig til overfladen. Dvs. indholdet af karbonat i hele pedonet har tilsvaret det vi i dag finder i C-horisonten. De karbonatfri øvre horisonter er udvaskede af nedbøren herefter. Efter karbonatudvaskningen har fundet sted i de øvre dele af pedonet har forbruningsprocessen gradvist overtaget som den dominerende jordbundsudvikling. Faldet i pH som følge af fjernelsen af karbonat er med til at fremme den kemiske forvitring. Forvitring af jernholdige primære mineraler opløser mineraler og frigør bl.a. jernoxider og danner nye lermineraler. Derved udvikles efterhånden en B-horisont hvis dannelseshastighed væsentligst styres af klimaet, dvs. fugtighedsforhold og temperatur (Schachtschabel et al., 1989).

De dannede jernoxider bindes i jorden som aggregater i metal-organiske komplekser hvis mobilitet svækkes yderligere af en stærk Ca^{2+} binding. Indholdet af jernoxider giver B-horisonten sin karakteristiske brunlige farve.

En yderligere forsurening og udvaskning af baser vil føre til en mobilisering af lermineraler og hermed en flytning og afsætning af ler i et dybere niveau. En sådan flytning af ler ses der kun meget svage tegn på i jorden ved Gjorslev.

Pseudogley optræder i Gjorslev sammenfaldende med C(g)-horisonten. Pseudogley optræder som lodrette grålige striber i en brun matrix. Pseudogleyen er svagt til moderat udviklet i de øverste jordlag, men genfindes som sprækker dybere i jorden. Pseudogley er tydeligvis sammenfaldende med sprækker der har sine oprindelse fra trykpåvirkninger fra isen. Senere er sprækkerne i de øvre jordlag udviklet til det vi kalder pseudogley ved vandets påvirkning. I perioder med megen nedbør er sprækkerne vandfyldte og jordbakterier

der lever af organisk stof som vandet har bragt med ned, forbruger hurtigt ilten og danner aerobe forhold. Jern der er tilstede i jorden som oxider reduceres til Fe^{2+} der giver sprækkekerne deres grålige farve. Ved overgangen til matrix kan man ofte observere en rødlig grænse der skyldtes at det reducerede jern iltes og afsættes som Fe^{3+} på overgangen mellem sprække og matrix.

Tabel 1.1. Feltbeskrivelse, klassifikation og lokalitetsoplysninger for jordbundsprofil ved Gjorslev (DJF profil nr. 3178).

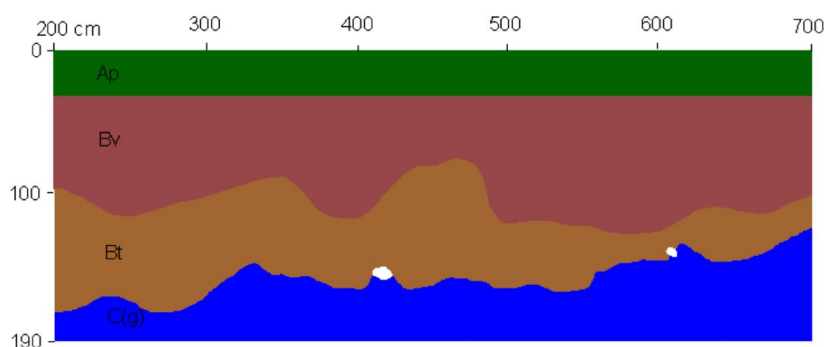
Dansk jordklassifikation	Kalkholdig pseudogleyet typibrunjord	FAO	Haplic Phaeozem
Landskabsform	Moræneflade	Jordklassifikation	
UTM	6139069 715258	Dræningsklasse	Veldrænet jord
Beliggenhed	Flade	Profil dybde	180
Kote	27 m	Grundvandsdybde	-
Terrænform	Flade	Vegetation	-
Hældning	0 – 1 °	Beskriver	Søren Torp
Bemærkninger	C(g)-horisonten: Enkelte rødder i grå pseudogley		
 Horisontbeskrivelse Ap (0 - 29 cm): Mørk grålig brun (10YR 4/2 fugtig) ler; moræneaflejringer; humusholdig, 1 – 7 %; mindre end 5 vol. %, små, 2,0 - 7,5 cm store sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; jordbrugskalket, overvejende klumper; meget hyppige fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; stærk, grov, angulær struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; klar jævn grænse. Bv (29 - 75 cm): Gullig brun (10YR 5/4 fugtig) ler; moræneaflejringer; humusfattig; mindre end 5 vol. %, små, 2,0 - 7,5 cm sten, af blandet tilstand, form og typer uden kalk; mindre end 5 vol. % bløde noder, afrundede, Fe- og Mn-oxider & hydroxider (sorte) med en diameter mindre end 1 cm; nogle fine rødder; porer, 10 - 40 / dm2 som orme- og rodgange; moderat, grov, angulær struktur; fugtig, klæbrig konsistens; plettet af tykke coatings af lerminerale (+ sesquioxider) og humus i rodgange; gradvis bølget grænse. Bt (75 - 115 cm): Brun (10YR 5/3 fugtig) ler; moræneaflejringer; få, mindre end 2 % gullig brun (10YR 5/8 fugtig) afrundede mellemstore, 5 – 15 mm pletter, med tydelig kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; humusfattig; mindre end 5 vol. %, alle størrelser sten, en blanding af tilstand og en blanding af form og typer uden kalk; mindre end 5 vol. % bløde noder, afrundede, Fe- og Mn-oxider & hydroxider (sorte); med en diameter mindre end 1 cm; nogle fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; moderat, grov, angulær struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; meget lidt plettet af moderat tykke coatings af lerminerale (+ sesquioxider) og humus i rodgange; gradvis bølget grænse. C(g) (115 - 180 cm): Gullig brun (10YR 5/4 fugtig) ler; moræneaflejringer; mange mere end 20 % lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; mindre end 5 vol. %, alle størrelser sten, en blanding af tilstand og en blanding af form og typer med kalk; mindre end 5 vol. % bløde + hårde noder, afrundede, Fe- og Mn-oxider & hydroxider (sorte); med en diameter mindre end 1 cm; stærkt kalkholdigt, overvejende klumper; massiv, meget grov, angulær struktur.			

Landbrugsdriftens indflydelse på jordbundsudviklingen har især haft betydning for jordens surhed de øverste horisonter. På trods af at der nogle steder findes kalkholdige lag allere-
de i 80 cms dybde, figur 1.5, er jorden blevet tilført landbrugskalk, der ses som klumper i
pløjelaget. I tabel 1.2 kan dette kun ikke ses på pH i pløjelaget der har en den laveste vær-
di af de målte horisonter ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: 7,3) men indholdet af Ca-base-ioner har en forhøjet vær-
di her der kan hidrøre herfra.

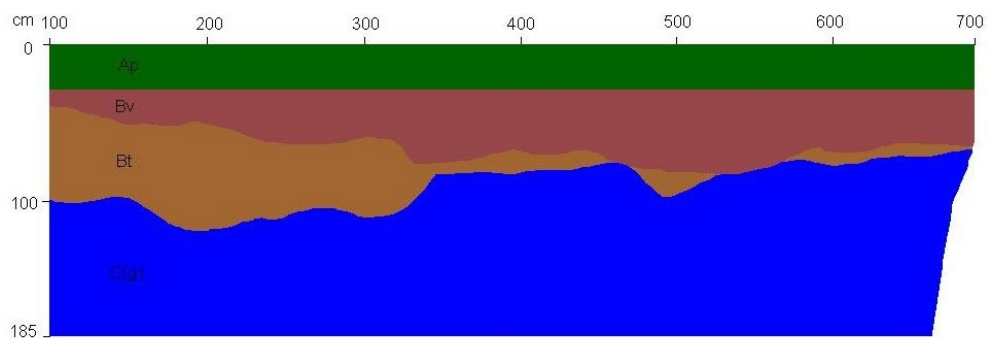
Tabel 1.2. Analyseresultater for Gjorslev, DJF profil nr. 3178.

KUPA nr.	Navn	Dybde cm	Kornstørrelsesfordeling (%)							Org. C %	Total N
			<2	2-20	20-63	63-125	125-200	200-500	0.5-2		
			μm						mm		
35001	Ap	10-20	16,9	18,1	15,1	14,6	14,9	11,1	6,7	1,54	0,17
35002	Bv	33-53	17,1	14,1	16,0	13,9	16,6	11,2	10,8	0,19	0,03
	C(g)	80-100	16,6	16,4	11,7	12,2	9,8	13,8	5,4	0,12	
35004	C1	205- 222	19,8	14,2	12,6	11,0	11	6,8	6,8	0,18	0,02
	C2	350- 370	18,9	14,1	12,4	11,4	12,6	7,4	6,0	0,18	-
	C3	465- 485	15,6	12,4	13,3	9,6	11,0	7,6	9,8	0,24	-

KUPA nr.	Ombyttelige kationer Cmol kg^{-1}							Base mætning	CaCO_3	pH (H_2O) 1:1	pH (CaCl_2) 1:2,5
	Ca	Mg	K	Na	Baser total	H^+	CEC Total	%			
35001	13,52	0,58	0,17	0,08	14,35	0,40	14,75	97	0	7,9	7,3
35002	9,29	0,36	0,13	0,09	9,87	1,13	11,00	90	0	8,3	7,4
									13,9		
35004	32,21	0,50	0,15	0,11	32,97	-	7,37	-	17,7	8,6	7,8



Figur 1.1. Skitse af profil fra Gjorslev.



Figur 1.2. Skitse af profil fra Gjorslev.



Figur 1.3. Foto af profil fra Gjorslev. Udsnittet er ca. 4 meter i længden og 80 cm i dybden.



Figur 1.4. Foto af profil fra Gjorslev. Udsnittet er 450 cm i længden og ca. 70 cm i højden.



Figur 1.5. Foto af profil fra Gjorslev. Nærbillede af regnormegange og jordstruktur. Fotoudsnittet er ca. 70 cm i dybden og ca. 350 cm i længden.

1.3 Højstrup lokaliteten

Ved Højstrup på Stevns blev der optegnet i alt 2 x 10 m pedologiske horisonter i de øverste jordlag, figur 1.6 og 1.8 samt vist i figur 1.7 og 1.9. Profilet er klassificeret efter det danske system (Madsen 1985) som en Pseudogley Typibrunjord pga. tilstedeværelsen af pseudogley og en Bv-horisont, tabel 1.3. På grund af den høje basemætning og da der ikke kan påvises lernedslemning bliver jorden en Phaeozem i FAO systemet. Med pseudogley indenfor de øverste 50 cm bliver jorden en stagnic Phaeozem.

1.3.1 Jordbundsudvikling

Jordbundsudviklingen i denne lerholdige jord er domineret af tre hovedprocesser; kalkudvaskning, forbruning og landbrugsdrift. Desuden er der tegn på en begyndende lernedvaskning der endnu er svagt udviklet.

Denne brunjord har en høj basemætning der primært udgøres af Ca^{2+} ioner, tabel 1.4. Der vil ikke ske en nævneværdig lernedslemning før saltkoncentrationen i jordvæsken med tiden er faldet til et lavere niveau. Der sker dog allerede nu en mekanisk flytning af en del af leret idet der er iagttaget tykke ler- og humus-belægninger i orme- og rodgange. I matrix og på aggregatoverfladerne er der derimod ikke iagttaget clayskins. Disse lodrette rod og ormegange findes fortrinsvis koncentreret i sprækkefladerne i jorden. Næsten sammenfaldende findes pseudogley striber, figur 1.7 og 1.9. Pseudogley og sprækker er en del af det kortlagte sprækkesystem der blev dannet under isens træk og tryk. Karbonat er udvasket i de øvre horisonter indtil ca. 85-120 cm. Grænsen for karbonatudvaskning er sammenfaldende med overgrænsen for C(g)-hoisonten, figur 1.6 og 1.8. Strukturen i jorden er grov subangulær over karbonatgrænsen og grov angulær der under. Marken er gennemdrænet hvilket kan ses som en udgravning med drænrør liggende i 115 cm, figur 1.6.

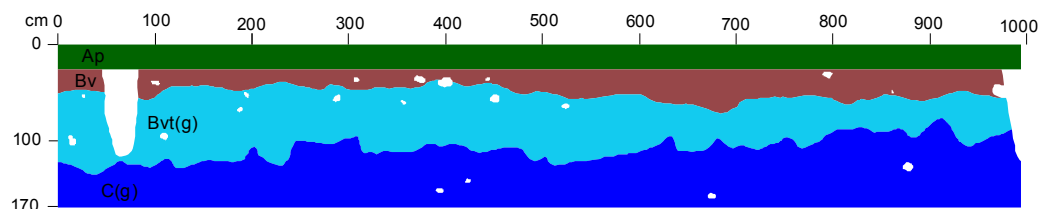
Tabel 1.3. Feltbeskrivelse, klassifikation og lokalitetsoplysninger for jordbundsprofil ved Højstrup (DJF profil nr. 3181).

Dansk jordklassifikation	Pseudogley Typi-brunjord	FAO Jordklassifikation	Stagnic Phaeozem
Landskabsform	Moræneflade	Dræningsklasse	Moderat veldrænet jord
UTM	6128630 711165	Profil dybde	160 cm
Beliggenhed	Flade	1.3.1.1 Grundvandsdybde	-
Kote	10 m	Vegetation	Stub
Terrænform	Flade	Beskriver	Søren Torp
Hældning	0 – 1 °	Dato	29-10-2002
Bemærkninger	Profilbeskrivelse lavet ved 0-1 m n.væg; jorden er drænet, rør ved 115 cm; C (g): rødder til 130 cm; typisk roddeybde 100 cm; 2-3: humus forede lodr. Ormegange; porer- og rod fyldte ormegange findes koncentreret i sprækkeflader (grå)2+3+(4); 4: jorden er gennemsat af microporer.		
	Horisontbeskrivelse		
	Ap (0 - 26 cm): Mørk grålig brun (10YR 4/2 fugtig) lerholdigt siltet sand; moræneaflejringer; humusholdig, 1 - 7 %; mindre end 5 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; hyppige fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; stærk, grov, angulær struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; abrupt jævn grænse.		
	Bv (26 - 43 cm) : Brun (10YR 5/3 fugtig) og teksturelle bånd af farven brun (10YR 5/3 fugtig); leret siltet sand; og bånd af lerholdigt siltet sand; moræneaflejringer; en del, 2-20 % stærk brune (7,5YR 5/8 fugtig) afrundede mellemstore, 5 - 15 mm pletter, med svag kontrast og diffus, større end 2 mm grænse; humusfattig; mindre end 5 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; nogle fine rødder; porer, 1 – 10 / dm2 som orme- og rodgange; moderat, grov, subangulær struktur; fugtig, klæbrig konsistens; meget lidt plettet af moderat tykke coatings af humus i rodgange; gradvis bølget grænse.		
	Bv(g) (43 - 85 cm): Lys oliven brun (2,5Y 5/3 fugtig), og teksturelle bånd af farven brun (10YR 5/3 fugtig); leret siltet sand; og bånd af lerholdigt siltet sand; moræneaflejringer; en del, 2-20 % stærk brune (7,5YR 5/6 fugtig) brogede store, større end 15 mm pletter, med tydelig kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; 5 - 15 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og typer uden kalk; 5 - 15 vol. % hårde noder, afrundede, Fe- og Mn-oxider & hydroxider (sorte); med en diameter mindre end 1 cm; nogle fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; moderat, grov, subangulær struktur; fugtig, svagt klæbrig konsistens; meget lidt plettet af moderat tykke coatings af humus i rodgange; klar bølget grænse.		
	C(g) (85 - 150 cm): Lys oliven brun (2,5Y 5/3 fugtig) og teksturelle bånd af farven stærk brun (7,5YR 5/8 fugtig); ler; moræneaflejringer; mange, mere end 20 % grålig brune (2,5Y 5/2 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; 5 - 15 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type med kalk; 5 - 15 vol. % bløde noder, angulære, Fe-oxider & hydroxider (røde); med en diameter mindre end 1 cm; stærkt kalkholdigt, overvejende klumper; få fine rødder; moderat, grov, angulær struktur; fugtig, svagt klæbrig konsistens.		

Tabel 1.4. Analyseresultater for Højstrup, DJF profil nr. 3181.

KUPA nr.	Navn	Dybde cm	Kornstørrelsesfordeling (%)							Org. C %	Total N
			<2	2-20	20-63	63-125	125-200	200-500	0.5-2		
			μm						mm		
46601	Ap	5-25	21,7	16,3	16,1	14,4	15,8	9,2	6,2	1,17	0,12
46603	Bv	28-48	24,7	14,3	16,9	12,2	13,8	9,2	8,4	0,32	0,05
46606	C	90-110	18,5	12,5	13,9	12,4	13,0	7,4	6,2	0,12	0,03
46607	C	170-190	18,5	13,5	20,0	12,0	13,4	8,4	6,2	1,18	-
46609	C	350	22,1	25,9	10,5	6,6	6	3,8	4,0	0,59	-

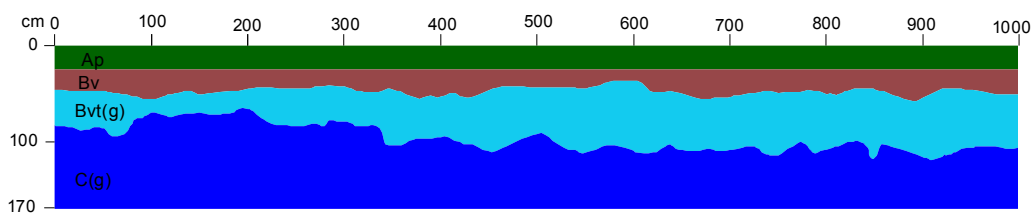
KUPA nr.	Ombyttelige kationer Cmol kg ⁻¹							Base mætning	CaCO ₃	pH (H ₂ O) 1:1	pH (CaCl ₂) 1:2,5
	Ca	Mg	K	Na	Baser Total	H ⁺	CEC total	%			
46601	12,68	0,44	0,20	0,26	13,58	-	12,93	-	0	8,0	7,5
46603	13,24	0,47	0,19	0,15	14,05	1,04	15,09	93	0	7,8	7,5
46606	33,96	0,63	0,15	0,10	34,84	-	9,12	-	15,9	8,6	7,7
46607	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
46609	-	-	-	-	-	-	-	-	20,1	-	-



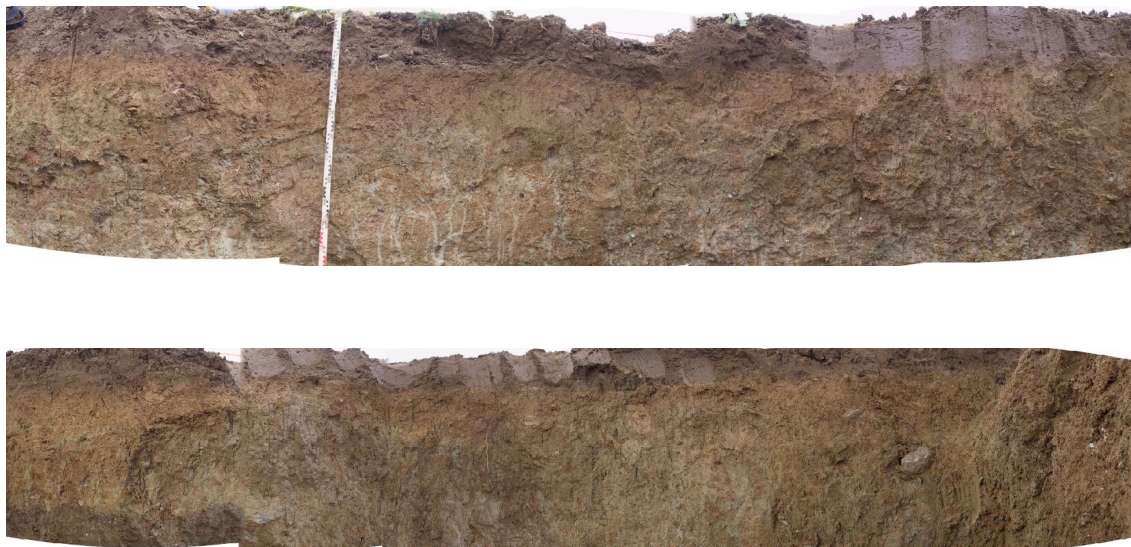
Figur 1.6. Skitse af profil fra Højstrup. De hvide felter er udgravninger i forbindelse med dræning, desuden er der indtegnet større sten (hvide pletter).



Figur 1.7. Foto af profil fra Højstrup



Figur 1.8 Skitse af profil fra Højstrup.



Figur 1.9 Fotos af profiler fra Højstrup. De to fotoudsnit er fra samme væg, men er af tekniske årsager opdelt i to. Øverste billede er ca. 120 cm i dybden og ca. 4 meter i længden. Det nederste billede er 150 cm i dybden og ca. 6 meter i længden.

1.4 Mammen lokaliteten

Ved Mammen er der optegnet i alt 14 meter pedologiske horisonter i de øverste jordlag, figur 1.9 og 1.10 samt vist i figur 1.12 og 1.13. Jordbundsprofilet ved Mammen er udviklet i lerholdige moræneaflejringer afsat af isen under Weichsel glaciationen. Profilet er klassificeret som en fragi brunjord pseudogley Typilessive efter det danske system (Madsen, 1985) pga. tilstedeværelsen af en diagnostisk Bt-horison, tabel 1.5. Efter FAO systemet (FAO, 1998) klassificeres jorden som en stagnic Luvisol, fordi der findes en diagnostisk argic-horison. Det ses ved tilstedeværelsen af ler-coatings på aggregatoverfladerne og i teksturspringet mellem horisonterne. Da der er tegn på temporær vandstuvning ved tilstedeværelsen af pseudogley tildeles prefix "stagnic".

1.4.1 Jordbundsudvikling

I jordbunden ved Mammen har de dominerende pedologiske processer været; karbonat-udvaskning, forbruning, lernedvaskning, fragipandannelse og landbrugsdrift. De jordbundsdannende processer ved karbonatudvaskning og forbruning er beskrevet for Gjorslev. Det skal dog nævnes at der ikke blev fundet moræneler med indhold af karbonat overhovedet

ved Mammen. Det er derfor svært at sige noget om jordens oprindelige indhold af karbonat.

I Mammen er jordbundsudviklingen mere moden end tilfældet var i Gjorslev. Analyseresultaterne, tabel 1.6, sammen med de fysiske iagttagelser, tabel 1.5, viser at der er sket en lernedvaskning til Bt-horisonten. Dette kommer dog ikke til udtryk i horisont navngivningen idet det kan diskuteres om ikke den overliggende Bv(g)-horisonten rettelig burde have heddet BE(g) eller BEv(g) ud fra sine fysiske træk. Mindre stærkt udvaskede partier af profilet har benævnelsen BE, figur 1.10 og 1.11.

Lernedvaskning kan opdeles i tre delprocesser; dispergering, transport og aflejring. Dispergering af ler er afhængigt af koncentration af salte i jorden. Især tilstedeværelsen af Ca^{2+} ionen har indflydelse på om lerminerallerne bliver mobile alt afhængigt af jordens pH værdi. Ved en pH på mellem 7 og 5 som netop er målt i jorden fra Mammen har lerminerallerne størst tilbøjelighed til dispergering hvorved udvaskningen kan foregå. Lerminerallerne udfældes igen når de på vej nedad møder jordvand med en højere koncentration af salte (Schachtschabel et al., 1989). Derved dannes en horisont beriget med lermineraller (Bt(g)) hvis udstrækning og variation kan ses på figur 1.10 og 1.11.

Det er observeret at mere end 50% af horisonten Bv(g) består af hærtnet fragipan. Jordhorisonten 27-65 cm består af hård fragipan der har en grov prismatisk struktur, tabel 1.5. Fragipan-dannelsen i jorden er sket mens jorden har været eksponeret for frost/tø og våd/tør-processer i perioder af den sidste istid hvor jorden har været uden isdække.

Med hævet pH i pløjelaget (Ap-horisonten) er jorden sandsynligt tilført jordbrugskalk selv om det ikke blev iagtaget direkte.

Tabel 1.5. Feltbeskrivelse, klassifikation og lokalitetsoplysninger for jordbundsprofil ved Mammen (DJF profil nr. 3179).

Dansk jordklassifikation	Fragibrunjord pseudogleyet typilessive	WRB jordklassifikation	Stacnic Luvisol
Landskabsform	Storbakket morænelandskab	Dræningsklasse	Meget veldrænet jord
UTM	6250860 539250	Profil dybde	
Beliggenhed	Meget svag skråning	Grundvandsdybde	500 cm
Kote	52 m	Vegetation	<ikke kendt>
Terrænform	<ikke kendt>	Beskriver	Søren Torp
Hældning	1 - 3 °	Dato	9-10-2002
Bemærkninger	Jordens øverste 70 cm var udtørret; beskrevet østvæg mellem 5 - 4 m; rødder til 130 cm; typisk rodde dybde 80 cm; rødder følger humusforede rodgange der har en diam. på 5-10 mm.		

Horisontbeskrivelse

Ap (0 - 27 cm): Meget mørk grålig brun (10YR 3/2 fugtig) lerholdigt siltet sand; moræneaflejringer; humusholdig, 1 - 7 %; mindre end 5 vol %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; meget hyppige fine rødder; lufttør, klæbrig konsistens; abrupt jævn grænse.

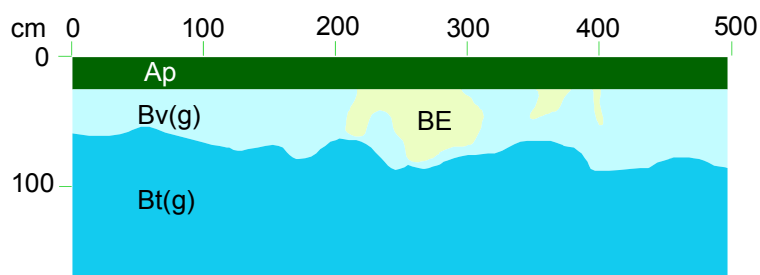
Bv(g) (27 - 65 cm): Gullig brun (10YR 5/4 fugtig), med indblanding af lys rødlig brun (2,5YR 6/3 fugtig) leret siltet sand; med indblanding af siltet sand; moræneaflejringer; mange, mere end 20 % lys grå (10YR 7/2 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; 5 - 15 vol %, små + mellem store sten, af blandet form, type og blandede tilstand uden kalk; mindre end 5 vol % bløde noduler, irregulære, Fe-oxider & hydroxider (røde) + Fe- og Mn-oxider; med en diameter større end 1 cm; hyppige fine rødder; porer, 10 - 40 / dm2 som orme- og rodgange; meget stærk, grov, prismatisk struktur; diskontinuert, mere end 50% er hårdt, af prismatisk fragipan; diffus bølget grænse.

Bt(g) (65 - 160 cm): Gullig brun (10YR 5/4 fugtig) ler; moræneaflejringer; en del, 2-20 % lys brunlig grå (10YR 6/2 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og diffus, større end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; mindre end 5 vol %, små + mellemstore sten, en blanding af tilstand og en blanding af form og typer uden kalk; mindre end 5 vol % bløde + hårde noduler, afrundede, Fe-oxider & hydroxider (røde) + Fe- og Mn-oxider; med en diameter mindre end 1 cm; meget få fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som andet; meget stærk, grov, subangulær struktur; fugtig, klæbrig konsistens; plettet af moderat tykke coatings af lerminerale (+ sesquioxider) i aggregatoverflader.

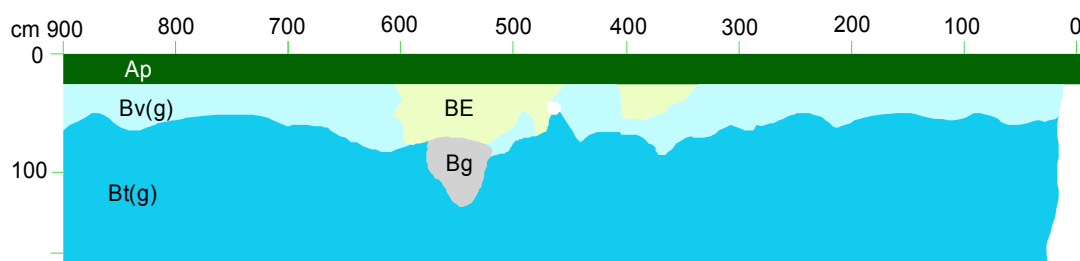
Tabel 1.6. Analyseresultater for Mammen, DJF profil nr. 3179.

KUPA nr.	Navn	Dybde cm	Kornstørrelsesfordeling (%)							Org. C %	Total N
			<2	2-20	20-63	63-125	125-200	200-500	0.5-2		
			μm						mm		
32315	Ap	5-23	11,2	14,3	13,9	15,2	16,6	14,9	10,5	1,98	0,16
32327	Bv	30-40	15,1	12,4	16,8	14,8	16,0	13,6	10,9	0,08	0,03
32328	Bt	110-130	19,5	9,0	11,8	19,2	17,4	12,8	10,2	0,04	0,02
	C	205-215	17,9	8,6	11,4	17,8	17,0	16,2	11,0	0,03	-
	C	340-360	11,3	6,7	10,9	12,0	22,3	22,1	14,6	0,01	-
	C	bund	3,6	0,9	2,9	3,4	21,7	45,0	22,5	1,98	-

KUPA Nr.	Ombyttelige kationer cmol kg^{-1}							Base mætning	CaCO ₃	pH (H ₂ O) 1:1	pH (CaCl ₂) 1:2,5
	Ca	Mg	K	Na	Baser total	H ⁺	CEC Total	%			
32315	6,80	0,68	0,13	0,11	7,72	0,85	8,57	90	0	7,5	6,7
32327	4,38	1,64	0,17	0,11	6,30	5,51	11,81	53	0	6,7	5,6
32328	3,64	2,18	0,16	0,12	6,10	1,48	7,58	80	0	6,6	5,4



Figur 1.10. Skitse af profil fra Mammen.



Figur 1.11. Skitse af profil fra Mammen.



Figur 1.12. Foto af profil fra Mammen. Udsnittet er ca. 65 cm i dybden og ca. 300 cm i længden.



Figur 1.13. Foto af profil fra Mammen. Nærbillede af en del af profilvæggen med regnorme-gange. Udsnittet er ca. 65 cm i dybden og ca. 250 cm i længden.

1.5 Grundfør lokaliteten

Ved Grundfør nord for Århus blev der optegnet i alt 15 m pedologiske horisonter i de øverste jordlag, figur 1.14 og 1.16 samt vist i figur 1.15 og 1.17. Profilet i Grundfør er klassificeret som en hærdnet brunjords pseudogley Degralessive efter det danske system (Madsen, 1985), tabel 1.7. På grund af pseudogley, tilstedeværelsen af clayskins og en diagnostisk lerudfældningshorisont klassificeres jorden som en cutanic stagnic Luvisol efter FAO systemet.

1.5.1 Jordbundsudvikling

Jordbundsudviklingen i den lerholdige jord i Grundfør er domineret af fire hovedprocesser; kalkudvaskning, forbruning, fragipandannelse og landbrugsdrift. I denne lerede moræneaflejring, figur 1.14 og 1.16, er det oprindelige karbonatindhold udvasket til bunden af udgravningen ved ca. 4 meter. Ved landbrugsdriften er der tilsat landbrugskalk til pløjelaget som giver et pH-profil med de højeste værdier i de øverste horisonter. I Grundfør findes pH værdier (målt i vand) mellem 6,6 og 5,7 med den laveste værdi i 150-170 cm, tabel 1.8.

Variationen i horisonterne kan ses på optegnelserne på figur 1.14 og 1.16. Bvm-horisonten ses som en mere eller mindre sammenhængende horisont i fra ca. 50–110 cm dybde. Suf-

fikset "m" står for en hærdnet og hård horisont også kaldet en "fragipan". I BCt-horisonten er der fundet tydelige tegn på pletning af lerminerale på aggregatoverfladerne, hvilket sammen med lerprocenten i horisonten sammenlignet med den overliggende horisont er et tydeligt tegn på lernedslemning. Pseudogleyen er så kraftigt udviklet i den øvre del så betegnelsen "glossic" er benyttet i navngivelsen. En "glossic-horisont eller "glossic interfinering" er tegn på en begyndende degradering af dele af en tidligere lerudfældningshorisont (FAO, 1998). Jordstrukturen skifter fra en svag medium subangulær struktur til en grov angulær struktur grænsende til det massive i bunden af profilet. Der var lagt drænrør af tegl i ca. 125 cm dybde, figur 1.16 og 1.17.

Tabel 1.7. Feltbeskrivelse, klassifikation og lokalitetsoplysninger for jordbundsprofil ved Grundfør (DJF profil nr. 3180).

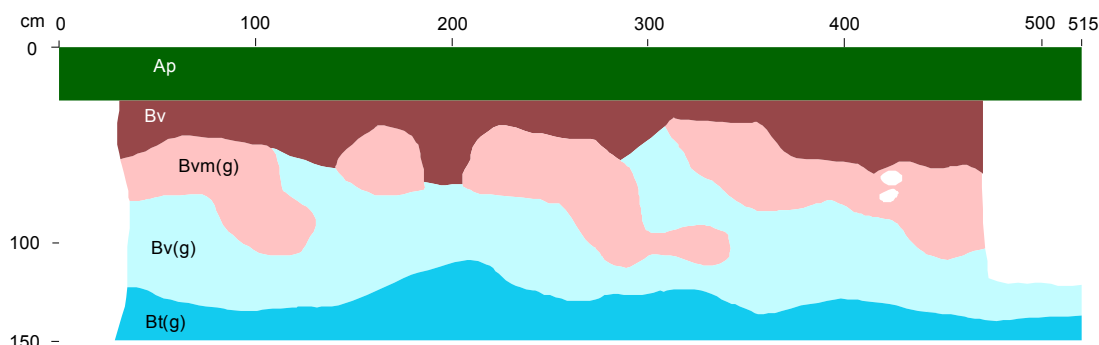
Dansk jordklassifikation	Hærdnet brunjords Pseudogleyet degralesive	FAO 1.5.1.1Jordklassifikation	cutanic stagnic Luvisol
Landskabsform	Moræneflade	Dræningsklasse	Moderat veldrænet jord
UTM	6237478 570173	Profil dybde	150
Beliggenhed	Meget svag skråning	Grundvandsdybde	-
Kote	60 m	Vegetation	Græs
Terrænform	Meget svagt kuperet	Beskriver	Søren Torp
Hældning	2 - 3 °	Dato	23-10-2002
Bemærkninger	Max roddybde 110 cm; typisk roddybde 50 cm; 3. lyse pseudogleystriber var mindre lerholdige end matrix (glossic); 2. Overgangen til Ap bestod af 20% humusfyldte ormegange.		
	Horisontbeskrivelse		
	Ap (0 - 27 cm): Meget mørk grålig brun (10YR 3/2 fugtig) leret siltet sand; moræneaflejringer; humusholdig, 1 - 7 %; mindre end 5 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form, type med kalk; jordbrugskalket, overvejende klumper; hyppige fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; svag, medium, subangulær struktur; fugtig, svagt klæbrig konsistens; abrupt jævn grænse.		
	Bv (27 - 40 cm): Brun (10YR 5/3 fugtig) leret siltet sand; moræneaflejringer; en del, 2-20 % stærk brun (7,5YR 5/8 fugtig) afrundede mellemstore, 5 - 15 mm pletter, med tydelig kontrast og diffus, større end 2 mm grænse; humusfattig; mindre end 5 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, type og former blandede uden kalk; hyppige fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; svag, medium, subangulær struktur; fugtig, svagt klæbrig og meget lidt plettet af moderat tykke coatings af humus i rodgange; gradvis bølget grænse.		
	Bvm(g) (40 - 84 cm): Gullig brun (10YR 5/4 fugtig) ler; moræneaflejringer; mange mere end 20 % bleg gul (2,5Y 7/3 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; mindre end 5 vol %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand form og type uden kalk; 5 - 15 vol. % bløde + hårde noder, afrundede, Fe-oxider & hydroxider (røde), med en diameter større end 1 cm; nogle fine rødder; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; moderat stærk, grov, kolumnar struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; diffus bølget grænse		
	Bv(g) (84 - 135 cm): Brun (10YR 5/3 fugtig) ler; moræneaflejringer; en del, 2-20 % lys gullig brun (2,5Y 6/3 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med fremtrædende kontrast og en klar, mindre end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; mindre end 5 vol %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; 5 - 15 vol. % bløde + hårde noder, afrundede, Fe-oxider & hydroxider (røde) + Fe- og Mn-oxider, med en diameter større end 1 cm; porer, 1 - 10 / dm2 som orme- og rodgange; moderat stærk, meget grov, angulær struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; diffus bølget grænse.		

	Horisontbeskrivelse – fortsat B Ct(g) (135 - 150 cm) : Gullig brun (10YR 5/4 fugtig) ler; moræneaflejringer; en del, 2-20 % lys gullig brun (10YR 6/4 fugtig) lodret stribede store, større end 15 mm pletter, med tydelig kontrast og diffus, større end 2 mm grænse; grålige gleyslirer på brun bund; humusfattig; mindre end 5 vol. %, små + mellemstore sten, af blandet tilstand, form og type uden kalk; 5 - 15 vol. % bløde noder, afrundede, Fe-oxider & hydroxider (røde) + Fe- og Mn-oxider; med en diameter mindre end 1 cm; massiv struktur; fugtig, meget klæbrig konsistens; meget lidt plettet af moderat tykke coatings af lerminerale (+ sesquioxider) på aggregatoverflader.
--	--

Tabel 1.8. Analyseresultater for Grundfør, DJF profil nr. 3180.

KUPA nr.	Navn	Dybde cm	Kornstørrelsesfordeling (%)							Org. C %	Total N
			<2	2-20	20-63	63-125	125-200	200-500	0.5-2		
			μm						Mm		
37277	Ap	5-25	12,2	13,3	15,9	17,9	17,9	12,1	8,0	1,56	0,14
37281	Bv	42-62	18,6	12,4	16,3	18,8	17,2	10,2	6,2	0,19	0,03
37282	BCt	150-170	19,4	11,6	11,1	23,2	18,2	10	6,4	0,13	0,03
	C	220-240	19,5	11,5	17,1	18	18,2	9,8	5,8	0,05	-
	C	350-370	12,2	13,3	15,9	17,9	17,9	12,1	40,8	0,01	-

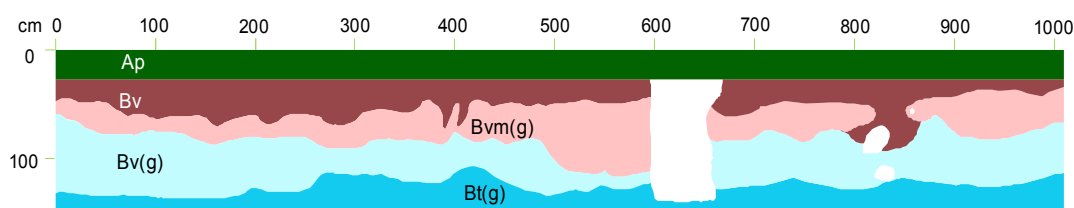
KUPA nr.	Ombyttelige kationer							Base mætning	CaCO ₃	pH (H ₂ O) 1:1	pH (CaCl ₂) 1:2,5
	Ca	Mg	K	Na	Baser Total	H ⁺	CEC total				
37277	6,24	0,54	0,18	0,15	7,11	2,08	9,19	77	0	7,2	6,6
37281	5,02	0,28	0,18	0,14	5,62	1,58	7,20	78	0	7,8	6,6
37282	4,74	2,18	0,15	0,14	7,21	2,31	9,52	76	0	6,7	5,7



Figur 1.14. Skitse af profil fra Grundfør med horisontinddeling. De hvide pletter er større sten.



Figur 1.15. Foto af profil fra Grundfør. Udsnittet svarer til den i figur 1.14 viste profilskitse.



Figur 1.16. Skitse af profil fra Grundfør.



Figur 1.17. Foto af profil fra Grundfør. Udsnittet svarer til profilskitzen vist i figur 1.16.

1.6 Pedologiske forskelle og ligheder ved lokaliteterne

De to sjællandske og de to østjydske morænejorder har gennemgået typiske jordbundsudviklinger ved sammenligning med kendte jorder fra tidligere undersøgelser (Sundberg et al. 1999). I alle jorder er kalken fjernet fra de øverste horisonter. Mammen adskiller sig herfor ved at kalken også er fjernet i den nederste del af morænen, til ca. 4 meter. Morænelerens oprindelige karbonatindhold kan der således kun gættes på.

De to moræner på Stevns ligner hinanden teksturelt med lerprocenter på 16-24 % i horisonterne. De østjydske moræner har et lavere indhold af ler (11-19%) og teksturelt ligner de indbyrdes hinanden.

Landbrugsdriften med det humusholdige pløjelag dominerer epipedonen. Indholdet af organisk carbon i epipedonen ligger på Højstrup på 1,17%, Gjorslev 1,56%, Grundfør 1,56% og Mammen 1,98%. Det niveau for kulstofindholdet viser at alle jorder har god omsætning

og at der ikke finder opbygning af morlag og lign. sted. De hyppige lodretgående regnormegange er det synlige tegn på stor biologisk aktivitet i jorderne.

For alle jorder gælder at forbruning er den dominerende jordbundsdannende proces. Efter udvaskningen af kalk i jorden beriges jorden af jernoxider ved forvitring af primære jerneholdige mineraler. Sammen med humusstoffer der transporteres ned fra oven dannes metaorganiske komplekser der giver B-horizonten sin karakteristiske brune farve.

I alle jorder er der mere eller mindre tegn på lernedvaskning og undeliggende lerakkumulering i en udfældningshorisont. I Højstrup og i Gjorslev er denne proces kun meget svagt erkendbar med coating af lermineraller og humus i ormegangene. I Grundfør og Mammen kunne der iagttages lercoatings på aggregatoverfladerne hvilket er et tydeligt tegn på lerbevægelse i profilet.

Dræningstilstanden i jorderne præges af det lerholdige udgangsmateriale. Pseudogley viser at jorden temporært mættes med vand i fugtige perioder. Det forgår eller har forgået de steder hvor jorden er kunstigt drænet.

I Mammen og Grundfør blev der observeret horisonter der bestod af hærdnet fragipan, der er karakteristisk ved at være svært gennemtrængelig for rødder og ved at have en høj volumenvægt.

1.7 Litteratur

Barlebo, H.C. 2002a. KUPA projektet – koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer. Geologi, nyt fra GEUS, Nr. 2 august 2002.

Barlebo, H.C. 2002b. Undersøgelser- og analysemetoder anvendt i forbindelse med undersøgelser af sandlokaliteter: Hvilke metoder er anvendt, og hvilke overvejelser er gjort? Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer. Rapport nr. 2, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet. ss. 62,

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998: World Reference Base for Soil Resources – World Soil Resources Reports 84, Rome 1998.

Madsen, H. B. og N. H. Jensen. 1985. Jordprofilundersøgelsen – Landbrugsministeriet, Arealdatakontoret Vejle.

Schachtschabel, P, H.-P. Blume, G.Brümmer, K.-H.Hartge, U.Schwertmann. 1989. Lehrbuch der Bodenkunde – Ferdinand Enke verlag Stuttgart.

Sundberg, P.S. I. Callesen, M. H. Greve og K. Raulund-Rasmussen. 1999. Danske jordbundsprofiler. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Danmarks JordbrugsForskning.

Walker, A. 2003. Adsorption and degradation: From the laboratory to the real World. In: A.A.M. Del Re, E. Capri, L. Padovani, M. Trevisan (Eds.). Pesticide in Air, Plant, Soil & Water system. Proceedings of the XII Symposium Pesticide Chemistry, June 4-6, 2003, Pienza – Italia.

2. Undersøgelse af de geologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør

Knud Erik S. Klint (GEUS)

2.1 Indledning

Den geologiske variabilitet inden for undersøgelsesområderne er af afgørende betydning for zoneringsstrategien. Det store spørgsmål er om områder med relativt ensartet geomorfologisk opbygning og geologisk lagfølge også har ensartede geokemiske/hydrauliske egenskaber (flow binding og nedbrydning). På forhånd er der udvalgt to områder med meget ensartet geomorfologisk/geologisk opbygning på Stevns (moræneflade domineret af moræneler over kalk) og to områder med relativt ensartede geologiske forhold i Midtjylland (bølget moræneflade med moræneler over smeltevandssand).

2.2 Formål

Morænelerets hydrauliske egenskaber bestemmes dels af matrix egenskaber (permeabilitet og porøsitet) og dels af udbredelsen af makropore (sprækker og biopore) i matrix. Makropore har vist sig at have stor betydning for transport af pesticider fra overfladen til underliggende grundvandsmagasiner. Det er derfor nødvendigt at foretage en detaljeret opmåling af makroporeudbredelsen i moræneler for at kunne opstille en realistisk hydraulisk model for et givet område.

Formålet med denne del af undersøgelserne er at opstille en overordnet geologisk model for de enkelte områder, samt at beskrive fordelingen og genesen af sedimenter og makroporer (sprækker og biopore) på de enkelte lokaliteter. Disse data indgår i tolkningen af mulige strømningsveje fra overfladen og ned til grundvandet.

2.3 Metode

Ved hjælp af lithologiske karakteristika kan moræneler klassificeres og indplaceres i et glacialt aflejringsmiljø. Dernæst kan sprækkerne i første omgang opdeles i systematisk eller ikke-systematiske sprækkesæt ud fra deres orientering og dybdevariation, og endelig kan de overordnede sprækkeparametre (sprækkedensitet og dybde) beregnes.

Variationer i opsprækningen af sedimenterne vil ofte hænge sammen med variationer i sedimentets sammensætning, konsolidering lagtykkelse, tektonisk udviklingshistorie og topografiske variationer. Alle disse parametre bør derfor inddrages i vurderingen af sprækkeudviklingen.

2.3.1 Geologisk undersøgelsesmetode

De geologiske undersøgelser omfatter bjergartsbeskrivelse efter Larsen et al. (1995), og kinetostratigrafiske undersøgelser efter Bertelsen (1978), der indbefatter beskrivelse af bjergarternes kornstørrelsesvariation, tekstur, sedimentære strukturer, farve, kalkindhold samt måling og beskrivelse af deformationer, skurestriber, fabrik m.m.

2.3.2 Geotekniske undersøgelsesmetoder

Specielt de belastningsmæssige forhold anses for at have stor betydning for dannelsen af sprækker, og det er derfor vigtigt, at belyse, om det undersøgte moræneler er afsat foran eller under en gletscher, samt i hvilken retning gletscheren bevægede sig. Til det benyttes en række metoder der indbefatter geomorfologisk analyse af landskabet, geotekniske analyser af morænelerets styrkeparametre, teksturelle og petrografiske analyser af matrix, og sidst men ikke mindst analyser af deformationer i selve moræneleret. Ved hjælp af disse metoder kan moræneleret og dets aflejningshistorie udredes. Til bedømmelse af styrkeforhold blev der udført CPT-test ved hjælp af et såkaldt håndpenetrometer for hver 10 cm fra overfladen til bunden af udgravningerne. Der blev udtaget prøver til sigteanalyse og bestemmelse af kalkindhold i matrix.

2.3.3 Till klassifikation og stratigrafi

Termen moræneler benyttes bredt om lerede dårligt sortererede sedimenter, der er aflejret i et glacialt miljø. Der findes imidlertid mange forskellige glaciale miljøer hvorunder moræneler kan aflejres. Det er derfor nødvendigt at lave en detaljeret analyse af moræneleret og klassificere det.

For at kunne lave en yderligere opdeling i specielle aflejningsmiljøer og processer relateret til bestemte isfremstød benyttes her den engelske procesrelaterede term "till" i stedet for moræneler. Till er sedimenter direkte afsat fra en gletscher (iskontaktsediment), enten som en basal till under gletscheren som *deformation till*, *lodgement-till* eller "*subglacial melt-out-till*" (bundmoræne), eller oven på isen (supraglacialt), ved uds melting og nedglidning fra selve isen som *meltout* eller *flow-till* (flydemoræne)

Generelt skelnes der i denne opgave ikke imellem de forskellige typer basale tills, men deres interne deformationsmekanisme er afgørende for dannelse af sprækker og der skelnes derfor imellem to typer till: A-type der er deformeret blødt "ductile" og B-type der er deformeret sprødt "Brittle".

De fleste till-aflejringer kan henføres til bestemte gletscherfremstød i den sidste istid (Weichsel-istiden) der sluttede for ca. 10.000 år siden. Danmark blev i den periode overskredet af gletschere fra flere retninger, men specielt de sidste tre fremstød fra henholdsvis NØ (Hovedfremstødet ca. 20.000-15.000 år siden) og SØ (to Ungbaltiske fremstød ca. 15.000-13.500 år siden) præger de fleste områder i dag (Houmark-Nielsen, 1987).

2.4 Feltarbejde

Alle feltundersøgelser blev foretaget på frisk-gravede profilvægge i store udgravninger der blev specielt designet til formålet. Profilvæggene blev skrabet rene og alle sprækker frigra-
vet ved hjælp af kniv og murske. For at undgå sprækker dannet i forbindelse med udgrav-
ningsarbejdet, blev kun sprækker der angiveligt har været hydraulisk aktive beskrevet, dvs.
sprækker der har en eller anden form for overfladebelægning eller udfyldning. Sprækkerne
opmålt derefter i forhold til fastsatte referencepunkter og følgende data blev indsamlet
på hver sprække:

2.4.1 Fysiske data

- *Sprække position (placing)*: Benyttes til at rekonstruere sprækkerne på et geologisk profil for bereg-
ning af sprække frekvens og intensitet (antal parallelle sprækker pr. m).
- *Sprækkesystem/orden*: Det har vist sig praktisk at dele sprækker op i 1^{ste}, 2^{den} og 3^{die} ordens spræk-
ker samt systematisere tydelige sæt af ensartede parallelle sprækker.
- *Sprækkeorientering*: Måles med et kompas og benyttes til rekonstruktion af profil, samt ved bereg-
ning af sprækkeintensitet, sprækkefrekvens og opdeling af sprækkesystemer.
- *Sprækkestørrelse*: Den "synlige" minimums størrelse af sprækkerne måles (længde/dybde).
- *Sprækkeform*: Beskrives og benyttes til at karakterisere og klassificere sprækker.

2.4.2 Kemiske og biologiske data

Beskrivelse af kemiske og biologiske parametre, der kan have indflydelse på eller afspejle
den hydrauliske ledningsevne er vigtige, og derfor beskrives flg. parametre:

- *Dybde til kalkgrænse og redoxgrænse*: Afspejler forvitringsgrad/hastighed og hænger ofte sammen
med densiteten af makropore.
- *Overfladeudfældninger på sprækker*: Afspejler sandsynligvis kemiske forhold og hydraulisk aktivitet i
sprækkerne.
- *Rødder på sprækkeoverflader*: Afspejler sandsynligvis sprækkes hydrauliske ledningsevne, og der-
med åbningsdiameteren. Større rodhuller kan påvirke den hydrauliske ledningsevne i jorden ved at
virke som kanaler.
- *Regnormehuller og andre grave gange*: Har stor betydning særligt i den øverste meter af profilerne.

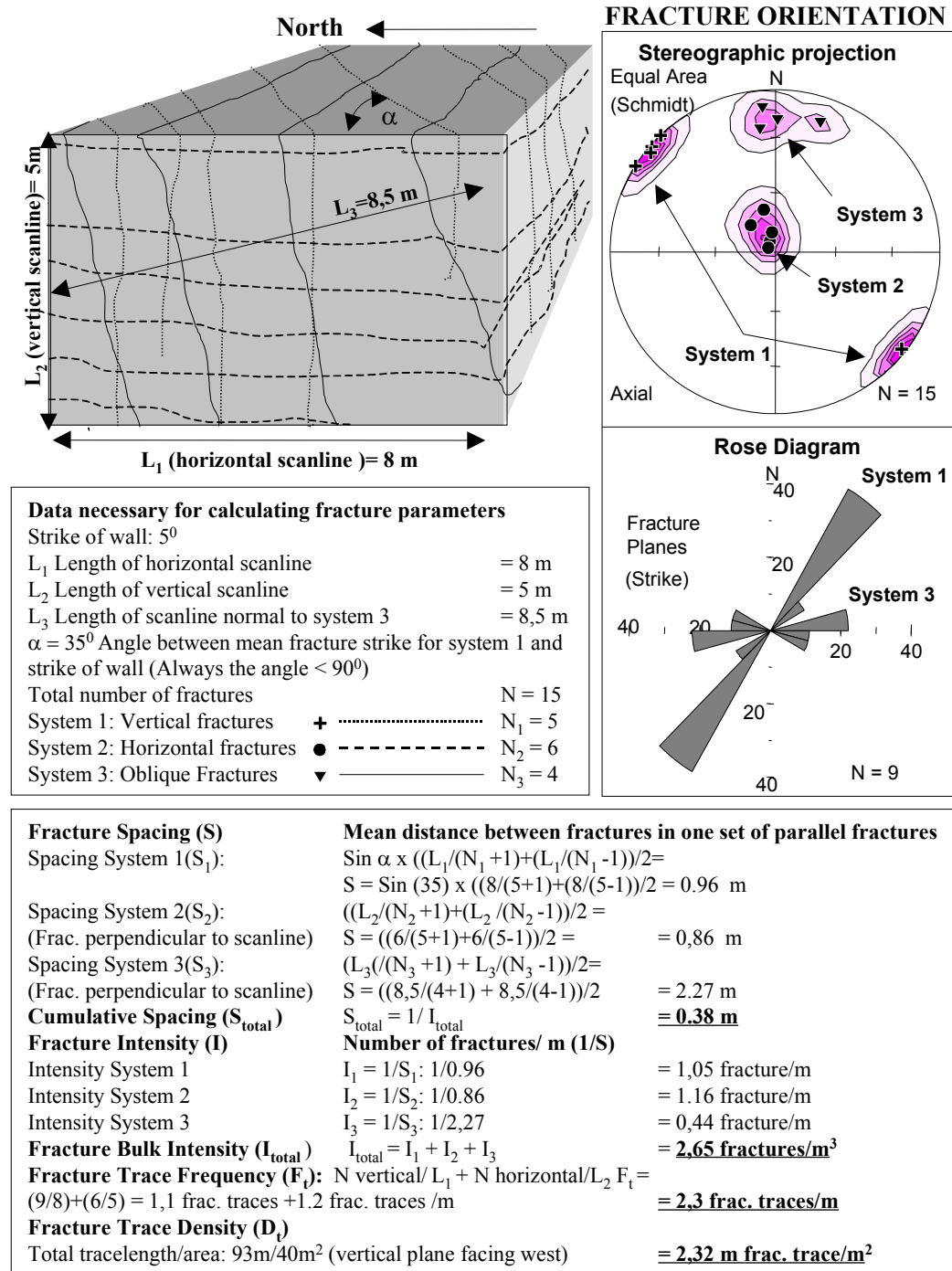
2.4.3 Beregning af sprækkeparametre

De væsentligste sprækkeparametre i flowmodeller er sprækkeapertur (åbningsdiameteren)
og sprækkeintensiteten. Derudover benyttes orientering, spacing, frekvens og densitet af
sprækker, figur 2.1.

- *Sprække orientering* har betydning for foretrukne flowretning. Orienteringen illustreres ved hjælp af
stereografiske projektioner, figur 2.1.
- *Sprække spacing (S)* er den gennemsnitlige afstand imellem sprækker i et sprækkesæt. I områder
med tilfældig orientering af sprækker er det vanskeligt at måle en decideret spacing.
- *Sprækkeintensitet (I)*: $1/S$ (antal sprækker pr m) spacing omregnes normalt til sin reciprokke værdi
sprækkeintensiteten ($1/S$), der lettere kan illustreres i f.eks. rosediagrammer eller indgå i beregnin-
ger. Intensiteten angives normalt som antal sprækker pr/m for et sprækkesæt, men en samlet spræk-

keintensitet for et givet jordvolumen kan angives ved at lægge alle intensiteter fra hvert enkelt sprækkesæt sammen og derved angive det totale antal sprækker pr m³.

- *Sprækkespors frekvens (N/Lw)* beskriver antal sprækkespor pr m i et bestemt dybde niveau. Metoden er hurtig og derfor velegnet til at beskrive den generelle *variation af opsprækning*.

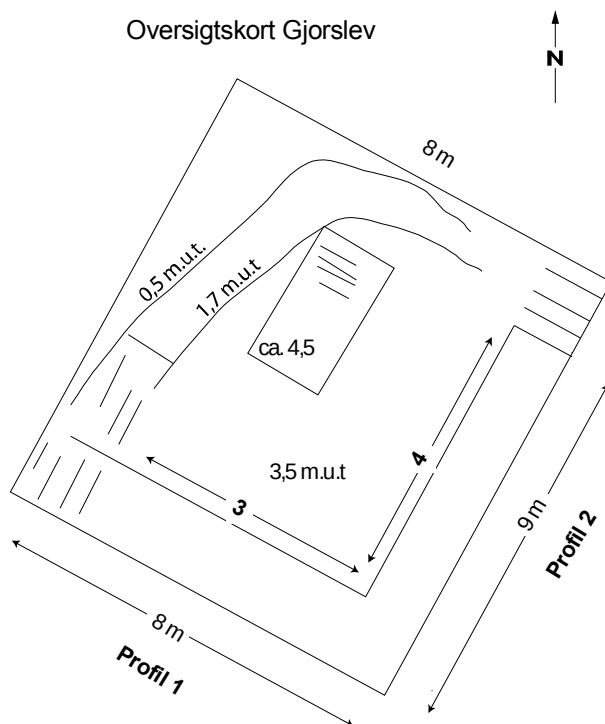


Figur 2.1. Beskrivelse af metode til beregning af sprækkeparametre der kan indgå som input parametre i numeriske hydrauliske modeller.

2.5 Gjorslev lokaliteten

2.5.1 Områdets geologiske opbygning

Området omkring Gjorslev er domineret af udstrakt svagt bølget moræneflade, med 7 til 15 meter moræneler direkte overlejrende primært opsprækket Bryozokalk. Denne type moræneflade er karakteristisk for det meste af sydøst Sjælland, herunder Stevns og området omkring Køge. Morænefladen er meget ensartet og plan kun afbrudt af mindre lavninger ned imod specielt Tryggevælde å. Der fornemmes dog en vis strømlining af landskabsformen i en Ø-V retning på topografiske kort. Længere imod nord ved Køge ses flere karakteristiske åse der angiver englaciale/subglaciale flodløb i tidligere gletsjere. Alt i alt kan området betegnes som et klassisk bundmoræneområde. Til belysning af områdets geologiske opbygning blev der udført en ca. 8 x 9 meter stor og 4.5 meter dyb udgravning, figur 2.2.



Figur 2.2. Oversigt over udgravning ved Gjorslev

2.5.2 Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 meter under terræn: Muld

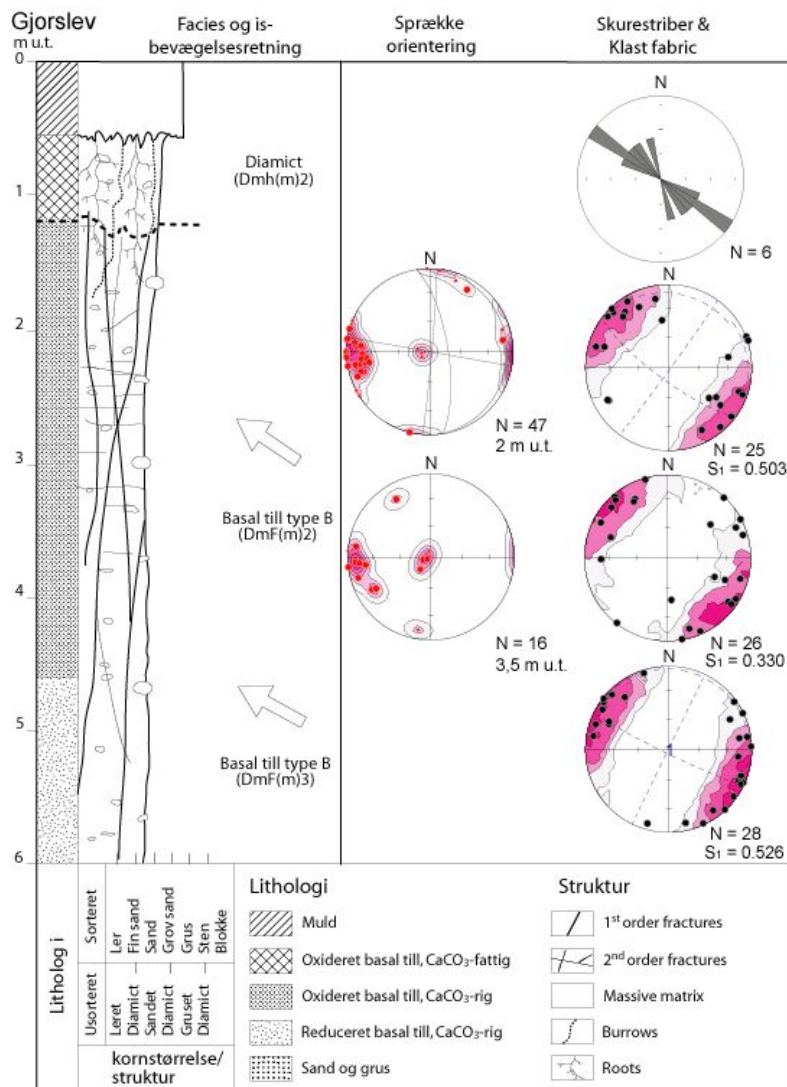
0,5 - 1,4 meter under terræn: Moræneler, siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt, olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

1,4 - 4,5 meter under terræn: Moræneler, siltet, sandet, svagt gruset, stenet, mange kalkklaster, general massiv matrix men optræder "fissil" i zone fra 2-2,5 meter under terræn olivenbrunt (2.5 Y/5/4) stærkt kalkholdig.

> 4, 5 meter under terræn: Moræneler, siltet, svagt sandet, svagt gruset, få sten, massiv matrix, olivengrå, stærk kalkholdig.

2.5.3 Till klassifikation

Som det fremgår af figur 2.3 blev der målt fabric analyse i tre dybdeintervaller 2, 3.5 og 5 meter under terræn. Der ses en signifikant orientering af langstrakte klaster med en fortrukken orientering SØ-NW. Der blev ligeledes målt skurestriber på større klaster. Også her fremstår en foretrukken retning SØ-NV. Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshearede kalkslire og kalkklaster er moræneleret tolket afsat som en basal till under en gletsjer der har overskredet området fra SØ imod NV. Moræneleret kan derfor klassificeres som en basal till. type B (Klint, 2001). Fremstødet korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987)

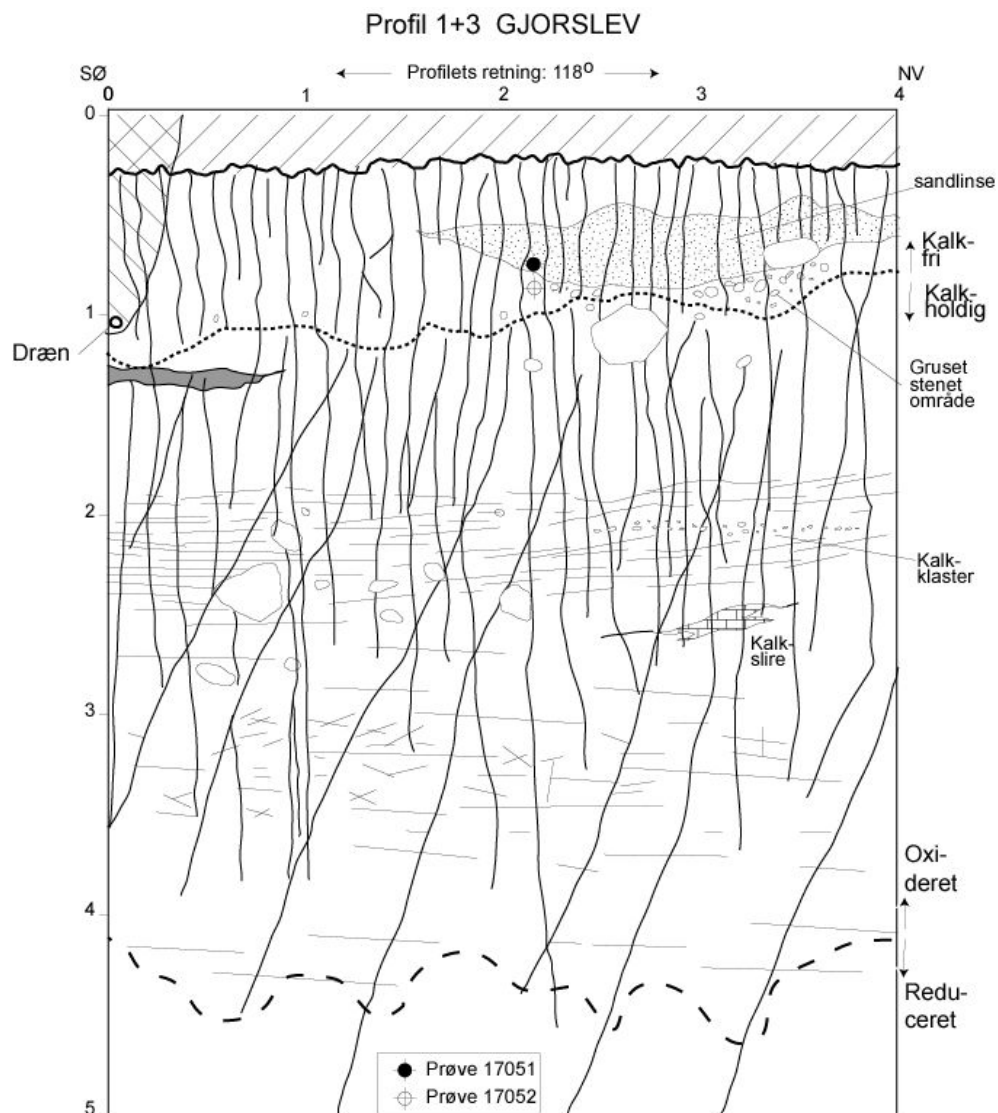


Figur 2.3. Lithologisk log med sprække og klast fabrik data fra Gjorslev.

2.5.4 Makroporefordeling

Der optræder mange rodgange og regnormehuller i den øverste meter (300-500 m² i 75 cm dybde) aftagende fra ca 1 –1,4 meter under terræn. I den øverste del og aftagende ned til ca 2 meters dybde optræder vertikale udtørningssprækker med tilfældig strygning, ellers dominere to sprækkesystemer området, figur 2.3 og 2.4.

1. System 1 består af systematisk orienterede stejltstående sprækker med en overvejende N-S strygning. Systemet består af to konjugerede sæt hvoraf det ene hælder 70-80 grader imod øst og det andet er mere eller mindre vertikalt. Sprækkerne optræder systematisk i hele udgravningen med en spacing på ca 10 cm i 2 meters dybde aftagende til ca 50 cm i 4 meters dybde og ca 1,5 meter i 5 meters dybde.
2. System 2 består af subhorizontale sprækker med vekslende spacing. Specielt imellem 1,8-3,5 meters dybde optræder disse sprækker meget tæt med spacing på 1-4 cm. Imellem 3,5 og 4 meters dybde øges spacingen til 4-10 cm og under 4 meter er till'en stort set massiv.

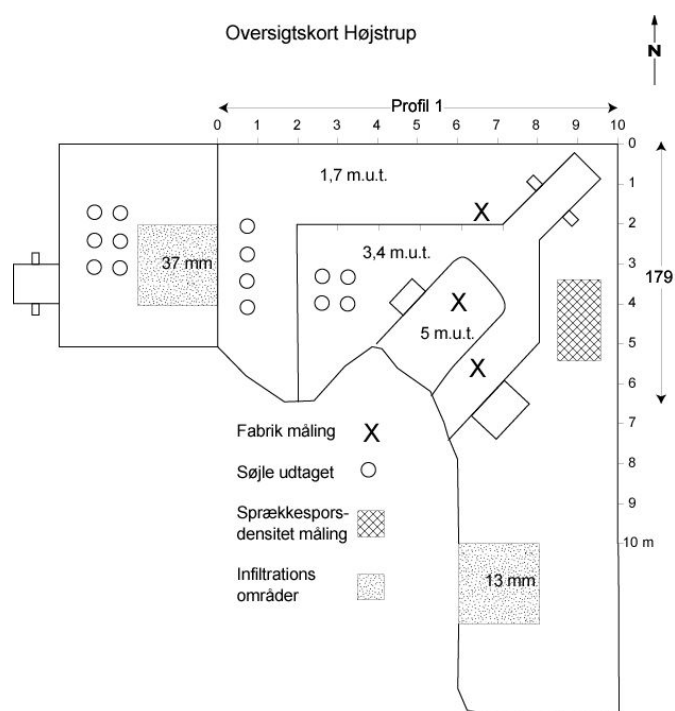


Figur 2.4. Makroporer fordeling i profil fra Gjorslev.

2.6 Højstrup lokaliteten

2.6.1 Områdets geologiske opbygning

Området ved Højstrup befinder sig i samme geomorfologiske landskabselement som Gjorslev nemlig morænefladen. Den geologiske lagfølge i området er stort set identisk med Gjorslev med moræneler overlejrende bryozokalk og med stedvise sandlinser indlejret i moræneleren. Til belysning af områdets geologiske opbygning blev der udført en ca. 10 x 10 meter stor og 5 meter dyb udgravning, figur 2.5.



Figur 2.5. Oversigt over udgravningen ved Højstrup.

2.6.2 Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 meter under terræn: Muldlag

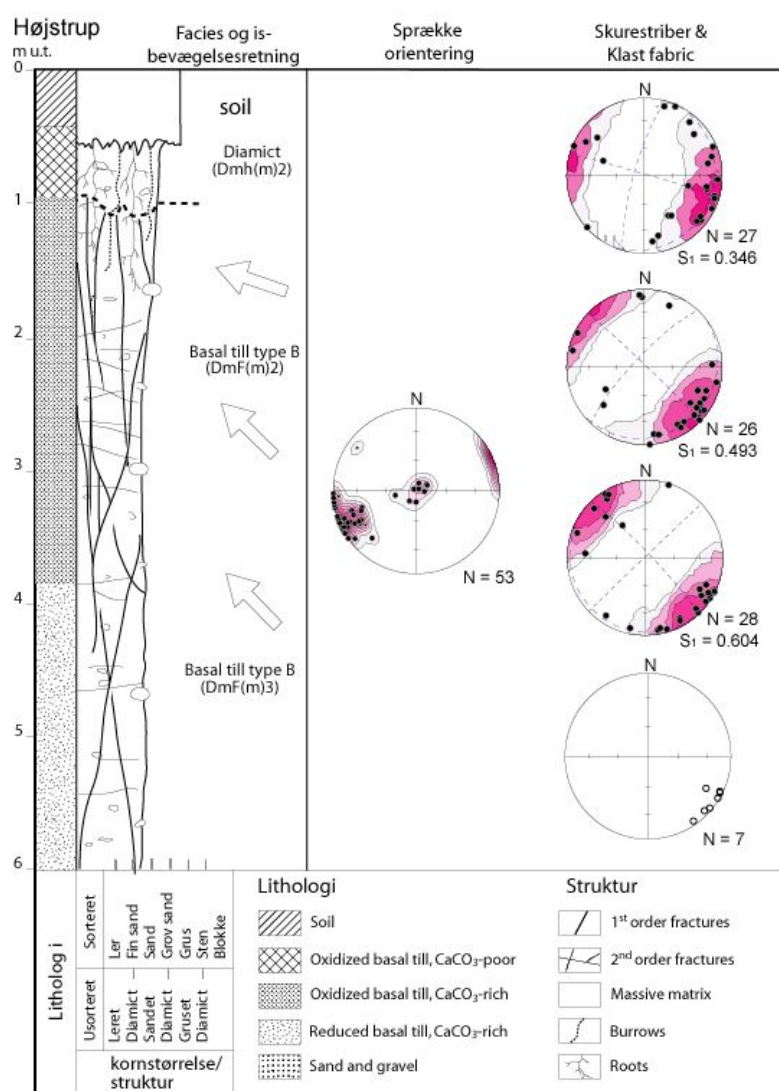
0,5 - 1,2 meter under terræn: Moræneler, svagt siltet, svagt sandet, svagt gruset, enkelte sten, massivt, mørk olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

1,2 – 3,3 meter under terræn :Moræneler, svagt siltet, svagt sandet, svagt gruset, enkelte sten, mange kalk-klaster, general massiv matrix men matrix optræder "fissil" i zone fra 1,8-2,3 meter under terræn, olivenbrunt (2.5 Y/5/4) stærkt kalkholdig.

> 3, 3 meter under terræn: Moræneler, svagt siltet, svag sandet, svagt gruset, få sten, mange kalk-klaster, massiv matrix, olivengrå, stærk kalkholdig.

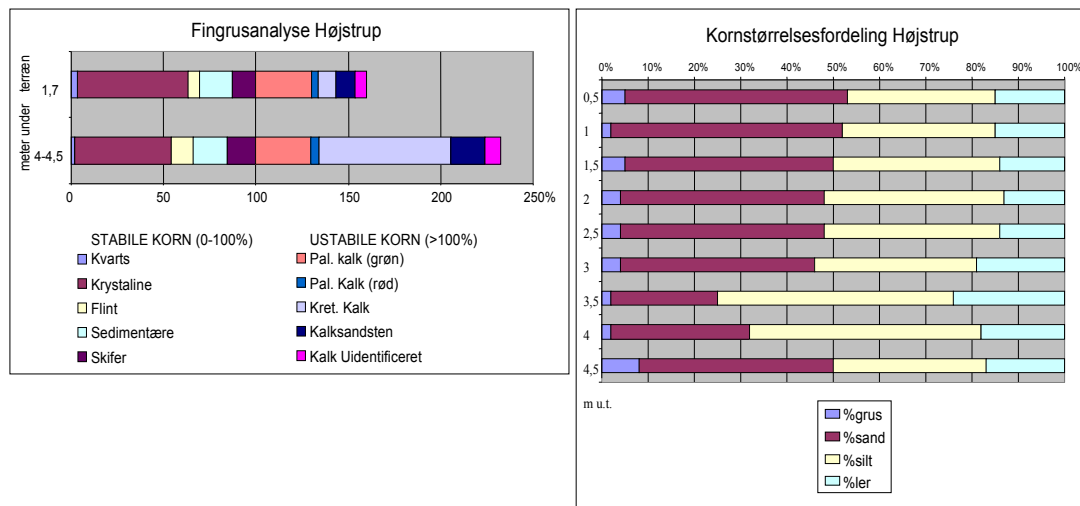
2.6.3 Till klassifikation

Som det fremgår af figur 2.6 blev der målt fabric analyse i tre dybdeintervaller 1,7 – 3,4 og 5 meter under terræn. Der ses en signifikant orientering af langstrakte klaster med en fortrukken orientering SØ-NW i de to nederste niveauer imens den øverste måling ikke var signifikant. Der blev ligeledes målt skurestriber på større klaster. Også her fremstår en fortrukken retning SØ-NV. Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshearede kalksire og kalkklaster er moræneleret tolket afsat som en basal till under en gletsjer der har overskredet området fra SØ imod NV. Der blev derudover lavet fingrusanalyse på to prøver i henholdsvis 1,7 m under terræn og 4,5 m under terræn samt kornstørrelses variation for hver 50 cm., figur 2.7. Som det fremgår er der et generelt stort indhold af palæozoisk kalksten i begge prøver hvorimod indholdet af kretasisk kalksten og flint er væsentligt højere i den dybeste prøve. Fingrusindholdet antyder at begge prøver stammer fra et baltisk fremstød og forskellen i indholdet af lokale kalksten kan tilskrives afstanden til den underliggende kalksten, idet der naturligt vil være et større indhold af lokale klaster jo tættere man kommer det underliggende basement.



Figur 2.6. Lithologisk log med sprække og klast fabric data fra Højstrup.

Moræneleret kan derfor klassificeres som en basal till, type B (Klint, 2001). Fremstødet korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987). Der sker et markant skift i siltindholdet ca. 3 m under terræn, og der er en mulighed for at den baltiske till kan opdeles i to underenheder, men dette kan også skyldes en ændring i de hydrauliske forhold under isen i forbindelse med afsætningen af till'en. Sprækkernes orientering antyder derimod at der er sket en ændring i isbevægelsesretningen hen imod slutningen af glaciationen, idet sprækkerne antyder en isbevægelsesretning imod NNV i slutfasen af glaciationen.

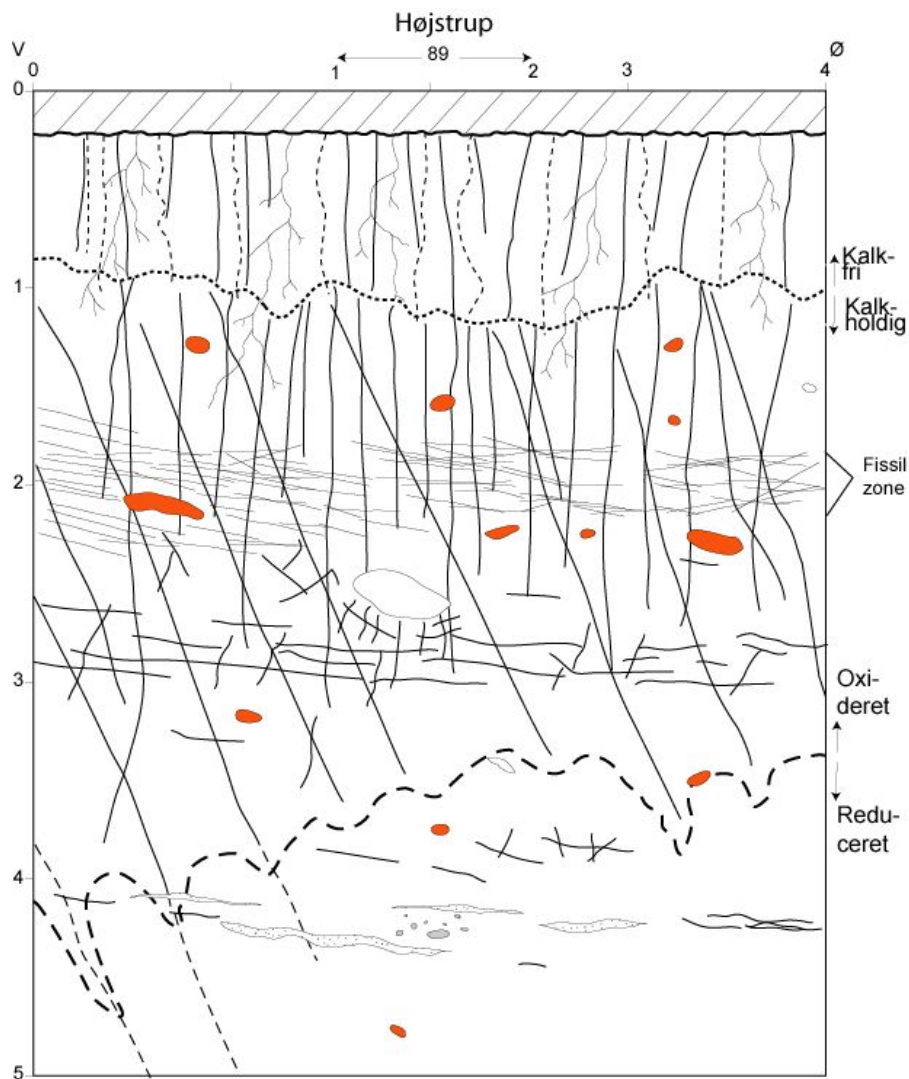


Figur 2.7. Fingrusanalyse samt kornstørrelsesvariation for hver 50 cm med dybden ved Højstrup.

2.6.4 Makroporefordeling

Der optræder mange rodgange og regnormehuller i den øverste meter (300-500 m² i 75 cm dybde) aftagende fra ca. 1 –1,4 meter under terræn. I den øverste del og aftagende ned til ca 2 meters dybde optræder vertikale udtørringssprækker med tilfældig strygning, ellers dominere to sprækkesystemer området, figur 2.6 og figur 2.8.

1. System 1 består af systematisk orienterede stejltstående sprækker med en overvejende NNV-SSØ strygning. Systemet består af to konjugerede sæt hvoraf det ene hælder 70-80 grader imod Ø-NØ og det andet er mere eller mindre vertikalt. Sprækkerne optræder systematisk i hele udgravningen med en spacing på ca 12 cm i 2 meters dybde aftagende til ca 50 cm i 4 meters dybde og ca 2 meter i 5 meters dybde.
2. System 2 består af subhorizontale sprækker med vekslende spacing. Specielt imellem 1,8-2,3 meters dybde optræder disse sprækker meget tæt med spacing på 1-4 cm. Længere nede øges spacingen til 2-8 cm og under 3,7 meter er till'en stort set massiv.



12



Figur 2.9. Oversigt over udgravning ved Mammen.

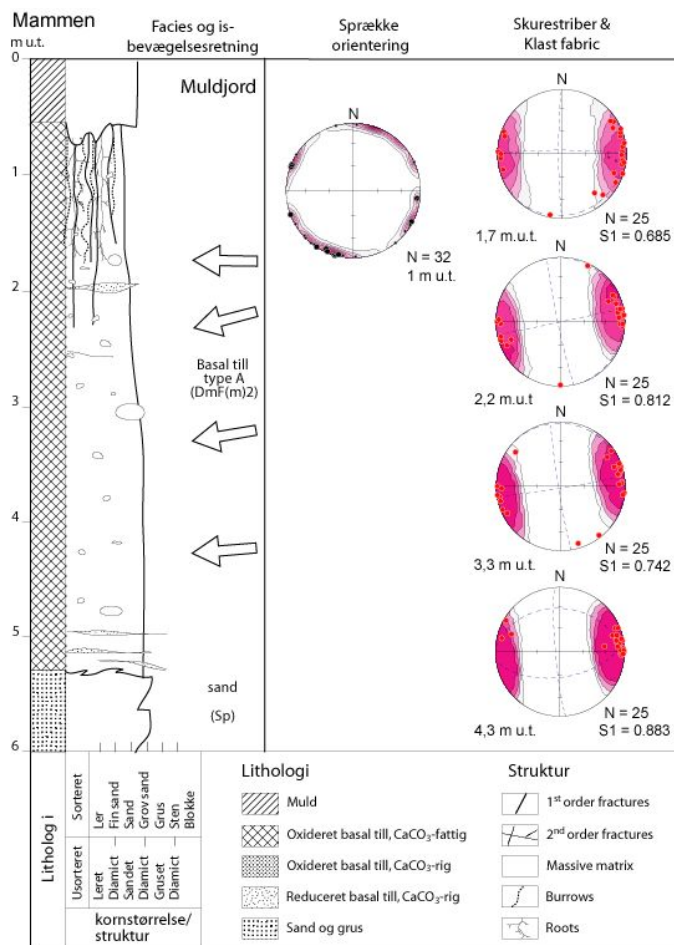
2.7.2 Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 meter under terræn: Muldlag

0,5 - 2 meter under terræn: Moræneler, stærk siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt, mørk olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

2 – 5 meter under terræn: Morænesand, leret, siltet, svagt gruset, , general massiv matrix, mørk olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

5 - > 5,5 meter under terræn: Smeltevand sand, udshearet i toppen med lerede bånd, grovere og massiv længere nede, kalkfri.



Figur 2.10. Lithologisk log med sprække og klast fabric data fra Mammen.

2.7.3 Till klassifikation

Som det fremgår af figur 2.10. blev der målt fabric analyse i fire dybdeintervaller 1,7 - 2,2 - 3,3 og 4,3 meter under terræn. Der ses en signifikant orientering af langstrakte klaster med en fortrukken orientering fra Ø-NØ imod VSV (70-90°). Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshærede kalklire og kalkklaster er moræneleret tolket afsat som en basal till under en gletsjer der har overskredet området fra Ø imod V. Dette kan enten være en subglacial meltout till eller en lodgement/deformation-till type A till. Manglen på sprækker samt den særdeles stærke fabric antyder at området har været deformeret ductilt (Blødt). Dette kan lade sig gøre under højt porevandstryk. Nærheden på store overordnede dræningssystemer (Gudenådal) samt evidens fra tilsyneladende slump strukturer ved grænsen til det underliggende smeltevandssand sandsynliggøre ligeledes at till'en er blevet afsat basalt under en aktiv is og ikke som en flow-till ved uds melting fra en stagneret is.

Moræneleret klassificeres derfor som en basal till. type A (Klint, 2001). Det er vanskeligt præcist at korrelere till'en til et bestemt fremstød, da den ekstremt høje forvittringsgrad kunne antyde en ældre alder en Weichel. Den østlige retning afviger også fra den traditionelle NØ retning, der normalt forbindes med Hovedfremstødet i Weichel (Houmark-

Nielsen, 1987). Der er dog en overvejende sandsynlighed for at till'en kan henføres til dette fremstød i betragtning af placeringen som den øverste enhed (Yngste) i området.

2.7.4 Makroporefordeling

Moræneleret optrådte stærkt udtørret ned til ca. 1 meter under terræn. Dette medførte visse vanskeligheder i forbindelse med frigravning af sprækker, samt påvirkede de geotekniske målinger således at der blev målt unormalt høje CPT værdier i de øverste 1,5 meter.

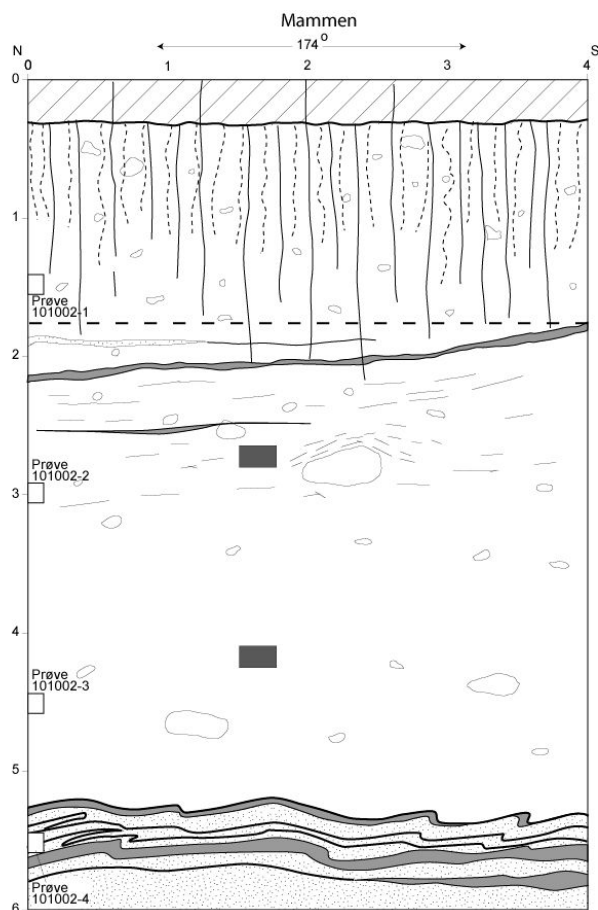
Talrige udtørringssprækker dannede polygoner med en typisk diameter på 15-20 cm ned til ca. 2 meter under terræn. Over 1 meters dybde er polygonerne opsprækkede i 2^{nden} ordens polygoner med en diameter på 3-4 cm. Et enkelt sted optræder en ca 3 cm tyk sandfyldt kile der tolkes dannet som en iskile under permafrost forhold. Store regnormehuller optræder med en gennemsnits afstand på ca. 8-12 cm på overfladen af udtørnings sprækkerne ned til ca. 1,5 m under terræn. Ca. 2 m under terræn optræder et karakteristisk ca 5 cm tykt bånd af stærkt leret diamikt opblandet med sten og grus. I samme dybde optræder en mindre subhorisontal sandslire parallelt med lerbåndet.

Under 2 meter bliver sandindholdet markant større og sedimentet under denne dybde må betegnes morænesand. Morænesandet optræder oxideret kalkfrit og stærkt forvitret, med talrige "rådne" sten (stærkt forvitrede sten der falder fra hinanden ved berøring).

Morænesandet optræder generelt massivt med en svag fissil karakter imellem 2-3 meters dybde. Specielt omkring enkelte store sten optræder mange små subhorisontale sprækker med en spacing på 1-2 cm. Matrix virker højporøs med talrige små kanaler (rodgange) med en typisk diameter på ca 1 mm. Hullerne er typisk reduceret (grå) i en 2-3mm bred zone rundt om hullerne. Større kanaler (2-3 mm i diameter) ses ofte stedvist med lerdrapering i selve kanalen og "renvaskede" sandkorn indikerende hydraulisk aktivitet.

Ca 5 meter under terræn strækker et udbredt sandlegeme bestående af smeltevandsand sig i hele gravens udstrækning. Sand legemet optræder stærkt udshearet og består af skiftende lag med lerede bånd og grusede sandede bånd. Ved overgangen til morænesandet ses en tynd sort linie bestående af manganudfældning. Overgangen virker foldet, men kan også være dannet ved slumping. (mobilisering af vandmættet sediment under højt porevandstryk). Intens isoklinal foldning af lerbånd samt udshearing af samme lerbånd i den underliggende smeltevandsenhed indikere imidlertid en shearbevægelse, der kunne hidrører fra en aktiv fremrykkende gletsjer.

De få og dårligt udviklede sprækker i området er alle blevet klassificeret som udtørringssprækker. Dels på grund af deres tilfældige retning og vertikale dip, men også fordi de danner tydelige polygoner og stopper ved overgangen til den mere sandede del under to meters dybde. Den gennemsnitlige afstand (spacing) varierer fra ca 20 cm i den øverste del til over 2 meter ca 2 meter under terræn, som det fremgår af profilet, figur 2.11.

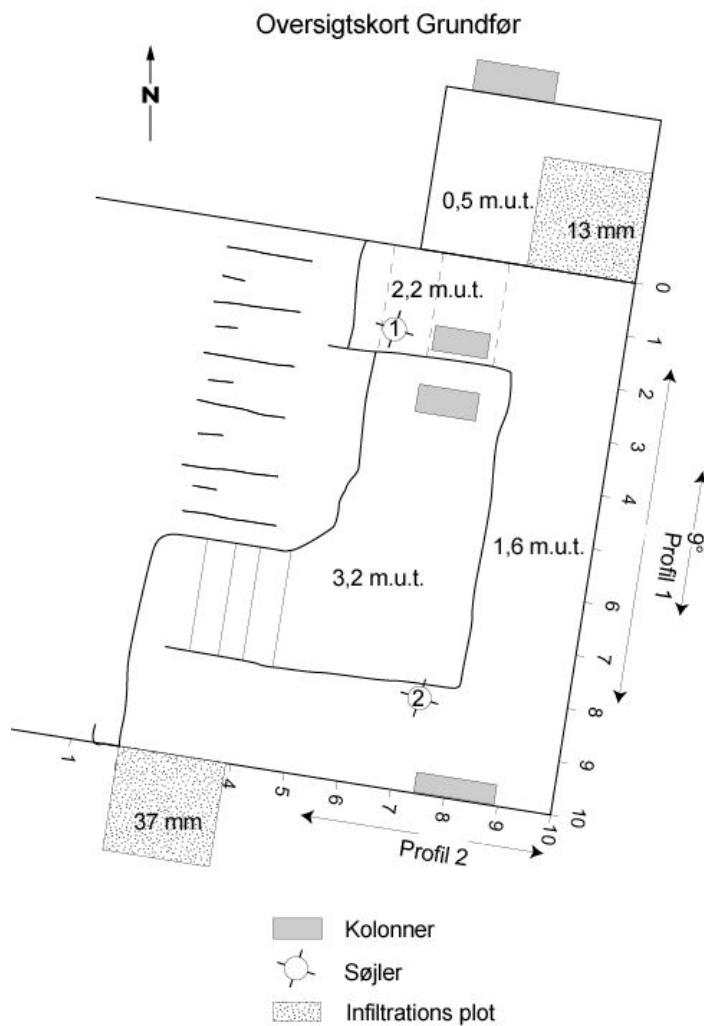


Figur 2.11. Tværprofil fra udgravningen ved Mammen.

2.8 Grundfør lokaliteten

2.8.1 Områdets geologiske opbygning

Området er beliggende umiddelbart vest for motorvejen nær Grundfør. Området er domineret af småbakket moræneflade med mange små dalsystemer. Den geologiske lagserie i området er domineret af en 3-5 meter tyk morænelersenhed overlejrende smetevands-sand/grus. Ved udgravningen blev smetevandssandet påtruffet i 3 meters dybde. Udgravningen blev anlagt med de to tracer infiltrationsplot på hver side som det fremgår af figur 2.12. På grund af moræneenhedens begrænsede tykkelse blev der kun gravet til en dybde af 3,2 meter under terræn, da der herunder kun blev påtruffet smeltevandsand.



Figur 2.12. Oversigt over udgravning ved Grundfør.

2.8.2 Lithologisk beskrivelse

0 - 0,3 meter under terræn: Muldlag, mørkebrunt.

0,3 - 0,7 meter under terræn: Moræneler, siltet, sandet, gruset, få sten, massiv, mørk olivenbrun, oxideret, kalkfri

0,7 - 2 meter under terræn: Moræneler, siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt ned til ca 1,7 m herunder fissil zone ned til ca 2 m., olivenbrun, oxideret, kalkfri.

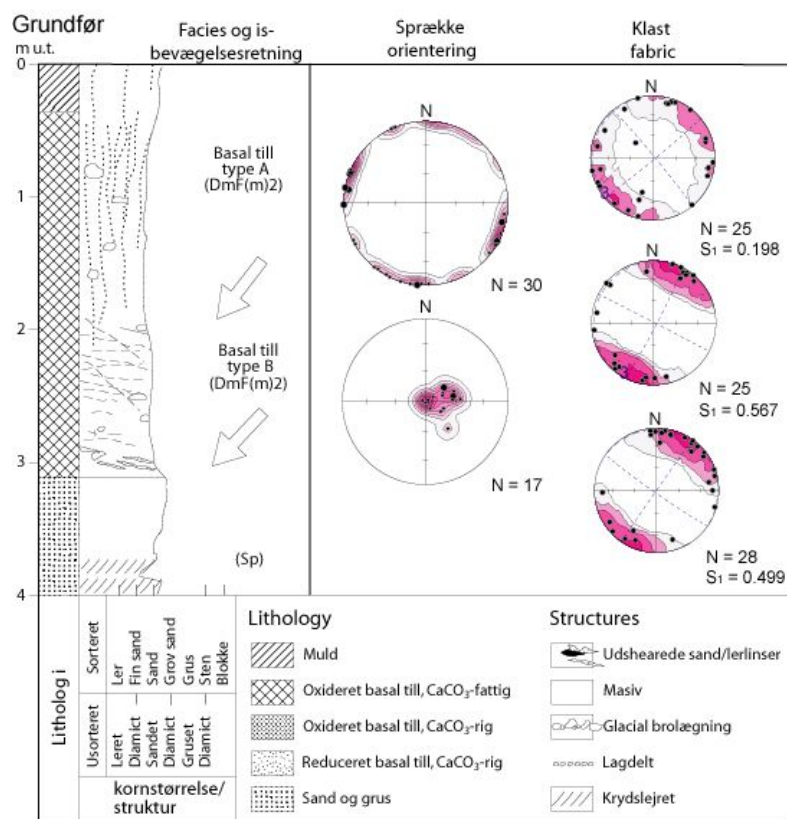
2-2 – 2,5 meter under terræn: Moræneler, stærkt siltet, stærkt sandet, gruset, stenet, massivt, olivenbrun, oxideret, kalkfri.

2,5 - 3 meter under terræn: Morænesand, stærkt leret, siltet, stærkt gruset, enkelte sten, olivenbrun, oxideret, kalkfri. Overgangen imod den underliggende sandlinse er præget gradvist øget indhold af sand og udshearede bånd med ler og grus fra 2 mm til 2 cm tykkelse.

3 - >3,5 meter under terræn: Mellem til groft velsorteret smeltevandssand/grus. Planar krydslejring med forsæt hældende imod Ø-NØ, Farven er stærk rødbrun i toppen (30 cm tyk zone) skiftende til grå længere nede. Sandet er kalkfrit.

2.8.3 Till klassifikation

Der blev opmålt 3 fabrik målinger i 1, 1,6 og 2,2 meter under terræn, figur 2.13. I 1 meters dybde var klasterne mere eller mindre tilfældigt orienterede og først under 1,6 meter optræder en signifikant orientering af klasterne. Fabrik viser en dominans af klaster med en NØ-SV orientering. Sammenholdt med sherplaner og sprækkeorienteringer tyder dette på at den nederste del af till'en kan klassificeres som en basal till type B afsat under en gletsjer der har overskredet området fra NØ. De øverste 1,5 meter moræneler kan være afsat som basal type A till der måske kan være blevet omlejret i forbindelse med cryogene processer i forbindelse med efterfølgende permafrost processer. Den basale till tolkes afsat i forbindelse med Hovedfremstødet fra NØ i sen Weichel og korreleres derfor til the Mid-Danish Till formation (Houmark-Nielsen, 1987).

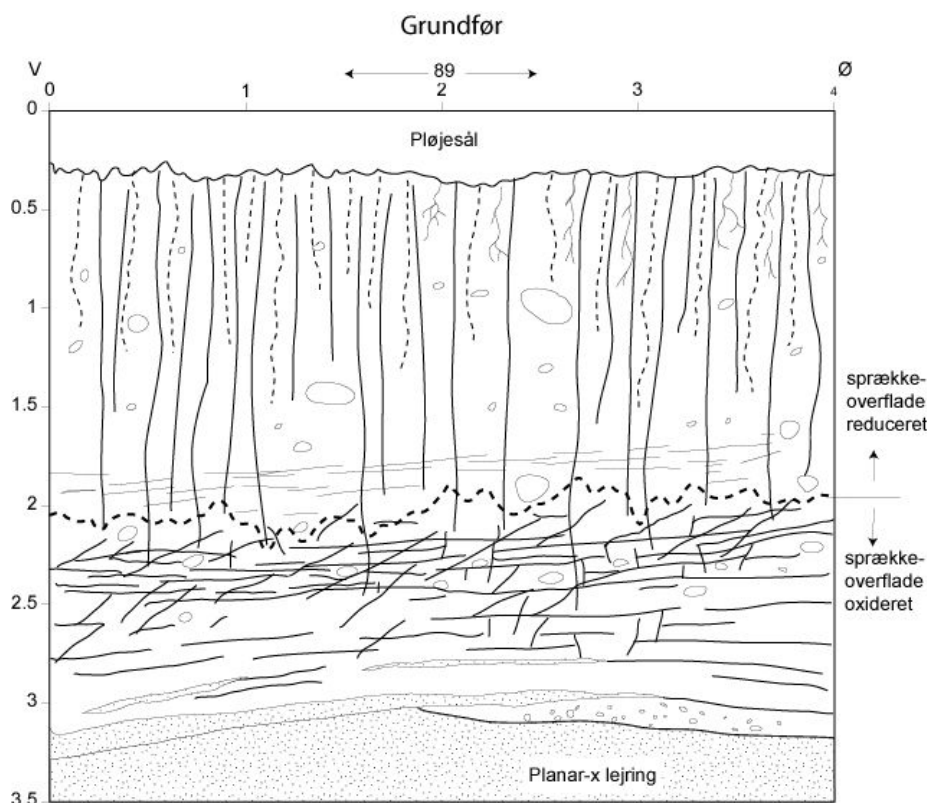


Figur 2.13. Lithologisk log med sprække og klast fabrik data fra Grundfør.

2.8.4 Makroporefordeling

Moræneleret fremstår stærkt forvitret og kalkfrit oxideret i hele sin tykkelse. Der er relativt mange sten heraf en del flintesten i leren. Der er mange store regnormehuller og rodgange i de øverste 1,5 meter (100-300 stk/m² i 75 cm under terræn).

De øverste to meter er ligeledes gennemsat af sprækker. Disse fremstår som typiske udtørringssprækker der danner karakteristiske polygoner bortset fra enkelte større N-S gående vertikale planare sprækker, der dog også tolkes at være dannet ved udtørring, men fra ca. 2 meter under terræn optræder også glacialtektoniske lavthældende sprækker med en overordnet hældning imod V-SV, samt subhorizontale shearsprækker, der danner et karakteristisk mønster (anastomoserende jointing). Fra 2,5 meters dybde til sandlinen optræder talrige sub-horizontale shearplaner og sandede shearbånd, figur 2.14. Sprækkerne optræder generelt med en karakteristisk grå reduceret overflade ned til ca. 2 meter under terræn, herunder optræder sprækkerne med en typisk rød overfladebelægning bestående af jern og mangan oxider (oxideret).



Figur 2.14. Tværprofil fra udgravningen ved Grundfør.

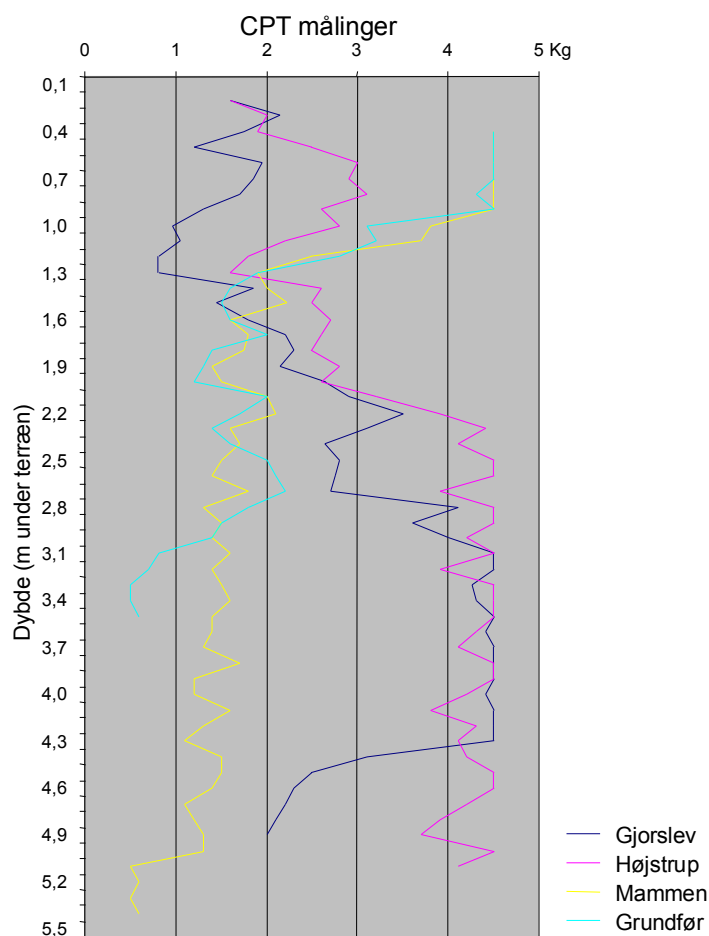
2.9 Geotekniske forhold på de fire undersøgelseslokaliteter

Af figur 2.15 fremgår det at der er stærkt varierende forhold i de fire områder. Gjorslev og Højstrup har relativt ensartede værdier, med lav styrke i A-horisonten (0-0,3 m), derunder høj styrke i den øverste delvis udtørrede del (0,3-0,7 m). Herunder lave værdier i den kalkfri zone med en markant stigning ved kalkgrænsen (1,3-1,5 m). I den "fissile stærkt opsprækkede zone fra 1,6 til ca 2,1 meter under terræn er der moderat styrke hvorimod den højeste styrke målt i den massive del under 2,1 m. En markant zone af blød moræneler

optræder under 4,3 meters dybde ved Gjorslev. Denne dybde falder overens med redoxgrænsen, men menes ikke at have nogen naturlig sammenhæng.

Ved både Mammen og Grundfør ses ekstremt høje værdier i den øverste del (0,4-1 m). dette skyldes klart udtørring p.g.a. den ekstremt tørre sommer og efterår 2002. Herunder ses generelt lave værdier der primært kan henføres dels til udvaskning af kalkindholdet i matrix, men muligvis også till typen (A-type Till ved Mammen og B-type fissil till ved Grundfør). Ved overgangen til de underliggende sandlinser falder værdierne markant på begge lokaliteter.

Sammenlagt kan det konkluderes at de geotekniske forhold i moræneler tydeligt afspejler kalkgrænsen. Det er svært at skelne imellem fissil type B till (belastet og sprækket) og type A till, hvorimod massiv basal type B-type till synes at have markant større styrke end massiv basal type A till. Der synes ikke at være nogen systematisk forskel på styrkeforholdene over og under redoxgrænsen, og det må anses for vanskeligt at benytte geotekniske parametre til at bestemme denne grænse. Derimod er der god overensstemmelse imellem skiftet i de geotekniske værdier og dybden til grænsen imellem den kalkfri og kalkholdige matrix. Der synes også at være et tydeligt skift i styrken ved overgang til sandlag af en hvis tykkelse. De må anses som overvejende sikkert at type B-type till (opsprækkede) har generelt højere styrke end type A till (blødt deformeret).



Figur 2.15. De geotekniske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør.

2.9.1 Generel fortolkning

De sjællandske lokaliteter repræsenterede den geologiske model: moræneler over kalk hvorimod de to jyske lokaliteter repræsenterede situationen moræneler over smeltevands-sand.

Umiddelbart var der stor lighed imellem de geologiske forhold på Stevns hvorimod de jyske lokaliteter varierer noget mere. Der er imidlertid stor forskel på de geologiske forhold imellem Stevns og Jylland.

På Stevns er fordelingen af sprækker meget ens, både antallet af sprækkesystemer, deres orientering, oprindelse og udbredelse (densitet og dybde), er meget ens. Dybden til kalkgrænsen og redoxgrænsen er ligeledes ret ens og begge moræneleraflejringer korreleres da også til samme isfremstød. Begge områder er klassificeret som basale tills aflejret på en moræneflade med et relativt lille relief. Der er således god korrelering imellem de to områder der ligger ca 15 km fra hinanden. Det må derfor konkluderes at der er gode muligheder for at vurdere den regionale udbredelse af sprækker, inden for den del af Stevns der er domineret af morænefladen. Der må dog forventes anderledes forhold i de lave områder omkring åer og vandløb specielt Tryggevejle å.

I Midtjylland ligger begge lokaliteter øst for hovedopholdslinien. Først og fremmest Mammen, men også Grundfør udmærker sig ved svag opsprækning, men kraftig forvitring og dyb redoxgrænse. Der er tydelige lighedspunkter imellem de to jyske lokaliteter, men de udmærker sig også ved at være meget forskellige fra de lokaliteter der er opmålt i forbindelse med tidligere undersøgelser på Sjælland og Fyn, tabel 2.1, og det må derfor konkluderes at der findes store regionale variationer på makroporefordelingen og dermed de hydrauliske forhold i danske lerede aflejringer.

2.10 Konklusion

Kan de lade sig gøre at zonerer for pesticider i danske lerede sedimenter ?

De foreløbige resultater tyder på, at der på trods af store regionale forskelle i Danmark, er nogle områder med relativ ens fordeling af makroporer inden for samme geomorfologiske ramme. Derfor bør det være muligt at udpege visse områder med karakteristiske nedsivningsforhold inden for visse landskabselementer. Det er imidlertid af afgørende betydning af de indsamlede feltdata kan relateres til eller sammenlignes med eksisterende geologiske og hydrauliske databaser. Det er ligeledes vigtigt at de indsamlede data kan indgå i geologiske og hydrauliske modeller.

Et af de vigtigste resultater af de hidtidige undersøgelser er, at der kan ses en sammenhæng imellem morænelers bulk-hydrauliske egenskaber og dybden til henholdsvis kalkgrænsen og til redoxgrænsen. Disse data er netop tilgængelige i boredatabasen. Ved hjælp af disse data kan en minimum tykkelse for "utæt moræneler" estimeres i visse områder, og sammenlignes med den aktuelle tykkelse af det øverste morænelersdække, der også udledes fra boredatabasen.

Tabel 2.1. Oversigt over sprække opmålinger af områder dækket af moræneler i Danmark.

Ler lokaliteter hvor der er opmålt sprækker i Danmark					
Lokalitet	Landskabstype	Antal udgravninger	Antal profiler	Maksimal sprække dybde	Antal sprække-systemer
Silstrup	Randmoræne	1	4	< 4 m	2
Estrup	Moræneflade (Bakkeø)	1	4	> 5 m	3
Ringe	Småbakket moræneflade	4	24	> 5 m	3-4
Lillebæk	Småbakket moræneflade	1	4	> 4 m	3
Slæggerup	Moræneflade over kalksten	1	4	> 5 m	3
Ranzausgade	Moræneflade over kalksten	1	4	> 3.5 m	3
Englandsvej	Moræneflade over kalksten	1	1	> 6 m	5
Avedøre	Moræneflade over kalksten	2	8	> 5.5 m	5
Kamstrup	Moræneflade over smeltevandsslette	1	1	> 7 m	3
Havdrup	Moræneflade	1	1	> 5 m	3
Haslev	Moræneflade over kalksten	1	4	> 9 m	3
Flakkebjerg	Moræneflade over smeltevandsslette	3	18	> 6 m	4
Fårdrup	Småbakket moræneflade	1	4	> 5 m	3
Mammen	Småbakket moræneflade over smeltevandssand (Plateau)	1	4	< 2 m	2
Grundfør	Småbakket moræneflade	1	4	> 3 m	2
Gjorslev	Moræneflade over kalksten	1	4	> 5 m	3
Højstrup	Moræneflade over kalksten	1	4	> 5 m	3
Gedserødde	Randmoræne	kystklint	1	> 6 m	3
I alt på 18 lokaliteter		24	94		

Topografien spiller helt tydeligt en vigtig rolle for dybden af redoxgrænsen. Det er derfor væsentligt at få et overblik over makropores fordeling i forskellige geomorfologiske regioner. Der er således umiddelbart stor forskel på de to lokaliteter i Jylland og på Sjælland, men de befinder sig også på to meget forskellige geomorfologiske regioner. Hvis man sammenholder de fire lokaliteter med eksisterende data fra tidligere undersøgelser, danner der sig imidlertid et mere systematisk billede af fordelingen af makropore i danske lerjorde.

På morænefladen i Østdanmark kender vi efterhånden variationen og her er der tydeligvis en sammenhæng imellem, 1. mængden af makropore/sprækker, 2. tykkelsen af morænelersdækket og 3. de hydrauliske forhold under moræneleret. Moræneler overlejrende højpermeable bjergarter som sprækket kalk eller sand/grus er generelt dybere sprækket og med en dybere redoxgrænse end moræneler over mere lavpermeable bjergarter som ler eller moræneler.

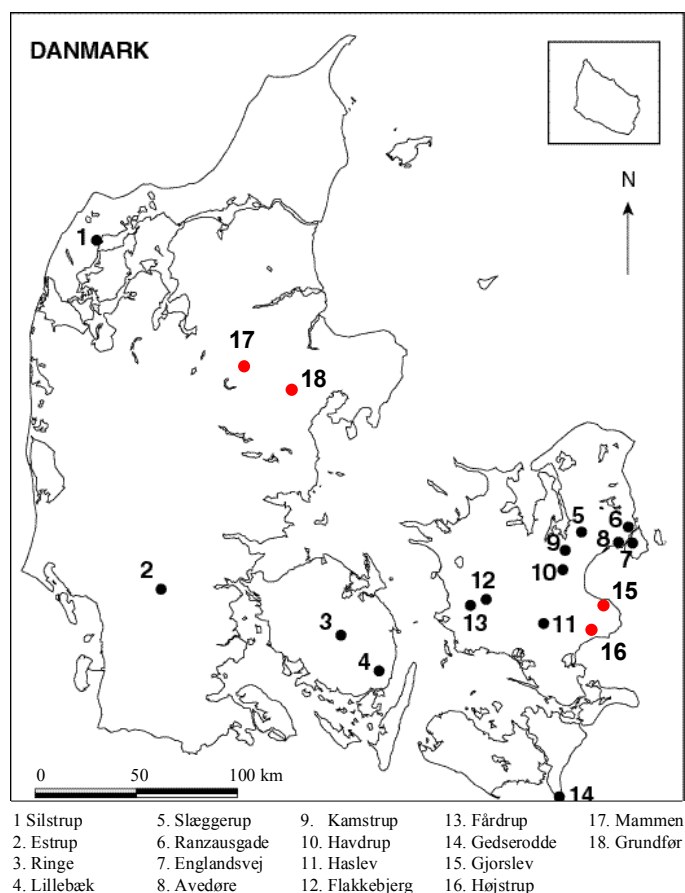
Bevæger man sig ind i mere kuperet terræn (dødislandskab og randmoræne) er sagen straks mere kompliceret. Ved Mammen, der ligger på et højtliggende plateau, er der næsten ingen sprækker i et relativt tyndt sandet morænelersdække der overlejrer en tyk smeltevandsssekvens. Til gengæld er der sket en kraftig forvitring og både kalkgrænse og redoxzone ligger meget dybt. Porøsiteten og mængden af makroporer er høj som følge af kraftig bioturbation. Mammen er imidlertid første billede vi har af den særegne landskabstype, der præger syd og midtjylland i et 30-50 km bredt bælte fra hovedopholdslinien og østpå. Landskabet er her præget af et relativt tyndt dække af moræneler over tykke smeltevandsssekvenser, der ligger som plateauer imellem de dybt nedskårne smeltevandssdale. Måske kan manglen på sprækker ved Mammen forklares ved meget højt porevandstryk under isen da den stod helt fremme ved hovedopholdslinien. Djursland og store dele af det nordlige Jylland samt Mors og Salling ligner lidt mere de forhold man også ser på Sjælland og Fyn med en mere generel opsprækning af moræneleret.

Kan data skaffes og er det realistisk, hvad kræver det.

Med kun to lokaliteter i Østjylland er det svært at udtale sig om variabiliteten, og der er helt klart et behov for flere feltundersøgelser for at belyse variabiliteten inden for områder domineret af dybt nedskårne dale tæt på hovedopholdslinien. De nødvendige data kan skaffes.

Er data relevante/nødvendige for zonerings ?

I høj grad, enhver modellering/tolkning af nedslivnings og nedbrydningspotentialer i et område er ikke bedre end den hydraulisk/geologisk model som ligger til grund for vurderingen. Kendskab til den geologiske variabilitet i den geomorfologiske enhed man ønsker at undersøge er selve grundlaget for en hydraulisk model.



Figur 2.16. Fordeling af undersøgte lerlokaliteter i Danmark.

Implikationer af data og erfaringer for og fra øvrige delprojekter og zonerings generelt

Som det fremgår af figurerne 2.16, 2.17 og 2.18 hvor de 4 lokaliteter er sammenlignet 14 andre tilsvarende opmålinger i Danmark, er der god korrelering til andre lokaliteter når man ser på Gjorslev og Højstrup hvorimod Mammen og Grundfør adskiller sig markant fra alt hvad der tidligere er blevet undersøgt. Dette understreger blot forskellen imellem Østjylland og resten af den del af Danmark, der er dækket af moræneler.

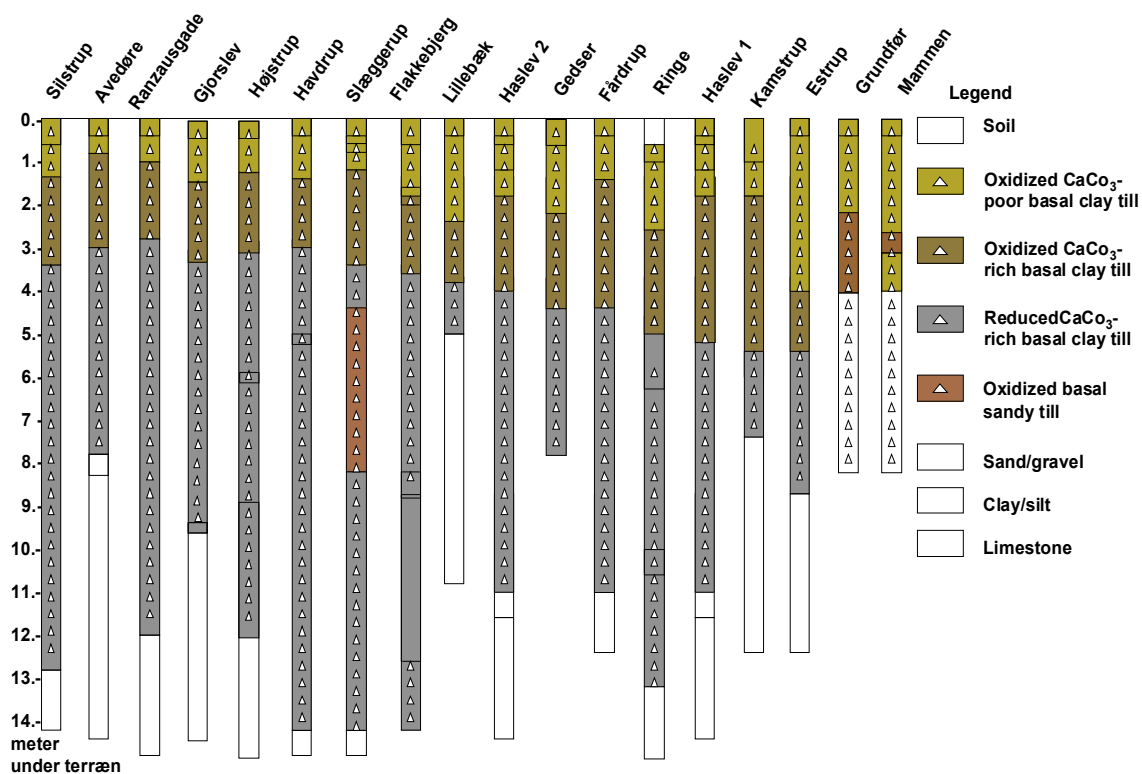


Fig. 2.17 Geologisk opbygning og tilsvarende redoxgrænse på 18 danske ler lokaliteter

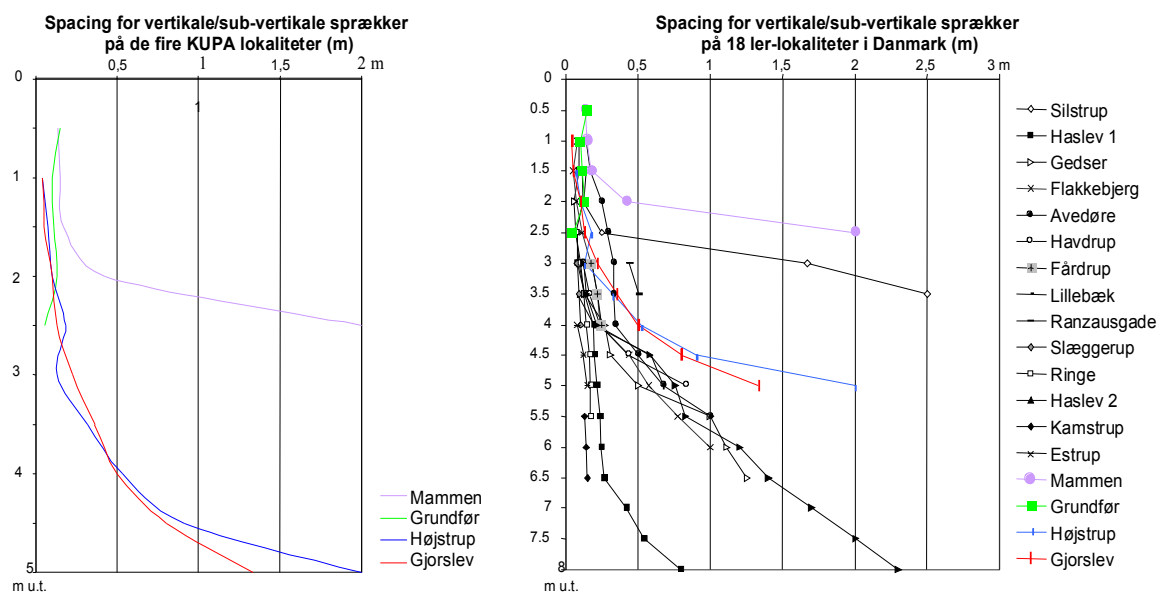


Fig. 2.18. Variation af gennemsnitlig afstand imellem sprækker (spacing) i forskellig dybde på de fire målte lokaliteter samt på de i alt 18 danske ler lokaliteter der er opmålt på nuværende tidspunkt efter samme princip og metoder.

2.11 Litteratur

Berthelsen A. 1978. The methodology of kineto-stratigraphy as applied to glacial geology. Bull. Geol. Soc. Denmark, 27: 25-38.

Houmark-Nielsen M. 1987. Pleistocene Stratigraphy and Glacial History of the Central Part of Denmark. Bull. Geol. Soc. Denmark, 36: 1-189.

Klint. K.E.S. 2001. Fractures in Glacigene Diamict deposits; Origin and Distribution. Ph.D-thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland, Special report no. 129.

Larsen G., Frederiksen J., Villumsen A., Fredericia J., Gravesen P., Foged N., Knudsen B., og Baumann J. 1995. A guide to engineering geological soil description, Bull. Danish Geotechnical Society, 1:1-130.

3. Geologisk variabilitet bestemt ved cone penetration testing (CPT)

Bertel Nilsson (GEUS) og Ditte Lykkesborg Petersen (Geologisk Institut, Københavns Universitet)

3.1 Indledning

Den geologiske variabilitet på markskala er undersøgt detaljeret på et 0.5 ha stort areal ved Højstrup på Stevns. Dette blev gjort ved et sammenlignende studium af forskellige overfladegeofysiske metoders egnethed til kortlægning af de indesluttede sandliners forekomst på 0.5 ha skala og en CPT sondeundersøgelse (CPT = Cone Penetration Testing) med sonderinger til 8-10 meters dybde på et 100 m x 50 m stort areal. Den eller de bedst egnede og mest cost-effektiv geofysiske målemetoder blev anvendt ved et mindre detaljeret måleprogram på et 50 ha stort areal (landskabselementskala) omkring den detailundersøgte mark ved Højstrup. Resultatet af de geofysiske undersøgelser på mark- og landskabselementskala er nærmere beskrevet i bilag 4. Skaleringsrutiner vedrørende geologisk variation fra 0.5 ha til 50 ha store arealer er testet ved brug af glacialdynamiske tolkningsanalyser og faciesbaserede geostatistiske værktøjer (overgangssandsynligheder).

3.1.1 Fordeling af sand og ler

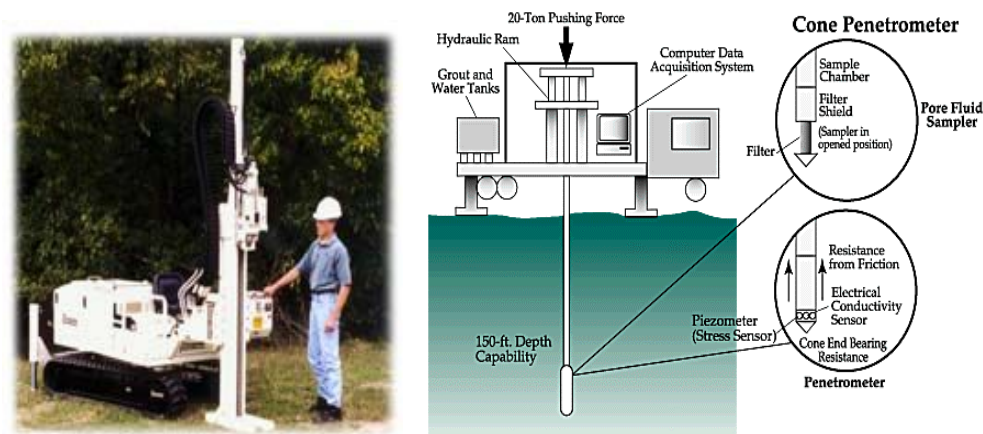
Indesluttede sandlinser forekommer i den umættede og mættede zone af morænelersaflejringerne, men udstrækning, orientering og hyppighed (korrelationslængder) er ikke veldokumenteret (Dreimanis et al., 1986; Fredericia, 1990; Haldorsen og Krüger, 1990). Glacialdynamiske tolkninger er i videst mulig omfang blevet inddraget til karakterisering af de glacial morænelersaflejringsfordeling i indtil 8-10 meters dybde, inklusiv den 3-dimensionelle fordeling af sandlinser/lag (Smichak et al., 1996). Det er en almindelig opfattelse, at de indesluttede sandaflejringer er hydraulisk forbundet med komplicerede sprækkesystemer og bioporer over store afstande såvel vertikalt som horisontalt (Jørgensen og Fredericia, 1992; McKay og Fredericia, 1995; Sidle et al., 1998). For at forstå stoffers spredning i sådanne aflejringer er det således påkrævet at forstå den rumlige fordeling af sandindeslutninger, sprækker og bioporer til at forbedre vurderingen af stoftransporten i heterogene morænelersaflejringer (Nilsson et al., 2001). Nærværende undersøgelse fokuserer på 3D udbredelsen af sandindeslutninger i moræneler ved Højstrup på Stevns.

3.2 Cone Penetration Testing – metode og anbrebsvinkel

CPT er en form for geoteknisk boring, hvor en sonde nedpresses vertikalt gennem jorden, mens den måler en række specifikke egenskaber ved jorden med specielle sonder. Typisk udføres CPT for at bestemme stratigrafien og geotekniske egenskaber af jordlagene i et større område. Til kalibreringsformål placeres én eller flere af CPT borerne nær lagføl-

geboringer, så CPT boringens karakteristiske logmønster for ler subsidært sand kan sammenholdes med lagfølgeboringernes kendte lagsekvens.

Sonden er forbundet til en borestang, der successivt forlænges som boringen nedpresses til større dybde. Da mange af parametrene kun kan måles i den uforstyrrede formation er det ikke muligt at gentage målingerne, som det er tilfældet for logning i åbne borehuller. Hvis sonden støder på en større sten, kan det blive nødvendigt at afbryde målingen. Figur 3.1 viser en typisk CPT sonde.



Figur 3.1. Til venstre, foto af Cone Penetrometer monteret på en mini-rig. Til højre, principskitse af Cone Penetrometer.

CPT sondeundersøgelsen udført ved Højstrup på Stevns var oprindelig tiltænkt at skulle kunne belyse følgende tre problemstillinger på markskala:

- (1) Sandlinsers rumlige udbredelse i et morænelersdække;
- (2) Variationen af dybden til kalkudvaskningsgrænsen ("kalkgrænsen");
- (3) Variationen af dybden til redoxgrænsen.

Problemstilling (1): Bestemmelsen af den rumlige fordeling af sandlinsers forekomst i morænelers sekvensen er nærmere beskrevet i afsnit 3.3.

Problemstilling (2): GEUS har ved tidligere markundersøgelser vist en mulig sammenhæng mellem ændringer i målt vingestyrke (udrænet forskydningsspænding, c_v) og dybden til "kalkgrænsen" i moræneler, idet vingestyrken målt med håndvingebor har vist en generel stigning på 3-4 gange hen over denne kemiske grænse i typisk 1-3 meters dybde hvor ler-matrix skifter fra at være blød kalkfri til fast kalkholdig. I Højstrup udgravningen har tilsvarende målinger vist samme stigningstendens i vingestyrken. Dybden til "kalkgrænsen" er meget tænkeligt bestemt i talrige tilfælde med CPT udstyr, hvor geotekniske vingestyrkeforsøg er udført med et helt andet formål, nemlig til vurdering af jordens styrkeparametre typisk i forbindelse med diverse byggeprojekter. Derfor er måling af vingestyrken med CPT blevet foreslået som mulig markør for "kalkgrænsen". Det må imidlertid konkluderes at

dybden til "kalkgrænsen" ikke har kunne fastlægges med det anvendte CPT udstyr i nærværende undersøgelse.

Problemstilling (3): Redoxgrænsen er normalt let at erkende på lermatrixens farveskift i jordprøver fra lagfølgeboringer eller udgravninger. En speciel CPT sonde til måling af redox potentialet ville muligvis kunne benyttes som indirekte bestemmelse af redoxgrænsens placering. Dette er imidlertid ikke forsøgt efterprøvet i indeværende projekt, så det må konkluderes at dybden til redoxgrænsen ikke kunne bestemmes med det anvendte CPT udstyr.

CPT sonder til belysning af problemstilling (1) er standard CPT måling i Danmark mens sonder til belysning af problemstilling (2) og (3) kræver specialsonder. Der findes imidlertid ikke et kommercielt tilgængelig CPT udstyr i Danmark (eller Sydsverige), hvor en kombinationssonde samtidig kunne dække alle tre skitserede problemstillinger. Inden for den økonomiske rammer for CPT sondeundersøgelsen har det derfor været nødvendigt at prioritere og det er valgt i nærværende undersøgelse at følge op på problemstilling (1).

På Højstrup marken blev der udført en detaljeret CPT sondeundersøgelse af det svenske firma Scc Scandiaconsult (nu Rambøll) i Malmø, der ligeledes bearbejdede de rå data til anvendelige logs. Til feltarbejdet blev der benyttet en borerig af typen Geotech 604D, hvor der blev målt de såkaldte CPT-R, hvor R henviser til elektrisk modstand (resistivity). Sonden blev presset ned med en hastighed på 20 mm/sekund, og der blev målt en række parametre for hver 2,5 cm nedpresning af sonden. De målte parametre er: porevandstryk, spidstryk, friktionsmodstand, resistivitet/konduktivitet, borehastighed, samt borestrengens hældning. Der blev i alt udført 29 boringer fra 3 – 9 meters dybde placeret efter statistiske overvejelser indenfor en mark på 50 x 100 m (for placering, se bilag 4).

3.3 Resultater

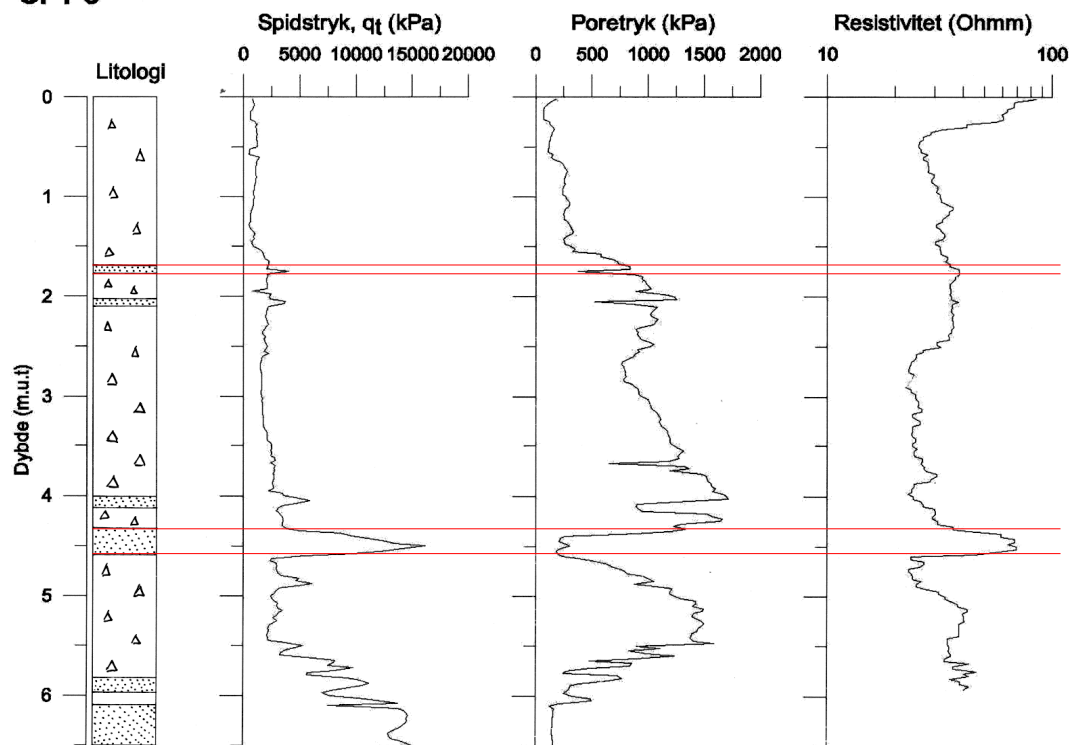
3.3.1 Feltobservationer

Til tolkning af sandlinsernes rumlige udbredelse i morænelersdækket ved Højstrup er følgende parametre benyttet: Det korrigerede spidstryk (q_T), porevandstrykket (u) samt resistiviteten (Wenneropstilling). Et karakteristisk logmønster for de tre nævnte parametre benyttes til at udskille sandindslagene fra ler i CPT boringerne. Når poretrykket stiger samtidig med at spidstrykket og resistiviteten falder (relative værdier) tolkes dette som tilstedeværelsen af sand i CPT profilet (se fig. 8.4). Omvendt når poretrykket er højt samtidig med at spidstrykket og resistiviteten er lav optræder ler i det tolkede CPT profil. Undtagelsen for denne regel er i dybder, hvor spidstrykket i enkelte tilfælde overstiger 20 MPa. I disse tilfælde formodes sondespidsen at have antruffet sten - sandsynligvis kalkbrokker, da det er primært disse der forekommer i udgravningen.

Til understøttelse af tolkningen af CPT-boringerne, er de tolkede lagfølger i CPT boringerne sammenlignet med tre lagfølgeboringer, der er placeret i 1-1,5 meters afstand fra tre CPT boringer. I en kerneboring og den tilhørende CPT-boring, kunne nogle af sandlagene

korreleres tilfredsstillende mellem de to boringstyper, mens andre sandlag ikke kunne findes i enten CPT- eller kerneboringen. Kerneboringen var ikke komplet, da mange brudstykker manglede. Det er derfor svært at afgøre, om tolkningen af CPT-parametrene er forkert, sammensætningen af kernens brudstykker er forkert, eller om geologien er så kompleks, at den skifter inden for kort afstand (1,4 m). Snegleboringerne, med jordprøver for hver 0,5 meter, kunne for en stor del ikke benyttes til korrelation med tilhørende CPT boringer da sandlagenes tykkelse sjældent overstiger 20 cm.

CPT 3



Figur 3.2. Eksempel på logmønstre for de tre CPT parametre (spidstryk, poretryk og resistivitet), hvor sandlag er tolket som indslag i en overvejende lerpræget litologisk profil.

3.3.2 Parametrisering ved brug af T-PROGS

Et sekundært formål med undersøgelsen var at skaffe en forbedret parametrisering af de hydrauliske parametre (rumlig fordeling af hydraulisk ledningsevne) til de numeriske modeller på markskala og oplandsskala.

I morænedæklagene ved Højstrup er en del indesluttede sandlag påvist i lagfølgeboringer og i en større udgravning etableret indenfor undersøgelsesmarken (se bilag 2). Sandlagene er desuden tolket indirekte fra CPT-boringerne. Udfra tolkningen af den vertikale sand og lerfordelingen i CPT-boringerne (terræn til 8-9 meters dybde) og den visuelt påviste ho-

risontale udstrækning af sandlinser i udgravningen (indtil ca. 4 meters dybde) er der ved hjælp af det geostatistiske software T-PROGS opstillet en geologisk model med fordeling af sand og ler i tre dimensioner. T-PROGS, som står for Transition PRObability Geostatistical Software (Carle et al., 1998; Carle, 1999), bygger på en geostatistisk metode (overgangssandsynligheder) velkendt blandt oliesedimentologer. Forenklet angiver overgangssandsynligheden i nærværende eksempel sandsynligheden for at sand optræder over/under ler i forskellige afstande i såvel den vertikal som horisontale litologisk sekvens. Ved hjælp af geostatistikken bag T-PROGS er det i modsætning til traditionel variogramanalyse, muligt at inddrage geologens viden og iagttagelser direkte i den geostatistiske beskrivelse.

Dataene til T-PROGS modellen stammer overvejende fra CPT-boringer samt geologiske beskrivelser og fortolkninger fra den 4-5 meter dybe udgravningen (se bilag 2). CPT dataene er korreleret til lagfølgen i hhv. to snegleboringer (prøver for hver ½ meter) og en i princippet fuldt kernet boring, der dog flere steder manglede dybdeintervaller hvor jordmaterialet var løst (typisk sandet). Der har desuden været udført overfladegeofysisk opmåling med den geoelektriske MEP metode med det formål at inddrage resultaterne fra denne metode til at forbedre korrelationen af sandindslagene mellem de enkelte CPT boringer. MEP dataene var imidlertid præget af en for dårlig dybdeopløsning af sandindslagene, så disse ikke kunne inddrages i en forudsigelse af sandlags korrelation mellem CPT boringer.

De i alt 29 CPT-boringer er placeret indenfor et areal på 100 x 50 meter af en større mark. På baggrund af lokal geologisk viden og iagttagelser er der gættet på at sandlinserne under CPT marken har form som pandekager med en diameter på ca. 3 - 10 meter og en tykkelse på 0.2 - 1.5 meter samt optræder med en indbyrdes afstand 20 - 50 meter. Disse antagelser viste sig senere at være sandsynlige, da der i profilerne fra udgravningen er observeret en sandlinse på en meters længde, og i tværsnit fra CPT-boringerne kan der observeres sandlinser fra under en meter op til 10 m (en enkelt muligvis op til 20 m). Med udgangspunkt i denne geologiske fortolkningsmodel af sandlinsers forekomst i moræneler ved Højstrup er 15 af boringerne fordelt regelmæssigt med en indbyrdes afstand på 25 meter, og de resterende 14 er placeret i midten af området i et dobbelt kryds (se bilag 4). CPT boringerne kan således sammenlignes i indbyrdes afstande på 1, 6.25, 12.5, 25, 50 og 100 meter. Derudover er de tre ovenfor nævnte lagfølgeboringer sat med en afstand på ca. en meter fra tre af CPT boringerne til korrelationsformål. I tabel 3.1 er vist antallet af CPT boringer samt øvrige 3 korrelationsboringer relateret til slutdybder fra ca. 3 til 10 meters dybde. Udfra datasættet beregnes overgangssandsynligheden i de tre retninger, x, y, z, hvor x, y akserne er laterale og z akser orienteret vertikalt. For at få størst udnyttelse af data, er x og y retningen drejet minus 8° i forhold til nord, så det ligger parallelt med boringsnettets akser. Området er længst i x aksens retning. Den største datatæthed optræder i z-aksens retning (hver 2.5 cm) og den mindste i x-aksens retning.

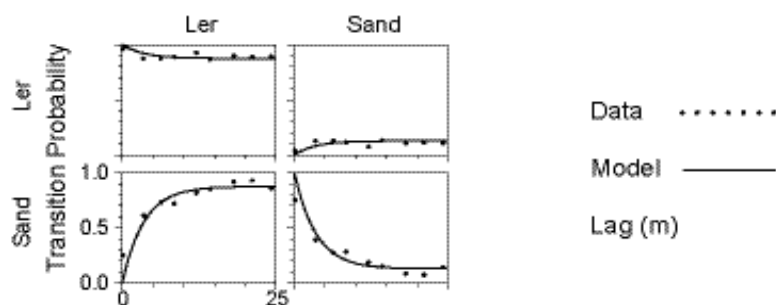
De litologiske tolkninger omsættes i en database med x, y, z koordinater. Der blev oprindeligt valgt 4 litologiske kategorier: moræneler, sand, kalk, og "kalkfri moræneler". I den initiale opsætning af T-PROGS modellen er imidlertid valgt en forsimplet model, hvor der kun indgår to litologiske kategorier (moræneler og sand) i denne, da kalk (bjergarten) og kalkfri moræneler senere kan lægges ind som flader i hhv. ca. 9 meters og 2 meters dybde.

Tabel 3.1. Statistik for borningsdybden af 29 CPT borer og 3 kalibreringsboringer.

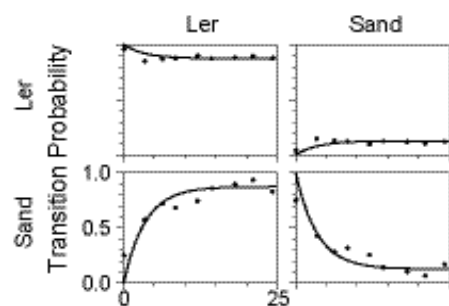
Borningsdybde (m)	Boringer (antal)
2,5-3,0	1
5,0-5,5	2
6,0-6,5	5
6,5-7,0	1
7,5-8,0	1
8,0-8,5	9
8,5-9,0	7
9,0-9,5	2
9,5-10,0	4

Figur 3.3 viser de målte og modellerede overgangssandsynligheder mellem sandlag (prikker) og den tilhørende geostatistiske model (linie) i henholdsvis vertikal retning (z-aksen) og lateral retning (x og y retningen). Modellen for den vertikale retning er beregnet ud fra de målte værdier. Modellen for den laterale retning er baseret på antagelser om en gennemsnitslængde på 4 meter for sandlinserne og korrelationsmæssige afstande forholder sig som anført ovenfor. Modellen har for hele jordvolumenet under CPT marken på 100 x 50 x 10 meter beregnet en procentvis fordeling af sand og ler på 13 % sand og 87 % ler.

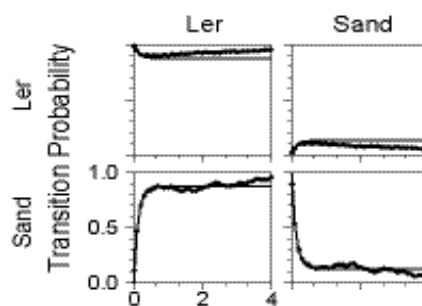
Lateral X TP



Lateral Y TP



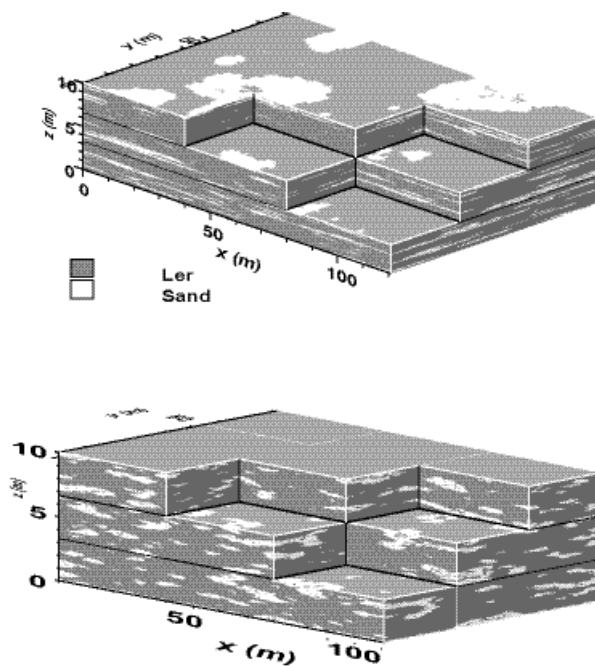
Vertikal TP



Figur 3.3. Målt og modelleret overgangssandsynlighed (transitional probability) i både lateral (x,y akserne) og vertikal retning (z aksen) (Petersen, 2004).

En eventuel asymmetri af sandlinserne er forsøgt undersøgt med den geostatistiske model, da det er kendt fra litteraturen at i subglaciale/basale till aflejringer kan indesluttende sandlinser have en tendens til at være langstrakt i isens bevægelsesretning (Brodzikowski and van Loon, 1987). På baggrund af den opstillede geostatistiske model har asymmetri-forhold imidlertid ikke kunne understøttes af datasættet vist i figur 3.3. Dette antages dog primært at kunne skyldes at hverken x eller y akserne er orienteret parallelt med den - eller rettere de retninger, som isen har overskredet området med ved Højstrup (se bilag 2). Der er i modelopsætningen valgt samme gennemsnitslængde for x og y akserne for sandlinserne. De i T-PROGS beregnede laterale dimensioner af sandlinserne er i gennemsnit 4 meter med en gennemsnitlig tykkelse i den vertikale retning på 0.14 meter. I begge retninger synes modellen således at give resultater som stemmer rimelig overens med "hårde data" fra CPT og med udgravningsdata fra lokaliteten på Stevns, samt med den generelle geologiske opfattelse af området.

Brugen af geostatistiske metoder til beskrivelse af heterogeniteter i moræneler åbner op for stokastiske simuleringer. Stokastiske simuleringer kan bruges til at belyse noget af den usikkerhed, som den geologiske beskrivelse er behæftet med. Oftest anvendes multiple stokastisk simulerede geologiske modeller som grundlag for den numeriske beskrivelse af strømningssystemet. Herved kan den geologiske heterogenitet bidrage til information om hvorvidt et givet stof kan forventes at finde vej igennem et tilsyneladende tæt morænelers-dække. Et eksempel på en stokastisk realisation af den behandlede morænelerspække er vist i figur 3.4. Det skal bemærkes at de eksisterende geologiske former kan genfindes i figuren og at sandlinserne til trods for den lille volumen procent kan danne sammenhængende transportveje gennem systemet.



Figur 3.4. Konditioneret simulering af sandlinser i morænelersdækket ved Højstrup på Stevns. Der er vist to forskellige realisationer som opfylder samme overgangssandsynligheder i x, y og z retningen. I den øverste figur er topjorden fjernet. Bemærk at dybdeskalaen (y akse) er inverteret, dvs. "10 meter mærket" svarer til terrænoverfladen og "0 meter mærket" svarer til underkanten af morænelersdækket (fra Petersen, 2004).

3.4 Diskussion og konklusion

Hvorledes kan resultatet af CPT undersøgelsen bidrage til at skaffe data som er nødvendige for at udpege og afgrænse særlige pesticidfølsomme lerområder i forhold til de fire afgørende kategorier:

- Nedbrydning

CPT er ikke velegnet til at skaffe mere viden om direkte målte nedbrydningsparametre (fx DT50).

- Sorption/binding

CPT er ikke velegnet til at skaffe direkte målte sorptionsparametre (fx K_f eller K_d). Dog er CPT sandsynligvis velegnet til indirekte at kunne kvantificere lerholdige og/eller organisk rige sedimentenheder volumenmæssige andel af et jordprofil på markskala hvortil sorptionen af sorberende pesticider kunne tænkes at ske. CPT kunne altså skaffe viden om/kvantificere simple jordparametre som ved andre forsøg har vist korrelation til relevante beskrivende sorptionsparametre.

- Strømning og transport

CPT vil være meget velegnet til at identificere mulige sammenhængende strømningsveje gennem morænelersdækkerne. CPT vurderes således at være et velegnet værktøj/metode til fremskaffelse af strømnings og transport data. CPT data står dog ikke alene men skal bearbejdes med geostatistiske metoder (f.eks. T-PROGS).

- Repræsentativitet

CPT er meget velegnet beskrivelse af fysiske heterogeniteter/geologisk variabilitet i moræneler. Specielt sandindeslutninger der typisk vil udgøre en lille del af det samlede jordvolumen kan udskilles med tydelighed med denne metode og på sigt forventes konnektiviteten mellem disse indeslutninger at kunne kvantificeres.

3.5 Litteratur

Carle, S.F., Labolle, E.M., Weismann, G.S., Van Brocklin, D. og Fogg, G.E. 1998. Conditional simulation of hydrofacies architecture: a transition probability/Markov approach, In Fraser, GS, and Davis, JM; Concepts in Hydrogeology and Environmental Geology No 1, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, p. 147-170.

Carle,SF (1999). T-PROGS: ransition Probability Geostatistical Software. Version 2.1 Hydrologic Science Graduate Group. University of California, Davis.

Brodzikowski, K. óg A.J. van Loon. 1987. A systematic classification of glacial and periglacial environments, facies and deposits. Earth-Sciences Reviews, 24:297-381.

Dreimanis, A., Hamilton, J.P. og Kelly, P.E. 1986. Complex subglacial sedimentation of Catfish Creek till at Bradtville, Ontario, Canada. In: J.J. M. Van Der Meer (Editor), Tills and Glaciotectonics. A. A. Balkema, Rotterdam , 73-87.

Fredericia, J. 1990. Saturated Hydraulic Conductivity of Clayey Tills and the Role of Fractures. Nordic Hydrology, 21:119-132.

Haldorsen, S. og Krüger, J. 1990. Till genesis and hydrogeological properties. Nordic Hydrology, 21:81-94.

Jørgensen P.R. og Fredericia, J. 1992. Migration of nutrients, pesticides and heavy metals in clayey till. Géotechnique, 42:67-77.

McKay, L. og Fredericia, J. 1995. Origin, distribution and hydraulic influence of fractures in clay-rich tills glacial tills. Canadian Geotechnical Journal, 32:957-975.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E.S., Bøggild, C.E. og Broholm, K. 2001 Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system. Journal of Hydrology, 243:162-179.

Petersen, D.L. (2004). En geologisk og hydrogeologisk undersøgelse af inhomogeniteter i moræner. Kandidatafhandling udarbejdet ved Geologisk Universitet, Københavns Universitet.

Sidele, R.C., Nilsson, B., Hansen, M. og Fredericia, J. 1998. Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. *Water Resources Research*, 34:2515-2527.

Smichak, J.R., Domonic, D.F. og Ritzi, R.W. 1996. Indicator geostatistical analysis of sand interconnections within a till. *Groundwater*, 34:1125-1131.

4. Geofysiske undersøgelser ved Mammen, Grundfør og Højstrup

Ingelise Møller (GEUS) og Mogens H. Greve (DJF)

Der er udført en EM38 kortlægning på og omkring undersøgelsesmarkerne ved Mammen, Grundfør og Højstrup i forbindelse med udpegningen af udgravningerne placering.

Der er udført en geofysisk kortlægning ved brug af slæbegeoelektrisk, EM31 og EM38 målesystemer på et ca. 50 ha areal ved Højstrup med formålet at undersøge de involverede geofysiske metoders egnethed i kortlægning af den geologiske variabilitet i et morænelers område.

4.1 Metode og angrebsvinkel

De anvendte geofysiske metoder beskrives herunder meget kortfattet. For mere uddybende beskrivelser for EM38, EM31 og slæbegeoelektrik henvises til KUPA rapport nr. 1 (Møller, 2001).

4.1.1 EM38 og EM31

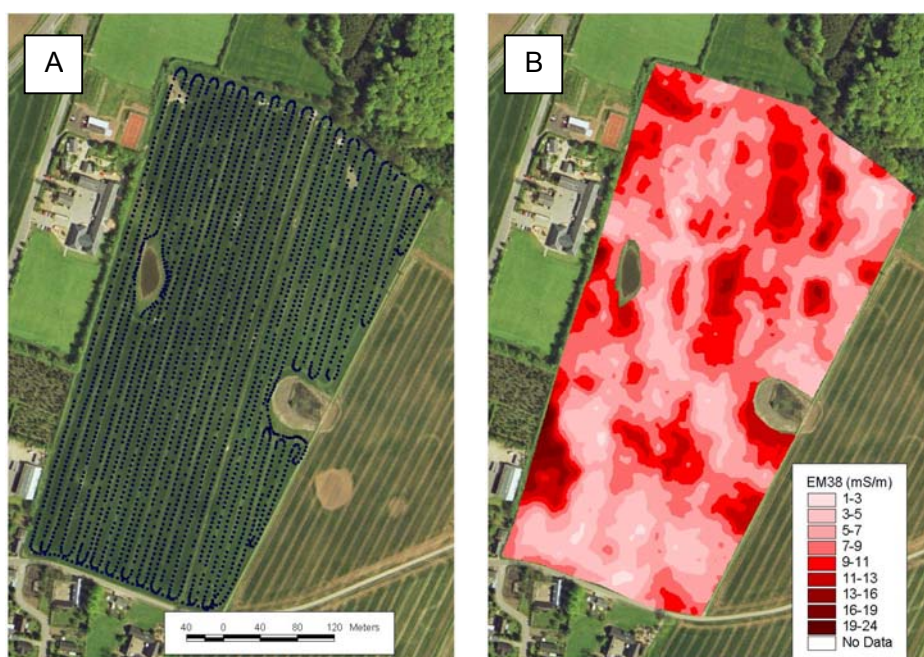
Disse sensorer opererer efter induktionsprincippet og måler jordens tilsyneladende elektriske ledningsevne. Forskellen mellem EM38 og EM31 er afstanden mellem den aktive og passive spole (1 m hhv. 3,8 m) og dermed indtrængningsdybden. Den elektromagnetiske ledningsevne er en funktion af indholdet af jordvæskens saltindhold, type og indhold af lerminerale, vandindholdet og jordens temperatur. Måleenheden er milliSiemens per meter (mS/m). Under danske forhold påvirkes målingerne kun i ringe grad af jordvæskens saltindhold, og et ofte lavt indhold af organisk stof i jorden gør, at jordens varierende lerindhold kan forklare op til 80 % af variationen i den målte ledningsevne. En absolut kalibrering af målingerne over for jordens tekstur forhindres af rumlige og tidslige forskelle i jordens vandindhold og temperatur. Tidsserier af målinger foretaget med EM31 og EM38 vil derfor vise parallelforskydninger i måletallet, medens den relative inddeling af det kortlagte areal stort set forbliver uændret. For begge sensorer gælder det, at indtrængningsdybden er afhængig af spolernes orientering i forhold til jordoverfladen. Der skelnes således mellem målinger foretaget med sensoren i horisontal og vertikal mode.

Indtrængningsdybden for EM38 er ca. 75 cm eller ca. 150 cm ved horisontal hhv. vertikal orientering. Dette gør EM38 velegnet til en geofysisk kortlægning af rodzonen på landbrugsjorder. I praksis har det vist sig, at en geoelektrisk kortlægning med EM38 er et kraftfuldt værktøj i forbindelse med pedologiske kortlægninger. Fladedækkende målinger med EM38 muliggør en hurtig og detaljeret inddeling af et areal i ensartede delområder mht. jordbundsegenskaber.

EM31 har en indtrængningsdybde på ca. 3 m eller ca. 6 m i horisontal hhv. vertikal orientering. Målinger med sensoren benyttes til at karakterisere den overfladenære geologi. Ved at foretage målinger i vertikal og horisontal mode med både EM38 og EM31, er det muligt at modellere lagfølgen i de øverste jordlag. Resultaterne skal, som for alle andre indirekte målemetoder, ledsages af konkrete undersøgelser/målinger af jordparametre.

I praksis udføres en geoelektrisk kortlægning ved at sensoren, monteret på en kunststofslæde, trækkes over marken vha. en firehjulet motorcykel. Målinger fra sensoren og et GPS-system flettes og lagres i en computer, som er monteret på motorcyklen. Målefrekvensen kan defineres efter behov og udløses efter et fast tidsinterval (op til 10 målinger pr sek.) eller efter afstanden mellem de enkelte målepunkter (mindst 1 m).

Målingerne gennemføres som transektmålinger eller flademålinger. Transektmålinger kan ofte med fordel udføres med håndbåren sensor. Ved flademålinger køres der i parallelle linier med maksimalt 20 meters afstand, figur 4.1a. På landbrugsarealer kan målingerne



Figur 4.1. Målepunkter for EM38 i en 14 ha stor mark (A) og et interpoleret kort over ledningsevnen (B). Sensoren afslører en meget stor rumlig variation i jordtyper, som ved brug af klassiske kortlægningsmetoder ville være vanskelig at beskrive.

gennemføres i tidsrummet mellem høst (medio august) og marts/april afhængig af vejrforholdene. I videst mulig omfang benyttes eksisterende kørespor. Afhængig af afstanden mellem sporene og målefrekvensen registreres der 60 – 200 målinger pr ha.

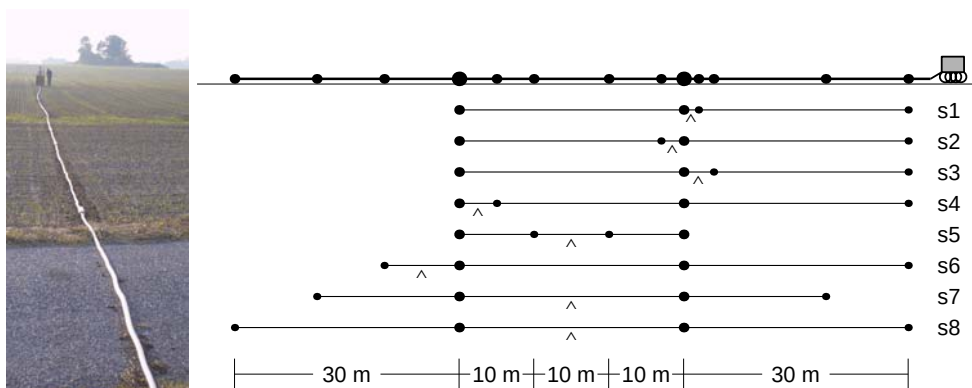
Lave værdier for ledningsevnen repræsenterer områder med sandjord medens de højeste værdier afgrænser områder med lerjord, figur 4.1b.

EM 38 og i et mindre omfang EM 31-data fra alle KUPA lokaliteter er lagret i DJFs EM database. Her forefindes ligeledes data fra evt. nærliggende arealer, opsamlet forud for ud-

pegning af undersøgelsesmarkerne. Endvidere lagres de udarbejdede kort som ArcView shape filer.

4.1.2 Slæbegeoelektrik

Den slæbegeoelektriske metode kombinerer geoelektrisk sondering med profilering, således at man måler, hvorledes jordens resistivitet varierer både lateralt og med dybden ned til ca. 15 meter (Sørensen & Pedersen, 1991). Måleproceduren for den slæbegeoelektriske metode består i, at en række elektroder slæbes hen over jorden af et lille trækkøretøj (fig. 4.2). Der sendes uafbrudt en strøm gennem et elektrodepar, medens potentialet måles over en række elektrodepar samtidigt. Der er typisk efter filtrering ca. 1 meter mellem datapunkterne. Der er anvendt et "slæb", hvor afstanden mellem strømelektroderne er 30 m, og hvor 8 potentialelektrodepar er fordelt således, at der er elektrodeafstande mellem 2 m og 30 m. Elektrodekonfigurationerne med de korte elektrodeafstande er pol-pol agtige konfigurationer, medens de med længere elektrodeafstande er Wenner eller Wenner-lignende konfigurationer, figur 4.2.



Figur 4.2. Foto (til venstre) af det slæbegeoelektriske system anvendt ved Højstrup. I forgrunden ses en af elektroderne og det kabel, elektroderne er påmonteret. Øverst på fotoet ses det lille bæltekøretøj, som trækker elektrodekablet og transporterer instrumentel. (Foto Lasse Gudmundsson). Skitse (til højre) af slæbegeoelektriske elektrodekonfigurationer. Liniere s1, ..., s8 viser elektrodekonfigurationerne hver for sig. Liniere s1, .. s4, s6 er pol-pol-agtige opstillinger, s5 og s8 er Wenner opstillinger og s7 er en symmetrisk Wenner-lignende opstilling.

De slæbegeoelektriske data er ved Højstrup indsamlet langs profiler, hvor afstanden mellem profillinierne er 5, 10, 25 eller 100 m. Profilliniernes position er fastlagt ved, at fikspunkter for hver 100 m langs liniere er stedsbestemt vha. teodolit. Mellem fikspunkterne bestemmes afstanden mellem målepunkterne vha. af et odometer.

Databehandlingen omfatter her processering og en fysisk tolkning ved brug af invers modellering. Alle data er tolket med inversionsprogrammet SIP (Simultaneous Inversion of Profile oriented resistivity data), hvor data samlet i sonderinger, tolkes med 1-dimensionale jordmodeller, hvis modelparametre er koblet til nabomodellernes modelparametre (Auken

et al, 2000). Udvalgte profiler er tolket med inversionsprogrammet DCIP2D (Oldenburg & Li 1994), hvor data tolkes med en 2-dimensional jordmodel, hvor modellen er opdelt i en række celler, hvis resistivitet estimeres, så de tilpasser data bedst muligt samtidig med, at celleresistiviteterne kun må variere cellerne i mellem med forudbestemte blødhedskrav.

Dataindsamlingen og processeringen er udført af Geologisk Institut, Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet. De har yderligere lavet en tolkning af alle data med inversionsprogrammet SIP. Detaljer vedrørende dataindsamlingen, processeringen og SIP tolkningen er beskrevet i Geologisk Institut (2002) "8-kanals slæbegeoelektrisk kortlægning ved Stevns". Data er tilgængelige på GERDA databasen (web-adresse: gerda.geus.dk; projektet: Stevns KUPA projekt PACES).

4.2 Indsamlede data

4.2.1 EM38 markundersøgelser i forbindelse med udpegning

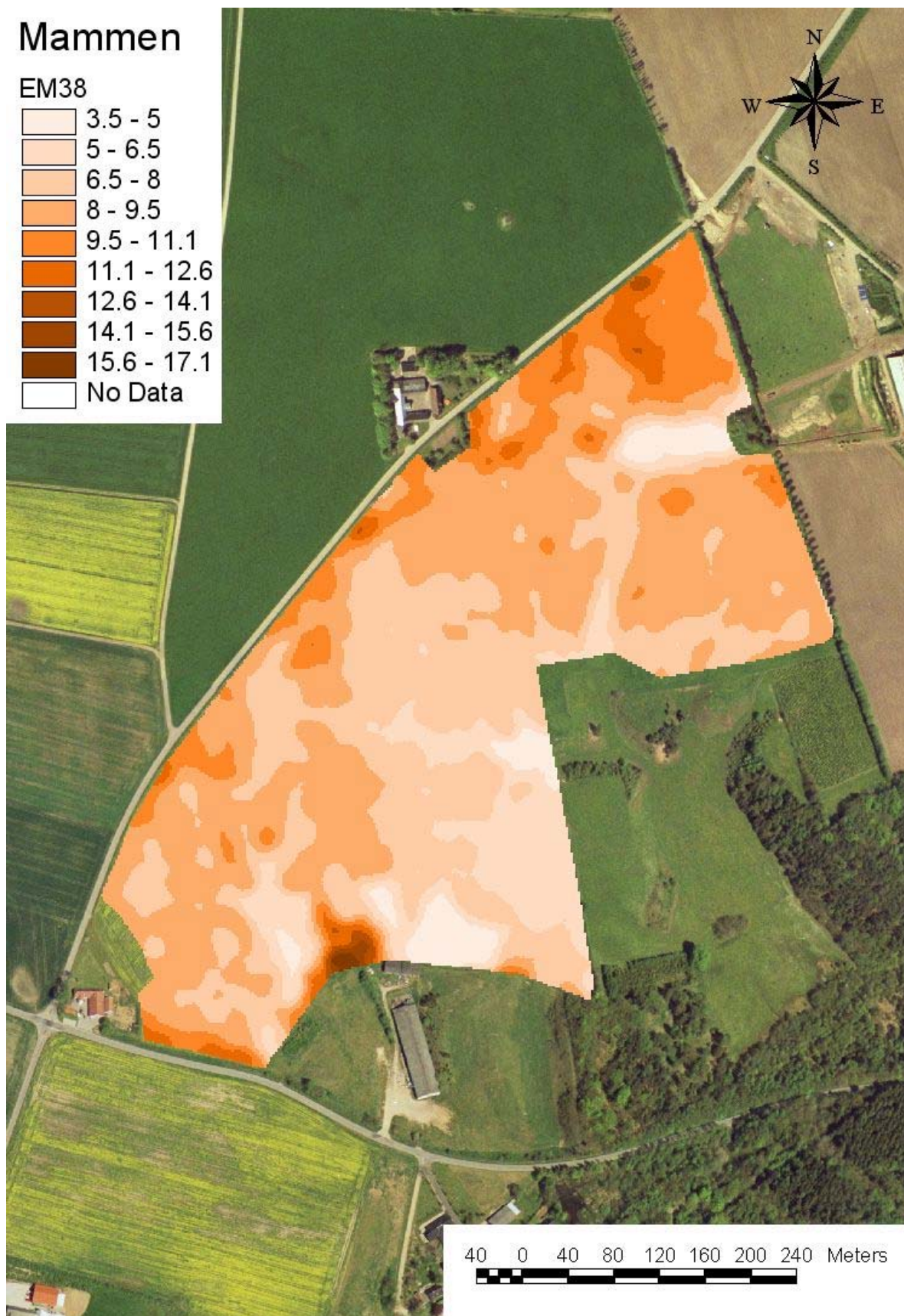
Resultater fra kortlægning med EM38 systemet ved Mammen, Grundfør og Højstrup præsenteres i henholdsvis i figurene 4.3. 4.4 og 4.5 samt figur 4.6.

De tre områder adskiller sig markant fra hinanden med hensyn til gennemsnitlig EM38 måling (mean) og variationskoefficient (CV), tabel 4.1. Områderne repræsenterer forskellige regionale typer af moræneområder og forventes derfor at være vidt forskellige. Resultatet antyder at moræneområderne må regionaliseres efter glacial stratigrafi og landskabstype.

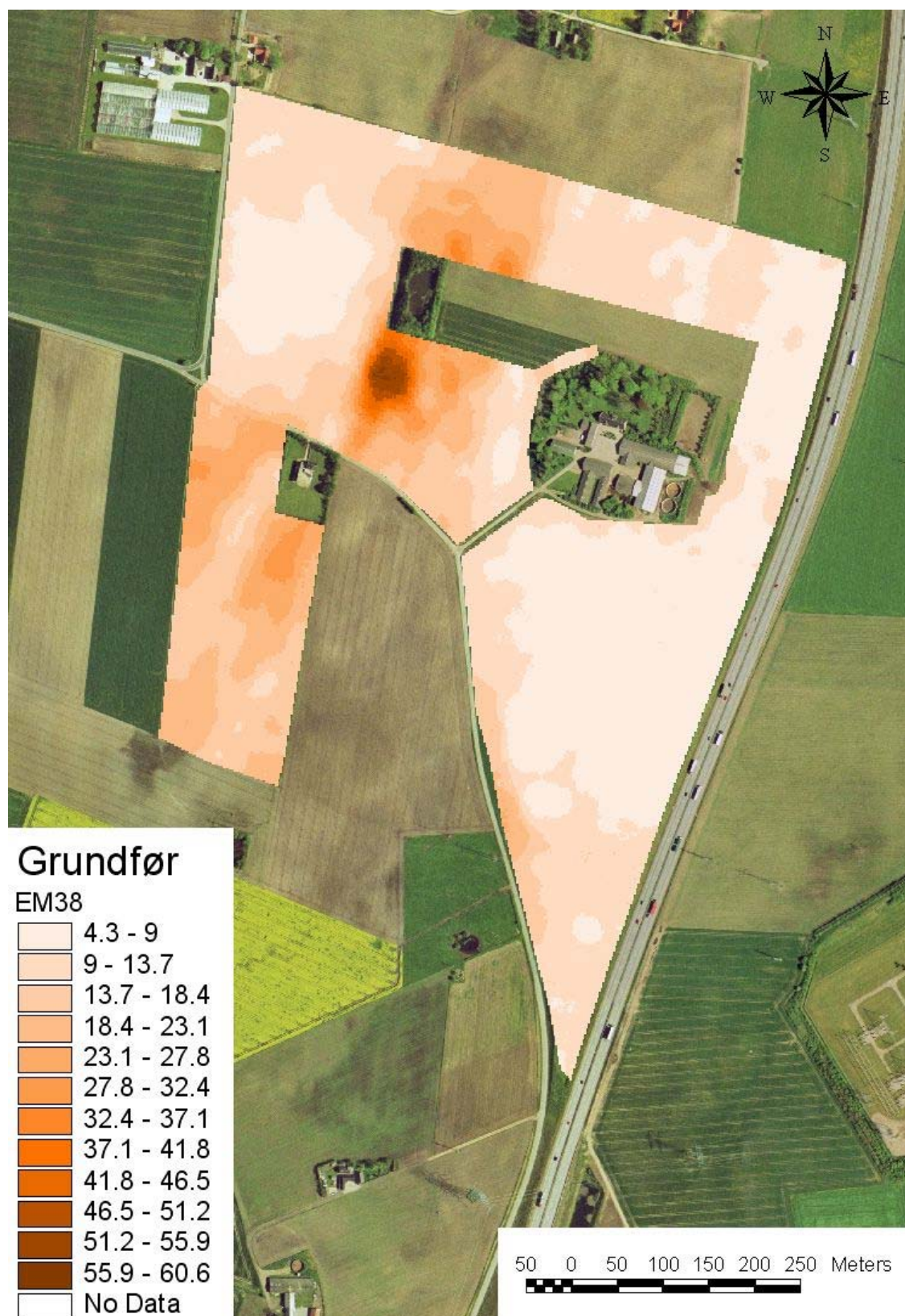
Tabel 4.1. Oversigt over geostatistiske parametre på de tre lerlokaliteter baseret på måling af elektrisk ledningsevne med EM38 (se forklaring af parametre i Barlebo, 2002).

Lerlokaliteter	Mean	Range	Sill	Nugget	CV*	Model
	mS/m	m	(mS/m) ²	mS/m ²	%	-
Højstrup	26,5	135	7,2	3,1	10	Exp.
Grundfør	16,9	151	40	6,6	40	Spherical
Mammen	8,2	84	2,9	0,5	20	Spherical

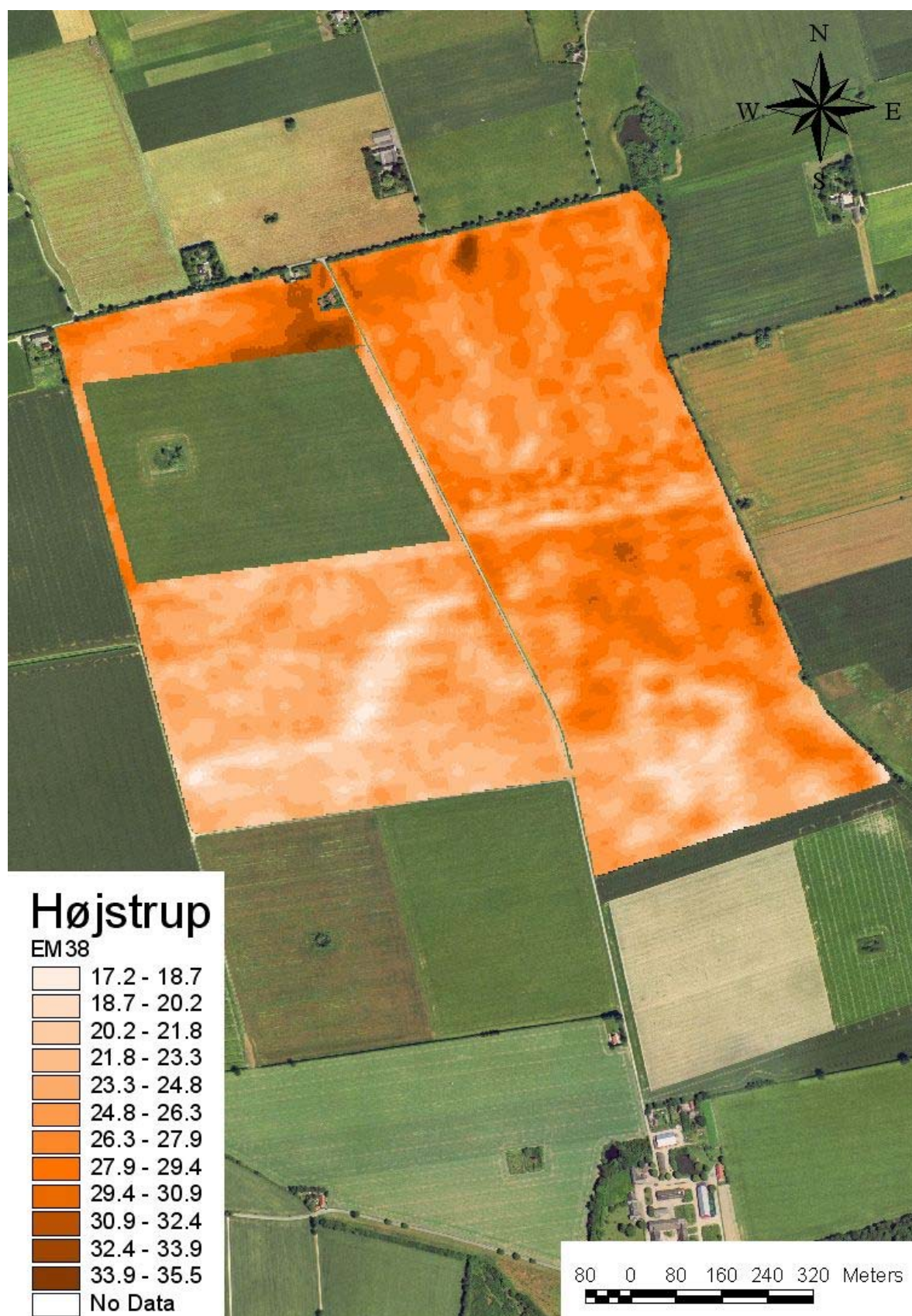
$$*Variationskoefficienten = \frac{\sqrt{VARX}}{\bar{X}} * 100$$



Figur 4.3. EM38 data fra Mammen. Data er elektrisk ledningsevne vist som mS/m.

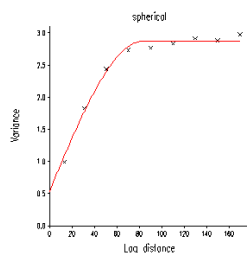


Figur 4.4. EM38 data fra Grundfjør. Data er elektrisk ledningsevne vist som mS/m.

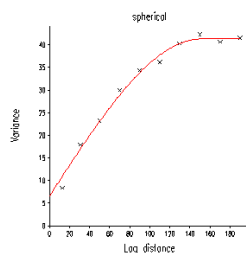


Figur 4.5. EM38 data fra Højstrup. Data er elektrisk ledningsevne vist som mS/m.

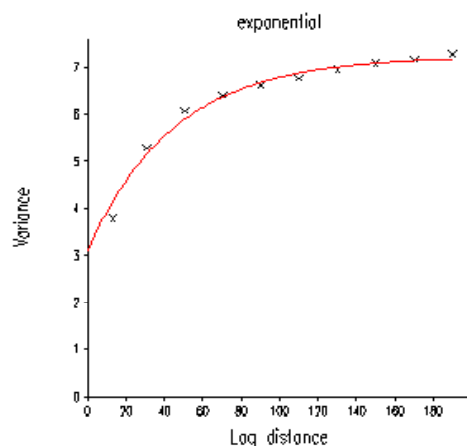
a) Mammen



b) Grundfør



c) Højstrup



Figur 4.6. Variogrammer af EM38 målinger ved a) Mammen, b) Grundfør og c) Højstrup lokaliteterne. Punkterne er det eksperimentelle semivariogram og den røde linie er den bedst fittede variogram model (se forklaring i Barlebo, 2002).

4.2.2 Højstrup geologisk variabilitetsundersøgelse

I dette afsnit præsenteres EM38 og EM31 data samt slæbegeoelektriske data og udvalgte tolkningsresultater af disse.

De geofysiske data er indsamlet langs profiler fordelt over ca. 50 ha ved Højstrup. Figur 4.7 og figur 4.8 viser disse profilers placering samt placeringen af CPT-boringer, snegleboringer og udgravning.

EM38 data er indsamlet dels fladedækkende ved kørsel i alle sprøjtespor, figur 4.9 a, dels ved kørsel i alle slæbegeoelektrik liniere, figur 4.9 b. I den sydlige del af området er der indsamlet EM31 data med en horisontal dipol-orientering, figur 4.9 c og en vertikal dipol-orientering (fig. 4.9 d). Den enkelte dataværdi er en midling over den elektriske ledningsevne fordeling til 3–4 m og 6–7 m under terræn for henholdsvis den horisontale og den vertikale dipol-orientering.

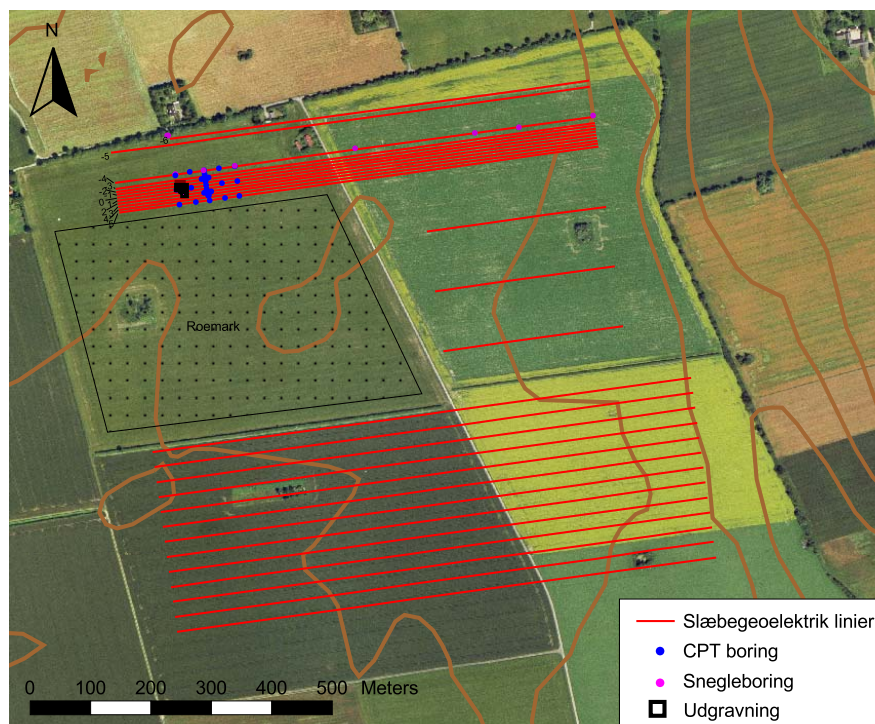
De slæbegeoelektriske data er vist som tilsyneladende resistivitet på et separat kort for hver af de 8 elektrodeafstande, figur 4.10 og 4.11.

Figur 4.12 viser tolkningsresultater for de vestligste dele af slæbegeoelektrik linierne -4 til 4 som dækker området med CPT boringer og udgravningen. At resistiviteten i dybder under ca. 20 m falder samt at den går mod 50 Ω m i siderne af modellen skyldes, at der ikke er information i data til at flytte modelresistiviteterne bort fra reference resistivitetsmodellen på 50 Ω m.

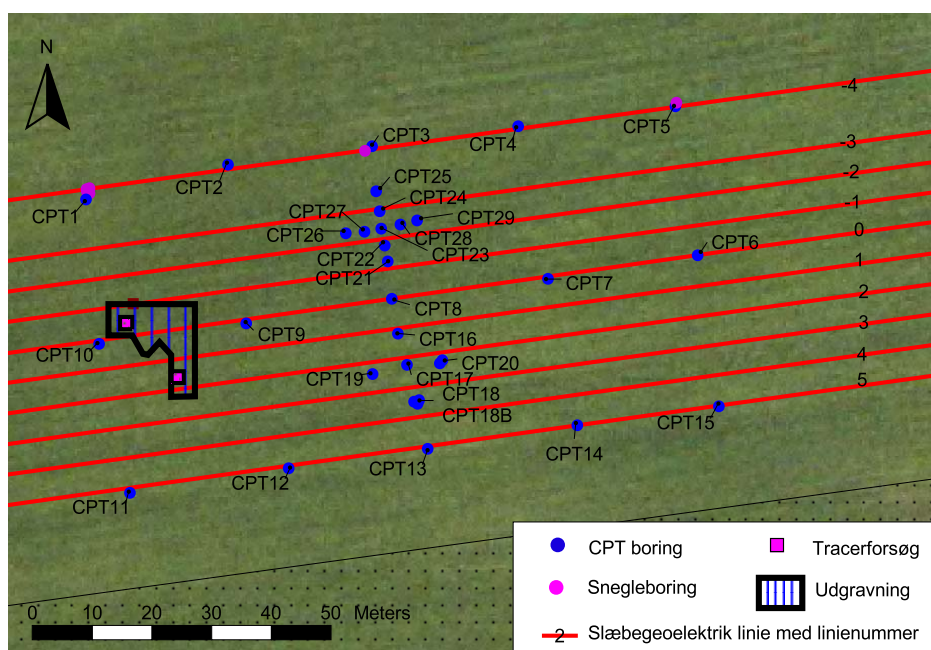
Figur 4.13 viser udsnit af tolkningsresultatet for slæbegeoelektrik linie -4 og 0 sammenstillet med CPT boringernes resistivitetslog. Der er god overensstemmelse mellem resistiviteten i 2D modellernes øverste lag og resistivitetsloggenes in situ målte resistiviteter. Da 2D resistivitetsmodellerne er estimeret under forudsætningen om, at de skal være "bløde", er der en kontinuert overgangszon i resistivitet fra første lag (morænseler) til andet lag (kalk).

Figur 4.14 viser et udsnit af tolkningsresultatet for den vestlige del slæbegeoelektrik linie 20, som er placeret som den tredje sydligste linie, figur 4.7. Omkring position 730–760 m på linien ses en højresistiv struktur lige under terrænoverfladen med en tykkelse på 1–2 m. Denne struktur kan i kortpræsentationen af data erkendes som et sydsydvest-nordnordøst orienteret legeme med en højere resistivitet end de omkringliggende terrænnære aflejringer. 2D resistivitetsmodellen indikerer, at denne struktur er aflejret oven på eller svagt nedskåret i morænelersaflejringerne og at denne ikke er i direkte kontakt med de underliggende kalkaflejringer.

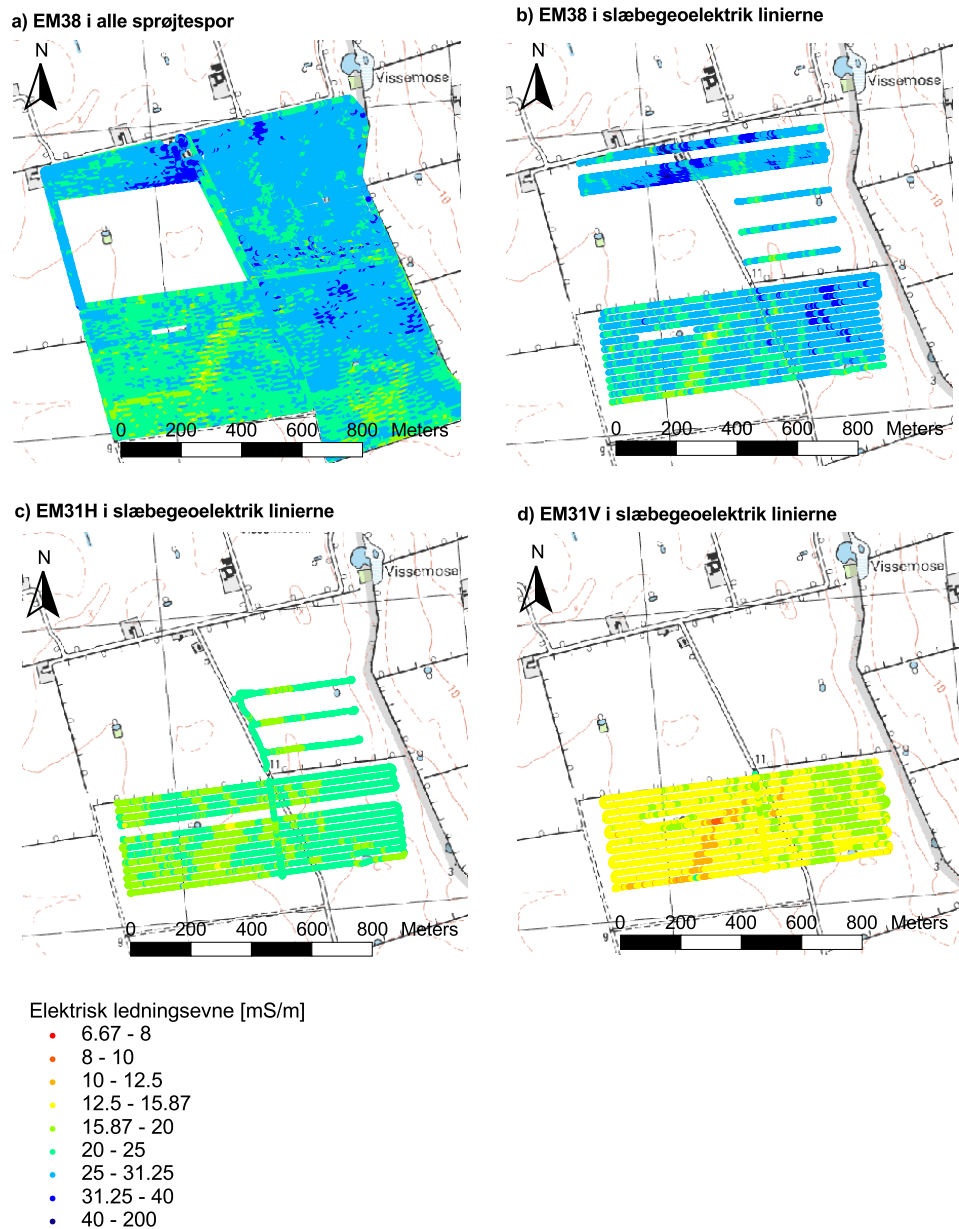
Figur 4.15 viser en sammenstilling af resistivitetsloggen fra alle CPT boringerne. I ca. 3 m dybde er der et fald i resistivitet som registreres i alle resistivitetslogs, ligeledes registreres en stigning i resistivitet i alle logs omkring 5,5 m dybde.



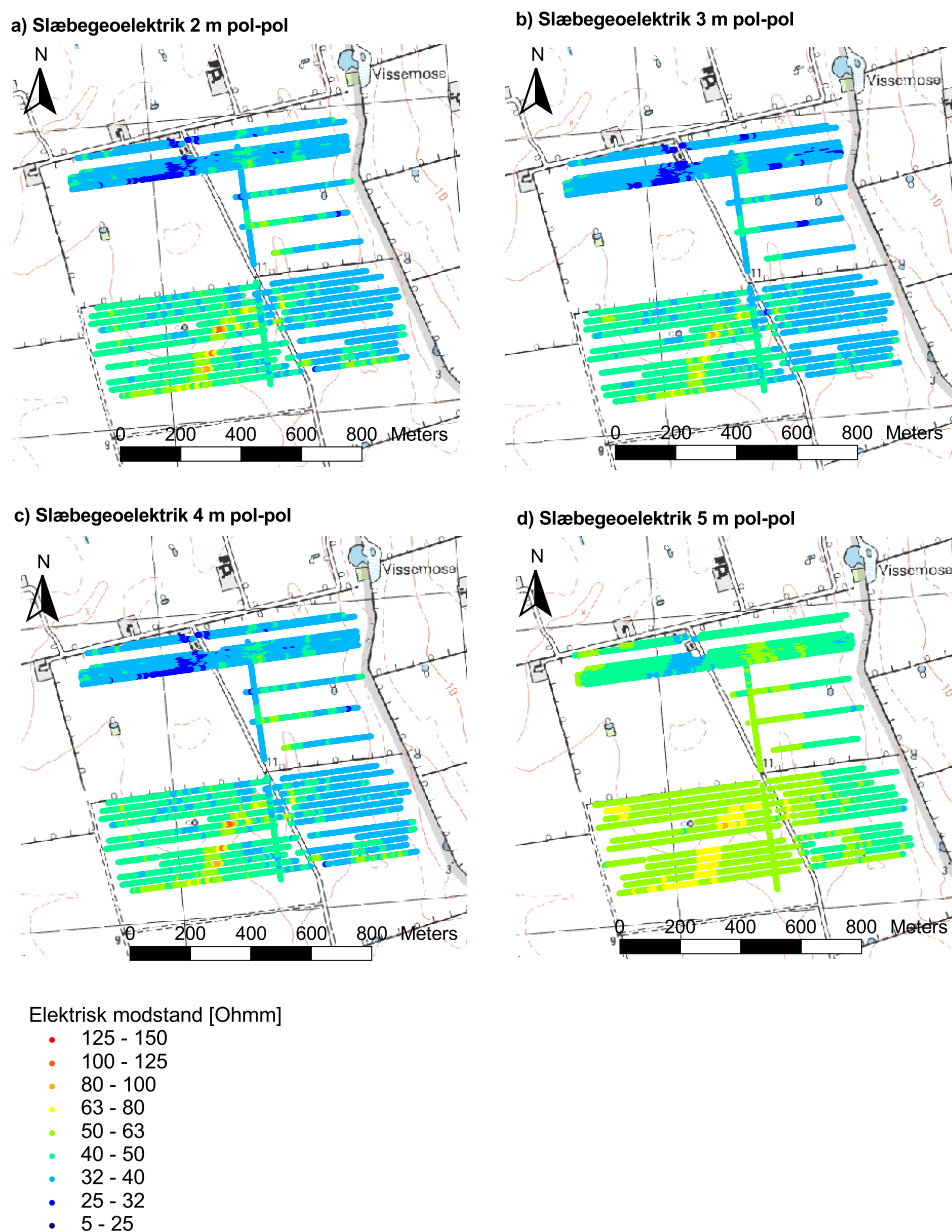
Figur 4.7 Kort over undersøgelsesområdet ved Højstrup, hvor slæbegeoelektriske linier, CPT boringer, snegleboringer og udgravningen er markeret.



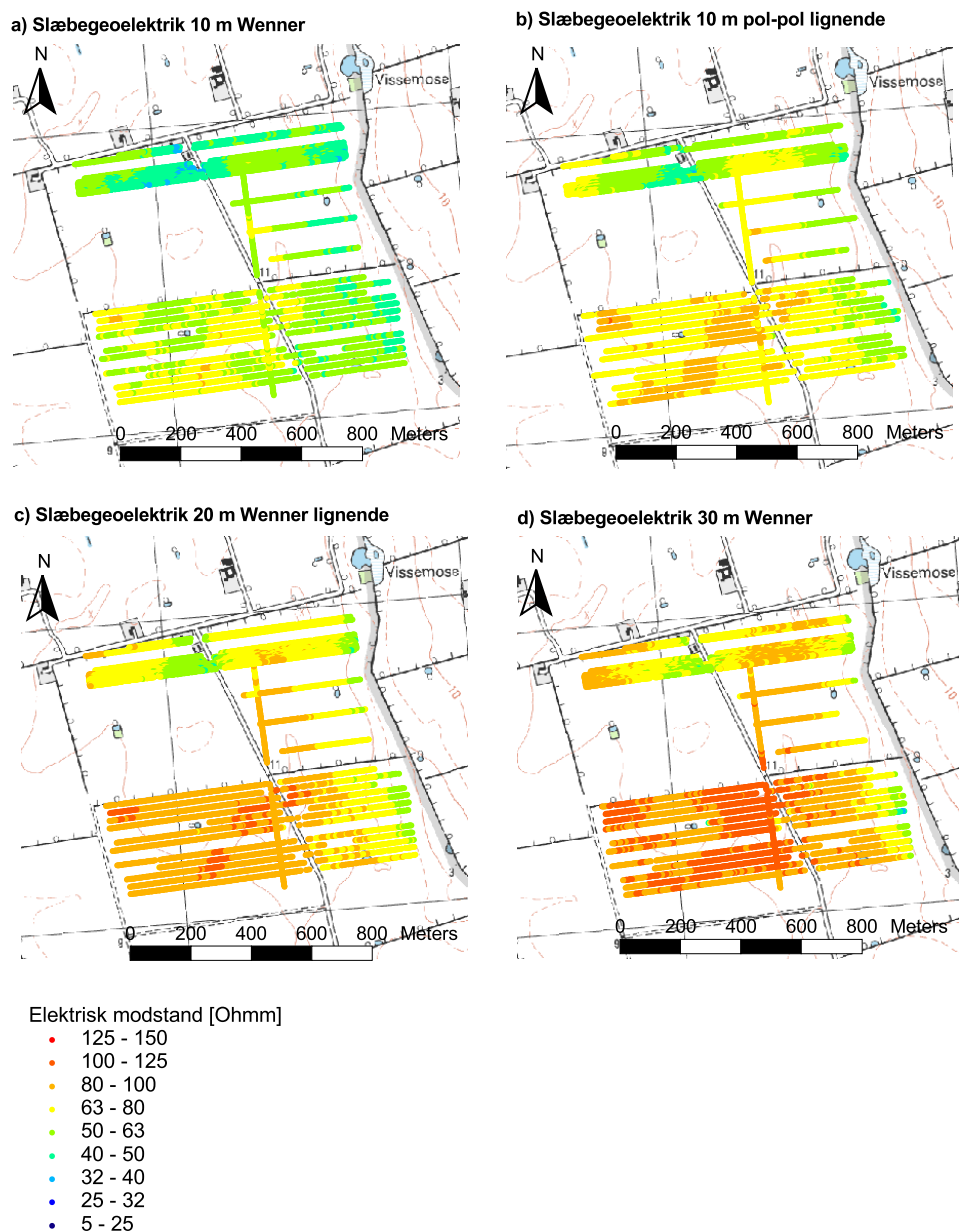
Figur 4.8. Kort over den nordvestlige del af undersøgelsesområdet ved Højstrup, hvor CPT undersøgelsen og udgravningen er udført. Slæbegeoelektriske linier, CPT boringer, snegleboringer og udgravningen er markeret.



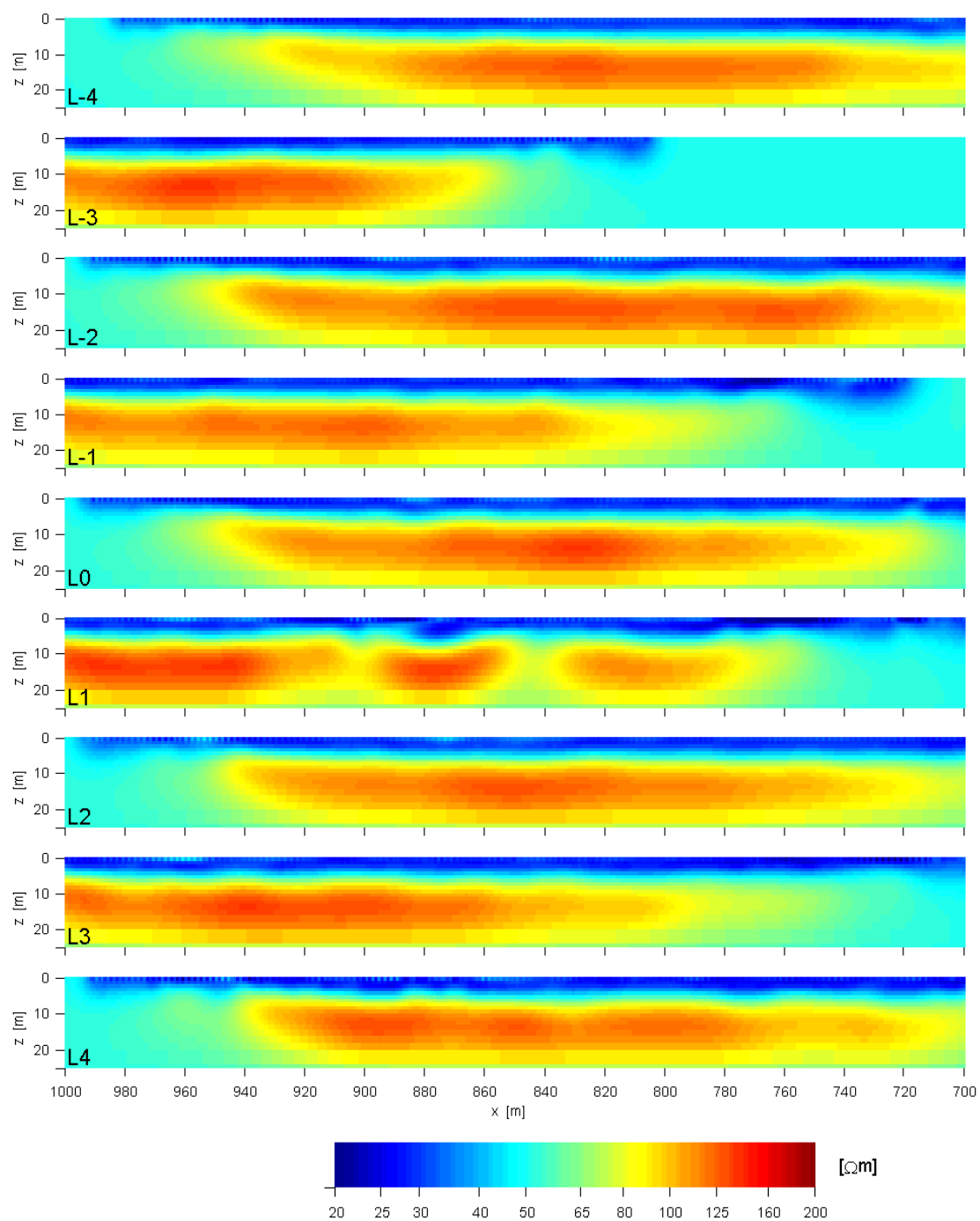
Figur 4.9. EM38 og EM31 data målt ved Højstrup. EM38 data målt a) fladedækkende i alle sprøjtespor og b) i alle slæbegeoelektrik linier. EM31 data målt med c) horisontal og d) vertikal dipolorientering. Data er vist som tilsyneladende elektrisk ledningsevne i mS/m i en farveskala som svarer til den reciprokke værdi i resistivitetsfarveskalaerne i figur 4.10 og 4.11.



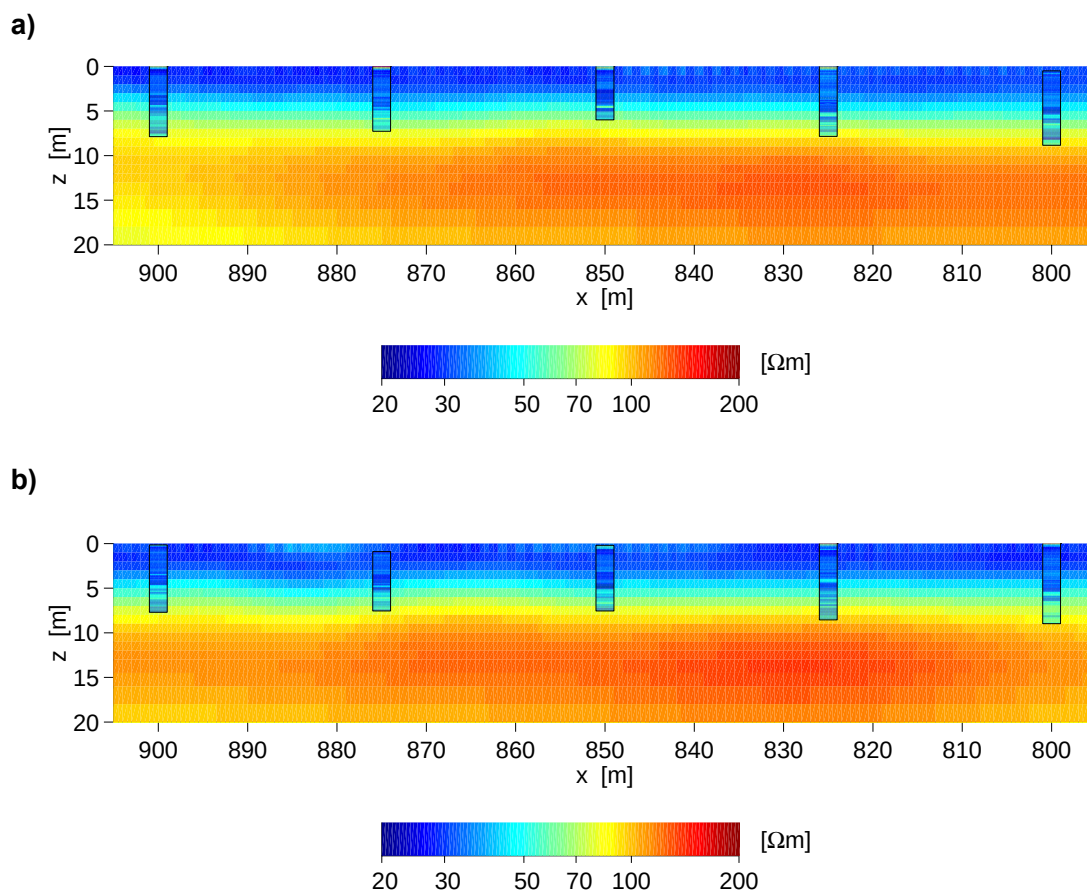
Figur 4.10. Slæbegeoelektriske data målt ved Højstrup med a) 2 m pol-pol elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 1,5 m, b) 3 m pol-pol elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 2,1 m, c) 4 m pol-pol elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 2,7 m og d) 5 m pol-pol elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 3,8 m. Data er vist som tilsyneladende resistivitet i Ωm i en farveskala som svarer til farveskalaen for elektrisk ledningsevne i mS/m i figur 4.9.



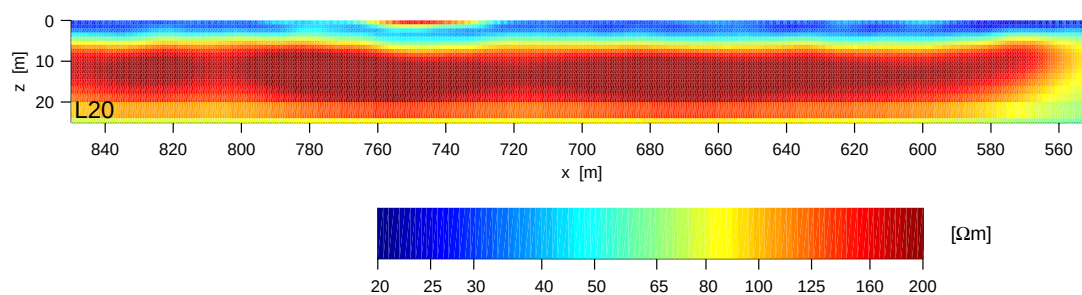
Figur 4.11. Slæbegeoelektriske data målt ved Højstrup med a) 10 m Wenner elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 5,2 m, b) 10 m pol-pol lignende elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 7,5 m, c) 20 m Wenner lignende elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 10,8 m og d) 30 m Wenner elektrodekonfiguration med en fokusdybde på 15,6 m. Data er vist som tilsyneladende resistivitet i Ωm i en farveskala som svarer til farveskalaen for elektrisk ledningsevne i mS/m i figur 4.9.



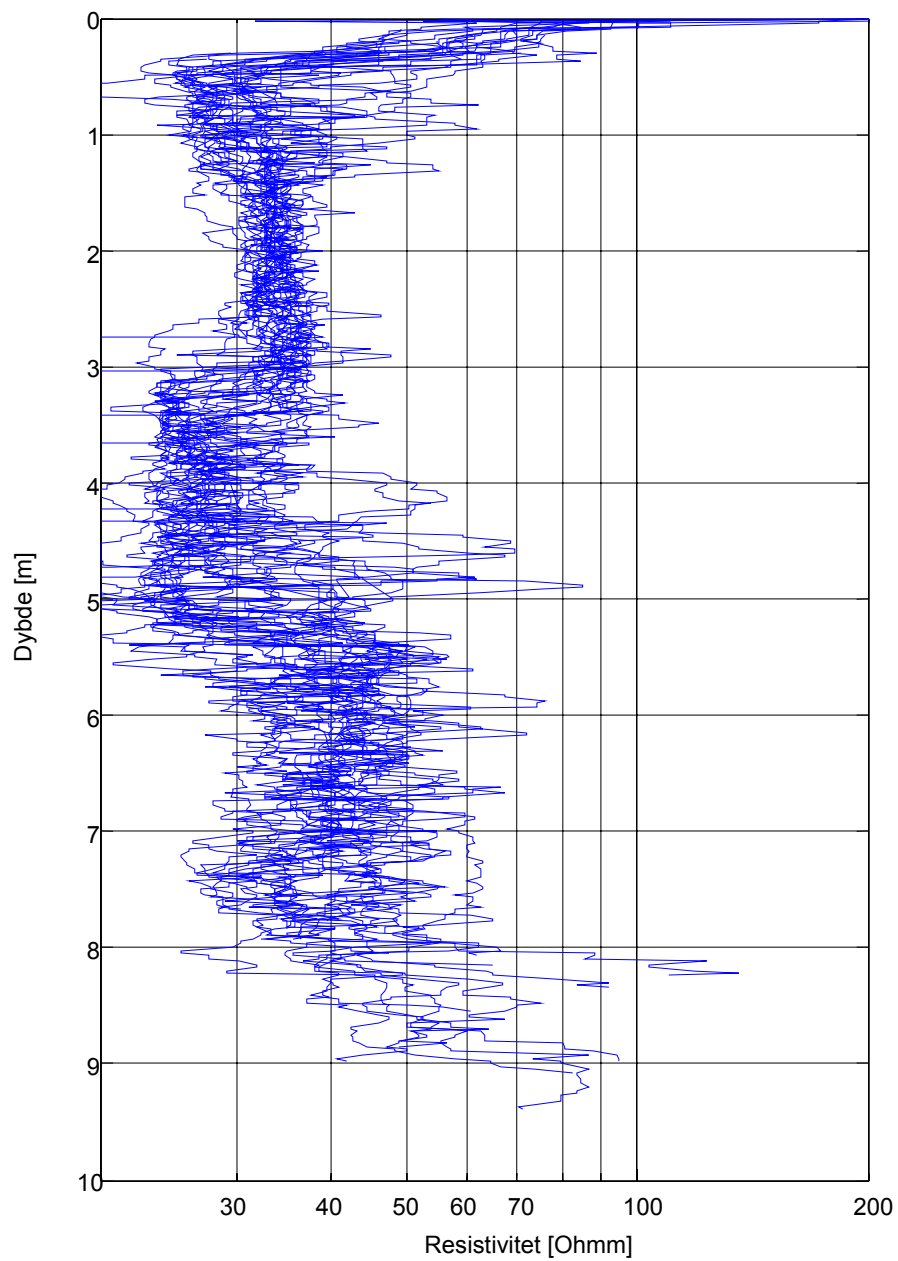
Figur 4.12. Tolkingsresultater for slæbegeoelektriske data i den nordvestlige del af Højstrup undersøgelsesområde. Tolkningen er udført ved brug af 2D inversionsprogrammet DCIP2D. Position 1000 m er ved den vestligste ende af slæbegeoelektriklinierne.



Figur 4.13. Udsnit af tolkningsresultater i fig. 4.12 for slæbegeoelektrisk a) linie -4 og b) linie 0. De geoelektriske profiler er sammenstillet med CPT borerne resistivitetslog. I a) er det fra venstre mod højre CPT boring 1, 2, 3, 4 og 5. I b) er det fra venstre mod højre CPT boring 10, 9, 8, 7, og 6.



Figur 4.14. Udsnit af tolkningsresultat for slæbegeoelektrik linie 20 ved Højstrup, som er tredje sydligste linie i kortlægningen, figur 4.7. Den vestlige ende af linien ligger i position 1000 m.



Figur 4.15. Resistivitetslogs fra alle CPT boringerne ved Højstrup plottet sammen.

4.3 Resultater

Kortlægningen på Højstrup viser, som det også er kendt fra tidligere kortlægninger, at EM38, EM31 og slæbegeoelektrik kan anvendes til kortlægning af inhomogeniteter så som sandlag og sandlinser i morænelersaflejringer. Disse inhomogeniteter skal antagelig have en lateral udstrækning på mere end ca. 10 m for at kunne detekteres med sikkerhed, dog under forudsætning af, at data er samlet med kortere afstand samt at der er en resistivtetskontrast mellem moræneler og inhomogenitet. EM38 systemet, som har en indtrængningsdybde på 1-1,5 m kan af den grund kun detektere inhomogeniteter, som stort set har kontakt med terrænoverfladen. Denne kortlægning viser, at det med den sparsomme dybdeinformation man opnår ved at indsamle data med EM31 systemet målt både med vertikal og horisontal dipolorientering, samt EM38 systemet, ofte ikke er tilstrækkelig til at kunne vurdere inhomogeniteters vertikale udstrækning i morænelerslaget. Antagelig kan der ikke skelnes mellem relativt tynde sandlag aflejret oven på morænelerslaget, relativt tykke sandlag i morænelerslaget eller en udtynding af morænelerslaget, hvis morænelerslaget overlejrer et resistivt lag som f.eks. kalk- eller sandaflejringer.

Kortlægningen ved Højstrup har vist, at man med slæbegeoelektrik vertikalt kan opløse større inhomogeniteter i forbindelse med morænelersaflejringer, så som 1-2 m tykke sandaflejringer i kanalformer aflejret oven på moræneleren, 4.14. Inhomogeniteter i morænelersaflejringerne skal have en betydelig tykkelse og udstrækning for at kunne opløses, hvilket generelt vil sige tykkelser svarende til den dybde, hvori de er begravet.

Slæbegeoelektriske data kan anvendes i en kvantitativt bestemmelse af morænelersaflejringens tykkelse, hvis denne ikke er tykkere end 10-15 m (f.eks. figurerne 4.12, 4.13 og 4.14. Denne tykkelsesbestemmelse kan dog være behæftet med relative store fejl, hvis resistivitetsfordelingen i jordlagene giver anledning til ækvivalente modeller. Laterale variationer i tykkelsen med bølgelængder, der er større end 30-50 m, kan kortlægges selv for små tykkelsesændringer.

4.4 Diskussion

Skala ?

EM38, EM31 og slæbegeoelektrik undersøgelserne dækker adskillige marker og kan nærme sig landskabselementskalet.

Kan data skaffes ?

De geofysiske data kan altid skaffes ved at udføre en kortlægning. I områder der inden for de senere år er kortlagt i forbindelse med en grundvandskortlægning vil det i nogen udstrækning være muligt at hente geoelektriske data fra den nationale GERDA database (<http://gerda.geus.dk>). Der arbejdes også på at kunne lagre EM38 og EM31 data i GERDA databasen.

Er det realistisk at skaffe data? EM38 data kan indsamles med hastigheder på op til 25–30 km/t og man er derfor i stand til at kortlægge store arealer forholdsvis hurtigt. Der er også realistisk at indsamle EM31 data over store arealer, dog vil det være fornuftigt at vurdere om en større afstand mellem linier kan anvendes. Der er ikke realistisk at indsamle slæbegeoelektriske data med de korte linieafstande, der er anvendt i kortlægningen på Højstrup. Slæbegeoelektrik anvendes i stor grad i grundvandskortlægningen med linieafstande på 150–250 m eller større.

Er data relevante ?

Data er relevante i vurdering af den geologiske variabilitet på skalaer fra markstørrelse til op mod landskabselementsstørrelse og dermed relevante for opskalering. Den geologiske variabilitet er forsøgt kvantificeret ved brug af EM38 data. For EM38 systemet, der har et relativ lille midlingsvolumen (følsomhedsfunktion), er det rimeligt at antage, at semivariogrammer estimeret ud fra målte tilsyneladende elektriske ledningsevneværdier afspejler en faktisk elektrisk ledningsevne variabilitet. Geoelektriske data og andre geofysiske data med større og mere komplekse midlingsvolumener kan ikke direkte indgå i en geostatistisk analyse, da man må antage, at det er nødvendigt at tage højde for måleinstrumentets systemrespons.

Geoelektriske data i profiler indsamlet med slæbegeoelektrisk system eller multielektrode profileringssystemer (MEP) er relevante til bestemmelse af variationer i tykkelsen af morænelersdækket og til interpolation mellem borer. Disse metoder kan også anvendes i en vurdering af om sandaflejringer i kontakt med terrænoverfladen er huller i eller aflejring oven på moræneleren.

4.5 Litteratur

Auken, E., Thomsen, P. og Sørensen, K. 2000. Lateral constrained inversion (LCI) of profile oriented data - the resistivity case: Proceedings of the 6th Meeting of the Environmental & Engineering Geophysical Society (European Section), Bochum, Germany, EEGS, EL06.

Barlebo, H. C. 2002. Undersøgelser- og analysemetoder anvendt i forbindelse med undersøgelser af sandlokaliteter: Hvilke metoder er anvendt, og hvilke overvejelser er gjort? Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme arealer, rapport nr. 2. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet, 62 pp.

Geologisk Institut. 2002. 8-kanals slæbegeoelektrisk kortlægning ved Stevns – Dataafrapportering. Rapport nr. 2002 09 001, Geofysisk Afdeling, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.

Møller, I. 2001. Geofysik i umættet zone: En vurdering af metoder og instrumentsystemers egnethed til kortlægning af den umættede zone. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme arealer, rapport nr. 1. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljø- og Energiministeriet, 85 pp.

Oldenburg, D.W. og Li, Y. 1994. Inversion of Induced Polarization Data Geophysics, 59: 1327-1341.

Sørensen, K.I. og Pedersen, F.F. 1991. Den slæbegeoelektriske metode. Råstofkontorets kortlægningsserie 9, Skov- og Naturstyrelsen, Miljøministeriet.

5. Hydrauliske undersøgelser – laboratorieundersøgelser

Bo Vangsø Iversen (DJF) og Ole Hørbye Jacobsen (DJF)

5.1 Metodebeskrivelse

5.1.1 Udtagning af prøver i felten

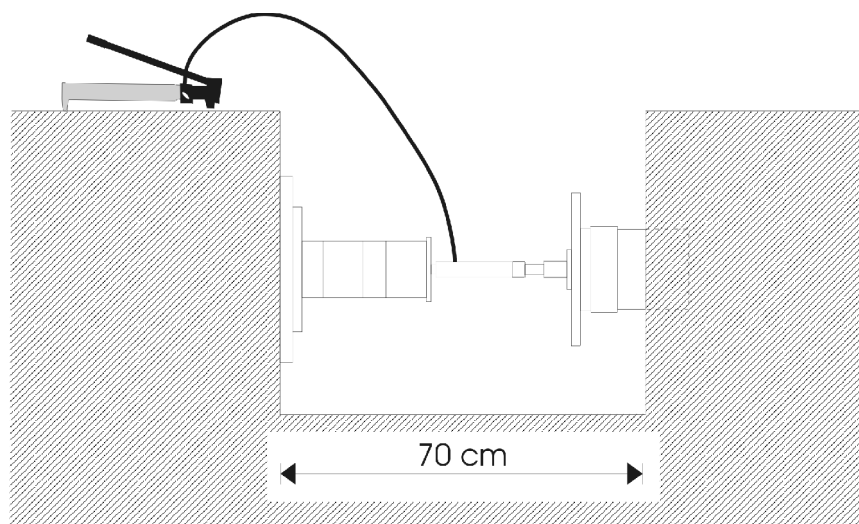
Feltarbejdet i forbindelse med prøveudtagelsen foregik i oktober måned, 2002. En undtagelse var dog prøveudtagelsen af de dybe prøve ved Gjorslev (C(I), C(II) og C(III)), figur 5.3, der fandt sted allerede i august måned samme år. I tilknytning til de pedologiske/geologiske beskrivelser af de udgravede profiler blev der i udvalgte horisonter/dybder udtaget intaktprøver i henholdsvis store kolonner (længde: 20,0 cm længde, i indre diameter: 20 cm) samt små 100 cm³ retentionsringe (6,10 cm i indre diameter). Som en hovedregel blev prøverne udtaget i en vertikal retning. I enkelte dybder blev der dog udtaget ekstraprøver (store kolonner) i en horisontal retning. De vertikalt udtagne store kolonner blev i dybden fra muldlaget (Ap-horisonten) til ca. 130 cm udtaget ved hjælp af en hydraulisk presse monteret bag på en traktor. Udtagningen af dybereliggende vertikale kolonner blev foretaget ved anvendelsen af et universelt udtagningsudstyr udviklet af Eijkelkamp Agrisearch Equipment, hvor kolonnen blev presset ned ved hjælp af en hydraulisk håndpumpe. Udtagning af horisontale kolonner blev ligeledes foretaget ved hjælp af den hydrauliske håndpumpe, hvor den modstående profilvæg blev brugt som "kontravægt", figur 5.1. Små 100 cm³ retentionsringe blev manuelt udtaget ved nedhamring med en specialkonstrueret flange. Som hovedregel blev der udtaget fem vertikale kolonner og fem retentionsringe ved hvert udtagespunkt. Ved horisontal prøveudtagelse blev der som hovedregel udtaget tre kolonner. Alle prøver blev under transport og opbevaring beskyttet mod udtørring og mekaniske forstyrrelser ved hjælp af plastlåg. Indtil analysen blev alle prøver opbevaret på køl ved en temperatur på 2 °C.

Gjorslev

Ved Gjorslev blev der udtaget vertikale prøver (kolonner og retentionsringe) i seks dybder, figur 5.2 og 5.3. I de tre nederste dybder i C-horisonten, C(I), C(II) og C(III), blev der i hver dybde kun udtaget tre kolonner. I Bv-horisonten blev der ydermere udtaget tre horisontale kolonner.

Højstrup

Ved Højstrup blev der udtaget vertikale prøver (kolonner og retentionsringe) i fem dybder, figur 5.2 og 5.3. Der blev ydermere udtaget horisontale kolonner i to dybder i C-horisonten (C(g)- og C(I)).



Figur 5.1. Udtagning af horisontale kolonner med hydraulisk håndpumpe.

Mammen

Ved Mammen blev der udtaget vertikale prøver (kolonner og retentionsringe) i seks dybder, figur 5.2 og 5.3. Grundet Bt(g)-horisontens grove prismatiske struktur (se også bilag 1) var det ikke muligt at presse de store kolonner ned i jorden. Der blev derfor i denne horisont udelukkende udtaget retentionsringe. Ap-horisonten var ligeledes hård (og tør), hvilket også her besværliggjorte udtagelsen af store kolonner. Her lykkedes det dog at udtage tre kolonner samt fem retentionsringe. I smeltevandssandet (C(III)) blev der som i Ap-horisonten ligeledes kun udtaget retentionsringe. I de to øverste dybder i C-horisonten (C(I) og C(II)) blev der ydermere udtaget horisontale kolonner.

Grundfør

Ved Grundfør blev der udtaget vertikale prøver (kolonner og retentionsringe) i fem dybder, figur 5.2 og 5.3. Der blev udtaget horisontale kolonner i Bv- og C(I)-horisonten.

5.1.2 Måling af vandretention og mættet hydraulisk ledningsevne

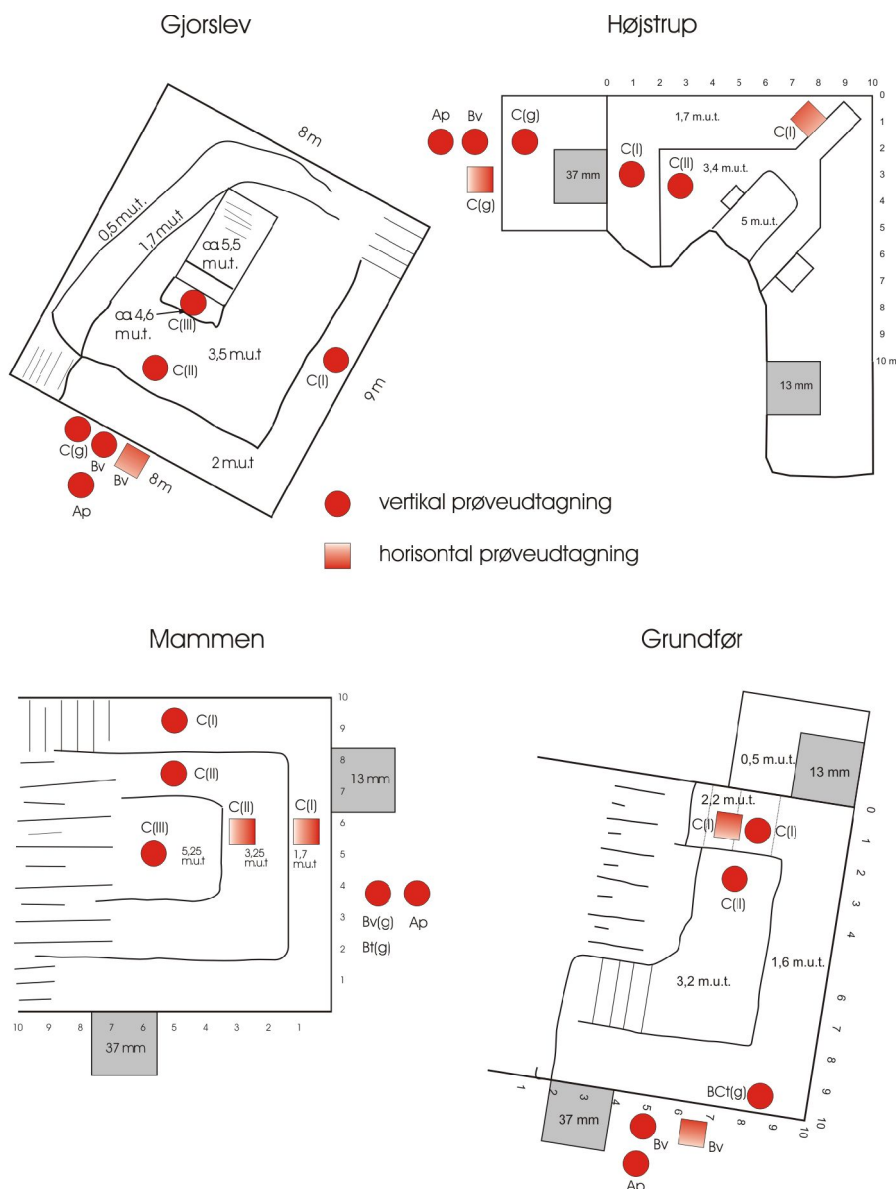
Store kolonner

I laboratoriet blev prøverne mættet langsomt op i løbet af tre dage. Derefter blev de afdrænet til et vandpotentiale svarende til -20 cm vandsøjle (v.s.) i midten af prøven. Efterfølgende blev den mættede hydrauliske ledningsevne (K_s) målt ved et konstant trykniveau (Klute og Dirksen, 1986).

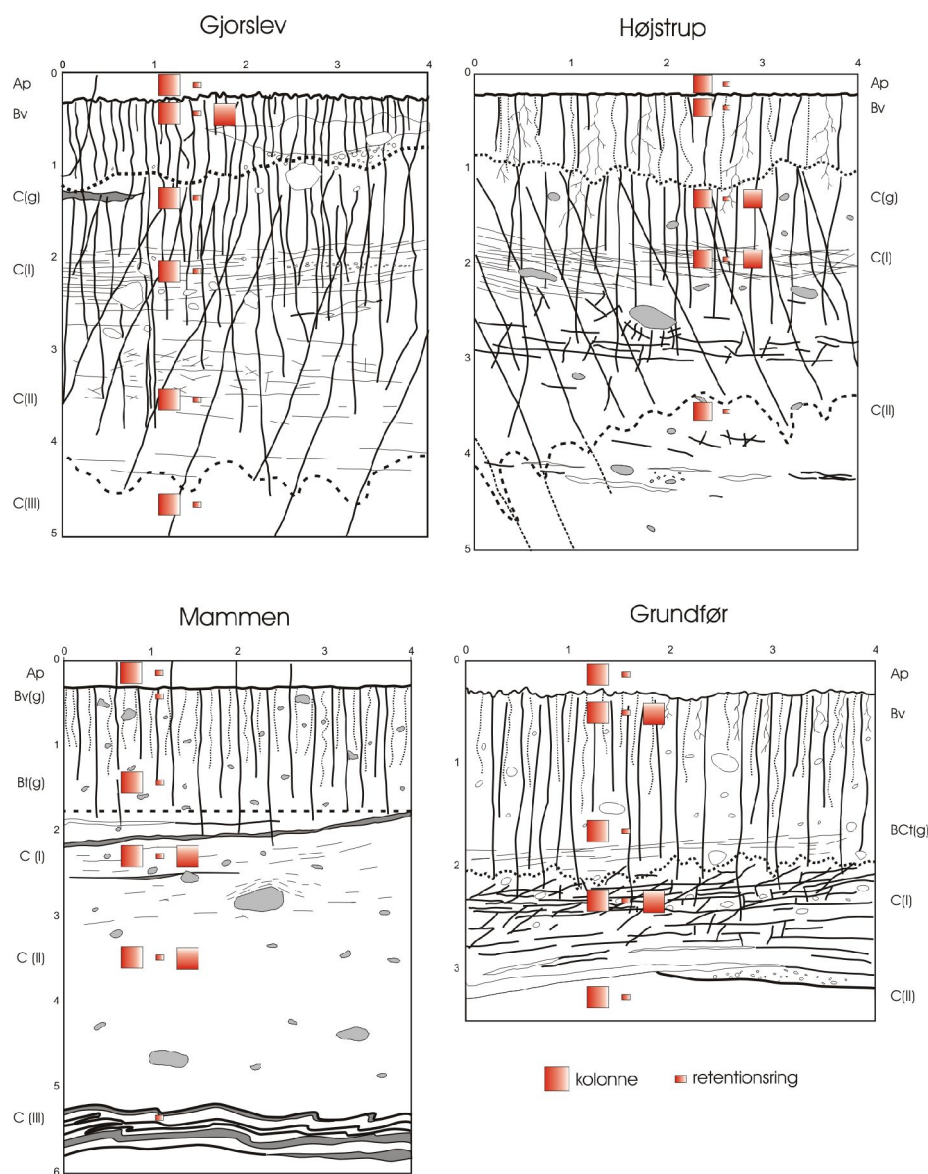
Retentionsringe

Efter en forudgående afvejning blev de små retentionsringe placeret i en sand-boks og langsomt mættet op fra nederen. Vandretentionsforløbet blev derefter bestemt ved at afdræne prøverne til et vandindhold svarende til -10 , -16 , -50 , -100 , -160 , -500 , -1000 og $-$

15800 cm v.s. Afdræningspotentialer fra –10 til –100 cm v.s. blev udført i sandboksen, hvorimod de resterende afdræninger blev foretaget i trykgryder. Afdræningen til –15850 cm v.s. blev bestemt på løs 2-cm-sigtet jord (Klute, 1986). De anvendte udstyr til afdræning samt proceduren er nærmere beskrevet i Schjønning (1985). For retentionsringe udtaget i niveauer, hvor der samtidig ikke var udtaget store kolonner, blev der i tillæg til måling af vandretentionsforløbet ligeledes målt K_s . I denne forbindelse blev prøverne genopmættet, og den mættede hydrauliske ledningsevne blev målt ved et konstant trykniveau (Klute & Dirksen, 1986) med en teknik beskrevet af Rasmussen (1976). Til sidst blev alle prøver tørret ved 105°C i 24 timer og bagefter vejret til bestemmelse af tørvægt.



Figur 5.2. Oversigtskort over udtagningspunkterne i forbindelse med udtagningen af kolonner (vertikale og horisontale) samt retentionsringe (vertikal) i udgravningerne ved de fire lokaliteter.



Figur 5.3. Udtagningsdybderne ved de fire lokaliteter. Betegnelserne for de korresponderende pedologiske horisonter er angivet ved siden af profiltegningerne. Store kolonner blev i enkelte dybder udtaget både horisontalt og vertikalt (eksempelvis i Bv-horisonten ved Gjorslev). Placeringen af kolonnerne og retentionsringene på figurerne svarer ikke fuldstændigt til de nøjagtige udtagelsespunkter i felten, men repræsenterer de forskellige dybder/horisonter, hvorfra der blev udtaget prøver.

5.2 Resultater

5.2.1 Volumenvægt

Tabel 5.1 viser værdierne for jordens volumenvægt ved de fire lokaliteter. Generelt ses de højeste volumenvægte ved de to lokaliteter på Stevns (Gjorslev og Højstrup). Specielt den nederste del af profilerne udviser meget høje volumenvægte op til 1,9 g/cm³. Profilerne viser alle et typisk forløb med de laveste værdier i den relativt løst bearbejdede, organiskholdige Ap-horisont og med et stigende forløb i dybden. Ved Mammen og Grundfør udviser de relativt grovkornede smeltevandslag i bunden af profilet dog lave volumenvægte. Lavest volumenvægt er målt i Ap-horisonten ved Mammen.

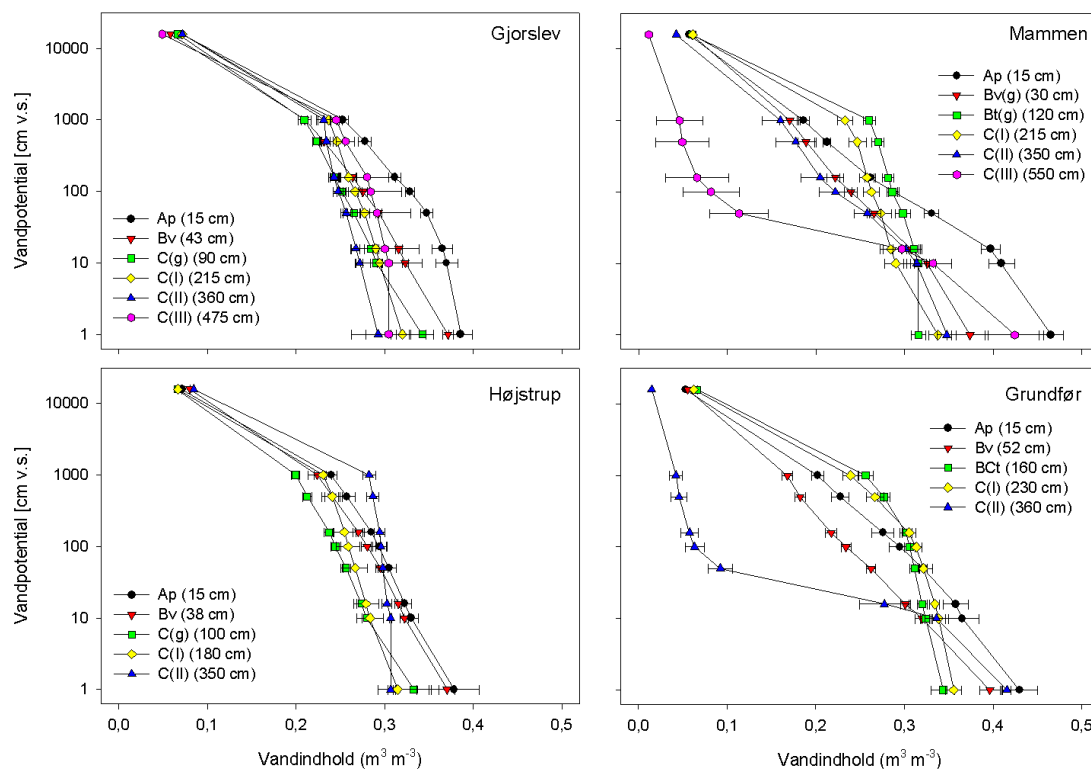
Tabel 5.1. Volumenvægt (g/cm³) målt på 100-cm³ retentionsringe (n=5).

Gjorslev				Højstrup			
Horisont	Dybde (cm)	volumenvægt (g/cm ³)	std.afv.	Horisont	Dybde (cm)	volumenvægt (g/cm ³)	std.afv.
Ap	15	1,63	0,03	Ap	15	1,65	0,08
Bv	43	1,67	0,02	Bv	38	1,67	0,02
C(g)	90	1,74	0,03	C(g)	100	1,77	0,05
C(I)	215	1,80	0,02	C(I)	180	1,82	0,06
C(II)	360	1,87	0,04	C(II)	350	1,88	0,01
C(III)	475	1,87	0,11	-	-	-	-
Mammen				Grundfør			
Ap	15	1,42	0,04	Ap	15	1,51	0,05
Bv(g)	30	1,66	0,05	Bv	52	1,60	0,03
Bt(g)	120	1,83	0,02	BCt(g)	160	1,74	0,04
C(I)	215	1,76	0,03	C(I)	230	1,71	0,02
C(II)	350	1,73	0,03	C(II)	360	1,55	0,01
C(III)	550	1,53	0,09	-	-	-	-

5.2.2 Vandretention og porestørrelsesfordeling

Vandretention

Generelt udviser jorden ved de forskellige lokaliteter en høj vandholdende kapacitet, figur 5.4. Kun de sandede lag i bunden af profilerne ved Mammen og Grundfør udviser en kraftig afdræning fra mætning til et vandpotential omkring 50 cm v.s. Generelt er der en lavere variation mellem dybderne for de to profiler ved Stevns (Gjorslev og Højstrup) sammenlignet med de to profiler i Østjylland (Mammen og Grundfør). Ligeledes er der en tendens til, at jorden ved Stevns har en højere vandholdende kapacitet sammenlignet med de to jorde i Østjylland, hvilket stemmer overens med et højere indhold af ler for de førstnævnte jorde.



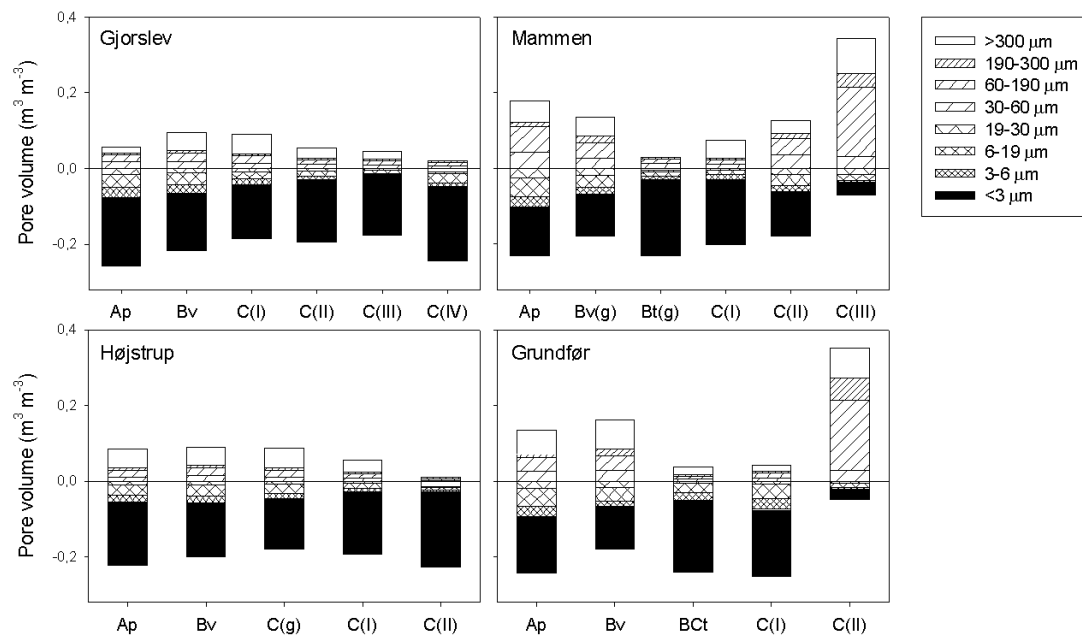
Figur 5.4. Data for vandretention målt på 100 cm³ retentionsringe. Alle værdier er aritmetiske middelværdier. Fejllinjerne viser ± 1 standardafvigelse.

Porestørrelsesfordeling

Figur 5.5 viser porestørrelsesfordelingen beregnet fra vandretentionsmålingerne ud fra den almindelige forudsætning om relation mellem ækvivalen porediameter (d) i μm og vandpotential (h) i cm vandsøjle:

$$d = 3000 / -h$$

De sandede smeltevandslag i bunden af profilerne ved Mammen og Grundfør skiller sig tydeligt ud ved at have en markant høj andel af grovporer ($d > 30 \mu\text{m}$) sammenlignet med de andre horisonter. Der er en tendens til, at profilerne i Østjylland (Mammen og Grundfør) har et højere indhold af grovporer sammenlignet med profilerne på Stevns (Gjorslev og Højstrup). Dette er specielt udtalt i de øverste horisonter (Ap og Bv).

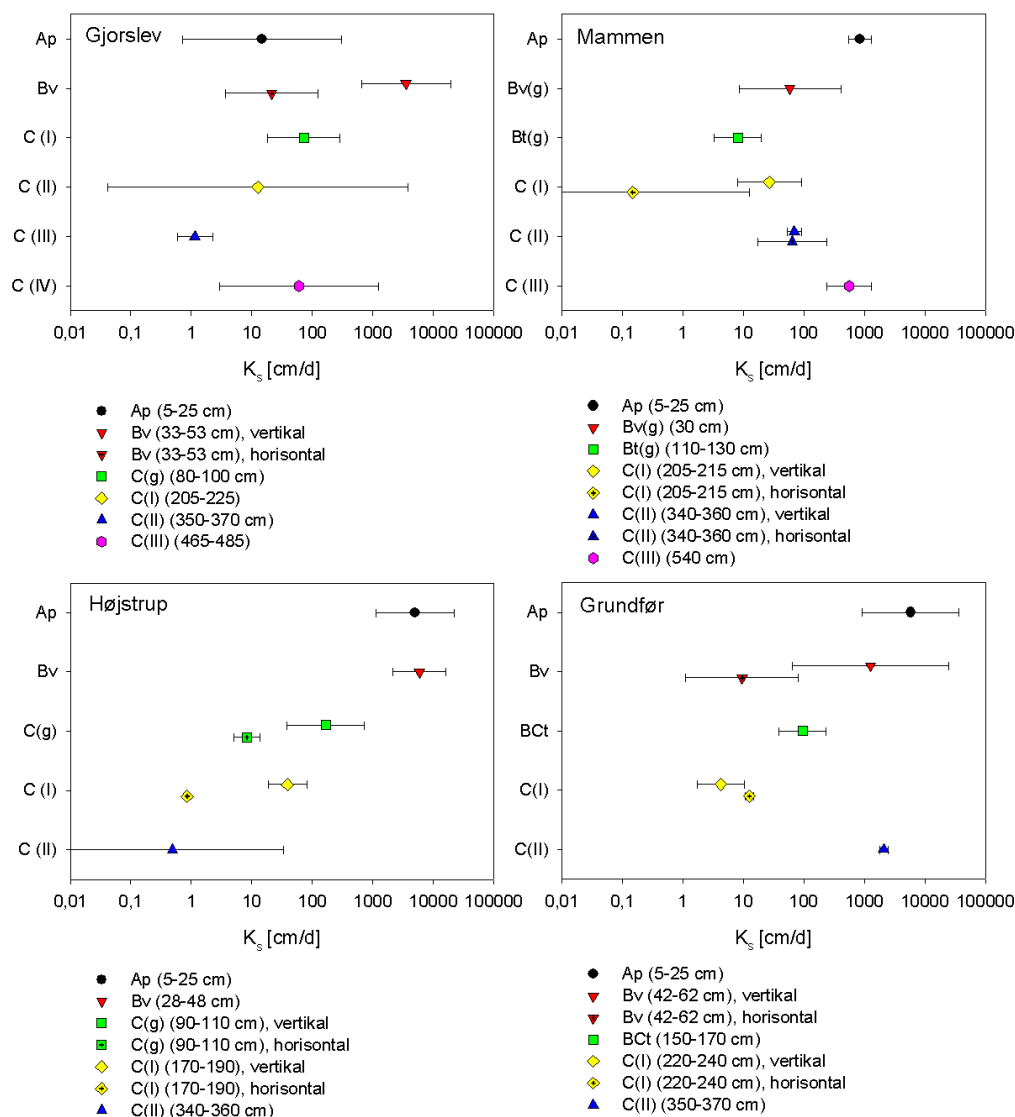


Figur 5.5. Porestørrelsesfordeling beregnet ud fra vandretentionsmålingerne. Kornfraktionerne $>30 \mu\text{m}$ (højden af søjlerne over "0-linjen") betragtes som tilhørende jordens grovporevolumen.

5.2.3 Mættet hydraulisk ledningsevne

Figur 5.6 viser værdierne for den mættede hydrauliske ledningsevne (K_s) målt ned gennem profilerne. Målingerne i enkelte horisonter udviser store variationer mellem enkeltmålingerne. Lavest målte værdier ses i bunde af profilet ved Højstrup i den reducerede zone. Højeste værdier ses i de øverste horisonter (Ap og Bv). Forskellen i K_s mellem vertikale og horisontale ses tydeligst i de horisonter, hvor der optræder mange vertikale eller horisontale sprækker.

I Bv-horisonten ved Gjorslev samt C(I)- C(II)-horisonten ved Højstrup optræder der mange vertikale sprækker, hvilket stemmer overens med den tydelige forskel mellem de vertikale og de horisontale værdier. Lavest værdi af K_s ses her for de horisontale målinger, hvor sandsynligheden for tilstedeværelsen af gennemgående porer i strømningsretningen er lav. Ved Mammen i C(II)-horisonten er K_s -værdierne mellem vertikale og horisontale målinger enslydende, hvilket stemmer overens med et ringe antal af både horisontale og vertikale sprækker i denne dybde. Ved Grundfør i C(I)-horisonten er K_s på de horisontalt udtagne prøver højere end målingerne på de vertikalt udtagne prøver, hvilket stemmer overens med et højt antal horisontale sprækker i netop denne dybde.



Figur 5.6. Mættet hydraulisk ledningsevne (K_s) målt på store kolonner med undtagelse af Bv(g)- og C(III)-horisonten ved Mammen, hvor der blev målt på små retentionsringe. Alle værdier er geometriske middelværdier. Fejllinjerne viser ± 1 standardafvigelse.

5.3 Litteratur

Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. I: Klute, A. (red.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd edition, Amer. Soc. Agron., Madison, WI, 635-656.

Klute, A. og Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. I: Klute, A. (red.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd edition, Amer. Soc. Agron., Madison, WI, 687-734.

Rasmussen, K.J. 1976. Soil compaction by traffic in spring. II. Soil physical measurements. Tidsskrift for Planteavl 80, 835-856.

Schjønning, P. 1985. Udstyr til afdræning af jordprøver for jordfysiske analyser. Tidsskrift for Planteavls Specialserie. København, Statens Planteavlsforsøg, Beretning nr. S 1762, 25 pp.

6. Transient infiltration (flux) og sprække transmissivitet for moræneler

William G. Harrar (GEUS)

6.1 Indledning

Dette kapitel sammenfatter resultaterne af metoder, udviklet i KUPA-projektet, hvor data fra monitoring af grundvandsspejlet benyttes til at vurdere: 1) det transiente infiltration til aquiferen gennem moræneleret og 2) sprække transmissiviteten og de hydrauliske egenskaber i matrix i moræneler. Først beskrives en analyse som er udviklet for at bestemme den transiente infiltration gennem moræneler ved hjælp af afsænkingsdata fra langtids pumpetests i overfladenære aquiferer under morænedække. Der næst beskrives resultaterne af en analysemetode som er udviklet til at bestemme både sprække-transmissiviteten i og de hydrauliske egenskaber af morænelerets matrix på basis af kortvarige naturlige fluktuationer i grundvandsspejlet. Begge analyser er testede på data fra Flakkebjerg.

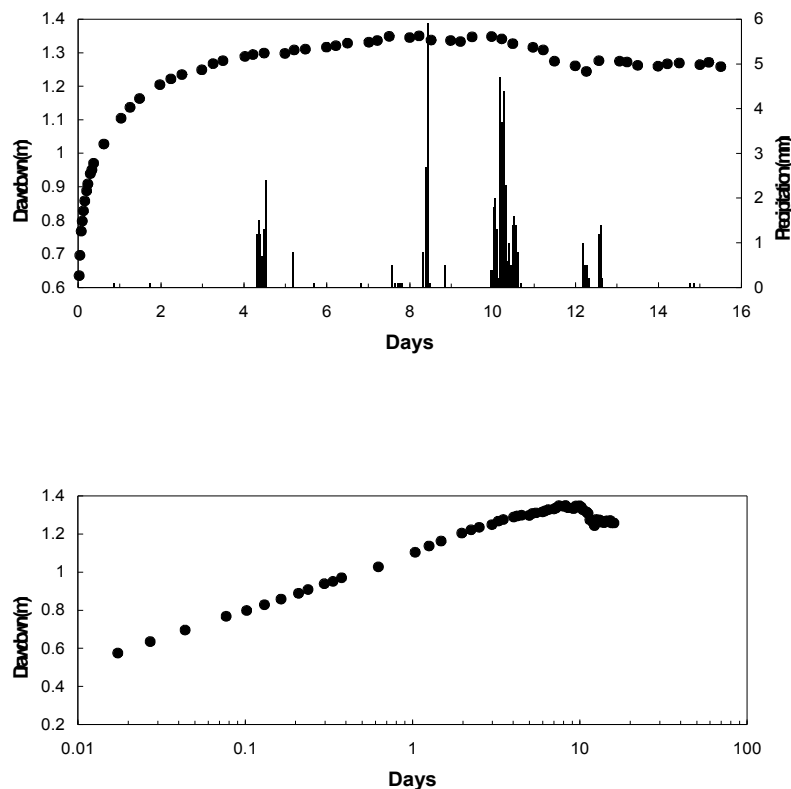
6.2 Beregning af transient infiltration til aquiferen gennem moræneler

Der er udviklet en metode til at beregne den transiente infiltration til en underliggende aquifer gennem moræneler gennem en langtids pumpetest. Ved denne metode sammenholdes resultaterne af en typisk pumpetest (Theis typekurve løsning) med effekterne af nettoinfiltration til en regional sandaquifer. Strømningssystemet kan konceptuelt beskrives som en spændt aquifer hvor der ikke foregår nogen strømning hen over grænserne på de tre sider, mens der på den fjerde side foregår udstrømning hen over grænsen ned ad den hydrauliske gradient. I den benyttede sammenhæng svarer grænsen med udstrømning til at vandløbet skærer sig ned gennem hele morænelersdækket og er i hydraulisk kontakt med den underliggende aquifer. Ved modelkørslen bestemmes først aquiferens transmissivitet (T) og magaskoefficient (S) ved at analysere den tidlige afsenkning under pumpning. Herefter analyseres hele pumpetesten ved at fastholde T og S for aquiferen og beregne den transiente infiltration til aquiferen som modsvarer den observerede afsenkning. Forudsigelserne af infiltrationen til aquiferen svarer til den transiente flux af vand på tværs af aquiferens øvre begrænsning og repræsenterer derfor den lodrette flux af vand gennem bunden af den ovenliggende moræneaflejring. De teoretiske aspekter og en mere detaljeret beskrivelse af analysen af pumpetestene findes i Harrar and Murdoch (indsendt).

6.2.1 Observationer

Nedbør indenfor de 16 dage hvor der forløb en pumpetest i en overfladenær aquifer under et 10-11 m tykt dække af moræneaflejringer medførte at afsenkningen ophørte og at der endog skete en lille stigning, figur 6.1. Data viser at Theis løsningen for en spændt aquifer er i god overensstemmelse med den aktuelle afsenkning indtil den 3. Dag, mens den

overvurderer afsænkningen gennem resten af testperioden. Den 10. dag er der en skarp ændring i hældningen af afsækningskurven, hvilket viser at de hydrauliske trykniveau steg under denne del af testen som følge af en længerevarende regnbyge. En tilsvarende reaktion blev også iagttaget i andre monitoringsboringer i aquiferen.



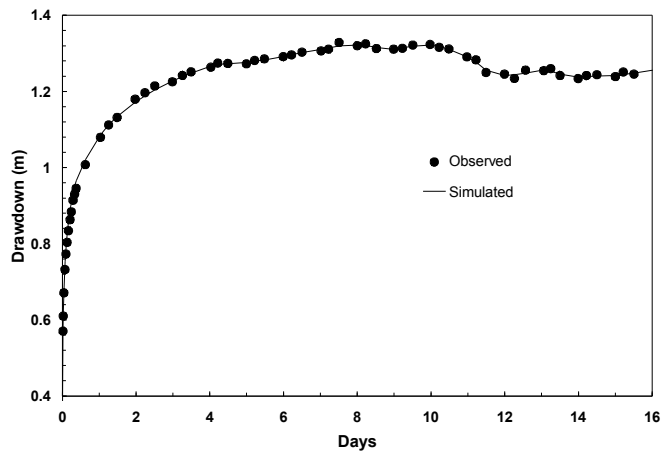
Figur 6.1. Den øverste figur viser nedbøren og den observerede afsænkning i aquiferen. Den nederste figur viser et semilogaritmisk plot af den observerede afsænkning.

6.2.2 Resultater

Analysen af de tidlige afsækningsdata resulterede i $T=173 \text{ m}^2/\text{dag}$ og $S=4 \times 10^{-4}$. Ved begyndelsen af pumpetesten var trykniveauet i aquiferen cirka 16 m over vandoverfladen i vandløbet (udstrømningszonen), beliggende 3,5 km mod sydvest. Under anvendelse af disse værdier forudsiger analysen at gennemsnitsinfiltrationen til aquiferen forud for pumpetesten var 0,09 mm/dag. Til sammenligning beregnede Henriksen et al. (1998) med en transient strømningsmodel for et område som omfattede Flakkebjerg den gennemsnitlige infiltration til aquiferen til 0,09 mm/dag (32 mm/år).

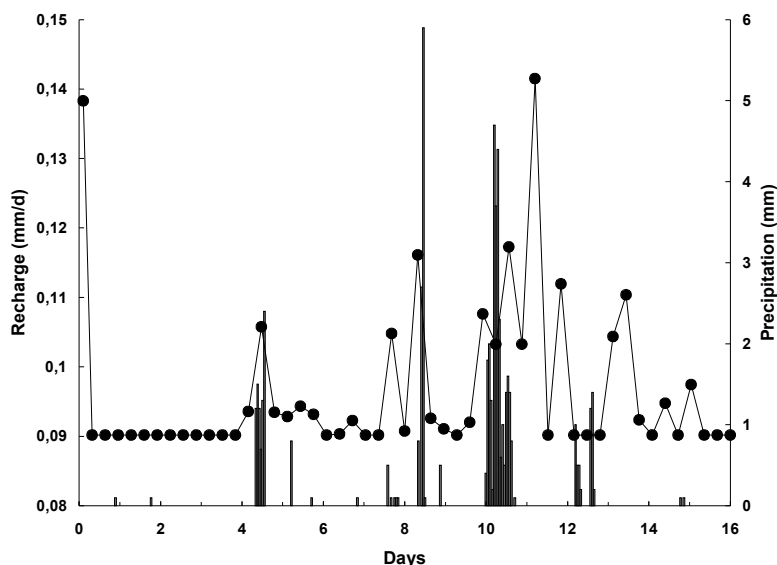
Ved at inkludere effekterne af transient infiltration kan de observerede afsænkninger forudsiges ret præcist, figur 6.2. Analysen forudsiger en stigning af infiltrationen til aquiferen i løbet af de første timer af testforløbet og siden aftog til baggrunds niveauet i løbet af den tredje dag, figur 6.3. Den forudsagte infiltration til aquiferen steg brat i løbet af dag 4 hvor den nåede den højeste værdi på 0,016 mm/dag for derefter at aftage igen. Efter dag 4 er

der forudsagt flere infiltrationspulser til aquiferen. Nogle af disse pulser varer flere dage og den højeste værdi på 0,14 mm/dag forekommer dag 11.



Figur 6.2. Observeret sænkning og sænkning simuleret med "pumpning under infiltration" modellen.

De forudsagte infiltrationspulser korrelerer med både nedbørsbegivenheder og kortvarige stigninger i den lodrette trykgradient gennem morænedækket. Nogle af de forudsagte maksimale infiltrationspulser falder sammen med maksimale nedbørsbegivenheder mens andre forekommer med forsinkelse på op til et døgn efter en tilhørende nedbørsbegivenhed (f.eks. korrelerer den store nedbørsbegivenhed dag 10 med infiltrationsmaksimet dag 11).

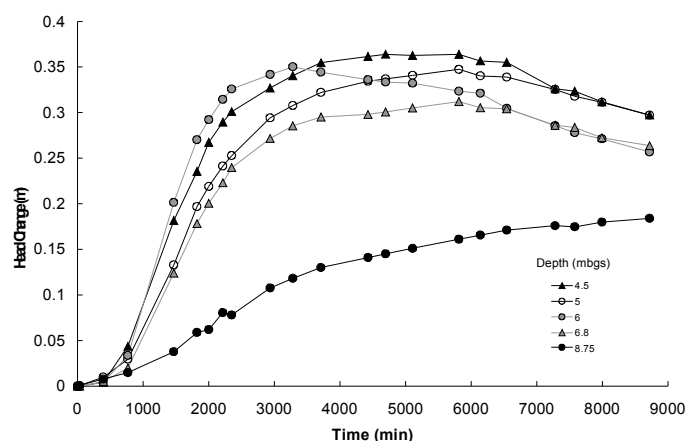
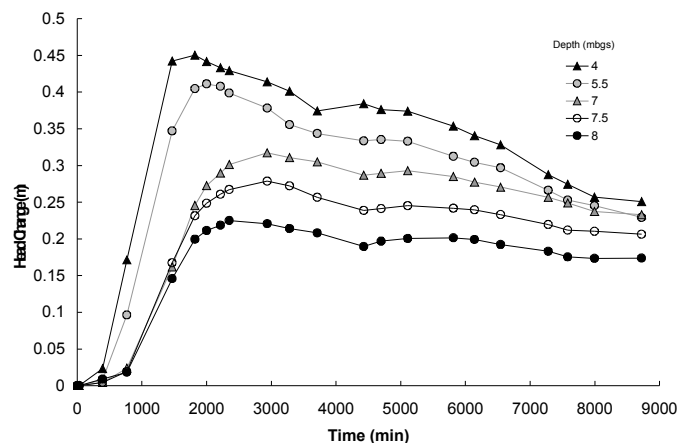


Figur 6.3. Simuleret infiltration til den øverste del af aquiferen og den målte nedbør.

Den lodrette hydrauliske trykgradient i dæklaget af moræneler er udregnet på basis af målinger i piezometre med filtre i den øverste meter af aquiferen og på tværs af grundvands-

spejlet i morænelerslaget. Resultaterne er sammenlignet med de forudsagte infiltrationsrater til aquiferen, figur 6.4. Den lodrette trykgradient stiger fra 0,42 til 0,48 i løbet af de første seks timer af testen hvor også resultaterne fra piezometrene forudsiger en stor infiltrationsbegivenhed selv om det er en nedbørsfri periode. Det tolkes at denne infiltrationspuls skyldes dræning af det strømningsmæssigt forbundne sprækkenetværk i morænelersdækket.

Den lodrette trykgradient stiger herefter til 0,52 i løbet af dag 4 hvor modellen forudsiger at der kun foregår "baggrundsinfiltation" til aquiferen. Herefter stiger den lodrette trykgradient gradvist gennem de næste 6 dage i løbet af hvilke to svage stigninger i gradienten svarer til forudsagte stigninger i infiltration til aquiferen dag 5 og 9. Den største infiltrationsbegivenhed som indledes dag 10 modsvares af en stigning i trykgradienten fra 0,53 til 0,55. Den vertikale gradient aftager gradvist efter denne store infiltrationsbegivenhed og infiltrationen til aquiferen aftager ligeledes. På baggrund af responset af den hydrauliske trykgradient under pumpetesten synes det at morænelersdækket kun afdræner en beskedent vandmængde fra matrix mens den i betydelig grad transporterer den arealudbredte nettoinfiltration fra nedbør.



Figur 6.4. Trykvariationer i morænen. Den øverste figur illustrerer de hurtige variationer som viser at disse piezometre er i kontakt med sprækker. Den nederste figur illustrerer de langvarige ændringer som viser at piezometrene er installeret inde i matrixblokke.

Den gennemsnitlige "baggrundsinfiltration" til aquiferen (før pumpetesten) er beregnet som forholdet mellem det forudsagte gennemsnitsinfiltration til aquiferen og den målte lodrette hydrauliske trykgradient i morænelersdækket. Dette forhold er 2.5×10^{-9} m/s hvilket kun er lidt mindre end den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne, beregnet på grundlag af 15 slug tests, i uforvitret moræneler (ca. 5.0×10^{-9} m/s). Forholdet er også beregnet mellem de forudsagte infiltrationsrater til aquiferen og de observerede lodrette gradienter under pumpetesten. Disse værdier afviger lidt fra forholdet mellem forudsagt gennemsnitsinfiltration til aquiferen og den vertikale gradient forud for testen.

Disse resultater viser at størrelsesordenen af den forudsagte infiltration til aquiferen er rimeligt godt fastlagt. Yderligere, idet størrelsesordenen af infiltrationen til aquiferen bestemmes af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne i morænelersdækket og den hydrauliske gradient på tværs af morænelersdækket, tyder den hurtige overførsel af infiltrationspulser efter nedbørsbegivenheder gennem morænelersdækket til den underliggende aquifer på at strømmingen foregår gennem et forbundet sprækkenetværk. Dette er i overensstemmelse med resultaterne af andre hydrauliske og tracer tests som er gennemført på lokaliteten og dokumenterer samlet at sprækkerne gennemskærer hele morænelersdækket (Harrar et al. indleveret; Jones, 1999; Cartwright, 2001).

6.2.3 Anvendelse

Den beskrevne metode for "pumpning under infiltration" kan bruges til at fastlægge den transiente infiltration til overfladenære aquiferer og til at fastslå om sprækker gennemsætter hele dæklaget af moræneler. Metoden kan i sin nuværende form benyttes som et administrativt værktøj for f. eks vandværker som udnytter grundvand fra overfladenære aquiferer som er overlejrede af moræneler. Analyse af eksisterende monitoringsdata som er indsamlet i nærheden af indvindingsboringer kan give estimater af den transiente infiltration til aquifererne. Estimerne kan benyttes til at fastslå indvindingsoplandet til indvindingsboringerne og til at bestemme hvorvidt og hvor sprækker gennemskærer hele det ovenliggende morænelersdække. Dette vil kunne bidrage til at udpege områder på jordoverfladen hvor anvendelsen af pesticid udgør en potentiel trussel mod de underliggende aquiferer.

Metoden kan også bruges til at beskrive infiltrationshistorien i tilfælde hvor der ikke pumpes ved at udnytte tidsserier af pejlinger fra boringsfiltre i overfladenære aquiferer. Angrebsvinklen ville her være at bruge en langtids pumpetest til at karakterisere de generelle hydrauliske parametre i aquiferen og dernæst fastlægge infiltrationen ved at inverttere pejledata fra boringer.

6.3 Hydrauliske egenskaber bestemt ved naturlige fluktuationer i grundvandet

Grundvandsstanden i moræneler har typisk sæsonmæssige og nedbørsrelaterede fluktuationer. Observationer af naturlige fluktuationer i grundvandsstanden i forskellige dybder indenfor et morænelerslag over en aquifer kan benyttes til at bestemme sprækkers dybdemæssige udstrækning og til at anslå morænelerets hydrauliske egenskaber. I Keller et al.

(1989) er der anvist en metode til at fastlægge den samlede hydrauliske diffusivitet (K/S_s) i sprækket moræneler ved hjælp af sæsonvariationer i grundvandsniveauet. Ved den nye metode som præsenteres her fastlægges sprækketransmissiviteten og de hydrauliske egenskaber i matrix ved at simulere korttids variationerne i grundvandsniveauet ved hjælp af en dobbeltporøsitetsmodel. Dobbeltporøsitetsmodellen som er udviklet af Dr. John Barker (University College of London) simulerer variationer i det hydrauliske trykniveau i forskellige dybder langs en sprække samt i matrix i varierende afstande fra en sprække som følge af ændringer i det hydrauliske trykniveau langs modellens overgrænse. Modellen håndterer at der kan være flere lag og tager dermed højde for sprækketransmissiviteten, den hydrauliske ledningsevne og den specifikke magasinkoefficient i matrix, samt varierende afstand mellem sprækkerne med dybden. Modellen er her brugt til at fastlægge sprækketransmissiviteten og de hydrauliske egenskaber, afledt af nedbørsbegivenheder, i morænelerets matrix ved at simulere de observerede ændringer i hydraulisk trykniveau i forskellige dybder indenfor den reducerede zone i en morænelersbænk. Data over grundvandsstanden er suppleret med særskilte målinger af den hydrauliske ledningsevne i morænelerets matrix og feltobservationer af afstandene mellem sprækker. Dobbeltporøsitetsmodellen er blevet kalibreret ved hjælp af invers teknik for at vurdere sprække transmissiviteten og den specifikke magasinkoefficient i matrix.

6.3.1 Observationer

Trykniveauet i grundvandet i moræneleret i Flakkebjerg øges ikke på en ensartet måde efter nedbør. Tvært imod er der stor variation hvor trykniveauet i nogle pizometre i relativt stor dybde stiger og falder hurtigere og indenfor et større spænd af værdier end mere overfladenære pizometre. Ændringerne i hydraulisk trykniveau som følge af to nedbørsbegivenheder er vist for pizometre i forskellige dybder i figur 6.5.

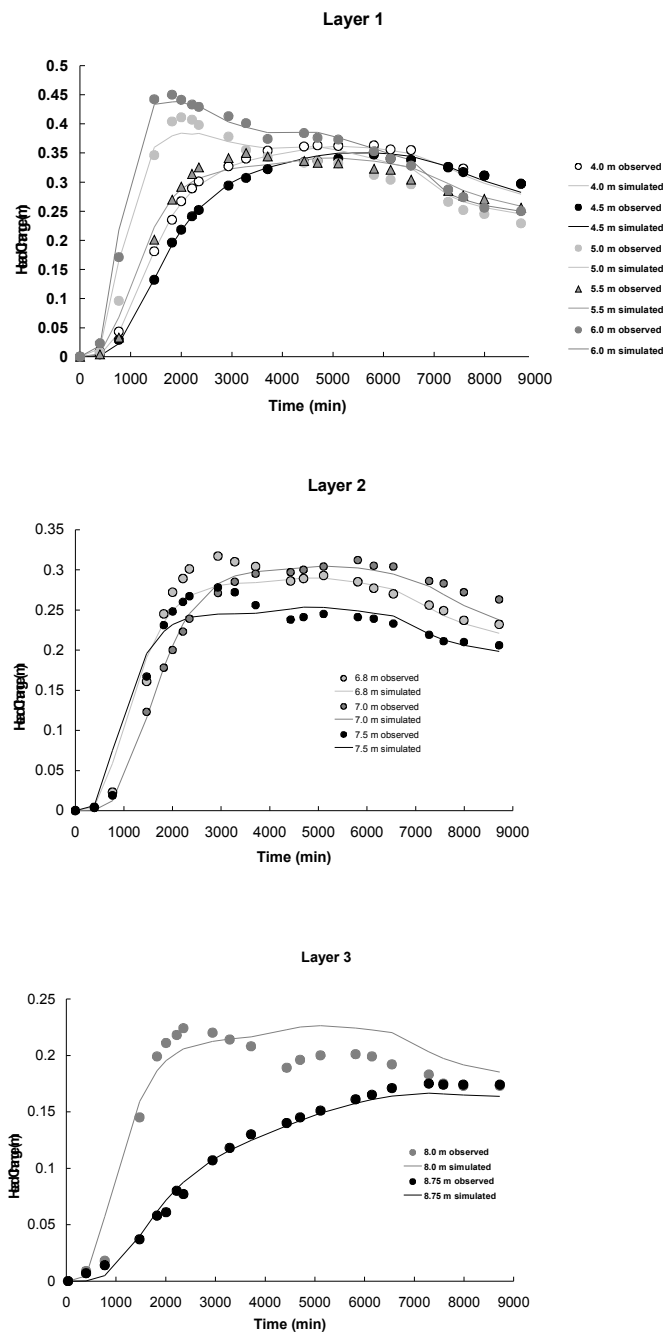
Figuren viser at der er to populationer af kurver. Den ene population kendes på hurtigt stigende og faldende tryk i forbindelse med den første nedbørsbegivenhed, mens trykket efter anden nedbørsbegivenhed enten flader ud eller stiger svagt. Den anden population af kurver kendes på at trykket stiger gradvist til et konstant niveau som efter en periode afløses af langsomt trykfald. Disse forskelle kan forklares ved infiltration gennem overfladerne af sprækker. Kurver for hurtigt fluktuerende tryk afspejler at pizometrene er installeret så der er strømningskontakt til sprækker mens kurver for langsomt og svagt fluktuerende tryk viser at pizometrene er installeret i morænelerets matrixblokke

6.3.2 Modellering

Dobbeltporøsitetsmodellen er blevet benyttet til at anslå sprækketransmissiviteten og den specifikke magasinkoefficient i den uforvitrede morænelersmatrix ved at simulere de observerede ændringer i trykket for forskellige dybder i moræneleret. Strømningssystemet udgøres konceptuelt af en enkelt sprække som gennemskærer en permeabel matrix i hele dennes lagtykkelse. Den observerede trykvariation ved bunden af det forvitrede moræneler er benyttet til definition af modellens øvre grænse. Afstanden til modellens nedre grænse er fastsat som uendelig. Den hydrauliske ledningsevne i matrix er holdt konstant på vær-

dien 2.0×10^{-10} m/s, som er bestemt ved permeabilitetsmåling i laboratorieforsøg på intakte kerner. For sprækkeafstanden, som antages at stige med dybden, er der anvendt værdier som er observerede i udgravninger på lokaliteten (Klint og Gravesen, 1999) såvel som på andre tilsvarende lokaliteter i Danmark (Klint, 2001).

De kurver som viser hurtigt varierende tryk antages at afspejle trykvariationerne i sprækkekerne mens de kurver som kun viser langsom trykvariation, figur 6.5 antages at afspejle trykvariationen i matrix. For tilfældene med langsom trykvariation tolker modellen også pizometrets afstand fra en sprække.



Figur 6.5. Observeret og simuleret trykvariation i moræneleren.

6.3.3 Resultater

For at bestemme hvilke parametre der kunne fastlægges konkret og det parameter kompleksitetsniveau (antallet af lag) som trykvariationerne kan forklare er der blevet gennemført et antal inverse modelleringer med dobbelt porøsitetsmodellen og PEST. Resultaterne viser, under forudsætning af de givne kalibreringsdata (trykvariationer), at modellen kan beregne sprækketransmissivitet samt hydraulisk og specifik magasinkoefficient i matrix.

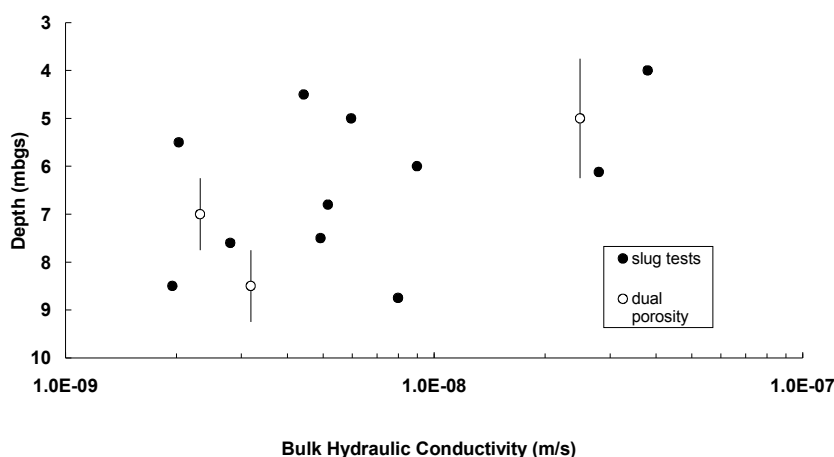
Der er blevet foretaget en serie inverse modelkørsler hvor moræneleret har været opdelt i 1-4 lag for at bestemme hvilket niveau af parameter kompleksitet der kan forklares ved trykvariationerne og for at afgøre hvilke parametre der skal modelleres ved regression. Resultaterne viser at modellen kan angive konkrete værdier af sprække transmissivitet, den hydrauliske diffusivitet i matrix (K/Ss) og afstanden mellem piezometre i matrix og sprækken for hver enkelt trykvariationskurve. Modelresultaterne kan yderligere beregnes for konkrete værdier af den specifikke magasinkoefficient i matrix ved at fastholde den hydrauliske ledningsevne i matrix. En vurdering af konfidensintervallerne for de beregnede parametre, og godheden af parameterfitternes afspejling af de målte tryk, viser at de bedste resultater opnås ved at dele morænelersdækket i tre lag. Resultaterne af kørslen af trelagsmodellen sammenfattes i det følgende.

De observerede og simulerede trykvariationer i trelagsmodellen er vist i figur 6.6. Modellen giver en god tilpasning til de observerede tryk, både i sprækken og i matrix i lag nr. 1 og til de observerede tryk i matrix i lag 2 og 3. Modellen undervurderer systematisk de tidlige trykpulser i lag 2 og 3. Den resulterende sum af de kvadrerede residualer er på 0,005 m. De beregnede parametre og deres standardafvigelser er vist i tabel 6.1. Resultaterne viser at såvel sprække transmissiviteten som den specifikke magasinkapacitet i matrix aftager med dybden. De beregnede parametres standardafvigelse er relativt lille, hvilket tyder på at parameterestimaterne er nøjagtige. Den beregnede specifikke magasinkoefficient i lag 2 og 3 svarer til værdier som er indhentet i den dybereliggende aquifer. De beregnede afstande mellem piezometre og sprækker virker realistiske. Modelresultaterne er også blevet vurderet ved at sammenligne morænelerets modellerede gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne med resultaterne af in-situ slug-test. Værdierne for den gennemsnitlige modellerede hydrauliske ledningsevne faldet indenfor spændet af de målte værdier, hvilket viser at de beregnede værdier for sprækketransmissivitet er realistiske.

6.3.4 Hydraulisk reaktionstid

Den hydrauliske reaktionstid er den tid det varer før der er sket udligning mellem det hydrauliske tryk i midten af en matrixblok og en trykændring i en nærliggende sprække. Denne responstid er en funktion af den hydrauliske diffusivitet (K/Ss) i matrix og afstanden mellem sprækkerne. Ved en sammenligning mellem den hydrauliske reaktionstid og varigheden af en transient strømningsbegivenhed kan det fastslås om strømningssystemet reagerer som et homogent (ækvivalent til et enkeltporøst medium) eller heterogent medie (dobbeltporøst). Hvis den hydrauliske reaktionstid er meget kortere end varigheden af strømningsbegivenheden viser det at trykket i matrixblokken i det store og hele er i lige-

vægt med trykket i sprækkerne. Under sådanne omstændigheder kan moræneleret opfattes som strømningsmæssigt homogent idet variationer i hydraulisk tryk ned gennem morænelerslaget reflekterer systemets gennemsnitlige hydrauliske egenskaber. I dette tilfælde kan den gennemsnitlige hydrauliske diffusivitet (K/S_s) bestemmes på basis af formelsættet fra Keller et al. (1989) i form af en grafisk teknik for amplitudeforhold og faseskift i observerede sæsonvariationer i grundvandets tryk i forskellige dybder. Hvis den hydrauliske reaktionstid er længere end varigheden af strømningsbegivenheden vil det hydrauliske tryk i matrix ikke være i ligevægt med det hydrauliske tryk i sprækkerne, hvorfor systemet vil reagere som en afspejling af heterogene og dobbeltporøse forhold. Under sådanne omstændigheder kan sprækketransmissiviteten og den hydrauliske diffusivitet (K/S_s) i matrix udregnes på grundlag af de hydrauliske trykvariationer.



Figur 6.6. Beregning af den generelle hydrauliske ledningsevne på baggrund af slug-tests og parametre fra dobbeltporøsitetens modellen. De lodrette stave ved dobbeltporøsitetens værdierne angiver det dybdeinterval som har været beregningsgrundlaget af de hydrauliske ledningsevner.

Tabel 6.1. Beregnede og empiriske værdier. T_f = sprække transmissivitet, Std. Afv. = standard afvigelse, S_s = specifik magasinkoefficient, K_m = matrix hydraulisk ledningsevne, * = empirisk værdi

Lag	Beregnet T_f (m ² /s)	Std. Afv. T_f (m ² /s)	Beregnet Matrix S_s (1/m)	Std. Afv. Matrix S_s (1/m)	K_m^* (m/s)	Sprække afstand* (m)
1	2.7E-08	4.1E-09	1.53E-04	1.15E-05	2.0e-10	1
2	5.1E-09	8.7E-10	1.65E-05	2.71E-06	2.0e-10	2
3	1.1E-08	3.7E-09	4.86E-05	8.21E-06	2.0e-10	3

Den hydrauliske reaktionstid i det uforvitrede moræneler i forsøgsområdet, Flakkebjerg, er ca. 8 dage. Dette viser at de hydrauliske egenskaber i såvel sprækkesystemet som matrix i det uforvitrede moræneler kan beregnes på basis af observationer i forskellige dybder af

korttids variationer i naturligt grundvandsspejl (hydraulisk trykniveau) i forhold til de fluktuationer i grundvandsspejl (stigning og fald) som varer ca. en uge. Moræneler andre steder på Sjælland og Fyn har lignende hydrauliske matrixegenskaber (Nilsson et al., 2001; McKay et al., 1999) og sprækketætheder (Klint, 2001) hvilket viser at disse aflejringer har hydrauliske responstider svarende til dem i Flakkebjerg. Dette indebærer at disse forskellige morænelerslag kan formodes at reagere på samme måde overfor kortvarige fluktuationer i naturlige fluktuationer i grundvandsspejlet som moræneleret på Flakkebjerg lokaliteten, og at sprække transmissiviteten og de hydrauliske matrixegenskaber må kunne beregnes ved ovenstående fremgangsmåde. Resultater af modelkørsler viser yderligere at hele morænelerslaget, hvilket er i overensstemmelse med andre hydrauliske og tracerests som er udført på lokaliteten (Harrar et al. submitted; Jones, 1999; Cartwright, 2001).

6.3.5 Nyttiggørelse af analysen af naturlige variationer i grundvandsspejl

Analyser af naturlige fluktuationer i grundvandsspejl i moræneler kan bruges til at beregne hvor dybt sprækkesystemerne når ned og de hydrauliske egenskaber i både sprækkesystemet og matrix. Disse oplysninger kan udnyttes som input til modellering af strømning og transport i moræneler.

6.4 Konklusion

Undersøgelsen viser at en analyse af grundvandsspejlets korttids variationer i forbindelse med nedbørsbegivenheder kan fortælle hvorvidt sprækker skærer helt gennem et morænelerslag, til at beregne den transiente vandstrømning gennem moræneler ned til underliggende aquiferer og til at beregne sprække transmissiviteten og de hydrauliske matrixegenskaber i moræneler. Med baggrund i kendskab til sprækkedybden i moræneler lettes udpegningen af områder hvor aquiferer under moræneleret kan være sårbare overfor forurening med pesticid. Beregnet vandstrømning gennem morænelerslag og de hydrauliske egenskaber i sprækker og matrix kan bruges som input til modelleringsstudier med henblik på at beregne den samlede pesticidbelastning af underliggende aquiferer.

6.5 Litteratur

Cartwright, D.J. 2001. Using hydraulic testing to determine vertical transport properties of a fractured clay aquitard. M.Sc. thesis. University College of London.

Harrar, W.G. og L.C. Murdoch. Effects of recharge through a fractured confining unit on the performance of a well test. Journal of Hydrology (accepteret for publikation).

Harrar, W.G., Nilsson, B., Murdoch, L.C., McKay, L., Klint, K.E. og Gravesen P, Field characterization of a tracer plume in a fractured glacial till. Hydrogeology Journal (accepteret pending revision).

Jones, E.H. 1999. Hydraulic characterisation of a fractured clayey till aquitard, western Sjælland, Denmark. M.Sc. thesis, University College of London.

Keller, C.K., van der Kamp, G., og Cherry, J. 1989. A multiscale study of the permeability of a thick clayey till. *Water Resources Research*, 25: 2299-2317.

Klint, K.E. 2001. Fractures in Glacigene Diamict Deposits: Origin and Distribution, GEUS rapport 2001/129.

Klint, K.E. og Gravesen, P. 1999. Fractures and biopores in Weichselian clayey till aquitards at Flakkebjerg, Denmark. *Nordic Hydrology*, 30: 267-284.

McKay, L., Fredericia, J., Lenczewski, M., Morthorst, J., og Klint, K.E. 1999. Spatial variability of Contaminant Transport in a Fractured Till, Avedøre, Denmark. *Nordic Hydrology*. 30: 333-360.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E., Bøggild, C.E. og Broholm, K. 2001. Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till-sandy aquifer system. *Journal of Hydrology*, 243: 162-179.

7. Flouriserende tracere til kortlægning af hydraulisk aktive strømningsveje i moræneler ved Gjorslev

Annette Rosenbom (GEUS)

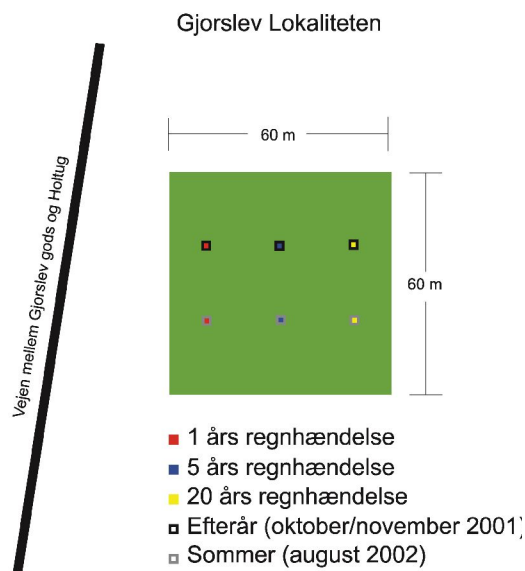
7.1 Indledning

Årstidsvariationer i de hydrauliske strømningsveje igennem den umættede zone i moræneler over kalk er undersøgt ved på to forskellige årstider svarende til henholdsvis en våd (oktober/november 2001) og en tør (august 2002) jord at gennemføre af 3 tracerforsøg repræsenterer én 1, 5 og 20 års regnhændelse, se figur 7.1.

7.2 Feltforsøg

7.2.1 Forberedelse af feltlokalitet og tilførsel af tracere

Undersøgelsen fandt sted på Gjorslev-lokaliteten, som udgør et areal på 60mx60m. På arealet blev der med en totalstation afsat en parcel af et areal på 2mx2m til hvert af de 6 tracerforsøg, se figur 7.1. Placeringen og orienteringen af lokalitetens areal samt parcellerne på lokalitet blev fastlagt ud fra et ønske om at undgå drænrør i forbindelse med parcellerne og i så vidt muligt omfang senere at kunne generalisere parcellernes sprække-mønstre.



Figur 7.1. Skitse af Gjorslev lokalitet med placering af de 6 parceller repræsenterende henholdsvis to årstider og tre regnhændelser.

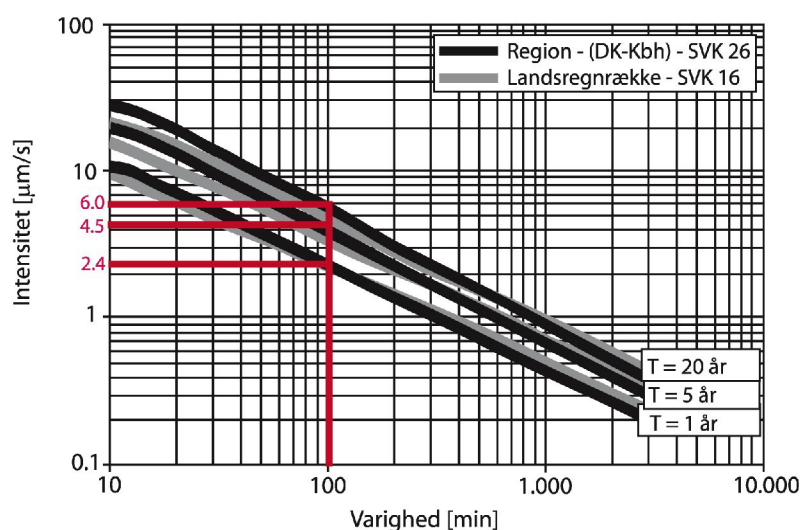
De enkelte parceller blev klargjort en uge før selve påførelsen af tracer. Ved klargøringen blev muldlaget manuelt fjernet med det formål kun at studere strømnings- og transport-veje igennem moræneleren. Herefter blev parcellens overflade planet for at minimere afstrømning af tracer, og umiddelbart før påførelsen af tracere løsnet med en rive for at undgå en forsejling af overfladen.

Efter klargøringen af parcellen blev den overdækket med en presenning. Et par dage inden påførelsen af tracere på parcellen blev erstattet af et 6m·10m telt for yderligere at minimere fordampningen fra samt undgå uønskede regnhændelser på forsøgsparcellen.

Påførelsen af traceren på de enkelte parceller blev foretaget med én til formålet designet vandingsmaskine, som sikrede en ensformig og jævn fordeling af traceropløsningen på parcellen.

Tracerne Acid Yellow 7 og Sulforhodamin B blev påført parceller i koncentrationer af henholdsvis 10 g/l og 0.12 g/l over 100 minutter og ved vandmængder svarende til omtalte regnhændelser. Vandmængdens størrelse blev fastlagt ud fra figur 7.2, hvor:

- én 1 års regnhændelse svarer til en regntintensitet på 2.4 $\mu\text{m/s}$ (14 mm/100min)
- én 5 års regnhændelse svarer til en regntintensitet på 4.5 $\mu\text{m/s}$ (27mm/100min)
- én 20 års regnhændelse svarer til en regntintensitet på 6.0 $\mu\text{m/s}$ (36mm/100min)



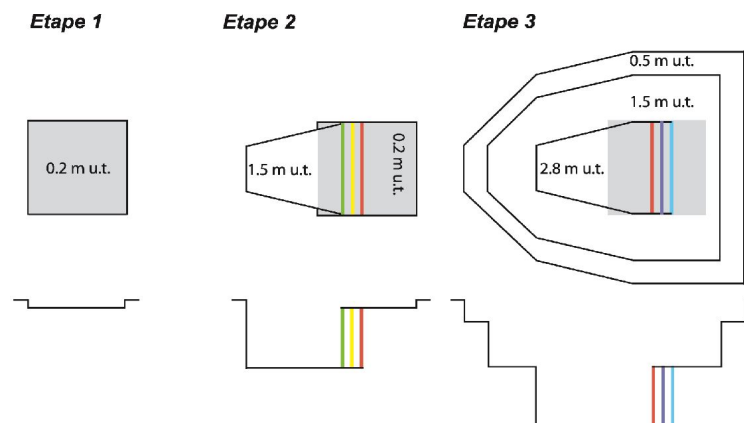
Figur 7.2. Regnkurver fra SVK-skrift 26 (Spildevandskomitéen, 1999) og Landsregnkurver fra SVK-skrift 16 (Spildevandskomitéen, 1974) for "Regionen Danmark udenfor København" afbildet for henholdsvis 1, 5 og 20 års regnhændelser. De til forsøgene udvalgte 1, 5 og 20 årsregnhændelser ses markeret med rødt.

Cirka 12 timer efter påførelsen af tracerne til en parcel påbegyndtes en etapevis udgravning af denne efter princippet angivet i figur 7.3. Udgravningens trekantede facon blev valgt med henblik på den efterfølgende billedtagning af profilerne. Ved denne etapevise udgravning af parcellen blev 3 morænelers-profiler henholdsvis svarende til dybdeintervallet 0.2–1.5 meter under terræn

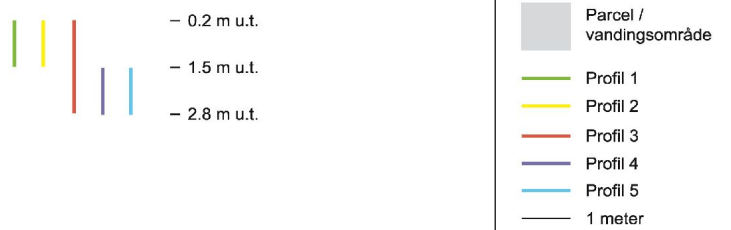
og 1.5-2.8 meter under terræn blotlagt. Samtlige profilers vertikale overfalde blev forsigtigt rengjort for udtværet materiale ved aftipning med en kniv.

Umiddelbart efter blotlægningen og rengøring af profilet blev der foretaget en fluorescence afbildning af tracerfordelingen i profilets midte (Aeby et al., 2001).

Udgravningens etaper (set fra hhv. oven og siden):



Udgravningens profiler (set fra siden):



Figur 7.3. Principskitse for den etapevise udgravning af en parcel. Udgravningen under etape 1 foregår manuelt og inden påføringen af tracerne. Ca. tolv timer efter påføringen af tracerne pågynedes etape 2, hvor en 1.5 m dyb udgravning etableres foran parcellen og 50 cm inde i parcellen til profil 1. Jorden ved profil 1 fjernes manuelt for at få et så intakt profil som muligt, hvorimod den resterende jord bortgraves ved brug af en rendegraver. Profil 2 og 3, som etableres henholdsvis 70 og 90 cm inde i parcellen, blotlægges ligeledes manuelt, hvorefter den bortgravede jord fjernes af en rendegraver. Efter blotlæggelsen af de tre profiler i den øvre del af udgravningen påbegyndes etape 3. Her videreføres profil 3 ned til en dybde af 2.8 meter under terræn og de nødvendige trappetrin til stabilisering af udgravningens vægge etableres. Bortgravningen af jord ved profilerne 3, 4 og 5 foregår atter manuelt, og en rendegraver anvendes til det resterende. Profil 4 og 5 etableres henholdsvis 110 cm og 130 cm inde i parcellen.

7.2.2 Opmåling og fordeling af tracere i jordprofiler

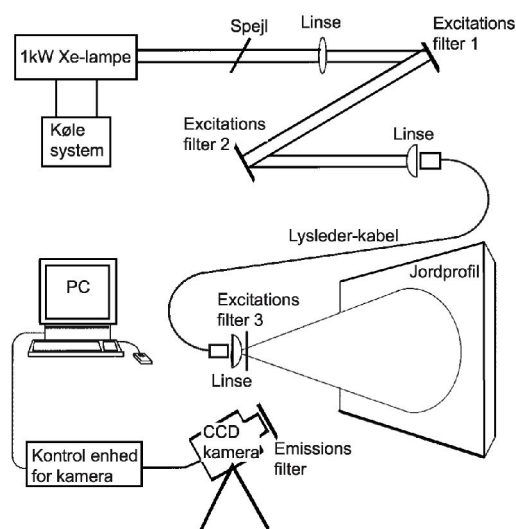
For at kunne kortlægge de to flouriserende tracere Acid Yellow 7 og Sulforhodamine B koncentrationsfordeling i de blotlagte vertikale morænelersprofiler blev der anvendt et specialudstyr udlånt af Institute of Terrestrial Ecology, Swiss Federal Institut of Technology Zürich (ETHZ) (Aeby et al., 2001).

Udstyret består af et excitations-modul og et detektions-modul, figur 7.4. Excitations-modulet består af:

- en højspænding xenon lampe med kølesystem, som giver excitation-lyset,
- 3 filtre pr. tracer, som frasortere den uønskede del af excitation-lyset,
- en 8 meter langt væskefyldt lyslederkabel, som fører den ønskede del af excitation-lyset fra lampe-enheden ned i udgravningen ca. 1.7 m foran morænelersprofilet,

og detektions-modul består af:

- ét filter pr. tracer, som frasortere den uønskede del af re-emissions-lyset fra morænelersprofilet.
- et "slow scan" sensitivt "charge coupled device" (CCD) kamera-system, som anvendes til detektion af lys re-emission fra morænelersprofilet. Systemet inkluderer ud over kameraet en PC med programmet Pixcel installeret samt en kontrol-enhed til kameraet. Kamera-systemet har et lys-sensitivt areal på B1286-H1152 pixels og tillader 16-bit digitalisering samt dataoverføringshastigheder på 83 kHz.



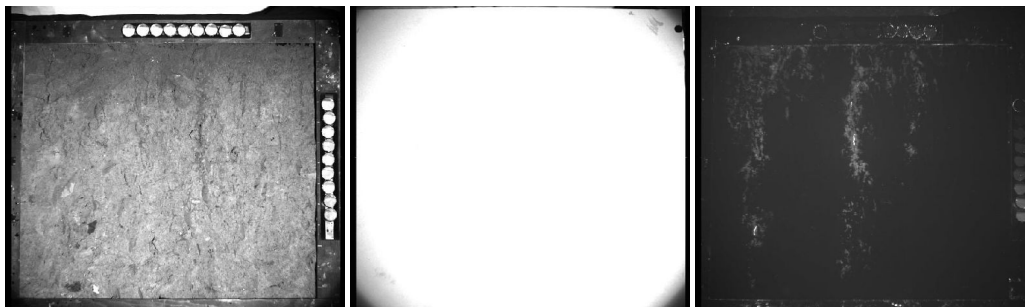
Figur 7.4. Forsøgsopstilling med excitations- og detektions-modul.

CCD kameraet og den "frie" ende af lysleder-kablet blev placeret i udgravningen ca. 1.7 m fra morænelersprofilet. Lampe- samt computer-enheden blev placeret i en varevogn ved udgravningen. For at undgå andre lyskilder i udgravningen under billed-tagningen blev udgravningen dækket til med et sort special-tæppe, som eliminerede passagen af dagslys til udgravningen. For at kunne sætte dimension på billederne blev der på morænelersprofilet ophængt en ramme med en

indre dimension på 70 cm x 65 cm (~1mm/pixel). På denne ramme blev der påsat 9 jordprøver med kendte koncentrationer af de to anvendte tracere, hvorved tracernes fluorescence ved den efterfølgende billedbehandling kunne omsættes til koncentrationer.

Med special-udstyret blev der optaget 3 digitale billeder pr. tracer pr. jordprofil, figur 7.5. Disse tre billeder omfatter:

- et refleksions billede af det reflekterede excitations lys fra profilet. Her benyttes de tre excitations-filtre og emissions-filtret fjernes fra CCD kameraet. Dette billede tages for at kunne korrigere for et uensformigt jordprofil samt de over profilet varierende optiske jord-matrix-egenskaber. Eksponeringstiden for dette billede er ca. 500-800 ms.
- et flat-field billede af den rumlige intensitets-fordeling af det reflekterede excitations lys fra profilet. Dette billede bruges til at korrigere for uensformig belysning af profilet. Her benyttes samme filteropsætning som ved refleksions billedet, blot indskydes der et gråt eller flouriserende plant pap-dække over profilet. Eksponeringstiden for dette billede er 1-15 millisekund.
- et fluorescence billede af tracerens emission fra profilet. Her benyttes både emissionsfilteret samt excitations-filtrene. Eksponeringstiden for dette billede er ca. 4-6 min.



Figur 7.5. (a) Refleksions billede, (b) "Flat-field" billede og (c) Fluorescence billede.

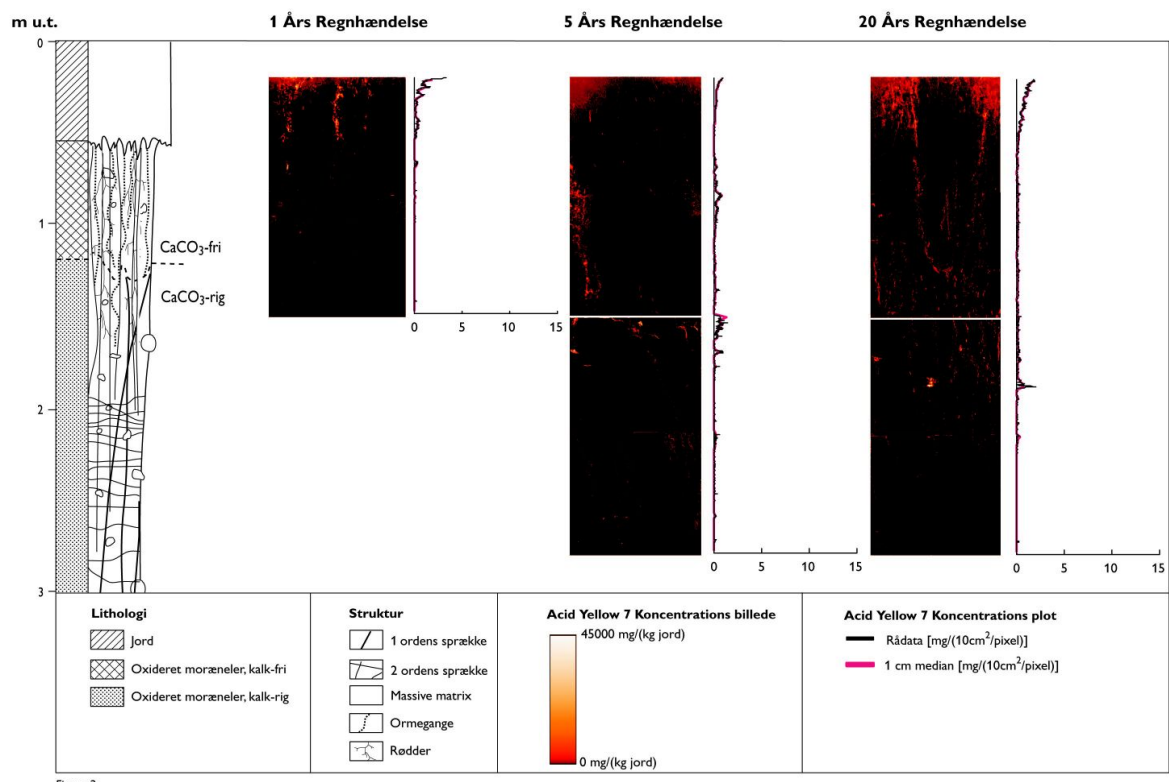
Ud fra disse tre billede-typer for hver tracer pr. profil frembringes ved billedbehandling et fluorescence intensitets-billed, som er uniform belyst, plant og fra en homogen jordoverflade. Intensitets-billederne blev herefter omsat til absolutte tracer koncentrations-billeder ved hjælp af kalibreringsprøverne. IDL-software (Interactive Data Language) blev anvendt til billedbehandlingen (Aeby, 2001).

7.3 Resultater

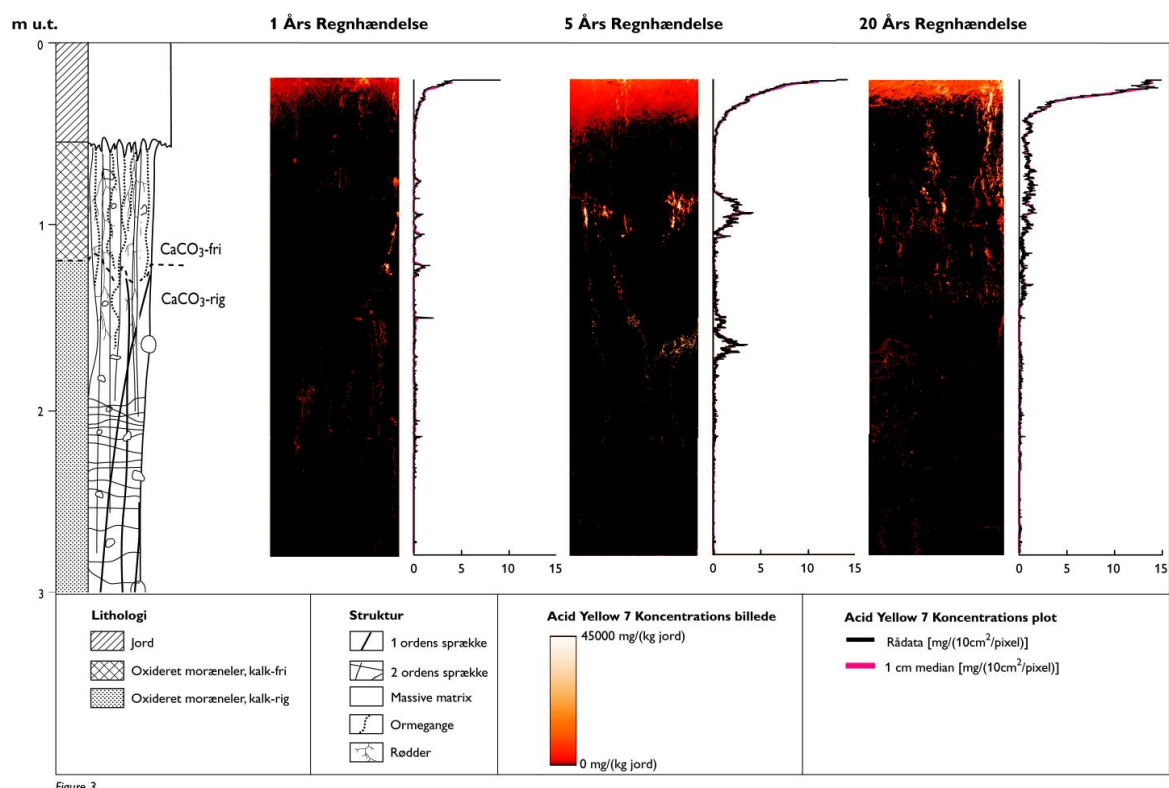
Ved hjælp af IDL-billedbehandlings-programmer var det herefter muligt at fremstille fluorescence intensitets-billed og omsætte disse til tracer koncentrations billeder.

Både Acid Yellow 7 og Sulforhodamin B koncentrations billeder fra de tre tracerforsøg repræsenterer én 1, 5 og 20 års regnhændelse ved henholdsvis den våde (oktober /november 2001) og den tørre (august 2002) periode fremgår af figurene 7.6, 7.7, 7.8 og 7.9. Af disse figurer samt ikke viste data fremgår det:

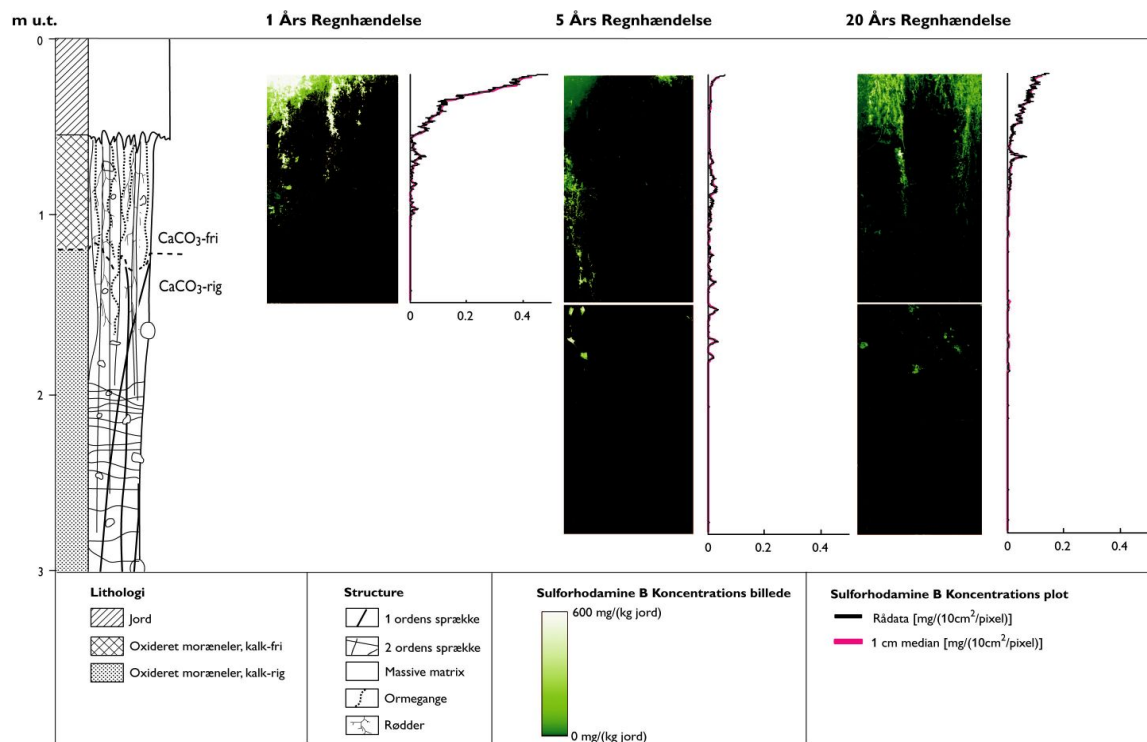
- at migrationsvejene igennem jordprofilet for Acid Yellow 7 og Sulforhodamin B tilnærmelsesvis er ens.
- at Acid Yellow 7 transporteres igennem jordprofilet (>2.8 meter under terræn), hvorimod Sulforhodamin B, som breder sig mere horisontalt ud i profilet og er ikke konstateret dybere end 1.5 meter under terræn i profilerne.
- at Acid Yellow 7 i de øverste ca. 20 cm af profiler følger en stempel-strømning i den tørre årstid, hvorimod Sulforhodamin B følger bioporerne.
- at koncentrationen af Acid Yellow udbredt ved stempel-strømning øges med øget regnmængde.
- at Acid Yellow 7 og Sulforhodamin B i den våde jord transporteres igennem de øverste 20 cm af profilet via bioporerne.
- at bioporer (primært ormegange) dominerer de to tracers migrationsvejene i de øverste 1.2 m af profilet.
- at samtlige ormegang bidrager til tracer migrationen i den tørre årstid, hvorimod kun ormegange, der videreføres i en sprække, bidrager til migrationen i den våde jord (oktober/november). I den tørre jord (august) ses ophobning af tracer-masse i ormegange, som ikke bliver videreført i en sprække. at transporten af tracer fra 1.4 meter under terræn kun foregår i sprækker med orbindelse til en transportmæssig aktiv bioporer/ormegang.



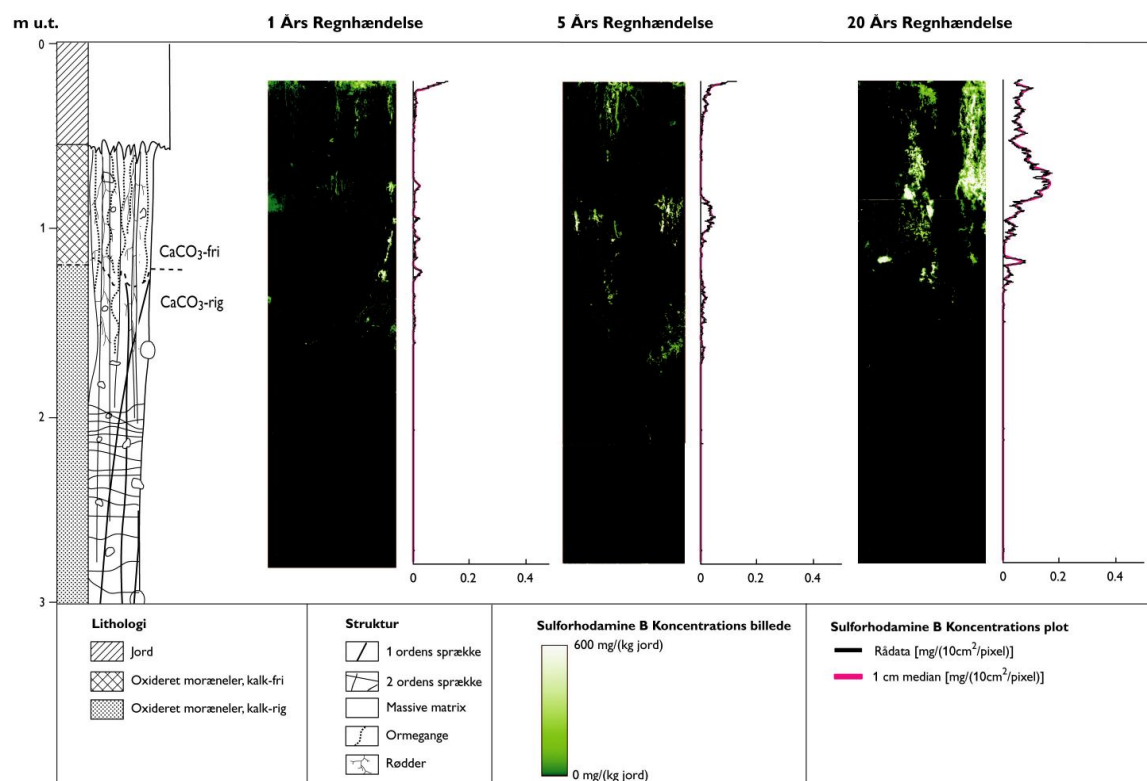
Figur 7.6 Koncentrationsprofiler for Acid Yellow 7 for 1, 5 og 20 års regnhændelsen tilført våd jord (oktober/november 2001).



Figur 7.7. Koncentrationsprofiler for Acid Yellow 7 for 1, 5 og 20 års regnhændelsen tilført tør jord (august 2002).



Figur 7.8. Koncentrationsprofiler for Sulforhodamine B for 1, 5 og 20 års regnhændelsen tilført våd jord (oktober/november 2001).



Figur 7.9. Koncentrationsprofiler for Sulforhodamin B for 1, 5 og 20 års regnhændelsen tilført tør jord (august 2002).

7.4 Konklusion

Ved anvendelse af omtalte tracer-detektions metode har det været muligt at opnå en detaljeret viden om årstidsvariationer i de hydrauliske aktive strømnings- og transport-veje igennem den umættede zone i moræneler over kalk. Metoden har muliggjort en identificering og kvantificering af tracere igennem de øverste 2.8 m af moræneleren via tracer koncentrations profiler/billeder med en opløsning svarende til en pixelstørrelse på 1mm². En indføring i anvendelsen af specialudstyret, tilvejebringelsen af specialudstyret (køb eller leje), omfattende feltarbejde samt et indgående kendskab til billedbehandling begrænser dog for nærværende brugen af metoden.

7.5 Litteratur

Aeby, P., Schultze, U., Braichotte, D., Bundt, M., Moser-Boroumand, F., Wydler, H. og Flühler H. 2001. Fluorescence Imaging of Tracer Distributions in Soil Profiles. Environmental Science & Technology, 35: 753-760.

Spildevandskomitéen, 1974. Bestemmelse af regnrækker. Dansk Ingeniørforening Spildevandskomitéen. Skrift nr. 16.

Spildevandskomitéen, 1999. Regional Variation af ekstremregn i Danmark. Dansk Ingeniørforening Spildevandskomitéen. Skrift nr. 26.

8. Tracerforsøg med Sulforhodamin B og bromid til kortlægning af hydraulisk aktive strømningsveje

Ole Hørbye Jacobsen (DJF) og Bo Vangsø Iversen (DJF)

8.1 Metode

På tre undersøgelsesmarker ved Mammen, Grundfør og Højstrup er gennemført et mindre detaljeret tracerforsøg, der primært har til formål at belyse, hvilke makroporer/sprækker der er hydraulisk aktive/inaktive, samt om denne aktivitet afhænger af regnintensiteten. Forsøgene blev gennemført således at den information der kunne uddrages findes tilsvarende for det detaljerede tracerforsøg.

Forsøgene blev udført på de nævnte lokaliteter i oktober 2002. På hver lokalitet blev to arealer af 2 x 2 m udpeget med tilstrækkelig afstand til at der kunne laves udgravninger omkring. Overjord i 25-30 cm blev fjernet på de to arealer og der blev vandet med vandingsanlægget som også anvendt og beskrevet i bilag 7. I forbindelse med tracerforsøget blev der tilført henholdsvis 13 og 37 mm over 100 minutter.

Med vandingsvandet tilførtes en fluorescerende farvetracer (Sulforhodamin B) med en koncentration på 120 mg/L og en konservativ tracer (kaliumbromid) med en koncentration på 1000 mg/L. Sulforhodamin B blev brugt som en farvetracer for at kunne kortlægge de aktive strømningsveje, mens bromid blev brugt til at kvantificere strømningen.

Dagen efter at tracerblandingen var blevet tilført, blev transporten af tracer bestemt efter udgravning af en profilvæg ned til ca. 2 meter og 70 cm bred. For hvert areal blev der udgrave tre profilvægge med 50 cm afstand. Profilvæggen blev fotograferet til indtegnning af aktive strømningsveje.

Massen af bromid i profilen blev bestemt ved at der i 7 dybder blev udtaget et veldefineret rumfang jord henover profilen. Med en kubisk skovl (7 cm x 7.8 cm x 11.5 cm) blev der udtaget 7 prøver henover profilen (i alt 4.40 dm³). Samlet vægt af jord blev bestemt ved vejning og volumetrisk vandindhold blev bestemt i hver dybde ved TDR målinger. Følgende procedure blev testet som en effektiv metode at ekstrahere bromiden fra jorden. I en spand blev små portioner af 0.004 M pyrofosfatopløsning (NaP₂O₇) tilsat, hvorefter blandingen blev rørt op med boremaskine med "cementblande-bor". Det foregik indtil der lige står en fri vand. Pilotprojekt viste at en gang opblanding var tilstrækkelig til at opnå konstant bromid-koncentration i prøven.

8.2 Resultater

Farvetraceren var ikke tydelig ret mange steder i profilerne. Det skyldes selvfølgelig, at meget af strømningen foregår i makroporer, men også at farven ikke er særlig kraftig og

derfor svær at se i jorden uden at bruge avanceret udstyr som i det detaljerede tracerforsøg (som findes beskrevet i bilag 7). Vi mener derfor ikke, at opmålingerne egner sig til at kvantificere mængden af aktive strømningsveje. På figur 8.1 ses resultatet på en af profilvæggene i Grundfør ved den høje regnintensitet.



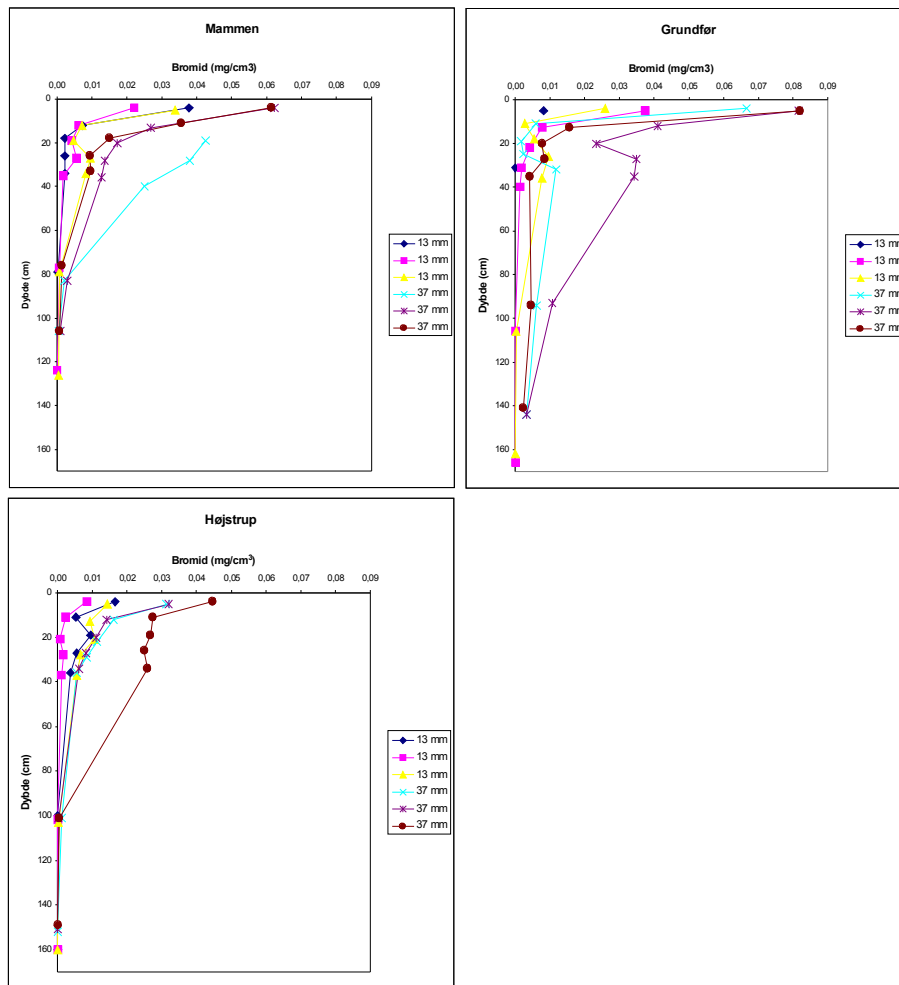
Figur 8.1. Profilvæg i Grundfør efter vanding med 37 mm tracerblanding indeholdende 120 mg/L Sulforhodamin B. De steder farvetraceren var synlig er fremhævet med lyserødt.

For bromid ser vi nogle rimeligt jævne kurve taget i betragtning, at det er makroporerstrømning vi kigger på. Og gentagelserne ligger også rimeligt i forhold til hinanden. Der er klar forskel mellem de to regnmængder sådan som man også vil forvente. Det vil kræve sammenlignende modelberegninger med en model, der inkluderer makroporerstrømning, hvis man skal kun konkludere om der er flere hydraulisk aktive porer ved høj regnintensitet sådan som man ville forvente.

Der er ikke de store forskelle mellem lokaliteter men der er en svag tendens til at der er mindre bromid i de øverste 10 cm i Højstrup i forhold til de to jyske lokaliteter. Dette kan forklares med de flere store porer der er i Mammen og Grundfør, som gør at bromiden ikke trænger så dybt ned. Derfor øger den tættere jordmatrix i Højstrup måske sandsynligheden for makroporestrømning i de makroporer der er.

Som det ofte er tilfældet med denne type forsøg er der problemer med massebalancen. Vi fandt kun henholdsvis 58 og 53 % af den udbragte bromid. En forklaring kan være at vi

ikke har samlet de øverste cm hvor koncentrationen måske er meget høj. Andre forklaringer kan være at noget er strømmet dybere end vi har målt eller at disse jorde har en vis anionbindingskapacitet.



Figur 8.2. Mængden af bromid i forskellige dybder i tre profilvægge for henholdvis 13 mm og 37 mm vanding med 1000 mg L^{-1} kaliumbromid.

8.3 Konklusion

Farvertracerforsøg kan være en god måde at bestemme mængden af hydraulisk aktive makroporer. Sulforhodamin B har dog vist sig mindre egnet som farvetracer i de undersøgte jorde.

Men endnu vigtigere end en bestemmelse af mængden af hydraulisk aktive makroporer er det med en kvantitativ vurdering af strømmingen. Det vil ofte være det man har brug for fx ved kalibrering af en model. Til dette formål er den beskrevne metode til at udføre bromid-tracerforsøg velegnet og meget priseffektiv. Det må dog anbefales at man bruger samme mængde nedbør i stedet for samme regnperiode når der undersøges effekten af regnintensitet.

9. Udvekslingskoefficienter mellem makroporer og jordmatrix

Hubert de Jonge (DJF), Ole Hørbye Jacobsen (DJF) og Bo Vangsø Iversen (DJF)

9.1 Metode

I tabel 9.1 findes en oversigt over de kolonner der blev anvendt til tracer forsøg. I alt er der udført 14 kolonne-eksperimenter, hvoraf 10 kolonner er udtaget i pløjelaget og 4 kolonner i underjorden.

Tabel 9.1. Oversigt over kolonner anvendt i forsøgene.

Lokalitet	Dybde (cm)	Kolonne nummer
Gjorslev	5-25	104, 217, 227
Gjorslev	465-485	118, 181
Grundfør	5-25	245
Grundfør	350-370	151, 243
Højstrup	5-25	84, 159, 195
Mammen	5-25	16,101, 528

Efter konklusionen i dette bilag findes en beskrivelse af forsøgsprotokollen. I korte træk er der tilført tre tracerpulse til kolonnerne, den første ved en vandingsintensitet på 10 mm/time og sug i bunden af kolonnen på ca. 1 cm (i alt 300 mm), den anden ved en vandingsintensitet på 5 mm/time og et sug på 15 cm (150 mm), og til sidst en tredje puls ved en vandingsintensitet på 1 mm/time og et sug på 50 cm (i alt 172 mm). Desuden har der været to stop-flow perioder af 16 timer hver. Hvert forsøg har strakt sig over i alt 11 dage, og der er gennemført eksperimenter med tre parallelle kolonneopstillinger. Den tekniske opstilling med pulspumper, tracer puls tilsætning, og automatisk opsamling af prøverne har fungeret tilfredsstillende.

Som baggrundselektrolyt er der anvendt enten 0.01 M CaCl_2 eller 0,01 M CaSO_4 . Det har været nødvendigt eftersom jordstrukturen skulle bevares gennem hele eksperimentet, fordi der efter eksperimentet var planlagt hydrauliske målinger på kolonnerne. Som tracere er der anvendt diFluoroBenzosyre (2,6-DFBA), Pentafluorobenzosyre (PFBA), og bromid (Ca-Br_2). Tracerne er analyseret med henholdsvis ionkromatograf (Br) og HPLC (2,6-DFBA og PFBA). Analysen af Br er ikke forløbet tilfredsstillende, da den blev påvirket af kloridbaggrundskoncentrationerne i effluentvand. Der er p.t. analyseret tracerkoncentrationer fra 8 kolonner, men det ikke har været muligt at måle bromid i de fleste af kolonnerne.

9.2 Resultater fra kolonneeksperimenter

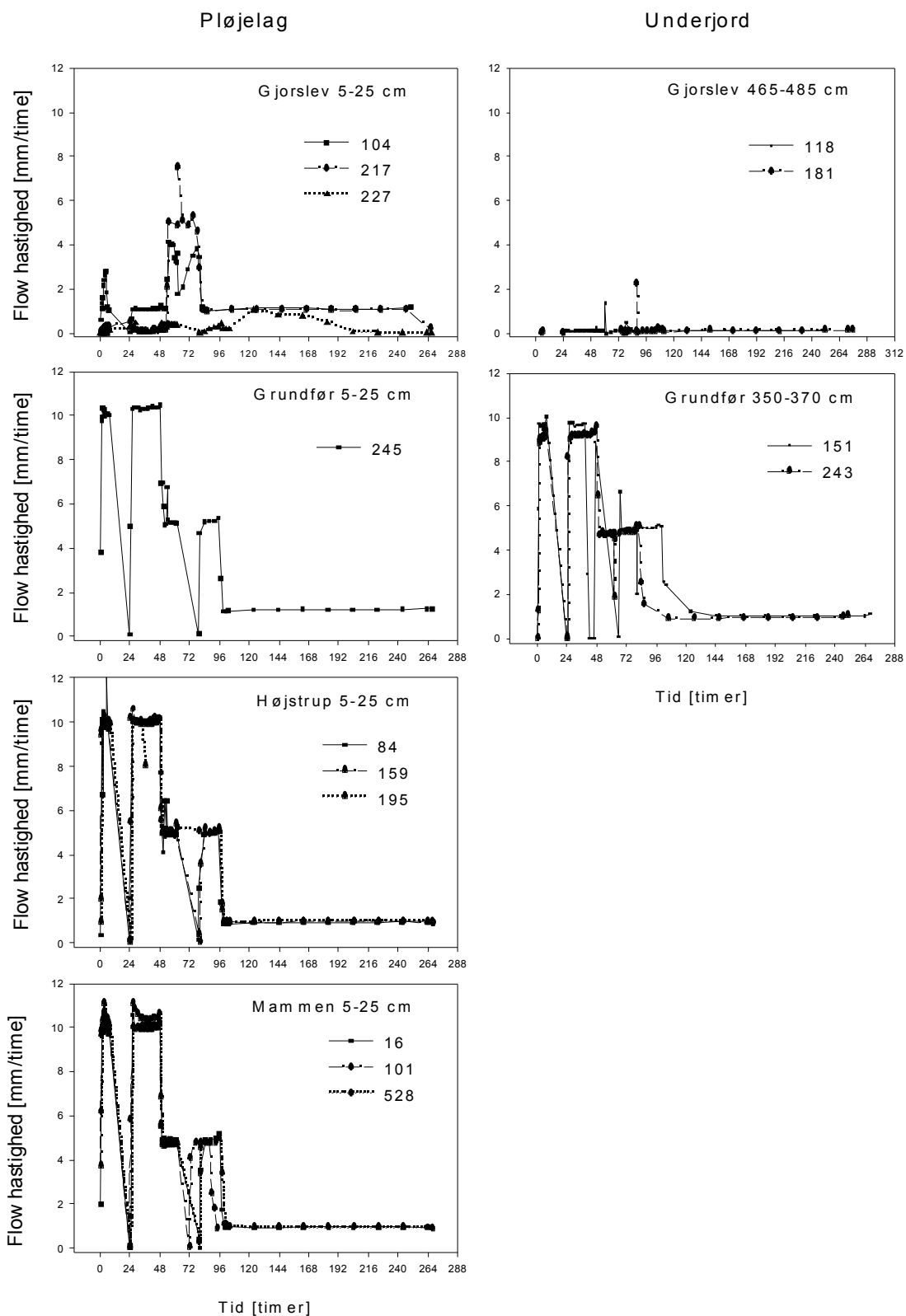
I figurene 9.1, 9.2 og 9.3 er der givet en oversigt over resultaterne fra kolonneeksperimenterne. Figur 9.1 viser effluent-afstrømningshastigheder fra kolonnerne. Vanding af kolonnerne fra Grundfør, Højstrup og Mammen blev gennemført som planlagt som beskrevet i protokollen. Der var hurtig respons på vanding og ændringer i vandingsintensitet, figur 9.1.

Infiltrationskapaciteten for Gjorslev kolonnerne var ikke tilstrækkeligt til at eksperimenterne kunne gennemføres i følge protokollen. Der opstod ponding på overfladen i starten af vandingen og eksperimenterne er udført ved konstant overfladeponding. Derfor svarer afstrømningshastigheden til den maksimale infiltrationskapacitet af kolonnerne. Denne afvigelse i forhold til andre jordtyper kan ikke forklares ud fra hverken tekstur eller vegetation på det tidspunkt hvor prøverne blev udtaget. Både Gjorslev og Højstrup er udviklet på Østdanske moræneaflejringer, og der var stubmarker på begge lokaliteter på prøveudtagnings tidspunktet. Lerindholdet i Højstrup Ap jord er lidt højere (21.7%) end i Gjorslev Ap jord (16.9%). Gjorslev profilen er blevet klassificeret som veldrænet jord.

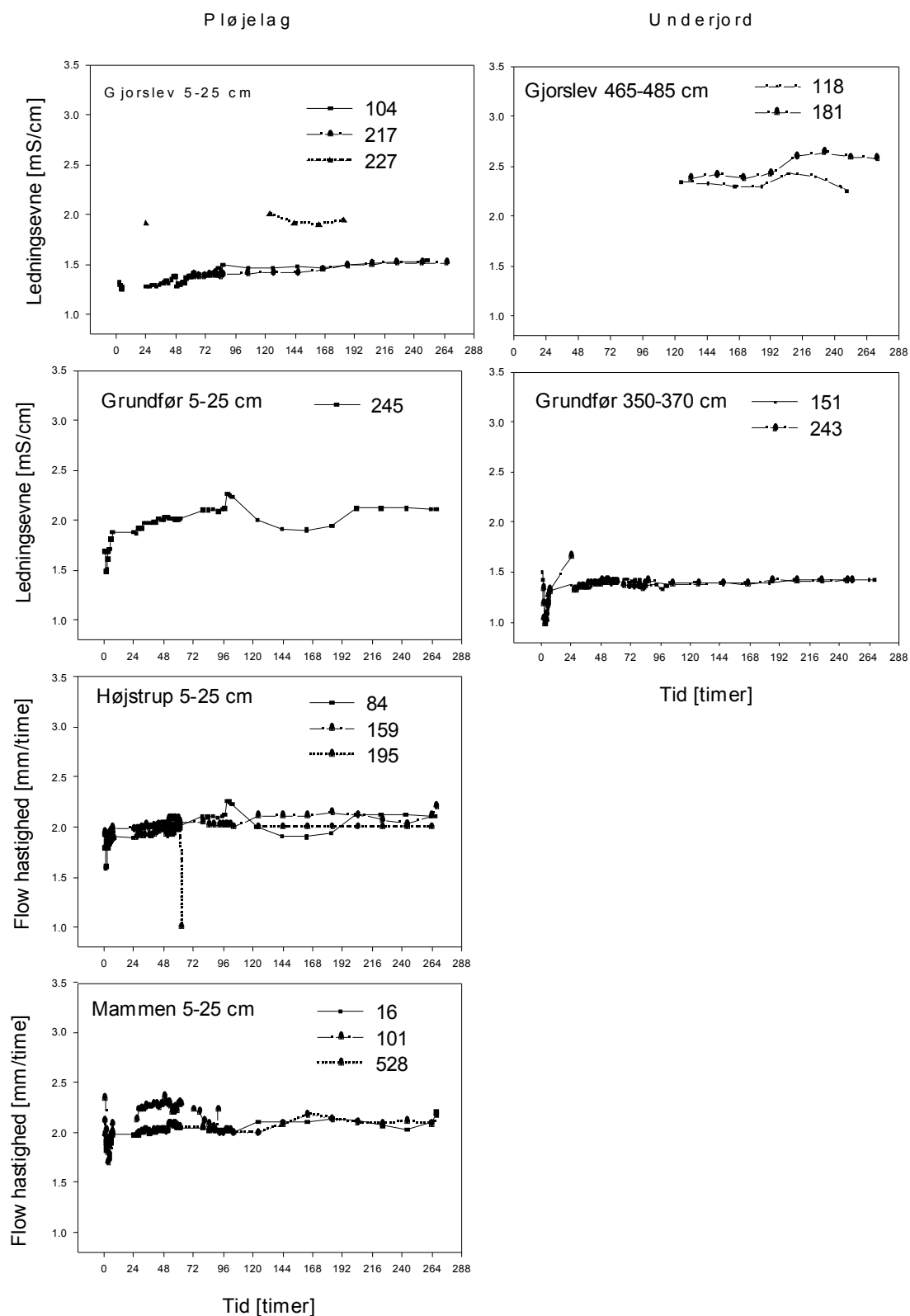
Ledningsevnen i effluenterne fra Grundfør, Højstrup og Mammen kolonnerne viser en meget kortvarig nedgang, hvorefter den hurtigt stiger til et konstant niveau, figur 9.2. Dette afspejler transport igennem gennemgående makroporer i kolonnerne. Det samme "dyk" i ledningsevne ses ikke i effluenterne fra Gjorslev kolonnerne.

Figur 9.3 viser gennembrudskurverne for tracerne (i alt 8 kolonner). Koncentrationsniveauer og formen af gennembrudskurver for de forskellige tracere afspejler vandets bevægelse gennem jordsøjlerne. Gennembrudskurven for Højstrup kolonner nr. 195 viser et meget hurtigt gennembrud for både tracer 1 og 2, hvilket afspejler hurtig transport gennem makroporer både ved vandingsintensiteter på 5 og 10 mm/time. Koncentrationerne af tracer 3 er lavere som følge af øget kontakt mellem makroporer og jordmatrice. Lignende gennembrudskurver for tracer 1 og 2 ses for prøven fra pløjelaget ved Mammen og underjorden fra Grundfør.

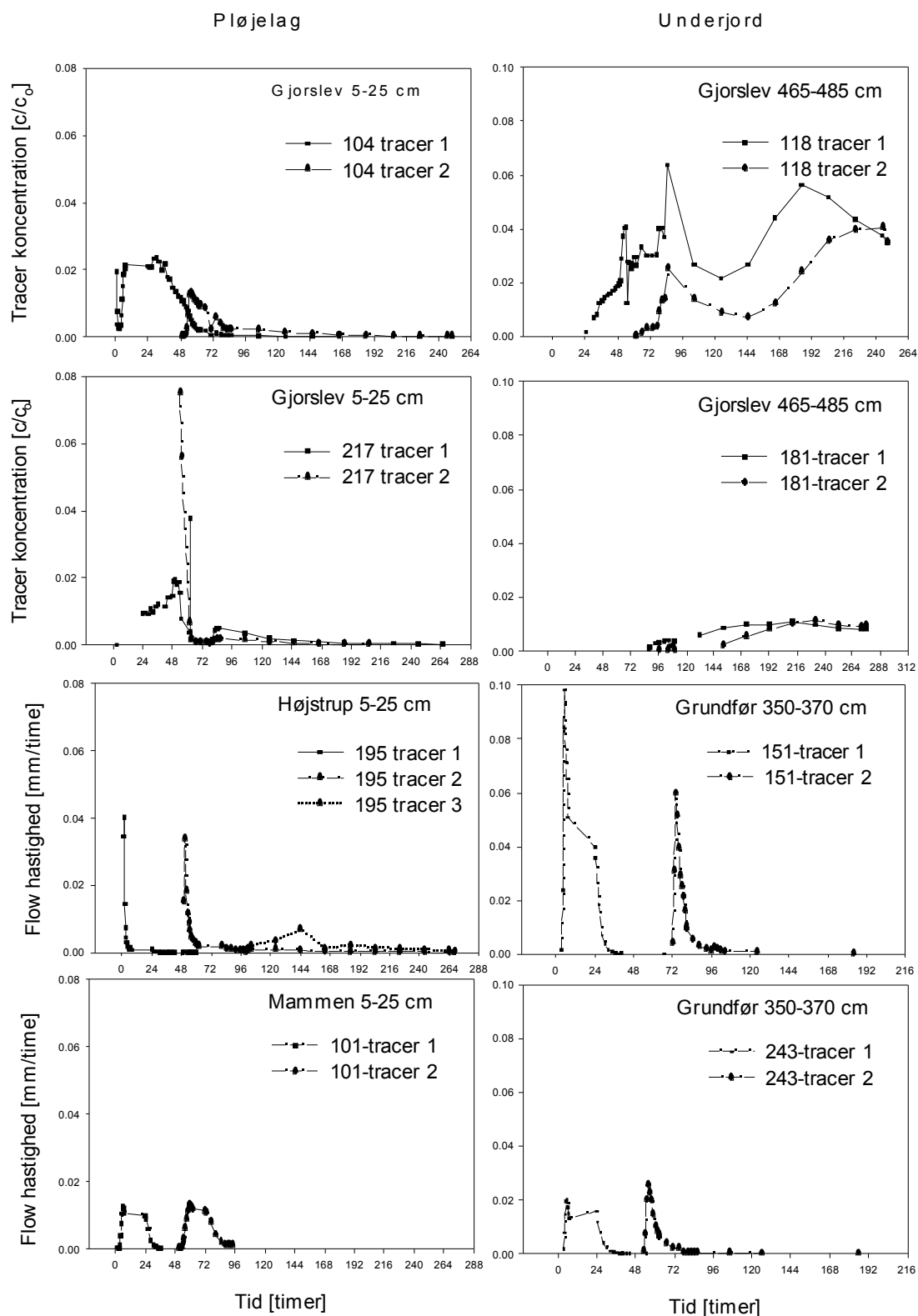
Gjorslev gennembrudskurver afviger fra de andre jordtyper, hvilket må forventes som følge af den lave infiltrationshastighed og mangel på hydraulisk ligevægt. De højeste effluent koncentrationer ses fra ca. 30 timer op til 72 timer, hvilket afspejler længere opholdstid af vandet i disse kolonner. Der ses også bimodale gennembrudskurver, som formodes at være forårsaget af vandtransport både i makroporer og i jordmatricen. Disse oplysninger giver høj informationsværdi i forhold til udvekslingskoefficienter af vandet mellem makroporer og jordmatricen.



Figur 9.1. Flowhastighed i kolonneforsøgene.



Figur 9.2. Flowhastighed og ledningsevne i kolonneforsøgene.



Figur 9.3. Flowhastighed og tracerkoncentration i kolonneforsøgene.

9.3 Modellering med *MACRO*

Formålet med denne del af projekt var at identificere udvekslingskoefficienter mellem makroporer og jordmatricen for forskellige typer lerjorde ved invers modellering. Idéen var at anvende den informationsværdi som ligger i gennemførelse af multipel-tracer forsøg. Hver tracer bliver tilført til kolonnen ved forskellige randbetingelser og "ser" derfor forskellige dele af jordstrukturen. I *MACRO* modellen er der imidlertid ingen muligheder for at simulere mere end ét stof per simuleringshændelse. Medio 2003 var det heller ikke muligt at opsætte modellen med dynamiske nedre randbetingelser, en begrænsning som der i slutningen af 2003 blev rettet op på.

På grund af ovenstående begrænsninger blev *MACRO* modellen opstillet til at simulere kolonne eksperimenter med tre efterfølgende tracer puls input af det samme stof. Men fordi der stadig er tracer tilbage i jorden ved den efterfølgende tracerpuls, kunne det ikke lade sig gøre at foretage invers modellering af udvekslingskoefficienter af de multiple tracerforsøg. Når *MACRO* eventuelt kan tilpasses til simulering af flere stoffer samtidigt, forventes modellen, som er koblet med *SUFI* modulen til invers modellering, at være et brugbart simuleringsværktøj til bestemmelse af udvekslingskoefficienter.

9.4 Konklusion

De beskrevne kolonneforsøg med multiple tracere og skiftende hydrauliske betingelser er velegnede til at give information om dynamikken af stoftransporten i makroporøs lerjord. Desværre findes der ikke for nærværende en velegnet model til at beregne udvekslingskoefficienterne.

Forsøgsprotokol

Bestemmelse af udvekslingskoefficient mellem matrix og makroporer

20x20 cm kolonne opfugtes langsomt og afdrænes til –20 cm i midten af prøven

Generelt bruges der 0.01 M CaSO_4 som vandingsvand for at bevare jordstrukturen.

1. runde

- ♦ Forsøget startes mandag morgen klokken 8.
- ♦ Prøven placeres på den porøse plade som er sat til et undertryk på 1 cm vandsøjle (eller det der er nødvendig for lige at få vand til at afdræne)
- ♦ Pumpen sættes på 10 mm i timen
- ♦ Prøvekarusellen sættes til at opsamle 150 ml (ca. en prøve pr halve time)
- ♦ Efter 1 time tilsættes 25 ml 0.02 M 2,6 diFluoroBenzosyre (0.316 g 2,6-DFBA i 100 mL demineraliseret vand)
- ♦ Ved klokken 15 slukkes for pumpen
- ♦ Næste morgen tirsdag klokken 8 genoptages med 10 mm i timen
- ♦ Den første prøve opsamles i separat glas
- ♦ Derefter opsamles for hver 600 ml

2. runde

- ♦ Næste dag onsdag klokken 8 skiftes til 5 mm i timen og der sættes 15 cm sug på
- ♦ Prøvekarusellen sættes til at opsamle 150 ml (ca. en prøve pr time)
- ♦ Efter 1 time tilsættes 25 ml 0.02 M PentaFluoroBenzosyre (0.424 g PFBAi 100 mL demineraliseret vand)
- ♦ Ved aftenstid klokken 22 slukkes for pumpen
- ♦ Næste dag torsdag klokken 16 genoptages med 5 mm i timen
- ♦ Den første prøve opsamles i separat glas
- ♦ Derefter opsamles for hver 600 ml

3. runde

- ♦ Næste dag fredag om morgenen skiftes til 1 mm i timen og der sættes 50 cm sug på
- ♦ Prøvekarusellen sættes til at opsamle 60 ml for de første prøver og herefter 600 ml.
- ♦ Efter 2 timer tilsættes 25 ml 0.01 M bromidtracer (0.9995 g CaBr_2 i 500 mL demineraliseret vand).
- ♦ Den køres en uge til næste fredag klokken 12.

Generelt måles der EC og tracers på prøverne.

10. Naturlig dræning og grundvandsdannelse

Bjarne Hansen (DJF), Svend Elsnab Olesen (DJF) og Vibeke Ernsten (GEUS)

10.1 Baggrund og formål

Mulighederne for nedsivning af overskudsnedbør og dermed grundvandsdannelse er en vigtig parameter i alle vandtransport- og vandbalancebetragtninger. Manglende nedsivning kan medføre, at der i forbindelse med overskudsnedbør, primært i vinterhalvåret, opstår temporær vandmætning enten i vækstlaget eller dybere i jordprofilen over dybereliggende grundvandsmagasiner. Det betyder, at der er mulighed for præferentiel strømning med risiko for udvaskning af bl.a. pesticider.

Mulighederne for nedsivning afhænger bl.a. af geologisk oprindelse, jordens lerindhold og den opsprækning af de øvre jordlag, der er sket siden den geologiske dannelse. Opsprækningen skyldes dels pedologiske processer som kalkudvaskning og udtørring/opfugtning i de øverste jordlag, dels geologiske forhold og geokemiske processer i dybere jordlag. Som resultat af bl.a. disse processer er jordlagenes hydrauliske ledningsevne ofte størst i vækstlaget hvorefter den reduceres med tiltagende dybde.

Dræning af dyrkede arealer er en indikator for utilstrækkelig nedsivning af overskudsnedbør og at der i kortere eller længere perioder opstår vandstuvning i de øverste jordlag. Formålet med dette projekt var at finde relationer mellem allerede kortlagte jordbundsparametre og omfanget af dræning for dermed at kunne udpege områder med utilstrækkelig nedsivning.

10.2 Tidligere undersøgelser

Der er tidligere udviklet en metode til udpegning af områder med større eller mindre afvandingsbehov på grundlag af kortlagte jordbundsparametre og oplysninger om dræningens omfang (Arealdatakontoret, 1985). Det tekstur- og strukturbetingede afvandingsbehov var baseret på kort over landskabselementer, sandet/leret undergrund og farvekoder i Den Danske Jordklassificering, der angiver teksten i pløjelaget. Oplysninger om drænedes arealer var hovedsagelig baseret på en landsdækkende undersøgelse udført af Landskontoret for Planteavl 1972-73 (Skriver & Hedegård, 1973). Gennem de lokale planteavlssk konsulenter blev der for ca. 920 landbrug indsamlet oplysninger om det samlede areal, hvor stor en del, der er drænet, og arealer med behov for omdræning, supplerende dræning og nydræning for henholdsvis mineraljord og lavbundsjord. De enkelte landbrug blev markeret på kort 1:50.000 hvor størstedelen af ejendommens areal var placeret. På kommuneniveau blev der beregnet areal, fordelt på afvandingsklasserne 1 til 4 med et afvandingsbehov på henholdsvis 75-100 %, 50-75 %, 25-50 % og 0-25 % af arealet.

10.3 Nye data

Ovennævnte metode har den svaghed, at den ikke inddrager viden om geologiske og geo-kemiske forhold for jordlagene i og under 1 m dybde som på daværende tidspunkt ikke var tilgængelige på digital form. Der foreligger nu geologiske oplysninger på digital form, hvor ca. 82 % af landet findes kortlagt og vist på en skala 1:25.000 (Hermansen og Jakobsen, 2000) og for hele landet 1:200.000 (Hermansen et al., 1999). Desuden findes oplysninger i boringsdatabasen Jupiter (GEUS), hvorfra data om tykkelse af lerlag, mægtigheden af den kalkfri zone og skiftet fra iltede til ikke iltede jordarter kan hentes frem. Der er udviklet bedre GIS værktøjer og der foreligger flere georelaterede oplysninger om drænedede arealer indsamlet ved interviewundersøgelser udført af Hedeselskabet 1983-89 (Kelstrup & Hansen, 1986, Hansen, 1990). Fra disse undersøgelser foreligger oplysninger om bl.a. arealanvendelse og dræning på markniveau for 17 oplande svarende til ca. 1300 marker. De enkelte marker er markeret på kort 1:10.000. Placeringen af arealerne og detaljeringsgraden er derfor væsentlig bedre end i Landskontorets undersøgelse. De fleste oplande er beliggende i Jylland. Desuden var det planlagt at inddrage oplysninger om drænklasser for de enkelte profiler i DJF's landsdækkende Profildatabase.

10.4 Beregning af grundvandskoter

Behovet for dræning af dyrkede arealer under givne klimatiske betingelser kan normalt henføres til to hovedårsager:

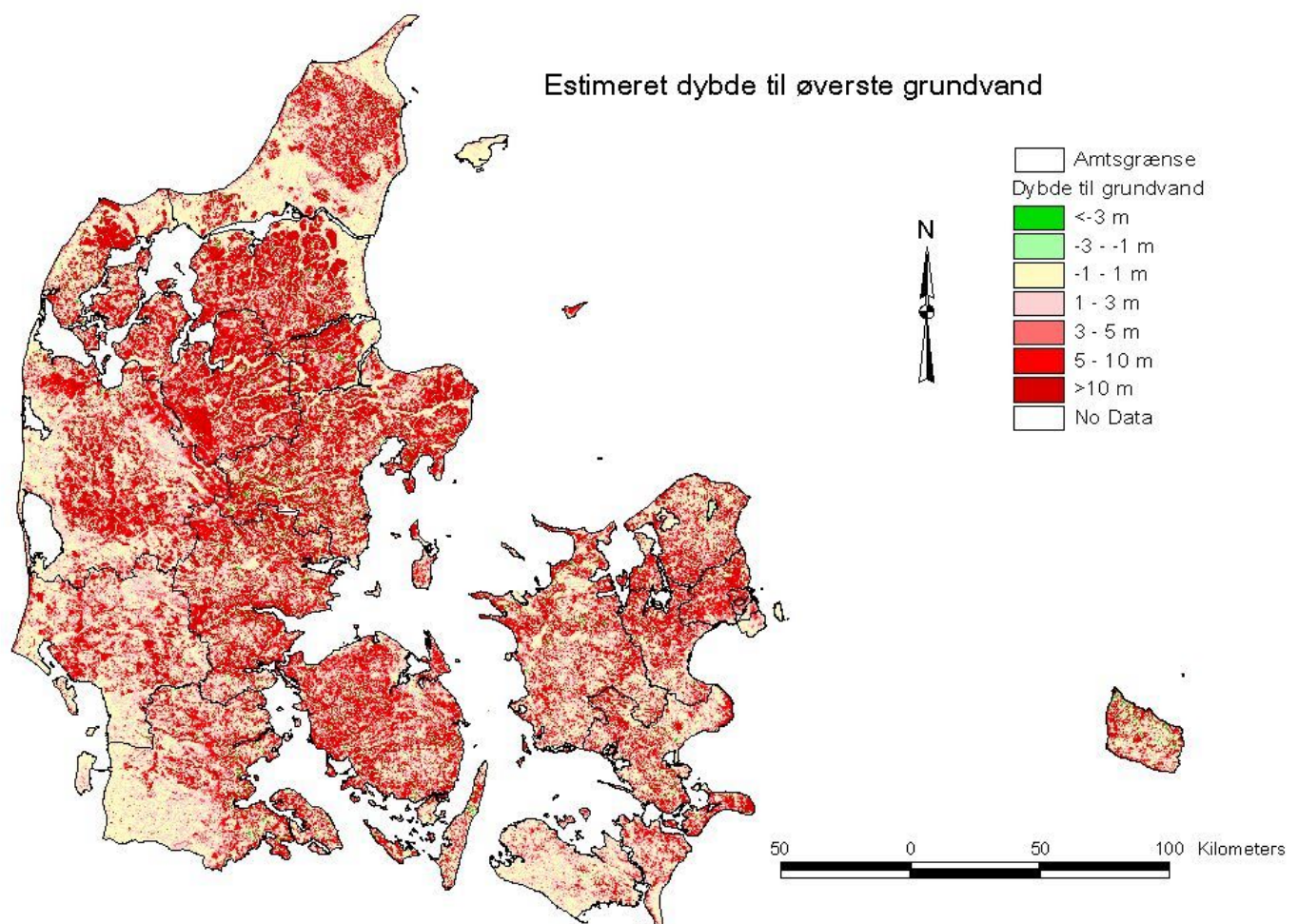
1. recipientafhængigt afvandingsbehov, der skyldes et højtliggende primært grundvandspejl på grund af arealets niveau i forhold til recipienten.
2. tekstur- og strukturbetinget afvandingsbehov på grund af lille hydraulisk ledningsevne i eller under rodzonen og manglende muligheder for nedsivning og grundvandsdannelse.

En vurdering af de teksturbetingede muligheder for nedsivning og grundvandsdannelse på grundlag af dræningsaktiviteten må derfor baseres på arealer der ikke har et recipientafhængigt afvandingsbehov.

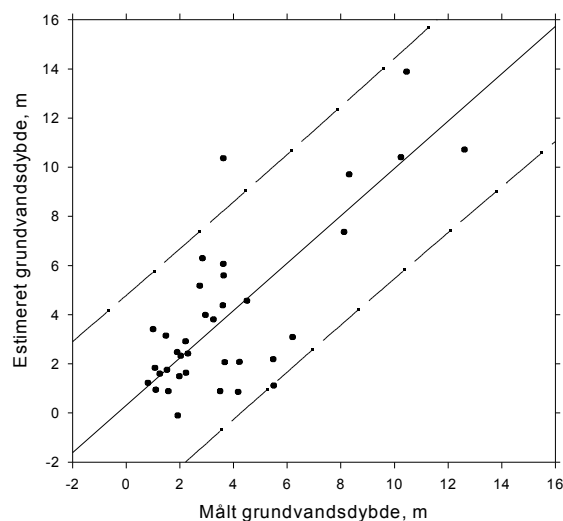
De fleste amtskommuner har kortlagt grundvandspotentialerne baseret på vandstandsmålinger i borer, brønde mv. Denne kortlægning er imidlertid ikke landsdækkende og nogle steder er der tilsyneladende ikke skelnet mellem primære og sekundære grundvandsmagasiner. Desuden er det ved pesticidzonerings vigtigt at kende tykkelsen af den umættede zone. Derfor er det forsøgt at foretage en landsdækkende kortlægning af det øverste grundvandsspejl på grundlag af oplysninger om grundvandspejlinger i borer, dybde af gravede brønde og vandstandskoter i vandløb, grøfter og søer. Oplysninger om grundvandspejlinger i borer samt dybde af gravede brønde stammer fra GEUS's databaser og oplysninger om vandstandskoter i vandløb, grøfter og søer er udtrukket fra TOP10DK datasættet hos GEUS. Dette datamateriale er meget omfattende og indeholder vandstandskoter i ca. 4.500.000 punkter. Grundvandspejlinger i borer samt brønde, der på grundlag af vandstandskoten og omkringliggende pejlinger skønnes at repræsentere dybereliggende reservoirer, er sorteret fra. Derefter er estimerede grundvandskoter beregnet i et landsdækkende gridnet ved brug af programmet Surfer. Det bør bemærkes, at det således

beregnete grundvandsspejl nogle steder kan være temporært. Dybden til grundvandsspejlet kan derefter beregnes som difference mellem terrænkoter og estimerede grundvandskoter. Der er anvendt terrænkoter fra den digitale højdemodel med 25 m gridstørrelse fra TOP10DK. Den estimerede dybde til øverste grundvand er vist i figur 10.1.

Beregningsmetoderne og usikkerhed ved datamaterialet medfører naturligvis nogen usikkerhed på de estimerede grundvandsdybder. Usikkerheden på terrænkoterne i højdemodelen er ifølge Kort- og Matrikelstyrelsen <0.9 m i fladt terræn og <2 m i kuperet terræn. Usikkerheden på de estimerede grundvandskoter kendes ikke, men varierer antagelig med terrænform, jordtype mv. Desuden har det ikke været muligt at tage hensyn til årstidsvariationen i grundvandsstanden. Der er i KUPA-projekterne på sandjordsarealer målt dybde til grundvand på nogle lokaliteter. Målte og estimerede værdier er vist i figur 10.2. Regressionsberegningerne viser en standardafvigelse på ca. 1 m for disse målesteder. Der foreligger ikke tilsvarende data fra lerjordsarealer i KUPA sammenhæng.



Figur 10.1. Estimeret dybde til det øverste grundvand.



Figur 10.2. Sammenligning af målt og estimeret grundvandsdybde på sandjordsarealer. Stiplede linier viser 95% prediktionsintervallet, dvs. regressionslinien ± 2 gange standardafvigelsen.

10.4.1 Dræningsintensitet og jordbundsparametre

Relationer mellem kortlagte jordbundsparametre og dræningsintensitet er bestemt på grundlag af datamateriale fra undersøgelsen udført af Landskontoret for Planteavl 1972-73 og interviewundersøgelserne udført af Hedeselskabet i perioden 1983-89. Arealer med en estimeret grundvandsdybde mindre end 5 m er udeladt for at undgå dræninger, der skyldes et recipient-betinget afvandingsbehov. For områder med oplysninger om dybereliggende grundvandsstand er der set bort fra dette krav. Derved er ca. halvdelen af arealerne omfattende såvel sand- som lerjorde udeladt.

For at undersøge hvilke jordbundsparametre, der er korreleret med drænprocenten, er korrelationen mellem de enkelte jordbundsparametre og drænprocenten analyseret. Analyserne er udført med GLM-proceduren i SAS. En sådan analyse forudsætter bl.a., at datamaterialet er normalfordelt. Da drænprocenten ikke er normalfordelt, hovedsagelig på grund af et stort antal arealer med drænprocent på 0 eller 100, er drænprocenten transformeret efter følgende formel

$$D = 1/\log((\text{drænprocent} + 0.5)/(100 - \text{drænprocent} + 0.5))$$

Der er generelt fundet langt bedre korrelation mellem de enkelte jordbundsparametre og drænprocenten for data fra interviewundersøgelserne foretaget af Hedeselskabet end for data fra Landskontorets undersøgelse, tabel 10.1. Det skyldes formodentlig, at der i Landskontorets undersøgelse kun er oplyst drænprocent og geografisk placering på ejendomsni-

veau. En drænprocent på 50 kan således f.eks. dække over en drænprocent på 100 for halvdelen af markerne og 0 og for den anden halvdel på grund af forskellig jordtype mv. Desuden er den geografiske placering af arealerne mere usikker med deraf følgende usikkerhed ved bestemmelse af de enkelte jordbundsparametre. Det gælder især parametre, der er bestemt med stor detaljeringsgrad og kortlagt i f.eks. 1:25.000 og i mindre grad for parametre, der er bestemt med mindre detaljeringsgrad og kortlagt i f.eks. 1:200.000 eller 1:500.000.

Tabel 10.1. Korrelationer mellem transformeret dræningsprocent (D) og jordbundsparametre for datamaterialet fra interviewundersøgelser gennemført af Hedeselskabet og drænundersøgelsen udført af Landskontoret for Planteavl.

Jordbundsparametre	Korrelation med data fra interviewundersøgelser, udført af Hedeselskabet		Korrelation med data fra undersøgelse gennemført af Landskontoret	
	Antal	Korrelation, r^2	Antal	Korrelation, r^2
Farvekode (tekstur i pløjelag)	726	0,36	433	0,23
Landskabselement	726	0,44	433	0,17
Forenkl. landskabselement	726	0,42	433	0,15
Geologi, 1:200.000	726	0,46	433	0,21
Forenkl. geologi, 1:200.000	726	0,43	429	0,16
Geologi, 1:25.000	469	0,67	310	0,28
Forenkl. geologi, 1:25.000	469	0,63	310	0,26
Leret/sandet undergrund	726	0,48	433	0,17
Kalkudvaskningsdybde	699	0,29	433	0,11
Lertykkelse	726	0,19	433	0,05

Da der er et stort antal jordarter på de geologiske kort, er de geologiske symboler forenklet til grusede, sandede, lerede og organiske aflejringer hvor sidstnævnte kategori er udeladt af korrelationen. Tilsvarende er der et stort antal landskabselementer, hvoraf nogle altid har et recipientafhængig afvandingsbehov, som f.eks. marsk eller littorina. Landskabselementerne er derfor reduceret til hedeslette, bakkeø og moræneaflejringer. Forenklingerne er nødvendige, fordi der i datamaterialet ikke findes data for mange af de øvrige jordarter eller landskabselementer. Som det fremgår af tabel 1 medfører forenklingerne mindre reduktioner i de fundne korrelationer.

Af tabel 10.1 fremgår, at korrelationen som forventet er størst for parametre, der repræsenterer dybere jordlag og mindre for landskabselementer og tekstur i pløjelaget. Korrelationen mellem tekstur i pløjelaget og drænprocenten skyldes hovedsagelig en korrelation mellem tekstur i pløjelag og dybere jordlag. Den i særklasse bedste parameter er jordart fra Geologiske kort 1:25.000, især for data fra interviewoplandene fra Hedeselskabets undersøgelser, hvor oplysningerne om dræning foreligger på markniveau. Korrelationen for jordarter på en skala 1:200.000 er væsentlig dårligere og sammenlignelige med korrelationen for de gamle kort over leret/sandet undergrund i 1:500.000.

Baseres beregningerne på lerjordsarealer alene, er de undersøgte jordbundsparametre generelt dårlig korrelerede med drænprocenten. Korrelationerne er især overraskende små for kalkudvaskningsdybde og tykkelse af lerlag. Det kan skyldes en relativ lille variation i drænprocent på lerjordsarealer. For ca. halvdelen af lerjordsarealerne i interviewundersøgelserne var dræningsprocenten >80 % og for kun 15-20 % af arealerne var dræningsprocenten <50 %. For de relativ få lerjordsarealer med lille dræningsprocent kan der være lokale forhold der spiller ind og som derfor ikke vil afspejle sig i lertykkelse eller i dybden af den kalkfri zone. Desuden kan der være arealer med et potentielt dræningsbehov, som af driftsmæssige eller økonomiske årsager ikke er drænet.

Resultaterne tyder på, at landskabselement, farvekode og en parameter for dybere jordlag bør indgå i en model til estimering af drænbehov og muligheder for nedsivning. Modeller til beregning af dræningsprocent på grundlag af disse parametre er opbygget ved hjælp af GLM-proceduren i SAS. Multiple korrelationer for disse modeller er vist i tabel 2. Der synes at være mulighed for at estimere drænbehov og muligheder for nedsivning rimelig sikkert for områder, hvor geologiske kort 1:25.000 foreligger og med nogen større usikkerhed, hvor de geologiske oplysninger stammer fra kort 1:200.000.

Tabel 10.2. Multiple korrelationer mellem transformeret dræningsprocent og jordbundsparametre.

Jordbundsparametre	Korrelation med data fra Hedeselskabets interviewundersøgelse		Korrelation med data fra Landskontorets undersøgelse	
	antal	Korrelation, r^2	Antal	Korrelation, r^2
Landskabselement + Farvekode + Leret/sandet undergrund	726	0,55	433	0,27
Landskabselement + Farvekode + Geologisk symbol, 1:200.000	726	0,54	433	0,30
Landskabselement + Farvekode + Geologisk symbol, 1:25.000	699	0,75	310	0,29
Landskabselement + Farvekode + Forenkl. geologisk symbol, 1:200.000	726	0,49	433	0,28
Landskabselement + Farvekode + Forenkl. geologisk symbol, 1:25.000	699	0,70	433	0,27

I DJF's Profildatabase med ca. 2200 jordbundsprofiler er de enkelte profiler inddelt i 5 dræningsklasser, hvor dræningsklasse 1 er meget veldrænet jord og dræningsklasse 5 er meget dårlig drænet jord. Analyser af disse data viste dårligere korrelation mellem drænklasser og jordbundsparametre end fundet for data fra Landskontorets undersøgelse. Årsagen er ikke nærmere undersøgt, men kan være, at mange arealer med drænbehov er drænet for en årrække siden og at gleypræg mv., som er anvendt ved vurdering af dræningsklasse, derved er ændret.

I tabel 10.3 er vist estimerede dræningsprocenter beregnet på grundlag af data fra Hedeselskabets interviewundersøgelser og modellen med farvekode, forenklet landskabselement og

forenklet geologi 1:25.000. Værdierne er tilbagetransformeret fra variabelen D, der er defineret tidligere.

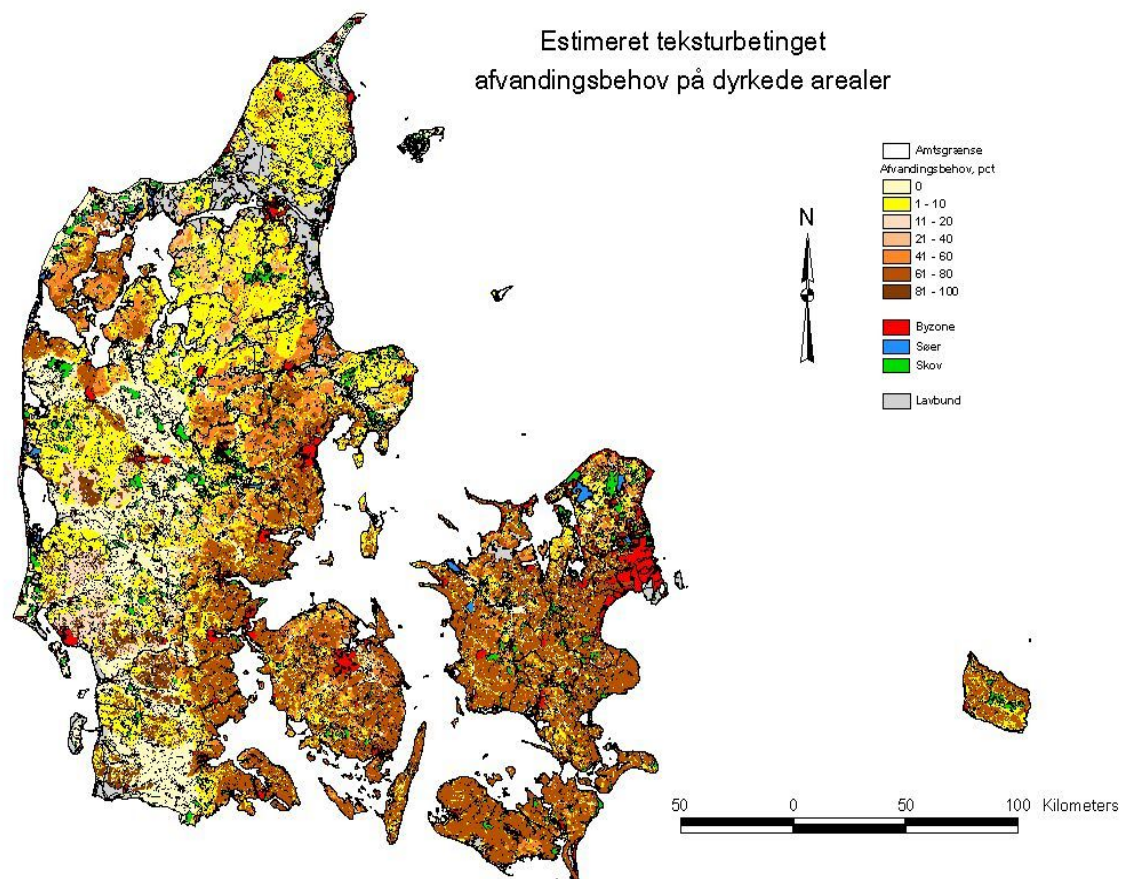
Tabel 10.3. Estimerede teksturbetingede dræningsprocenter ved forskellige kombinationer af farvekode (tekstur i pløjelag), forenklet geologi 1:25.000 og forenklete landskabselementer.

	Forenklet geologi		
	Grus	Sand	Ler
Farvekode 1-2 Hedeslette	0	0	-
Bakkeø	0	5	79
Moræne	0	1	38
Farvekode 3 Hedeslette	0	0	-
Bakkeø	6	15	84
Moræne	1	3	56
Farvekode 4-6 Hedeslette	0	2	-
Bakkeø	25	37	88
Moræne	4	7	77

Der er ikke estimeret drænbehov for hedeslette med leret undergrund på grund af manglende data. Desuden forekommer denne kombination sjældent. De estimerede teksturbetingede dræningsprocenter for bakkeø er overraskende store, hvor der er grus eller sand i ca. 1 m dybde. Det skyldes antagelig, at der på bakkeøer ofte i begrænset dybde er ler overlejret af grus eller sand. Dræningsbehovet skyldes i disse tilfælde de dybereliggende lerlag. Det skal dog også tages i betragtning, at datamaterialet har været begrænset for landskabselementet bakkeø.

Anvendes geologisk kortlægning 1:200.000, hvor den mere detaljerede kortlægning 1:25.000 mangler, fås en gennemsnitlig teksturbetinget dræningsprocent for hele landet på 39 % for ikke lavbundsarealer med farvekode 1-6. De således estimerede dræningsprocenter er vist i figur 3. På grundlag af data fra den tidligere undersøgelse (Arealdatakontoret, 1985) kan forskellen mellem teksturbetinget og total dræningsbehov skønnes til ca. 9 % af de dyrkede arealer. Ifølge Aslyng (1980) er ca. 49 % af landbrugsarealet drænet. Der er således god overensstemmelse mellem estimeret afvandingsbehov og aktuelle drænedes arealer på landsplan.

I forbindelse med Suså-undersøgelserne 1978-81 blev der indsamlet oplysninger om drænedes arealer i Susåens opland. Der blev udsendt spørgeskemaer til 800 landbrug. Ca. halvdelen af spørgeskemaerne blev returneret. I tabel 4 er vist estimeret teksturbetinget dræningsbehov og drænedes arealer beregnet på grundlag af besvarelserne. De drænedes arealer omfatter her både teksturbetingede og recipientbetingede dræninger. Tages dette i betragtning er der rimelig overensstemmelse mellem estimeret dræningsbehov og drænedes arealer.



Figur 10.3. Estimeret tekstur- og strukturbetinget afvandingsbehov på dyrkede arealer.

Tabel 10.4. Estimeret teksturbetinget dræningsbehov og drænedede arealer på ikke-lavbundsområder i 7 kommuner i Susåens opland.

Kommune	Estimeret dræningsbehov (%)	Registrerede dræninger (%)
Fuglebjerg	67	66
Ringsted	66	72
Næstved	60	62
Rønnede	74	83
Holmegård	62	72
Haslev	68	90
Suså	68	76

Hedeselskabets oversigtskort over arealer, hvor der er projekteret eller udført dræning, er digitaliseret for 4 områder ved Grundfør, Mammen, Bjerringbro og på Stevns. Estimeret dræningsbehov og aktuel dræning på ikke lavbundsarealer er vist i tabel 10.5. Det fremgår heraf, at der for Stevns er rimelig overensstemmelse mellem estimeret dræningsbehov og aktuel dræning. For de øvrige områder er den registrerede aktuelle dræning langt mindre

end det estimerede behov. Det kan skyldes en overvurdering af dræningsbehovet i disse områder. Den væsentligste årsag er dog sandsynligvis, at en stor del af dræningerne ikke er registreret, enten fordi de er udført af andre end Hedeselskabet eller fordi ældre dræninger ikke er registreret. En stor del af lerjordsarealerne var således ifølge Aslyng (1980) drænet allerede før år 1900.

Tabel 10.5. Estimeret teksturbetinget dræningsbehov og dræned arealer på ikke lavbundsområder registreret i Hedeselskabets arkiver for 4 områder.

	Total areal, ha	Estimeret dræningsbehov, %	Registrerede dræninger, %
Stevns	11000	76	70
Grundfør	15000	54	15
Bjerringbro	39000	37	6
Mammen	15000	40	4

10.5 Konklusion

Sammenfattende kan konkluderes, at det estimerede teksturbetingede drænbehov synes at være i rimelig overensstemmelse med kendte aktuelle dræninger. Verifikation af modellen kræver indsamling af oplysninger om dræned arealer ved interview, spørgeskemaer eller lignende. I nogle områder er en stor del af de dræned arealer således tilsyneladende ikke registreret i Hedeselskabets arkiver.

10.6 Litteratur

Arealdatakontoret. 1985. Afvandingsundersøgelsen i Danmark. Landbrugsministeriets Arealdatakontor.

Aslyng, H.C. 1980. Afvanding i jordbruget. Kulturteknik III. 3. Udg. DSR-forlag. 228 sider.

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Boringsdatabasen, Jupiter.

Hansen, B. 1981. Drænvandskvantitet og -kvalitet i Susåens opland. Suså-projekt. Rapport H19.

Hansen, B. 1990. Landbrugets gødnings- og arealanvendelse i 1983 og 1989. Interviewundersøgelser i syv mindre landbrugsområder. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, nr. A21.

Hermansen, B. og P.R. Jakobsen. 2000. Danmarks digitale jordartskort 1:25 000. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, version 2,0, GEUS rapport nr. 81, 2000.

Hermansen, B., S.A.S. Petersen og C. Bjerregaard. 1999. Digital kort over Danmarks jordarter 1:200 000. Geologisk kort over de overfladenære jordarter i Danmark. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, version 1.0, GEUS rapport nr. 47, 1999.

Kelstrup, N. og B. Hansen. 1986. Arealanvendelse og geologi – nitrat i grundvand. Miljøprojekt nr. 73. Miljøstyrelsen.

Skriver, K. og J. Hedegård. 1973. Undersøgelser over danske jorders dræningstilstand. Planteavlsarbejdet i Landbo- og Husmandsforeningerne, 2055-59.

11. Geologi, geokemi, mineralogi og sorption af pesticider i unge lerholdige sedimenter

Vibeke Ernstsén (GEUS) og Per Rosenberg (GEUS)

11.1 Indledning

Undersøgelsen omfatter to lokaliteter på Sjælland, ved Gjorslev og Højstrup, og to lokaliteter i Jylland, ved henholdsvis Mammen og Grundfør. De sjællandske lokaliteter blev valgt som repræsentative for områder med unge, kalkholdige, morænelersaflejringer over kalkholdige grundvandsmagasiner og de jyske lokaliteter blev valgt som repræsentative for områder med forholdsvis tynde morænelersaflejringer. Det var således forventeligt at de fire borer parvis ville repræsentere betydelige forskelle i en lang række egenskaber, herunder de kemiske og mineralogiske egenskaber, som ligeledes antages at have betydning for udbredelsen af pesticider og dermed deres udvaskelighed til underliggende grundvandsmagasiner.

11.2 Metode

På alle fire lokaliteter er der gennemført snegleboringer med indsamling af prøvemateriale til geologisk beskrivelse og til brug for fysiske, kemiske og mineralogiske analyser. Ved Højstrup gennemførtes en række supplerende borer til brug for en mere uddybende beskrivelse af de geologiske - og redoxmæssige forhold på en moræneflade.

Efter hjemkomsten til laboratoriet blev sedimentprøver behandlet i henhold til de planlagte analyser og således blev noget materiale lufttørret mens andet blev opbevaret i køleskab indtil brug.

En række analyser er gennemført i henhold til de metoder der findes beskrevet i KUPA rapport nr. 2 (Barlebo, 2002). Anvendte metode der ikke findes i rapporten beskrives kort i det følgende. Indholdet af fosfor i jordprøverne er ekstraheret med 0,2 N svovlsyre (H_2SO_4) hvorefter indholdet er bestemt fotometrisk (Plantedirektoratet, 1994). Kationombytningskapaciteten (CEC) er bestemt som beskrevet af Sumner og Miller (1996) idet der dog er titreret med 0,01 M HCl i stedet for en 0,01 M kaliumdiiodat-opløsning ($\text{KH}(\text{IO}_3)_2$). Ombytteligt ferrojern bestemt på naturfugtige prøver efter ekstraktion med en 3 % aluminiumchloridopløsning (Lind og Pedersen, 1976), Fe(II) er bestemt på naturfugtige prøver og Fe-total er bestemt på lufttør prøve, begge ved en fotokemisk metode under brug af 1,10 phenantrolin (Komadel og Stucki, 1988), det totale kvælstof indhold er bestemt på en LECO CHN 2000, indholdet af kalk (CaCO_3) er beregnet ved forskellen mellem det totale indhold af kulstof og indholdet af organisk kulstof og porestørrelsesfordelingen er efter måling med brug af N_2 på et Coulter™ Sa3100™ beregnet efter BJH metoden (Gregg og Sing, 1982). Til bestemmelse af lermineralsammensætningen i lerfraktionen ($< 2 \mu\text{m}$) blev fraktionen $< 30 \mu\text{m}$ ved gravitation separeret fra resten af prøven, efter at prøven forudgående var blevet behandlet

med ammonium acetat, pH 5, til fjernelse af kalk. Fraktionen $< 2 \mu\text{m}$ blev efter adskillelse fra fraktionen $< 30 \mu\text{m}$ ved brug af partikelcentrifuge, mættet med natrium og efterfølgende vasket fri for salte ved brug af ethanol og lufttørret.

Fra den lufttørre prøve blev der fremstillet 4 præparater, med følgende egenskaber 1) magnesiummættet og lufttør, 2) magnesiummættet under tilsætning af glycerol, 3) kalium mættet og lufttør og 4) kaliummættet og opvarmet til 300°C .

11.3 Resultater fra Gjorslev lokaliteten

11.3.1 Geologi og redoxforhold

I det vestlige hjørne af forsøgsparcellen ved Porsehuset, tilhørende Gjorslevs Gods, gennemførtes en snegleboring ned til 10 meter under terræn. Boringen (DGU arkivnr. 218.1876) består af sandet og svagt gruset moræneler ned til 9 meter under terræn hvorefter blødt, slammeth bryozokalk af Danien alder fortsætter ned til bunden af boringen, figur 11.1. I følge den geologiske beskrivelse fremstår de øverste 3.5 meter er ved gulbrune og olivenbrune farver, hvorefter følger mørk gråbrun farve ned til 4.5 meter under terræn hvorefter resten af morænelers-laget beskrives som værende med mørkegrå farve. Den efterfølgende bryozokalk er ligeledes reduceret men fremstår grundet det høje indhold af kalk med en hvidgrå farve. I henhold til notater gjort i forbindelse med feltarbejdet er det imidlertid muligt at stedfæste redoxgrænsen mere præcist til 4.0 meter under terræn, idet der ved redoxgrænsen, på overgangen mellem det iltede og reducerede moræneler, forekom stærkt rødfarvede flader. I henhold til den geologiske beskrivelse er den øverste meter kalkfri, hvorefter resten af boringen fremstår stærkt kalkholdige.

11.3.2 Fysiske egenskaber

Kornstørrelsessammensætningen viser at indholdet af ler + silt varierer mellem 48 og 58 % indenfor de øverste 4 meter, hvorefter indholdet stiger svagt til mellem 62 og 65 % i de næste 3 meter, hvor indholdet falder til 52-53 %, figur 11.3. Indholdet af fint sand er omkring 25 % i den iltede, kalkfrie zone, hvorefter det aftager til omkring 21 % i resten af profilen. Mængden af mellem- og groft sand er 41-42 % i den iltede, kalkfrie zone, hvorefter det aftager og udgør omkring 35 % i den iltede og kalkholdige zone, hvorefter indeholdet i den reducerede zone varierer mellem 29 og 35 %. CEC-værdien opmår maksimale værdier (14 cmol kg^{-1}) i den iltede og kalkfrie zone, hvorefter værdien aftager gradvist ned gennem profilen til omkring 4 cmol kg^{-1} i den nedre del af den reducerede zone, hvor indholdet af kalk stiger, figur 11.4.

Det specifikke overfladeareal, der påvirkes af prøvens kornstørrelsessammensætning og mineralogiske egenskaber, er $2.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ i pløjelaget hvor det forholdsvis høje indhold af organisk stof bevirker en sammenkitning af partiklerne, men stiger i de dybere dele af profilen ned til 7 meter til $11\text{-}13 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ned til 7 meter, hvor overfladearealet aftager til kun $2.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ i bryozokalken.

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 218.1894

Borested : Gjorslevvej, Gjorslev Gods, Holtug
4660 Store-Heddinge
KUPA projekt. Ingen borerapport

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

Boringsdato : 14/10 2002

Boringsdybde : 10 meter

Terrænkote : 27 meter o. DNN

Brøndborer : H. Brøker I/S, Holbæk
MOB-nr :
BB-journr :
BB-bornr :

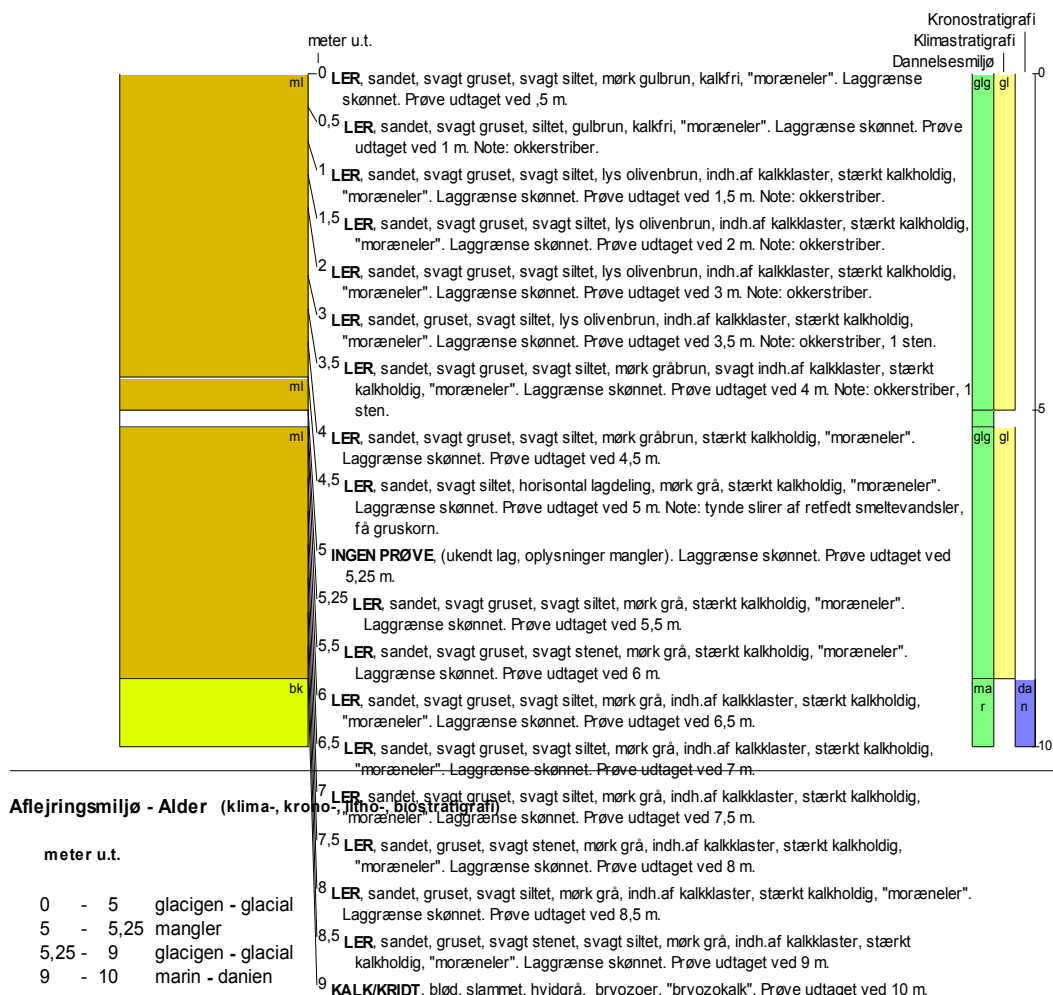
Prøver
- modtaget : 14/10 2002 **antal** : 19
- beskrevet : 6/3 2003 **af** : TC
- antal gemt : 0

Formål : Undersøg./videnskab
Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor
Boremethode :

Kortblad : 1512 INØ
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 715323, 6139050

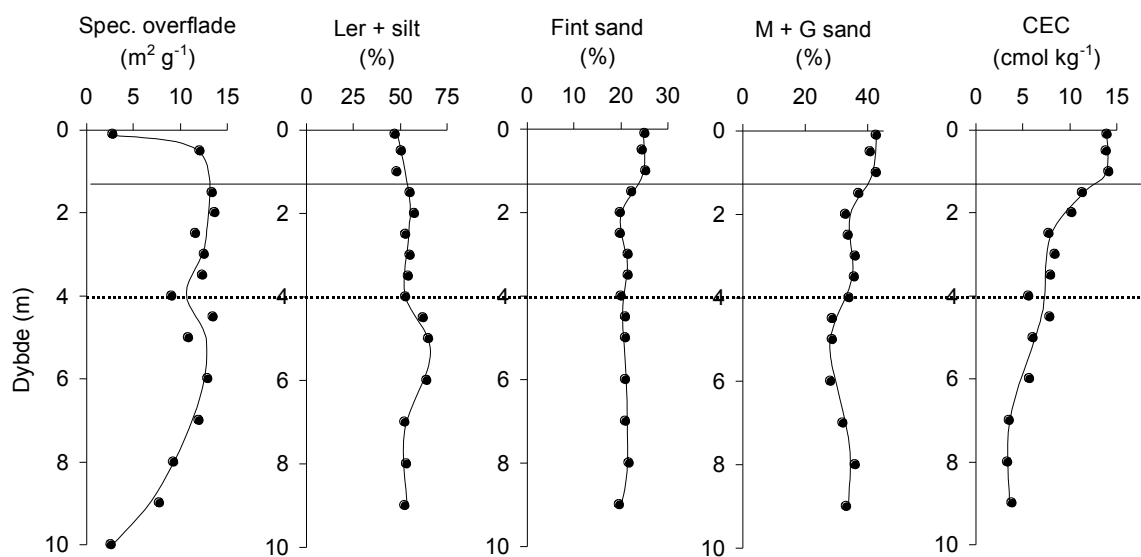
Datum : ED50
Koordinatkilde : GEUS
Koordinatmethode : KMS digitale kort

Notater : Bill Harrar var projektleder

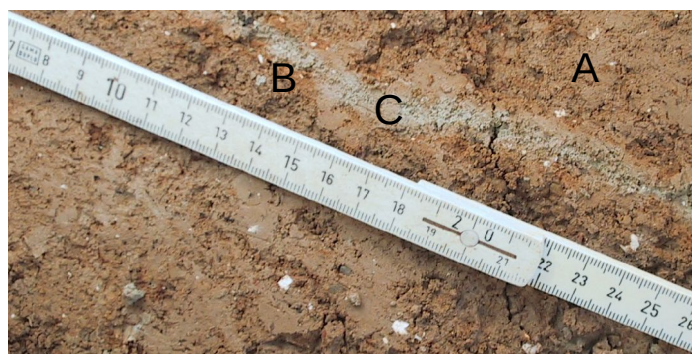


Figur 11.1. Geologiske forhold ved Gjorslev (DGU arkivnr. 218.1894).

Supplerende målinger af mikroformer i den brunfarvede matrix er ligeledes gennemført. Resultaterne gav et specifikt overfladeareal på $6.2 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ for materiale fra overfladen af en bioporer (ormegang) i 50-80 cm dybde. Målinger af materiale fra en gråfarvet makropore samt det omgivende areal, figur 11.3, viste et specifikt overfladeareal på $11 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ for den grå zone, $17\text{-}21 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ for den tilstødende jern-berigede smalle zone og $12 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ for den tilstødende matrix. Det specifikke overfladeareal af en kraftigt rødfarvet sprækkeoverflade og den smalle overgangs zone til den reducerede ler ved redoxgrænsen var henholdsvis 22 og $24 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$.



Figur 11.2. Specifikt overfladeareal, ler+silt, fint sand, mellem (M) + groft (G) sand og CEC ved Gjorslev.



Figur 11.3. Iltet moræneler (A) med gråfarvet sprække (C) og jernberiget rand (B) i 2.1 meters dybde ved Gjorslev.

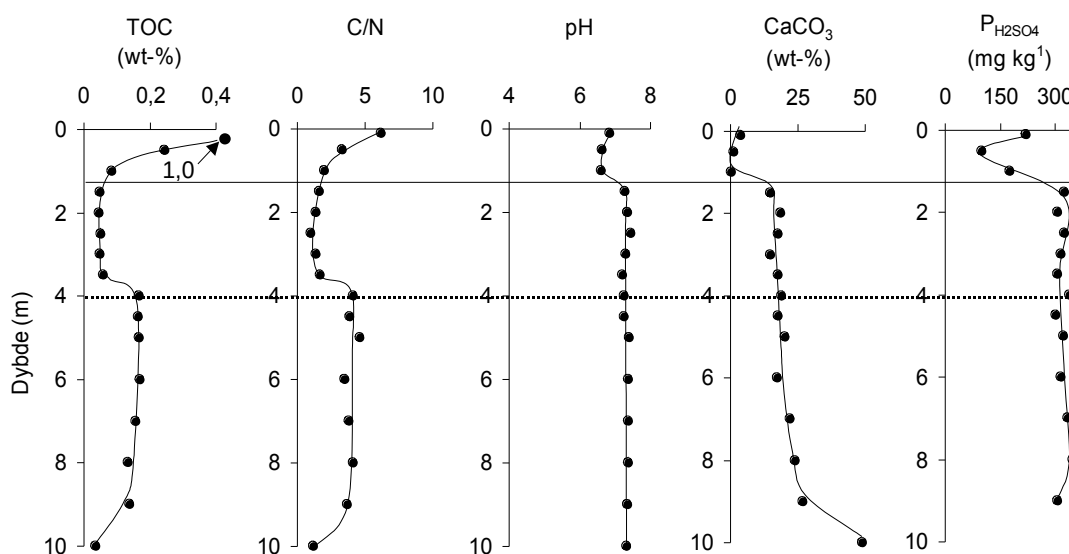
11.3.3 Kemiske egenskaber

Som allerede nævnt fremstår sedimenterne kalkfrie ned til 1 meters dybde, hvorefter indholdet af kalk stiger markant til 15 %, beregnet som CaCO_3 , figur 11.4. Indholdet er svagt stigende ned gennem den iltede og den reducerede zone og når op på 27 % i bunden af den reducerede zone, hvorefter indholdet stiger til 49 % i den efterfølgende bryozokalk. Et lille indhold af kalk svarende til 4 % CaCO_3 i pløjelaget skyldes tilførsel af jordbrugskalk.

Forbruget af kalk i den øverste meter betyder at $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -værdierne her er målt til mellem 6.6. og 6.9, hvorefter pH-værdien stiger til mellem 7.3. og 7.4 i de efterfølgende kalkholdige sedimenter, figur 11.4.

Indholdet af fosfor er 220 mg P kg^{-1} i pløjelaget, hvorefter det aftager til 100-175 mg P kg^{-1} i den iltede og kalkfrie zone, hvorefter indholdet stiger til mellem 304 og 367 mg P kg^{-1} .

Iltningen af de oprindeligt reducerede sedimenter har bl.a. betydet ændringer i fordelingen af forskellige jernpuljer, figur 11.5. Således er indholdet af ombytteligt ferrojern lavt i den iltede zone ($< 10 \text{ mg Fe kg}^{-1}$), hvorefter indholdet ses tiltage ned gennem zonen og når i den nedre del til et niveau svarende til det for den reducerede zone (33-40 mg Fe kg^{-1}). I den efterfølgende bryozokalk aftager indholdet af ombytteligt ferrojern markant til 13 mg Fe kg^{-1} .



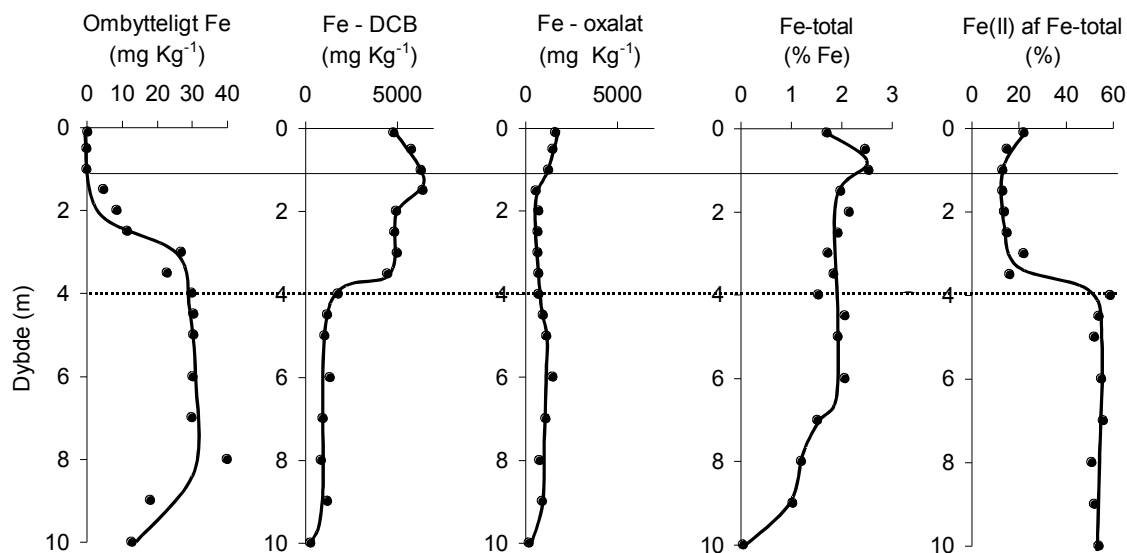
Figur 11.4. TOC, C/N, pH (målt i CaCl_2) og kalk (beregnet som CaCO_3) og fosfor (ekstraheret med svovlsyre) ved Gjorslev.

Iltningen af sedimentet har betydet en markant stigning i det samlede indhold af frie jernoxider, her udtrykt ved Fe_{DCB} , figur 11.5. I den iltede zone stiger indholdet fra 4800 mg Fe kg^{-1} i pløjelaget til 6400 mg Fe kg^{-1} i 1.5 meter hvorefter det ligger på omkring 5000 mg Fe kg^{-1} i resten af den iltede zone. Indholdet aftager markant ved overgangen til den reducerede zone, der typisk indeholder omkring 1000 mg Fe kg^{-1} i moræneleren og 300 mg Fe kg^{-1} i bryozokalken. Mængden af $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$ er svagt forøget i den iltede kalkfrie zone, hvor indholdet er målt til 1300-1600 mg Fe kg^{-1} , hvorefter indholdet varierer omkring 1000 mg Fe kg^{-1} i resten af

profilen, med undtagelse af bryozokalken hvor indholdet er 180 Fe kg^{-1} . I sedimenter med kun ringe indhold af organisk stof antages Fe_{DCB} primært at inkludere krystallinske og amorf jernoxider, mens $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$ normalt omfatter mængden af amorf jernoxider. Med den viste fordeling af de her to nævnte jernformer synes iltningen primært at afstedkomme en stigning i mængden af krystallinske jernoxider. Supplerende målinger af Fe_{DCB} for sprækker som vist i figur ? gav et indhold på $3900 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ for matrix, $9100 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ for den rødfarvede sprækkerand og $980 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ for den gråfarvede sprække. For de tilsvarende miljøer var indholdet af $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$ henholdsvis $580 \text{ mg Fe kg}^{-1}$, $1300 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ og $200 \text{ mg Fe kg}^{-1}$.

Det totale indhold af jern (Fe-total) forekommer ikke nævneværdigt påvirket af iltningen, hvorfor den forøgede mængde Fe_{DCB} må være frigivet fra andre jernpuljer i sedimenterne. Fe-total er under 2 % Fe i den øverste meter, hvorefter indeholdet stiger til over 2.5 % i den næste 1.5 meter for dernæst at aftage til omkring 1.8 % i laget ned til 7 meter, hvor indholdet aftager yderligere til 1-1.2 % i resten af moræneleren og til 0.1 % Fe i bryozokalken. Det aftagende indhold af Fe-total med tiltagende dybde knytter sig til de mineralogiske ændringer i den del af den reducerede zone, med stadig færre ler- og silt-partikler samt stigende kalkindhold.

Iltningen af sedimenterne har foruden tilvæksten i frie jernoxider resulteret i et betydet fald i andelen af ferrojern (Fe(II)), figur 11.5. Således udgør Fe(II) 22 % i pløjelaget, 12-15 % i resten af den iltede zone og under redoxgrænsen typisk 52-55 %.



Figur 11.5. Ombytteligt ferrojern (Fe), jernoxider (Fe_{DCB} og $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$), total indhold af jern (Fe-total) og andele af ferrojern (Fe(II) af Fe-total) ved Gjorslev.

11.3.4 Mineralogiske egenskaber

Pløjelaget har et indhold af organisk stof svarende til 1 % C, figur 11.4. Herefter aftager indholdet markant til 0,09 % C indenfor den øverste meter (rodzonen) og forbliver herefter stort set uændret på ca. 0,05 % C ned til redoxgrænsen, hvor indholdet stiger til omkring 0,17 % C, for atter at aftage til 0,04 % C i bryozokalken. På baggrund af samtidige målinger af det totale indhold af kvælstof er C/N forholdet beregnet til 6 i pløjelaget, hvorefter det aftager til 2 i 1 meters dybde, hvorefter den forbliver konstant ned til redoxgrænsen hvor C/N forholdet stiger til mellem 4 og 5. Dette niveau holder sig ned gennem den reducerede moræneler. C/N forholdet aftager til 1 i den underliggende bryozokalk.

Sedimenterne på Gjorslev lokaliteten består således overvejende af mineralske partikler, der varierer i sammensætning med dybden. Den geologiske beskrivelse og resultaterne af de forskellige analyser viser at profilet umiddelbart lader sig inddele i 3 geokemiske zoner bestemt ved fordelingen af kalk, jernoxider og reducerende stoffer. Den øverste zone er kalkfri og iltet og findes udbredt ned til en meter under terræn, hvorefter følger en kalkholdig og iltet zone ned til fire meter under terræn som ved sin nedre begrænsning markerer redoxgrænsen og dermed overgangen til den tredje zone med kalkholdige og reducerede sedimenter.

Supplerende undersøgelser af den mineralogiske sammensætning af prøver udtaget i henholdsvis 1 meter, 3 meter og 7 meter viser her en dominans af kvarts. Dertil kommer varierende mængder af bl.a. feltspat, glimmer og biotit samt lermineraller og som allerede nævnt desuden jernoxider og kalk. Sammensætningen af lermineraller er i 1 meters dybde domineret af smectit samt et betydeligt indhold af veksellagsmineralet illit-smectit og mindre mængder vermikulit, illit og kaolinit. I 3 og 7 meter aftager mængden af smectit til omkring det halve af det i 1 meters dybde, og findes nu i nogenlunde tilsvarende mængder som for illit-smectit eller illit. Desuden findes mindre mængder vermikulit og kaolinit og for den reducerede zone også små mængder af chlorit.

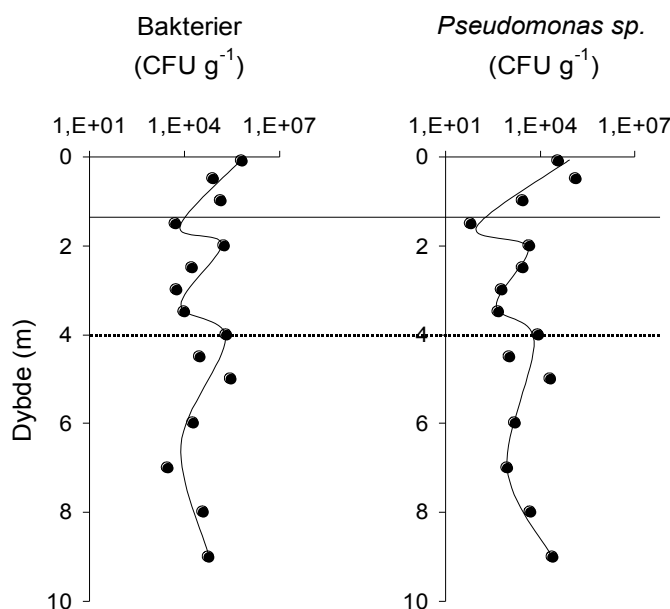
11.3.5 Mikrobiologiske undersøgelser

Indhold og fordeling af såvel total dyrkbare bakterier og antallet af *Pseudomonas* sp. fremgår af figur 11.6. Antallet af dyrkbare bakterier er størst i pløjelaget med $6 \cdot 10^5$ CFU g⁻¹, hvorefter antallet aftager og varierer uregelmæssigt med dybden, omkring $2 \cdot 10^4$ CFU g⁻¹. Det største antal *Pseudomonas* sp. er målt i pløjelaget ($4 \cdot 10^4$ CFU g⁻¹), hvorefter et aftagende og varierende antal er typisk for resten af profilet (omkring 10^3 CFU g⁻¹). Den fundne variationen med dybden for såvel det totale antal dyrkbare bakterier og antallet af *Pseudomonas* sp. udviser en høj grad af overensstemmelse.

11.3.6 Sorption af pesticider

Sorptionen af de tre pesticider, MCPA, metribuzin og glyphosat samt omdannelsesproduktet methyltriazinamin (fra tribenuronmethyl) er vist ved tilhørende K_d -værdier i figur 11.7. Sorptionen af MCPA er forholdsvis høj (K_d : 0,8) i pløjelaget hvorefter den aftager ned gennem rodzonen til 0,1, hvorefter den holder sig konstant gennem resten af den iltede zo-

ne. I en snæver zone umiddelbart under redoxgrænsen stiger sorptionen markant (k_d : 0.6), hvorefter sorptionen atter aftager i den reducerede moræneler, om end til et højere niveau end målt for den iltede moræneler (k_d : 0.4). I bryozokalken er sorptionen af MCPA bestemt ved en k_d -værdi på 0.2.



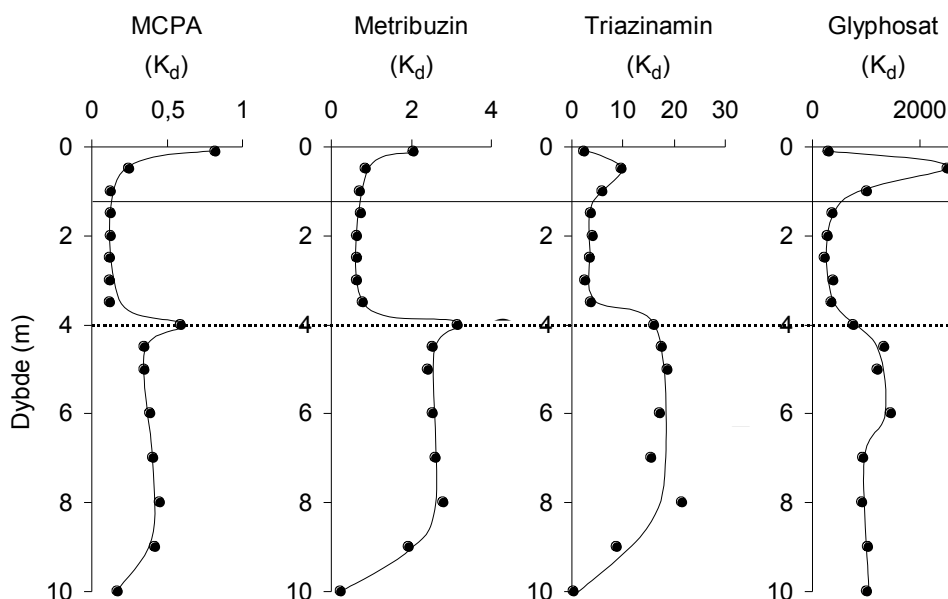
Figur 11.6. Totale antal dyrkbare bakterier og antal *Pseudomonas sp.* ved Gjorslev.

Sorptionen af metribuzin minder i forløbet meget om det der netop er beskrevet for MCPA, idet dog niveauet for sorption er højere, figur 11.7. Således blev sorptionen af metribuzin målt til en K_d på 2,1 i pløjelaget, hvorefter sorptionen aftog til en k_d -værdi på omkring 0.7 i resten af den iltede zone. K_d -værdien stiger til 3.2 umiddelbart under redoxgrænsen, for atter at aftage til omkring 2.5 i den resterende del af den reducerede zone. I bryozokalken er k_d -værdien 0.2.

I modsætning til MCPA og metribuzin er sorptionen af methyltriazinamin lavere i pløjelaget end i resten af den iltede zone. I pløjelaget er k_d -værdien målt til 2, hvorefter k_d -værdien stiger til 9 i den del af den iltede zone med høje indhold af frie jernoxider, for atter at aftage til omkring 4 i den dybere del af den iltede zone. Under redoxgrænsen stiger sorptionen med en K_d -værdi på omkring 17. I den dybe kalkholdige del af morænelerslaget begynder sorptionen at aftage (K_d : 9) for at blive 0.3 i bryozokalken.

Sorptionen af glyphosat minder i forløbet om den der netop er skitseret for methyltriazinamin, men de målte k_d -værdier dog er markant højere. k_d -værdien for glyphosat er 300 i pløjelaget hvorefter den stiger til 2500 i 0.5 meters dybde, hvorefter den aftager til omkring 300 i den resterende del af den iltede zone, hvorefter den stiger til 1300 i den øvre del af den reducerede zonen, hvor indholdet af kalk varierer mellem 17 og 20 % CaCO_3 . Ved hø-

jere indhold af kalk, som i den resterende del af den reducerede zone og i bryozokalken, er K_d -værdien omkring 1000.



Figur 11.7. K_d -værdier for MCPA, metribuzin, methyltriazinamin og glyphosat ved Gjorslev.

11.4 Resultater fra Højstrup lokaliteten

11.4.1 Geologi og redoxforhold

Ved Højstrup er geologien og redoxudviklingen beskrevet i fem borerer placeret langs en øst-vest orienteret profilinie med en samlet længde på 700 meter, figur 11.8. Linien udgør en del af linien nummereret -4, langs hvilken der også blev foretaget geofysisk kortlægning (se bilag 4). Den vestligste af borererne, HSI, (DGU arkivnr. 218.1876) er ni meter dyb, figur 11.9. Beskrivelsen af sedimentprøver fra boringen viser siltet, sandet og svagt gruset moræneler ned til 8 meter under terræn, efterfulgt af 0.5 meter blød, slammet bryozokalk og yderligere 0.5 meter med lokal moræneler med klumper af kalk. Profilet viser iltede, brunlige farver ned til 3.5 meters dybde hvorefter resten af profilet er reduceret, med grålige farvenuancer. Det oprindelige kalkindhold forbrugt i den øverste meter og herunder fremstår sedimenterne kalkholdige. Koten for stedet er bestemt til 11.6 meter.

Boringen HSII (DGU arkivnr. 218.1890), der er placeret 300 øst for boring HSI, er 4 meter dyb, figur 11.10. Under muldlaget, følger ret fed moræneler med til 1 meter under terræn, hvorefter sandet, siltet og svagt gruset moræneler bliver almindelig ned til 3.5 meter under terræn, hvor smeltevandsler udgør den sidste 0.5 meter af boringen. Skiftet fra iltede, brunlige farvenuancer til reducerede grå farve falder her sammen med skiftet fra moræneler til smeltvandsler. Den øverste meter fremstår kalkfri, hvorefter følger kalkholdige sedimenter. Koten for stedet er bestemt til 11.5 meter.



Figur 11.8. Serie af borerer ved Højstrup. Bemærk venligst at boring DGU arkivnr. 218.1879 er den filtersatte boring svarende til boring DGU arkivnr. 218.1876, hvorfra prøverne til den geologiske beskrivelse er udtaget.

Boring HSIII (DGU arkivnr. 218.1891) er placeret 500 meter øst for boring SHI. Boringen, der er gennemført til 3 meter under terræn, viser øverst et muldlag efterfulgt af sandet, svagt siltet moræneler. Kalkfrie sedimenter forekommer ned til 1 meter under terræn og redoxgrænsen findes i 2.5 meters dybde. Koten for stedet er bestemt til 10.3 meter, figur 11.11.

Boring HSIV (DGU arkivnr. 218.1892) findes 575 meter øst for HSI. Boringen blev udført til 8.2 meters dybde, figur 11.12. Under muldlaget findes sandet, svagt siltet, moræneler ned til 4 meter, herefter følger et indslag af blød, slammet bryozokalk ned til 6.4 meter hvor sandet, siltet moræneler atter bliver almindeligt ned til 8,1 meter, kun afbrudt af et 0.2 meter tykt lag af bryozokalk. Morænelerslaget ned til 4 meter er beskrevet ved iltede, brunlige farvenuancer, hvorefter reducerede grå farvenuancer bliver herskende. Notater foretaget under feltarbejdet viser dog at redoxgrænsen er beskrevet i 3 meter under terræn. Muldlaget er beskrevet som værende kalkfrit mens resten af profilet er beskrevet som kalkholdigt. Koten for stedet er bestemt til 10.3 meter.

Den femte boring, HSV (DGU arkivnr. 218.1893), er lokaliseret 700 meter øst for HSI, figur 11.13. Boringen der er 4 meter dyb viser under muldlaget sandet, svagt siltet moræneler. Redoxgrænsen er beliggende i 2 meters dybde, dog viser feltobservationer at redoxgrænsen nærmere er beliggende i 2.6 meter under terræn. Kalkholdige sedimenter findes fra 0.25 cm dybde. Koten for stedet er bestemt til 10.9 meter.

DGU arkivnr : 218. 1876

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

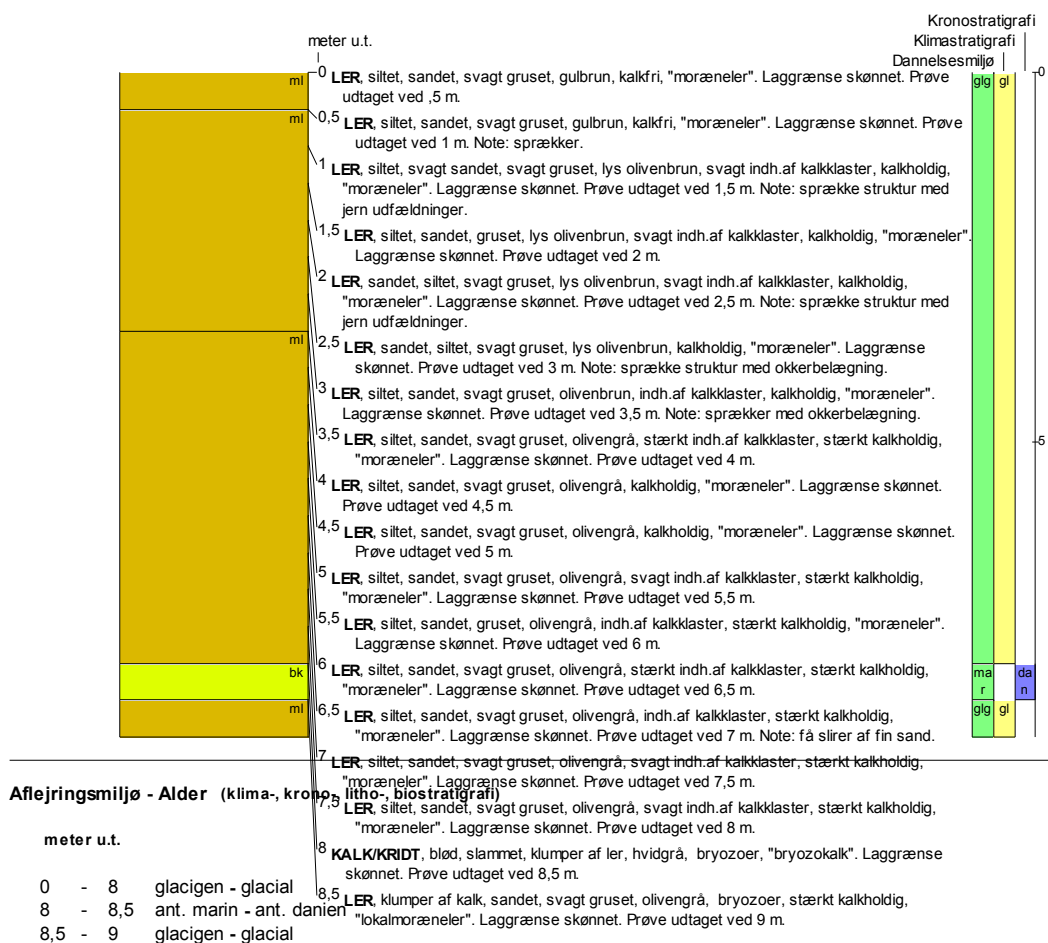
Terrænkote : 11,58 meter o. DNN

Prøver
- modtaget : 27/11 2002 **antal** : 18
- beskrevet : 7/3 2003 **af** : TC/G
- antal gemt : 0

Datum : ED50

Koordinatkilde : Brøndborer
Koordinatmetode : KMS digitale kort

Notater : G= Ditte L Petersen, specialestuderende i geologi, KU



Figur 11.9. Geologiske forhold ved Højstrup I (DGU arkivnr. 218.1876).

BORERAPPORT
DGU arkivnr : 218. 1890

Borested : Vissemosevej 20, Gevnø
4673 Rødvig Stevns
KUPA projekt. Ingen borerapport, Højstrup II

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

Boringsdato : 15/10 2002

Boringsdybde : 4 meter

Terrænkote : 11,52 meter o. DNN

Brøndborer : H. Brøker I/S , Holbæk
MOB-nr :
BB-journr :
BB-bornr : 2

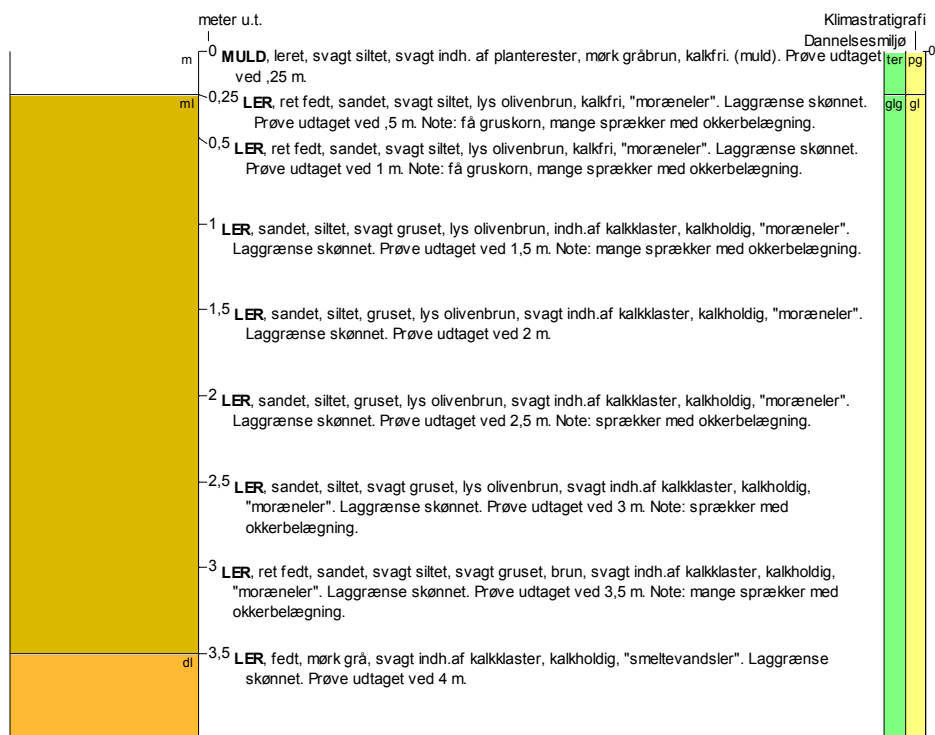
Prøver
- modtaget : 15/10 2002 **antal** : 9
- beskrevet : 6/3 2003 **af** : TC
- antal gemt : 0

Formål : Undersøg./videnskab
Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor
Boremetode :

Kortblad : 1512 ISV
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 711493, 6128670

Datum : ED50
Koordinatkilde : GEUS
Koordinatmetode : GPS

Notater : Bill Harrar var projektleder


Aflejringsmiljø - Alder (klima-, krono-, litho-, biostratigrafi)

meter u.t.

0 - 0,25 terrigen - postglacial
0,25 - 4 glacigen - glacial

Figur 11.10. Geologiske forhold ved Højstrup, HSII (DGU arkivnr. 218.1890).

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 218. 1891

Borested : Vissemosevej 20, Gevnø
4673 Rødvig Stevns
KUPA projekt. Ingen borerapport, Højstrup III

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

Boringsdato : 15/10 2002

Boringsdybde : 3 meter

Terrænkote : 10,3 meter o. DNN

Brøndborer : H. Brøker I/S , Holbæk
MOB-nr :
BB-journr :
BB-bornr : 3

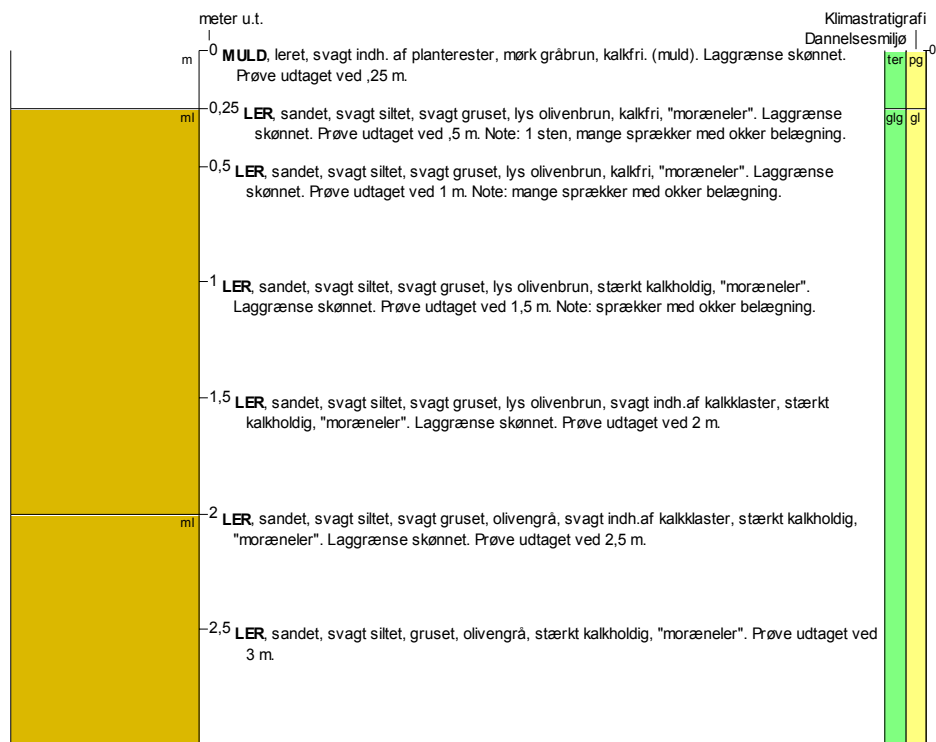
Prøver
- modtaget : 16/10 2002 **antal** : 7
- beskrevet : 7/3 2003 **af** : TC
- antal gemt : 0

Formål : Undersøg./videnskab
Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor
Boremetode :

Kortblad : 1512 ISV
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 711691, 6128698

Datum : ED50
Koordinatkilde : GEUS
Koordinatmetode : GPS

Notater : Bill Harrar var projektleder



Aflejringsmiljø - Alder (klima-, krono-, litho-, biostratigrafi)

meter u.t.

0 - 0,25 terrigen - postglacial
0,25 - 3 glacigen - glacial

Figur 11.11. Geologiske forhold ved Højstrup, HSIII (DGU arkivnr. 218.1891).

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 218. 1892

Borested : Vissemosevej 20, Gevnø
4673 Rødvig Stevns
KUPA projekt. Ingen borerapport, Højstrup IV

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

Boringsdato : 15/10 2002

Boringsdybde : 8,2 meter

Terrænkote : 10,27 meter o. DNN

Brøndbore : H. Brøker I/S , Holbæk
MOB-nr :
BB-journr :
BB-bornr : 4

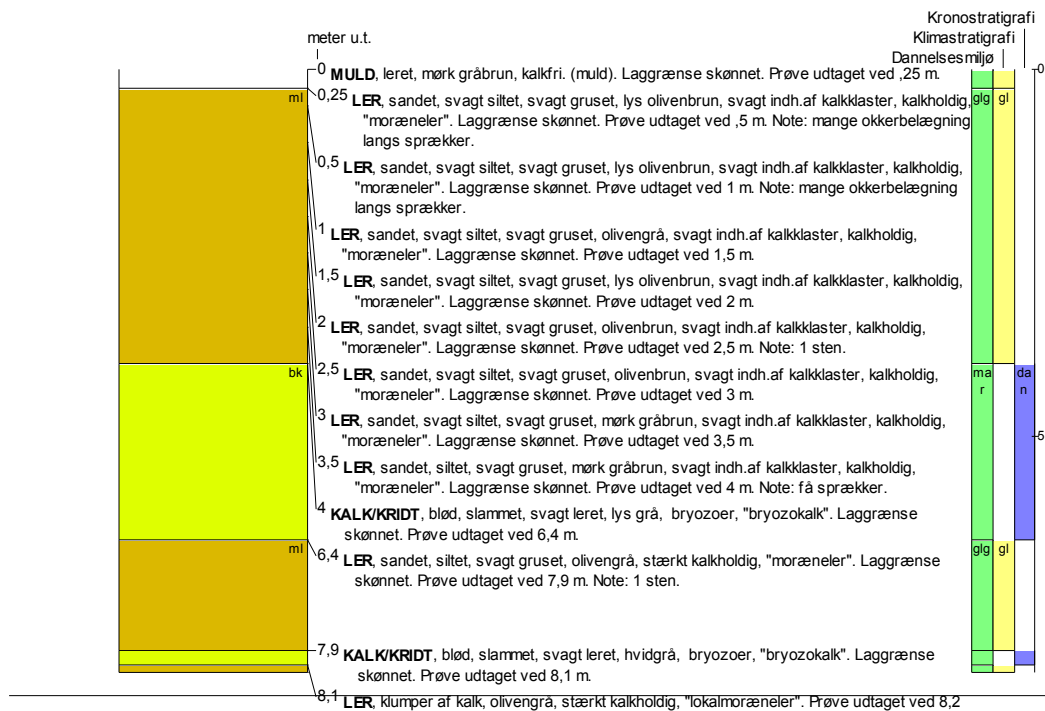
Prøver
- modtaget : 16/10 2002 **antal** : 13
- beskrevet : 11/3 2003 **af** : TC
- antal gemt : 0

Formål : Undersøg./videnskab
Anvendelse : Sløfet/opgivet bor
Boremetode :

Kortblad : 1512 ISV
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 711765, 6128708

Datum : ED50
Koordinatkilde : GEUS
Koordinatmetode : GPS

Notater : Bill Harrar var projektleder



Aflejningsmiljø - Alder (klima-, krono-, litolo-, biostratigrafi)

meter u.t.

0 - 0,25 terrigen - postglacial
0,25 - 4 glacigen - glacial
4 - 6,4 marin - danien
6,4 - 7,9 glacigen - glacial
7,9 - 8,1 marin - danien
8,1 - 8,2 glacigen - glacial

Figur 11.12. Geologiske forhold ved Højstrup, HSIV (DGU arkivnr. 218.1892).

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 218. 1893

Borested : Vissemosevej 20, Gevnø
4673 Rødvig Stevns
KUPA projekt. Ingen borerapport, Højstrup V

Kommune : Stevns
Amt : Storstrøm

Boringsdato : 15/10 2002

Boringsdybde : 4 meter

Terrænkote : 10,9 meter o. DNN

Brøndbore : H. Brøker I/S , Holbæk
MOB-nr :
BB-journr :
BB-bornr : 5

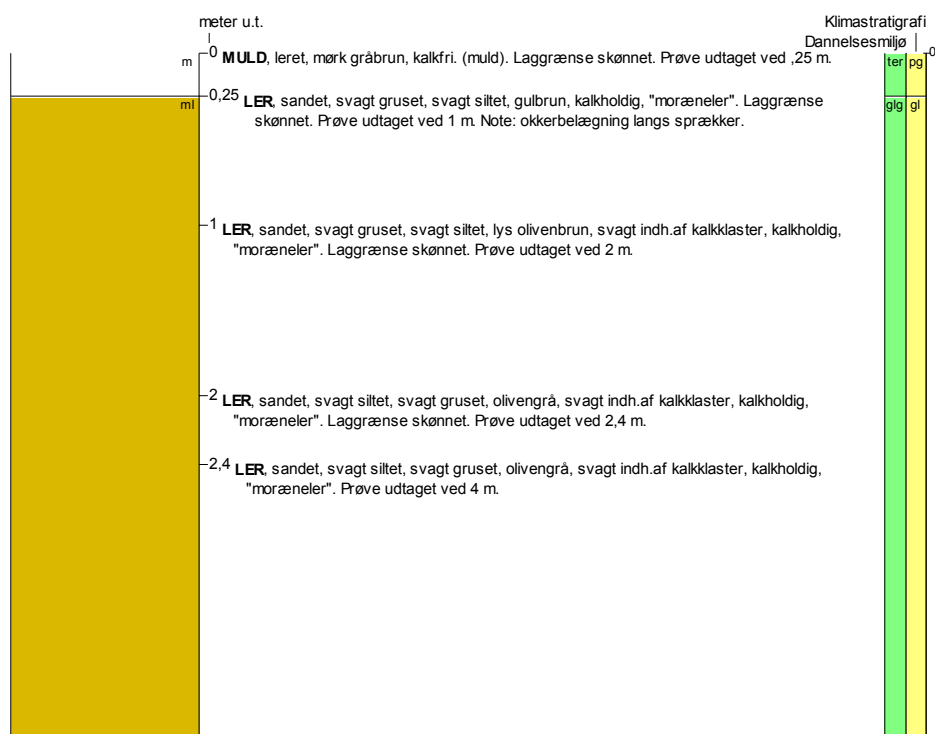
Prøver
- modtaget : 16/10 2002 **antal** : 5
- beskrevet : 11/3 2003 **af** : TC
- antal gemt : 0

Formål : Undersøg./videnskab
Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor
Boremetode :

Kortblad : 1512 ISV
UTM-zone : 32
UTM-koord. : 711889, 6128725

Datum : ED50
Koordinatkilde : GEUS
Koordinatmetode : GPS

Notater : Bill Harrar var projektleder



Aflejringsmiljø - Alder (klima-, krono-, litho-, biostratigrafi)

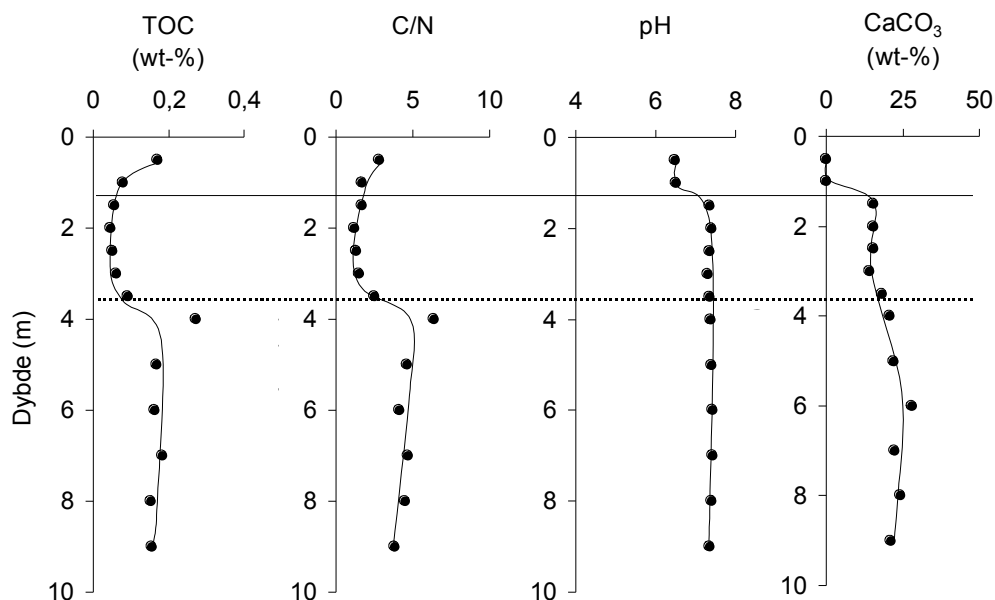
meter u.t.

0 - 0,25 terrigen - postglacial
0,25 - 4 glacigen - glacial

Figur 11.13. Geologiske forhold ved Højstrup, HSV (DGU arkivnr. 218.1893).

11.4.2 Kemiske og mineralogiske undersøgelser

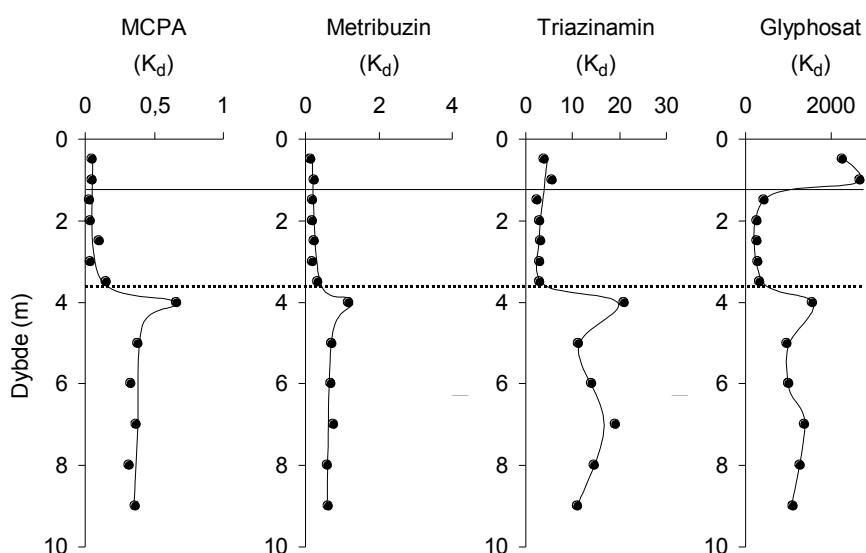
Undersøgelser af udvalgte kemiske og mineralogiske egenskaber samt sorption af pesticider er gennemført på prøver fra HSI. Indholdet af organisk stof under pløjelaget viser aftagende indhold, fra 0.18 % C i 0.5 meters dybde til 0.06 % C i 1.5 meter under terræn, hvorefter indeholdet stort set er konstant (0.05 % C) i resten af den iltede zone hvorefter indholdet stiger til omkring 0.18 % C i den reducerede zone, figur 11.14. C/N forholdet varierer kun lidt inden for den iltede zone (omkring 3), hvorefter det stiger til 6 i toppen af den reducerede zone for atter at aftage svagt med stigende dybde til omkring 5. Under den kalkfrie zone stiger indholdet af kalk til 15-18 % CaCO_3 i den iltede zone og 22-28 % CaCO_3 i den reducerede zone. Samtidig ses de laveste pH-værdier indenfor den øverste meter, med $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ på 6.5 stigende til typisk 7.4 i den kalkholdige del af profilen.



Figur 11.14. TOC, C/N forhold, pH (målt i CaCl_2) og kalk (CaCO_3) ved Højstrup.

11.4.3 Sorption af pesticider

Sorptionen af MCPA er forholdsvis lav i den iltede zone med k_d -værdier på 0.05-0.15, hvorefter k_d -værdien stiger markant i den øvre del af den reducerede zone til 0.7. for atter at aftage til 0.3-0.4 i den resterende del af den reducerede zone, figur 11.15. Sorptionen af metribuzin er ligeledes lav i den oxiderede zone (0.2-0.3), hvorefter der sker en stigning i den øvre del af den reducerede zone til 1.2, hvorefter k_d -værdien aftager til 0.6-0.7 i den resterende del af den reducerede zone. Sorptionsforløbet for methyltriazinamin minder meget om det bekrevet for MCPA og metribuzin, idet dog sorptionen er højere. Således varierer k_d -værdien mellem 3 og 6 i den iltede zone og stiger til 21 i den øverste del af den reducerede zone, hvorefter k_d -værdien aftager til mellem 11 og 19 i resten af den reducerede zone. Sorptionen af glyphosat er markant højere end for de andre tre undersøgte pesticider. Således er den største sorption målt i den øvre del af den iltede zone, med k_d -værdier på 2300-2600, hvorefter sorptionen aftager markant i den resterende del af den iltede zone til mellem 300 og 400 for atter at stige til 1600 i den øverste del af den reducerede zone, hvorefter k_d -værdien forbliver mellem 1000 og 1400 i resten af den reducerede zone.



Figur 11.15. k_d -værdier for MCPA, metribuzin, methyltriazinamin og glyphosat ved Højstrup.

11.5 Resultater fra Mammen lokaliteten

Geologien på lokaliteten er beskrevet til 12 metres dybde mens kun det øvre moræneler-slag er undersøgt ved forskellige analyser.

11.5.1 Geologi og redoxforhold

Geologien er beskrevet i en 12 meter dyb boring, der blev udført i umiddelbart tilknytning til udgravningens sydlige hjørne. På dette sted er geologien beskrevet ved sandet og svagt siltet moræneler ned til 4 meters dybde hvorefter følger vekslende lag af fin, mellem og

groft sand. Hele profilen fremstår gennemiltet med brunlige farvenuancer og desuden er hele profilen beskrevet som kalkfrie, figur 11.16.

11.5.2 Fysiske egenskaber

I morænelerslaget variere indholdet af ler + silt mellem 35 og 42 % i de øverste 2.9 meter, hvorefter indholdet aftager til 24-27 % i den nederste del af laget, figur 11.17. Indholdet af fint sand er nogenlunde konstant (ca. 25 %) i hele lerlaget, mens indholdet af mellem - og groft sand stiger fra 46 % i pløjelaget til 60 % i bunden af lerlaget. CEC-værdien aftager fra 10 cmol kg⁻¹ i pløjelaget til 5 cmol kg⁻¹ for den dybeste prøve udtaget i 4.1 meter.

Indholdet af grus falder jævnt fra 14 % i pløjelaget til 2 % i 2.7 meter, hvorefter indholdet variere uregelmæssigt mellem 3 og 10 % i resten af laget. Det specifikke overfladeareal er forholdsvis lavt (2 m² g⁻¹) i pløjelaget, hvorefter det stiger til maksimale værdier i 1.0 meter og 1.8 meters dybde (16 m² g⁻¹), hvor de resterende målinger indenfor de øverste 2.9 meter viser typiske værdier på omkring 10-12 m² g⁻¹. I den nederste meter, med lavere indhold af ler+silt og højere sandindhold, aftager det specifikke overfladeareal til under 10 m² g⁻¹.

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 67.1079

Borested : Storhedevejen, Mammen
8850 Bjerringbro

Kommune : Bjerringbro
Amt : Viborg

Boringsdato : 5/11 2002

Boringsdybde : 12 meter

Terrænkote : 50,48 meter o. DNN

Brøndbore : Carl Bro A/S

MOB-nr :

BB-journr :

BB-bornr :

Prøver

- **modtaget** : 6/11 2002 **antal** : 21

- **beskrevet** : 11/3 2003 **af** : TC

- **antal gemt** : 0

Formål : Undersøg./videnskab

Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor

Boremetode :

Kortblad : 1215 IINV

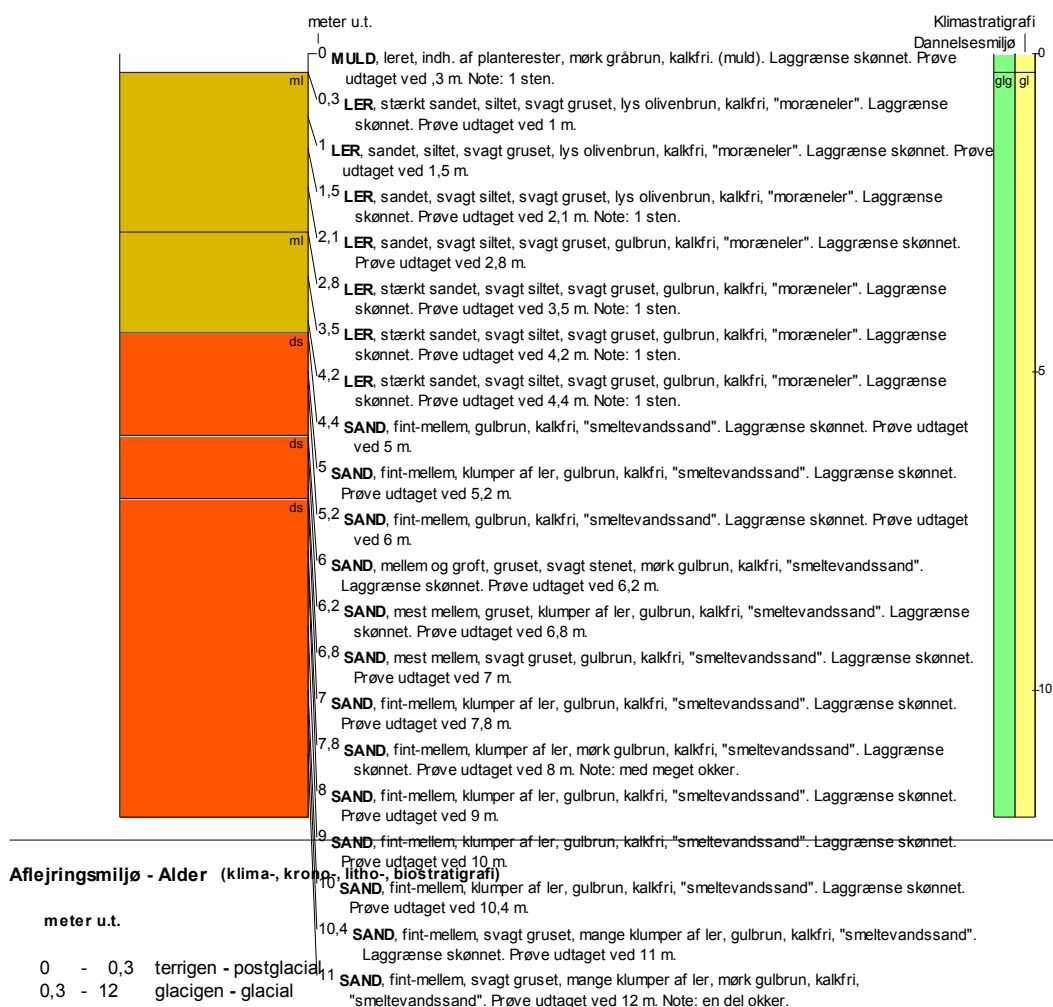
UTM-zone : 32

UTM-koord. : 539222, 6250869

Datum : ED50

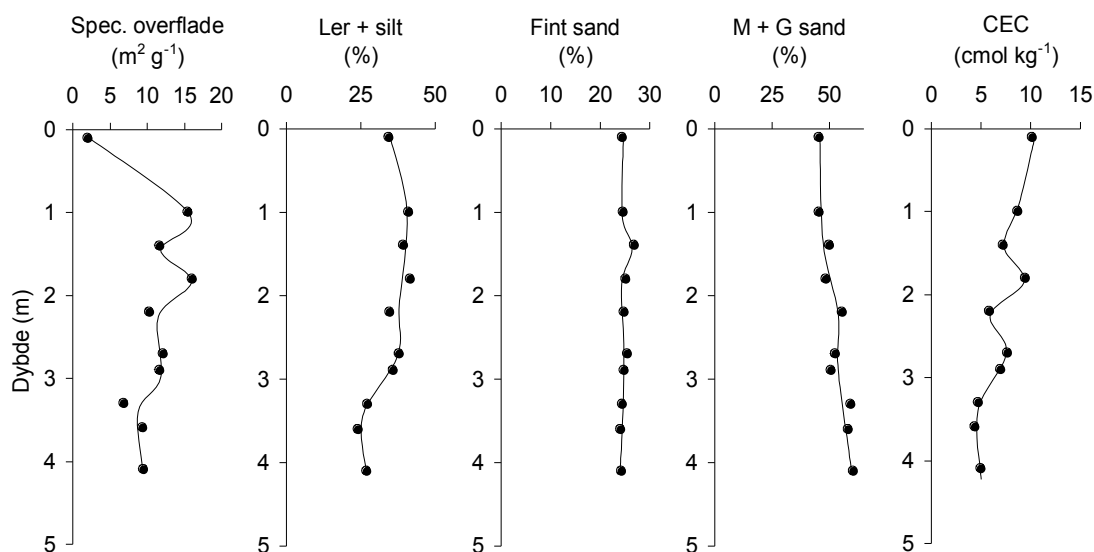
Koordinatkilde : GEUS

Koordinatmetode : KMS digitale kort



Figur 11.16. Geologiske forhold ved Mammen (DGU arkivnr. 67.1079).

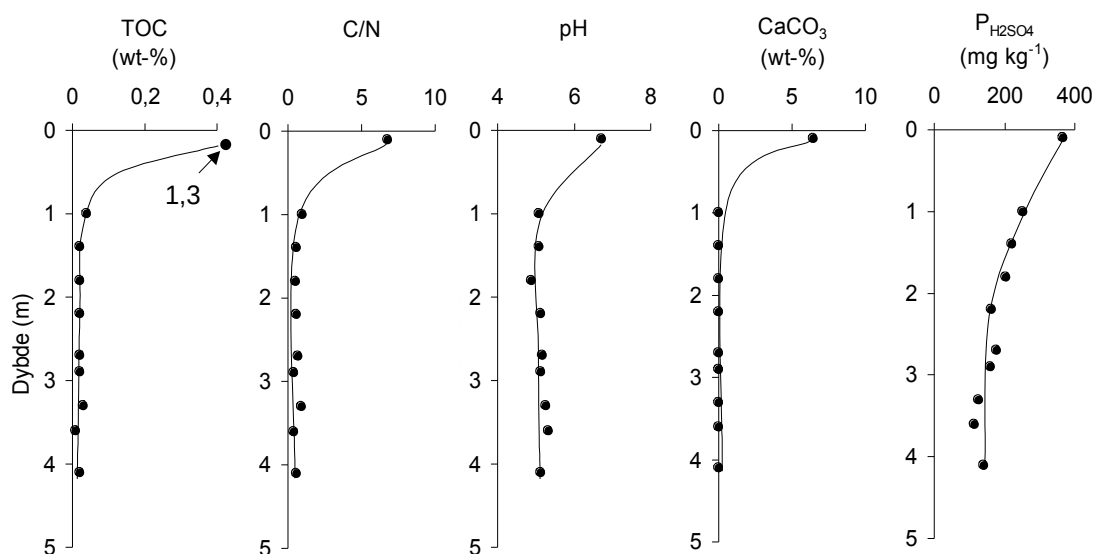
Supplerende undersøgelser af to delprøver der blev identificeret ved med forskellige farver i prøven fra 1.8 meters dybde udviste betydelige forskelle i det specifikke overfladeareal. Således havde det lyse parti et specifikt overfladeareal på $36 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, hvor det omkringliggende mørkefarvede materiale havde et overfladeareal på $17 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. En nærmere undersøgelse af det lysfarvede parti, der foruden farven forekom forholdsvis let, viste en stor andel af kiselholdige diatomeer, der tilsyneladende findes spredt i moræneleren. Det stammer antagelig fra nærliggende lokale forekomster. Undersøgelser af porestørrelsesfordelingen viste desuden at næsten 90 % af porevolumenet i det lysfarvede parti var større end $20 \mu\text{m}$ mens det for det mørke omkringliggende materiale kun var omkring 50 % af volumenet.



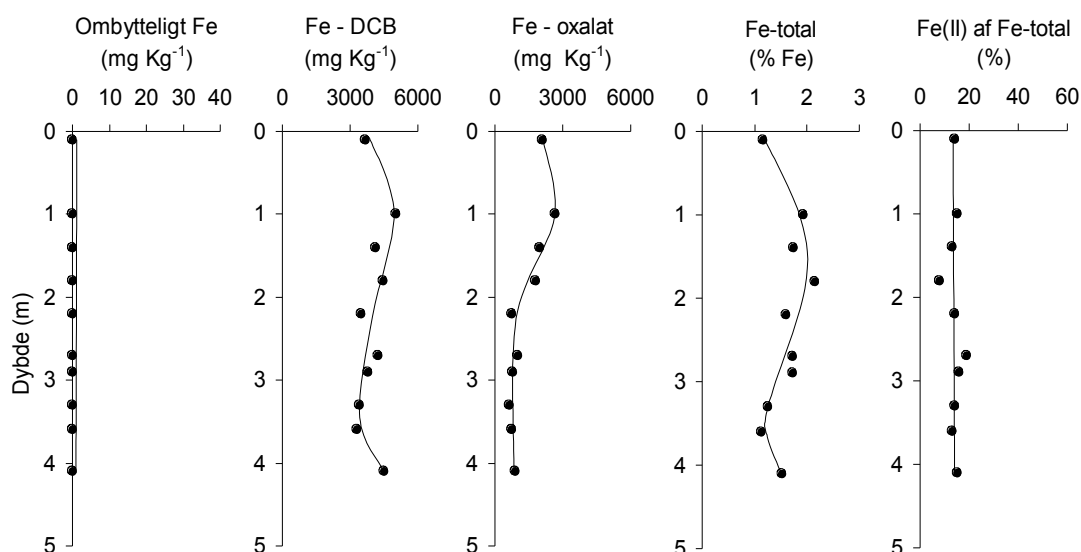
Figur 11.17. Specifikt overfladeareal, ler+silt, fint sand, mellem (M) + groft (G) sand og CEC ved Mammen.

11.5.3 Kemiske egenskaber

Alle de undersøgte sedimentprøver fremstod kalkfrie, for nær pløjelaget der indeholdt kalk i en mængde svarende til 6 % CaCO_3 , figur 11.18. Kalken i pløjelaget er tilført som del af den almindelige dyrkningspraksis, for at sikre optimale forhold for planteproduktionen. De målte pH-værdier afspejler denne fordeling af kalk, idet $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -værdien i pløjelaget blev målt til 6.7 hvor den for den resterende del af morænelerslaget blev målt til omkring 5. Indholdet af fosfor aftager jævnt ned gennem lerlaget fra 367 mg P kg^{-1} i pløjelaget til omkring 130 mg P kg^{-1} i bunden af lerlaget.



Figur 11.18. TOC, C/N, pH (målt i CaCl_2), kalk (beregnet som CaCO_3) og fosfor (ekstraheret med svovlsyre) ved Mammen.



Figur 11.19. Ombytteligt ferrojern (Fe), jernoxider (Fe_{DCB} og $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$), total indhold af jern (Fe-total) og andele af ferrojern (Fe(II) af Fe-total) ved

Indholdet af ombytteligt ferrojern i den gennemlevede moræneler var under detektionsgrænsen, figur 11.19. Indholdet af frie jernoxider, bestemt som Fe_{DCB} , er $3700 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ i pløjelaget, hvorefter indholdet stiger til $5000 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ i 1 meters dybde hvorefter indholdet aftager svagt med til 3.6 meter, hvor indholdet er målt til $3300 \text{ mg Fe kg}^{-1}$. I 4 meter under terræn slutter indholdet på $4500 \text{ mg Fe kg}^{-1}$. Amorfe jernoxider ($\text{Fe}_{\text{oxalat}}$) udgør mellem 53 og 58 % af det samlede indhold af jernoxider indenfor den øverste meter, hvorefter andelen aftager til mellem 40 og 48 % i den efterfølgende meter hvorefter andelen aftager yder-

ligere til omkring 20 % i den resterende del af morænelerslaget, svarende til mindre end 1000 mg Fe kg⁻¹. Det totale indhold af jern udgør 1.4 % Fe i pløjelaget hvorefter det stiger til 1.8 % Fe i 1 meters dybde og efterfølgende variere ned gennem morænelerslaget. Andelen af ferrojern (Fell) varierer mellem 8 og 16 % ned gennem lerlaget, hvor det udgør en pulje af jern, der kun meget vanskelig lader sig ilte.

11.5.4 Mineralogiske egenskaber

Indholdet af organisk stof i pløjelaget svarer til 1.3 % C. Under pløjelaget aftager indholdet til typiske værdier under 0.02 % C, figur 11.18. Forholdet mellem C/N var 7 i pløjelaget og aftog til værdier omkring eller under 1 i den resterende del af morænelerslaget.

Sedimenterne ved Mammen består således overvejende af mineralske partikler, der på baggrund af den geologiske beskrivelse og resultaterne af forskellige analyser viser at morænelerslaget er karakteriseret ved kun ét geokemisk miljø. Dette miljø er gennemiltet og kalkfrit. Supplerende undersøgelser af prøver fra 1 og 2.9 meter viser her en kraftig dominans af kvarts. Hertil kommer bl.a. feldspat og lermineraller. Sammensætningen af lermineraller udgøres i begge dybder af 5 forskellige typer. I 1 meters dybde er smectit og veksellagsmineralet illit-smectit de mest almindelige, hvortil kommer illit og vermikulit samt en mindre mængde kaolinit. I 2.9 meter bliver smectit dominerende og udgør mere end 50 %, hvortil kommer nogen illit-smectit og illit samt mindre mængder vermikulit og kaolinit.

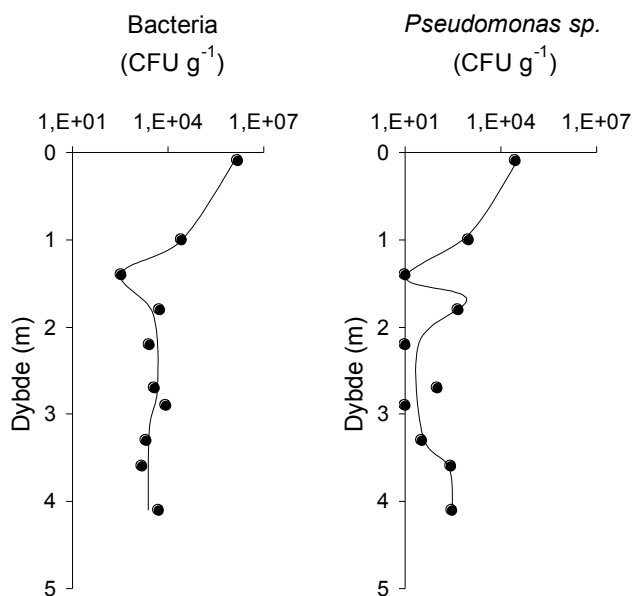
11.5.5 Mikrobiologiske undersøgelser

Det totale antal dyrkbare bakterier og *Pseudomonas* sp. fremgår af figur 11.20. Her ses antallet af dyrkbare bakterier at være størst i pløjelaget ($2 \cdot 10^6$ CFU g⁻¹) hvorefter det aftager til $3 \cdot 10^2$ CFU g⁻¹ i 1.4 meters dybde for atter at stige, hvorefter antallet atter stiger til mellem $2 \cdot 10^3$ og $9 \cdot 10^3$ CFU g⁻¹ i resten af morænelerslaget. Antallet af *Pseudomonas* sp. er ligeledes størst i pløjelaget ($3 \cdot 10^4$ CFU g⁻¹) hvorefter antallet aftager markant og ikke længere er måltbart i 1.4 meters dybde. Dybere ned stiger antallet atter og variere her mellem $3 \cdot 10^2$ og $5 \cdot 10^2$.

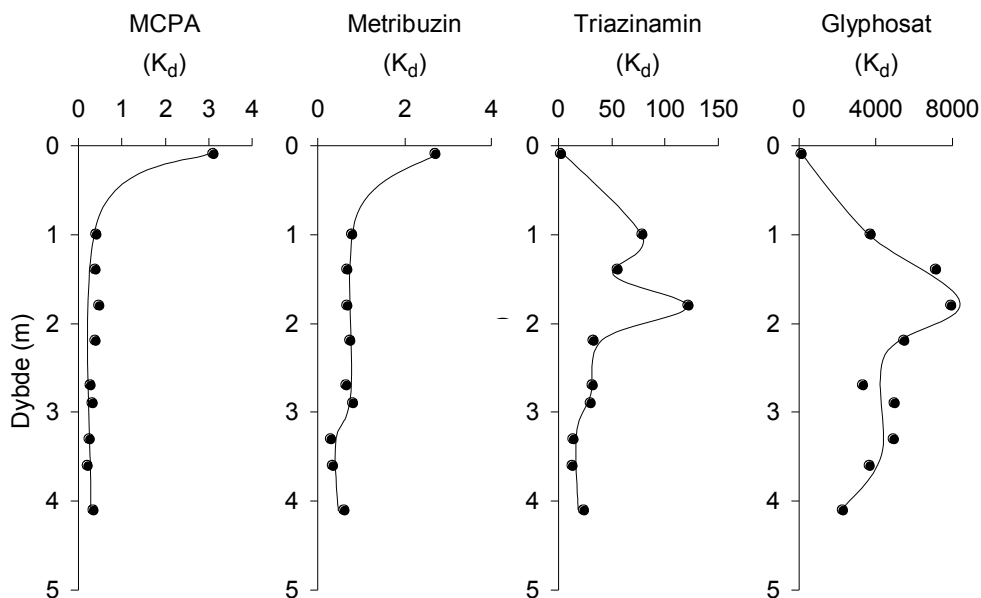
11.5.6 Sorption af pesticider

Sorptionen af MCPA er markant højere i pløjelaget (k_d : 3.2) end i resten af profilen, hvor k_d -værdien varierer mellem 0.2 og 0.4, figur 11.21. Sorptionen af metribuzin minder om den for MCPA, med en højeste k_d -værdi på 2.7 i pløjelaget og k_d -værdier på 0.3-0.8 i den resterende del af moræneleren, hvor de laveste værdier forekommer indenfor intervallet 3.3-3.7 meter. Dette interval er ligeledes forskellig fra det overliggende lag ved bl.a. indholdet af ler + silt, sand samt jernoxider. Sorptionen af methyltriazinamin er lav i pløjelaget (k_d : 3.0), hvorefter den stiger markant indenfor de næste 1.5 meters, hvor k_d -værdien er mellem 56 og 122. Herefter aftager k_d -værdien til 14-34 hvor de laveste værdier forekommer i intervallet fra 3.3-3.7 meter. Den laveste sorptionen af glyphosat er målt i pløjelaget (k_d : 153),

hvorefter sorptionen stiger markant til 8000 i 1.8 meters dybde hvorefter sorptionen atter aftager til k_d -værdier mellem 2300 og 5500, med den laveste værdi målt i 4.1 meter.



Figur 11.20. Totale antal dyrkbare bakterier og antal *Pseudomonas sp.* ved Mammen.



Figur 11.21. k_d -værdier for MCPA, metribuzin, methyltriazinamin og glyphosat ved Mammen.

11.6 Resultater fra Grundfør lokaliteten

11.6.1 Geologi og redoxforhold

På lokaliteten ved Grundfør er de geologiske forhold samt udviklingen i redoxforhold beskrevet i en 10 meter dyb boring, der blev gennemført 2 meter syd for udgravningens sydøstlige hjørne.

Den geologiske beskrivelse viser øverst et 0.3 meter muldlag, der efterfølges af sandet, siltet moræneler ned til 2.2 meter under terræn, figur 11.22. Herefter følger fint til mellem sand ned til 5.8 meter under terræn, hvorefter sand og grus bliver den dominerende jordart ned til 6.7 meters dybde, hvor der efter et 20 cm indslag af fint sand følger ret fed moræneler ned til 10 meters dybde.

Sedimenterne fremstår ved iltede brunlige farvenuancer ned til 8.2 m, hvorefter, farven under redoxgrænsen, skifter til grå farvenuancer. Fra overfladen og ned til 7.5 meters dybde er sedimenterne kalkfrie.

11.6.2 Kemiske og mineralogiske undersøgelser

Det øverste muld- og morænelerslag er analyseret efter et reduceret program, figur 11.23. Resultaterne viser at muldlaget indeholdt organisk stof svarende til 1.2 % C, hvorefter indholdet aftager markant til omkring 0.04 % C i 1.3 meter og yderligere aftager til 0.01-0.02 i den resterende del af lerlaget. C/N-forholdet er beregnet til 7 i pløjelaget, hvorefter det aftager til 1 i 1.3 meters dybde for yderligere at aftage til under 1 i resten af laget.

De målte pH-værdier er omkring 6.0 ned til 1.3 meters dybde, hvorefter værdien aftager til ca. 5.3 i resten af lerlaget. Den forhøjede pH-værdi i de øvre dele af profilen skyldes tilførsel af jordbrugskalk, der ligeledes kan erkendes ved et indhold af kalk i pløjelaget svarende til 4.0 % CaCO_3 . Når et sådanne kalkindhold ikke er registreret i forbindelse med den geologiske beskrivelse kan det skyldes at kalken findes ujævnt fordelt i pløjelaget.

11.6.3 Sorption af pesticider

Sorptionen af såvel MCPA og metribuzin med dybden viser et meget parallelt forløb, med de største K_d -værdier i pløjelaget og markant aftagende værdier fra 1.3 til 2.7 meters dybde, hvorefter sorptionen forbliver lav og stort set uændret, figur 11.24. Den målte k_d -værdi i pløjelaget er henholdsvis 3.2 for MCPA hvorefter værdien aftager til 0.1-0.4. Tilsvarende er k_d -værdierne for metribuzin henholdsvis 2.4 og 0.4-0.7. For methyltriazinamin er sorptionen lav ned til 1.3 meter (k_d : 7-11) hvorefter sorptionen stiger til 54-59 ned til 2.4 meter, hvor sorptionen atter aftager til 9 i 2.8 meter under terræn. Den laveste K_d -værdi for glyphosat er ligeledes målt i pløjelaget (k_d : 345) hvorefter sorptionen stiger med k_d -værdier på 4800-5400 ned til 2.4 meter under terræn, hvorefter k_d -værdien aftager til 2300 i 2.7 meters dybde.

BORERAPPORT

DGU arkivnr : 79.1327

Borested : Herstvej, Hæst, Grundfør
8380 Trige

Kommune : Århus
Amt : Århus

Boringsdato : 4/11 2002

Boringsdybde : 10 meter

Terrænkote : 60,53 meter o. DNN

Brøndbore : Carl Bro A/S

MOB-nr :

BB-journr :

BB-bornr :

Prøver

- **modtaget** : 4/11 2002 **antal** : 20

- **beskrevet** : 6/3 2003 **af** : TC

- **antal gemt** : 0

Formål : Undersøg./videnskab

Anvendelse : Sløjfet/opgivet bor

Boremetode :

Kortblad : 1315IIISV

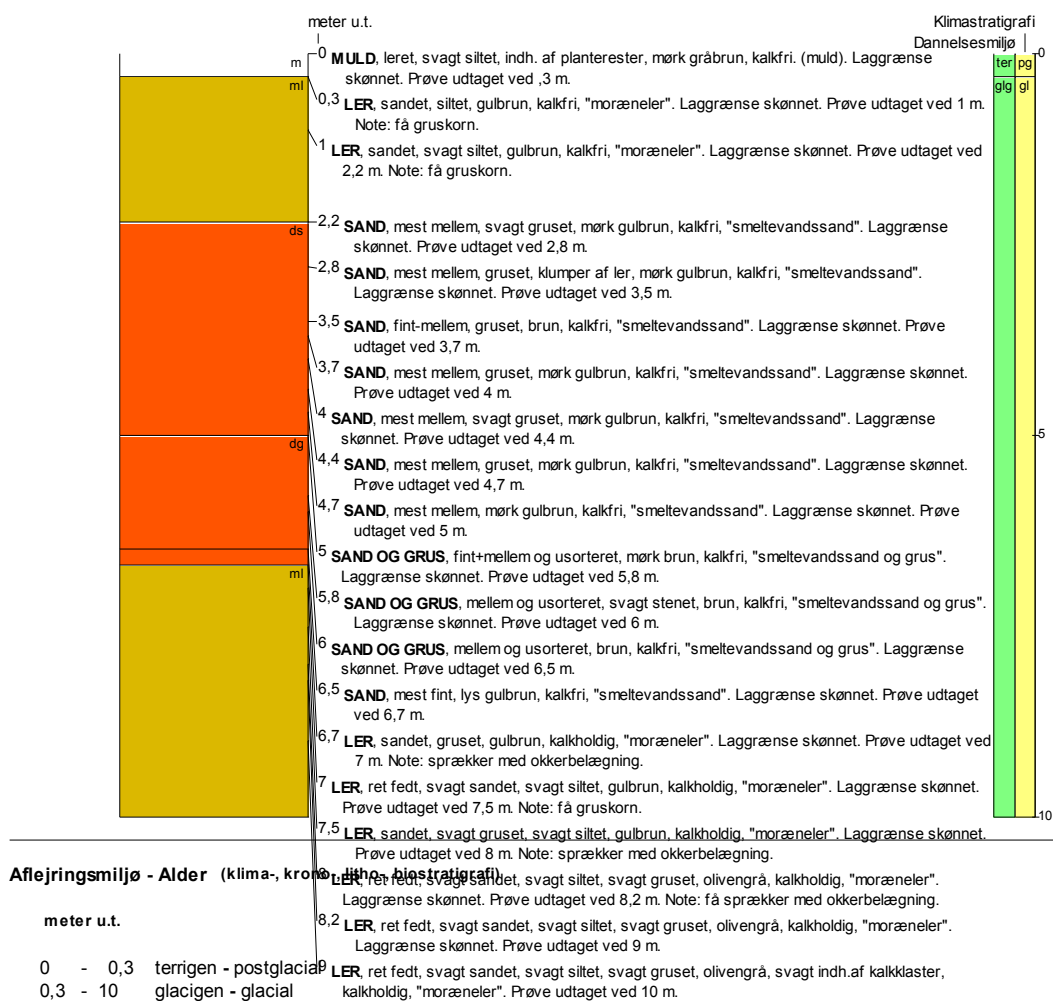
UTM-zone : 32

UTM-koord. : 570206, 6237259

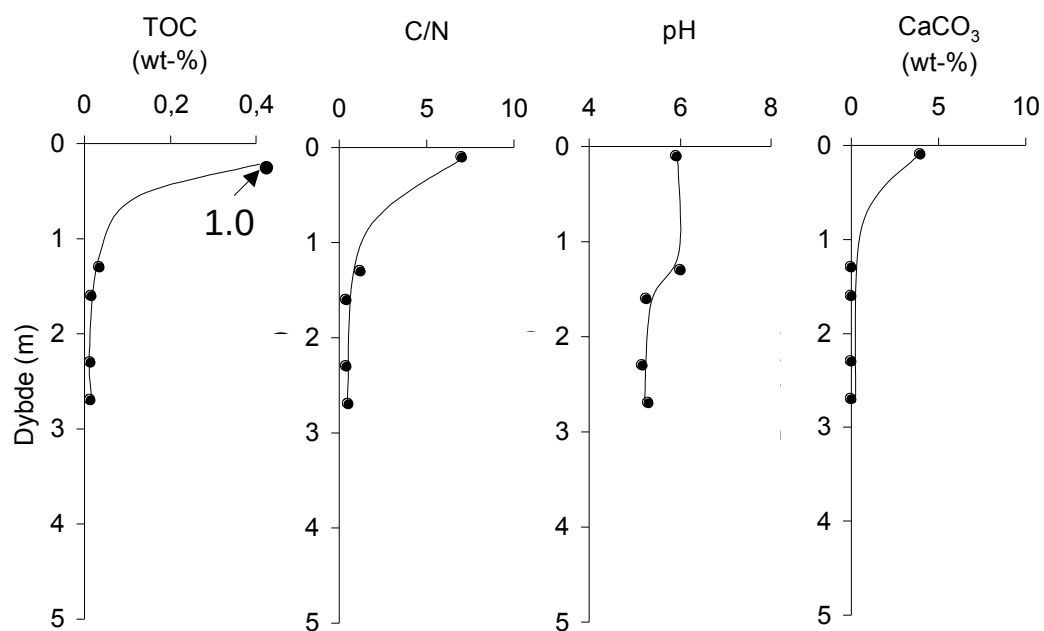
Datum : ED50

Koordinatkilde : GEUS

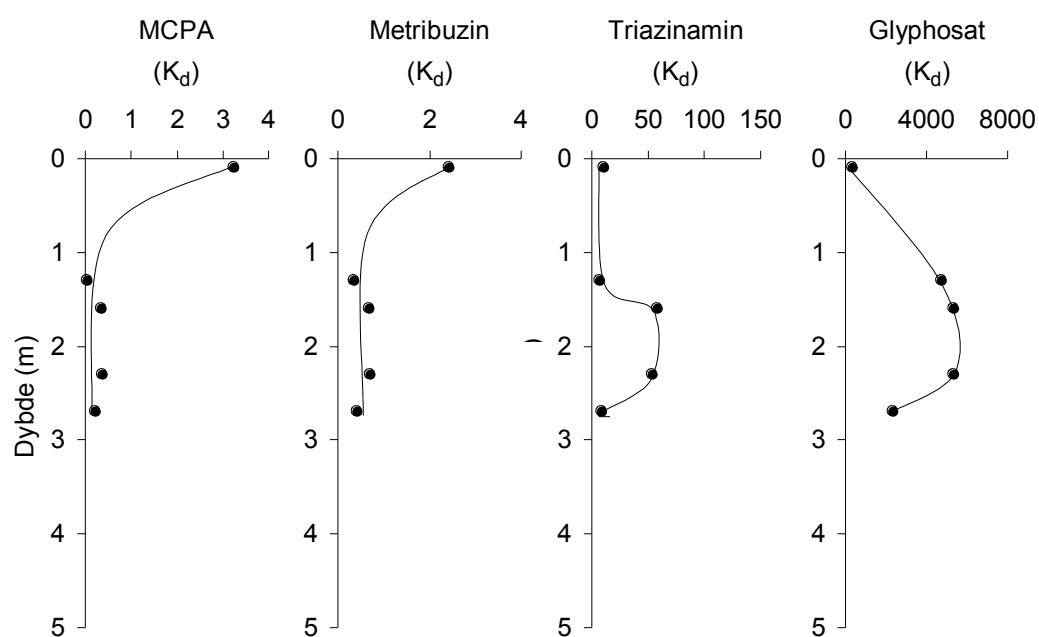
Koordinatmetode : KMS digitale kort



Figur 11.22. Geologiske forhold ved Grundfør (DGU arkiv nr. 79.1327).



Figur 11.23. TOC, C/N forhold, pH (målt i CaCl₂) og kalk (CaCO₃) ved Grundfør.



Figur 11.24. K_d -værdier for MCPA, metribuzin, methyltriazinamin og glyphosat ved Grundfør.

11.7 Korrelation mellem sorption og målte parametre

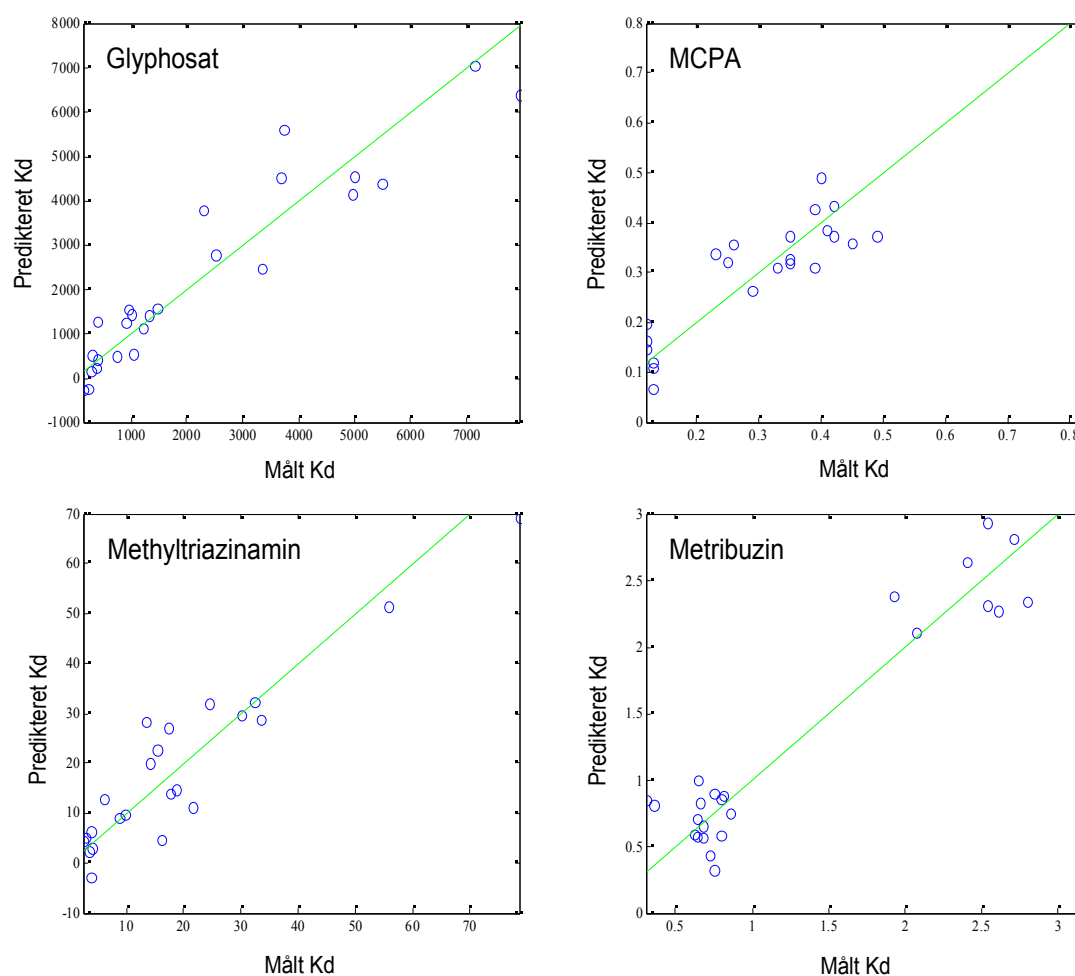
Datamaterialet fra de to lokaliteter Gjorslev og Mammen er anvendt som input til en multivariat korrelationsanalyse (Partial Least Squares Regression) til brug for en beskrivelse af de parametre der er afgørende for sorptionen af de fire undersøgte stoffer, tabel 11.1.

På baggrund af det foreliggende datamateriale viste det sig muligt at relatere sorptionen af glyphosat til i alt 11 parametre som tilsammen forklare 89 % af den fundne variation i K_d . Sorptionen af glyphosat viste sig stærkt knyttet til indholdet af finsand, frie jernoxider (Fe_{oxalat}) samt det specifikke overfladeareal, der alle ved stigende indhold virker til en øget sorption. Derimod tyder korrelationsanalysen på at stigende pH-værdi i jordlagene samt stigende indholdet af frie manganoxider (Mn_{CBD}) og phosphor ($P_{H_2SO_4}$) virker til en mindsket sorption af glyphosat. Sorptionen af MCPA kan forklares med 86 % ved inddragelse af i alt 10 parametre. Det er især organisk stof (TOC), N_{total} , Fe_{oxalat} , $Fe(II)$ samt i lidt mindre grad også finsand der bidrager til en stigende sorption af MCPA ved stigende indhold mens stigende pH-værdi, stigende indhold af manganoxid (Mn_{oxalat}) og stigende specifikt overfladeareal bidrager til aftagende sorption. Den negative korrelation til overfladearealet er i god overensstemmelse med den positive korrelation til TOC, idet det organiske indhold bidrager til dannelse af aggregater, hvorved det samlede ydre overfladeareal – som her målt – aftager. Sorptionen af methribuzin synes knyttet til langt færre parametre, idet der ved blot 3 parametre opnås en forklaring i den målte sorption på 87 %. Her er det indholdet af organisk stof samt indholdet af ferrojern, der er ved øgede indhold bidrager til en sorption af methribuzin mens stigende indhold af jernoxider (Fe_{CBD}) bidrager til aftagende sorption af methribuzin. Sorptionen af methyltriazinamin lader sig beskrive for 89 % ved i alt fire parametre, hvor det specifikke overfladeareal samt indholdet af frie jernoxider (Fe_{oxalat}) bidrager til øget sorption, hvorimod stigende pH-værdi i jordlagene samt stigende CEC-værdier mindsker sorptionen af methyltriazinamin.

Tabel 11.1. Parametre af betydning for sorption (K_d) af glyphosat, MCPA, methribuzin og methyltriazinamin samt forklarings-% bestemt ved korrelationsanalyse. Værdien af parameteren er følgende: +:0-0,1; ++:0,1-0,2; +++:>0,2; -: 0; --: -0,1- -0,2 og ---:>-0,2.

Parameter	Glyphosat	MCPA	Metribuzin	Methyltriazinamin
Specifikt overfladeareal	++	--		+++
Finsand	+++	++		
TOC	--	+++	+++	
N_{total}	-	+++		
$P_{H_2SO_4}$	--			
pH_{CaCl_2}	---	--		---
Fe_{oxalat}	+++	+++		+++
Fe_{CBD}			---	
$Fe(II)$	+	+++	+++	
Fe_{total}	-	--		
Mn_{oxalat}		---		
Mn_{CBD}	---			
CEC	-	--		---
Variation forklaret ved de her viste parametre (%)	89	86	87	89

Ved korrelationsanalysen er den målte sorption (K_d) af de fire stoffer sammenholdt med den predikterede værdi er ligeledes vist i figur 11.25. Sammenstillingen for glyphosat viser en god spredning indenfor de målte værdier og desuden en god overensstemmelse mellem de målte og predikterede værdier indenfor hele K_d -intervallet. Det samme gælder for methyltriazinamin efter at en enkelt værdi på over 100 er taget ud af data sættet. Værdien er repræsentativ for et jordlag med høje indhold af diatoméjerd. Datasættet for MCPA har tendens til at være opdelt i tre grupper, repræsenterende meget lave, mellem og høje K_d -værdier, hvor antallet af observationer er markant større for de to førstnævnte grupper end for den sidste gruppe. Når data som her fordeler sig i tre grupper, svarer det regressionsmæssigt til at antallet af observationer begrænser sig til 3. Ser man imidlertid på udbredelsesretningen i den midterste gruppe, ses det at tendensen her følger tendensen i datasættet, hvilket betyder at regressionsmodellen overordnet set er generelt gældende indenfor det viste variationsområde. Dette betyder at K_d værdier i intervallet til omkring 0.8 kan predikteres rimeligt sikkert, i modsætning til K_d værdier over 0.8 som målt i pløjelaget ved Mammen, hvorfor denne værdi er pillet ud af det i figur 11.25 viste datasæt for MCPA.



Figur 11.25. Målte og predikterede K_d værdier for glyphosat, MCPA, methyltriazinamin (MTA) og metribuzin (MTB).

Datasættet for metribuzin viser en tendens til gruppering efter henholdsvis forholdsvis lave og forholdsvis høje værdier, men trods dette repræsenterer det anvendte datasæt en forholdsvis god overensstemmelse mellem de målte og predikterede værdier. De overvejelser der blev gjort for grupperingen i MCPA er endnu mere gældende for metribuzin hvor der ikke er nogen mellemgruppe.

11.8 Sammenfatning og konklusion

De fire profiler repræsenterer to typiske morænelerstyper. De to sjællandske lokaliteter er karakteriseret ved et forholdsvis tykt lerlag over et kalkmagasin og de to jyske lokaliteter er karakteriseret et forholdsvis tyndt morænelerdække over sand.

På hver af de sjællandske lokaliteter, Gjorslev og Højstrup, findes tre overordnede geokemiske miljøer. Under pløjelaget fremstår den første zone oxideret og kalkfri med forholdsvis lave pH-værdier samt lave indhold af ombytteligt og strukturelt bundet ferrojern. Herunder følger en oxideret og stærkt kalkholdig (20-25 % CaCO_3) zone karakteriseret ved forholdsvis høje pH-værdier, forholdsvis lave indhold af organisk stof og generelt lave indhold af ferrojern, idet indholdet af ferrojern dog ses at stige ned gennem zonen. Herunder følger, umiddelbart under redoxgrænsen, en reduceret zone, der fremstår stærkt kalkholdig (25-50 % CaCO_3) med forholdsvis høje indhold af såvel ombyttelig som strukturelt bundet ferrojern samt et, til sammenligning med den oxiderede og kalkholdige zone, stigende indhold af organisk stof. Et tiltagende indhold af kalk i den reducerede zone ved Gjorslev påvirker indholdet af bl.a. organisk stof og forskellige former af jern.

På begge lokaliteter er den øverste zone omkring 1 meter dyb hvorefter følger den anden zone, der når ned til en dybde på henholdsvis 4 meter ved Gjorslev og 3.5 meter ved Højstrup. Supplerende borer ved Højstrup langs en 700 meter øst-vestlig orienteret profilinie, viste her at den iltede zone varierede i mægtighed med ca. 1 meter, fra 2.6 meter til 3.5 meter under terræn. Disse variationer i udbredelsen af den iltede zone på morænelersfladen afspejler forskellige i bl.a. de geologiske forhold, det oprindelige indhold af reducerende stoffer og mængden af nedsivende vand på det pågældende sted (Ernstsen m. fl., 2001). Mægtigheden af den iltede zone, som beskrevet ved Gjorslev og Højstrup, er typisk for mange andre sjællandske og fynske lokaliteter (Ernstsen, 1998).

På de jyske lokaliteter, Mammen og Grundfør, findes kun en geokemisk zone og den modsvarende den øvre iltede og kalkfrie zone på de to sjællandske lokaliteter. Forholdene ved Mammen og Grundfør bestemt ved bl.a. 1) bedre mulighed for dræning ved sandlaget under lerlaget, 2) en længere isfri periode samt 3) et lavere oprindeligt indhold af kalk har resulteret i at hele det øverste lerdække er gennemiltet, og zonen er derfor tykkere end på Stevns. Forholdene på de jyske lokaliteter har bl.a. bevirket i en effektiv udnyttelse af det oprindelige indhold af reducerende stoffer og bufferkapacitet, hvilket i dag ses ved henholdsvis lave indhold af Fe(II) og lave pH-værdier ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: ca. 5) i jordlagene under pløjelaget. Til sammenligning er pH-værdien omkring to enheder højere på de sjællandske lokaliteter.

Indenfor de overordnede geokemiske zoner forekommer der på alle fire lokaliteter mikromiljøer i den iltede zone, hvor de kemiske og mineralogiske forhold afviger markant fra de generelle forhold, der beskrives gennem analyser af bulkprøver. Således findes der som bl.a. her nævnt i forbindelse med beskrivelsen af lokaliteten ved Gjorslev, samt i bilag 1 omhandlende de jordbundsmæssige forhold, lyse, gråfarvede farvemønstre knyttet til makroporer, hvor indholdet af bl.a. jernoxider er markant lavere end i den tilstødende jernberigede rand og matrix. Dette betyder ligeledes at co-varierende egenskaber, bl.a. det specifikke overfladeareal, ligeledes vil kunne variere ganske betydeligt over meget korte - nogle få millimeter - afstande og dermed påvirke omsætningen og sorptionen af pesticider.

Sorptionen af de tre pesticider MCPA, metribuzin og glyphosat samt omdannelsesproduktet methyltriazinamin (fra tribenuronmethyl) bestemt på bulkprøver afspejler i høj grad fordelingen af forskellige forskellige geokemiske miljøer med tilhørende forskellige mineralogiske egenskaber. For MCPA er sorptionen forholdsvis høj i pløjelaget, hvor den ved Gjorslev er bestemt ved en K_d -værdi på 0.8 og på de to jyske lokaliteter ved en K_d -værdi på lidt over 3. På alle lokaliteter varierer sorptionen i den iltede zonen mellem 0.1 og 0.4, hvor den i den reducerede zone er bestemt til mellem 0.4 og 0.7. Denne fordeling af K_d -værdier er i god overensstemmelse med de ved korrelationsanalysen fastlagte parametre, der indgår i beskrivelsen af sorptionen af MCPA. Her viste netop TOC og Fe(II) sig som nøgleparametre for sorptionen af MCPA. I rodzonen findes høje indhold af TOC og i den reducerede zone forholdsvis høje indhold af TOC og Fe(II). Den lave sorption relateret til Mn_{oxalat} er ligeledes i overensstemmelse med at det primært findes i den iltede zone.

Sorptionen for metribuzin viser ligeledes høje værdier for pløjelaget med K_d -værdier på 2.1-2.7, hvorefter sorptionen aftager i resten af den iltede zone til K_d -værdier mellem 0.2 og 0.8. Under redoxgrænsen stiger K_d -værdien til mellem 2.5 og 3.2 ved Gjorslev mens den ved Højstrup varierer mellem 0.6 og 1.2. Fordelingen af K_d -værdier efter de forskellige geokemiske miljøer stemmer godt overens med de styrende parametre bestemt ved korrelationsanalysen, hvor indholdet af TOC og Fe(II) bidrager positivt og frie jernoxider (Fe_{CBB}) til sorptionen. Det høje indhold af TOC og kombinationen af TOC og Fe(II) i den reducerede zone bidrager til de forøgede værdier her, mens kombinationen af lave indhold af TOC, Fe(II) og generelt høje indhold af frie jernoxider i den iltede zone er medvirkende årsag til de forholdsvis lave værdier her.

Sorptionen af glyphosat er forholdsvis lav i pløjelaget (med K_d -værdier fra 153 til 345) hvorefter sorptionen på de sjællandske lokaliteter stiger markant indenfor den øverste halve meter til en K_d -værdi på omkring 2500. I resten af den iltede zone er K_d -værdien på disse lokaliteter omkring 300, hvorefter sorptionen stiger i den reducerede zone til en K_d -værdi på 1000-1400, bl.a. bestemt af kalkindholdet. På de jyske lokaliteter stiger sorptionen ligeledes markant under pløjelaget, til typiske K_d -værdier på omkring 5000, for størstedelen af lerlaget. I de diatomholdige prøver ved Mammen var sorptionen endog højere og bliver egentlig højere end en sikker bestemmelse gør mulig ved brug af den anvendte metode. Korrelationsanalysen viste at en lang række parametre havde betydning for sorptionen af glyphosat. Den forholdsvis lave sorption i pløjelaget kan således forklares ved bl.a. det forholdsvis høje indhold af organisk stof og svovlsyre-ekstraherbart fosfor, hvorefter stigende indhold af jernoxider i form af Fe_{oxalat} og samtidige stigende overfladearealer samt relativt

lave pH-værdier i den iltede kalkfrie zone bidrager til en øget sorptionen her. Ved Mammen bidrager bl.a. indholdet af diatome-jord karakteriseret ved et forholdsvis stor overfladeareal samtidig med forholdsvis lave pH-værdier og høje indhold af frie jernoxider ($\text{Fe}_{\text{oxalat}}$) til en større sorption her end i den tilsvarende oxiderede og kalkfrie zone på de sjællandske lokaliteter. Samtidig med bl.a. aftagende indhold af $\text{Fe}_{\text{oxalat}}$ og stigende pH-værdier aftager K_d -værdien for den resterende del af den oxiderede zone på de sjællandske lokaliteter, hvorefter K_d -værdien i den reducerede zone stiger bl.a. som følge af et aftagende indhold af manganoxider (Mn_{CBD}) samt stigende indhold af Fe(II) . Et aftagende indhold af Fe(II) samtidig med stigende indhold af kalk som ved Gjorslev kan være medvirkende årsag til de med dybden aftagende K_d -værdier her.

Sorptionen af methyltriazinamin var ligeledes lavere i pløjelaget end i resten af den iltede zone. På de sjællandske lokaliteter betød det en stigning fra en k_d -værdi på 2 i pløjelaget til mellem 3 og 9 i den iltede zone og 11-17 i den reducerede zone. På de jyske lokaliteter varierede k_d -værdien mellem 3 og 11 i pløjelaget og typisk mellem 14 og 59 i for efterfølgende del af den iltede zone. En højere sorption blev målt i de diatome-holdige sedimenter ved Mammen (k_d -værdi: 56-122) og lidt lavere sorption i bunden af morænelerslaget ved Grundfør (k_d -værdi: 9). Korrelationsanalysen viste en positiv sammenhæng mellem sorptionens størrelse og det specifikke overfladeareal samt indholdet af frie jernoxider ($\text{Fe}_{\text{oxalat}}$) og en negativ sammenhæng med jordens pH og CEC-værdi. Det lave specifikke overfladeareal i pløjelaget som følge af det organiske stofs evne at kitte de mineralske partikler sammen og danne mikroaggregater er antagelig årsagen til den lave sorption i pløjelaget, hvorefter indholdet af bl.a. frie jernoxider og lave pH-værdier er medvirkende til de stigende K_d -værdier i den kalkfrie del af den iltede zone, hvorefter det specifikke overfladeareal i stigende grad kommer til at bestemme sorptionen dybere nede.

I nærværende undersøgelse af unge morænelersaflejringer har den metodiske tilgang været feltbeskrivelse, laboratorieanalyser af en række fysiske, kemiske, mineralogiske og mikrobiologiske parametre med efterfølgende korrelationsanalyse, hvilket har vist sig særdeles effektivt i analysen af hvilke forhold i jorden/sedimentet der er bestemmende for sorptionen af forskellige pesticider/nedbrydningsprodukter. Datamaterialet vil med fordel kunne anvendes ved udvælgelsen af relevante analyse-parametre samt indgå i analysen af danske lertyper indsamlet fra forskellige dele af Danmark. Desuden vil resultaterne kunne anvendes i forbindelse med undersøgelsen af forskellige domæner - makroporer og matrixjord - der er karakteristiske for mange danske lerholdige jorde og sedimenter.

11.9 Litteratur

Barlebo, H.B. (ed). 2002. Undersøgelser- og analysemetoder anvendt i forbindelse med undersøgelser af sandlokaliteter: Hvilke metoder er anvendt, og hvilke overvejelser er gjort ?. Danmarks- og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Danmarks JordbrugsForskning, Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 2. 62 sider.

Ernstsen, V. 1998. Clay minerals of clayey subsoils of Weichselian age in the Zealand-Funen area, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 45:39-51.

Ernstsen, V. H.J. Henriksen og F. von Platen. 2001. Principper for beregning af nitratreduktion i jordlagene under rodzonen. Arbejdsrapport nr. 24. Miljøstyrelsen. 54 sider. <http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2001/87-7944-713-9/html/>

Gregg, S.J. og Sing, K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. Academic Press. 303 sider.

Komadel, P og J.W. Stucki. 1988. Quantitative assay of minerals for Fe^{2+} and Fe^{3+} using 1,10 phenanthroline: III. A rapid photochemical method. Clay and Clays Minerals, 36:379-381.

Lind, A.-M. og M. B. Pedersen. 1976. Nitrate reduction in the subsoil. II. General description of boring profiles, and chemical investigations on the profile cores. Danish Journal of Plant and Soil Science 80, 82-99.

Plantedirektoratet. 1994. Fælles arbejdsmetoder for jordbundsanalyser.

Sumner, M.E. og W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. I D.L. Sparks (ed.) Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3. ss. 1201-1230. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

12. Undersøgelse af mikrobiologi samt mineralisering og sorption af pesticider i et lerjordsprofil ved Højstrup, Stevns.

Ole Stig Jacobsen (GEUS), Lars Elsgaard (DJF) og Finn Pilgaard Vinther (DJF)

12.1 Indledning

Transport, nedbrydning og sorption i strukturjorder er generelt meget forskelligt fra hvad man finder de fleste steder i sandjorde. Specielt er strømningsmønstret i ler ganske anderledes end i sand og vanskelighederne med at detektere, hvor nedsivningen af vand og stof foregår, vil naturligt også afspejle sig i de biologisk og kemiske processer.

Udvaskning af pesticider i lerjord kan foregå gennem sprækkestrukturer (makroporer) af forskellig geologisk og biologisk oprindelse. Det betyder, at pesticider på kort tid transporteres ned i dybere jordlag uden mulighed for mikrobiel nedbrydning i den omgivende matrix jord. Antallet af makroporer i danske lerjorde kan være meget højt, men det anslås, at kun en ringe del af disse makroporer er hydraulisk aktive på et givent tidspunkt. Derfor kan antallet af makroporer være et usikkert mål for risikoen for udvaskning af pesticider. Samtidig kompliceres muligheden for at vurdere omfanget af pesticiders binding og omsætning i hydraulisk aktive makroporer, da disse normalt ikke kan skelnes fra de inaktive. Aktive makroporer kan imidlertid visualiseres eksperimentelt ved hjælp af et farvestof (tracer), der vandes ud og føres med vandet ned gennem jorden. Farvestoffet binder sig til organisk stof og jordpartiklerne i de kanaler, hvor vandet løber. Derfor kan de aktive (farvede) makroporer identificeres ved efterfølgende udgravning af en profilvæg. For at vurdere pesticiders miljømæssige skæbne i hydraulisk aktive makroporer blev der i efteråret 2002 udført et tracerforsøg ved lerjordslokaliteten i Højstrup, Stevns.

12.2 Formål

I dette projekt er vægten derfor blevet lagt på forståelsen og anvendeligheden af nogle metoder til målinger af omsætning og retention af pesticider, som de udføres for sandlokaliteter. For eksempel er bestemmelsen af mineralisering for jordprøver, der udtages ved gravning i og under pløjelaget, blevet sammenlignet med prøver udtaget i uforstyrret lejring. Endvidere er omsætningen af pesticider og det mikrobiologiske potentiale i jorde fra de forskellige sprækkezoner blevet sammenholdt med aktiviteten i den omgivende matrix jord. Samtidig blev et antal jordprøver udtaget i forskellig dybde (10 cm, 40 cm og 150 cm) for at vurdere den rumlige variation i de undersøgte mikrobiologiske parametre.

12.3 Metode

Der er fra et plot ca. 40 meter nord for den store udgravning på Højstrup marken blevet udgravet et mindre profil på 5*5 meter og 1,7 meter dybt. Herudover blev der udtaget prøver i to farveplot i hovedudgravningen.

Bulkprøver

Der blev udtaget ca. 10 delprøver fra de tre dybder og delprøverne blev blandet intenst i feltet (ca. 5 kg) og opbevaret i Rilsan poser ved 5 °C indtil brug. Prøver af bulk jord (4 prøver fra 0-10 cm, 12 prøver fra 35-45 cm og 12 prøver fra 150-155 cm) blev analyseret for generel mikrobiel aktivitet og diversitet. Analyserne omfattede måling af arylsulfatase aktivitet (ASA), fluorescein diacetat hydrolyse (FDA), substrat-induceret respiration (til bestemmelse af mikrobiel biomasse) og fysiologisk diversitet (Biolog®, Ecoplates). Detaljerede beskrivelser af de anvendte metoder findes i West & Sparling (1986), Vinther et al. (2003) og Elsgaard et al. (2002; 2003).

Fra tre horisonter, 0-10 cm, 35-45 cm og 155-165 cm, blev der udtaget prøver til bestemmelse af mineralisering og sorption.

I laboratoriet blev tre delprøver af 10 g inkuberet ved 10 °C og tilsat 1.0 ml radioaktiv pesticidopløsning svarende til 5 mg stof / kg jord. Dette blev gjort for hver af de tre dybder og mineraliseringen blev bestemt for 9 pesticider og natriumacetat over ca. 8 uger.

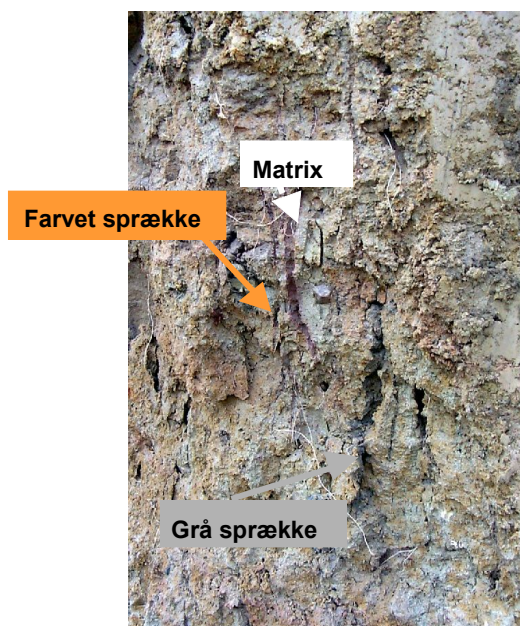
Yderligere er sorption, K_F og n -værdier, blevet bestemt for 9 pesticider fra de tre dybder.

Matrix og sprækkejord

Fra den store udgravning blev der udtaget detailprøver (1-5 g) fra to infiltrationsplot, hvor der tre dage inden var tilført Sulforhodamin B, således at det var muligt at identificere hydrologisk aktive og inaktive sprækker. Der blev udtaget i alt 71 prøver af røde (Sulforhodamin B) sprækker, af grå (ufarvede) sprækker og af matrix, figur 12.1.

Indsamlet sprække- og matrixjord fra 40 til 120 cm under terræn blev undersøgt for mikrobiel arylsulfatase aktivitet (profilvæg 1; 19 prøver) og fluorescein diacetat hydrolyse (profilvæg 2; 12 prøver). Analysemetoderne fulgte tidligere beskrivelser (Elsgaard et al., 2002; 2003), men jordvægten blev tilpasset til den beskedne prøvemængde, der var på 0,9 til 5,2 g for profilvæg 1 og 1,8 til 4,7 g for profilvæg 2. Som en tilpasning af metoden blev det vurderet hvilken prøvestørrelse, der var optimal i forhold til prøvens aktivitet og den respektive baggrundsfarvning i blindprøverne. De enkelte prøver blev delt i to til tre portioner, hvoraf én blev anvendt til måling af analysebaggrund. Det betyder, at målingerne er baseret på en til to analysegentagelser (mod normalt tre). Jorddybden for de enkelte prøver blev beregnet som gennemsnittet af det dybdeinterval, hvorfra prøven blev udtaget.

De andre 40 prøver (gennemsnitlig 2,7 g jord) blev inkuberet i mindre bægre i 150 ml glas, og tilsat radioaktivt mærket pesticid (ca. 0,4 mg / kg og 50 000 dpm) og mineraliseringen blev fulgt i ca. 9 uger. Efter forsøget er restmængden ekstraheret fra jordprøven og kvantificeret.



Figur 12.1. Farvede (røde) og ufarvede (grå) sprækker samt matrix fra den store udgravning.

Uforstyrrede søjler

Fra de tre samme dybder som bulk-prøver blev udtaget, blev der endvidere udtaget i hver dybde 15 intakte jordkerner i stålrør (60*100 mm) til undersøgelse af mineraliseringen af tre pesticider, MCPA, glyphosat og metamitron. Jordkernerne blev forseglet og inkuberet umiddelbart efter udtagningen. Søjler blev inkuberet i 500 ml glas-containere og tilført en volumen vand indeholdende en radioaktiv pesticidopløsning på 5 mg/l og en mængde svarende til det mobile vand i søjlen. Herved skulle pesticidet blive fordelt i søjlen som ved normal nedsivning og ikke som ved batchforsøg i hele jordmængden. Mineraliseringen blev fulgt i 60 dage.

Profilvæg

Det nordlige plot, som 4 dage inden var infiltreret med Brilliant Blue farvestof i en vandmængde svarende til 10 mm nedbør, fik blotlagt en profilvæg for udtagning af prøver i fire horisonter med hver 9 plugs (25*100 mm, 100 g). Forinden var pløjelaget blev fjernet og overfladen afrenset. Der blev udtaget plugs i 50 cm, 75 cm, 100 cm og 130 cm under terræn fra et profil gravet ca. 1 meter inde i plottet for at undgå randeffekt. Prøverne blev analyseret for indhold af Brillint Blue, vandindhold, organisk indhold og kolonidannende bakterier (CFU), samt en række kemiske parametre.

Kemiske analyser

Brillant Blue blev målt på ekstrakter i 70 % MeOH og derefter bestemt kolorimetrisk ved 530 nm. Sulforhodamin B blev ekstraheret i 70 % MeOH og kvantificeret ved differens-fotospektroskopi ved 630/480 nm.

Der blev udført kemiske analyser på de indsamlede jordprøver for at vurdere næringsindholdet og for at vurdere den lokale variation på de enkelte delprøver. Analyser blev også udført efter forsøgene for at se eventuelle ændringer ved inkuberingen. Vandindholdet er bestemt ved tørring i 24 timer ved 105 °C og beregnet på tørstofbasis. Organisk stof er estimeret som glødetab ved glødning i 6 timer ved 550 °C. Gløderesten er efterfølgende oplukket i 1N HCl for bestemmelse af total ekstraherbart jern Fe (ex) efter reduktion med hydroxylammoniumchlorid for fotometrisk bestemmelse ved bipyridin-metoden. Extraherbart Fe(II) er bestemt direkte på friske prøver ved ekstraktion med 1N HCl og kvantificering med bipyridin metoden. Total ekstraherbart phosphat er bestemt på HCl-extracten af gløderesten ved kaliumantimonyl-tartrat metoden. pH-værdien blev bestemt på friske prøver ved jord:vand suspension (1:2,5 vægt/vol). Efter centrifugering blev vand-ekstraherbart sulfat og nitrat bestemt ved ion-chromatografi.

12.4 Resultater

12.4.1 Det nordlige plot profil

De øverste 20-30 cm af profilet er pløjelag der årligt ompløjes, dyrkes og sprøjtes. Fra 30 cm til ca. 90 cm er leren gennemsat af rodkanaler og ormegange og mindre tydelige sprækker. Fra ca. 100 cm er sprækkerne det mest fremherskende. Alle prøver er indsamlet i jordlag hvor det overordnede miljø er oxideret. Ingen af de indsamlede prøver var reducerede.

Tabel 12.1. Vandindhold, organisk indhold, pH (målt i vand) og mikrobiologi på de anvendte bulkprøver

Dybde (cm)	Vandindhold (%)	Organisk stof (% C)	pH	R2A-agar ^a (CFU g ⁻¹)	Petrifilm ^a (CFU g ⁻¹)
0-10	17.25	3.7	7.47	6.5 10 ⁶	2.1 10 ⁷
35-45	14.81	2.1	7.79	2.1 10 ⁴	7.2 10 ⁴
150-155	14.97	1.9	8.73	2.5 10 ³	4.6 10 ³

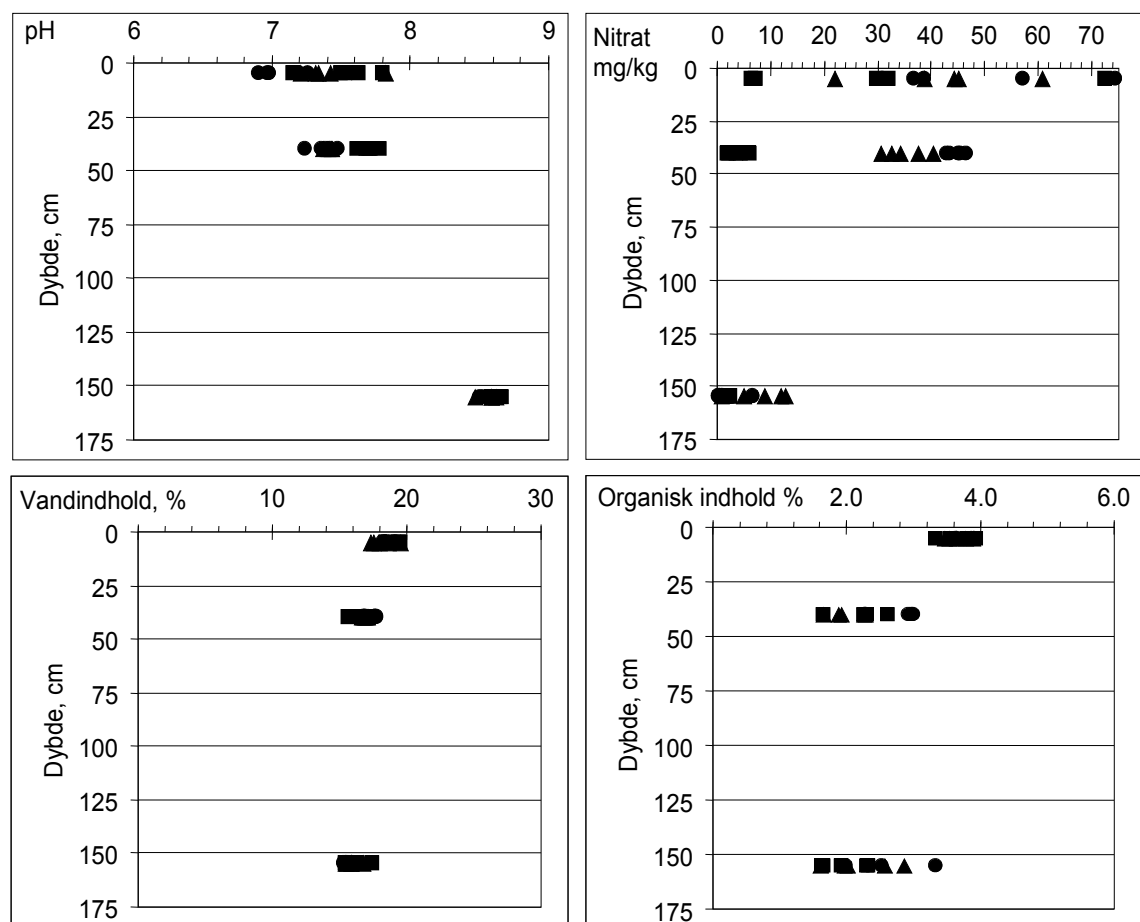
^aR2A og Petrifilm® er to medier til at tælle kollonidannende bakterier (CFU).

I modsætning til sandjordsprofiler har lerjordsprofiler som regel et noget højere indhold af organisk stof under pløjelaget (0-30 cm), tabel 12.1 og figur 12.2. Det ses også at pH stiger næsten 1,5 enhed med dybden som følge af det større kalkindhold. Det betyder meget for såvel sorption som for mikroorganismernes aktivitet. Som det også fremgår er variationen også stor specielt i overjorden både med hensyn til pH og nitratinhold. Prøverne som er

anvendt er homogeniserede 500 g frisk vægt. Antallet af bakterier falder med tre størrelsesordner fra pløjelag til underjord i 1,5 meters dybde.

12.4.2 Mikrobiologi i sprækker og matrix

Prøver af bulk-jord fra dybderne 0, 35 og 150 cm viser en aftagende mikrobiel aktivitet ned gennem jordprofilet, tabel 12.2. For både ASA og FDA er aktiviteten i 150 cm's dybde under 3 pct. af niveauet i pløjelaget. ASA udviser den mindste rumlige variation i de enkelte jorddybder, men variationen er relativ ensartet for de to parametre. Den mikrobielle biomasse, estimeret ud fra substrat-induceret respiration, falder med en faktor ti ned gennem jordprofilet. Den mikrobielle diversitet, estimeret ved Shannon-Weaver indexet (H'), viser at den potentielle mikrobielle substratudnyttelse er sammenlignelig i alle tre jorddybder.



Figur 12.2. pH (målt i vand), nitrat- og vandindhold samt indhold af organisk stof i prøver udtaget ved Højstrup.

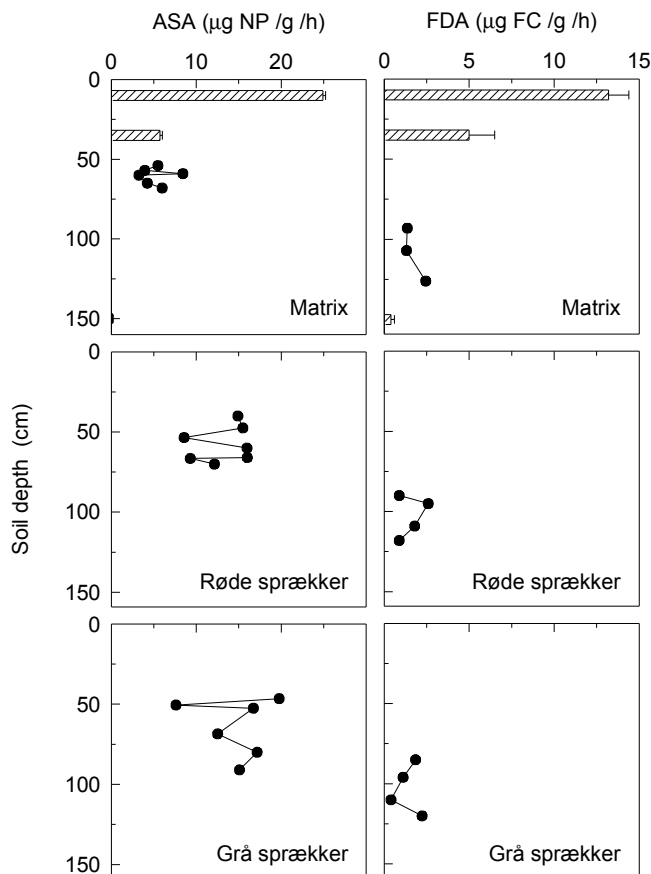
Arylsulfatase aktiviteten (ASA) i jord fra makroporer ligger højere end niveauet for ASA i omgivende matrix-jord og jord fra bulkprøver fra 35 og 150 cm's dybde, figur 12.3. Det betyder, at der i makroporerne findes en relativ høj ASA selv i dybe jordlag (ned til ~100 cm). Samtidig tyder resultaterne på, at ASA i aktive og inaktive makroporer ikke er kvantitativt forskellig. Disse resultater fra profilvæg 1 svarer delvis til resultaterne for FDA fra profilvæg

2. Her observeres også, at aktiviteten i hydraulisk aktive og inaktive makroporer ligger på samme niveau. Til gengæld er FDA hydrolysen i disse makroporer ikke højere end niveauet i omgivende matrix-jord og jord fra bulk-prøver, figur 12.3.

Tabel 12.2. Mikrobiel aktivitet, biomasse og diversitet (H') i prøver af matrix-jord fra Højstrup. Data er middel $\pm$ standardfejl af 4 til 12 jordprøver (N). ASA, arylsulfatase aktivitet; FDA, fluorescein diacetat hydrolyse; NP, nitrophenol; FC, fluorescein.

Dybde (cm)	n	ASA ($\mu\text{g NP /g /h}$)	FDA ($\mu\text{g FC /g /h}$)	Biomasse ($\mu\text{g C /g}$)	Diversitet (H')
0-10	4	24.9 ± 0.3	13.6 ± 1.2	312 ± 30	3.1 ± 0.1
35-45	12	5.7 ± 0.3	5.0 ± 1.5	<50	2.6 ± 0.2
150-155	12	<0.5	<0.5	<50	2.8 ± 0.1

Arylsulfatase aktiviteten (ASA) i jord fra makroporer ligger højere end niveauet for ASA i omgivende matrix-jord og jord fra bulkprøver fra 35 og 150 cm's dybde, figur 12.3. Det betyder, at der i makroporerne findes en relativ høj ASA selv i dybe jordlag (ned til ~100 cm). Samtidig tyder resultaterne på, at ASA i aktive og inaktive makroporer ikke er kvantitativt forskellig. Disse resultater fra profilvæg 1 svarer delvis til resultaterne for FDA fra profilvæg 2. Her observeres også, at aktiviteten i hydraulisk aktive og inaktive makroporer ligger på samme niveau. Til gengæld er FDA hydrolysen i disse makroporer ikke højere end niveauet i omgivende matrix-jord og jord fra bulk-prøver, figur 12.3.



Figur 12.3. Mikrobiel aktivitet i prøver af matrix og makroporer udtaget ved Højstrup. Skraverede søjler viser aktiviteten i bulk-prøver fra 0-10 cm, 35-45 cm og 150-155 cm's dybde. Disse data er middel $\pm$ standardfejl af 4 til 12 jordprøver. Sorte cirkler viser aktiviteten i mindre prøver af matrix (øverst), i jord fra hydraulisk aktive makroporer (røde sprækker; midterst) og i jord fra hydraulisk inaktive makroporer (grå sprækker; nederst). Disse data er baseret på enkelte jordprøver. ASA, arylsulfatase aktivitet; FDA, fluorescein diacetat hydrolyse; NP, nitrophenol; FC, fluorescein.

12.4.3 Sorption af pesticider målt på bulkprøver

Sorptions og desorptions isotermer blev tilnærmet en Freundlich sorption isoterm:

$$C_s = K_F \times C_e^{n_F}$$

hvor C_s (mg/kg) er koncentrationen af sorberet pesticid og C_e (mg/l) er koncentrationen af pesticid i jordvæsken. K_F ($\text{mg}^{(1-n_F)} \times \text{L}^{n_F} / \text{kg}$) og n_F er konstanter.

Sorptionen for de tre undersøgte pesticider varierer ganske meget både med hensyn til dybde og til stof. MCPA er det stof som helt klart bindes mindst til jordmatricen og som derfor i dette profil generelt vil være tilgængeligt for nedbrydning i jordvandet, tabel 12.3. Metamitron bindes kun en lidt mere end MCPA og vil også i underjorden være fortrinsvis i jordvæsken. Derimod bindes glyphosat meget stærkt til lermatricen og kun en ringe mængde vil befinde sig i jordvæsken.

Tabel 12.3. Freundlich konstanter for de tre undersøgte stoffer målt som triplikater på bulk prøver.

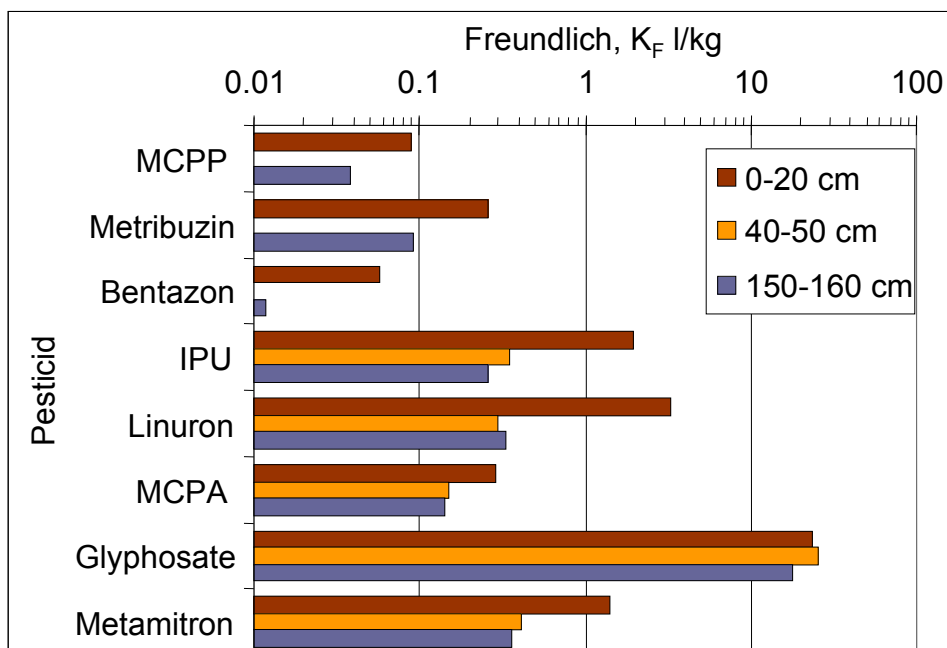
Dybde (cm)	MCPA		Glyphosat		Metamitron	
	K _F	N	K _F	n	K _F	n
0-10	0,29	0,96	23,3	0,64	1,4	0,8
35-45	0,15	0,98	25,3	0,61	0,41	0,99
155-165	0,14	0,98	18,1	0,55	0,36	1,1

Når et stof bindes så stærkt som glyphosat er det afgørende for nedbrydningen af stoffet om bindingen er reversibel, det vil sige hvorvidt stoffet kan frigøres til jordvæsken og derved blive tilgængelig for bakteriel nedbrydning. I modsat fald opnås persistens af stoffet, som vist tidligere (Jacobsen, 2003). Desorptionen er såvel tids- som koncentrationsafhængig og afhænger af bindingstypen til jordmatricen (Jensen et al., 2004). I de to øverste jordlag er det ca. 30 til 60 % af den bundne mængde, der kan frigøres igen til jordvæsken, mens det i det dybe jordlag (150 cm) er fra 50 til 85 % som kan gøres tilgængelig for nedbrydning (Strange-Hansen, 2004).

Tabel 12.4. Desorptionsprocenter for glyphosat ved forskellige koncentrationer

Initial koncentration mg/l	0-10 cm	35-45 cm	155-165 cm
0.5	32.8	27.0	49.2
1.0	40.5	37.7	44.9
5.0	45.8	42.8	57.4
50.0	56.8	57.3	66.5
500.0	57.9	55.4	82.2

Måling af sorptionen på 8 forskellige pesticider viser at med undtagelse af glyphosat findes den højeste sorptionskoefficient K_F i overjorden hvor mængden af organiske stof er største og pH lavest. For tre stoffers vedkommende (MCPA, metribuzin og bentazon) er sorptionen så lille i 35-45 cm, at sorptionen ikke har kunne bestemmes.



Figur 12.4. Sorption af 8 pesticider i tre dybder; angivet som Freundlich isotermens K_F .

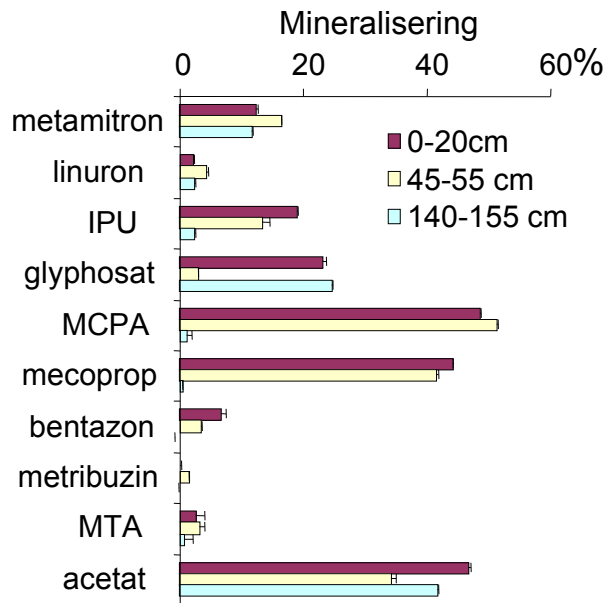
12.4.4 Mineralisering i bulkprøver fra tre dybder

For 9 stoffer (Metamitron, Linuron, IPU, glyphosat, MCPA, MCPP, Bentazon, Metamitron og MTA) er der udført målinger af mineraliseringsraterne i de tre dybder ved anvendelse af bulkprøver. Der er samtidig udført måling af omsætningen af acetat for at få et udtryk for den mikrobiologiske aktivitet i de tre dybder, figur 12.5. Det fremgår at aktiviteten i de tre dybder er nogen lunde lige stor. For phenoxysyrerne MCPP og MCPA ses mineraliseringen at være af samme størrelsesorden som for acetat i de to øverste dybder, mens mineraliseringen stort set ikke er tilstede i 140-150 cm. For Linuron, Bentazon, metribuzin og MTA er mineraliseringspotentialet manglende i alle dybder. Derimod mineraliseres såvel Metamitron som IPU i de to øverste dybder, Metamitron i alle dybder. Glyphosate mineraliseres, men har en ringe mineralisering umiddelbar under pløjelaget.

12.4.5 Mineralisering på intakte søjler

For at undersøge hvorvidt mineraliseringsraterne er afhængige af inkuberingsmetoden blev der udført målinger på intakte jordsøjler med ca. 450 g jord i naturlig lejring i modsætning til bulkprøvernes 10 g homogeniseret jord. For hver dybde og stof er der udført 5 replikater.

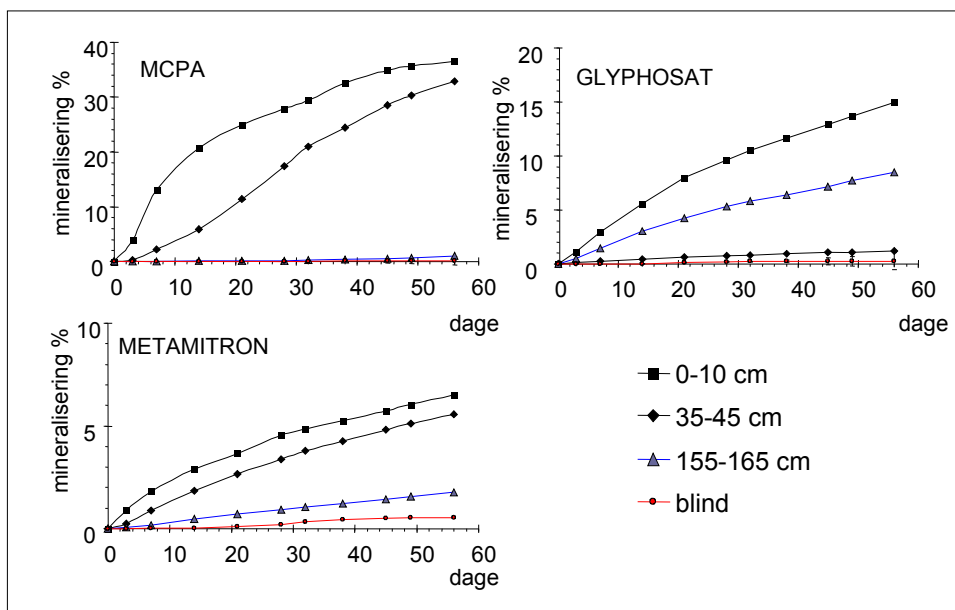
MCPA følger stort set det samme mønster som for bulkprøverne, idet de to øverste dybder har en næsten ens høj mineraliseringsrate og dybden 155-165 cm stort set ikke mineraliserer, figur 12.6.



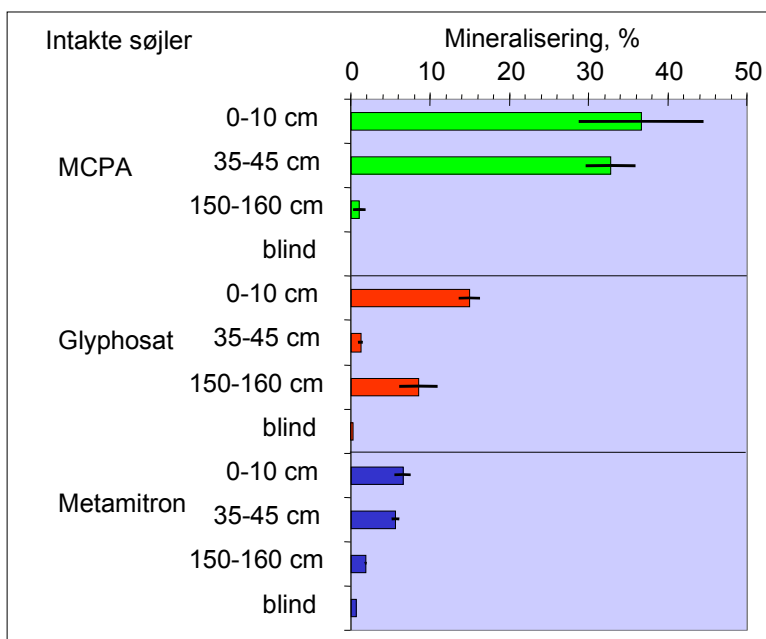
Figur 12.5. Mineralisering i % efter 60 dage af 9 pesticider udført på 10 g bulkprøver (omblandet poseprøver)

Da der er anvendt intakte søjler - med den heterogenitet dette indebærer - viser forsøgene at under de givne forhold er anvendelsen af 450 g intakt jord en rimelig mængde i forhold til den spredning på medianværdien man derved opnår, figur 12.7.

Da indholdet af organisk stof anses for i visse tilfælde at afspejle den biologiske aktivitet, idet den fornødne kulstofkilde er tilstede, er sammenhørende værdier for mineraliseringen af de tre pesticider og de tilsvarende organiske indhold i søjlerne sammenstillet, figur 12.8. Det fremgår at der ikke umiddelbart synes at være en univariat sammenhæng mellem disse parametre.



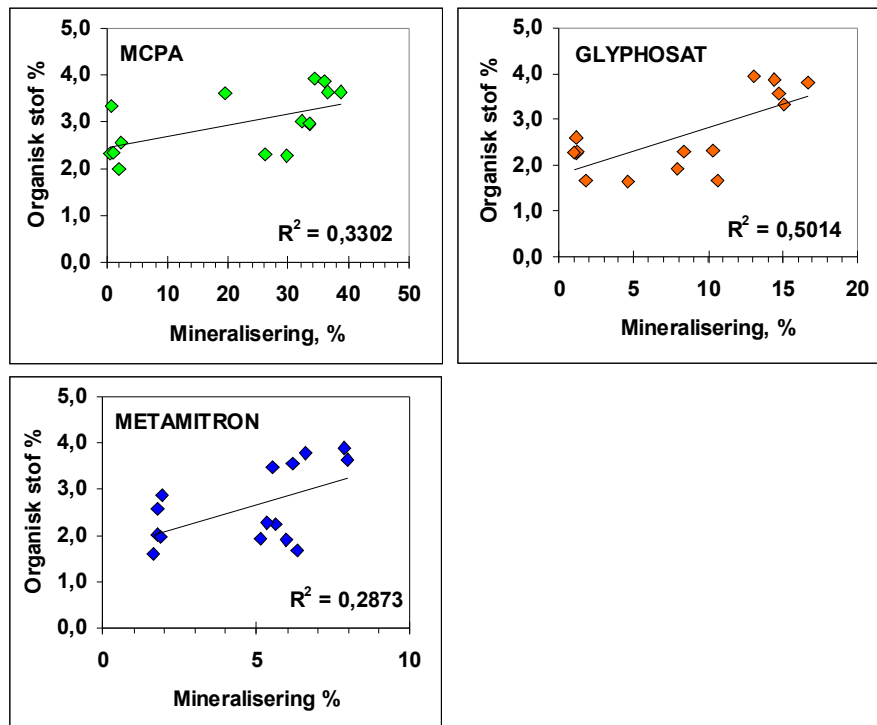
Figur 12.6. Mineralisering i % af 3 pesticider udført på intakte søjleprøver (450 g) fra tre dybder med angivelse af median værdi.



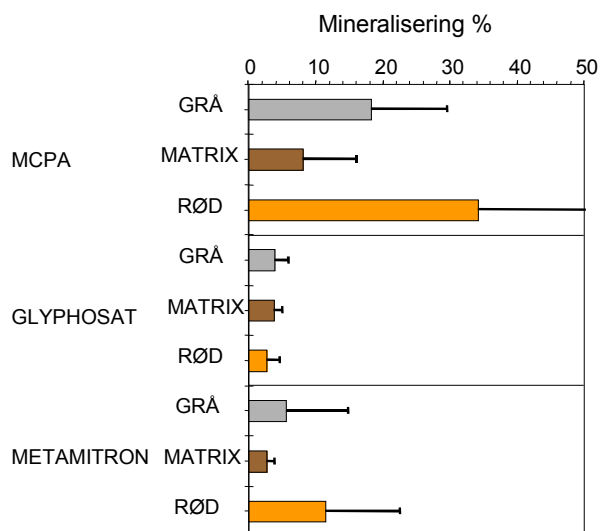
Figur 12.7. Mineralisering i % efter 56 dage af 3 pesticider, MCPA, glyphosat og metami- tron, udført på intakte søjler med angivelse af spredningen på medianen (n=5)

12.4.6 Mineralisering i sprækker og matrix

For at afklare om hydraulisk aktive sprækker har et større nedbrydningspotentialer end hydraulisk inaktive sprækker og matrix blev der udført målinger af mineraliseringen på prøver udtaget fra disse tre miljøer. Skellen mellem aktive og inaktive sprækker blev vurderet efter indfarvningen af sprækkerne med det tre dage inden udsprede farvestof sulforhodamin. Målingerne viste, at der ikke kunne ses nogen umiddelbar relation mellem sprækkerne hydrauliske aktivitet og mineraliseringen, figur 12.9. Derimod kunne man for MCPA og metamitron se forskel på nedbrydning i sprækker og i matrix. Dette var ikke tilfældet med glyphosat.

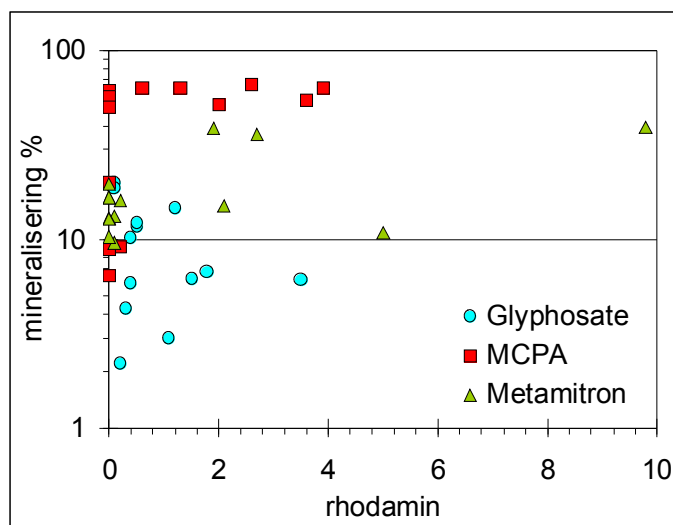


Figur 12.8. Forholdet mellem mineraliseringen (%) af henholdsvis MCPA, glyphosat samt metamitron og det organiske indhold (%).



Figur 12.9. Mineralisering af henholdsvis MCPA, glyphosat og metamitron i % efter 60 dage i sprækker og matrix

For at se om der var en sammenhæng mellem rødfarvningen i sprækkerne og mineraliseringen målt indholdet af ekstraherbart Sulforhodamin B på prøverne og dette blev sammenstillet med værdier for mineraliseringen, figur 12.10. Det fremgår at der ikke er en umiddelbar sammenhæng mellem rødfarvningen og mineraliseringspotentiallet.



Figur 12.10. Forholdet mellem indholdet af Sulforhodamin B og mineralisering af de tre pesticider MCPA, glyphosat og metamitron.

12.4.7 Variabiliteten i et 3 x 1,5 meter lerprofil

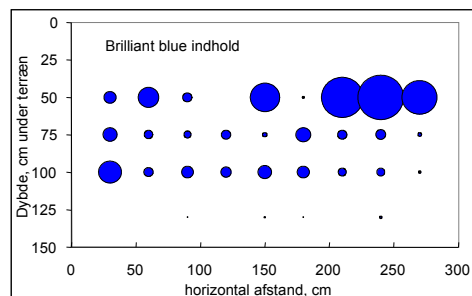
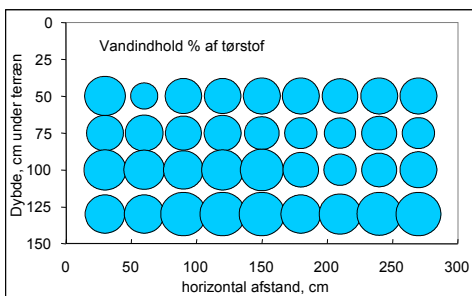
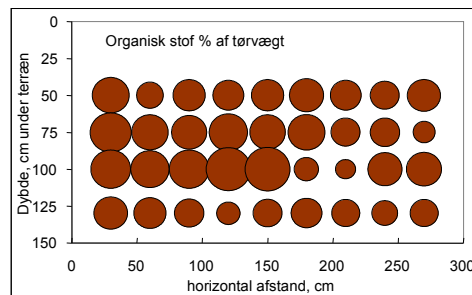
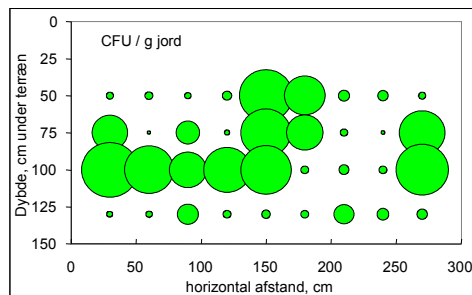
For at undersøge hvor store forskelle man ville kunne finde inden for et mindre plot på lerjord, blev der udført målinger på et profil fra 50 cm til 135 cm under overfladen i 36 punkter. Profilet fremstod umiddelbart ensartet med en zonering i ca. 90 cm dybde, figur 12.11, idet pløjelaget var fjernet forinden.



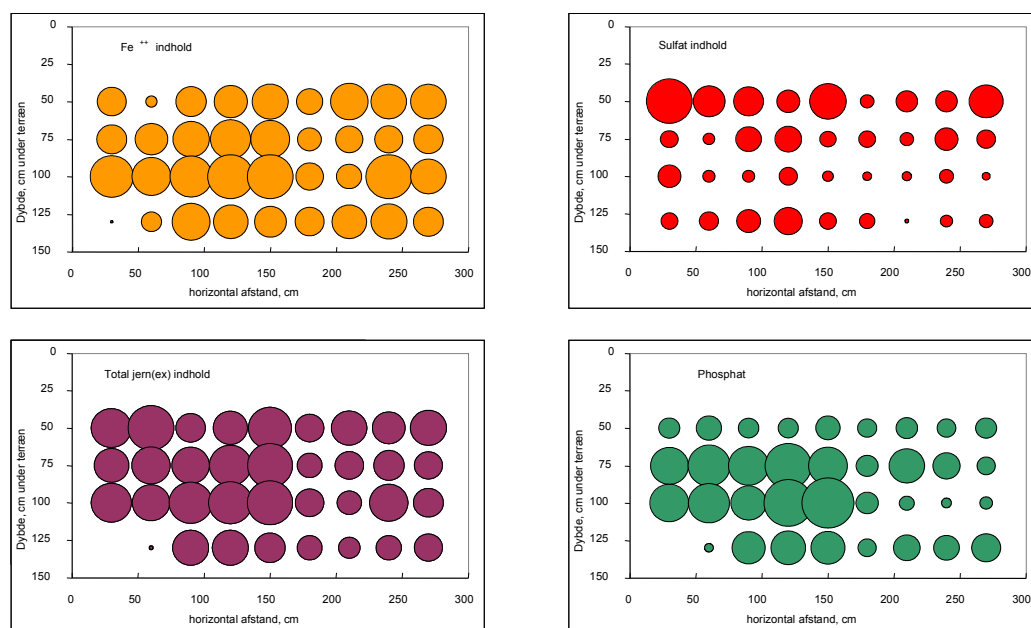
Figur 12.11. Profilet efter prøvetagningen. Bemærk hullerne efter plugning.

Analyser af de udtagne plugs viste at vandindhold og organisk indhold ikke varierede stærkt, figur 12.12. Derimod var antallet af bakterier (CFU) meget forskelligt både over dybden og horisontalt. Ligeledes varierede indholdet af det udsprede farvestof brilliant blue ganske betydeligt. Nogen umiddelbar sammenhæng mellem disse parametre kunne ikke etableres.

Måling af sulfat, fosfat, jern(II) og total ekstraherbart jern viste også en ganske stor variation såvel horisontalt som vertikalt, figur 12.13. Der kunne måske ses et mindre område hvor et mere ensartet koncentrationsniveau blev målt. Men generelt må det konstateres at prøver inden for et profil af denne størrelse udviser endog ganske store variationer selv når prøvestørrelsen er ca. 100 g.



Figur 12.2. Mikrobiel aktivitet, indhold af organisk stof, vandindhold og ekstraheret indhold af traceren Brilliant Blue i plugs.



Figur 12.13. Indhold og fordeling af ferrojern, totalt ekstraherbart jern, sulfat og fosfat i plugs.

12.5 Fortolkning og diskussion

12.5.1 Metodiske forhold

Undersøgelsen på Højstrup viser, at det er muligt at udtage jordprøver fra hydraulisk aktive og inaktive makroporer i dybere jordlag. Den opnåelige prøvemængde er dog beskeden (< 5 gram) og dette begrænser de analytiske muligheder for at måle den mikrobielle aktivitet i prøverne. Det betyder at analysemetoderne skal optimeres i forhold til en begrænset prøvestørrelse. I det udførte forsøg blev dette gjort bl.a. ved at nedsætte prøvemængden anvendt til analyse for baggrundsfarvning i de spektrofotometriske assay for ASA. Dette krævede en efterfølgende korrektion i forhold til prøvestørrelsen anvendt til måling af den samlede farveudvikling. Sammenhængen mellem prøvestørrelse og baggrundsfarvning i blankprøverne viste, at en prøvestørrelse på under 0,5 g gav en markant forøgelse af den relative baggrundsfarvning. Derfor vurderes det, at en prøvestørrelse på mindst 0,5 g er optimal for ASA i makroporejorden. Analysens følsomhed kan efterfølgende øges ved at forlænge inkubationstiden og/eller inkubationstemperaturen.

Med så små prøvestørrelse er det også meget vanskeligt at bestemme mineralisering og sorption, idet begge processer kan være knyttet til meget små nicher og derfor vil målingerne være yderst afhængige af tilfældigheder i prøvernes beskaffenhed.

Selve prøvetagningen er også behæftet med nogen usikkerhed, idet sprækkernes apertur generelt er lille (mm).

Måling af mineralisering i prøver fra matrix og sprækker, bulk-prøver og intakte søjler viser nogen lunde den samme tendens, men omsætningen per areal/vægt/volumen ganske forskellig. Alle tre anvendte metoder er baseret på ikke dynamiske forhold, hvilket vil sige, at vand og stofbevægelse udelukkende er diffusionsbestemt.

12.5.2 Mikrobiel aktivitet i makroporer

Resultaterne fra Højstrup viser, at makroporer i lerjord kan have en højere mikrobiel aktivitet end der findes i den omgivende matrix-jord. Dette underbygger resultater fra andre danske jorde (Vinther et al., 1999; 2001), hvor også indholdet af nitrat og vandopløseligt kulstof viste sig at være forhøjet i makroporemiljøet. I lerjorden fra Højstrup var ASA tydeligt forøget i makroporemiljøet, mens FDA ikke var højere end i det omgivende matrixjord. Et lignende resultat blev tidligere fundet i lerjord fra Flakkebjerg, hvor kun ASA var statistisk signifikant forøget i makroporer versus matrixjord (Vinther et al., 2001).

Analyserne af mikrobiel aktivitet i hydraulisk aktive og inaktive makroporer er uden fortillæde og tyder på, at der ikke er kvantitativ forskel på det mikrobielle miljø i de to typer af makroporer. Dette kan skyldes, at opdelingen mellem aktive og inaktive makroporer er dynamisk, således at vandtransporten foregår i forskellige makroporer til forskellige tidspunkter. For de mikrobielle undersøgelser betyder resultatet, at det ikke er nødvendigt eksperimentelt at skelne mellem de to typer makroporer for at skaffe repræsentative data for mikrobiel omsætning i makroporemiljøet. I praksis betyder det, at prøveindsamlingen kan foregå uden tracertilførsel, hvilket styrker muligheden for at indhente data fra udgravede jordprofiler.

12.5.3 Mineralisering og sorption i ler og makroporer

Mineraliseringen målt i søjler og på bulk-prøver viser ret stor samhörighed, og om den procentuelle fjernelse (mineralisering) af pesticider er nogenlunde sammenstemmende end beregningsmæssige problemer med hensyn til angivelsen af mineraliseringen på vægt, volumen eller areal kan volde problemer. Derimod synes målingerne på sprække-matrix prøverne at adskille sig fra den procentuelle mineralisering. Derfor vil der ikke være basis for at anvende detailprøver som disse ved måling af mineraliseringspotentialet i lerjord når det drejer sig om analyser på plot eller markniveau. Men da alle målinger er foretaget på stationære opstillinger vil disse ganske givet være forskellige fra målinger i et dynamisk system hvor vandet bevæger sig gennem sprækker og matrix som i lysimetre.

Desorption betyder meget for tilgængeligheden af pesticiderne og deres metabolitter og derfor må det anbefales at man udfører målinger af desorptionskinetik på prøver eller anvender lysimeterstudier for en bedre vurdering af nedsivningsrisikoen (Jensen et al., 2004; Jacobsen et al., 2004; Strange-Hansen et al. 2004).

12.5.4 Relevans for zonerings af lerjorde

Makroporer i lerjord muliggør udvaskning af pesticider til dybere jordlag uden mikrobiel nedbrydning i den omgivende matrixjord. Den kvantitative risiko for udvaskning af pesticider fra lerjord afhænger derfor bl.a. af den mikrobielle omsætning af pesticider i makroporemiljøet. Sammenhængen mellem makroporetransport og nedbrydning af pesticider er kun sparsomt belyst for danske lerjorde. Derfor skal datagrundlaget udvides, hvis en kvantitativ vurdering af makroporetransport skal inkluderes i forsøget på at kortlægge risikoen for udvaskning af pesticider fra forskellige lerjorde. Kvantitativ måling af pesticidnedbrydning er ønskelig, men økonomisk urealistisk, når et større antal jordprøver rutinemæssigt skal screenes. Ved at anvende korrelerbare mål for den mikrobielle aktivitet, som for eksempel ASA, nedsættes den analytiske belastning. Derfor kan de generelle mikrobielle parametre inkluderes som zoneringsværktøj i samspil med øvrige pedologiske og jordfysiske parametre. Omsætningen er desuden som alle andre biologiske processer temperatúrafhængig (Walker et al., 1997).

For at opnå de optimale betingelser for at kunne vurdere udvaskningsrisikoen, skal disse målinger suppleres med målinger, hvor sorption-desorption og nedbrydning finder sted i samme system og hvor vandbevægelsen nærmer sig det naturlige (Aamand og Jacobsen, 2001). Herudover skal der på alle strukturjorder vurderes hvor stor den kolloid- og partikelbårne transport udgør.

De pesticider, der anvendes i dag, er meget forskelligartede og repræsenterer både letopløselige og stærkt adsorberende pesticider. Det er derfor vigtigt, at man i risikovurderingen tager højde for transport af både opløst og bundet pesticid. Tidligere har man haft den overbevisning, at det udelukkende var jordens vand- og gasfase, der var mobile og derfor bidrager til udvaskning af pesticider fra jorden. Dette har f.eks. haft betydning for hvilke egenskaber, man har valgt at lægge vægt på i forbindelse med godkendelse af pesticider. Således har man ment, at pesticider som bindes hårdt til jordpartiklerne ikke udvaskes.

Ligeledes har undersøgelser vist, at bindingsprocesserne i overjorden også har stor betydning for pesticidernes biotilgængelighed og derved deres direkte effekter i jordbundsmiljøet (Scribner et al., 1992; Ronday et al., 1997; Sijm et al., 2000; Jensen et al., 2004).

Kolloider der frigives fra den øverste del af landbrugsjorden kan medbringe en række pesticider og nedbrydningsprodukter bundet til overfladerne. Specielt stoffer med en høj K_{oc} værdi binder sig til såvel organiske kolloider som organisk coatede lerkolloider (Jones og Bryan, 1998; Pignatello, 1998). For stoffer med affinitet over for uorganiske overflader kan det også forventes, at en del af stoftransporten foregår kolloidbåren. Grundlaget for affinitet er dog langt fra entydigt og afklaret.

Nedbrydning og mineralisering af pesticider er hurtigere, når pesticidet er opløst i forhold til, når det er kolloidbundet. Enkelte studier indikerer at omsætningen kan gå i stå når stoffet er bundet (Jensen et al., 2004). Når kolloid/pesticid komplekset transporteres ned gennem jorden vil muligheden for flokkulering og filtrering fremmes i underjordshorisonter med høj ionstyrke. Flokkuleringskinetikken af kolloid-pesticid komplekset har derfor afgørende betydning for den videre transport.

12.6 Litteratur

- Aamand, J. og O. S. Jacobsen. 2001. Sorption and degradation of glyphosate and dichlo-benil in fractured clay In: Walker A (ed) Pesticide behaviour in soils and water, 2001-BCPC Symposium Proc. No78: 205-210
- Elsgaard, L., Andersen, G.H. og Eriksen, J. 2002. Measurement of arylsulfatase activity in agricultural soils using a simplified assay. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 81-84.
- Elsgaard, L., Pojana, G., Miraval, T., Eriksen, J. & Marcomini, A. 2003. Biodegradation of linear alkylbenzene sulfonates in sulfate-leached soil mesocoms. *Chemosphere* 50: 929-937.
- Jacobsen, O.S. 2003. Degradation, sorption and persistence of glyphosate and the metabolite AMPA in a fractured clay soil profile In: (Eds) Del Re, A.A.M., Capri, E., Padovani, L., Trevisan, M. Pesticide in air, plant, soil and water system. p 137-144
- Jensen, P. H., Hansen, H. C. B., Rasmussen, J. og O.S. Jacobsen. 2004 Sorption-controlled degradation kinetics of MCPA in soil. *Envir. Science Technol.* (submitted)
- Jones, M.N. og N.D. Bryan. 1998. Colloidal properties of humic substances. *Adv. Colloid Interface Science* 78: 1-48
- Pignatello, J.J. 1998. Soil organic matter as a nanoporous sorbent of organic pollutants. *Adv. Colloid Interface Science* 76-77: 445-467
- Ronday, R., Van Kammen-Polman, A. M. M., Dekker, A., Houx, N. W. H., og Leistra, M. 1997. Persistence and toxicological effects of pesticides in topsoil: Use of the equilibrium partitioning theory. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 16: 601-607.
- Scribner, S. L., Benzing, T. R., Sun, S. B., og Boyd, S. A. 1992. Desorption and bioavailability of aged simazine residues in soil from. *J. Environ. Qual.* 21: 115-120.
- Sijm, D., Kraaij, R., og Belfroid, A., 2000. Bioavailability in soil or sediment: Exposure of different organisms and approaches to study it. *Environmental Pollution*, 108: 113-119
- Strange-Hansen, R., Holm, P. E., Jacobsen, O. S. og C.S. Jacobsen. 2004 Sorption, mineralization and mobility of *N*-(phosphonomethyl)glycine (glyphosate) in five different types of gravel. *Pest. Manag. Sci.*, 60:570–578
- Vinther, F.P., Eiland, F., Lind, A.M. og L. Elsgaard. 1999. Microbial biomass and numbers of denitrifiers related to macropore channels in agricultural and forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 31: 603-611.
- Vinther, F.P., Elsgaard, L. og Jacobsen, O.S. 2001. Heterogeneity of bacterial populations and pesticide degradation potentials in the unsaturated zone of loamy and sandy soils. *Biology and Fertility of Soils* 33: 514-520.

Vinther, F.P., Mortensen, G.K. og Elsgaard, L. 2003. Effects of linear alkylbenzene sulphonates on functional diversity of microbial communities in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22: 35-39.

Walker, A., Helweg, A. og O.S. Jacobsen. 1997. Temperature and pesticide transformation, in *Soil Persistence Models and EU Registration*, Ed by Boesten, J., Helweg, A., Businelli, M., Bergstrom, L., Schaefer, H., Delmas, A., Kloskowski, R., Walker, A., Travis, K., Smeets, L., Jones, R., Vanderbroeck, V., Van Der Linden, A., Broese, S., Klein, M., Layton, R., Jacobsen, O.S. og Yon, D., EU Focus Group, Brussels, Belgium, pp 10–24 (1997).

West, A. W. og G.P. Sparling. 1986. Modification to the substrate induced respiration method to permit measurement of microbial biomass in soils of differing water contents. *Journal of Microbiological Methods* 5:177-189.

Projektet har haft til formål at afklare hvorvidt der kan etableres en metode for identifikation af særligt pesticidfølsomme danske lerjorde.

Samlet vurderes det muligt at tilvejebringe det nødvendige grundlag for at udvikle et zoneringskoncept for særligt følsomme lerjorde. Det færdige koncept og grundlaget for metodens anvendelse forudsætter yderligere metodeudvikling og fastlæggelse af nødvendige databehov.

