

Vurdering af mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme lerområder (SFO-ler) på grundlag af eksisterende data

Udarbejdet for Naturstyrelsen

Peter Gravesen, Ingelise Balling Møller, Giulio Vignoli,
Knud Erik S. Klint, Walther Brusch, Bertel Nilsson,
Carsten Langtofte Larsen, Rene Hjuler
& Annette E. Rosenbom



Vurdering af mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme lerområder (SFO-ler) på grundlag af eksisterende data

Udarbejdet for Naturstyrelsen

Peter Gravesen, Ingelise Møller Balling, Giulio Vignoli,
Knud Erik S. Klint, Walther Brusch, Bertel Nilsson,
Carsten Langtofte Larsen, Rene Juhler
& Annette E. Rosenbom

Med bidrag fra Bo Vangsø Iversen, Århus Universitet

0.	Resume	7
1.	Indledning	20
2.	Baggrund	21
2.1	Indledning.....	21
2.2	KUPA 2009- Resultater og konklusioner	25
3.	Opgavens mål og indhold	32
3.1	Grundvandskortlægning-geofysisk kortlægning	32
3.2	Makroporer: Bioporer, sprækker og sandlinser	33
3.3	Relationer til VAP lermarkerne.....	33
3.4	Muligheder for udpegning af pesticidfølsomme områder	34
4.	Aflejringerne karakterer – jordbund og geologi	35
4.1	Jordbund	35
4.2	Geologiske leraflejringer	35
4.2.1	Moræneler	35
4.2.2	Smeltevandsler	49
5.	Pesticiders egenskaber	51
5.1	Baggrund for pesticider	51
5.2	Pesticider og leraflejringer	53
6.	Pesticidindhold i grundvandet og magasinforhold i Stevns, Hedeland og Dalsmose-Fuglebjerg områderne	55
7.	Generel geofysisk grundvandskortlægning på landsplan	69
7.1	Indledning.....	69
7.2	Baggrund.....	70
7.2.1	Elektriske metoder	70
7.2.2	Elektromagnetiske metoder	71
7.2.3	Seismik.....	74
7.2.4	Borehulslogs	75
7.2.5	Magnetisk resonans sondering.....	76
7.3	Beskrivelse af geofysiske metoder	76
7.3.1	PACEP og PACES.....	77
7.3.2	MEP.....	78
7.3.3	SkyTEM.....	79
7.3.4	Tolkningsmetoder.....	82
7.4	Eksempler	83

7.4.1	Morænelers resistivitet.....	83
7.4.2	Analyse af syntetiske 1D modeller.....	84
7.4.3	Felteksempler.....	95
7.5	Vurdering af metoder til kortlægning af morænelerslag	98
7.5.1	Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge tynde overfladenære morænelerslag fra jordoverfladen og nedad.	99
7.5.2	Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge interne strukturer i de overfladenære morænelerslag	102
7.5.3	Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge overfladenære morænelerslags horisontale udbredelse over større arealer.	104
7.6	Sammenfatning.....	104
8.	Geofysisk kortlægning i Sydvestsjælland	106
8.1	Indledning.....	106
8.2	Lokaliteter.....	107
8.3	Geofysiske metoder	113
8.4	Sammenstilling af data.....	115
8.5	Vurdering af metoder	120
8.5.1	Tykkelse af lerlag	120
8.5.2	Horisontale og vertikale heterogeniteter.....	121
8.6	Sammenfatning.....	122
9.	Overfladenær morænelers egenskaber	123
9.1	Indledning.....	124
9.2	Stevns området.....	125
9.2.1	Jordbund	128
9.2.2	Grundvand og grundvandsmagasiner	128
9.2.3	Lertykkelser.....	131
9.2.4	Lokaliteter: Leregenskaber og makroporer.....	132
9.2.5	Redoxforhold i leraflejringerne	141
9.2.6	Redoxforhold i grundvandet (Ilt - og nitratindhold)	145
9.2.7	Pesticidfund i borerger	147
9.2.8	Sammenfatning.....	148
9.3	Hedeland området	149
9.3.1	Jordbund	152
9.3.2	Grundvand og grundvandsmagasiner	153
9.3.3	Lertykkelser.....	154
9.3.4	Lokaliteter og lertyper	155
9.3.5	Redoxforhold i leraflejringerne	168
9.3.6	Redoxforhold i grundvand (Ilt- og nitratforhold)....	171
9.3.7	Pesticidfund i borerger	172

9.3.8	Sammenfatning	173
10.	Samlende konklusioner for områderne	175
10.1	Makroporedata: sprækker og sandlinser	175
10.2	Makroporer og dybden	176
10.3	Morænelers tykkelse og oxidationsforhold	179
10.4	Pesticider i grundvandet	184
10.5	Makroporer, redoxforhold og lertykkelser	185
10.6	Hovedkonklusioner.....	190
11.	Det Poly Morfologiske Koncept (PM konceptet)	192
11.1	Indhold.....	192
11.2	Muligheder for anvendelse.....	197
11.3	Sammenfatning	199
12.	Relationer til VAP lermarkerne	201
12.1	Indledning.....	201
12.2	VAP markernes karakterer.....	201
12.3	VAP-lermarkerne og de undersøgte områder	217
13.	Opsummering for hele rapporten	223
13.1	Makroporer, oxidation, lertykkelser og geologiske modeller.....	223
13.2	Geofysisk kortlægning: Udbredelse, tykkelser og interne strukturer	225
13.3	Det Poly morfologiske koncept (PM konceptet) og arealafgrænsninger	226
13.4	Pesticidfund.....	226
13.5	Relationer til VAP lermarkerne.....	226
14.	Konklusioner	227
14.1	Vurderinger af mulighederne for at udpege pesticid følsomme områder (SFO) som er mere følsomme end VAP lermarkerne.....	227
14.2	Behov for nye informationer og de økonomiske behov.....	235
15.	Referencer	238
16.	Bilag 1. PM konceptet	246
17.	Bilag 2. Feltlokalteter i forbindelse med geofysisk kortlægning: Dalmoose-Fuglebjerg	251
18.	Bilag 3. Geofysiske metoder	258

19.	Bilag 4. Feltlokaliteter på Stevns	274
20.	Bilag 5. Feltlokaliteter på Hedeland området	282
21.	Bilag 6. VAP lerlokaliteter	295

0. Resume

Indledning

Det har været målet med projektet at prøve at vurdere, hvordan indsamlede eksisterende data og nye forskningsresultater fra forskellige opgaver, herunder Grundvandskortlægningen, kan anvendes målrettet i forhold til vurderingen af sprøjtefølsomheden for ca. 36 % af Danmarks areal. Dette areal er ved modelsimulering fundet følsomt for pesticidudvaskning gennem aflejringer af moræneler fra bunden af rodzonen, hvilket er potentiel kilde for transport af pesticider ned til grundvandsmagasinerne (Modellering i GEUS & DJF 2009).

Der har været to hovedaktiviteter indenfor projektet:

- I) Vurderinger af de eksisterende geofysiske kortlægninger udført i forbindelse med Grundvandskortlægningen. Desuden er der foretaget vurdering af de geofysiske data på et udvalgt område på Sjælland, Dalmoose-Fuglebjerg området, hvor de geofysiske data kunne sammenlignes med data fra to feltlokaliteter.
- II) Vurderinger af de eksisterende kortlægninger og undersøgelser udført på morænelersaflejringer med fokus på de senere års aktiviteter indenfor to områder på Sjælland: Stevns området med tre feltlokaliteter og Hedeland med seks feltlokaliteter.(Figur 0).

De tre områder er udvalgt på grundlag af PM-konceptet, som væsentligt består af et sammensat geologisk kort (Polymorfologisk kort). Kortet er inddelt i arealer på grundlag af de øverste istidsaflejringer og deres terrænformer og de underliggende terrænformer/grundvandsmagasiner bestående af istidsaflejringer eller ældre kalkaflejringer eller leraflerlinger. Desuden giver kortkonceptet vurdering af sprækkeintensiteter i det øverste moræneler, og morænelers tykkelse indgår også. Kortet er p.t. fremstillet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn m.m..

Ved udvælgelsen af området til undersøgelsen blev der under I) også taget hensyn til, om der var sammenfald mellem geofysiske data og geologiske feltdata, hvilket var tilfældet på Sydvestsjælland med nye SkyTEM målinger.



Figur 0. Kort som viser beliggenhed af de undersøgte områder, lokaliteter og marker. Område I, Stevns: 1. Højstrup, 2. Sigerslev, 3. Gjorslev. Område II, Hedeland: 4. Tune, 5. Kamstrup, 6. Slæggerup, 7. Vadsby, 8. Høje Tåstrup, 9. Kallerup. Område III, Dalmoose-Fuglebjerg: 10. Flakkebjerg, 11. Fårdrup (VAP-mark). Jylland: 12. Estrup (VAP-mark), 13. Silstrup (VAP mark).

De sammenstillede data er blevet vurderet og sammenholdt med data fra VAP- lerområderne for at vurdere deres følsomhed i forhold til hinanden.

Grundlaget for mulighederne for at udpege pesticidfølsomme områder (SFO), som er mere følsomme end VAP lermarkerne, er baseret på leraflejrings karakterer fra terræn til grundvandsmagasinerne. De mange pesticider (forbudte, regulerede og tilladte) har forskellige egenskaber over for sorption og nedbrydning, og derfor vil de opføre sig forskelligt i de geologiske aflejringer og grundvandsmagasinerne i modsætning til f.eks. nitrat. Det er vigtigt at have disse egenskaber i mente, men snart mange års erfaring viser, at mange typer pesticider kan udvaskes til grundvandet.

Der er derfor i denne sammenhæng forsøgt at anskue pesticiderne under et, og der er derfor set på, hvordan leraflejringerens egenskaber kan vurderes som enten beskyttende mod udvaskning eller som medie for transport til grundvandsmagasinet.

Først omtales en række delopgaver, hvorefter mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme områder resumeres.

Gennemgang af de geofysiske metoder, som hidtil er anvendt under grundvandskortlægningen.

Generel gennemgang

Den geofysiske kortlægning i forbindelse med Grundvandskortlægningen er især foretaget indenfor OSD- områderne (Områder med Særlige Drikkevandsinteresser), men der har vist sig behov for, at også stedvis kortlægge indenfor OD-områderne (Områder med Drikkevandsinteresser).

Metoder

De metoder, som overvejende er anvendt indenfor Grundvandskortlægningen, er følgende:

Elektriske metoder: *PACEP, PACES, MEP*

Elektromagnetiske metoder: *TEM, SkyTEM*

Seismiske metoder: Slæbeseismik

Borehulslogging: En række forskellige metoder

Magnetisk resonans: MRS

De metoder, som er angivet med kursiv, er de mest anvendte, og desuden de metoder der er mest anvendelige med hensyn til kontinuert kortlægning af lerlags tykkelse og horisontale udbredelse. Disse metoder er beskrevet kortfattet i rapporten. Flere af metoderne udvik-

les stadig for at kunne opnå bedre og hurtigere dataindsamling. Især SkyTEM metoden er i kraftig udvikling, og der findes en række systemer. Der forventes endnu bedre muligheder med SkyTEM systemer fremover. En beskrivelse af alle de forskellige SkyTEM systemer falder udenfor denne rapports område, selv om en række af dem er blevet analyseret nærmere.

Analyser

Metoderne er analyseret ved brug af syntetiske 1D modeller, hvilket er simpelt og enkelt. En fuldstændig undersøgelse af metoderens laterale opløsningsevne vil kræve 2D og 3D modellering af data med efterfølgende simuleringer. Denne proces ligger uden for denne opgaves ramme.

På grundlag af en række antagelser af bl.a. forskellige aflejrings resistivitetsværdier er der udført analyser på 11 af de mest anvendte instrumentsystemer og systemopsætninger: PACEP (1), PACES (1), MEP (3) og SkyTEM (6). Med udgangspunkt i resistivitetmålinger fra feltstudier er der sat en række 1D modeller op. Analyserne har derefter vist de forskellige metoders evner til at kortlægge forskellige lertykkelser mellem 0 m og 30 m.

Eksempler

To eksempler på praktisk kortlægningsarbejde i Himmerland og ved Norsminde viser anvendelse og usikkerheder ved SkyTEM systemet og der sammenlignes dels med PACES systemet og dels med boringsdata.

Kortlægning af lagtykkelser

Tykkelsen af morænelersaflejringerne forventes at være en vigtig parameter ved bedømmelse af pesticidtransport gennem aflejringerne, så derfor blev de geofysiske metoders evne til at kortlægge tykkelsen analyseret ved brug af syntetiske 1D modeller. Resultaterne var følgende:

PACES systemerne er bedst egnede til at kortlægge både lerlag på 5 m 's tykkelse og 10 m 's tykkelse. MEP systemer med målekonfigurationer, som optager data med stor datatæthed (nyere data i gradient array), er også bedst egnede til at måle 5 m og 10 m tykke lag, men MEP kan også anvendes ved kortlægning af både 15 m og 20 m tykke lerlag, hvis der er anvendt en minimumelektrodeafstand på 5 m, og data har stor datatæthed (gradient array). Ældre MEP data målt med mindre datatæthed (Wenner array) med en minimumselektrodeafstand på 5 m kan anvendes ved kortlægning af både 10 m og 15 m tykke lerlag, hvor aflejringerne generelt er elektrisk ledende.

Højtopløselige SkyTEM systemer med tidspunktet for første anvendelige datapunkt efter strømmen er blevet slukket (gatecentertid) på under 10 mikrosekunder er bedst til at kortlægge 15 m og 20 m tykke lag, men kan også anvendes ved 10 m ´s tykkelse, hvor aflejringerne generelt er elektrisk ledende. De øvrige SkyTEM systemer, på nær de allerældste, er egnede til at kortlægge 20 m tykke lerlag, hvor aflejringerne generelt er elektrisk ledende.

PACES og MEP målt med gradient array ser derfor ud til at være bedst til at kortlægge de tyndeste morænelersaflejringer. SkyTEM-metoden har vanskeligt ved at opløse meget tynde højmodstandslag, der er helt terrænnære. Derfor er SkyTEM-metoden dårligt egnet som et værktøj ved udpegning af områder med morænelersaflejringer lige under terræn, da morænelersaflejringer kan være dækket af et tyndt sandlag, som ikke kan opløses i data. Flyvehøjden for SkyTEM-systemerne spiller, ud over tidspunktet for det første anvendelige datapunkt efter strømmen er blevet slukket (gatecentertid), en betydende rolle for metodens evne til at opløse tykkelsen af første/øverste morænelerslag.

Kortlægning af horisontal udbredelse

Den horisontale udbredelse af moræneler er også væsentlig med henblik på beskyttelsen mod pesticid forurening. Metoder, som er profilorienterede med tætliggende linjer, kan kortlægge overfladenære morænelerslags horisontale udbredelse, hvis det i øvrigt er muligt at kortlægge laggrænser tilstrækkeligt overfladenært. Derudover har hastigheden, hvormed data indsamles, en afgørende betydning.

Ud fra vurderingen af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag fremstår PACES-metoden og nogle af de højtopløselige SkyTEM-systemer som egnet til kortlægning af udbredelsen af henholdsvis tynde morænelersaflejringer med tykkelser på 5-10 m, og lidt tykkere morænelersaflejringer.

Kortlægning af interne strukturer

De interne strukturer, makroporerne, i moræneler er centrale for pesticidtransport til grundvandsmagasinerne. Analysen viser, at meget detaljerede undersøgelser med MEP med enhedselektrodeafstande på 1–2 m kan kortlægge resistivitetsvariationer, som kan relateres til zoner med interne strukturer i morænelersaflejringer, f. eks. større horisontale sandlag/slirer, men ingen metoder ser ud til at kunne kortlægge de tynde vandrette og lodrette sprækker, bioporer og de mindste sandlinser.

Sammenligning af geofysisk kortlægning med geologiske forhold i Dalmose-Fuglebjerg området.

Inden for Dalmose-Fuglebjerg området, som delvist er dækket af Næstved SkyTEM kortlægningen fra 2011 og af Slagelse SkyTEM kortlægningen fra 2012, er de geofysiske kortlægninger sammenlignet med geologiske data som boringer, feltdata og lertykkelseskort udarbejdet ud fra boringsdata.

I nogle områder er der god overensstemmelse mellem lertykkelseskortet og observerede resistivitetsfordelinger, mens der i andre områder ses en uoverensstemmelse, som primært i det vestlige område skyldes relativt tynde sandlag, som er observeret i boringer, men ikke opløses af SkyTEM metoden.

I det østlige område skyldes det et dybtliggende relativt tyndt sandlag, som er observeret i boringer, enten har en underestimeret tykkelse i boringerne, eller at det overliggende moræneler har så høj resistivitet, at det svarer til sandlags resistivitet.

Sammenholdes de to lokaliteter ved Flakkebjerg og Fårdrup med nærliggende SkyTEM-målinger, ses det, at morænelerslagene har resistiviteter i intervallet 30–60 Ohmm, men det ikke muligt at lave en detaljeret sammenligning, da SkyTEMs vertikale og horisontale opløsning ikke rækker til dette.

Heterogeniteter på en skala ned til 50–200 m, som skyldes relativt tynde sandaflejringer ved terræn overlejrende morænelerslag, fremstår klart fra Slagelseskortlægningens middelmodstandskort for intervallet 0–5 m, mens det ikke fremgår tydeligt i Næstved kortlægningen hvilket skyldes forskellen i de to systemer.

Grundvandskortlægningen

Analyserne af de forskellige geofysiske metoder, som er blevet gennemgået i denne rapport i forhold til at kunne kortlægge overfladenære leraflejringer, viser, at mange af dem er egnet til at indgå i en pesticidfølsomhedskortlægning i det omfang morænelers tykkelse og horisontal udbredelse er vigtige parametre. Derimod kan de geofysiske data ikke på nuværende tidspunkt kortlægge makroporefordeling og type indenfor deres udbredelse (ned til 10 m's dybde), men nogle metoder kan påvise horisontale sandlag eller zoner med sandlinser. Data om oxidationsforholdene er det heller ikke

generelt muligt at indsamle ved geofysisk kortlægning, f.eks. om redoxgrænsens beliggenhed.

Anvendelse af geofysiske metoder er en af de vigtigste hjælpeværktøjer inden for Grundvandskortlægningen suppleret med nye borer og etablering af geologiske modeller. Analysen viser, at Grundvandskortlægningens geofysiske data også kan anvendes ved kortlægning af pesticidfølsomme områder i det omfang at morænelerstykkelse og - udbredelse er centrale parametre (se senere), og det er ligeledes gjort klart, at de geofysiske data skal sammenstilles med boringsdata.

Geologiske forhold i Stevns området og Hedeland området

Opgave

Transport af pesticider gennem moræneler foregår især under voldsomme nedbørshændelser gennem makroporer: bioporer, sprækker og sandlinser, som danner et 3-dimensionelt netværk. Viden om makroporerens geometri er derfor vigtig, herunder hvor langt ned i lerlagene de forekommer, for at bedømme risikoen for den videre transport til grundvandsmagasinerne. Informationerne om makroporerens strukturer og geometri kan kun indhentes ved indsamling af felldata i åbne profiler og udgravninger. Der er foretaget sådanne undersøgelser på mere end 30 lokaliteter i Danmark, hvoraf de fleste er på Sjælland. Iltforhold (oxidationsforhold) i moræneler er ligeledes undersøgt på feltlokaliteterne. De karakteristiske farveforhold med gule og brune farver i den iltede (oxiderede) zone over en grænse, som kaldes redoxgrænsen, og grå farver i den iltfrie (reducerede zone) under grænsen er markante egenskaber, som både kan findes på feltlokaliteter og i morænelersprøver fra borer.

Der er beskrevet tre feltlokaliteter fra Stevns området og seks feltlokaliteter fra Hedeland området.

Makroporeforholdene i morænelerslagene er sammenholdt med geokemiske forhold i lagene, samt med pesticider, ilt og nitrat i det underliggende grundvandsmagasin. Tilstedeværelse af pesticider i grundvandet i de to områder viser, at dele af områderne er følsomme for udvaskning.

Resultater

De vigtigste resultater fra denne analyse bekræfter, at makroporer næsten altid gennemsætter moræneler, og at de omfatter bioporer, sprækker og sandlinser, der udgør et samlet 3-dimensionelt transportnetværk, som kan føre vand og pesticider til grundvandet. I

nogle tilfælde kan særligt store og dybe sprækker også fungere sådan. Transport gennem den finkornede del af moræneleret (matrix) foregår også, men er almindeligvis meget langsomme.

Antallet af makroporer aftager ned gennem den oxiderede zone i moræneleret mod redoxgrænsen. Redoxgrænsen ligger almindeligvis omkring 3,5 m til 5 m's dybde selv om dybereliggende redoxgrænser er registreret ned til 7-8 m. Enkelte sprækker kan nå ned til 10 m's dybde i det reducerede moræneler, hvor de må forventes at ophøre. Små sandlinser kan også forsætte nedad i det reducerede moræneler, og i Hedeland området forekommer særligt mange sandlag.

Redoxgrænsens beliggenhed og dannelse ved iltning synes at hænge sammen med udbredelsen af makroporerne, hvilket bl. a. ses af de jern- og manganoxiderede "halos" omkring sprækker i det reducerede moræneler. Redoxgrænsens beliggenhed ser ud til at være afhængig af, hvor langt ned i morænelerslagene, hovedparten af makroporerne når. Oxidationen er dog også foregået i matrix

Gentagelse af oxidation-reduktions forholdene i Hedeland området adskiller dette område fra Stevns området, hvor der kun er et oxidationssystem. Ved gentagelsen synes særlige sprækkeforhold i det øverste reducerede moræneler samt tilstedeværelsen af sandlag at spille ind, men systemet er ikke fuldt forstået.

Erfaringer fra den mange feltlokaliteter suppleret med boringsdata peger på, at 10 m morænelerstykkelse er en kritisk tykkelse, fordi kun få sprækker findes under denne dybde, mens sandlinser kan træffes. Under det oxiderede ler tyder det også på, at der kan være sprækker 3 m ned i det reducerede ler. Der er kun gennemoxideret ler ned til ca. 7-8 m's dybde. Derfor synes gennemoxideret moræneler på op til 10 m tykkelse eller 7 m oxideret og 3 m reduceret ikke at yde tilstrækkelig beskyttelse af grundvandet. Hvis det reducerede ler vokser yderligere i tykkelse vokser beskyttelsen. Generelt øges den reducerede zones tykkelse med øget total lertykkelse.

Sammenhængen mellem udbredelse af sprækker i dybden til redoxgrænsens beliggenhed og tykkelsen af den reducerede zone sammenholdt med den totale lertykkelse ser derfor ud til at kunne blive det redskab, der skal til for at udpege områder med forskellige egenskaber overfor pesticidfølsomhed.

Det Poly Morfologiske Koncept

Konceptet er et forsøg på at sammenholde terrænforhold og aflejringer i flere niveauer ned gennem jordlagene inklusiv aflejringer, som er grundvandsmagasiner. Ud fra teoretiske overvejelser om dannelse af moræneler og sprækker i leret samt forholdene i sand og kalklag er der fremsat et forslag til sprækkedannelse og intensitet i forskellige geologiske situationer. PM konceptet er indtil videre afprøvet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn med fremstilling af et polymorfologisk kort i 1:200.000, hvor områder med forskellige egenskaber er afgrænset.

Nærværende undersøgelse har taget udgangspunkt i PM konceptet ved udvælgelse af de områder der er blevet undersøgt, og det ser ud til at være et godt værktøj at arbejde videre med. Der har dog vist sig end større variabilitet en først tænkt med konceptet, da de to områder Stevns og Hedeland blev undersøgt i detaljer mht. lagene dybere under terræn. Imidlertid er der muligheder for at verificere konceptet ved at se på moræneler-kalk situationer som på Lolland, Falster, Møn og Djursland og moræneler-sand situationer i dele af Djursland og Himmerland. Det er kun få af de opstillede, afgrænsede PM områders egenskaber, der er undersøgt, og af større områder indenfor konceptet er det især dødislandskaber, som ikke er inddraget og analyseret.

De polymorfologiske kort kan fremstilles i målestoksforhold op til 1:25.000, hvor flere relevante detaljer kan inddrages, og det er antagelig denne målestok, der kan danne udgangspunkt for inddeling af lerområdet i pesticidfølsomme områder.

Forståelsen af den geologiske opbygning kan beskrives i en konceptuel model med lagenes opbygning og dannelse og senere påvirkninger. Denne model kan også anvendes som grundlag for egentlig vand - og stofmodellering inden for hvert PM-område.

Relationer til VAP-markerne

De tre VAP-lermarkers egenskaber blev beskrevet i VAP-etableringsrapporten fra 2001, men supplerende vurderinger er udført i dette arbejde for både Silstrup, Estrup og Fårdrup.

Ud fra forsøg med pesticidudvaskning er Silstrup-marken vurderet til at være den mest følsomme lermark i Danmark, mens Estrup-marken er vurderet til at være den mindst følsomme.

Der er foretaget en sammenligning mellem VAP-lermarkernes geologiske, strukturelle og geokemiske opbygning med de tilsvarende egenskaber, som lokaliteterne har indenfor Stevns og Hedeland områderne for ud fra dette at bedømme mulig følsomhed i forhold til hinanden. Denne sammenligning bygger derfor ikke på målt pesticidudvaskning, da sådanne data ikke findes fra Stevns og Hedeland lokaliteterne, men alene lokaliteternes fysiske og geokemiske egenskaber.

Ved denne sammenligning er mulig følsomhed i forhold til hinanden (VAP-marker og område-lokaliteter) vurderet som faldende følsomhed, som følger: 1. Silstrup (VAP-mark), 2. Dele af Stevns området, 3. Dele af Hedeland området, 4. Dele af Stevns området, 5. Dele af Hedeland området, 6. Fårdrup (VAP-mark), 7. Estrup (VAP-mark). Inddelingen skal opfattes således, at 1, 2 og 3 opfattes som antagelig næsten lige følsomme, 4, 5 og 6 som antagelig næsten lige følsomme og 7 som antagelig mindst følsom.

Mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme områder

Ud fra den samlede gennemgang af alle analyserne og kendskab til de eksisterende data og nye forskningsresultater vurderes det, at det er muligt, at udvikle en metode til at udpege områder, der er mere følsomme eller lige så følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler til grundvandet som VAP-lermarkerne.

Der er ikke udarbejdet en metode til at identificere de særligt pesticidfølsomme lerjorde i denne rapport, men der kan peges på de data/elementer, der skal indgå. For at udarbejde en valid, konsolideret metode vil det forudsætte nye undersøgelser til at tilvejebringe ny viden fra områder, der ikke er undersøgt, metodeudvikling/modellering og yderligere pesticidmålinger til validering. Det vil forudsætte, at flere lerområder undersøges, da der kan være områder (landskabelementer) mere følsomme end de nu undersøgte, f.eks. Djursland, omkring Limfjorden og Lolland-Falster. Desuden vil metoden skulle vurderes ud fra resultater af målinger af godkendte pesticider.

Af Grundvandskortlægningens resultater er det især oplysninger om leraflejrings udbredelse og tykkelse, som er vigtige for at vurdere hvilke data, som kan indgå i et koncept for pesticider. Grundvandskortlægningens geofysiske metoder og målinger har, som omtalt ovenfor, vist sig at kunne beskrive og kortlægge udbredelsen og tykkelse af lerlag fra 5 m til 20 m, men viden om, hvor der er risiko for sprækker eller andre vertikale og horisontale makropore strukturer kan ikke påvises ved hjælp af geofysiske målinger.

Projektet viser endvidere, at der er en sammenhæng mellem makropore dybde og redoxgrænse. De fleste makroporer stopper ved redoxgrænsen, da redoxgrænsens beliggenhed og nedadgående bevægelse er afhængig af tilstedeværelsen af makroporer. Derfor er nøglen til relationerne mellem makropore dybde og redoxforhold i morænelersaflejringerne afgørende. Der fleste sprækker forventes at ophøre omkring 10 m's dybde, hvilket feltobservationer med støtte af boringsdata synes at vise. Gennemoxiderede lag op til 10 m tykkelse ser ud til at være de mest følsomme for udvaskning, mens oxiderede lag på 7 m sammen med reducerede lag på 3 m (7m +3 m = 10 m) er noget mindre følsomme, og reducerede lag på mere end 3 m er i alle sammenhængende lag mindre følsomme (f.eks. 7 m oxideret og + 4 m).

Makropore dybden kan almindeligvis kun registreres i udgravninger, som dog er begrænsede i antal, men oxiderede lerlag, redoxgrænsen og reducerede lerlag kan også relativt let genfindes ved hjælp af boreprøver i boringer i Jupiter databasen, hvor der p.t. er op mod 300.000 boringer. Afvigelse fra dette med f.eks. gentagelser af oxidationszoner forekommer, men som kernen i en metode er det med den nuværende viden et robust udgangspunkt.

Det nye er således opfattelsen af, at redoxgrænsen beliggenhed er styret af makroporenes dybde og er således et hjælpemiddel (kaldet proxy) for makropore dybde, som dermed i denne sammenhæng kan bruges som nøgleparameter.

Elementerne/data i en metode/koncept, der sandsynligvis kan gælde for hele det danske lerområde, er følgende:

- PMkoncept-område kortlægning i relevant målestok (Evt. 1:25.000).
Modelkoncept for hvert PM-område
- Morænelerstykkelse og udbredelse fra boringer og geofysik
- Tykkelse af oxideret og reduceret moræneler fra feltlokaliteter og boringer
- Redoxgrænsens beliggenhed (makropore dybde) fra boringer og feltlokaliteter
- Pesticidindhold i grundvandsmagasiner fra boringer
- Ilt indhold i grundvand fra boringer
- Anvendelse og sammenstilling af ovenstående data kan bruges til at etablere en Følsomhedsklassifikation, som samlende grundlag for ud-

pegning af pesticidfølsomme områder. Hvis elementerne kombineres, er det forventeligt, at arealer kan opdeles i forhold til forskellig følsomhed.

Detaljeringsgrunden med hensyn til datatæthed, datanet m.m. kan først bestemmes, når der er større klarhed over forholdene på de geografiske områder, der ikke er indgået i denne undersøgelse.

Rækken af eksisterende datasamlinger med de centrale og nødvendige data for at udvikle en metode vil være:

- a. Udgravninger: Leregenskaber (makroporer, geokemi m.m.) fra eksisterende udgravninger og evt. nye.
- b. Boringer fra Jupiter boringsdatabasen
- c. Geofysik fra Gerda databasen fra bl.a. Grundvandskortlægningen
- d. Geokemi i aflejringer fra felt – og laboratorieforsøg
- e. Geokemi i grundvandet i Jupiterdatabasen fra GRUMO, LOOP, Boringskontrol og AA.
- f. Pesticiddata fra grundvandet i Jupiterdatabasen og VAP-registrene fra GRUMO, LOOP, Boringskontrol, AA og VAP.
- g. VAP-mark data i Jupiterdatabasen og VAP-registrene
- h. Eksisterende Grundvandskortlægning, herunder geologisk modeller og om nitratfølsomme områder.

Datagrundlaget er således overvejende eksisterende i arkiver, databaser og kortlægninger, Nedenfor er anført opgaver med at finde ny information fra områder, der ikke er inddraget i denne undersøgelse samt at sætte og vurdere eksisterende information sammen på en ny måde for at udarbejde, beskrive og konsolidere metoden.

En efterfølgende kunne være, at udarbejde den detaljerede metode til, hvordan en udpegning skal foregå, hvilket kan forgå sideløbende med de opgaver der omtales nedenfor. PM koncept i justeret og udbygget udgave som grundlag for konceptuelle modeller og arealafgrænsninger vil være en farbar vej.

Behov for nye informationer

Følgende behov er indentificeret: En vurdering af poly morfologiske områder med tilsvarende forhold som på Stevns og Hedeland områderne på Sjælland, Lolland, Falster og Møn, og derefter opstille konceptuelle modeller for områder indenfor de allerede opstillede PM områder til anvendelse på alle lerområder. Opgaven skal konsolidere og generalisere de allerede indhentede resultater i nærværende projekt.

Udarbejdelse PM inddeling for resten af lerområderne i Danmark samt justering af konceptet bør foretages, hvis det er nødvendigt, samt opstilling af konceptuelle modeller for nye områder. Bearbejdelse af resten af opmålte feltlokaliteter og relevante borer i forhold til makroporer og redoxgrænsens beliggenhed samt, hvis nødvendigt at udføre feltobservationer. Fokus på nye borer i områder med gentagelse af redoxzoner. Modellering af relevante konceptuelle modeller. Denne opgave er den vigtigste for at komme frem til et landsdækkende koncept og for at kunne etablere en følsomhedsklassifikation.

Vurdering af lerområder, hvor de geologiske forhold peger på, at der ikke er grundvandsmagasiner under moræneler/smeltevandsler, hvorfor de kan udlades fra videre overvejelser.

Screening af pesticider over grænseværdien på Sjælland i andre PM områder fra tidligere og nu. Screening af pesticider over grænseværdi resten af landets lerområder fra tidligere og nu. Screeningen vil være med som grundlag for, hvor der skal rettes fokus hen mht. følsomhed overfor pesticider.

Etablering af en følsomhedsklassifikation baseret på: makroporer, oxidationsforhold, lertykkelse, lerudbredelse og pesticidfund samt PM-koncept. Alle gamle og nye data vil indgå. Klassifikationen skal pege på udpegning af pesticidfølsomme lerområder og skal derfor baseres på landsdækkende lerområde data (Indsamlet ovenfor).

1. Indledning

Der er udført et projekt for Naturstyrelsen, for at vurdere om eksisterende data kan anvendes til udpege lerområder, som er sprøjtefølsomme for pesticider. Rapporten giver derfor en samlet beskrivelse og vurdering af de eksisterende geologiske, geofysiske, geokemiske data samt pesticiddata fra tre udvalgte sjællandske områder, som har betydning for udpeging af sprøjtefølsomme lerområder (SFO) m.h.t. til udvaskning af pesticider til grundvandet indenfor lerjordsarealer. Rapporten giver desuden en vurdering af, om det på det foreliggende grundlag er muligt, at identificere arealer som er mere følsomme end VAP- markerne. Et samlet koncept for pesticidzonering blev ikke udviklet i forbindelse med de tidligere lerprojekter i KUPA regi, men nærværende projekt er således en vurdering og status, der baseres på data fra de tidligere KUPA-projekter, data indsamlet de senere år, bl.a. ved Grundvandskortlægningen og nye forskningsresultater.

Projektet er udført af GEUS med bidrag fra Institut for Agroøkologi - Jordfysik og Hydrologi, Århus Universitet, og det er udført i perioden fra 9. september 2013 til 15. december 2013.

Rapporten fremlægger en række data og resultater, som er samlet under de to hovedaktiviteter: Geofysik og makroporelokaliteter. Herudover er resultaterne integreret og sammenstillet, og det er beskrevet, hvordan de eksisterende data kan tænkes anvendt. Der er også gjort rede for begrænsninger i de eksisterende indsamlede data, og desuden peget på, hvad der eventuelt bør foretages yderligere.

2. Baggrund

2.1 Indledning

Baggrunden for nærværende analyse er de resultater, som er opnået indenfor to projekter angående ”Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA”, fra det Strategiske Miljøforskningsprogram, fra Grundvandskortlægningen, Varslingssystemet for pesticider, VAP samt fra Grundvandsovervågningen, GRUMO.

Senest har Regeringen i en ny Sprøjtemiddelstrategi 2013-2015 bl.a. fokuseret på behovet for en styrket indsats for at beskytte grundvandet (Regeringen, 2013) og Natur- og Landbrugskommissionen (2013) har peget på følgende handlinger: ”Miljøministeriet bør udarbejde en konkret plan for identificering af pesticidfølsomme områder som grundlag for kommunernes arbejde med indsatsplaner for pesticider”

I forbindelse med gennemførelsen af Vandmiljøplan II og Drikkevandsudvalgets betænkning fra 1997 fik de daværende amter til opgave at udpege de områder, som var særligt følsomme for bestemte typer af forurening samt at prioritere den indsats, der skulle gennemføres i disse områder for at beskytte vandressourcen. Udpegningen m.v. skulle ske på baggrund af en detailkortlægning, som amterne skulle gennemføre. Disse forpligtelser blev efter Kommunalreformen pålagt Miljøcentrene.

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

KUPA 2000- 2004

På denne baggrund fik Miljø- og Energiministeriet i første omgang Finansudvalgets tilslutning til at disponere midler til at etablere det nødvendige videngrundlag vedrørende risikoen for udvaskning af pesticider på sandede jorde og muligheden for at zonere på dette grundlag. Der blev også givet midler til at afklare, om det metodisk vil være muligt at etablere et analogt kortlægningsrelevant videngrundlag for lerjorde.

Det var således opgaven for det samlede KUPA projekt (Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer) at afklare, om det var muligt at identificere og zonere dan-

ske sand- og lerjorde, som var særligt følsomme overfor udvaskning af pesticider. Projekt opgaven var derfor en afklaringsproces, hvor mange af de kriterier, der tænkeligt ville kunne lægges til grund for en følsomhedszonerings, blev afprøvet. Herunder viste nogle kriterier og afprøvninger sig at være farbare og andre ikke. Sandområderne blev rapporteret i GEUS & DJF (2004a), og der blev peget på et koncept for mulighederne for udpegning af følsomme sandområder, som nu forsøges gjort operativt gennem et SFO-projekt i slutningen af 2013 og starten af 2014.

Mulighederne for lerjorde blev rapporteret i GEUS & DJF (2004b), og der blev beskrevet afprøvning 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 demonstrerede, at der kunne skaffes data, som var egnede til at indgå i en analyse af omsætning, tilbageholdelse og transport af pesticider i tilknytning til de to domæner (matrix og makroporer), der karakteriserer lerjorde. Det viste sig desuden, at nogle datatyper, der var indsamlet på et begrænset areal, med kendte og afprøvede metoder, antagelig kunne udbredes til at repræsentere større geografiske områder.

Resultaterne viste imidlertid også, at det kunne være væsentlig 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 havde 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 blev det vurderet, at det var muligt at tilvejebringe det nødvendige grundlag for at udvikle et zoneringskoncept for særligt pesticidfølsomme lerjorde, men det blev påpeget, at arbejdet ikke var afsluttet, og der var behov for at arbejde videre med problematikkerne omkring danske lerjorde.

KUPA 2004-2008

På grundlag af resultaterne fra det første KUPA-projekt blev det gennem Miljøministeriet bevilliget midler til at "videreudvikle projektet med etablering af det faglige grundlag for at udpege områder, der er særligt følsomme overfor pesticidudvaskning for lerjorde"

(Pesticidplan 2004-2009, Folketingets Miljø- og Planlægningsudvalg, 13. oktober 2003).

Om pesticidfølsomme områder hed det i Pesticidplanen: "En yderligere sikring af grundvandet kan opnås ved at udpege områder, hvor der er størst risiko for forurening, således at der kan indgås dyrkningsaftaler med landmænd for at minimere risikoen for forurening af grundvandet. Sigtet vil dermed være at beskytte grundvandet i de mest følsomme områder".

Opgaven med at etablere et videngrundlag for lerjorde blev givet til De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS, tidl. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse) og Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet (DJF, Aarhus Universitet, tidl. Danmarks JordbrugsForskning) i fællesskab.

Projektet blev næsten udelukkende gennemført med baggrund og udgangspunkt i eksisterende data og blev kun i begrænset omfang suppleret med nyindsamlede data. Herudover udnyttedes resultater fra andre projekter, som arbejdede indenfor samme problemkreds. Hovedresultaterne refereres kortfattet i afsnit 2.2.

National grundvandskortlægning

Kortlægning af grundvandet i Områder med Særlige Drikkevandsinteresser (OSD) og vandværkernes indvindingsoplande (Den Nationale Grundvandskortlægning) blev vedtaget i 1998 og iværksat 1999 med henblik på fremtidig beskyttelse af drikkevandsressourcen i Danmark (Thomsen et al., 2004). Kortlægningen skulle udgøre det geologiske grundlag for de overordnede statslige og lokale kommunale indsatsplanlægninger. Kortlægningen blev indtil 2006 varetaget af amterne. Fra 2007 overgik opgaven til By- og Landskabsstyrelsens miljøcentre, som i januar 2011 blev en del af Naturstyrelsens enheder. Miljøcentrene er senere indgået i Naturstyrelsens centrale organisation. Naturstyrelsen administrerer kortlægningsopgaven, og væsentlige dele af kortlægningen udføres af konsulenter, mens GEUS som Fagdatacenter for Grundvand har bistået med faglige ekspertise, udarbejdelse af standarder og rådgivning. Kortlægningen skal ifølge loven være færdiggjort i 2015.

Udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder og indsatsområder mht. nitrat er en vigtig del af kortlægningens resultater (Hansen et al., 2008), ligesom det tilsvarende også er det for pesticider (Naturstyrelsen, 2013).

En stor del af grundvandskortlægningen er udført som geofysisk kortlægning, som er et hjælpemiddel til at sammenkæde grundvandsmagasiner og beskyttende lerlag bl.a. ved etablering af 3D modeller (GEUS, 2011).

VAP

Varslingssystemet for udvaskning af pesticider (til grundvandet)(VAP) blev påbegyndt i 1998. Formålet var at kunne give et tidligt varsel om risiko for påvirkning af grundvandet ved regelret anvendelse af godkendte pesticider under realistiske danske forhold og hermed risikoen for, at de blev udvasket til grundvandet i uacceptable mængder. Hvis et pesticid og/eller dets nedbrydningsprodukter kan påvises i dræen eller boreriger, kan dette danne grundlag for, at Miljøstyrelsen kan igangsætte en revurdering af det pågældende stof. Programmet omfattede i 2001 oprindeligt seks marker (Lindhardt et al., 2001), men i 2003 blev antallet reduceret til fem. Der er i dag to sandlokaliteter og tre lerlokaliteter i programmet, hvor der løbende undersøges om pesticider efter sprøjtning på markerne kan registreres i dræen, boreriger eller horisontale boreriger/filtre i 3,5 m's dybde. Undersøgelserne rapporteres årligt (Brüsch et al., 2013).

GRUMO

Grundvandsovervågningen (GRUMO) blev påbegyndt som følge af Vandmiljøplanen i 1987. Der blev oprindeligt etableret 73 områder, hvor grundvandet skulle overvåges kvalitativt og kvantitativt, og områderne er senere suppleret op med korte indtag i bl.a. redoxboringer. De kemiske parametre, som der skulle analyseres, for herunder relativt få pesticider, blev fastsat (Nygaard et al., 1991). Programmet er til stadighed blevet revideret og tilpasset skiftende behov, og der er også indpasset data fra vandværkernes boringskontrollodata. Den seneste rapport om grundvandets tilstand fra 2013 (Thorling et al., 2013) giver tilstanden og udviklingen i perioden 1987-2012, hvor også de fem Landovervågningsoplande (LOOP) er inddraget samt data fra bl.a. OSD-områderne. I rapporten er der et uddybende tema i kapitlet om pesticider, og der er analyseres nu for 31 pesticider og nedbrydningsprodukter.

GRUMO er en del af det nationale overvågningsprogram af vand og natur: NOVANA, som varetages af Naturstyrelsen. Naturstyrelsen indsamler data, der indsendes til GEUS.

SMP96

Det Strategiske Miljøforskningsprogram (SMP) fra 1996-2000 omfattede et delprogram: "Pesticider og Grundvand", hvor der blev taget fat på en række problemer angående pesticider i den umættede zone og grundvandet, som omfattede makroporestrømning af pesticider i jordlagene over grundvandspejlet, pesticiders opførsel i grundvandsmagasinerne og stor-skala modellering af pesticidtransport (SMP, 2000). Studierne dannede basis for de videre studier i KUPA-projekterne.

2.2 KUPA 2009- Resultater og konklusioner

Projektet fra 2004 til 2008 skulle udnytte resultater fra det første KUPA-projekt, og det viste sig, at opgaven mest hensigtsmæssigt skulle deles op i to angrebsvinkler, som bl.a. var betinget af de datatyper og datadækninger, som fandtes om de danske leraflejringer: 1. Forudsigelser om følsomhed for udvaskningen til under bunden af rodzonen (2 m's dybde), og 2. Følsomhed for udvaskning og transport fra bunden af rodzonen (under 2 m's dybde) til det øverste grundvandsmagasin.

Fra terræn til bunden af rodzonen

Ved den første angrebsvinkel blev det vurderet for hver lerjordstype, om det var muligt at beregne lerjordens følsomhed overfor udvaskning af pesticider til bunden af rodzonen. Det blev også undersøgt, om arealerne med de forskellige jordtyper vil kunne underinddeles efter mere detaljeret følsomhed på grundlag af de parametre, som karakteriserer jordtyperne. Der blev som eksempel på fremgangsmåden brugt en grov jordartsinddeling, og derfor er resultaterne ikke særligt detaljerede.

Fremgangsmåden viste sig imidlertid, at kunne karakterisere lerjordens følsomhed overfor udvaskning af pesticider ved modelsimulering. Det blev konkluderet, at det var muligt at inddele danske lerjorde i typer med forskelligt følsomhedsniveau overfor udvaskning af pesticider til bunden af rodzonen, da det viste sig, at det var muligt at simulere en udvaskning fra jordoverfladen til bunden af rodzonen. I danske modelstudier anses rodzonen almindeligvis for at være til 1 m, men modelleringen blev foretaget efter internationale retningslinjer i et EU projekt (se nedenfor).

Der blev simuleret udvaskning for hver lerjordstype på én gang for hele det areal jordtypen dækkede, og for hvert enkelt af 5 pesticidmodelstoffer. Simuleringerne var baseret på karakteristiske parametre og værdier for jordtyperne. Herved var det muligt at

sammenligne niveauet for jordtypernes generelle følsomhed. Det blev også vist, at den grove jordartsinddeling, som blev benyttet, kunne underopdeles på grundlag af geografiske forskelle i jordparametre. Som eksempel blev den nærmættede hydrauliske ledningsevne, som afspejler jordtypernes evne til at transportere vand og pesticider i makroporer, brugt til underinddeling efter følsomhed.

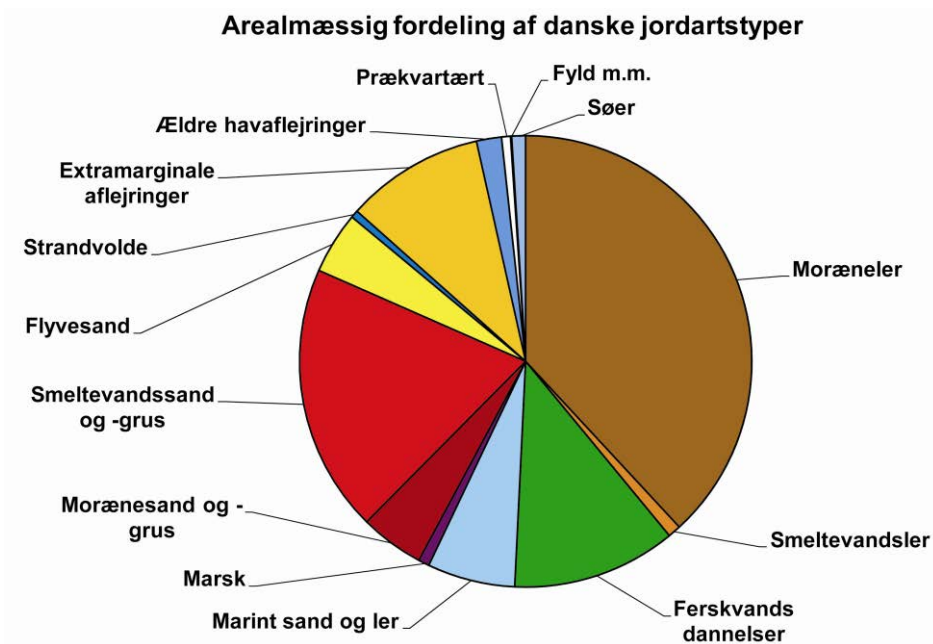
Der blev simuleret samlet for de 5 modelstoffer lidt større relativ udvaskning fra de mest udprægede lerjorde, der blev antaget at være præget af strømning i makroporer, end fra lerholdige jorde med dominerende matrixstrømning.

Simuleringen blev udført med modelværktøjet MACRO. Det anvendte datasæt blev etableret i sammenhæng med EU projektet FOOTPRINT og bestod af jordsbundsdata fra hele Europa, herunder suppleret med danske jordsbundsdata. Det var således en grov jordtypeinddeling, der blev benyttet, fordi der i FOOTPRINT var færdsige sæt af parametre til rådighed for denne inddeling, som det ikke var muligt selv at fremskaffe inden for projektets ramme.

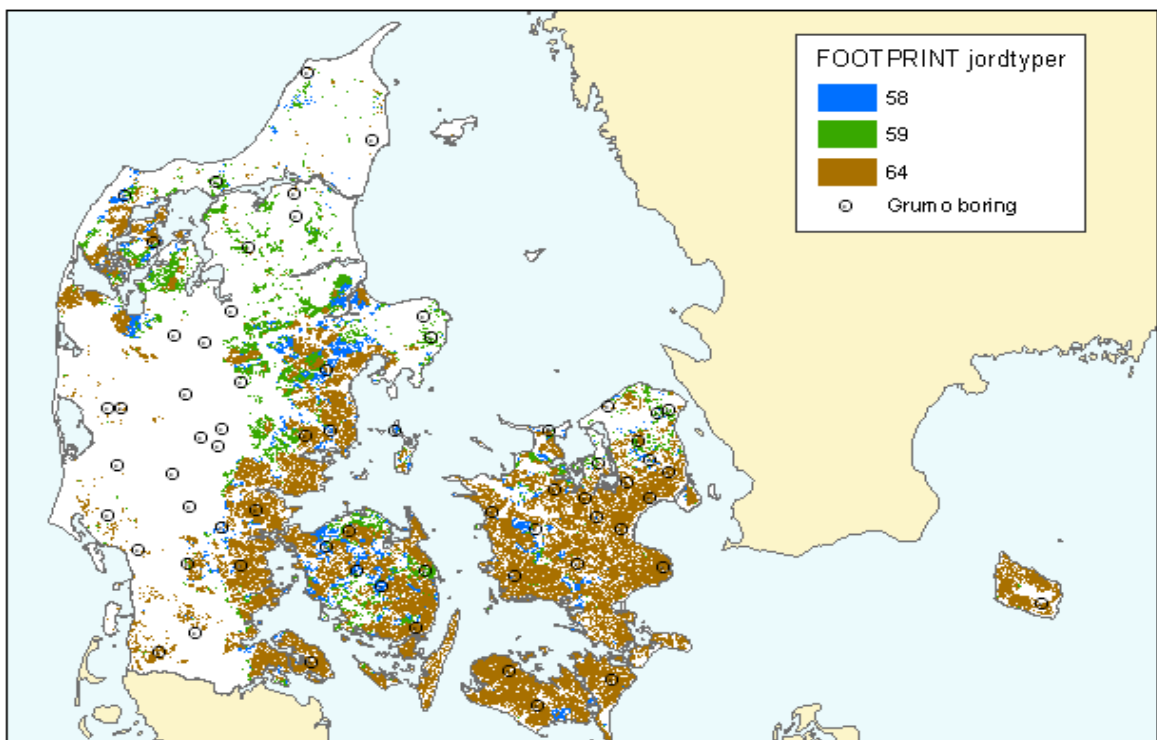
FOOTPRINT konceptet består af et modelbaseret værktøj, der kan anvendes i forbindelse med en vurdering af pesticidudvaskningen på en række jordbundstyper med forskelligt klima og forskellige landbrugspraksis. FOOTPRINT har opstillet en række modelparametre for disse jordtyper herunder også danske jordtyper.

GEUS & DJF (2009) konkluderede således, at FOOTPRINT-konceptet var anvendeligt også for danske jordbundstyper, men på grund af en relativ grov inddeling af jordtyperne var detaljeringsgraden ikke høj nok. Ved fremover at bruge fremgangsmåden på mere detaljerede data blev det forventet, at følsomheden kan nuanceres i mindre arealer med forskellige følsomheder.

Det viste sig, at en FOOTPRINT jordbundstype (J64) udgjorde ca. 27 % af det danske areal og stod for en væsentlig del af den simulerede udvaskning. J64 svarer overvejende til den geologiske jordart moræneler, der i alt dækker ca. 40 % af Danmarks areal (Figur 1).

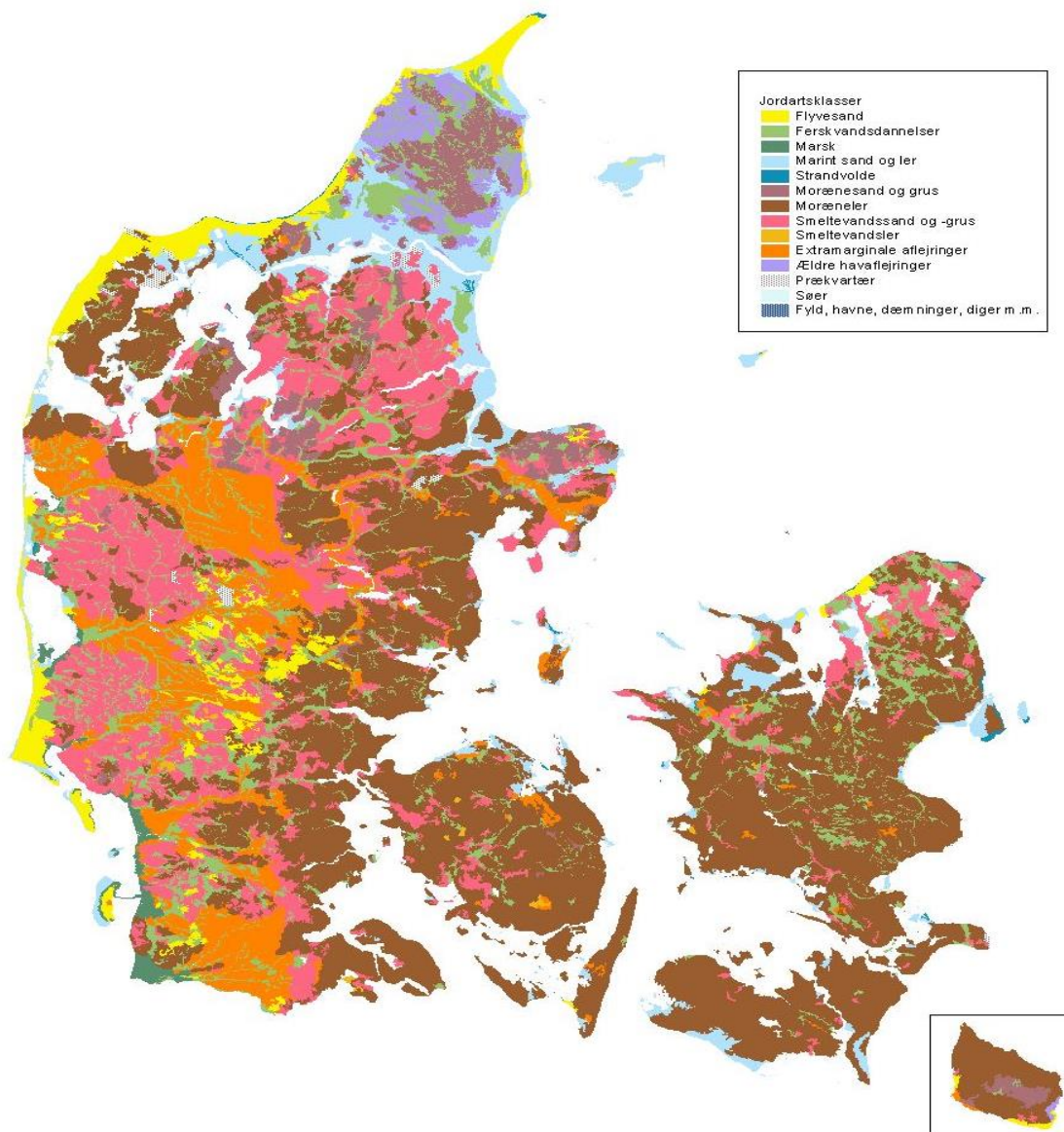


Figur 1. Diagram som viser fordelingen af jordarter i 1 meters dybde. Moræneler udgør ca. 40 %, smeltevandsler ca. 1-2 % og smeltevandssand og grus ca. 28 %. (Efter GEUS & DJF, 2009).



Figur 2. Kort som viser fordelingen af FOOTPRINT-jordtyperne J58, J59 og J64 indenfor jordbunden, som svarer til moræneler (Fra GEUS & DJF, 2009).

Jordbundstypen J64/moræneler er indenfor de øverste 2 m ofte udvasket, oxideret og gennemsat af makroporer i form af ormegange, rodgange, sandlinser og sprækker. Det skal dog bemærkes, at FOOTPRINT jordbundstyperne ikke er identiske med de danske JB-klasser, idet de er baseret på en anden teksturodeling og er mere kvalitative end den inddeling, der anvendes i dansk jordbrugssammenhæng. Modelleringen base-



Figur 3. Kort som viser fordelingen af jordarter i 1 m's dybde. Brun viser moræneler, olivengul viser smeltevandsler, og rød og orange er smeltevandssand og grus (Efter Hermansen, Pedersen & Bjerregaard, 1999).

ret på FOOTPRINT kan betragtes som en første tilnærmelse til udvaskningen fra bunden af rodzonen, men med en del usikkerhedsforhold, som formodentlig kunne forbedres med anvendelse af danske data.

En overordnet sammenligning kan foretages mellem jordbundskortet med de tre FOOTPRINT-lerjordbunde J58, J59 og J64, som udgør i alt ca. 36 % af arealet (Figur 2), og det geologiske kort, som viser jordarter i 1 m's dybde (Figur 3). Selv om kortene ikke "GIS-mæssigt" er lagt over hinanden, er det åbenlyst, at de tre jordbunde og overfladenær moræneler (brun signatur) stort set dækker de samme arealer. Dette betyder sandsynligvis, at datamaterialets detaljeringsgrad ikke er for dårlig, selv om det kan forbedres, hvorfor udvaskningssimuleringerne kan opfattes som rimelige for de ca. 36 % af landets areal.

Den simulerede udvaskning, som blev bestemt til bunden af rodzonen, udgør kildestyrken for den videre perkolation nedad mod grundvandsmagasinet.

Fra bunden af rodzonen til grundvandsmagasinet

Ved den anden angrebsvinkel blev det forsøgt at vurdere følsomheden overfor udvaskning i dybdeintervallet fra bunden af rodzonen til det øverste grundvandsmagasin ved at sammenstille eksisterende og nye kort med en række relevante temaer. Det lykkedes ikke at føre en forklaring af projektets enkle fordeling af monitorerede pesticider til ende ved hjælp af korttemaerne. De fleste kort blev etableret i regional skala, og var derfor muligvis ikke detaljerede nok til fuldt ud at afspejle udvaskningsfølsomheden. Det var således på det pågældende tidspunkt ikke muligt at nærme sig og pege på et koncept.

Alle kendte parametre var blevet kortlagt og forsøgt kombineret bl.a. ved GIS-analyser. Et væsentligt punkt var også mangelen på en række centrale data som f.eks. hydrauliske data fra moræneler ned til 10 m's dybde, men især også fra dybereliggende morænelerslag.

En simpel undersøgelse af grundvandsovervågningsdata tydede på, at perkolationen af pesticid til grundvandsmagasinerne var lidt højere i lerjordsområder/morænelersarealer samt kalkarealer (over grundvandsmagasinerne) end i sandjordsområder, og at variabiliteten var størst på lerjordsarealer. Den gennemsnitlige funddybde var omkring 20 m under terræn.

Denne forskel i forhold til de simulerede resultater for de enkelte modelstoffer blev tilskrevet for landbrugsbelastningens vedkommende bl.a., at der er benyttet samme klima i alle simuleringer. Derfor blev der ikke taget højde for den fortynding i nedbørsrige sandjordsområder, som indgår naturligt i overvågningsdataene.

Konklusioner

Analyserne og vurderingerne af henholdsvis udvaskningen til bunden af rodzonen og følsomheden under rodzonen konkluderede bl.a.:

Projektet sandsynliggjorde, at det vil være muligt at karakterisere lerjordens følsomhed overfor pesticidudvaskning til bunden af rodzonen. Det var derimod ikke lykkedes at estimere følsomheden overfor videre udvaskning fra bunden af rodzonen til de øverste grundvandsmagasiner. Dermed var det ikke lykkedes at udvikle en færdig fremgangsmåde til udpegning af særligt pesticidfølsomme lerjorde fra terræn til grundvandsmagasin. Dette betød, at projektet ikke endte op med at pege på et færdigt koncept for udpegning af særligt pesticidfølsomme arealer.

Det var derimod sandsynliggjort at:

- at danske lerjorde til bunden af rodzonen kan inddeles i typer med forskellig følsomhedsniveau overfor udvaskning af pesticider til bunden af rodzonen.
- at den mest følsomme lerjordstype kan underinddeles på grundlag af egenskaber som karakteriserer den.
- at følsomheden er forskellig for forskellige pesticider, men at de relative følsomheder følger samme mønster jordtype for jordtype.
- at følsomheden er stofspecifik, men at den samlede grad af simuleret udvaskning er størst på den mest udbredte lerjordstype.
- at der blandt de undersøgte lerjorde og lerede sandjorde simuleres højest udvaskning til bunden af rodzonen ved høj nærmættet hydraulisk ledningsevne, lidt lavere udvaskning ved lav nærmættet hydraulisk ledningsevne og mindst ved middel nærmættet hydraulisk ledningsevne.
- at resultaterne for udvaskning til bunden af rodzonen for lerjorde er i overensstemmelse med Varslingssystemet for Pesticider (simulerede og målte værdier), men der foreligger ikke en egentlig verifikation.

De ca. 36/40 % af Danmarks areal, som er dækket af lerjord/moræneler, der sandsynligvis er følsomt for pesticidudvaskning til bunden af rodzonen, er et væsentligt areal. Udvasning fra bunden af rodzonen er en potentiel risiko for videre transport til og foru-

rening af grundvandsmagasinet, og derfor er det vigtigt at kunne begrænse arealet ved hjælp af geologiske situationer ned til grundvandet, som ikke anses for at være følsomme for pesticidudvaskning.

3. Opgavens mål og indhold

Det er målet, at indenfor den korte projektperiode at prøve at vurdere, hvordan de indsamlede eksisterende data og nye forskningsresultater fra forskellige opgaver, herunder Grundvandskortlægningen, kan anvendes målrettet i forhold til vurderingen af sprøjtefølsomheden for de ca. 36 % af Danmarks areal, som er følsomme for pesticidudvaskning i aflejringer af moræneler fra rodzonen ned til grundvandsmagasinerne.

Der har været to hovedaktiviteter indenfor projektet:

- III) Vurderinger af de eksisterende geofysiske kortlægninger udført i forbindelse med Grundvandskortlægningen samt vurdering af de geofysiske data på et udvalgt område på Sjælland.
- IV) Vurderinger af de eksisterende kortlægninger og undersøgelser udført på morænelersaflejringer med fokus på de senere års aktiviteter indenfor to områder på Sjælland.

De tre områder er udvalgt på grundlag af konceptet angående et sammensat geologisk kort (Polymorfologisk PM-kort)(Klint et al., 2013). Kortet er inddelt i arealer på grundlag af de øverste kvartære aflejringer og terrænformer og de underliggende terrænformer/grundvandsmagasiner (kvartære eller prækvartære). Desuden giver kortkonceptet vurdering af sprækkeintensiteter i det øverste moræneler, og morænelers tykkelse indgår også. Kortet er p.t. fremstillet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn m.m..

Ved udvælgelsen er også taget hensyn til, om der var sammenfald mellem geofysiske data og geologiske felldata. De sammenstillede data vil blive sammenholdt med VAP lerområderne. Endelig vil der blive peget på hvad der yderligere bør undersøges.

Undersøgelserne kan kortfattet karakteriseres som nedenfor.

3.1 Grundvandskortlægning-geofysisk kortlægning

Geofysisk kortlægning – geologisk tolkning

Der er to delopgaver:

1. Vurdering af de indsamlede geofysiske data indenfor Grundvandskortlægningen i forhold til anvendelse i kortlægning af pesticidfølsomme områder.

2. Undersøgelse af delområde Dalmose-Fuglebjerg på Sydvestsjælland, hvor geofysiske data skal sammenlignes med geologiske data bl.a. fra de to feltlokaliteter Flakkebjerg og Faardrup (VAP-lokalitet).

3.2 Makroporer: Bioporer, sprækker og sandlinser

Geologi og makroporer

Der skal undersøges to delområder på Sjælland for relationer mellem leregenskaber, strukturer/makroporer, redoxforhold og pesticider i grundvandsmagasinerne.

1. Område: Stevns halvø

Feltlokaliteter: Højslev

Gjorslev

Sigerslev

2. Område: Hedeland

Feltlokaliteter: Kamstrup

Kallerup

Tune

Slæggerup (Tidligere VAP-lokalitet)

Vadsby

Høje Tåstrup

3.3 Relationer til VAP lermarkerne

Vap-markerne:

Silstrup

Estrup

Fårdrup

Der foretages en sammenligning af de undersøgte områder i forhold til VAP-lermarkerne for at vurdere, om områderne er mere følsomme end VAP-lermarkerne. I dette projekt er der tale om en sammenligning af de geologiske og geokemiske forhold ud fra de eksisterende data, bl.a. fordi pesticiddata fra VAP-lermarkerne overvejende

er fra rodzonen og lige herunder d.v.s. fra terræn og ned til de horisontale borer i 3,5 m's dybde. Der foretages ikke modellering.

3.4 Muligheder for udpegning af pesticidfølsomme områder

På grundlag af alle data, som er sammenstillet og sammenholdt, er der konklusivt pegt på om, det er muligt at udpege pesticidfølsomme områder for lerområder. Det er dels blive belyst, om det eventuelt kan ske med anvendelse af eksisterende data og dels, hvis dette ikke anses for muligt, hvad der yderligere skal undersøges og indsamles.

Indledningsvis er der en kortfattet gennemgang af leraflejringeres karakterer (afsnit 4), pesticidernes egenskaber (afsnit 5) og forekomst af pesticider indenfor de tre områder (afsnit 6).

4. Aflejringernes karakterer – jordbund og geologi

Overfladenære leraflejringer i Danmark består helt overvejende af to typer: Moræneler og smeltevandsler, begge istidsaflejringer, selvom også senglaciale marine leraflejringer kan træffes, især i Nordjylland. Moræneler udgør ca. 40 % af de overfladenære lag, d.v.s. lag lige under terræn (1 m), mens smeltevandsler udgør ca. 1-2 %. I dybden ændrer disse andele sig, hvor aflejringerne må efterforskes med borer og geofysik. Gennem KUPA projekterne er udtrykket "lerjorde" anvendt om de danske lerholdige aflejringer. I denne rapport vil udtrykkene: moræneler, smeltevandsler og leraflejringer blive anvendt.

4.1 Jordbund

Fra terræn og ned gennem de øverst 1-2 m præger jordbundsudviklingen, som startede ved sidste istids slutning i både moræneler og smeltevandsler. Ændringer af de klimatiske forhold ved regnedbør forårsagede nedsivning af vand, som opløste kalk og sammen med påvirkning af højere temperatur begyndte omdannelse af mineraler og bjergarter. Aktiviteter af dyr og planter ændrede også de oprindelige jordarters strukturer og indhold af organisk stof. Jordarterne ændrede således karakterer, selv om oprindelsesmaterialet stadig kunne erkendes, og jordbunde i moræneler har stadig et højt lerindhold. Der anvendes særlige klassifikationer og inddelinger for jordebunde (se f.eks. GEUS & DJF, 2004b, 2009).

4.2 Geologiske leraflejringer

4.2.1 Moræneler

Moræneler er en heterogen, dårligt sorteret jordart, der består af fraktionerne ler, silt, sand, grus og sten samt stedvis blokke (Figur 4). Der skal være mindst 12-14 % i lerfraktionen for at der tale om moræneler, mens et mindre lerindhold klassificerer jordarten som morænesand. Lerindholdet er væsentligt mindre end i de fleste andre danske lerarter. Morænelers finkornede grundmasse kaldes for matrix, mens det grovere materiale opfattes som klaster (grus og sten) i matrix.

Moræneler kan karakteriseres efter Larsen et al. (1988), samt indbefatter beskrivelse af jordarternes kornstørrelsesvariation, tekstur, sedimentære strukturer, mineralogi, farve

og kalkindhold. På feltlokaliteter kan også måles og beskrives deformationer, skurestriber, fabric m.m., der kombineret med geotekniske undersøgelser og geomorfologisk analyse kan bruges til at tolke aflejningsmiljøet og dannelseshistorien.



Figur 4. Moræneler fra klinten på Risø. Forekomsten af sten og grus i en mere finkornet matrix er tydelig. (Foto: P: Gravesen).

Morænelers dannelse og aldersforhold

Moræneler er dannet af eller i forbindelse med gletscheris. Der findes mange forskellige gletschermiljøer, hvorunder moræneler kan aflejres. Det er derfor ofte nødvendigt at lave en detaljeret analyse af moræneleret og klassificere det.

For yderligere at opdele i specielle aflejningsmiljøer og processer relateret til bestemte isfremstød benyttes 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 forbindelse med analyse af sprækker ikke imellem de forskellige typer basale tills, men deres interne deformationsmekanisme er afgørende for dannelse af sprækker, og der skelnes derfor imellem deformationsmekanismerne i to typer basale tills: A-type der er deformeret blødt ("Ductile"), og B-type der er deformeret sprødt ("Brittle"). I den følgende tekst anvendes tiil-terminen, når dannelsesforholdene beskrives for morænelersaflejringerne.

De fleste moræneler/till-aflejringer på Sjælland kan henføres til bestemte gletscherfremstød i den sidste istid (Weichsel-istiden), der sluttede for ca. 17.000 år siden. Danmark blev i den periode overskredet af gletschere fra flere retninger. Det Gammelbaltiske isfremstød fra SØ var henover Sjælland for ca. 55000 til 50000 år siden, men derefter var der overvejende isfrit de næste ca. 28000 år. Det er specielt de sidste tre fremstød fra henholdsvis NØ (Hovedfremstødet ca. 27.000-19.000 år siden inkl. genfremstød) og SØ (to Ungbaltiske fremstød mellem ca. 19.000-17.000 år siden), som præger de fleste områder i dag (Houmark-Nielsen, 1987). Den sidste gletscheris på Sjælland regnes for at være smeltet omkring grænsen til Senglacial for ca. 16000 år siden, selv om der i mange år lå rester tilbage i form af "dødis", som endelig forsvandt på grænsen til Postglacial for 11700 år siden.

På Bakkeøerne i Jylland er de øverste morænelerslag overvejende fra Saale istidens sidste fremstød, Warthe for ca. 140000 år siden.

Matrix og mikroporer

Porer i moræneler består dels af mikroskopiske porer i matrix (mikroporer) og makroporer, som almindeligvis skærer gennem matrix (se nedenfor). Transport af vand og stoffer i mikroporer i matrix i den umættede zone foregår relativt langsomt, mens transport i makroporer kan ske meget hurtigt, f.eks. under voldsomme regnskyl.

Makroporer

Makroporer består af tre typer: Bioporer, sprækker og sandlinser. Ligesom med mikroporer er der tale om strukturer med en tre-dimensionel udbredelse (se figur 5), hvilket har stor betydning ved vurdering af morænelers beskyttende egenskaber.

Bioporer

Bioporer består af porer skabt af planter og dyr og findes især inden for de øverste 0 til 2 m under terræn, hvor de strækker sig fra terræn og ned gennem jordbunden og rodzonen. Kanaler udgravet af dyr er talrige, men det er især ormehuller fremstillet af regnorme, som dominerer billedet, men stedvis kan gange gravet af muldvarpe også have betydning. Rodgange er "rør" dannet af planternes rødder, der ligeledes kan strække sig et par meter ned under terræn. Bioporerne er oftest lodrette eller sublodrette.

Sprækker

Moræneler er almindeligvis opsprækket eller gennemsat af andre typer makroporer, som har stor betydning for transport af miljøfremmede stoffer til grundvandet. En forståelse for sammenhængen imellem de processer, der skaber sprækkerne, samt typen af moræneler og landskabets opbygning er essentiel for en regional vurdering af sprækkernes udbredelse og landskabets sårbarhed for nedsvivning af pesticider til grundvandet (Klint, 2001, 2004, 2009, Klint & Fredericia, 1995, Klint et al., 2001, Gravesen et al., 2000). For at kunne vurdere om et givet område er opsprækket, er det derfor vigtigt at vide hvordan og hvorfor, sprækker dannes i første omgang.

Glacialtektoniske sprækker

Undersøgelser har vist, at der optræder forskellige glacialtektoniske sprækketyper i basale tills (bundmoræner). De klassificeres som værende af glacialtektonisk oprindelse, hvis de har en klar relation til stress forhold, der kan relateres til subglacial deformation, herunder systematisk orientering i forhold til isbevægelsesretninger (Figur 5). Følgende tre typer er observeret under danske forhold:

Subhorizontale/horizontale shearsprækker er ofte meget lange (>20 meter) med en ondulerende overflade, hvorpå der ofte optræder stribninger. Deres hydrauliske egenskaber er dårligt belyst, men deres udbredelse er generel i næsten alle såkaldte bundmoræner (basale tills). De kan have svage hældninger imod eller med isbevægelsesretningen på 0-20°, og sprækkerne er ofte fyldt med silt eller fint sand. Derudover forbinder de ofte vertikale sprækker. De findes generelt udbredt i hele till-enheden, men har en tendens til øget frekvens ned imod bunden af till'en. (Figur 5 og 6).

Vertikale/subvertikale shearsprækker (hælder typisk 60-90°) der ofte udvikler konjugerede (krydsende) sprækkesæt, hvoraf den ene sæt er kraftigere udviklet end det andet med en spids vinkel imellem de to skærende sprækkesæt på typisk 20°. Disse spræk-

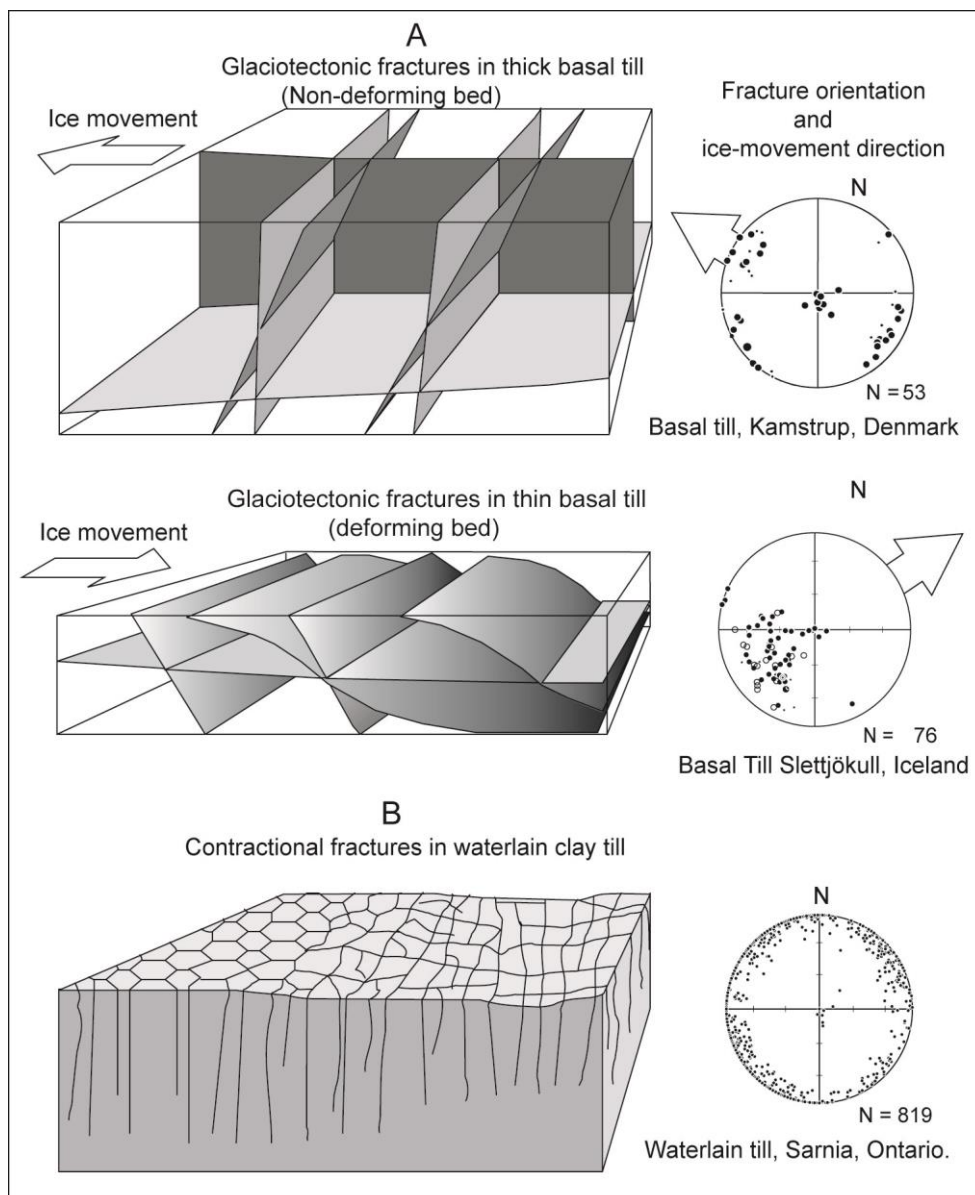
ker er primært orienteret vinkelret på isbevægelses retningen og har normalt en planar form, samt kan i visse tilfælde være svagt forsat (1-3 cm). De gennemsnætter i flere tilfælde moræneler med en mægtighed på over 8 meter, men de optræder tilsyneladende i zoner med stor indbyrdes afstand (Figur 5 og 6).

Vertikale ekstensionssprækker (80-90° hældning) optræder primært parallelt med isbevægelsesretningen. Denne sprækketype kan gennemsnætte en basal till og har en overordnet betydning for transport af forskellige stoffer til grundvandet. (Figur 5 og 6).

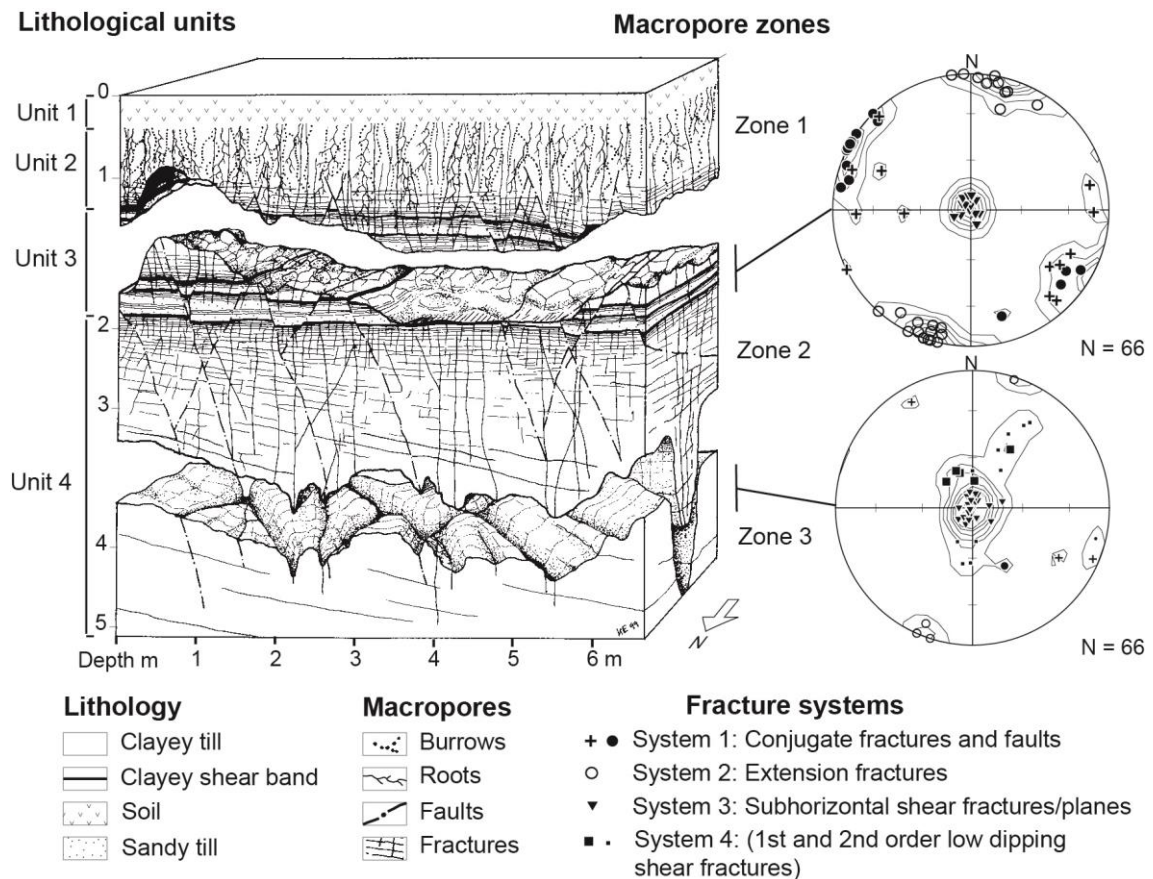
Kontraktionsprækker

Kontraktionssprækker dannes ved udtørring eller fryse-tø processer. De aftager med dybden og er udbredt i alle opmålte lokaliteter over grundvandsspejlet. Der skelnes imellem udtørringssprækker og sprækker dannet ved fryse/tø processer:

Frostsprækker (fryse-tø) kendes fra bl.a. arktiske områder i Norge og på Island, men hvor *udtørringssprækker* oftest danner vertikale uregelmæssige polygoner af varierende størrelse, kan fryse/tø processer resultere i, at moræneleret sprækker op i zoner med en typisk horisontal sprækkeafstand (spacing) på under 0,5 cm. Disse zoner er normalt vandmættede om vinteren men umættede om sommeren og vil, når de er mættede, kunne danne basis for et kraftigt lateralt strømning, specielt på hældende overflader (Figur 6).



Figur 5. Skematisk tre-dimensional figur, som viser de vigtigste sprækketyper i moræner. A store glacialtektioniske sprækkesystemer i form af horisontale/subhorisontale sprækker, vertikale/subvertikale sprækker (konjurerende) og vertikale ekspansionssprækker. Den øverste figur viser forholdene, når lagene ikke er deformeret, mens den nederste viser de deformede forhold. B Kontraktionssprækker: Frost og udtørningsprækker danner vertikale polygoner, der typisk strækker sig ned til den reducerede zone. I dybden aftager antallet af sprækker til omkring 10 m, hvor de fleste forsvinder. Horisontalt kan sprækkerne have stor udbredelse.



Figur 6. Model for makroporeforholdene ved Flakkebjerg. Zone 1 er den kalkfri, oxiderede moræneler med mange biopor (Rødder og regnormehuller m.m.) og udtøringsprækker, Zone 2 er den oxiderede, kalkrige moræneler med udtørings- og glacialtektoniske sprækker. Zone 3 er den reducerede, kalkrige moræneler med få primært glacialtektoniske sprækker (Modificeret fra Klint & Gravesen, 1999).

Sandlinser

Sandlinser i moræneler er stedvis meget udbredt, men der kan også træffes morænelersenheder, som er stort set uden sandlinser. Sandlinser bidrager til de inhomogene strukturelle forhold og kan medvirke til at forbinde vertikale og horisontale sprækkesystemer ned gennem moræneler til grundvandsmagasinerne. Der er i de senere år blevet fokuseret på sandlinsernes geometri, størrelse og udbredelse i moræneler (Kessler et al., 2012), og et typestudie er udført i Kallerup grusgrav i Hedelandområdet. Der er udarbejdet en klassifikation for sandlinser med en horisontal udbredelse mellem 0,05 m og 50,0 m og tykkelse mellem 0,01 m og 5,0 m. Den største klasse (50m/5 m) har en størrelse, der er en overgang til et egentligt sandlag, som kan være vandførende regionalt. Sandlinser kan registreres og opmåles i åbne profiler samt i sjældne tilfælde i boreprøver.

Forsøg med Cone Penetration Testing boringer (CPT-boringer) har vist, at dette kan være en metode til at registrere sandlinser (Nilsson & Petersen, 2004). Modellering af sandlinser i moræneler baseret på feltmålinger har vist et særligt tæt net af mindre sandlinser, som kan interagere med sprækkesystemer (Petersen, 2004, Kessler et al, i trykken).

Morænelers tykkelsesforhold

Tykkelsen af morænelerslagene er ikke automatisk et udtryk for god eller dårlig beskyttelse af grundvandet, men undersøgelser viser, at det er en vigtig faktor (Malaguerra et al., 2012). Meget tyder på, at alle morænelersaflejringer med en tykkelse under 10 meter må anses for potentielt opsprækkede, men tykkere lag kan være gennemsat af sprækker, især hvis de overlejrer højpermeable jordarter.

I Haslev er truffet sprækker ned til 8-9 m's dybde med indhold af tjære (Klint & Jakobsen, 1997, Jakobsen & Klint, 1999).

Undersøgelser af moræneler overlejrende højpermeable smeltevandssletter i Hedelandsområdet omkring Roskilde viser, at moræneflader med samlet tykkelse under 10 meter er gennemsat af sprækker, hvorimod lag med tykkelse på over 14 meter kun er opsprækket ned til ca 6 meters dybde (se senere). Moræneler på lavpermeable jordarter må derimod forventes at yde en væsentlig bedre beskyttelse af grundvandet. Forholdene er imidlertid kun delvis belyst, da der kun eksisterer få undersøgelser af sprækkefordelingen under 6 meters dybde.

Hydrauliske forhold i moræneler

Grundvandspejlets beliggenhed under terræn i morænelersaflejringer varierer med årstiden, hvor den tykkeste umættede zone almindeligvis vil være om sommeren. Moræneler vil almindeligvis være forholdsvis tør i den umættede zone, selv om matrix godt kan have et relativt højt vandindhold. Når der begynder at regne, og der sker infiltration i den umættede zone vil der forgå en transport af vand i matrix og makroporer ned mod grundvandsspejlet.

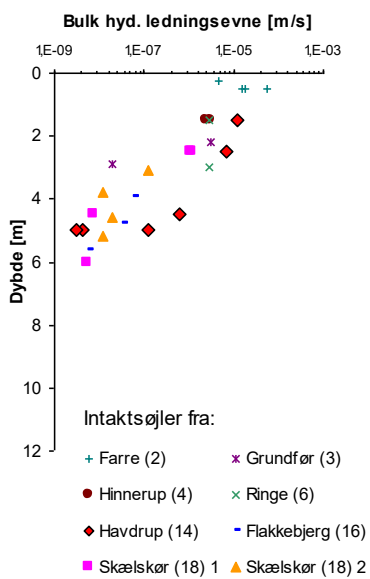
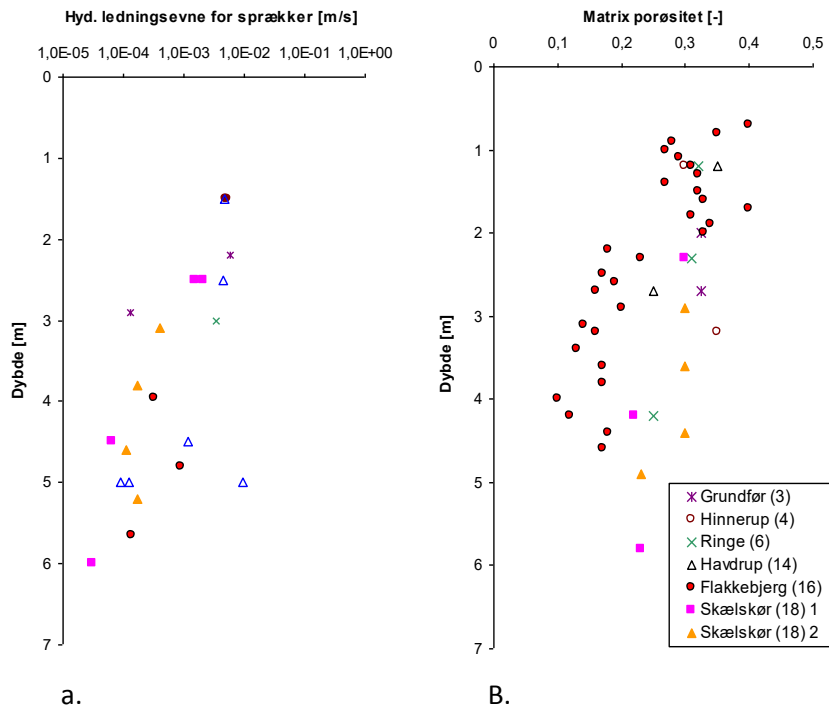
Transport i makroporerne afhænger ikke af matrix's vandmætning, men kan foregå selv om matrix er tør eller kun delvis vandmættet (Nimmo, 2012). Vandstrømningen i makroporerne er tilsyneladende kun begrænset af varighed og størrelse af den impuls, der har sat den i gang, f.eks. en kraftig nedbørshændelse (Beven & Germann, 2013),

og af det makroporenetværk, som er til stede (Rosenbom et al., 2008). Under mættede forhold sker der imidlertid også makroporestrømning (Nimmo, 2012).

Transport kan ske i både lodrette og vandrette makroporer, men vil være afhængig af lokale forhold og strukturer. Voldsomme regnskyl vil kunne bringe opløste stoffer i vandet hurtigt til grundvandet bl.a. fordi makroporetransport allerede kan starte før matrix er vandmættet. At makroporer er hydraulisk aktive kan bl.a. ses ved de udfældninger af jern og mangatforbindelser, der ofte findes på f.eks. sprækkeplaner (Ruland et al., 1991).

Undersøgelser har vist, at der kan forgå transport af vand og stof i makroporer i både den oxiderede og reducerede zone, og forbindelser mellem sprækker og sandlinser kan have stor betydning (Sidle et al., 1998, Nilsson et al., 2001, Jørgensen et al., 2002). Sådanne transportforhold kendes også fra lignende morænelersaflejringer i USA og Canada (Ruland et al., 1991, Rowe & Booker, 1990). Desuden sker der vandbevægelse i matrix, dog med noget lavere hastighed end i makroporerne. Der er målt rater på op til 15 cm/år vertikal transport i den reducerede zone ved Flakkebjerg (Harrar et al., 2007). Lignende rater er bestemt i Canada (Robertson et al., 1991).

Terrænforhold vil have en indflydelse på strømningsforholdene i grundvandet. Bakkede områder må anses for at være mere sårbare end flade områder, når der er højt grundvandsspejl, da lateral strømning i de ofte stærkt opsprækkede zoner i 2-3 meters dybde må anses for udbredt, når grundvandsstanden er høj. Med stor lateral strømning vil eventuelle vertikale sprækkezoner eller sandlinser kunne fungere som dræn for et større område i kuperet terræn end i fladtliggende terræn.

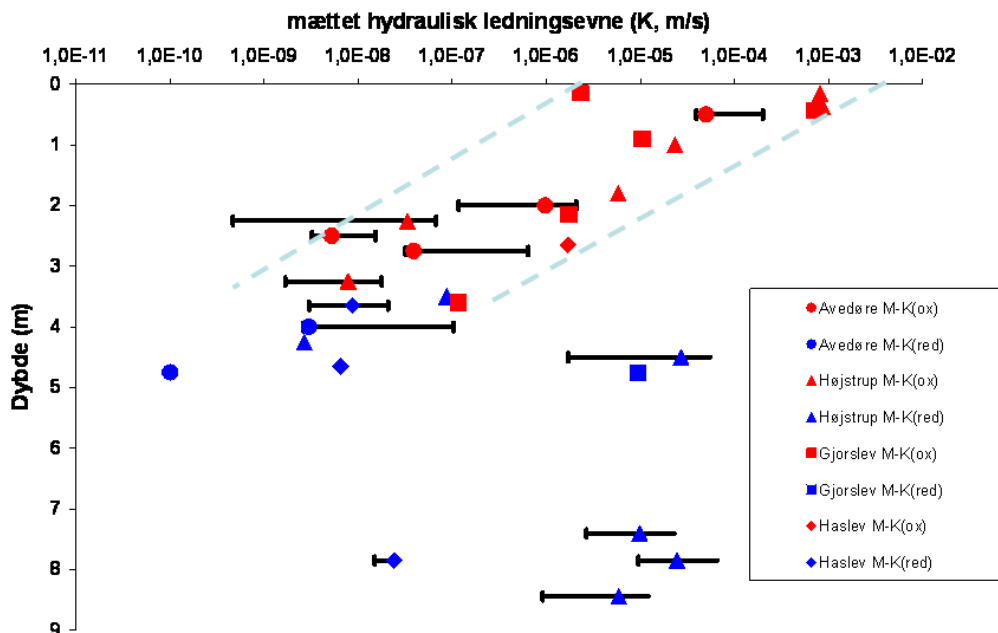


Figur 7. Dybdevariation af (a) sprækkehydrauliske ledningsevne, (b) matrixporøsitet og (c) bulk hydraulisk ledningsevne. Værdierne i (a) og (b) er beregnede værdier mens (c) er målt Bemærk at dybdeskala for (c) er forskellig fra de to øvrige profiler (Fra Nilsson & Klint, 2009).

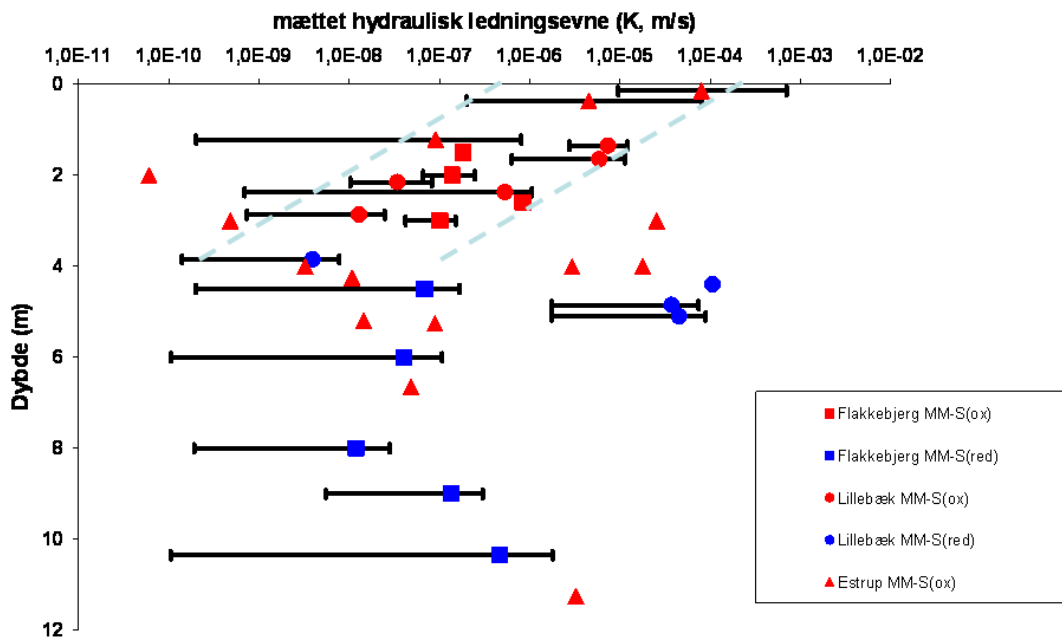
Figur 7 viser en række værdier for morænelers totale hydrauliske ledningsevne (bulk hydraulisk ledningsevne) og hydraulisk ledningsevne i sprækker plottet mod dybden,

som viser, at den hydrauliske ledningsevne i sprækker ligger flere størrelsesordener over bulk hydraulisk ledningsevne (Nilsson & Klint, 2009). Dette betyder endvidere, at matrix hydraulisk ledningsevne har lavere værdier end bulk hydraulisk ledningsevne.

På figur 8 og 9 ses mættet hydraulisk ledningsevne plottet mod dybden med eksempler fra Flakkebjerg, Højstrup og Gjorslev, som viser fald i hydraulisk ledningsevne gennem den oxiderede zone mod redoxgrænsen med 2-4 størrelsesordener, mens der ikke er systematik under redoxgrænsen i den reducerede zone (Nilsson & Klint, 2009)(se også Fredericia, 1990).



Figur 8. Dybdevariation af mættet hydraulisk ledningsevne for bl.a. Højstrup og Gjorslev lokaliteterne, Stevns området. Værdierne er målt ved forskellige metoder (Fra Nilsson & Klint, 2009).



Figur 9. Dybdevariation af mætter hydraulisk ledningsevne fra bl.a. Flakkebjerg, Dal-mose-Fuglebjerg området. Værdierne er målt ved forskellige metoder (Fra Nilsson & Klint, 2009).

Geokemi og redoxforhold i moræneler

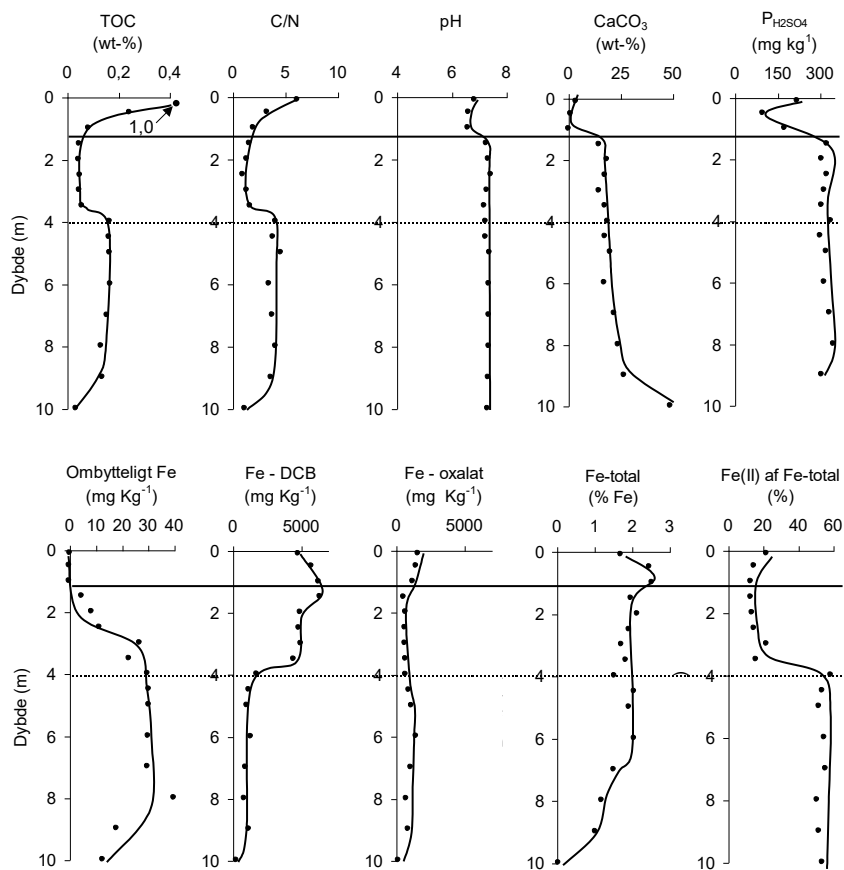
I moræneler på Sjælland findes ofte tre overordnede geokemiske miljøer. Den første zone fremstår iltet og kalkfri, den næste zone er iltet og kalkholdig, samlet kaldes de den oxiderede zone og den tredje zone, der findes umiddelbart under en markant grænse, redoxgrænsen (redoxklinen), er kalkholdig og reduceret og kaldes den reducerede zone. På f.eks. Stevns er den første zone omkring 1 meter dyb, og den næste zone når ned til 4 meter ved Gjorslev, 3,5 meter ved Højstrup og 6 m ved Sigerslev, mens den i Hedeland kan være op til 10 m tyk. Den underliggende reducerede zone kan være helt fraværende eller op til 20 m tyk.

Ved sidste istids slutning var alt det aflejrede moræneler kalkholdigt (mellem 25 og 50 % CaCO_3), men med nedsivning af regnvandet begyndte en opløsning af kalken, som skabte den kalkfri zone (Figur 10). Dette medførte også en højere porøsitet i leret. Ved Flakkebjerg er foretaget porøsitetmålinger af moræneleret, og figur 10 og figur 41 vi-

ser en ændring fra mellem 10 og 20 % til mellem 30 og 40 % porøsitet. Regnormene især har gode muligheder for gravning i det "højporøse" moræneler.

Den oxiderede zone kan indenfor samme område variere med mere end en meter, således at redoxgrænsen har et bølgeformet forløb. Andre markante relationer mellem den oxiderede og reducerede zone kan især ses i Hedeland området, hvor også gentagelser af de oxiderede-reducerede forhold forekommer ned gennem profilerne, som kan være dannet på grund af aflejringer fra forskellige isfremstød.

Variationer af redoxfladens beliggenhed og form afspejler bl.a. forskelle i det oprindelige indhold af reducerende stoffer og mængden af nedsivende vand med ilt og nitrat efter istiden (11700 år siden) på det pågældende sted. Udbredelsen af redoxzoner på Sjælland ligner meget den, der kendes fra fynske lokaliteter.



Figur 10. Geokemiske parametre med TOC, C/N, pH_{CaCl_2} , $CaCO_3$, $P_{H_2SO_4}$ (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 (fra Ernstsens, 2004)

Den begyndende iltning af det oprindelige reducerede, grå moræneler har bl.a. konsekvenser for fordelingen af forskellige former af jern, idet iltningen bevirker at ferrojern omdannes til forskellige former af ferrijern, hvilket giver moræneleret i den oxiderede zone en gulbrun farve (Figur 10).

Iltningen med ilt er forgået siden sidste istids slutning af især morænelersaflejringer fra det Ungbaltiske fremstød, der ligger øverst de fleste steder. Da den sidste død is smeltede og permafrosten forsvandt for 11.700 år siden, blev landet udsat for vand og vejr, hvorved iltningen af morænelerslagene begyndte, og der dannedes en redoxgrænse mellem de oxiderede og de reducerede leraflejringer, som har siden bevæget sig nedad med rater på mellem 0,3 og 0,9 mm pr. år (oxiderede lags tykkelse /11700 år) (Robertson et al., 1999). Det må forventes, at denne bevægelse er sket gennem både lermatrix (langsomt) og makroporer (hurtigere) (se figur 11).



a



b

Figur 11. Redoxforhold i moræneler fra Gedser Odde (Foto : K.E.S. Klint). a. Profil hvor redoxgrænsen er skarp, men varierende på op til 1 m. b. Profil med markante makroporer, hvor redoxgrænsen kan følges som en skarp varierende grænse, men også kan følges ned udenom sprækkerne i den reducerede zone.

I landbrugsarealer vil et forøget forbrug af f.eks. nitratholdig gødning bidrage til en øget bevægelse nedaf af redoxgrænsen. I nogle områder vil råstofgravning bidrage med øget ilttilførsel, ligesom oppumpning af grundvand med sænkning af grundvandet kan give øget ilt til morænelerslagene indenfor sænkningstragten.

Der er ikke umiddelbart sammenhæng mellem redoxforholdene i moræneleret og i grundvandet, da hurtig transport af regnvandet til grundvandsmagasinet kan bringe iltrigt vand langt ned under redoxgrænsen i moræneleret.

4.2.2 Smeltevandsler

Smeltevandsler har almindligvis et højt indhold af partikler i ler - og siltfraktionerne (mellem 40% og 60 %). Lerarten er ofte homogen eller lagdelt/laminret (Figur 12). Leret har helt andre egenskaber end moræneler på grund af den homogene struktur. Det meste smeltevandsler er dannet i søer uden for isranden. Der kan godt være tale om sprækker og andre makroporer i smeltevandsler, men da mikroporerne er meget små og uden større vandbevægelse, er der tale om andre risikoforhold m.h.t transport ned gennem lerlagene. Der er ikke foretaget en selvstændig analyse af smeltevandsler fra terræn og nedad i jordlagene på grund af den beskedne udbredelse (ca. 1-2 % af overfladearealet i Danmark).

Større forekomster af overfladenær smeltevandsler med stor tykkelse kendes fra Nordjylland og Sønderjylland (Gravesen, 1993, Jensen, 1985), midt på Fyn og stedvis på Sjælland.

Områder præget af tykke lerede/siltede søaflejringer må generelt anses at være de mindst sårbare områder. Her optræder kun udtørringssprækker og fryse/tø-sprækker til relativ beskeden dybde. Disse områder har generel et stort drænbehov, og det meste nedbør løber af som overfladeafstrømning enten i kanaler eller i gravede dræn. Dybden af udtørringssprækker afhænger naturligvis af klimaet, men også den lokale topografi styrer sprækkedybden.



Figur 12. Fedt, lagdelt smeltevandsler, hvor de tyndere lyse striber indeholder mere silt end de mørkere striber. Karby Klint (Foto: M. Binderup).

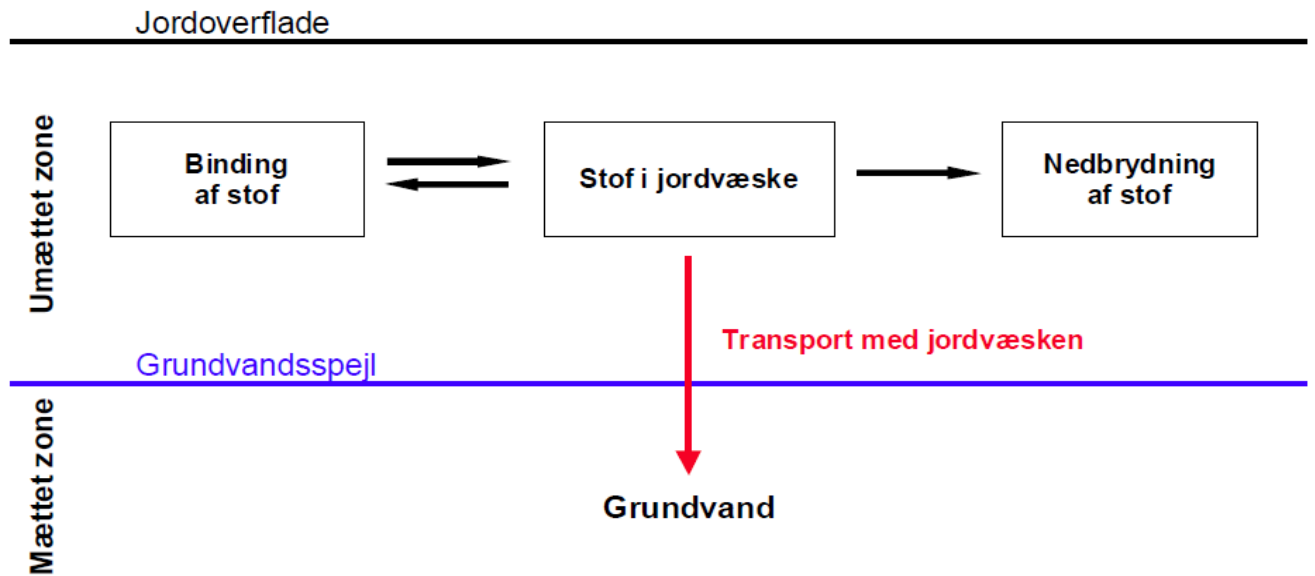
5. Pesticiders egenskaber

Afsnittet indeholder et kort omtale af pesticider i leraflejringer og deres problemstillinger.

5.1 Baggrund for pesticider

Pesticider er en betegnelse for de aktivstoffer, som indgår i sprøjtemidler. Da der er udviklet mange typer sprøjtemidler er der også stor forskel på de aktive stoffers egenskaber. Pesticiderne adskiller sig både i forhold til kemisk og fysiske egenskaber som vandopløselighed, anvendelsesformer, og i forhold til skæbne i miljøet efter udbringning. En lang række faktorer, der har betydning for nedbrydning og transport af pesticider i miljøet, er beskrevet af Arias-Estevez et al. (2008) og Jacobsen et al. (2008). En følsomhedskortlægning af hvert enkelt pesticid ville være en meget omfattende indsats, og derfor adskiller problemstillingen for pesticider sig væsentligt for en følsomhedskortlægning for nitrat. Der er i KUPA og SFO projekterne lagt vægt på at identificere parametre, som muliggør en følsomhedskortlægning på tværs af pesticidgrupperne.

I forbindelse med KUPA sand projektet er en lang række egenskaber for pesticider og jordparametre undersøgt for at underbygge et koncept for en tværgående sårbarhedskortlægning (GEUS & DJF, 2004a). I KUPA sand konceptet er der anvendt tre overordnede delelementer, som kan anvendes til sårbarhedskortlægningen: Hydrauliske parametre og bindings- og nedbrydningsparametre i jorden (Figur 13). Gennem karakterisering af betydende faktorer inden for disse parametre kunne der på sandjorde etableres et koncept baseres på jordens indhold af humus, ler og silt, om efterprøves i et SFO-sand projekt i slutningen af 2013 og starten af 2014..



Figur 13. Principskitse af de vigtigste processer for pesticider i jorden (GEUS & DJF, 2004a). Pesticider kan bindes i jordens faste bestanddele, nedbrydes (abiotisk og af mikroorganismer), eller transporteres i forbindelse med vandets bevægelse i jorden.

I KUPA-sand blev der anvendt fire modelstoffer: Glyphosat, MCPA, Methyltriazinamin (et nedbrydningsprodukt), og Metribuzin (GEUS & DJF, 2004a). For at perspektivere disse modelstoffers egenskaber og vurdere anvendeligheden af konceptet i forhold til andre pesticidtyper, blev der gennemført en bred karakterisering af sorptions- og nedbrydningsegenskaber for pesticider (Aamand et al, 2004).

Konklusionen fra rapporten indholdt følgende i relation til sandjorde: "De to modelpesticider, MCPA og Metribuzin repræsenterede en større gruppe af stoffer, hvis sorption er negativt korreleret med jordens pH og positivt korreleret med indholdet af organisk kulstof. På denne baggrund ville det være muligt at zonere i forhold til sorption. Risikoen for udvaskning af de fleste pesticider til grundvandet vil være mindst, hvor sorptionen er størst d.v.s. på organiske jorde med et lavt pH.

Det var ikke muligt, at finde iboende egenskaber i jorden, der er bestemmende for nedbrydningens størrelse. Det er derfor ikke muligt at zonere i forhold til nedbrydning. De undersøgte pesticider har kunnet opdeles i grupper med henholdsvis lille og stor nedbrydelighed. Det vil derfor være muligt, at ændre arealanvendelsen på særligt sårbare områder, på en måde så brugen af de mest persistente pesticider undgås.

De undersøgte phenoxysyreherbicer mineraliseredes generelt set hurtigt i alle jorde, mens der stort set ikke blev observeret mineralisering af hverken de undersøgte triaziner, sulfonylureaerbicer, benzonitriler samt Diazinon, Metribuzin og Bentazon”.

Det er blevet undersøgt, om det udviklede sandkoncept var robust i forhold til de pesticider og en række nedbrydningsprodukter, som kunne relateres til sprøjtemiddelformuleringer med godkendte anvendelser i Danmark (Rosenberg et al., 2013). En af konklusionerne var, at sandkonceptet stadig holdt i forhold til størstedelen nye godkendte stoffer, og at stofferne i det store hele udviser samme egenskaber, der ikke adskiller fra dem, der blev fundet i det oprindelige KUPA sand projekt.

5.2 Pesticider og leraflejninger

Det ovenfor beskrevne koncept blev udviklet til brug for følsomhedskortlægning på sandjorde, og som beskrevet i de øvrige afsnit i denne rapport er der væsentlige forskelligheder mellem sand og lerjorde/leraflejninger for en række betydende forhold. Dette afspejler sig også i de elementer, der er skitseret i figur 13. Baseret på undersøgelserne i KUPA-sand kan pesticidesårbarheden i sandjordsområderne betegnes som lithologisk styret, d.v.s. en beskrivelse kan baseres på jordens iboende egenskaber (i konceptet beskrevet ved humus, ler og silt).

Ud fra kendskab til danske leraflejningers karakteristika og centrale pesticidegenskaber vil det forventes, at der ved vurdering af følsomhed for leraflejninger i højere grad vil indgå elementer, som er hydraulisk, strukturelt og geokemisk styret. Eksempelvis forventes det, at der skal tages hensyn til at dække de centrale forhold som redoxforhold, hydrologi og vandtransport, skift af vandførende / ikke vandførende jordlag og udbredelse af mikroorganismer. Elementer, som i meget høj grad hænger sammen med leraflejningernes geologi, vandtransport i sprækkesystemer, variabilitet og fluktuerende randbetingelser.

Pesticidernes opholdstiderne i jord, transport som opløst og bundet til stof, og tilgængeligheden for nedbrydning forventes i leraflejninger at være stærkt relateret til sorptionskinetik og interaktioner mellem pesticiderne og jordmatricen, opslæmmede stoffer og kolloider. At etablere indsigt i sammenhænge mellem pesticidernes transport og interaktioner med strukturer i lerlagene vil forudsætte beskrivelse af et meget komplekst system. Detaljeret kendskab til centrale processer som sorptionsprocesser kræ-

ver indsigt i både processer og egenskaber i ler og lerlagenes komplekse strukturer med mange typer af overflader (Totsche et al., 2010).

Der er en række faktorer om pesticider og deres relationer til leraflejring, hvor det er centralt med en større indsigt og forståelse. Som i sandjordene er det derfor nødvendigt at identificere og beskrive de betydende og styrende parametre for pesticidernes skæbne i danske leraflejring. Mobiliteten af pesticiderne vil være af betydning for udvaskningen, også selv om den er hydraulisk styret. Derfor vil det også i leraflejringerne være nødvendigt med en kombineret beskrivelse af vandtransport og sorptionsprocesser. Det vil kræve en karakterisering af de danske leraflejringers egenskaber i forhold til de pesticidtyper, der forekommer i godkendte formuleringer, og som har anvendelsesrelevans på områderne. Nedadgående transport i leraflejring kan efter kraftige regnhændelser være meget hurtig, og det er her nødvendigt at kunne give et bud på, hvor store mængder pesticid, der vil kunne nedvaskes.

Viden om vandtransport i leraflejring med makroporer og præferentiel strømning er udbygget i de seneste år (Beven and Germann, 2013; Koerdel et al., 2008; Nimmo, 2012). Pulser i vandstrømningen i lerlagene vil også medføre oxidations- og sorptionskarakteristika, som er væsentligt forskellige fra mere almindelige betingelser i forskellige aflejring. Variation i redoxzonerne (rummelig og over tid) vil have betydning for pesticidernes skæbne i jorden, og risikoen for udvaskning af aktivstoffer og/eller metabolitter, men det er nødvendigt at undersøge størrelsen af effekten, og etablere et kvantitativt bud på variation og spænd i udvaskningshændelser for lerlagene.

6. Pesticidindhold i grundvandet og magasinforhold i Stevns, Hedeland og Dalsmose-Fuglebjerg områderne

Pesticider i grundvandet, samt forhold angående ler/sand forhold fra de tre forskellige områder, er undersøgt på basis af data i Jupiter databasen på GEUS.

Databasearbejde

I forbindelsen med arbejdet er der etableret deldatabaser fra Jupiter boringsdatabasen for tre områder med lertykkelse, antal lerlag, dybde til lerlag og kalk, dybde til øverste sandlag og tykkelsen af dette og samlet sand og lertykkelse i borer mm.

De etablerede datasæt er sammenholdt med udtræk af pesticiddata fra Grundvandsovervågningen (GRUMO), Boringskontollen (BK) og Andre analyser (AA) for de tre områder. Der etableres således tre delmængder af GRUMO, BK og AA fra den samlede database for de tre områder.

Datasættene er anvendt til at undersøge antal boringer analyseret, antal boringer med fund og antal boringer med fund $\geq 0,1 \mu\text{g/l}$ for de tre datatyper (GRUMO, BK og AA). Indenfor de tre datatyper er optalt antal stoffer (pesticider og nedbrydningsprodukter) fundet pr boring/indtag, antal stoffer fundet $\geq 0,1 \mu\text{g/l}$, den største koncentration fundet i boringen/indtaget samt gennemsnitskoncentrationer.

I forbindelse med etableringen er der kun anvendt udtræk, som stammer fra GRUMO rapporten for 2013 (Thorling et al., 2013). Det betyder, at denne sammenstilling kan sammenholdes med grundvandsovervågningsrapporten, som er under udarbejdelse, og at kvalitetssikringen af data der hvert år gennemføres i forbindelse med rapporten betyder, at f.eks. dubletter undgås.

Resultater

Forekomst af pesticider i de områder

Tabel 1 viser forekomsten af pesticider i de tre udvalgte områder: Stevns, Hedeland og Dalmose-Fuglebjerg.

Område	Data type	Antal boringer analyseret	Boringer med fund	Boringer $\geq 0,1 \mu\text{g/l}$	Fund andel %	0,01 til $0,1 \mu\text{g/l}$	$\geq 0,1 \mu\text{g/l}$
Hedeland	BK	26	11	2	42,3	34,6	7,7
	GRUMO	5	5	3	100,0	40,0	60,0
	AA	76	50	25	65,8	32,9	32,9
	alle	107	66	30	61,7	33,6	28,0
Stevns	BK	16	10	1	62,5	56,3	6,3
	GRUMO	16	11	8	68,8	18,8	50,0
	AA	44	24	11	54,5	29,5	25,0
	alle	76	45	20	59,2	32,9	26,3
Dalmose-Fuglebjerg	BK	28	3	0	10,7	10,7	0,0
	GRUMO	15	6	4	40,0	13,3	26,7
	AA	15	2	1	13,3	6,7	6,7
	alle	58	11	5	19,0	10,3	8,6
Alle tre oplande		241	122	55	50,6	27,8	22,8

Tabel 1. Forekomst af pesticider i de tre områder, Hedeland, Stevns og Dalmose-Fuglebjerg i BK, GRUMO og AA.

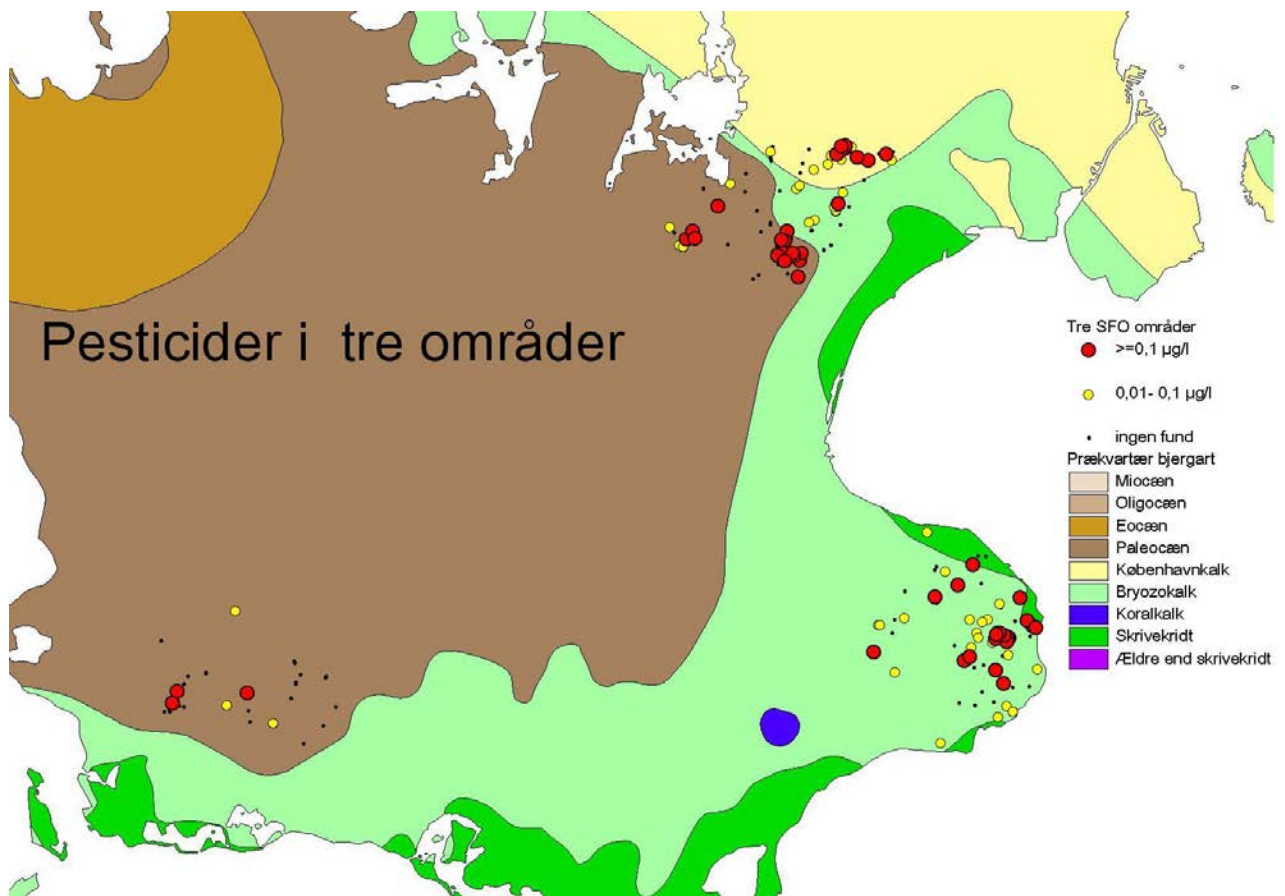
Af tabel 1 fremgår, at der i Stevns og Hedeland området forekommer pesticider i omtrent samme andele af de boringer, der er analyseret for pesticider, ca 60 %, mens der i Dalmose kun findes pesticider i ca 20 %. Grænseværdien for pesticider for grundvand på $0,1 \mu\text{g/l}$ var i de to områder Hedeland og Stevns overskredet i små 30 % af de analyserede boringer, mens grænseværdien var overskredet i små 10 % i Dalmose-Fuglebjerg.

Af tabellen fremgår, at der forekommer GRUMO-indtag i alle tre oplande, men at antallet af GRUMO indtag i Hedeland kun er fem. I modsætning til opgørelser på landsplan ses, at andelen af pesticider i aktive indvindingsboringer (BK) er overraskende højt i både Hedeland og Stevns, mens fundandelen i Dalmose-Fuglebjerg svarer til landsgennemsnittet. Andelen af overskridelser i indvindingsboringer i de to oplande er også langt højere end landsgennemsnittet (Thorling et al., 2013).

Vandværkerne lukker løbende boringer med fund af pesticider, og disse boringer overføres dernæst til gruppen AA, Andre Analyser/andre boringer. AA omfatter lukkede vandværksboringer, vandværksboringer ude af drift, andre monitoringstyper, små vandforsyninger, der forsyner enkelte husstande, forureningsundersøgelser etc. På landsplan ses derfor, at fundandele i AA er langt større end i BK og i GRUMO.

Dette er ikke tilfældet i Hedeland og på Stevns, hvilket kan tilskrives at disse to områder antagelig er mere sårbare. I Dalmoose-Fuglebjerg ses heller ikke en større fundandel i AA, hvilket formodentlig kan skyldes, at der ikke i dette område findes så mange AA borer.

Figur 14 viser fordelingen af analyserede borer og borer med fund i de tre områder. Af kortet ses, at Stevns området er domineret af Danien kalk og Skrivekridt, der underlejrer de glaciale sedimenter, mens Hedeland området domineres af både Danien bryozokalk og København kalk samt Palæocæn Grønsandskalk og ler. I Dalmoose-Fuglebjerg området er alle de prækvartære sedimenter også fra Palæocæn og består af Grønsandskalk og ler. Af figuren fremgår også at tætheden af borer er mindst i Dalmoose-Fuglebjerg området.



Figur 14. Forekomsten af borer med fund af pesticider over og under grænseværdien samt analyserede borer i de tre områder på Sjælland. Længst mod øst – Stevns området, længst mod nord Hedeland området og længst mod vest Dalmoose-Fuglebjerg området (Prækvartærkort fra Knudsen, 1998).

Lertykkelse og antal lerlag

Tabel 2 viser, at Hedeland og Stevns ikke adskiller sig væsentligt fra hinanden med hensyn til de målte koncentrationer af pesticider og antal stoffer fundet sammenholdt med dybde til øverste lerlag samt tykkelse af dette og den samlede tykkelse af ler i borerne med fund af pesticider. Tabellen har kun medtaget borer, hvor der er mindre end 5 meter til øverste lerlag.

I Dalmose-Fuglebjerg, hvor der ikke er fundet pesticider eller nedbrydningsprodukter så hyppigt, ses, at lerlagstykkelsen i borer med fund er langt større end i de to andre områder, og at den gennemsnitlige pesticidkoncentration i borer med fund, er større end i de to andre områder, mens antallet af analyser med fund pr boring er større i både Hedeland og på Stevns.

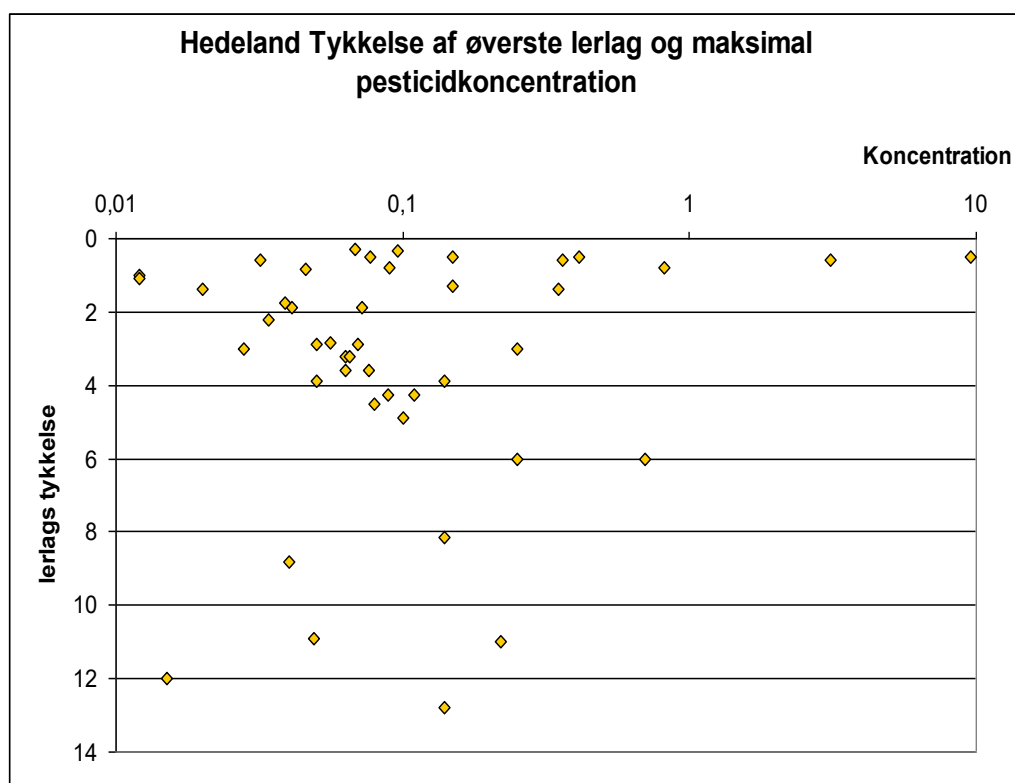
Område		Pesticider. Koncentrationer i µg/l					Lerlag i borer med pesticid-fund			
		Ant. ana. m. fund	Mak s. Kon c.	Gn s. Ko nc.	Antal stof-fer	Antal stoffer ≥ 0,1	Øverste lerlags tykkelse	Ler i bo-ring	Dyb de til ler	An-tal ler-lag
Hedeland (44)	Gns	4,5	0,4	0,1	2,8	0,9	3,4	10,0	0,9	4
	Medi	2,5	0,1	0,1	2,0	0,0	2,9	9,7	0,6	3
Stevns (25)	Gns	5,5	0,3	0,2	2,2	0,6	2,8	9,6	0,7	5,2
	Medi	2,0	0,1	0,1	1,0	0,0	2,6	9,6	0,5	2
Dalmose-Fuglebjerg (7)	Gns	2,1	0,6	0,5	1,4	0,6	2,5	47,6	0,5	5,6
	Med.	2	0,2	0,2	1	1	3,7	39,4	0,5	7,5

Tabel 2. Analyser med fund og antal lerlag, tykkelse og dybde i de tre områder, hvor der er mindre end 5 meter til øverste lerlag. Ant. ana. m. fund – gennemsnitligt antal analyser med fund i borer med fund. Gns –gennemsnit, medi - median. (n) – antal analyser end fund hvor der mindre end 5 meter til øverste lerlag.

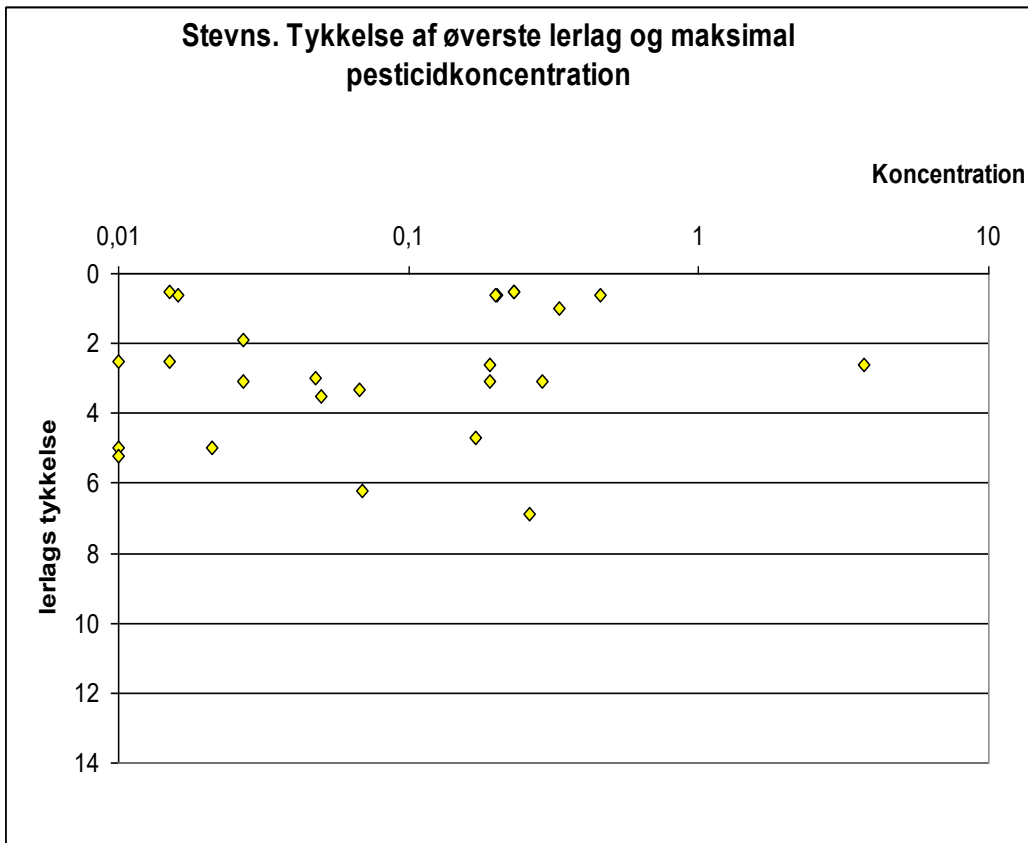
Figur 15 og 16 sammenholder den øverste lerlagstykkelse i borer med fund og den samlede lerlagstykkelse med de maksimale koncentrationer, der er målt i den enkelte boring.

Det fremgår af figurene, at der i en del borer i Hedeland forekommer tykkere lerlag, men også at der ikke er forskel på udbredelsen af pesticider i de to områder. Et tilsvarende mønster ses, når koncentrationer sammenholdes med den samlede tykkelse af lerlagene i borer med fund (Figur 17 og 18).

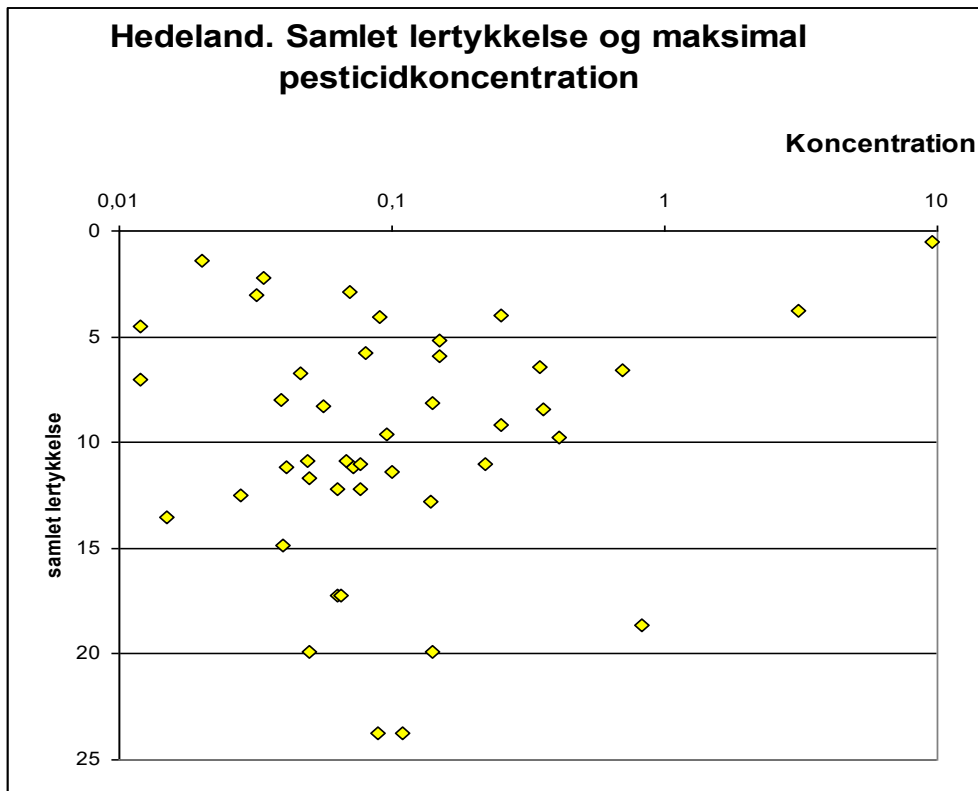
Da der kun forekommer oplysninger fra syv borer i Dalmose-Fuglebjerg, hvor dybden til øverste ler lag er mindre end 5 m, er der ikke lavet tilsvarende figurer for området, men dybden til øverste lerlag ligger i intervallet 1-4 m under terræn, og den samlede lertykkelse (antagelig inklusiv palæocænt ler) i borer med fund er fra ca. 40 til 100 meter.



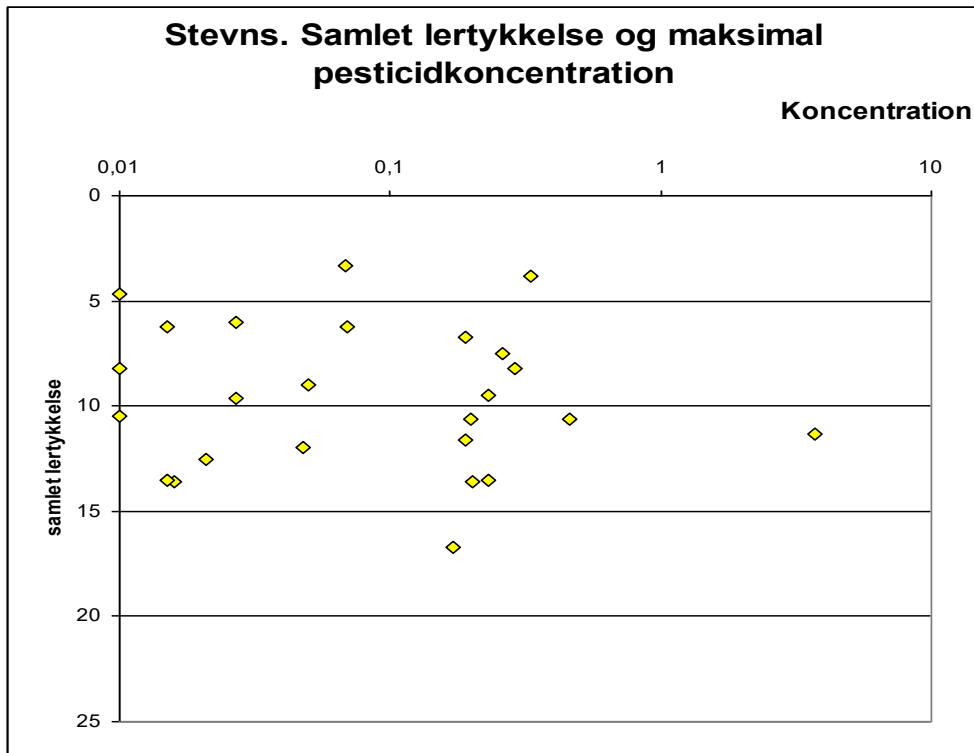
Figur 15. Tykkelse af det øverste lerlag og maximal pesticidkoncentration i Hedeland området. Koncentration i $\mu\text{g/l}$.



Figur 16. Tykkelse af det øverste lerlag og maximal pesticidkoncentration i Stevns området. Koncentration i µg/l.



Figur 17. Samlet lertykkelse af det øverste lerlag og den maksimale pesticid koncentration målt i den enkelte boring. Hedeland området. Koncentration i µg/l.

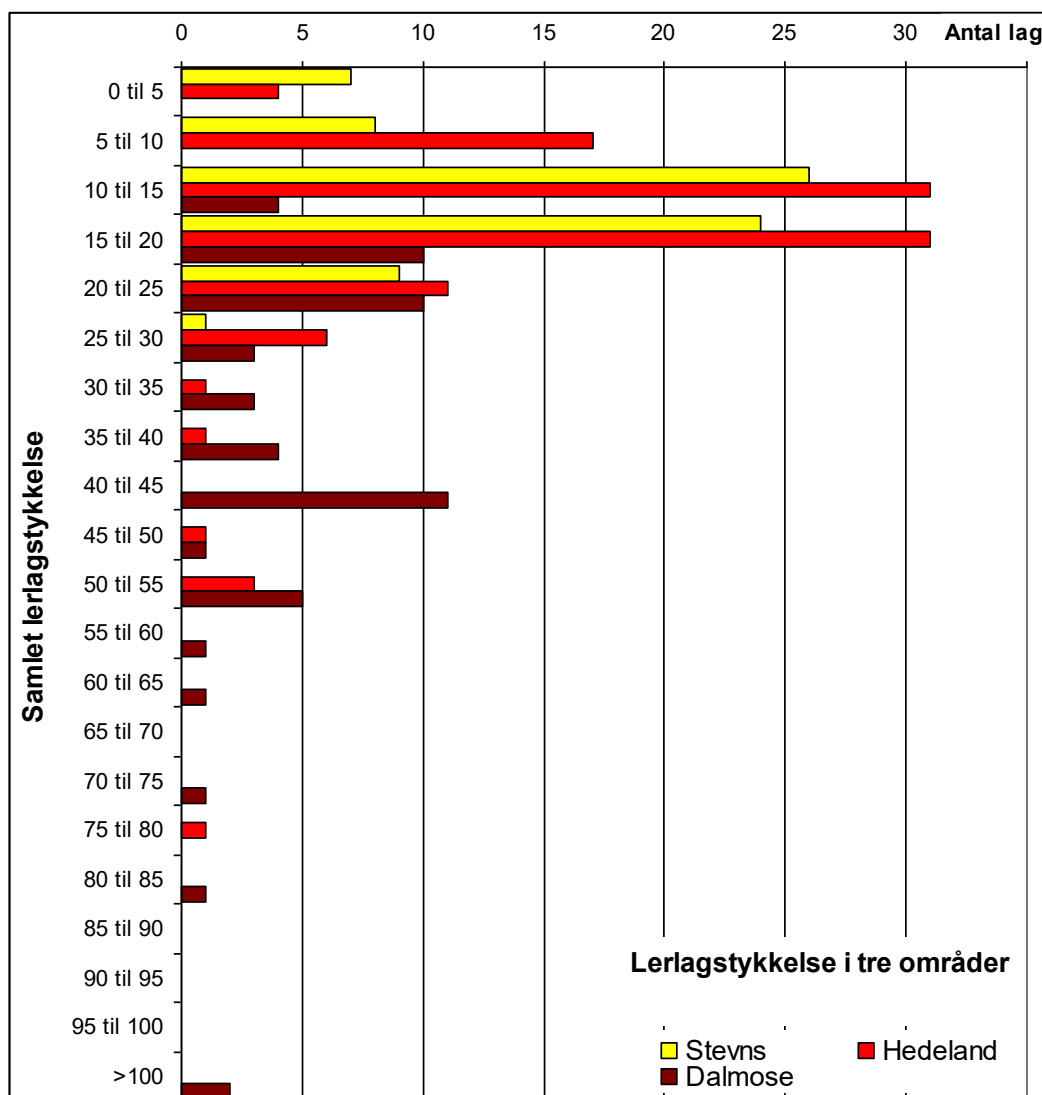


Figur 18. Samlet lertykkelse af det øverste lerlag og den maksimale pesticid koncentration målt i den enkelte boring. Stevns området. Koncentration i $\mu\text{g/l}$.

I figur 19 er vist antallet af boringer i de tre områder opdelt efter lerlagstykkelse. Af figuren fremgår, at der i Stevns området er mange boringer med tynde lerdækker, mens der i Hedeland forekommer en del boringer med ret tykke lerdækker.

I Dalmoose-Fuglebjerg området findes mange boringer, der indeholder meget tykke lerlag, og der forekommer i dette område ikke boringer, som indeholder mindre end 10 meter moræneler.

Tabel 3 viser, at den gennemsnitlige lertykkelse for alle boringer i de tre områder er størst i Dalmoose-Fuglebjerg, mens lertykkelsen på Stevns er en smule mindre end i Hedeland. Der er ingen markante forskelle på tykkelsen af det øverste lerlag i de tre områder.



Figur 19. Den samlede lertykkelse i den enkelte boring i de tre områder. Der er optalt antal boringer i hvert interval. Alle boringer i Jupiter databasen inden for områderne er medtaget.

Område		Tykkelse af øverste lerlag	Samlet lertykkelse i boringer	Antal lerlag
Hedeland	Gns	4,6	12,2	3,4
	Medi	3,2	10,2	3,0
Stevns	Gns	4,1	9,3	3,4
	Medi	3,0	9,6	2,0
Dalmose-Fuglebjerg	Gns	4,1	32,2	9,8
	Medi	2,5	27,1	7,5

Tabel 3. Den gennemsnitlige tykkelse af det øverste lerlag og den gennemsnitlige samlede tykkelse af alle lerlag i alle boringer i de tre områder. Gns – gennemsnit, medi – median.

Dybde til prækvartær aflejringer

Tabel 4 viser, at den gennemsnitlige dybde til kalken er mindst i Stevns området, hvor kalken ligger ca 10 meter under terræn, mens kalken ligger 20 m under terræn i Hedeland.

Alle analyser med fund

Område og antal		Maks. konc.	kalk, dybde til	antal stoffer	antal stoffer \geq 0,1
Hedeland (n=66)	gennemsnit	1,38	19,3	3,3	1,2
	sum	91,03		219	79
	median	0,09	18	2	0
Stevns (n=45)	gennemsnit	0,32	10,3	2,2	0,6
	sum	14,21		100	27
	median	0,07	11	2	0
Dallose-Fuglebjerg (n=11)	gennemsnit	0,39	>100	1,5	0,5
	sum	4,29		17	6
	median	0,07		1	0

Analyser < 0,5 μ g/l

Hedeland (n=54)	gennemsnit	0,11	20,0	2,2	0,5
	Sum	5,73		121	27
	median	0,07	19,1	2	0
Stevns (n=41)	gennemsnit	0,12	10,1	2,1	0,5
	Sum	4,85		88	20
	median	0,05	10	2	0
Dallose (n=8)	gennemsnit	0,06	>100	1,5	0,4
	Sum	0,48		12	3
	median	0,03		1	0

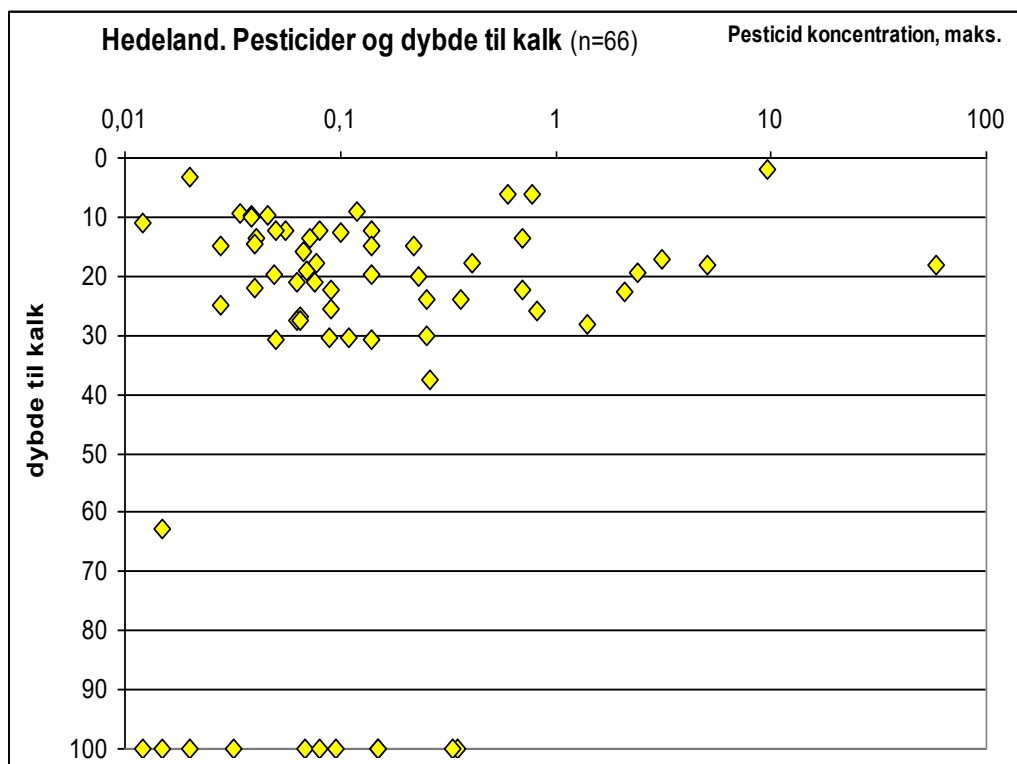
Tabel 4. Gennemsnitlig dybde til kalk og pesticidkoncentrationer beregnet ud fra den maksimale fundne koncentration i de enkelte borer. Antal stoffer og antal stoffer \geq 0,1 μ g/l beregnet som gennemsnit.

Det fremgår, at den gennemsnitlige pesticidkoncentration er størst i Hedeland, hvilket kan skyldes, at der i dette område forekommer nogle punktkilder. Derfor er der i tabel 4 også gennemført de samme gennemsnitsvurderinger for analyser, der er mindre en 0,5 μ g/l. Af disse koncentrationer fremgår, at der ikke sker ændringer i dybdefordelingen til

top kalk, men at de fundne koncentrationer i Hedeland og på Stevns er sammenlignelige.

Figur 20 og 21 viser pesticidkoncentrationer mod dybden til kalken. Af figurerne fremgår, at der ikke er den store forskel på fordelingen af pesticid koncentrationer i Hedeland og på Stevns bortset fra, at pesticiderne i Hedeland bliver fundet ca. 10 m dybere end på Stevns, men at koncentrationerne ikke afviger fra Stevns.

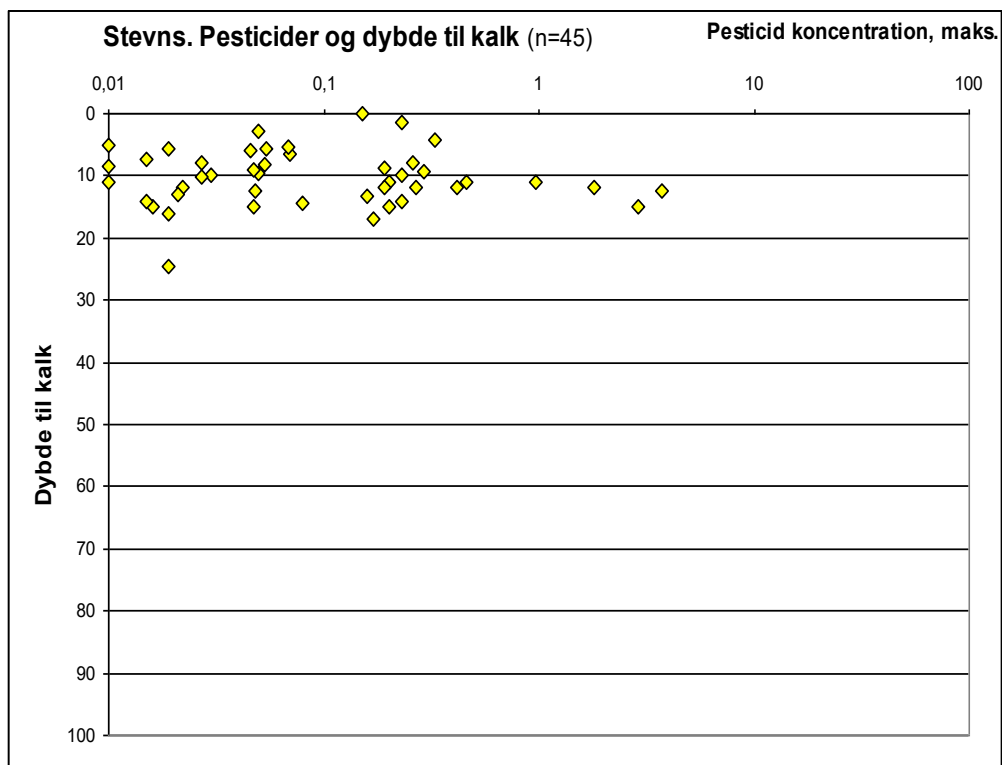
Desuden er der i Hedeland elve borerer med fund, hvor kalken ikke er anboet. I disse borerer er dybden til kalken sat til 100 m under terræn, selv om disse elve borerer har en boreddybde, der er mindre end 30 m. De elve borerer har en gennemsnitlig borerings dybde på ca. 19 m.



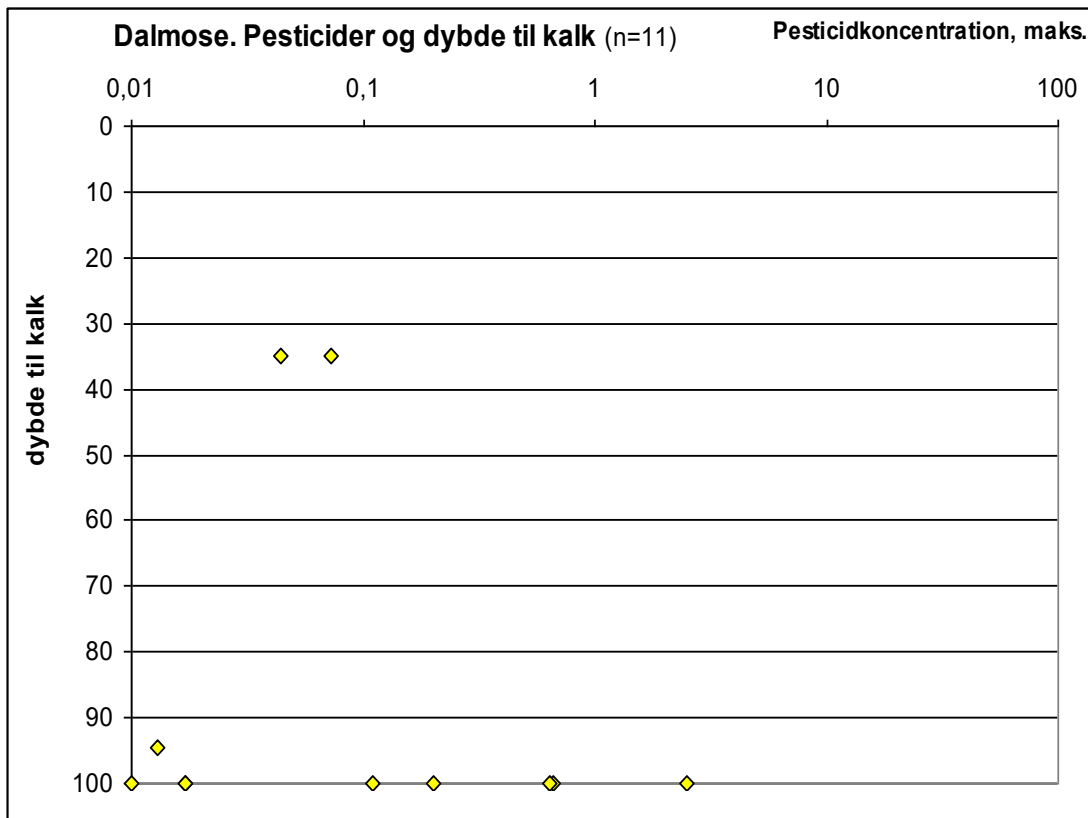
Figur 20. Dybde til kalk og den maksimale koncentration i borerer med fund af pesticider og nedbrydningsprodukter. Hvor kalken ikke er anboet er dybden til kalk sat til 100 meter. (n) antal borerer med pesticidfund. Hedeland området. Koncentration i µg/l.

I Dalmose-Fuglebjerg området forekommer der kun tre fund i borerer, hvor grønsandskalken er anboet, mens de resterende otte fund stammer fra borerer, hvor kalken ikke er nået. Disse otte borerer har en middeldybde på 53 m (Figur 22).

Den mulige sårbarhed overfor pesticider i Hedeland og Stevns er ikke afhængig af dybden til kalk, men kalkdybden betyder alene, at pesticidfund i Stevns området sker i ca. 10 m's mindre dybde. Dette forhold skyldes, at kalken ligger tæt ved terræn i Stevns området.



Figur 21. Dybde til kalk og den maksimale koncentration i borer med fund af pesticider og nedbrydningsprodukter. Hvor kalken ikke er anført er dybden til kalk sat til 100 meter. (n) antal borer med pesticidfund. Stevns området. Koncentration i µg/l.



Figur 22. Dybde til Grønsandskalk og den maksimale koncentration i borerer med fund af pesticider og nedbrydningsprodukter. Hvor kalken ikke er anført er dybden til kalk sat til 100 meter. (n) antal borerer med pesticidfund. Dalmose-Fuglebjerg området. Koncentration i µg/l.

Sandlag, antal og dybde.

Tabel 5 viser, at der ikke er fundet sandlag mellemleret lerlag i borerer med fund af pesticider på Stevns, mens der gennemsnitlig er fundet 3,9 sandlag i borerer i Hedeland, hvor der er fundet pesticider.

I Dalmose-Fuglebjerg området, hvor tykkelsen af lerlagene er større end i Hedeland, er der fundet ca. dobbelt så mange sandlag mellemleret lerlagene i borerer med fund. Den gennemsnitlige dybde til det øverste lerlag er 6,4 m i Hedeland, mens den gennemsnitlige dybde til øverste lerlag er næsten tre gange større, 17,4 m, i Dalmose-Fuglebjerg.

Tabel 5 viser også, at antallet og tykkelsen af sandlag formodentlig har stor betydning for udvaskning af pesticider i Hedeland og i Dalmose-Fuglebjerg, mens det formodentlig er tyndere morænelerslag med mange makroporer på Stevns, der har betydning for

udvaskning og transport af pesticider og nedbrydningsprodukter til grundvandsmagasinerne.

Område, antal boringer med fund		Maks Konc	Gns Konc	Antal stoffer	Stoffer $\geq 0,1$	Antal sandlag	Tykkelse øverste sandlag	Tykkelse af sandlag i boring	Dybde til øverste sandlag
Hedeland (66)	Gns	1,38	0,32	3,3	1,2	3,9	3,5	8,9	6,4
	Medi	0,09	0,07	2	0	2	2	8,4	7
	Sum	91,03		219	79	260		589,9	
Stevns (45)	Gns	0,32	0,21	2,2	0,6	0	0	0	-
	Medi	0,07	0,05	2	0	0	0	0	-
	Sum	14,21		100	27	0		0	-
Dalmose - Fuglebjerg (11)	Gns	0,39	0,3	1,5	0,5	6,7	1,4	11,3	17,4
	Medi	0,07	0,1	1,0	0	6,0	1,0	5,2	11,8
	Sum	4,29	3,7	17,0	6,0	74,0		124,7	191,0

Tabel 5. Boringer med fund af pesticider i de tre områder. Gennemsnits median og sum af pesticidkoncentrationer samt antal sandlag, tykkelse af øverste sandlag, den samlede tykkelse af sandlag i boringerne samt dybden til øverste sandlag.

Pesticider i Stevns og Hedeland områderne

Gennemgang af indberettede boringer med pesticiddata til Jupiterdatabasen viser nedenstående indhold over grænseværdien af stoffer og deres nedbrydningsprodukter. Der tale om både forbudte stoffer, regulerede stoffer og tilladte stoffer (Tabel 6). Listen er sandsynligvis en minimumsliste.

Der er kun medtaget pesticider fra Stevns og Hedeland områderne, da det er disse to områder, som vurderes i forhold til mulig transport gennem makroporer i moræneler. Pesticiddata findes i øvrigt fra Fårdup VAP lermarken (Brüsch et al., 2013).

Tabel 6. Pesticider og metabolitter påvist i koncentrationer over grænseværdien (0,1 µg/l) i grundvandsprøver udtaget i Hedeland og på Stevns.

Forbindelse	Hedeland	Stevns
2,6 –DCPP	x	
2,6 dichlorbenzoylsyre	x	
4-CPP 2-(4-chlorophenoxy)propanon syre	x	
4-Nitrophenol		X
Atrazin	x	X
Atrazin, deethyl-hydroxy	x	
Atrazin, desethyl	x	X
Atrazin, desisopropyl	x	X
BAM (2,6 Dichlorbenzamid)	x	X
Bentazon		X
DEIA	X	X
Dichlorbenil		X
Dichlorprop		X
Didealkylhydroxyatrazin	X	
Diuron	X	
MCPA		X
Merchlorprop	x	X
Simazin		X
Terbutylazin		X
Glyphosat/AMPA		X

7. Generel geofysisk grundvandskortlægning på landsplan

7.1 Indledning

Der er gennemført en generel vurdering af eksisterende geofysiske data indsamlet i grundvandskortlægningen. Dette er gjort med henblik på at vurdere hvilke typer af geofysiske data, der er velegnede til bestemmelse af morænelerstykkelser inden for de øverste 15-20 m, til at kortlægge aflejringerens horisontale udbredelse, samt i hvor stort et omfang disse data kan bidrage til en beskrivelse af heterogeniteter internt i morænelersaflejringerne.

Vurderingen af metodernes velegnethed til bestemmelse af morænelerstykkelser inden for de øverste 15-20 m er primært baseret på en analyse af en række syntetiske 1D modeller. Der er valgt at anvende en analyse af enkeltstående 1D sonderinger, da det er et simpelt og brugbart værktøj til at simulere de forskellige instrumentsystemer. I konkrete kortlægninger vil data i næsten alle tilfælde tolkes med laterale (LCI) eller rumlige (SCI) bånd på modelparametrene, hvilket oftest forbedrer bestemmelsen af modellerne. Det er dog umuligt i en undersøgelse som denne at foretage retvisende analyser af betydningen af LCI og SCI-tolkninger, hvorfor den simple, men brugbare analyse af enkeltstående 1D modeller er valgt.

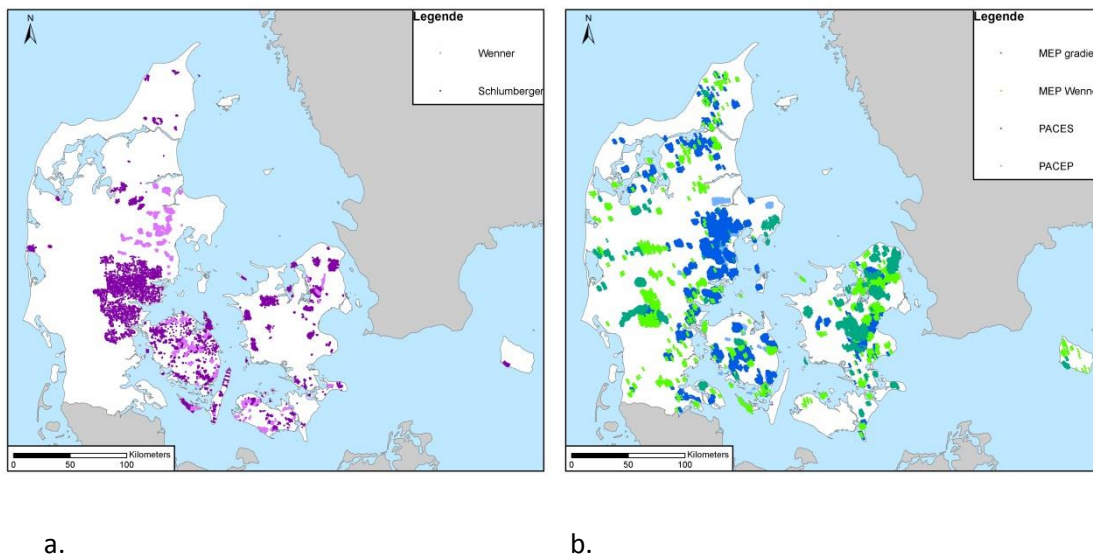
Vurdering af metodernes egnethed til at kortlægge aflejringerens horisontale udbredelse, og i hvor stort et omfang disse data kan bidrage til en beskrivelse heterogeniteter internt i morænelersaflejringerne, er baseret på metodernes opløsningsevne beskrevet eller illustreret i modelstudier og feltstudier fra litteraturen. En fuldstændig undersøgelse af metodernes laterale opløsningsevne ville kræve en analyse af en række 2D og 3D syntetiske modeller, hvor de syntetiske data fremkommer ved 2D eller 3D forward-modellering af data og en efterfølgende tolkning af disse, der inkluderer laterale (LCI) eller rumlige (SCI) bånd på modelparametrene, som alle feltdata i praksis tolkes med. Det er en umådeligt ressourcekrævende proces at foretage en sådan analyse og ligger derfor uden for denne rapports ramme.

7.2 Baggrund

I dette afsnit gives en generel beskrivelse af de typer af geofysiske data der er indberettet til GERDA databasen (<http://gerda.geus.dk>), og som er indsamlet i Grundvandskortlægningen. Afsnittet bygger en baggrundsforståelse op, og derudfra laves afgrænsninger af hvilke data, der kommer til at indgå i vurderingen.

7.2.1 Elektriske metoder

Geoelektriske metoder har været anvendt siden 1950'erne i hydrogeologisk og almen geologisk kortlægning samt råstofeftersøgning, hvor man anvendte linjeprofilering (Wennerprofilering med én, typisk to og maksimalt fire elektrodeafstande) og punktprofilering (Schlumbergersondering). De geoelektriske metoder har undergået en meget betydelig udvikling siden midten af 1980'erne, hvor man begyndte at lade computere styre dataindsamlingen, og profilering og sondering blev indbygget i én arbejdsproces. Det har ført til udviklingen af først PACEP fra omkring 1988 (Sørensen & Pedersen, 1991, Sørensen, 1996) og siden PACES omkring 1998 samt multi-elektrode-profilering (MEP) (van Overmeeren & Ritsema, 1988, Dahlin, 1996). De første MEP-profiler blev udført i Danmark i 1993, hvor målingerne blev udført med én-kanalsudstyr og Wenner-



Figur 23. Geoelektriske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013). Datatyperne a) Wenner profilering og Schlumberger sonderinger og b) PACES/PACEP og MEP er vist. (Se også bilag 3).

konfigurationsprotokoller. Disse er siden afløst af flerkanalsudstyr og gradient-konfigurationsprotokoller (Geofysiksamarbejdet, 2005a). PACES/PACEP- og MEP-metoderne er beskrevet mere detaljeret i et efterfølgende kapitel.

Alle geoelektriske data, som er indsamlet i regi af Grundvandskortlægningen, kan findes i GERDA databasen (<http://gerda.geus.dk>) sammen med data indsamlet af andre aktører og en del ældre data. Figur 23 viser data, fordelt på datatype indberettet til GERDA inden 1/11 2013. (Se også bilag 3, hvor kortene også findes).

Afgrænsning

Data fra Wennerprofilering vil ikke indgå i vurderingen, da disse data traditionelt ikke er blevet tolket og derfor præsenteret som tilsyneladende resistivitet; hvorfor det kun er muligt at bruge data kvalitativt. Schlumbergersonderinger vil heller ikke indgå i vurderingen, da disse typisk er målt med for stor indbyrdes afstand til at kunne bruges i vurdering af laterale variationer i de øvre jordlag samtidig med, at der kan være relativ stor usikkerhed forbundet med tolkningerne.

7.2.2 Elektromagnetiske metoder

De første elektromagnetiske (EM) metoder var frekvensdomæne metoder udviklet omkring 1930 i Sverige, USA og Canada til mineralråstofefterforskning af f.eks. godt ledende sulfidmineraliseringer i højresistivt grundfjeld. Metoderne blev gjort luftbårne et par årtier senere. Tidsdomæne EM (transient EM eller TEM) instrumentel blev introduceret omkring 1960. I løbet af de seneste 20–30 år har anvendelsen af EM metoderne bredt sig til en lang række anvendelser inden for miljø og grundvandsrelaterede opgaver, hvor resistivitetskontrasterne er relativt små. Det stiller større krav til målenøjagtighed, kalibrering, processering og tolkning af data.

I Danmark er den mest udbredte elektromagnetiske metode TEM metoden, som blev introduceret i starten af 1990'erne af Aarhus Universitet (GeofysikSamarbejdet, 2003, Danielsen et al., 2003). Der startede man med at måle med Protem systemet fra det canadiske firma Geonics. Senderen var en TEM47, hvorfor det ofte blot refereres som Protem47. Data/instrumentsystemet omtales også ofte som 40x40 TEM efter sender-spølsens konfiguration med et kvadratisk udlæg med sidebredde på 40 m. Med gode geologiske forhold er indtrængningsdybden op til 150 m.

Ønsket om at opnå en større indtrængningsdybde førte til udvikling af HMTEM (højmoment TEM) ved Aarhus Universitet, hvor der blev bygget en kraftigere sender og nye modtagerspoler, som blev kombineret med Protem-modtageren. Der er lavet to varianter, som under optimale geologiske forhold kan kortlægge til dybder på over 250 m (GeofysikSamarbejdet 2003, Danielsen et al. 2003, Sørensen et al. 2005).

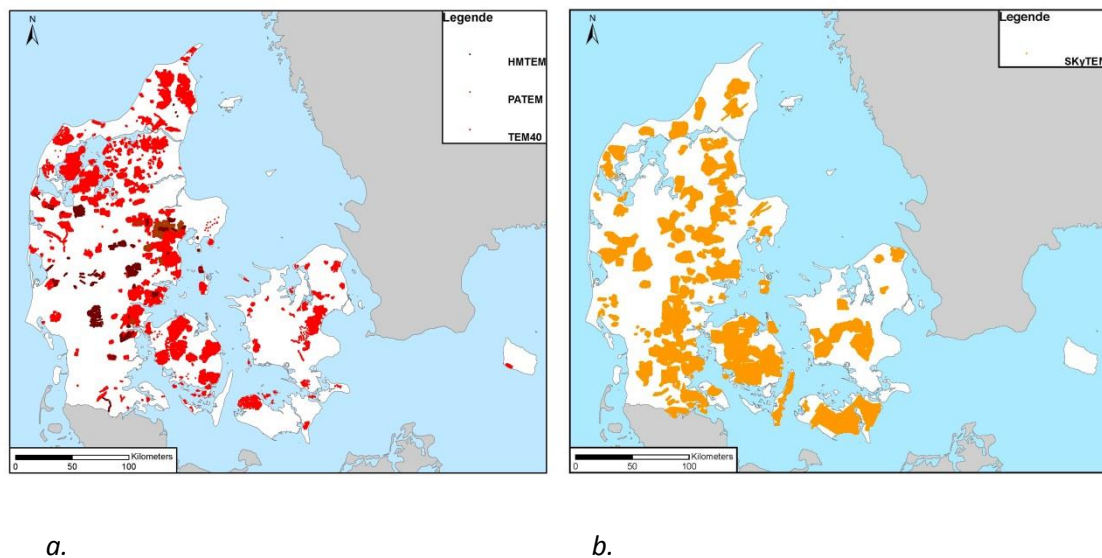
Fra forskellige sider blev der gjort forsøg på at indføre luftbårne elektromagnetiske metoder til hydrogeofysisk kortlægning. En række amter gik sammen om at få Aarhus Universitet og GEUS til at udarbejde rapporter med vurdering af flybårne TEM-systemer i 2000 (Christensen et al., 2000) og helikopterbårne frekvensdomæne (HEM) systemer i 2002 (Christensen et al., 2002). Konklusionerne i rapporterne blev baseret på analyser af éndimensionale og todimensionale modeller og ved brug af de tolkningsrutiner, som man typisk anvendte i tolkningsprocessen. De flybårne TEM-systemer, som var til rådighed på daværende tidspunkt, havde for lav opløselighed sammenlignet med Protem47-systemet og til de krav, der var stillet i grundvandsresourcekortlægningen, mens den primære hindring for HEM-systemerne blev en begrænset indtrængningsdybde på 50-70 m. Der er lavet tre til fire kortlægninger med HEM-systemet i Danmark. Data fra disse kortlægninger er ikke indberettet til GERDA.

En hurtigere dataindsamling og tættere datadækning blev opnået med PATEM (Pulled array TEM) systemet som blev udviklet ved Aarhus Universitet i slutningen af 1990'erne (GeofysikSamarbejdet, 2003, Danielsen et al., 2003, Sørensen et al., 2005). For at gøre systemet mobilt blev det designet med sender og modtager i offset-konfiguration. Det giver stor følsomhed over for laterale variationer (Geofysiksamarbejdet, 2002a), men omvendt viste det sig nødvendig at have lange laterale midlingsfiltre for at data kunne tolkes efter standarden med 1D modeller. Disse lange laterale midlingsfiltre udglattede til dels den laterale information.

SkyTEM er udviklet ved Aarhus Universitet som en videreudvikling af de forskellige jordbaserede TEM-systemer, og de første data blev indsamlet i december 2002 (Sørensen & Auken, 2004). Siden er der sket en løbende udvikling af systemet mod større sendermoment for øget indtrængningsdybde og mod brugbare data til tidligere tider for information om jordlagene tættest på overfladen. Den del af SkyTEM-udviklingen, som har betydning for den information, man opnår om de øvre jordlag, er ridset op i et efterfølgende SkyTEM-metodeafsnit.

Alle TEM-målinger, som er udført under grundvandskortlægningen siden 2001 er kalibrerede til et absolut niveau. Et nationalt teststed vest for Aarhus blev oprettet med henblik på at kunne verificere og sikre at data indsamlet med forskellige ProTEM-instrumenter ville give samme resultat på samme lokalitet (Geofysiksarbejdet, 2002b). Data målt på teststedet vil yderligere kunne afsløre fejl ved det anvendte instrument. Sidenhen er alle TEM-systemer anvendt i Danmark løbende blevet testet og data kalibreret ved brug af teststedsmodellen. Det gør det muligt at sammenstille data indsamlet på forskellige tidspunkter og med forskellige instrumenter i sammenhængende tematiske kort. I 2012 blev det konstateret i flere SkyTEM-kortlægninger, at de mest terrænnære lag havde klart lavere modstande, hvis man sammenlignede med f.eks. PACES eller MEP målt langs samme profil. Problemet var opstået ved, at de nye SkyTEM-systemer kan måle til tidligere tider end det gamle jordbaserede ProTEM47 system, og derfor er følsom over for jordlag tættere ved overfladen. Efter en deltaljet kortlægning med MEP på teststedet blev teststedsmodellen revideret (Geofysiksarbejdet, 2012), og problemet med de lave terrænnære modstande løst.

Figur 24 viser udbredelsen af data indsamlet med forskellige TEM-systemer og SkyTEM-systemerne, hvor data er indberettet til GERDA inden 1/11 2013. (Se bilag 3).



Figur 24. Elektromagnetiske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013). a) For forskellige typer af jordbaseret TEM og b) SkyTEM. (Se også bilag 3).

Stangslingram (også kaldet ground conductivity meters, GCM) er små lethåndterlige frekvensdomæne elektromagnetiske instrumentsystemer som fx EM38 og EM31 med

en enkelt spolekonfiguration, der er anvendt inden for ler- og jordbundskortlægning (Møller et al., 2001, Møller, 2001), eller nye systemer som DualEM421S med seks spole-konfigurationer, som vil få en bredere anvendelse til kortlægningen af de øverste 5-8 m af jorden. Der har indtil videre ikke været indberettet data af denne type til GERDA.

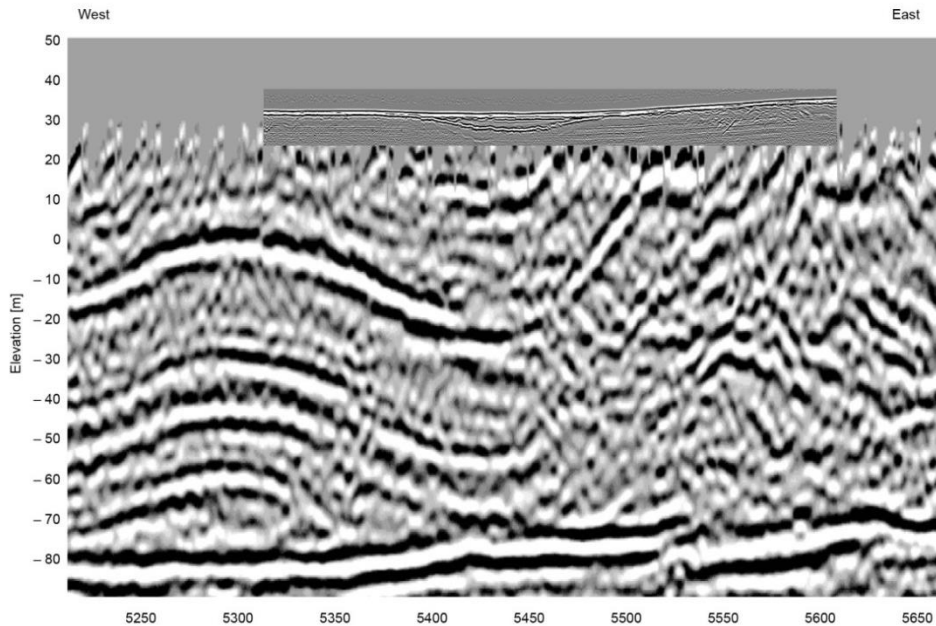
Begrænsninger

Data fra 40x40 TEM og andre jordbaserede TEM-systemer, hvor målinger er udført som enkeltstående sonderinger typisk med en afstand på 250 m, indgår ikke i vurderingen, da det for disse metoder ikke er muligt at vurdere den horisontale udstrækning af de øvre jordlag.

Med PATEM-systemet indsamles data langs profiler, og efter dataprocessing med filtrering og midling er afstanden mellem sondering langs profilet på 25 eller 50 m. Da PATEM-systemet anvender en offset sender-modtager konfiguration, er den meget følsom over for overfladenære laterale resistivitetsændringer. For at gøre PATEM-data tolkbare med 1D modeller er det nødvendigt at lave en relativ hård lateral midling af data. PATEM systemet indgår ikke direkte i analysen af de syntetiske 1D modeller, da det har været for omfattende her at simulere effekten af dataprocesseringen med laterale midling. Ydermere vurderes det, at systemet vil have begrænset information om de aller-øverste jordlag, fordi tiden for den første dataværdi er relativt sen (omkring 17 mikrosekunder hvilket svarer til de tidligste SkyTEM-systemer)

7.2.3 Seismik

Med introduktionen af slæbeseismik, hvor en minivibrator kombineres med landstreamer (Vangkilde-Pedersen et al., 2003) tog indsamlingen af højopløseligt reflektionsseismik fart og gennem de seneste 10 år er der indsamlet mere end 1500 km. Det er ikke muligt at opnå information om de mest terrænnære jordlag (< ~ 10-15 m), bl.a. på grund af for sparsom geofondækning. Dette er illustreret i figur 25, hvor udsnit af et vibroseismisk profil er vist sammen med et 100 MHz georadarprofil. Figur 26 viser placeringen af de seismiske linjer, som er indberettet til GERDA inden 1/11 2013. (Se bilag 3).



Figur 25. Udsnit af et vibroseismisk profil og et 100 MHz georadar profil indsamlet mellem Ølgod og Skovlund i KOMPLEKS-projektet (efter Høyer et al., 2013).

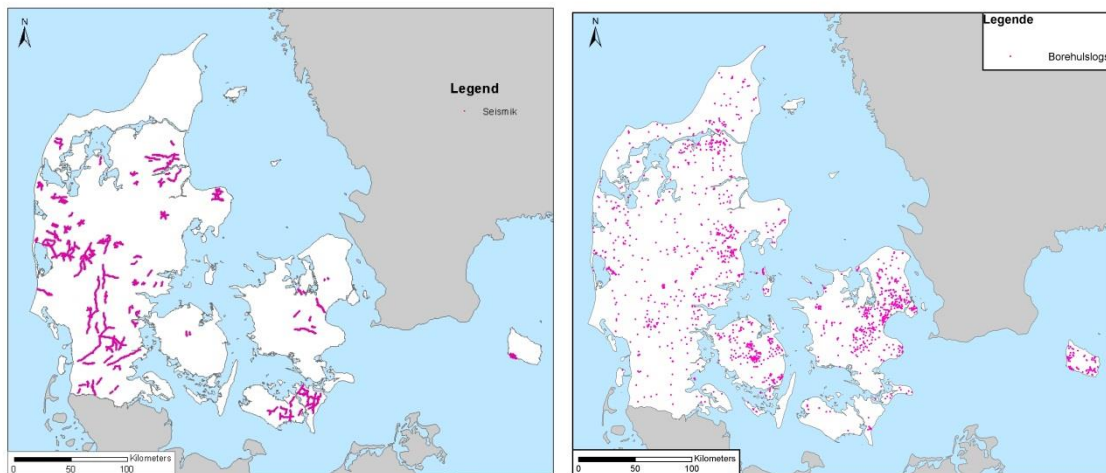
Da der ikke kan opnås information om de mest terrænnære jordlag vil reflektionsseismiske data ikke indgå i vurderingen.

7.2.4 Borehulslogs

Der er løbende indsamlet geofysiske borehulslogs gennem hele Grundvandskortlægningen. Det er foretaget borehulslogging både i nye borehuller, hvor der logges i åbent hul, og i eksisterende udbyggede boringer. Geofysiske borehulslogs giver sammen med en lithologisk beskrivelse af det opborede materiale et direkte mål for tykkelsen af morænelerslagene og er et vigtigt hjælpemiddel, når øvrige geofysiske data skal tolkes.

Da loggede borehuller oftest står med relativ stor indbyrdes afstand, kan man ikke ud fra borehulslogs alene udtale sig om den laterale udbredelse af morænelerslagene eller den laterale variation af inhomogeniteter i morænelerslagene. Borehulslogs vil ikke indgå i vurderingen.

Figur 26 viser placeringen af geofysiske borehulslogs som er indberettet til GERDA inden 1/11 2013. (se bilag 3).



a.

b.

Figur 26. Kort med a) Seismiske data og b) Borehulslogs udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013). (Se også bilag 3).

7.2.5 Magnetisk resonans sondering

Magnetisk resonans sondering (MRS), hvor ændringer i jorden vandindhold direkte kan måles, har været udført i grundvandskortlægningen gennem de senere år (Nielsen et al. 2008). MRS måles som enkeltstående sonderinger, og målingerne bidrager derfor ikke med lateral information om jordlagene eller deres laterale inhomogeniteter; MRS vil ikke indgå i vurderingen. Der arbejdes på at udvide GERDA, så de MRS-sonderinger, der er udført i Grundvandskortlægningen, kan indberettes til GERDA.

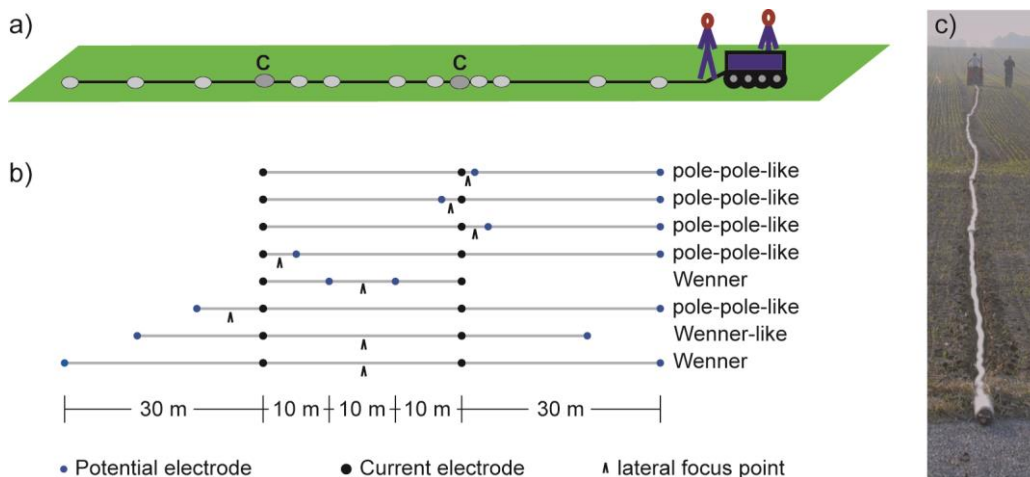
7.3 Beskrivelse af geofysiske metoder

I dette afsnit gives der en kort beskrivelse af de metoder, som indgår i vurderingen, da de både giver information om laterale variationer og så megen information om vertikale variationer, at det giver mulighed for at vurdere lagtykkelser. I afsnittet om SkyTEM gives en beskrivelse af den seneste udvikling inden for denne metode og dennes betydning for metodens evne til at kortlægge tynde og overfladenære moræneler aflejringer.

7.3.1 PACEP og PACES

PACEP og PACES (pulled array continuous electrical profiling/sounding) også på dansk kaldt slæbegeoelektrisk metode, kombinerer geoelektrisk sondering med profilering, således at man måler, hvorledes jordens resistivitet varierer både lateralt og med dybden ned til ca. 20 meter. Data indsamles langs profiler. Afstanden mellem profillinjerne afhænger dels af de laterale resistivitsvariationer dels af opgavens detaljeringsgrad; i sårbarhedskortlægningen af grundvandsmagasiner har linjeafstanden typisk været 250 m.

Måleproceduren for PACES/PACEP (Sørensen & Pedersen, 1991, Sørensen, 1996, Geofysiksamarbejdet, 2008a) består i, at en række elektroder slæbes hen over jorden af et lille bæltekøretøj (Figur 27). Der sendes en strøm gennem et elektrodepar, mens potentialet måles over en række elektrodepar samtidigt. Der anvendes normalt et "slæb", hvor afstanden mellem strømelektroderne er 30 m, og hvor otte potentialelektrodepar (PACES) er fordelt således, at der er elektrodeafstande mellem 2 m og 30 m. Elektrodekonfigurationerne med de korte elektrodeafstande er pol-pol agtige konfigurationer, mens de med længere elektrodeafstande er Wenner-lignende konfigurationer (Figur 27). Indtil 1998 blev der benyttet et "slæb" med tre Wenner-lignende elektrodekonfigurationer (PACEP).



Figur 27. PACES metoden. a) skitse af PACES systemet, hvor elektroderne monteret på et multilederkabel bliver trukket af et lille bæltekøretøj. b) Diagram over de otte elektrodeopstillinger. c) Foto af PACES systemet i felten. (Møller et al., 2006).

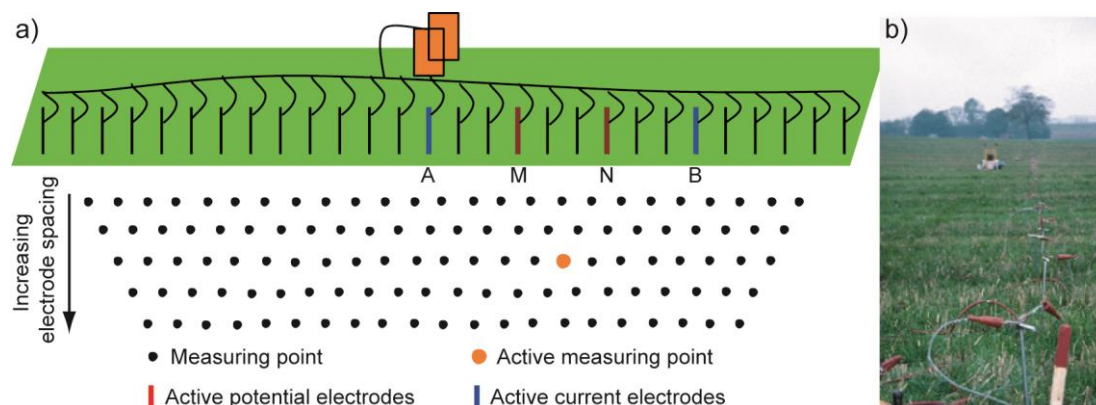
Der er typisk efter stakning ca. 1 meter mellem datapunkterne. I efterprocesseringen filtreres og midles data yderligere og samles i sonderinger for hver 5-10 m. Sonderingerne tolkes med én-dimensionale resistivitetsmodeller, hvis modelparametre er koblet til nabomodellernes modelparametre, en såkaldt LCI tolkning (GeofysikSamarbejdet, 2002c, Auken et al., 2005).

7.3.2 MEP

MEP-metoden kombinerer geoelektrisk profilering og sondering, således at man måler, hvorledes jordens resistivitet varierer både lateralt og vertikalt. Måleproceduren for MEP metoden består i, at en lang række elektroder opstilles på linje med ens indbyrdes afstand (Geofysiksamarbejdet, 2008b). I Grundvandskortlægningen er der hovedsageligt anvendt en afstand på 5 m, mens der i mindre grad i detailundersøgelser er anvendt 1 m eller 2 m elektrodeafstand. Alle elektroder forbindes via multilederkabler til en omskifterboks og et resistivitetsinstrument (Figur 28). Et kabel har ca. 20 elektrodeudtag, og et udlæg består af 3–4 kabelsekvenser. Et længere profil opmåles ved, at den bageste kabelsekvens flyttes frem til forreste ende af udlægget, efter alle de valgte elektrodeopstillinger er målt. Såfremdeles måles og flyttes der, til den ønskede profil-længde er nået (Dahlin, 1996). En computer styrer hvilke elektroder, der sendes strøm igennem, og hvilke potentialet måles over. Med moderne resistivitetsinstrumenter er det muligt at måle potentialet over flere elektrodepar samtidigt (multikanalsudstyr).

MEP-systemer kan indsamle data i vilkårlige elektrodekonfigurationer. Wennerkonfigurationer, hvor der anvendes 4 elektroder med ens indbyrdes elektrodeafstand, har været den hyppigst anvendte elektrodekonfiguration, da data blev optaget med énkanaledstyr. Her bestod et datasæt af data målt med 10-14 forskellige elektrodeafstande, hvor den mindste elektrodeafstand er én enhedselektrodeafstand, og den maksimale elektrodeafstand er 16–24 enhedselektrodeafstande. Lige efter multikanalssystemer kom i brug, blev der anvendt Schlumberger-agtige opstillinger sammen med Wenneropstillingerne. Dog blev det hurtigt standard at anvende gradient-opstillinger, da disse er mere følsomme over for resistivitetskontraster og meget effektive i udnyttelsen af flere målekanaler (Dahlin & Zhou, 2004). Ved gradientkonfigurationen er afstanden mellem strømeelektroderne 8-10 gange afstanden mellem potentialelektroderne, og der måles flere potentialelektrodepar mellem strømeelektroderne. Der måles typisk ved fem forskellige strømeelektrodeafstande gående fra 8-10 gange enhedselektrodeafstanden til 40-50 gange enhedselektrodeafstanden.

Dataprocessering udføres ved visuel inspektion, og afvigende datapunkter fjernes. Data tolkes typisk både med 1D resistivitetsmodeller i en LCI-tolkning (Geofysiksamarbejdet, 2002c, Auken et al., 2005, Geofysiksamarbejdet, 2005a) og med en 2D resistivitetsmodel (Loke & Dahlin, 2002, Geofysiksamarbejdet, 2005a).



Figur 28. MEP-metoden. a) skitse af feltopstilling for MEP-systemets datatæthed for et profil, hvor data indsamles i Wenner konfigurationen med fem elektrodeafstande. b) Foto af MEP-systemet i felten. (Møller et al., 2006).

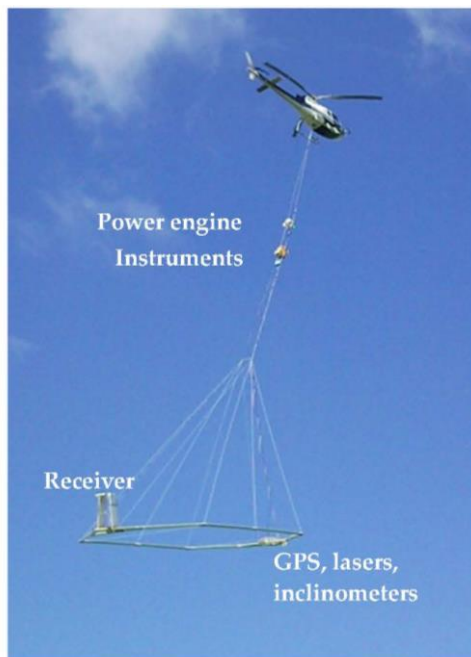
7.3.3 SkyTEM

SkyTEM, som er udviklet ved Aarhus Universitet (Sørensen & Auken, 2004), er en videreudvikling af jordbaserede TEM-systemer, hvormed man måler jorden resistivtetsvariationer med dybden. De laterale variationer kortlægges også med SkyTEM, da sonderingerne optages med relativ tæt afstand langs flyvelinjen.

Den transiente elektromagnetiske metode, TEM, er baseret på princippet om, at en strøm ledt gennem en strømsløjfe placeret på eller over jordoverfladen, danner et primært magnetfelt. Når strømmen slukkes brat, vil det primære magnetfelt aftage, og dermed induceres strømme i jordlagene umiddelbart under jordoverfladen. Disse strømme diffunderer nedad og udad i jordlagene, mens deres amplitude falder pga. jordlagenes elektriske modstand. Det giver anledning til et tidligt henfaldende sekundært magnetfelt, som måles i en modtagerspole. Målepunkter til tidlige tider indeholder primært information om de overfladenære lag, mens målepunkter til sene tider indeholder mere information om dybereliggende lags resistivitetsforhold. Strømmenes udbredelseshastighed og amplitudedefald afhænger af de elektriske modstandsforhold i jordla-

gene. I jordlag med høj elektrisk modstand, såsom sand- og grusaflejringer, udbreder strømmene sig hurtigt, mens udbredelsen er langsommere i godt ledende jordlag, såsom leraflejringer.

Det samlede SkyTEM udstyr hænger under en helikopter og består af en ikke-metallisk ramme, hvorpå senderspølen er monteret og en modtagerspøle placeret på et lille tårn i det bageste hjørne af senderspølen i en position, hvor det primære magnetfelt er nul (Figur 29). Navigationsudstyr (laser-altimeter, inklinometre og GPSer) er også placeret på rammen, mens generator og instrumenter hænger over rammen tættere på helikopteren. SkyTEM systemet er et to-moment system, hvor der på skift genereres et lavt moment og et højt moment for henholdsvis at sikre tilstrækkelig god opløsning af overfladenære lag og dybe lag.

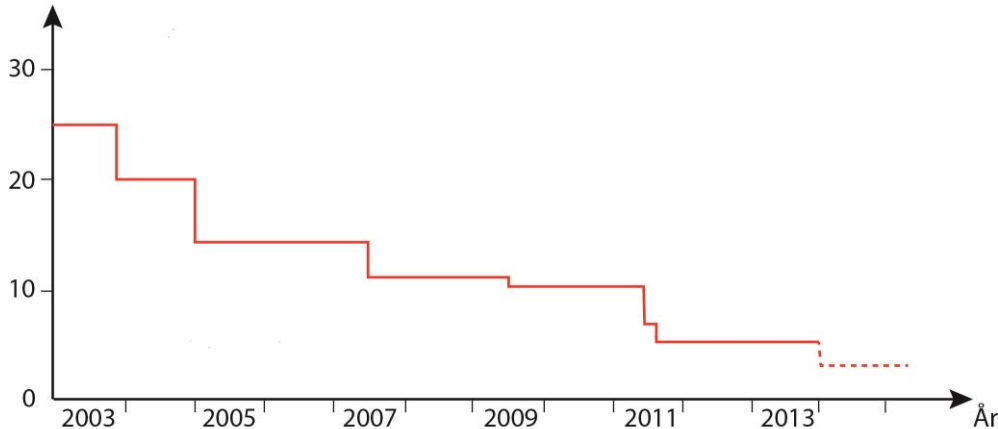


Figur 29. SkyTEM 101 systemet i felten (HydroGeophysics Group, 2012).

Da det er de tidlige tider, som indeholder mest information om de øvre jordlag, har det stor betydning, hvor hurtig strømmen kan slukkes, og de første data optages. Siden SkyTEM systemet blev taget i brug i 2003, har forskellige udviklinger medført at slukketiden og dermed tiden til den første dataværdi, er nedbragt fra ca. 25 mikrosekunder til under 10 mikrosekunder (Figur 30). Der findes nu flere SkyTEM konfigurationer fordelt

på tre rammestørrelser (139 m², 341 m² eller 536 m²) og forskellige antal vindinger på senderspølen på det høje moment (GeofysikSamarbejdet, 2011, www.skytem.com).

Første gatecentertid i mikrosekunder



Figur 30. Udviklingen i tiden for første anvendelige målegate for SkyTEM-systemerne. Tiden måles fra starten af slukkeforløbet. (pers. komm. Verner H Søndergaard og Kurt I. Sørensen).

Den laterale opløsning af de overfladenære lag afhænger af sonderingsafstanden, som er styret af flyvehastighed og repetitionsfrekvenserne samt de overfladenære lags elektriske modstand. Endelig bestemmer de fysiske egenskaber ved metoden, hvor stort et volumen der midles over (footprint), som vil begrænse den laterale opløsningsevne nedadtil.

Implementering af "coil response" inversion som et led i tolkningen af data betyder, at der opnås endnu tidligere tider, og den første anvendelige gatecentertid ligger nu på 6-7 mikrosekunder for kortlægninger, hvor dette er anvendt. En af de første kortlægninger med coil response inversion var Himmerlandsprojektet i 2011 (Geofysiksamarbejdet, 2011).

SkyTEM¹⁰¹ systemet, udviklet i NiCA-projektet (www.nitrat.dk), anvender en mindre ramme på 132 m² og nye instrumenter og software, så første anvendelige gatecentertid ligger omkring 5-6 mikrosekunder (Pedersen et al., 2013). Feltkampagnen i NiCA projektet foregik i sommeren 2011, og data var færdigprocesseret og tolket i sommeren 2012 med meget detaljeret information i data om de overfladenære lag (HydroGeophysics Group, 2012).

Nye udviklinger af SkyTEM systemet mht. slukkeforløbet i sender-spolen vil betyde, at der snart kan være SkyTEM systemer, hvor den første anvendelige gatecentertid ligger omkring 3 mikrosekunder.

7.3.4 Tolkingsmetoder

Tolkingsmetoderne har udviklet sig gennem de snart 15 år Grundvandskortlægningen har forløbet. Tolkning af store datamængder har været baseret på inversion med 1D modeller. De første data blev tolket som enkeltstående sonderinger, og det er man vedblevet at gøre med jordbaseret TEM, hvor afstanden til nabosonderinger er stor. Til TEM målinger, hvor sonderingerne har både central-loop og offset-loop konfigurationer, blev udviklet en 1D tolkningsmetodik med en model for hver konfiguration og bånd mellem de to modelleres modelparametrene for at honorere, at følsomhedsfunktionerne for de to konfigurationer er forskellige (Sørensen et al., 2005).

PACES-metoden genererer store mængder af profilorienterede data. For at få en effektiv og stabil tolkning af disse data blev LCI-tilgangen med laterale bånd mellem nabomodeller udviklet (LCI = Lateral Constrained Inversion) (Geofysiksamarbejdet, 2002c, Auken et al. 2005). Metoden bredte sig også til tolkning af MEP-data og blev overført til SkyTEM data (Geofysiksamarbejdet 2004). LCI-tilgangen blev videreudviklet for SkyTEM data til SCI (SCI = Spatially Constrained Inversion), hvor der er bånd, rumlige bånd, ikke kun mellem nabosonderinger på samme linje men også til nabosonderinger på de nærmeste flyvelinjer (Geofysiksamarbejdet 2008, Viezzoli et al., 2008).

Tolkningen kan udføres med fålagsmodeller, hvor lags resistivitet og tykkelse estimeres, eller med mangelagsmodeller, hvor modellen inddeles i et antal lag med faste laggrænser, og resistiviteten estimeres i hvert lag (Geofysiksamarbejdet, 2007). Antallet af lag svarer stort set til antallet af målekonfigurationer. Tolkning med mangelagsmodeller kan udføres både i LCI og SCI tilgang med henholdsvis laterale og rumlige bånd. I de fleste ældre kortlægninger er data kun tolket med fålagsmodeller, mens det de seneste fem år er blevet almindeligt, at SkyTEM data tolkes både med fålags- og mangelagsmodeller.

Kortlægningsdybden (DOI = Depth of Investigation), som er et mål for hvor dybt, der er information fra data til modellen, beregnes som standard for alle modeller (Christiansen & Auken, 2012).

MEP-data tolkes også ofte med 2D modeller, hvor modellen inddeles i en række celler vertikalt og horisontalt, hvori resistiviteten estimeres (Loke & Dahlin, 2002).

Lertykkelseskort er det væsentlig produkt i Grundvandskortlægningen. Det kompiles bl.a. på baggrund af geofysiske data. For at kunne gøre det skal resistivitet oversættes til lithologi, eller forsimplet til en lerandel. Der kan forekomme variationer i, hvor afskæringen mellem hvilke resistiviteter, der oversættes til henholdsvis ler og sand, ligger, selv inden for et kortlægningsområde. For at imødekomme dette er SSV-konceptet udviklet (Geofysiksamarbejdet, 2005b, Geofysiksamarbejdet, 2009).

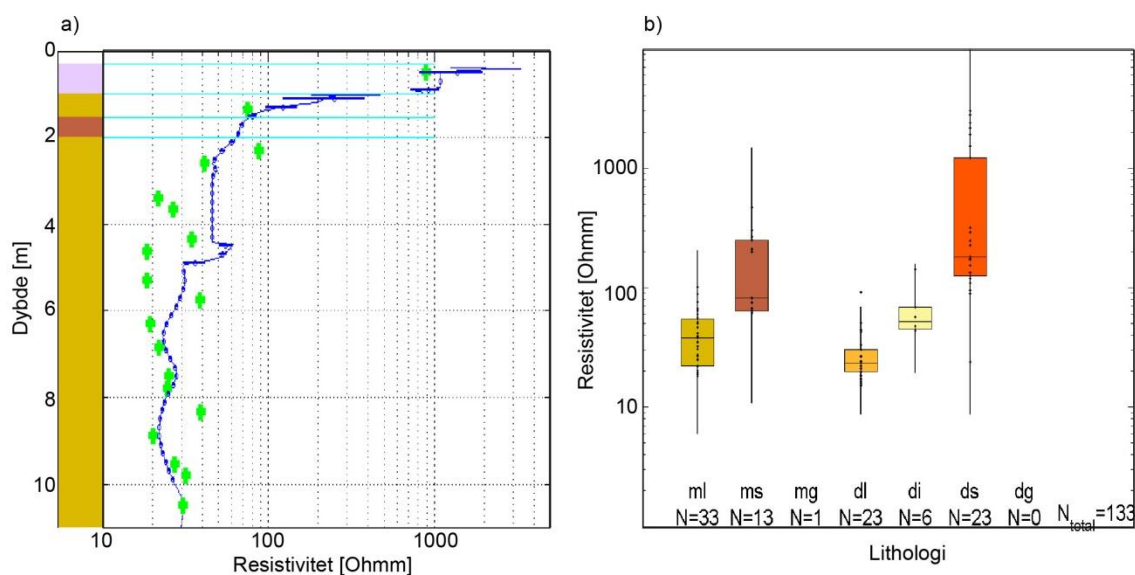
7.4 Eksempler

I dette afsnit vil der først blive vist eksempler på morænelers resistivitet bestemt ved direkte målinger på jordprøver. Disse resultater danner grundlag for suite af 1D modeller, som herefter bliver analyseret med henblik på at vurdere pålideligheden af inversionsresultatet af en given model givet ved en kvantitativ vurdering af usikkerheden på modelparametrene. Afsnittet rundes af med et par felteksempler, som illustrerer metoderne evne til at kortlægge udbredelsen af overfladenære lag.

7.4.1 Morænelers resistivitet

I en række projekter er der lavet en detaljeret bestemmelse af de overfladenære jordlags resistivitet og samtidig lavet en detaljeret lithologisk prøvebeskrivelse af det opborede materiale (se fx Geofysiksamarbejdet, 2011, Johnsen & Jørgensen, 2006). Disse data er ved at blive sammenstillet i et resistivitetsatlas for danske aflejringer.

Figur 31 viser et eksempel fra Himmerlandsprojektet (GeofysikSamarbejdet, 2011b), hvor der er målt resistivitet på kernematerialet fra fem kerneboringer til ca. 20 m. Der er i umiddelbar nærhed også lavet en ellogboring. Morænelersprøver fra de fem Østhimmerlanske boringer har en medianværdi på 38 Ohmm, og nedre og øvre kvartil er henholdsvis 22 Ohmm og 55 Ohmm.



Figur 31. Resistivitetsmåling fra Himmerlandsprojektet. a) Lithologisk log, plottet med sædvanlige DGU borings farvekode og sammenstillet med ellog (blå kurve) og elektrisk modstandsmålinger på kernestykker. b) Statistisk sammenstilling, box plot, af resistivitetsmålinger fra prøvemateriale. Der er fem glaciale materialer repræsenteret i borehullerne: moræneler (ml), morænesand (ms), smeltevandsler (dl), smeltevandssilt (di) og smeltevands-sand (ds). I et box plot definerer nedre og øvre kvartil boksens bund og top kant og strengen, som deler boksen i to, er defineret af medianværdien. De lodrette streger kaldes "whiskers" og datapunkter, som ligger uden for disse, er potentielle outliers.

I Tabel 7 opsummeres de foreløbige resultater fra de undersøgelser, hvor der er foretaget detaljerede resistivitetsmålinger.

Tabel 7. En statistisk sammenstilling af morænelers resistivitet i områder, hvor der er udført detaljerede undersøgelser.

Område	Resistivitet (Ohmm)		
	Nedre kvartil	Median	Øvre kvartil
Himmerland (5 boringer á 20 m inden for 780 km ²)	22	38	55
Hadsten (5 boringer á 30 m på ~1 km profil)	34	57	79
Mårslet (1 boring á 15 m, 4 boringer á 5 m på 1 ha)	20	26	33
Brædstrup (10 boringer á 10 m inden for 80 km ²)	32	36	62

7.4.2 Analyse af syntetiske 1D modeller

Metoder og instrumentsystemers evne til at opløse givne strukturer kan mest objektivt vurderes ved at lave en analyse ved brug af syntetiske modeller.

Analysen kan gøres simpelt og enkelt, når man antager, at resistiviteten kun ændrer sig med dybden ved at analysere 1D modeller. Pålideligheden af et inversionsresultat, den fundne model, er givet ved en kvantitativ vurdering af usikkerheden på modelparametrene, og den foretages ved beregninger, der ligner dem, som er involveret i den iterative tilpasning til data. På basis af kendskabet til, hvorledes modelresponsen ændrer sig, når man ændrer modelparametrene og med en vurdering af usikkerheden på data, kan man beregne usikkerheden på modelparametrene. En sådan analyse er foretaget under en lineær tilnærmelse, og den er således kun kvantitativ pålidelig for små usikkerheder. For store usikkerheder vil analysen ikke være kvantitativ pålidelig, men vil dog stadig være et udtryk for, at en parameter er dårligt bestemt eller ubestemt. Sådanne analyser kan bruges i vurderingen af metodernes evne til at bestemme lagtykkelsen af et morænelerslag.

En fuldstændig undersøgelse af metodernes laterale opløsningsevne ville kræve 2D og 3D modellering af data med efterfølgende simulering af dataindsamling, dataprocesering og tolkning, der inkluderer laterale (LCI) eller rumlige (SCI) bånd på modelparametrene, som alle feltdata i praksis tolkes med, på tilsvarende vis som det er gjort i Christensen et al. (2000) og Christensen et al. (2002). Det er en umådelig ressourcekrævende proces og ligger derfor uden for denne rapports ramme. Der er i stedet valgt en tilgang, der udelukkende involverer 1D-modellering og ingen LCI eller SCI tolkning.

Antagelser

Ovenstående samt en række yderligere antagelser gør, at analysen ikke kan bruges direkte til at udpege metoderes eller instrumenters evne til at bestemme morænelerslagstykkelser, men det kan bruges som en relativ rangering.

Antagelserne er:

- Størrelsen af støjen, der antages at være på det givne datasæt, har indflydelse på hvor godt modellens lagparametre kan bestemmes. Støjmodellerne svarer til dem, der er sat op i Christensen et al. (2002), hvor støjen på data er opbygget af to komponenter: (1) den absolutte støj, der består af mere eller mindre tilfældige støj fra omgivelserne og fra tilfældig målestøj i måleapparatet, og (2) den relative støj, et støjbidrag, som er proportionalt med måleværdien. Sidstnævnte støjkomponent tager højde for støjefekter, som kan stamme fra konfigurationsfejl i

måleopstillingen, og et bidrag skal redegøre for at data bliver tolket med en modeldimension, som er lavere end jordens. For alle metoder vil vi antage at bidraget fra den relative del af støjen, beskrevet som støjkomponent 2 er 5 %. Dette er formentlig pessimistisk for nogle af metoderne, bl.a. SkyTEM, hvor støjbidraget er relativt velbeskrevet pga. de store datamængder. Den samlede relative støj er givet ved udtrykket $\sqrt{(\text{støjkomponent 1})^2 + (\text{støjkomponent 2})^2}$.

- Støjmodellerne for de geoelektriske metoder svarer til dem, som er sat op i Christensen et al. (2002). Trods instrumentforbedring i løbet af de seneste 10 år har det ikke ændret på de væsentligste kilder til støj for disse metoder. For MEP er støjkomponent 1 sat til 5 %, og derved bliver den samlede støj for MEP 7,1 %. For PACEP/PACES er støjkomponent 1 sat til 2 %, og derved bliver den samlede støj for PACEP/PACES 5,4 %.
- Støjmodellen for SkyTEM følger ikke helt princippet sat op i Christensen et al. (2000) for TEM systemer, hvor den absolutte støj består af to dele; en del som beskriver den del af den omgivne støj, der stammer fra andre elektromagnetiske kilder (f.eks AM radiosendere), som ikke vil være tilfældig og vil have indflydelse på tidlige tider, og en del der kan beskrives som tilfældig støj, der vil have indflydelse på sene tider. Vi har undladt den del af støjmodellen, som beskriver den tilfældige støj, der har indflydelse på de sene tider, da vi antager at informationsbidraget fra de sene tider kan negligeres i en analyse af de mest overfladenære lag. For SkyTEM er støjkomponent 1 sat til 3 % og den samlede støj bliver 5,8 %.
- Det er ikke muligt at lave en analyse af alle de SkyTEM-systemer, der har været i brug i Grundvandskortlægningen, da der er mange varierende konfigurationer over tid. Der har bl.a. været forskellige måder at opdele tidsvinduerne (gating) på for de tidlige tider, nogle versioner har brugt lineære gates á 1 mikrosekunds bredde og andre á 2 mikrosekunders bredde. Vi har derfor valgt at opstille standard SkyTEM-systemer, hvor det kun er første anvendelige gatecentertid, der ændres. Det betyder at sendermoment, seneste gatecentertid mv. er det samme for alle analyserede standardsystemer. Seneste gatecentertid er sat til 0,9 ms.

- Analyserne udføres på enkeltstående modeller. Der er ikke taget hensyn til at data tolkes med en LCI eller SCI tilgang, hvor nabomodeller bindes sammen i modelrummet og skal overføre information fra model til model under inversionsproceduren.

Instrumentssystemer

Der laves analyser for følgende instrumentssystemer:

- PACEP
- PACES
- MEP, Wenner konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 5 m, (MEP_{W5})
- MEP, Gradient konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 2 m, (MEP_{G2})
- MEP, Gradient konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 5 m, (MEP_{G5})
- SkyTEM, første gatecentertid i 3 mikrosekunder, (SkyTEM₃)
- SkyTEM, første gatecentertid i 7 mikrosekunder, (SkyTEM₇)
- SkyTEM, første gatecentertid i 9 mikrosekunder, (SkyTEM₉)
- SkyTEM, første gatecentertid i 13 mikrosekunder, (SkyTEM₁₃)
- SkyTEM, første gatecentertid i 17 mikrosekunder, (SkyTEM₁₇)
- SkyTEM, første gatecentertid i 27 mikrosekunder, (SkyTEM₂₇)

Der laves analyser for de geoelektriske metoder og konfigurationer, der har været brugt i Grundvandskortlægningen. SkyTEM-metoden analyseres med seks forskellige første gatecentertider, som repræsenterer SKyTEM systemer fra det tidligste system i 2003 til systemer, der kommer i den nærmeste fremtid.

Flyvehøjden sættes til 40 m for SkyTEM₃ og SkyTEM₇ systemerne, da disse systemer flyver hurtigere, og derved kommer til at have en højere gennemsnitsflyvehøjde. Flyvehøjden for de resterende fire systemer sættes til 30 m.

Modellerne

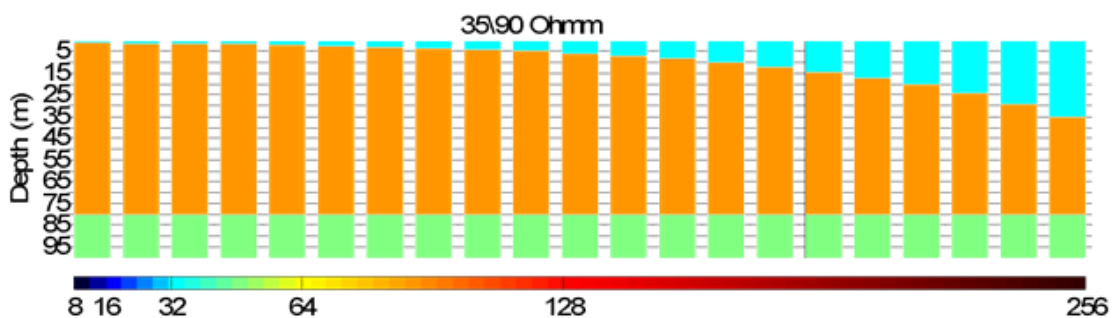
Med udgangspunkt i de ovenstående feltstudiers måling af resistivitet, er der sat en suite af 1D modeller op, hvor:

- Første lags resistivitet kan være
 - 25 Ohmm (meget fedt moræneler),
 - 35 ohmm (fedt moræneler),
 - 50 Ohmm (sandet moræneler) og

70 Ohmm (stærkt sandet moræneler, opsprækket og udvasket).

- Første lags tykkelse varierer fra 1 m til 35 m med logaritmisk stigende lagtykkelse
- Andet lags resistivitet kan være
 - 15 Ohmm (smeltevandsler eller anden fed ler),
 - 60 Ohmm (mættet smeltevandssand, leret eller porevand med højt ionindhold, morænesand),
 - 90 Ohmm (mættet smeltevandssand, morænesand, skrivekridt eller kalk),
 - 150 Ohmm (mættet kalk, skrivekridt),
 - 300 Ohmm (tørt sand, tørt eller mættet kalk)
- Tredje lags resistivitet er 50 Ohmm
- Dybden til toppen af tredje lag er altid 80 m.

Når alle mulige resistiviteter for første og andet lag kombineres er der 20 modelsuiter, hvor laggrænsen mellem første og andet lag varierer. Én af de 20 modelsuiter er vist i figur 32. Ud af de 20 kombinationer fremkommer både modelsuiter, hvor resistivitetskontrasten mellem første og andet lag er lav, intermedier eller stor. Derved skulle være muligt at afdække, hvilke typer af modeller, der er problematiske at opløse.



Figur 32. Modellsuite for trelagsmodel, hvor resistivitet i første lag er 35 Ohmm, andet lag 90 Ohmm og tredje lag 50 Ohmm. Tykkelsen af første lag varierer fra 1 m til 35 m med en logaritmisk forøgelse af tykkelsen. Dybden til toppen af tredje lag er 80 m.

Modellens tredje lag er medtaget for at gøre analyserne mere realistiske, da antallet af modelparametre i modellen har betydning for bestemmelsen af usikkerhed på modelparametrene, sådan at flere lag giver en dårligere bestemmelse af de enkelte parametre, da der er en fast mængde information tilstede i data. Dybden til toppen af tredje lag er lagt så dybt, at analysen ikke skulle blive påvirket af ækvivalenser, hvor en række modeller kan tilpasse data lige godt inden for måleusikkerheden.

For PACEP-metoden er analyserne udført på tolagsmodeller, da det ikke giver mening at tolke et datasæt med tre målepunkter med en trelagsmodel med i alt fem parametre. Alle analyser er udført med programmet AarhusInv (tidligere em1div), som er udviklet ved Aarhus Universitet (Christiansen & Auken, 2009) og er anvendt i stort set alle tolkninger af elektriske og elektromagnetiske data samlet ind i grundvandskortlægningen, som er udført som 1D modeller, hvad enten det er som enkeltstående sonderinger, eller med LCI eller SCI tilgang.

Præsentation af analyserne

Den relative usikkerhed på første og andet lags resistivitet samt tykkelsen af første lag præsenteres som kurveplot af alle modeller for hvert instrumentsystem i figurerne 33, 34 og 35. Modellerne er grupperet ved hjælp af stregfarve og type; modeller med samme stregtype har samme modstand i første lag, og modeller med samme farve har samme modstand i andet lag. Alle analyser præsenteres også som sektioner, hvor hver enkelt modelsuite vises sammen med analyseresultaterne for hvert af instrument-systemerne (bilag 3), svarende til fremstillingen i Christensen et al. (2002).

Den relative usikkerhed på den enkelte parameter, udtrykt som en faktor, angiver hvor godt den enkelte parameter er bestemt. Den relative usikkerhed kan beskrives for intervallerne som,

- < 1,1 Velbestemt
- 1,1–1,2 Godt bestemt
- 1,2–1,5 Nogenlunde bestemt
- 1,5–2 Dårligt bestemt
- > 2 Ubestemt.

Analyserne viser, at for at første lags resistivitet (Figur 33) mindst er nogenlunde bestemt (<1,5), så skal tykkelsen af laget

- for MEP_{G2} og PACES mindst være 1–3 m, afhængigt af andet lags resistivitet; jo lavere resistivitet i andet lag, jo tyndere kan første lag være,
- for MEP_{G5} og MEP_{W5} mindst være 2–5 m, afhængigt af andet lags resistivitet; jo lavere resistivitet i andet lag, jo tyndere kan første lag være,
- for PACEP mindst være 6–11 m, afhængigt af andet lags resistivitet; jo lavere resistivitet i andet lag, jo tyndere kan første lag være,

- For SkyTEM₃ mindst være 5–10 m afhængigt af, hvor lave modstandene generelt er i modellen; jo lavere modstand i både første og andet lag, jo tyndere kan første lag være,
- For SkyTEM₇ og SkyTEM₉ mindst være 7–17 m afhængigt af, hvor lave modstandene generelt er i modellen; jo lavere modstand i både første og andet lag, jo tyndere kan første lag være,
- For SkyTEM₁₃, SkyTEM₁₇ og SkyTEM₂₇ mindst være 8–30 m afhængigt af, hvor lave modstandene generelt er i modellen; jo lavere modstand i både første og andet lag, jo tyndere kan første lag være.



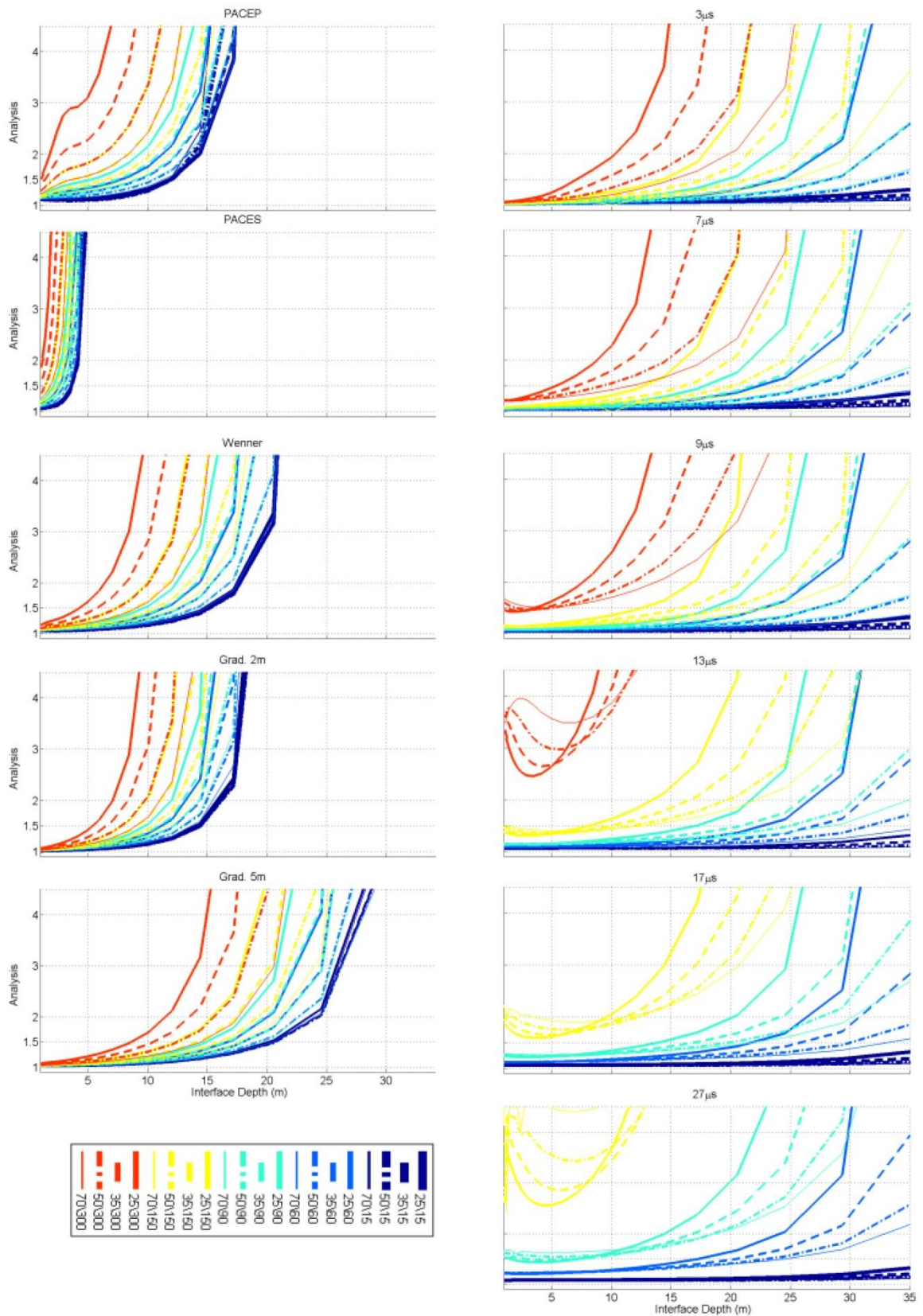
Figur 33. Den relative usikkerhed for første lags resistivitet for de fem geoetriske og seks SkyTEM-systemer plottet som funktion af tykkelsen af første lag.

Modsvarende kan ses at bestemmelsen af andet lags resistivitet bliver bedre jo tyndere første lag er (Figur 34).

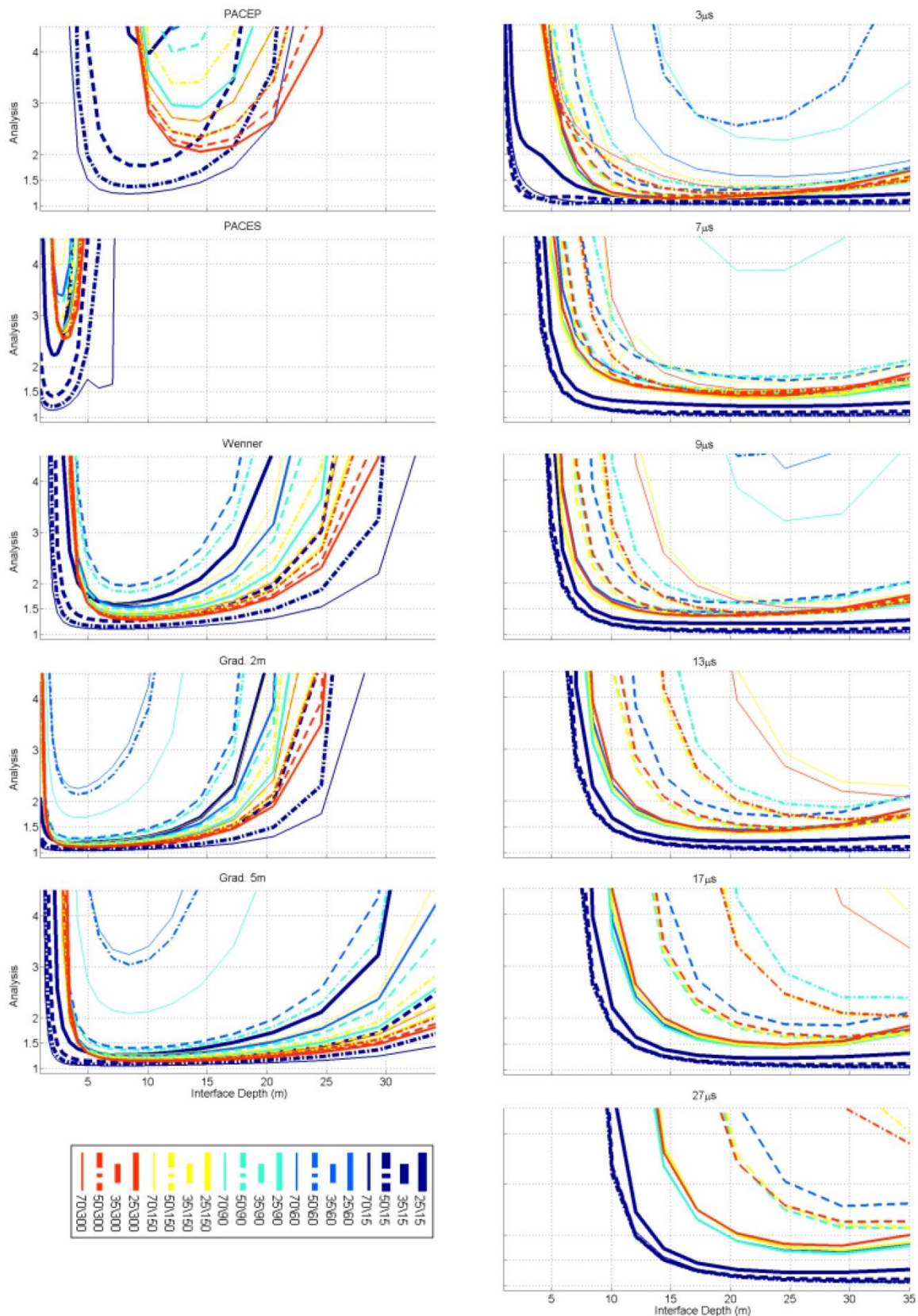
- For de geoelektriske metoder er det igen resistiviteten i andet lag, der styrer hvor tyndt første lag skal være for at resistiviteten i andet lag er godt bestemt, jo lavere modstand i andet lag, jo tykkere kan første lag være.
- For SkyTEM er det også resistiviteten i andet lag, der styrer hvor tykt første lag kan være for at resistiviteten i andet lag er godt bestemt, jo lavere resistivitet i andet lag, jo tykkere kan første lag være. Dog må resistiviteten i andet lag ikke blive for høj, så kan det ikke bestemmes.

Når man ser på analysen af tykkelsen af første lag (Figur 35), bliver mønsteret mere kompliceret, specielt for de geoelektriske metoder. Generelt kan siges, at første lag hverken må være for tyndt eller tykt, for at tykkelsen af det kan bestemmes.

- For de geoelektriske metoder er det resistivitetskontrasten mellem resistiviteten i første og andet lag som styrer, hvor godt det første lags tykkelse er bestemt. Jo større kontrast, jo bedre bestemt lagtykkelse. Samtidig kan man se, at af to modeller med samme resistivitetskontrast, er det den nedstigende model med høj resistivitet i første lag og lav resistivitet i andet lag, som er bedre bestemt end den opstigende model med lav resistivitet i første lag og høj modstand i andet lag.
- For SkyTEM-systemerne betyder det mest for en god bestemmelse af tykkelsen af første lag, at der er en lav modstand i andet lag; sekundært, jo lavere modstand i modellen generelt, jo bedre bestemmelse af første lags tykkelse.



Figur 34. Den relative usikkerhed for andet lags resistivitet for de fem geoeltriske og seks SkyTEM systemer plottet som funktion af tykkelsen af første lag.



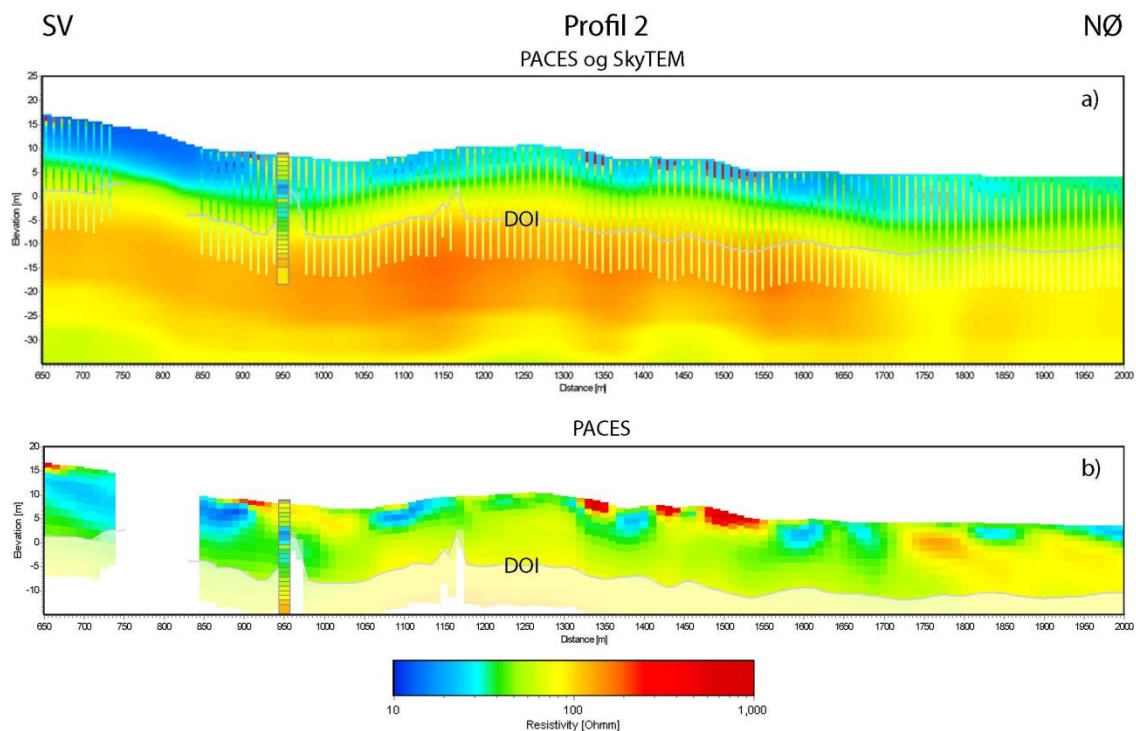
Figur 35. Den relative usikkerhed for første lags tykkelse for de fem geoetriske og seks SkyTEM systemer plottet som funktion af tykkelsen af første lag.

7.4.3 Felteksempler

I dette afsnit resumeres resultater fra to projekter, hvor SkyTEM-metodens evne til at opløse overfladenære lag evalueres på baggrund af en konkret kortlægning.

Himmerland

Himmerlandsprojektet havde til formål at kvantificere den anvendte SkyTEM målekonfigurations brugbarhed i sårbarhedskortlægning (Geofysiksamarbejdet, 2011b). Evalueringen af SkyTEM-resultaterne blev foretaget ved sammenstilling med PACES-resultater, borer og i nogen grad jordartskartering. Inden for et 784 km² stort SkyTEM kortlægningsområde i den østlige del af Himmerland er der udvalgt fem tracéer, hvor der er målt PACES langs SkyTEM linjer. Derudover er der lavet en EI-logboring og en kerneboring umiddelbart ved siden af hinanden på hvert af de fem PACES profiler. Der er også målt elektrisk modstand direkte på kernerne. SkyTEM-datane er optaget med et system, hvor den første anvendelige gatecentertid ligger på 7,7 mikrosekunder. Figur 36 viser en sammenstilling af SkyTEM- og PACES-tolkningsresultaterne. EI-logboringen viser den bedste vertikale opløsningsevne af de tre metoder. Det 1-2 m tynde højmodstandslag, som kan ses i EI-log boringen bliver stort set opløst af PACES-metoden, men det er for tyndt til, at det kan kortlægges af SkyTEM-metoden. Det underliggende 1-2 meter tynde lavmodstandslag er for tyndt til at blive opløst af PACES metoden, og det bliver slået sammen med det underliggende lag med intermediære modstande, mens det bliver kortlagt af SkyTEM-metoden og kommer til at udgøre de øverste ca. 5 m af SkyTEM modellen. Hen langs profilet viser PACES-metoden stor lateral variation i de øverste 5-10 m, og det kortlægger flere steder med meget høj modstand, som ikke bliver kortlagt med SkyTEM metoden. SkyTEM metoden viser god overensstemmelse med EI-log boringens dybere del.



Figur 36. Geofysiske tolkningsresultater for et udsnit af profil 2 i Himmerlandskortlægningen. a) Modelstavene er PACES-tolkningen, hvor den lysegrå linje markerer DOI-grænsen (bemærk at farverne er nedtonet under DOI-grænsen). Den bagvedliggende resistivitetssektion er SkyTEM-resultatet fra et snit i et 3D-grid. b) PACES-tolkningen som sammenhængende sektion. Ved koordinat 950 m er EI-log boringen plottet (Geofysiksamarbejdet, 2011b).

I Himmerlandsrapporten konkluderedes bl.a. ” Sammenholdes tolkningen af henholdsvis PACES-målinger og SkyTEM-målinger med resultater fra ellogboringer, så viser PACES-metoden sig ikke overraskende at opløse tyndere højmodstandslag i de øverste 10 - 15 m bedre end SkyTEM-metoden. Ingen af metoderne opløser dog alle detaljer i ellogboringerne.” og ” PACES-metoden har, som forventet, en mere detaljeret lateral opløsning langs profilet i de øverste 0-10 m. Dette gør det muligt for PACES-metoden at ”se” tynde og mindre højmodstandsindslag, som ofte kun er meget svagt indikeret i SkyTEM. I begge tilfælde vil SkyTEM svagt overvurdere omfanget af de meget overfladenære lavmodstandslag. Til gengæld fremstår SkyTEM-tolkningerne mere troværdige med dybden (dybere end 5 - 10 m), hvor PACES-metoden er præget af ækvivalens, lagundertrykkelse og begrænset indtrængningsdybde”.

Når konklusionerne i Himmerlandsrapporten læses, skal man have i mente, at revisionen af TEM-testmodellen er sket efter Himmerlandsprojektet afslutning. Hvis den reviderede TEM-teststedsmodel var brugt i kalibreringen af SkyTEM-dataene i Himmer-

landsprojektet ville det til en vis grad have forbedret SkyTEM-metodens evne til at "se" tynde overfladenære højmodstandslag.

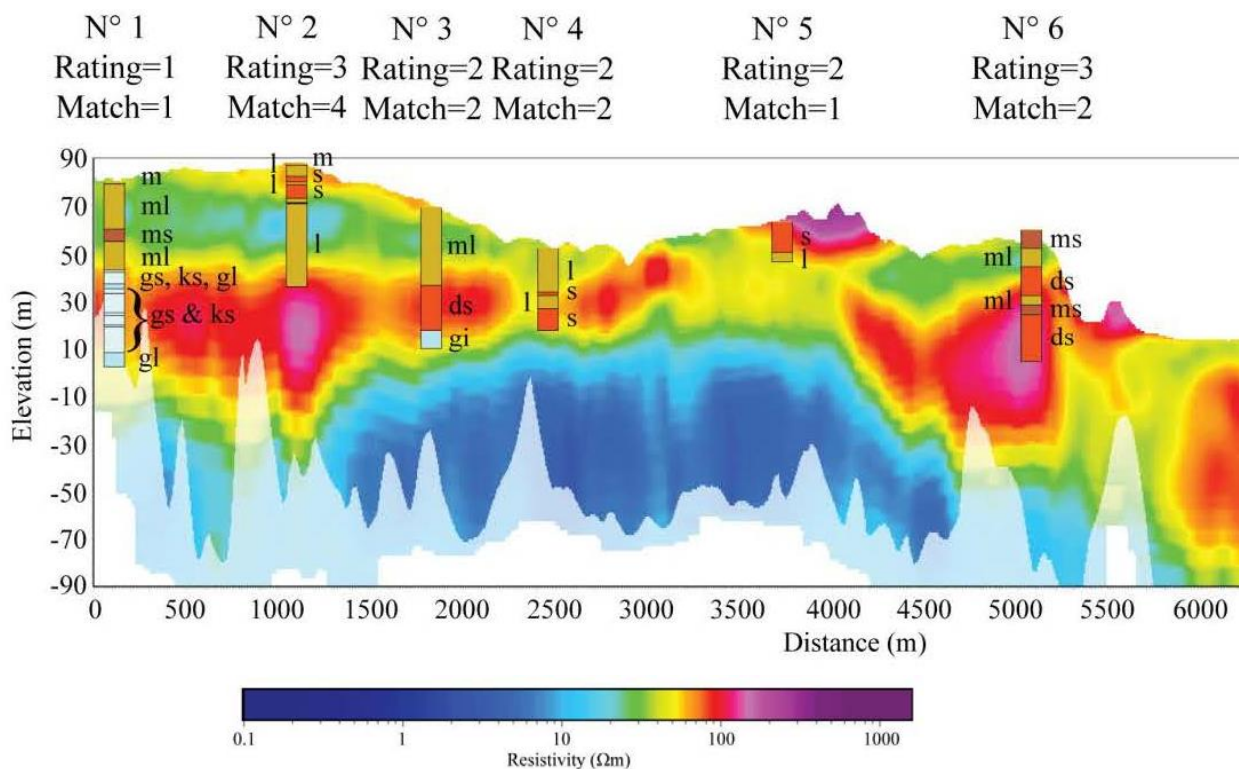
Norsmindekortlægningen i NiCA-projektet

Et ca. 100 km² område, som udgør oplandet til Norsminde Fjord ved Odder, er kortlagt med SkyTEM¹⁰¹-systemet i et meget tæt net af linjer (HydroGeophysicsGroup, 2012, Schamper et al., submittet, Pedersen et al., 2013). Der er i alt indsamlet 1846 linjekm i kortlægningen. Den første anvendelige gatecentertid ligger mellem 5 og 6 mikrosekunder. Der blev anvendt en flyvehastighed og en repetitionsfrekvens, som resulterede i at der udlæses en fuld sondering pr. 14 m. I processeringen bliver data stakket og midlet for at forbedre signal/støjforholdet, og den horisontale opløsning er i realiteten 25-50 m og mindre end et par meter vertikalt for de overfladenære dele af datasættet. Data er tolket med 1D mangelags SCI tilgang og giver en kvasi-3D model af jordens modstand ned til ca. 130 m dybde.

For at validere den overfladenære opløsning af SkyTEM¹⁰¹-systemet er tolkningsresultaterne sammenstillet med eksisterende og nye boredata i området. Til validering er der anvendt alle boringer, som er placeret inden for 15 meters afstand fra en flyvelinje. Borningskvaliteten blev nøje vurderet bl.a. med hensyn til prøveudtagning, prøvebeskrivelse og koordinatsætning. Det har ført til en rating af boringerne. Derefter blev overensstemmelsen mellem boredata og SkyTEM resultater vurderet og inddelt i 4 kategorier (meget god overensstemmelse, god overensstemmelse, ringe overensstemmelse og uoverensstemmelse). 46 boringer indgik i sammenligningen, heraf er der for 43,5 % fundet en meget god overensstemmelse, for 32,6 % fundet en god overensstemmelse, for 17,4 % fundet en ringe overensstemmelse og for 6,5 % uoverensstemmelse. Det betød, at der kun var 11 boringer af 46, hvor der var ringe eller ingen overensstemmelse. Årsagen til en manglende overensstemmelse blev undersøgt og i 1/3 del af tilfældene skyldtes boringsrelaterede årsager (dårlig boringskvalitet eller fejl i boringslokaliseringen), mens det i 2/3 af tilfældene skyldtes årsager relateret til SkyTEM metoden (koblinger til elinstallationer og støj, forhøjet saltindhold i porevandet eller 3D effekter og begrænsninger i lateral eller horisontal opløsning).

Figur 37 viser et nordvest-sydøst orienteret profilsnit gennem området med SkyTEM resistivitetssektionen vist som et snit i 3D-griddet, og boringerne noteret med deres

rating og overensstemmelsesklasse. En detaljeret beskrivelse af sammenligningen findes i Shamper et al. (submittet).



Figur 37. SkyTEM tolkningsresultat fra Norsmindekortlægningen. Resistivitssektionen er et snit i et 3D-grid. Boringer fra Jupiterdatabasen er noteret med deres rating og overensstemmelsesklasse (Shamper et al., submittet).

7.5 Vurdering af metoder til kortlægning af morænelerslag

På basis af 1D analysen, erfaringerne fra evalueringsstudier fra konkrete kortlægninger og syntetiske 2D/3D modelleringsstudier rapporteret i litteraturen vil dette afsnit rumme en diskussion af de geofysiske metoders egnethed til kortlægning af overfladenære morænelerslag.

En vurdering kan udføres med forskelligt fokus. Er det evnen til at bestemme en laggrænse, som er et mål for egnethed, eller er det evnen til at fange en gennemsnitsmodstand, som er målet, eller noget helt tredje? I realiteten bliver målet en kombination af evnen til at bestemme en laggrænse – grænsen mellem første og andet lag - og evnen til at bestemme en gennemsnitsmodstand - i hvert fald for morænelerslaget. I vurderingen antages det, at morænelerslaget er første lag under terræn.

Vurderingen af evnen til at kortlægge morænelerstykkelsen vil blive bygget op af fire konkrete spørgsmål: Kan et morænelerslag på ca. 5 m kortlægges, kan et på ca. 10 m, ca. 15 m eller ca. 20 m?

7.5.1 Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge tynde overfladenære morænelerslag fra jordoverfladen og nedad.

Det kan diskuteres, hvor godt et lags resistivitet og tykkelse skal være bestemt for at laget kan erkendes. I den følgende vurdering af resultatet af 1D analyserne vil der blive taget udgangspunkt i, at modelparametrenes relative usikkerhed skal være mindre end 1,5, hvilket svarer til, at laget er nogenlunde bestemt.

Der vil primært blive set på analysen af første lags resistivitet og tykkelsen af første lag, hvor der vil blive lagt størst vægt på analysen af første lags resistivitet. I analysen er der ikke taget højde for, at feltdata tolkes med laterale eller rumlige bånd, som vil "hjælpe" en dårlig bestemt laggrænse. Analysen af første lags tykkelse vil være med til at udpege hvilke modelscenarier, der er problematiske at opløse og indikere indtrængningsdybde for de geoelektriske metoder.

Kan et morænelerslag på ca. 5 m kortlægges?

Resistiviteten i første lag er bestemt for

- alle 20 modeller med PACES, MEP_{G2} og MEP_{G5},
- 14 modeller med MEP_{W5}. Det er modeller, hvor modstanden i andet lag er mest resistivt, som ikke kan opløses,
- 1 model med SkyTEM₃, SkyTEM₇, SkyTEM₉. Det er den mest konduktive model.

Tykkelsen af første lag er bestemt for

- 17 modeller med MEP_{G5}.
- 16 modeller med MEP_{G2},
- 4 modeller med MEP_{W5} og SkyTEM₃.

Det er modeller med meget lille resistivitetskontrast, som ikke kan opløses med de geoelektriske metoder, og det er de modeller med det mest konduktive andet lag, som kan opløses med SkyTEM₃. Hvis man ser på analysen af tolagsmodellerne for PACES er det 17 modeller, hvor laggrænsen er bestemt, hvilket er et mere retvisende mål, når der tages i betragtning, at PACES altid tolkes med laterale bånd.

Hvis man ændrer SkyTEM's støjmodel til at være meget optimistisk (i alt 3 %) i stedet for den lidt pessimistiske støjmodel, som analyserne er beregnet med, forbedrer det ikke resultatet af analyserne så meget, at der er flere af modellernes modelparametre, der bliver nogenlunde bestemt.

Kan et morænelerslag på ca. 10 m kortlægges?

Resistiviteten i første lag er bestemt for

- alle 20 modeller med PACES, MEP_{G2} , MEP_{G5} og MEP_{W5} ,
- 19 modeller med SkyTEM₃,
- 17 modeller med SkyTEM₇,
- 13 model med SkyTEM₉,
- 4 og 1 modeller med henholdsvis SkyTEM₁₃, og SkyTEM₁₇

Det er modeller, hvor modstanden i andet lag er mest resistivt, som ikke kan opløses af SkyTEM-systemerne, mens det er modeller med det mest konduktive første lag PACEP-systemet ikke kan opløse.

Tykkelsen af første lag er bestemt for

- 17 modeller med MEP_{G5} og MEP_{G2} .
- 12 modeller med MEP_{W5} .
- 9 modeller med SkyTEM₃.
- 4, 4 og 2 modeller med henholdsvis SkyTEM₇, SkyTEM₉, og SkyTEM₁₃

Det er modeller med meget lille resistivitetskontrast, som ikke kan opløses med de geoelektriske metoder, og det er de modeller med det mest konduktive andet lag, som kan opløses med SkyTEM-systemerne. Hvis man ser på analysen af tolagsmodellerne for PACES er det 15 modeller, hvor laggrænsen er bestemt, hvilket er et mere retvisende mål, når der tages i betragtning, at PACES altid tolkes med laterale bånd.

Kan et morænelerslag på ca. 15 m kortlægges?

Resistiviteten i første lag er bestemt for

- alle 20 modeller med PACES, MEP_{G2} , MEP_{G5} og MEP_{W5} ,
- alle 20 modeller med SkyTEM₃, SkyTEM₇ og SkyTEM₉.
- 14 modeller med SkyTEM₁₃.
- 4 og 1 modeller med henholdsvis SkyTEM₁₇, og SkyTEM₂₇

Det er modeller, hvor modstanden i andet lag er mest resistivt, som ikke kan opløses af de ældre generationer af SkyTEM-systemerne, mens det er modeller med det mest konduktive første lag, PACEP-systemet ikke kan opløse.

Tykkelsen af første lag er bestemt for

- 17 modeller med SkyTEM₃.
- 16 og 12 modeller med henholdsvis MEP_{G5} og MEP_{G2}.
- 10 modeller med SkyTEM₉
- 7 modeller med MEP_{W5},
- 4 modeller med henholdsvis SkyTEM₇, SkyTEM₁₃, og SkyTEM₁₇
- 1 model med SkyTEM₂₇

Det er modeller med lille resistivitetskontrast, som ikke kan opløses med de geoelektriske metoder og SkyTEM₃, mens det er de modeller med de mest konduktive andet lag, som kan opløses med de øvrige SkyTEM-systemerne.

Kan et morænelerslag på ca. 20 m kortlægges?

Resistiviteten i første lag er bestemt for

- alle 20 modeller med PACEP, PACES, MEP_{G2}, MEP_{G5} og MEP_{W5},
- alle 20 modeller med SkyTEM₃, SkyTEM₇, SkyTEM₉ og SkyTEM₁₃.
- 18 og 11 modeller med henholdsvis SkyTEM₁₇, og SkyTEM₂₇

Det er modeller, hvor modstanden i andet lag er mest resistivt, som ikke kan opløses af de ældre generationer af SkyTEM-systemerne.

Tykkelsen af første lag er bestemt for

- 17 modeller med SkyTEM₃.
- 13 modeller med henholdsvis MEP_{G5} og SkyTEM₉
- 11, 9, og 7 modeller med henholdsvis SkyTEM₇, SkyTEM₁₃, og SkyTEM₁₇
- 4 model med SkyTEM₂₇
- 2 modeller med MEP_{W5} og MEP_{G2}

Det er modeller med lille resistivitetskontrast, som ikke kan opløses med MEP_{G5} og SkyTEM₃, og yderligere de resistive modeller, som ikke kan opløses med de øvrige SkyTEM-systemer og MEP-systemer. Yderligere nærmer disse MEP-systemer sig deres maksimale indtrængningsdybde.

Sammenfatning

Flyvehøjden for SkyTEM-systemerne spiller en betydende rolle for metodens evne til at opløse tykkelsen af første lag. Det kan ses i analyserne ved at SKYTEM₉-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 30 m, er bedre til at opløse tykkelsen af første lag end SKYTEM₇-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 40 m.

PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 5 m tykt morænelersdække.

PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 10 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de mest højopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.

SkyTEM₃, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 15 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de øvrige mest højopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.

De højtopløselige SkyTEM-systemer og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 20 m tykt morænelersdække. De øvrige SkyTEM systemer, på nær de allerældste generationer, er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.

Det bemærkes dog generelt, at en system-specifik indikation af at en modelparameter er dårligt bestemt *ikke* betyder, at laget ikke vil erkendes i konkret kortlægning. Det betyder blot at lagets parametre ikke kan fastlægges med sikkerhed. I mange tilfælde er tilstedeværelsen af f.eks. et lag med lav modstand (som moræneler) nødvendig for at tilpasse data, men uden at det kunne bestemmes præcist.

7.5.2 Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge interne strukturer i de overfladenære morænelerslag.

Der er en række faktorer, som har betydning for metodernes evne til at kortlægge interne strukturer i de overfladenære morænelerslag. Det er:

- Metodernes footprint, som er bestemmende for den laterale og vertikale opløsnings-evne. Jo større midlingsvolumen en målemetode har, desto mindre evne har den til at opløse små og tynde strukturer.

- Samplingsafstand, givet som den laterale afstand mellem målepunkterne. Jo større samplingafstand der måles med, jo større er risikoen for at overse små strukturer.
- Dataprocessering, hvor midling kan udglatte reelt signal. Jo større midling der anvendes i processeringen, jo mere udglattes strukturer. Her skal dog bemærkes at midling ofte er uomgængeligt for at få data med tilstrækkeligt lave støjniveauer. Er midlingen for svag, er der risiko for at introducere strukturer, der ikke er reelle men derimod et resultat af støj.
- Inversion med laterale bånd mellem nabomodeller. Laterale bånd tilføjer i udgangspunktet information om graden af den laterale homogenitet, hvorfor inversion med laterale bånd ofte opløser tynde lag bedre. Er de laterale bånd for stramme, kan det dog også medføre en udglatning af laterale ændringer. En oversigt over betydningen af laterale bånd findes i Geofysiksamarbejdet (2002c) og Geofysiksamarbejdet (2005).

I Byer i Vandbalance projektet (byerivandbalance.dk) viser flere undersøgelser, hvor MEP målt med en enhedselektrodeafstand på 1 m og 2 m i gradientkonfiguration, at det med denne opstilling er muligt at kortlægge resistivitetsvariationer i overfladenære morænelag. Sammenholdt med korte borer, spydkartering og udgravninger kan resistivitetsvariationerne relateres til teksturændringer i morænelerslaget og zoner med forøget antal sandlinser.

Der findes få udenlandske eksempler på undersøgelser af geoelektriske metoders vertikale og horisontale opløsningsevne (Dahlin & Zhou, 2004) ud over analyserne, som er udført i Christensen et al. (2002). Ud fra disse syntetiske modelstudier, erkendes det tydeligt, at den horisontale og vertikale opløsning reduceres med dybden. Dette giver sig bl.a. til udtryk ved, at et lille legeme med en størrelse på 3–5 gange enhedselektrodeafstanden, skal være så bredt, som det er tykt og det må ikke være begravet dybere end dets tykkelse, for at kunne erkendes i en resistivitetssektion, og hvis resistiviteten skal opløses må legemet kun være begravet i den halve dybde. Det er meget svært at kvantificere horisontal opløsning, da det er meget afhængig af resistivitetsstrukturernes form og kontraster.

I felt eksempel med SkyTEM¹⁰¹-systemet (Mini-SkyTEM) fra Norsmindekortlægningen er nævnt, at der blev anvendt en flyvehastighed og en repetitionsfrekvens som resulterede i, at der udlæses en fuld sondering pr. 14 m. Efter dataprocesseringen med staking og midling bliver den horisontale opløsning i realiteten 25-50 m og mindre end et par meter vertikalt for de overfladenære del af datasættet. Det betyder, at de interne

strukturer i morænelerslaget skal have en lateral udtrækning på mere en 25-50 m og en tykkelse på 1–2 m, for at disse kan kortlægges sikkert med dette SkyTEM-system. En forbedret lateral opløsning med SkyTEM opnås enten ved at sænke flyvehastigheden eller forøgelse af momentet, for derved at kunne reducere antallet af data i stakningen til en enkelt sondering.

7.5.3 Undersøgelsesmetodernes evne til at kortlægge overfladenære morænelerslags horisontale udbredelse over større arealer.

Metoder, som er profilorienterede med tætliggende linjer, kan kortlægge overfladenære morænelerslags horisontale udbredelse, hvis det i øvrigt er muligt at kortlægge laggrænser tilstrækkeligt overfladenært.

De faktorer, som har betydning for kortlægning af interne strukturer i et overfladenært morænelerslag, listet i forgående afsnit, har også betydning for metodernes evne til at kortlægge den horisontale udbredelse og specielt ændringer i tykkelse og afgrænsninger.

Derudover har hastigheden, hvormed data indsamles, en afgørende betydning. Det vil f.eks. være en uoverkommelig opgave at kortlægge store arealer med MEP målt med en enhedselektrodeafstand på 1 m og 2 m i gradientkonfiguration.

PACES- og SkyTEM-metoderne anvendes i Grundvandskortlægningen til kortlægning af store arealer. Når ovenstående vurdering af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag tages i betragtning, fremstår PACES-metoden, som egnet til kortlægning af udbredelsen af tynde morænelersaflejringer med tykkelser på 5-10 m og de højtopløselige SkyTEM-systemer med første anvendelige gatecentertid mindre end 10 mikrosekunder, som egnet til kortlægning af lidt tykkere morænelersaflejringer. Et fremtidigt SkyTEM-system med første gatecentertid i 3 mikrosekunder fremstår generelt som velegnet.

7.6 Sammenfatning

Sammenfattende for hele afnit 7 kan siges følgende:

SkyTEM-metoden har vanskeligt ved opløse meget tynde højmodstandslag, der er helt terrænnære, derfor er SkyTEM-metoden dårligt egnet som et værktøj ved udpegnings

områder med morænelersaflejringer lige under terræn. Morænelersaflejringen kan være dækket af et tyndt sandlag, som ikke kan opløses i data.

Flyvehøjden for SkyTEM-systemerne spiller en betydende rolle for metodens evne til at opløse tykkelsen af første lag. Det kan ses i analyserne ved, at SKYTEM₉-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 30 m, er bedre til at opløse tykkelsen af første lag end SKYTEM₇-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 40 m.

Ud fra analysen af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag kan konkluderes, at

- PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 5 m tykt morænelersdække.
- PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 10 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de mest højtopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.
- SkyTEM₃, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 15 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de øvrige mest højtopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.
- De højtopløselige SkyTEM-systemer og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 20 m tykt morænelersdække. De øvrige SkyTEM systemer, på nær de allerældste generationer, er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.

Meget detaljerede undersøgelser med MEP med enhedselektrodeafstande på 1–2 m kan kortlægge interne strukturer i morænelersaflejringer.

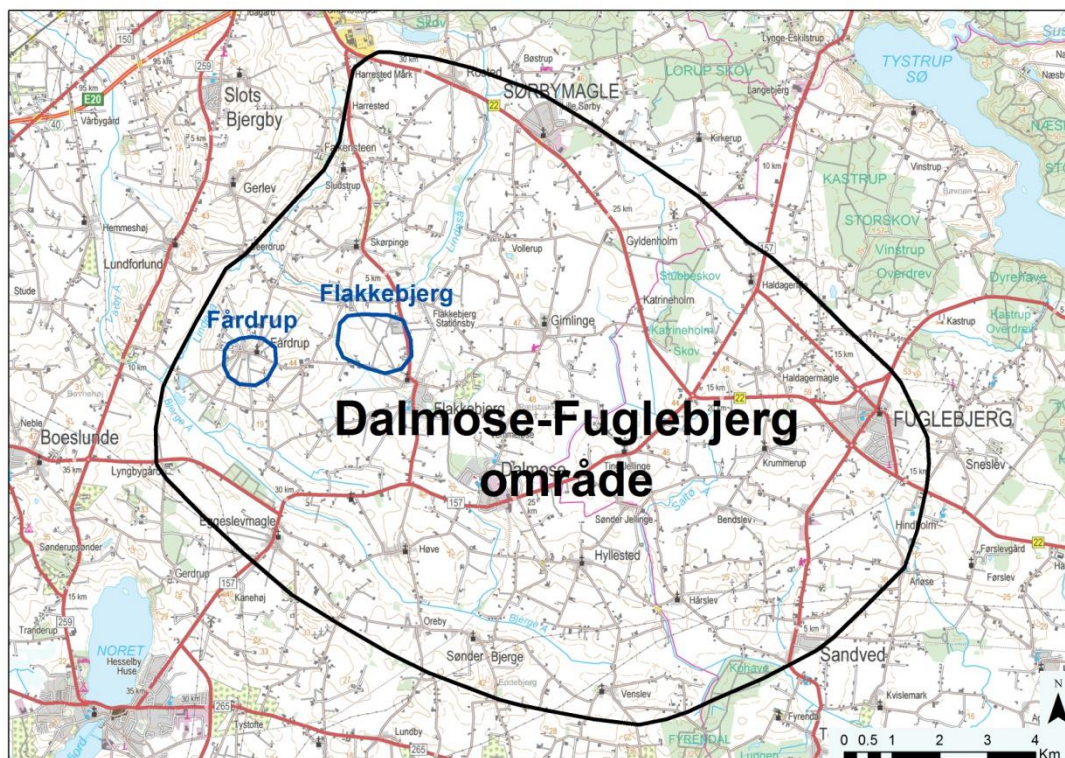
Når ovenstående vurdering af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag tages i betragtning, fremstår PACES-metoden som egnet til kortlægning af udbredelsen af tynde morænelersaflejringer med tykkelser på 5-10 m, og de højtopløselige SkyTEM-systemer med første anvendelige gatecentertid mindre end 10 mikrosekunder som egnet til kortlægning af udbredelsen af lidt tykkere morænelersaflejringer. Et fremtidigt SkyTEM-system med første gatecentertid i 3 mikrosekunder fremstår generelt som velegnet.

8. Geofysisk kortlægning i Sydvestsjælland

8.1 Indledning

Til analyse af eksisterende overfladegeofysik og tolkning i forhold til geologiske profiler er der udvalgt område på Sydvestsjælland: Dalmose-Fuglebjerg (Figur 38). Analysen af lertykkelser bygger på sammenstilling af de geologiske data (især borer) med de geofysiske opmålinger. De to lokaliteter ved Flakkebjerg og Fårdrup giver relevante geologiske data om morænelers sammensætning og indhold af makroporer, som kan sammenholdes med de geofysiske målinger. Desuden ligger GRUMO område Eggerslevmagle inden for området.

Området blev valgt ved projektets start, fordi der både er ny overflade geofysik (Sky-TEM) og to feltlokaliteter, som der kan sammenlignes med. Det var ikke muligt at tidsmæssige grunde at inddrage andre geofysiske metoder, som den generelle analyse pegede på som meget brugbare i forhold til f.eks. kortlægning af lertykkelser.



Figur 38. Kort over undersøgelsesområdet Dalmose – Fuglebjerg.

8.2 Lokalteter

De to lokaliteter Flakkebjerg og Fårdrup ligger i områdets vestlige centrale ende. Informationer fra de to områder gennemgås nedenfor. De ligger på en morænelersflade, hvorfor området da også domineres helt af moræneler ved terræn (Figur 39). Nordvest-sydøst gående strøg af smeltevandssand og grus findes desuden også i området, ligesom nordøst-sydvest gående bassiner med ferskvandsaflejringer er til stede, i begge tilfælde langs områdets åer.

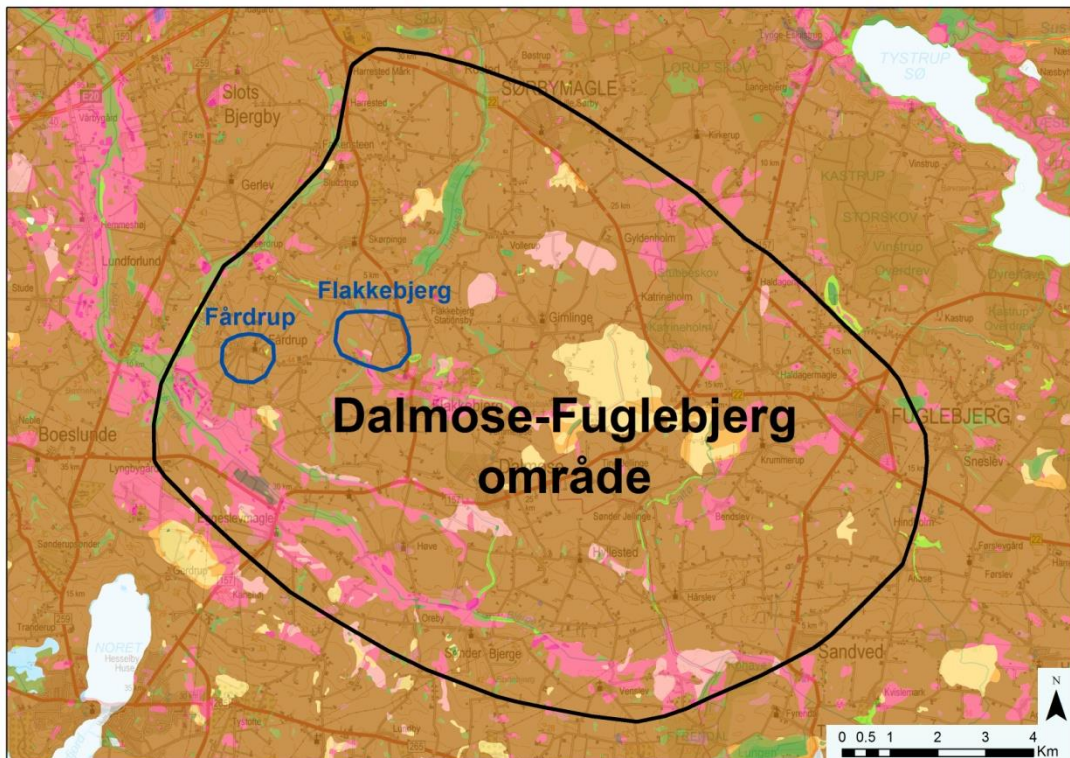


Fig. 39. Kort over de overfladenære aflejringer i 1 m's dybde. Signaturer: Brun: Moræneler (sidste istid), rød og lyserød. Smeltevandssand - og grus (sidste istid). Brungul og gul: Smeltevandsler (sidste istid) grøn: Ferskvandsaflejringer (efter istiden). (GEUS, 2013).

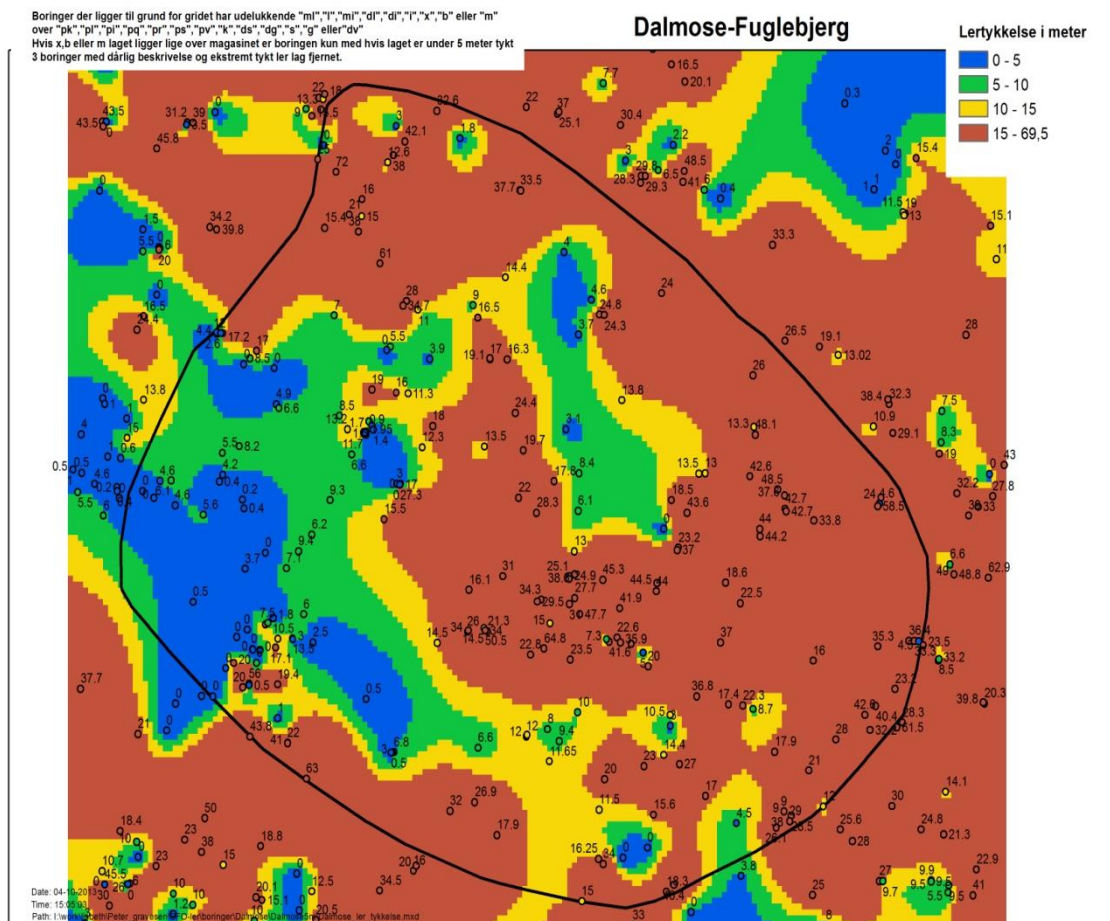
Lertykkelse

For hele området er udarbejdet et kort over morænelerets tykkelse (Figur 40).

Kortet er baseret på data fra 240 borer fra GEUS Jupiter database. Der er kortlagt moræneler og smeltevandsler (ML og DL) fra terræn og ned til regionale grundvandsmagasiner af smeltevandssand og grus (DS og DG) eller palæocænt grønsandskalk (PK) eller ler (PL). Lertykkelsens variation er kortlagt i intervallerne 0-5 m, 5-10 m, 10-15 m og 15-70 m (I det sidste interval med tilstedeværelse af mange borer på dyb-

der over 20 m). Interpolationen og kontureringen er foretaget med programmene Xtools.

Størstedelen af det nordlige og østlige område samt helt centralt dominerer lertykkelser på over 15 meter. Tykkelser på 10-15 m ligger uden om tykkelser på 5-10 m især mod vest og syd, hvor også de tyndeste lag på mellem 0 og 5 m findes.



Figur 40. Kort over morænelerets tykkelse baseret på boringer fra Jupiter databasen. De anvendte kriterier kan ses i kortets venstre hjørne. Tykkelsen er kortlagt fra terræn og ned til første betydende sandlag eller palæocæne ler eller kalklag (områdets grundvandsmagasiner).

Formålet med kortet er en sammenligning med de geofysiske data, som findes for området.

Jordbundsforhold

Et kort over jordbundsforholdene i området ses på figur 1 i bilag 2, hvor JB-klassifikationen viser, at Fin sandblandet lerjord dominerer (JB nr.6), mens JB nr.5: Grov sandblandet lerjord findes pletvis. I figur 2, bilag 2 ses, at lerprocenten i området i

C-horisonten, den nederste i jordbundsprofilen, ligger på omkring 10-15 %, men der er mange områder med indhold på 2-5 % ler.

Flakkebjerg lokaliteten

Egenskaber

I forbindelse med det strategiske miljøforskningsprogram (SMP 96) blev der etableret en række forsøgsopstillinger til forsøg med nedsivning af pesticider i moræneler ved Århus Universitets jordbrugsforskningsstation i Flakkebjerg (Klint & Gravesen, 1999)(Figur 41).

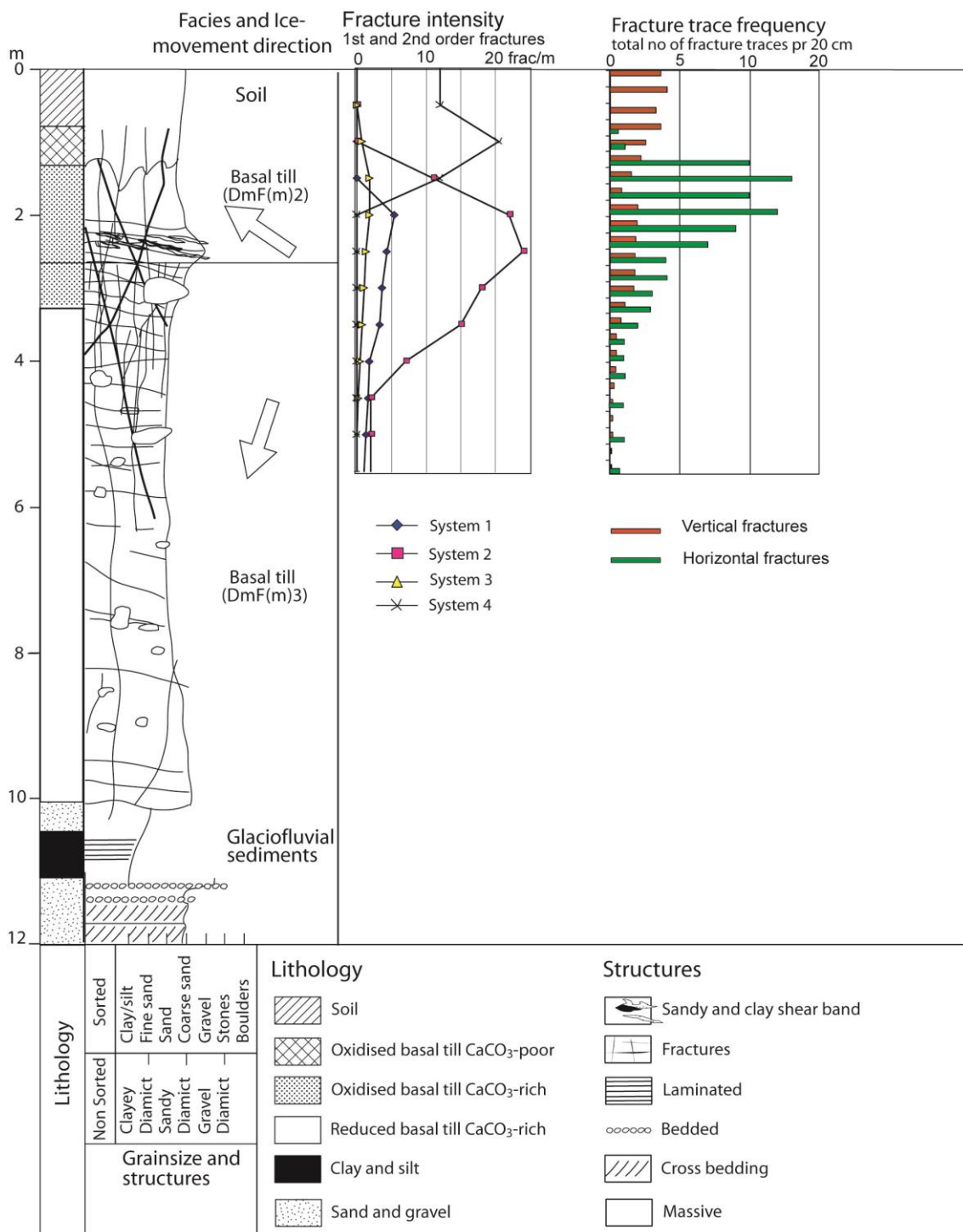
I en udgravning var der under muldlaget oxideret, olivenbrunt moræneler til 3,5 m's dybde, og derunder reduceret olivengråt moræneler til 5 m's dybde. Boringer viser, at det sidste morænelerslag fortsætter ned til 10 m's dybde, hvor det ligger på smeltevandsler, sand og grus (se også bilag 2).



Figur 41. Udgravning i moræneler ved Flakkebjerg (Foto: K.E.S. Klint).

Den geologiske opbygning i området består af en 2-3 meter tyk såkaldt Ungbaltisk basal till overlejrende en ca. 5-6 m tyk basal till afsat under Hovedfremstødet fra NØ.

Overgangen imellem de to tills er stedvis sandet og optræder som talrige tynde udtrukne sandede bånd (Figur 42).

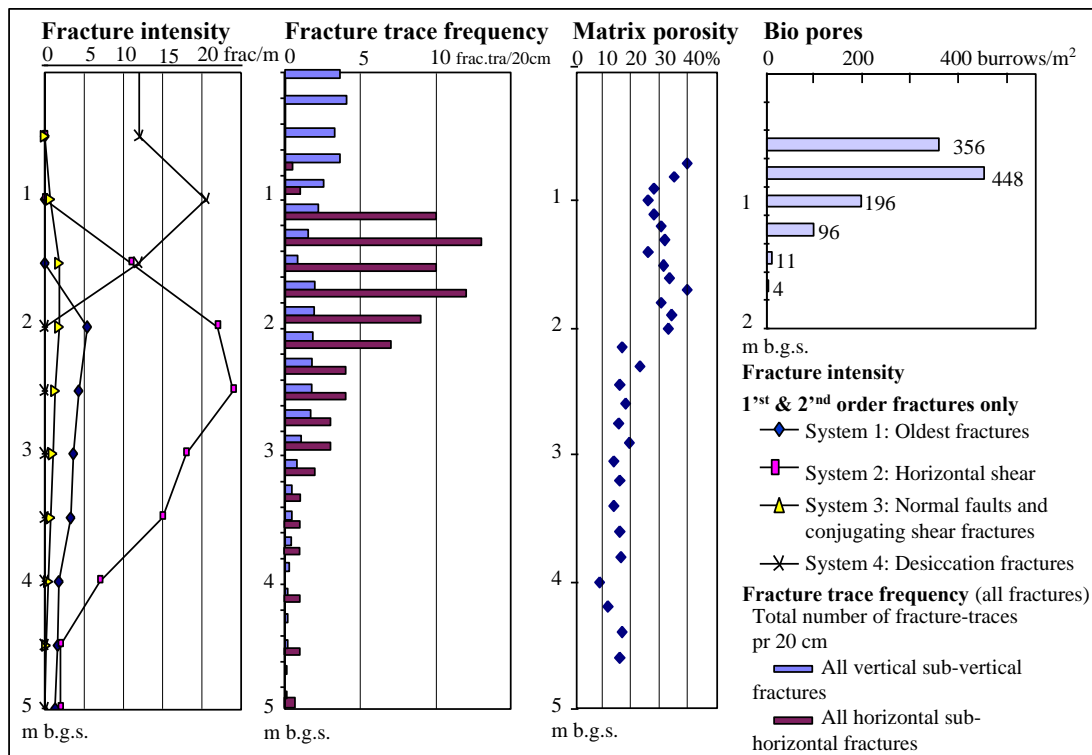


Figur 42. Lithologisk log der viser sprækker og redoxforhold fra Flakkebjerg. Det målte profil i udgravningen til 5 m er forlænget med borningsdata.

Makroporer

Der er opmålt fem sprækkesystemer, hvoraf de tre kan relateres til det øvre moræneler: Udtørningsprækker øverst, derefter horisontale shear sprækker samt lodrette shear sprækker.

Den nedre moræneler fremstår dårligt konsolideret, og der optræder to originale sprækkesystemer i denne, hvorimod konjugerende shearsprækker og små normalfor-kastninger strækker sig fra det øvre moræneler ned i den nedre. De må derfor må være dannet under det Ungbaltiske fremstød, hvorimod de primære sprækker, der er dannet i selve den nedre moræneler, kan relateres til udtørring eller horisontal shear under NØ-fremstødet (Figur 42 og 43 samt figur 6).



Figur 43. Makroporedata fra Flakkebjerg (Efter Klint og Gravesen, 1999).

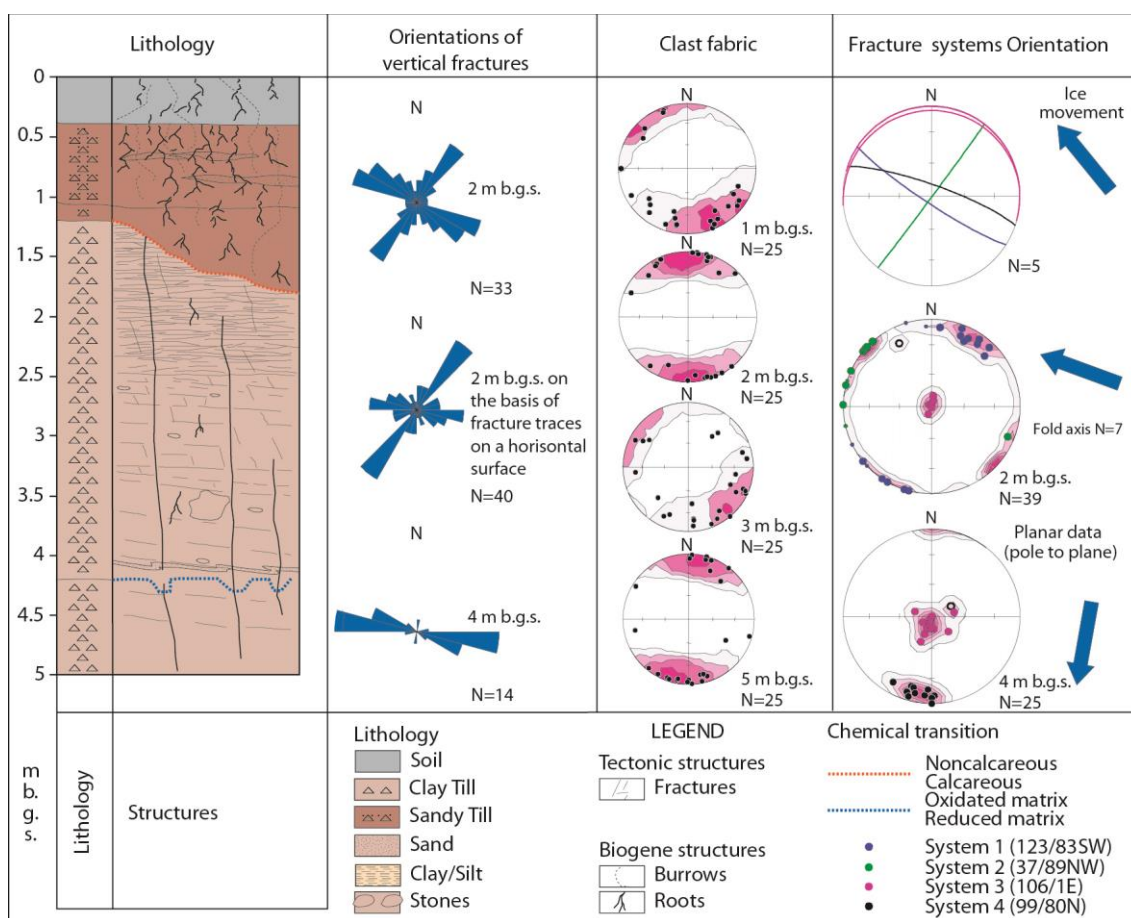
Fårdrup lokaliteten

Egenskaber

Fårdrup er en af de fem VAP-lokaliteter, som blev etableret i 2001 (Lindhardt et al., 2001). Områdets geologi er beskrevet i detaljer rundt om marken, bl.a. ved hjælp af udgravninger og borer. Fårdrup marken har siden etableringen indgået i varslingen og overvågningen, som bliver rapporteret årligt (se f.eks. Brüscher et al., 2013).

Fårdrup ligger på et plateau bestående af en bundmoræneflade med en relativ lille geologisk variabilitet. De terrænnære aflejringer er dannet af en Ungbaltisk isstrøm, der har overskredet en ældre randmoræne. Randmoræneaflejringerne ligger højt mod vest ved Slots Bjergby.

Fårdrup ligger tæt på Flakkebjerg og er kendetegnet ved den samme overordnede geologi. Der er udført en udgravning til 5,5 m under terræn i moræneler, syv monitoringsboringer til 5,5 m under terræn og fire pejleboringer til 11 – 12 m under terræn. Det opmålte profil består under mulden af oxideret, gulbrunt moræneler med sandlinser ned til 4,0 m's dybde. Herefter følger til 4,3 m moræneler, som skifter fra olivenbrunt til olivengråt, og redoxgrænsen kan følges ned langs sprækker (se figur 11) Der er enkelte sandslirer og – linser. Til 5,7 m er der reduceret mørkt olivengråt moræneler. Ifølge boringer er der mindst 12 m moræneler over sand-grusaflejringer i området (se også bilag 2).



Figur 44. Profilet fra Fårdrup med sprækker og redoxforhold. (Fra Lindhardt et al., 2001).

Morænelerslagene er således klassificeret som to basale tills, afsat under gletschere, der kom fra henholdsvis NØ (Hovedfremstødet) og SØ (Ungbaltiske fremstød) i Weichsel (Figur 44).

Makroporer

Der er konstateret mindst fire sprækkesystemer i de øverste 5 m moræneler under muldlaget med bioporer og udtørningsprækker.

System 1: Vertikale sprækker med svag hældning mod SV. Findes mellem 1 m og 5,5 m's dybde. Sprækkeafstand ved 3,5 m er 35-40 cm.

System 2: Vertikale sprækker med svag hældning mod NV. Findes mellem 1 m og 3 m's dybde.

System 3: Horisontale eller subhorisontale sprækker (Shear sprækker) med fissilt udseende. Findes mellem 1,8 m og 2,3 m's dybde.

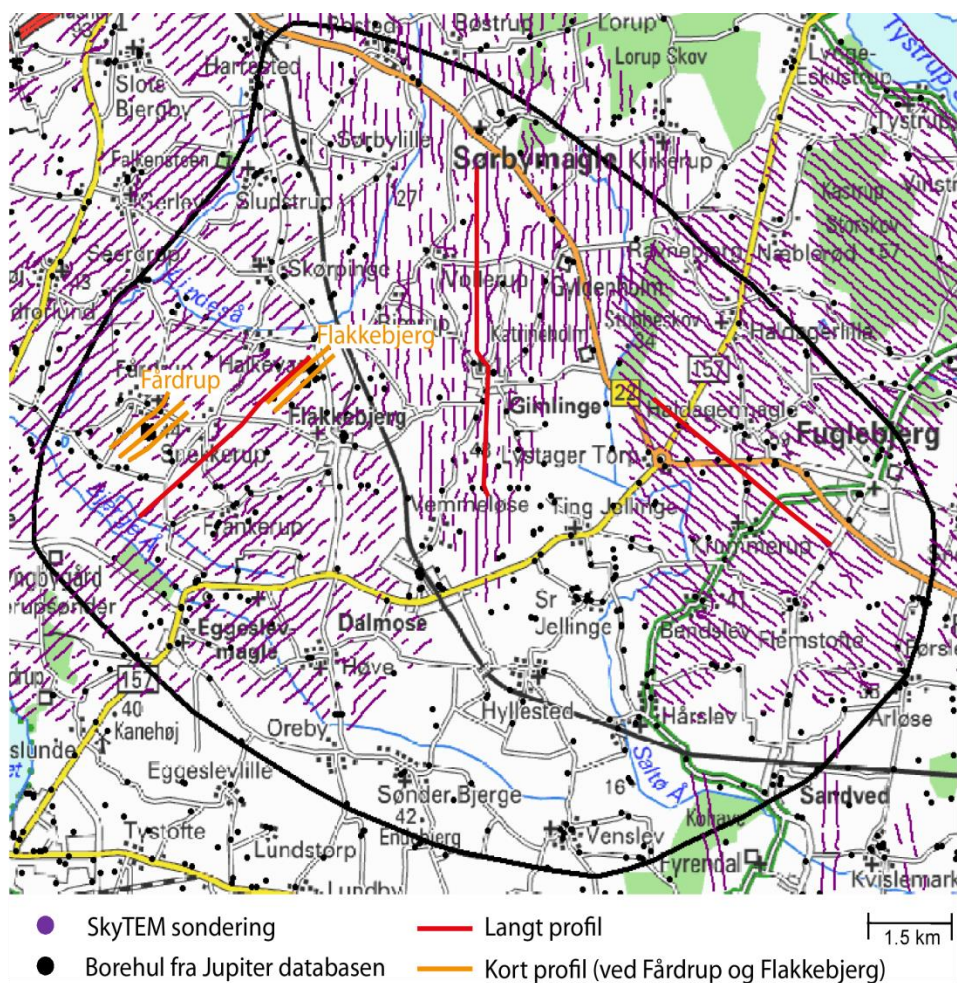
System 4: Vertikale sprækker med svag hældning mod N med afstand på 35-40 cm. Sprækkerne strækker sig ned i den reducerede zone, hvor der kan ses oxidationsspor omkring dem.

8.3 Geofysiske metoder

I Dalmose-Fuglebjerg området findes data fra to SkyTEM kortlægninger, som støder op til hinanden (Figur 45). De er de eneste data udover nogle spredte TEM-sonderinger og Schlumberger sonderinger i det aller vestligste område, og en enkelt geofysisk borehullog længst mod sydøst i området. TEM- og Schlumberger-sonderingerne vil ikke indgå i analysen.

Den østlige del af området dækkes af Næstved-kortlægningen (COWI, 2012), hvor data er indsamlet i perioden 20/1–11/2 2011. Der er fløjet med et SkyTEM-system med en ramme på 314 m², og de tidligste anvendte gatecentertider er 9,2 mikrosekunder efter CR-inversion. Linjeafstanden er ca. 166 m, og efter processing er sonderingsafstanden langs linjerne ca. 30 m. Data er tolket med en SCI fålagsmodel med 5 lag og en SCI mangelagsmodel med 19 lag.

Den vestlige og midterste del af området dækkes af Slagelse-kortlægningen (COWI, 2013), hvor data er samlet ind i perioden 3/7–10/7 2012. Der er fløjet med et SkyTEM-system med en ramme på 314 m², og de tidligste anvendte gatecentertider er 7,2 mikrosekunder efter CR-inversion. Linjeafstanden er ca. 200 m og efter processing er sonderingsafstanden langs linjerne ca. 20 m. Data er tolket med en SCI fålagsmodel og en SCI mangelagsmodel med 19 lag.

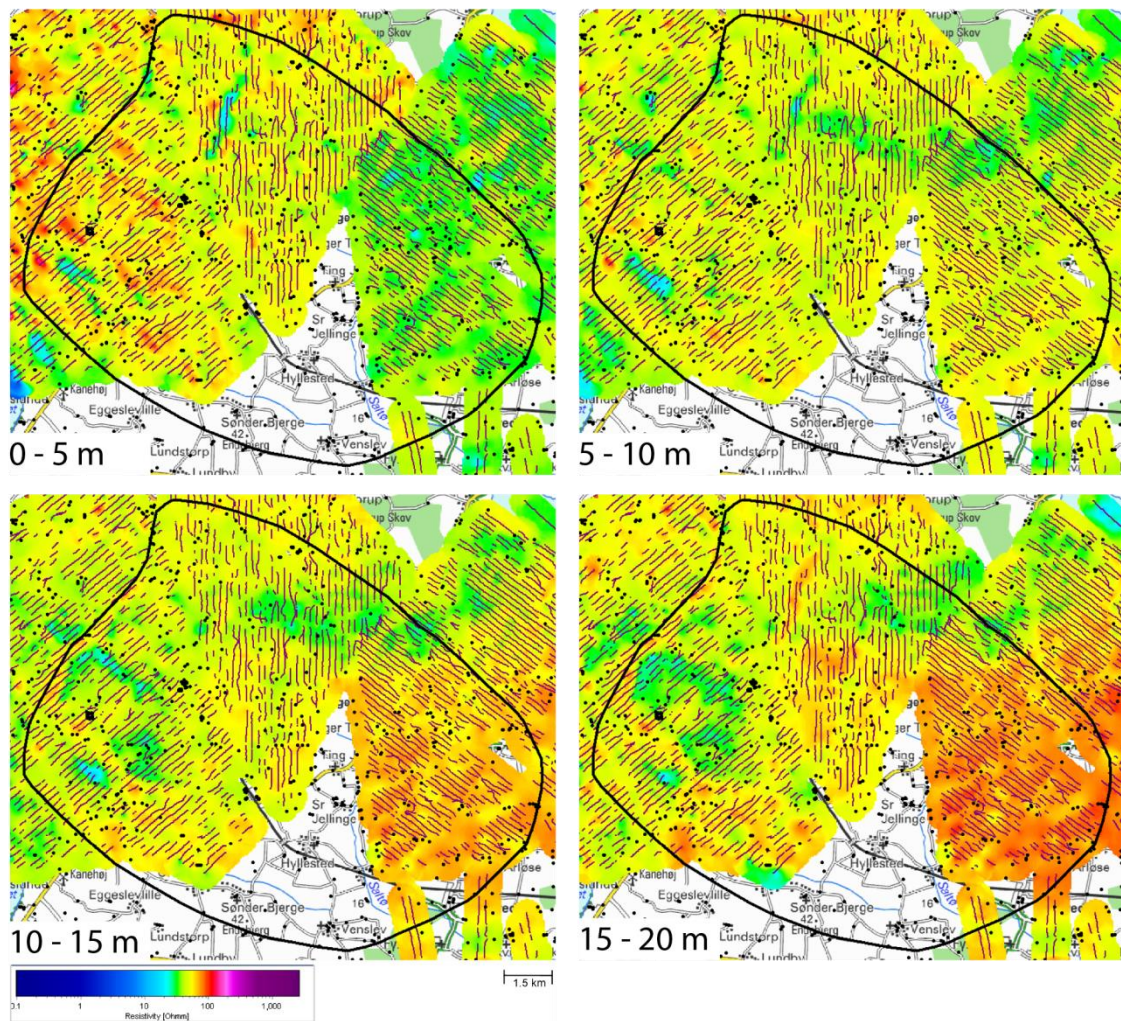


Figur 45. Kort over SkyTEM data i området. I det vestlige (SV-NØ orienterede linjer) og midterste (N-S orienterede linjer) område hører data til Slagelse kortlægningen fra 2012. I det østlige (NV-SØ orienterede linjer) område hører data til Næstved kortlægningen fra 2011. De røde og orange linjer markerer lokaliseringen af de profiler, som vises efterfølgende i afsnittet.

8.4 Sammenstilling af data

SkyTEM data præsenteres som middelmodstandskort og som profilsnit og sammenstilles med boringer fra Jupiter databasen og jordartskortet (Figur 39).

Figur 46 viser SkyTEM resistivetsmodellerne for de øvre jordlag repræsenteret i fire middelmodstandskort dækkende intervallet 0–20 meters dybde i skridt af 5 m. Det mest terrænnære middelmodstandskort (0–5 m) viser et spættet mønster med mindre, mere eller mindre sammenhængende områder med resistiviteter i intervallet 60–100 Ohmm (røde farver) mellem resistiviteter omkring 30–40 Ohmm (grønne farver). I de tre øvrige middelmodstandskort er resistivetsmønstret mere roligt overvejende med resistiviteter i intervallet 30–60 Ohmm. I den østlige del af område bliver resistiviteter i intervallet 60–100 Ohmm fremherskende.



Figur 46. SkyTEM resistivetsmodeller præsenteret som middelmodstandskort for fire intervaller.

I figur 47 er resistiviterne fra SKyTEM resistivetsmodellernes første lag præsenteret som prikker på kortet over de overfladenære aflejringer i 1 m's dybde som baggrund. Der ses en vis grad af sammenfald mellem områder med smeltevandssand i det geologiske kort og områder med resistivitet i intervallet 60–100 Ohmm. Der er også områder med resistivitet i intervallet 60–100 Ohmm, hvor kortet viser moræneler, ellers ligger resistiviteterne her omkring 30–50 Ohmm. Ferskvandsaflejringerne i ådalene er overvejende sammenfaldende med lave resistiviteter i intervallet 10–20 Ohmm.

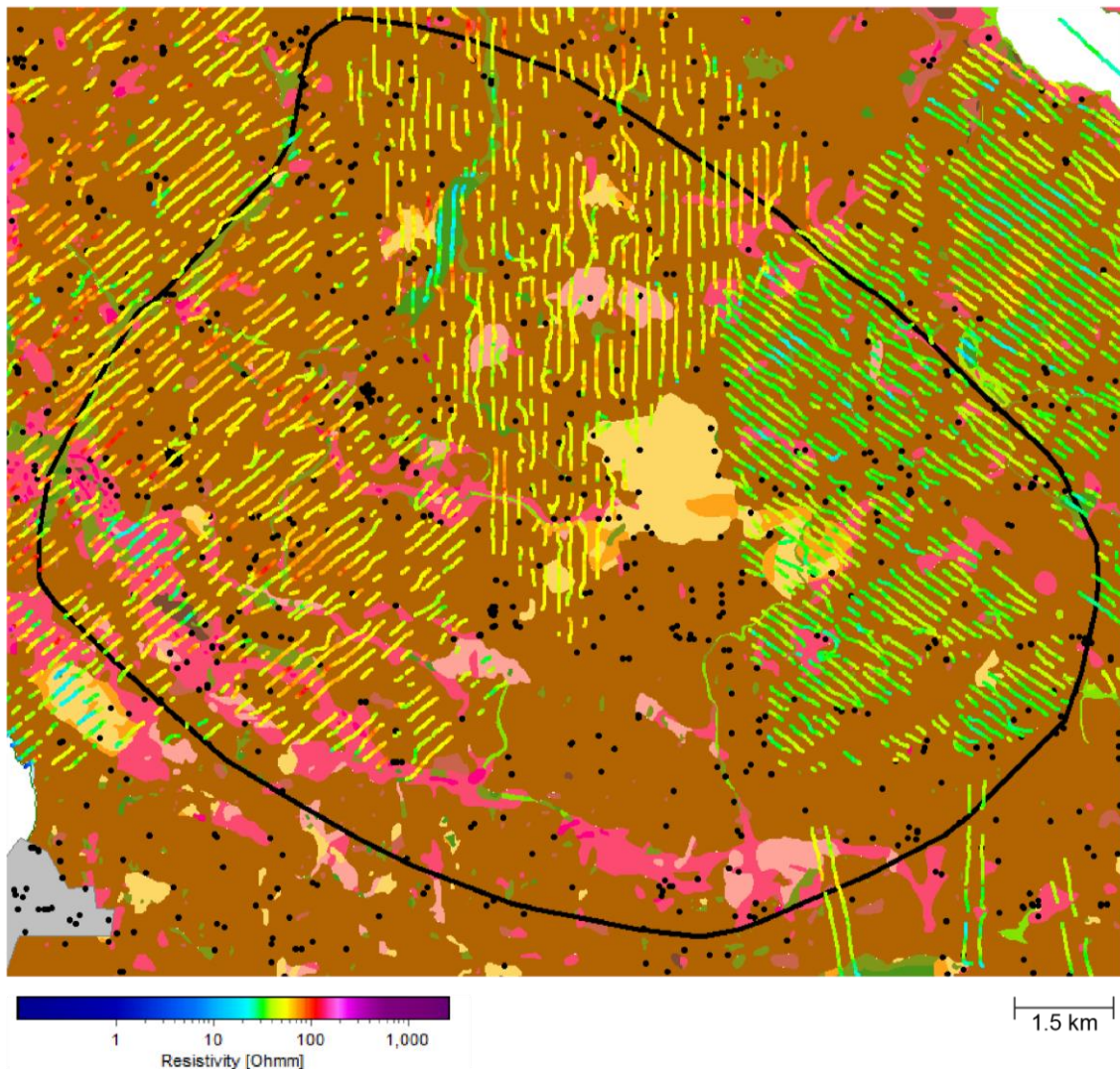


Fig. 47. Kort over de overfladenære aflejringer i 1 m's dybde sammenstillet med SkyTEM resistivitet i intervallet 0–3 m. Signaturer: Brun: Moræneler (sidste istid), rød og lyserød: Smeltevandssand - og grus (sidste istid). Brungul og gul: Smeltevandsler (sidste istid) grøn: Ferskvandsaflejringer (efter istiden). (GEUS, 2013).

Figur 48 viser et 4 km profilsnit langs SkyTEM flyvelinjer i den sydvestlige del af området i nærheden af Flakkebjerg og Fårdrup lokaliteterne. På skråningen ned mod Bjerge

Å (800–1000 m) og vest for Flakkebjerg (2800–3000 m) er der tættest på terræn områder med resistiviteter i intervallet 50–80 Ohmm, som indikerer at sandede aflejringer overlærer morænelerslagene, hvilket også bliver bekræftet af borerne. Resten af profilet indikerer, at der er tykke morænelersaflejringer (resistiviteter omkring 30–50 Ohmm) ned til omkring kote -10 m, hvor palæogent ler og Grønsandskalk starter.

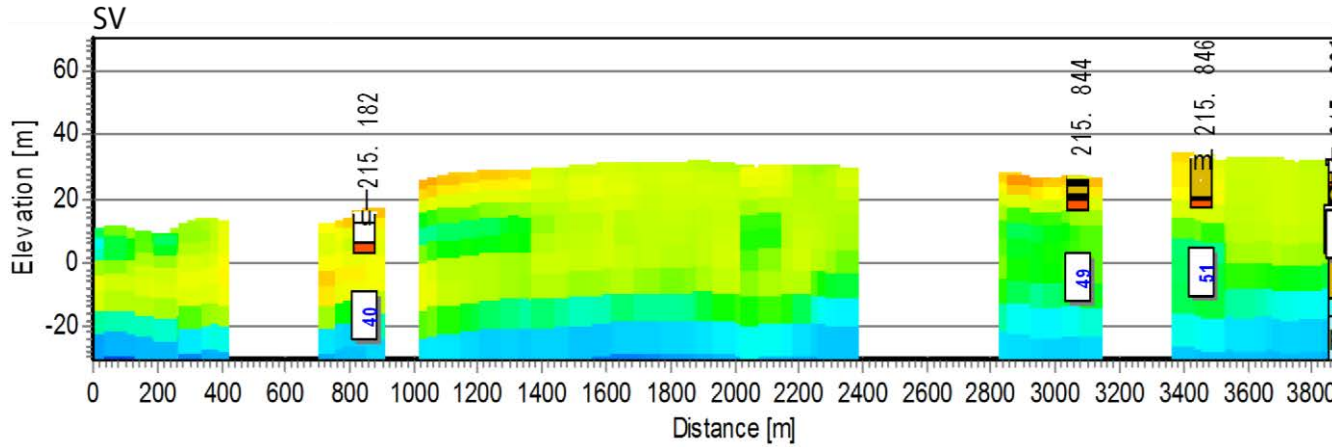


Fig. 48. Profilsnit langs SkyTEM linjer gennem den sydvestlige del af området sammenstillet med borerne fra Jupiter databasen. Den nordøstlige ende af profilet er placeret ved Flakkebjerg lokaliteten (Rød profillinje på figur 45).

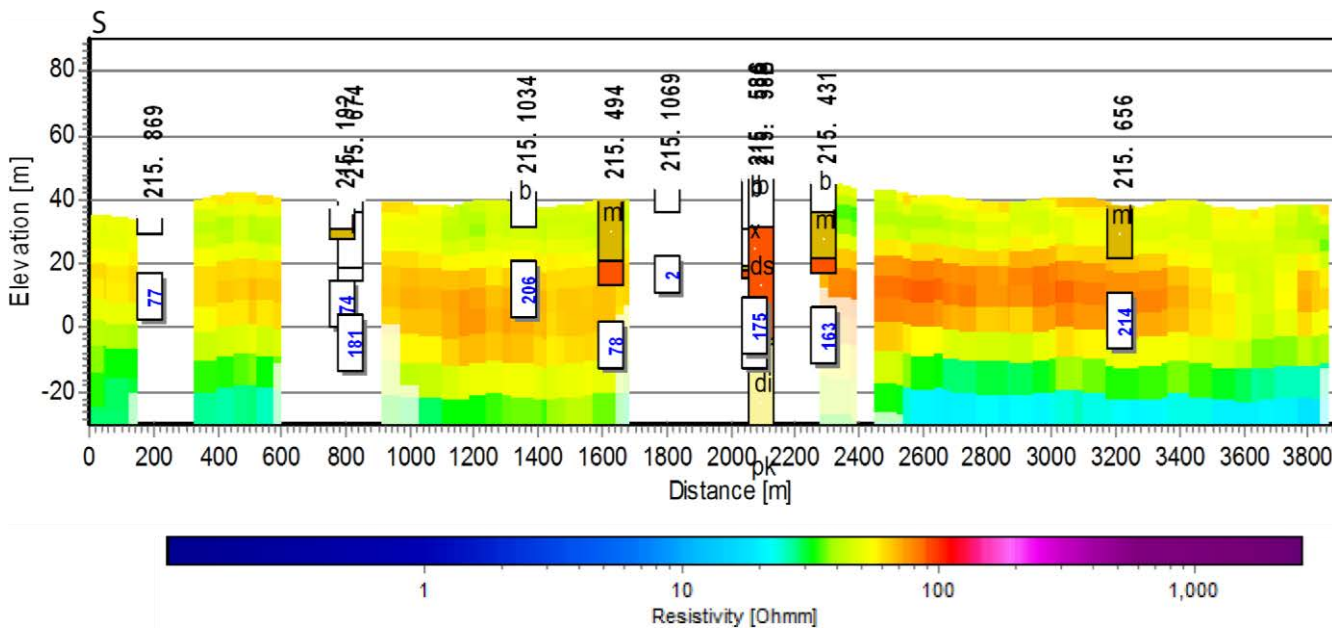


Fig.49. Profilsnit langs SkyTEM linjer gennem den midterste del af området omkring Gimlinge sammenstillet med borerne fra Jupiter databasen (Rød profillinje på figur 45).

I den midterste del af området omkring Gimlinge er de tykke morænelersaflejringer afløst af to 10–20 m tykke morænelerslag mellemløst af et 10–20 m tykt sandlag (Fi-

gur 49). SkyTEM-resultaterne stemmer overvejende fint sammen med boringsinformati-
tionen.

I det østlige område omkring Fuglebjerg indikerer SkyTEM-resultaterne, at det øverste morænelerslag er tyndere, og det underlejrende sandlag også er blevet tyndere (Figur 50). Det bekræftes delvist af boringer. Sandlaget er ikke påvist i alle boringer i området, hvilket primært skyldes, at det er ældre boringer af dårlig kvalitet med meget få beskrevne prøver.

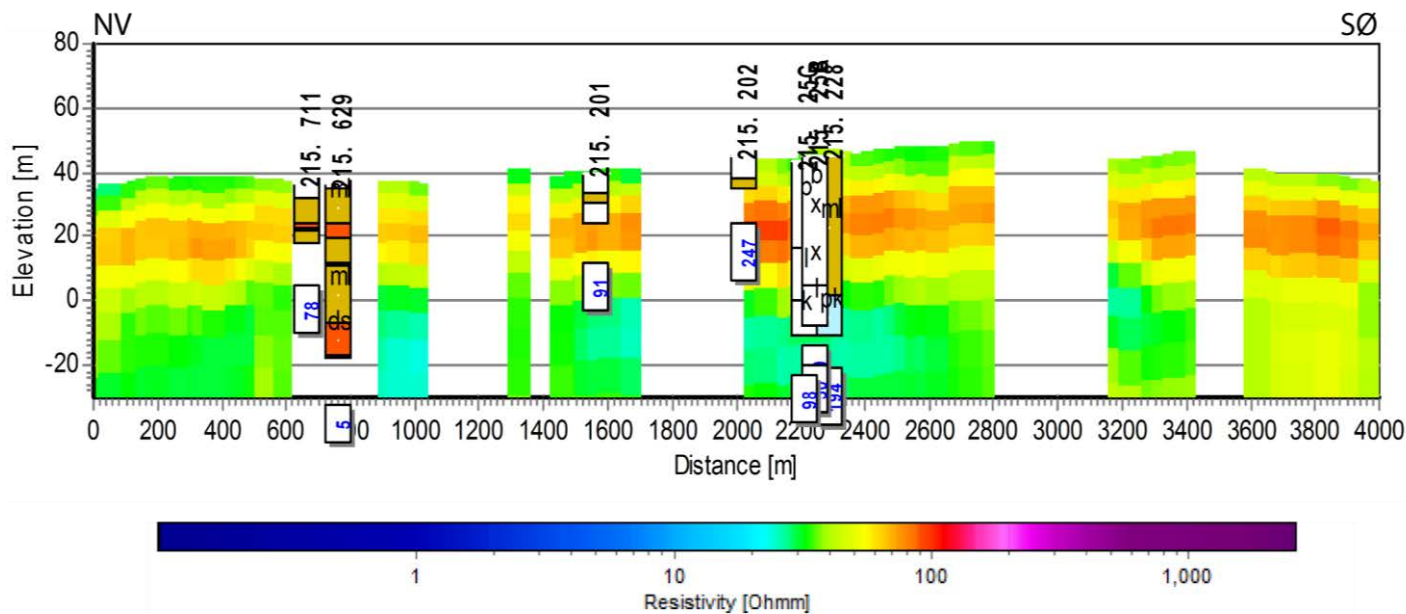


Fig.50. Profilsnit langs SkyTEM linjer gennem den østlige del af området ved Fuglebjerg sammenstillet med boringer fra Jupiter databasen. (Rød profillinje på figur 45).

Figur 51 viser profilsnit fra tre SkyTEM-linjer ved Fårdrup lokaliteten. Den midterste linje skærer direkte igennem VAP-marken og indikerer, at morænelersaflejringerne i den vestlige del af marken kan være mere sandede end i den østlige del, da resistivitetene er 10–15 Ohmm højere.

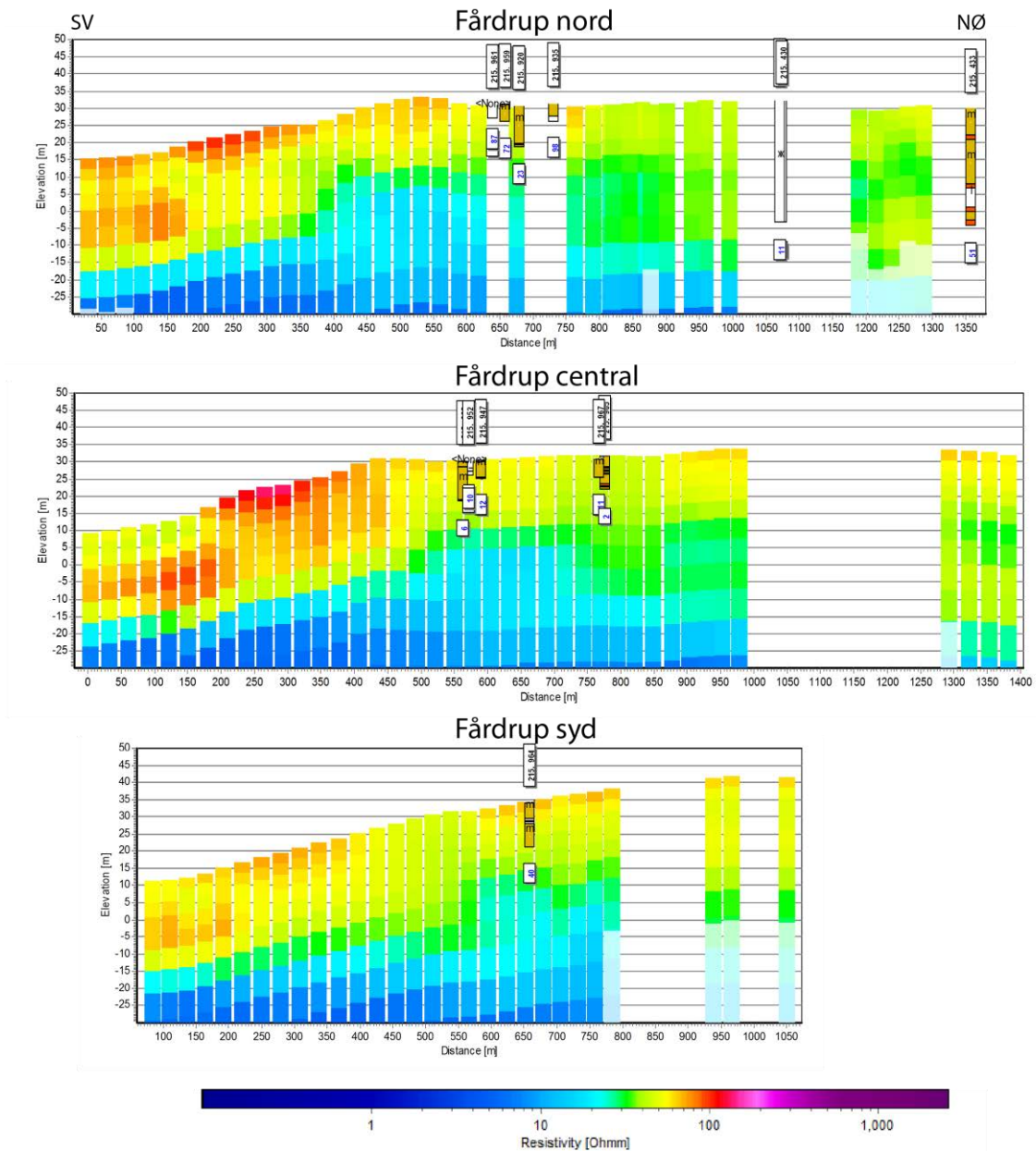


Fig. 51. Profilsnit langs SkyTEM linjer ved Fårdrup lokaliteten. Det centrale profil skærer diagonalt gennem VAP-marken, mens det nordlige og sydlige profil er placeret mindre end 50 m fra henholdsvis det nordvestlige og sydøstlige hjørne af marken. (Orange profillinjer på figur 45).

SkyTEM-dataene krydser ikke direkte hen over lokaliteten ved Flakkebjerg, da denne er placeret for tæt ved bygninger (Figur 52). I området umiddelbart vest for lokaliteten er resistivitetens niveauet i den øvre del af morænelerslagene omkring 50 Ohmm, mens det nord for lokaliteten på det nordlige profil ligger omkring 35 Ohmm. Sandlagene, som træffes i borerer omkring 10 meters dybde (figur 42), bliver ikke opløst i SkyTEM resistivitetssektionerne.

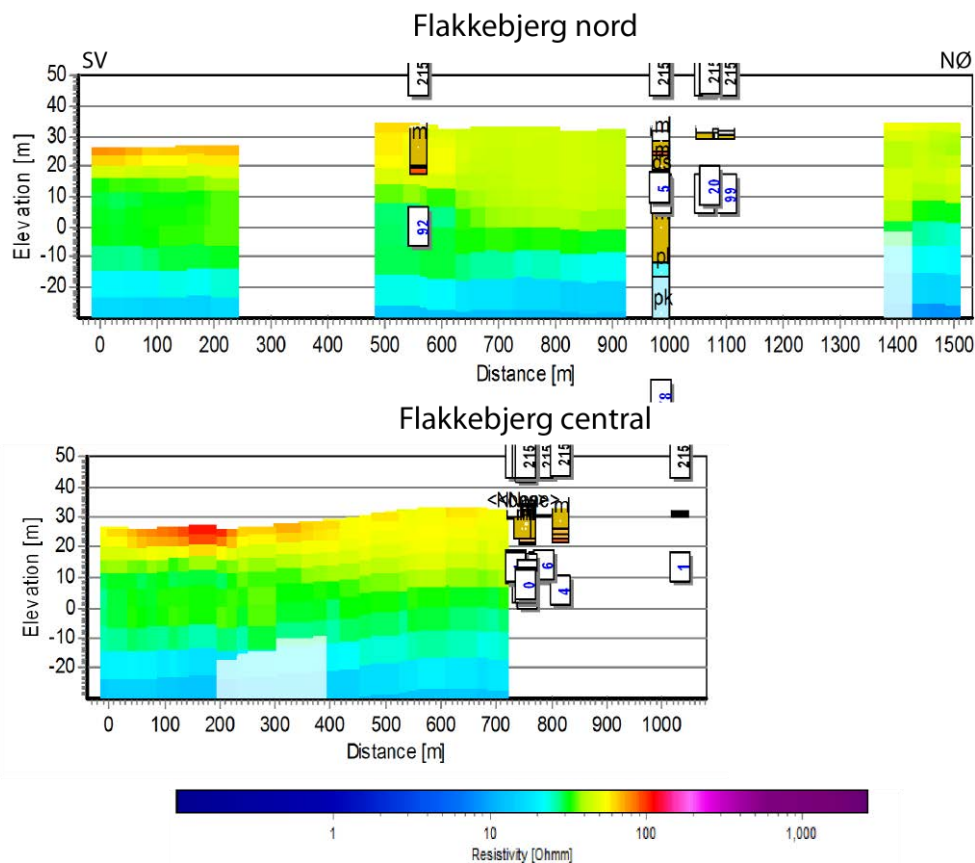


Fig. 52. Profilsnit langs SkyTEM linjer ved Flakkebjerg lokaliteten. Det centrale profil går meget tæt på forsøgsområdet, mens det nordlige profil er placeret ca. 200 m mod nord-vest. (Orange profillinjer på figur 45).

8.5 Vurdering af metoder

8.5.1 Tykkelse af lerlag

Lertykkelser, beregnet på baggrund af geofysiske data og borer, udføres ofte som standard i grundvandskortlægning ved brug af SSV (Geofysiksamarbejdet, 2009) i givne intervaller ned gennem lagfølgen. En sådan beregning har vi ikke til rådighed her, og det er for omfattende en øvelse at udføre en til denne rapport.

Figur 40 viser et kort over tykkelsen af moræneler fra terræn og ned til det første betydende sandlag eller palæocene ler eller kalklag. I den vestlige del af området er lertykkelserne generelt tynde. Hvor borer viser, at der er 0–5 m ler, er også overvejende observeret høje resistivitetsværdier (Figur 46).

I dele af området (primært i den vestlige del), hvor der ud fra borerer er lertykkelser på 5–15 m, indikerer SkyTEM-dataene, at lertykkerne er betydelig større. Uoverensstemmelsen skyldes sandsynligvis, at det sandlag, der findes i borerne, som afgrænser bunden af morænelerslaget, er for tyndt til at blive "set" af SkyTEM-metoden, eller dets resistivitet ikke er væsentlig højere end morænelerets.

I det østlige område angiver borerne, at lertykkelsen er over 15 m og i mange borerer væsentligt over 15 m. Ud fra middelmodstandskortet for intervallerne 10–15 m og 15–20 m (Figur 46) samt profilet i Figur 50 observeres høje resistiviteter, som indikerer, at der er et betydeligt sandlag af en tykkelse på 10–20 m og med en overgrænse i ca. 10 m's dybde, og dermed begrænses tykkelsen af det terrænnære morænelerslag til omkring 10 m. Af ikke undersøgte årsager stemmer dette dårligt overens med observationer fra borerne, som enten ikke registrerer sandlaget eller kun registrerer et relativt tyndt sandlag omkring 30 m's dybde. Det betyder, at enten bliver sandlaget overset i borerne, eller også har morænelerslag registeret i borerne i intervallet 10–30 m høje resistiviteter.

8.5.2 Horisontale og vertikale heterogeniteter

Ud fra middelmodstandskortene (Figur 46 og 47) kan der ses horisontale heterogeniteter, som er observeret fra den mindste kortlægningsbare skala langs flyvelinjerne på 50–100 m (2–3 sonderinger) og et par hundrede meter på tværs af flyvelinjerne i dybdeintervallet 0–5 m. De observerede heterogeniteter i det mest overfladenære lag skyldes tynde sandlag, som overlejrer morænelerslagene.

Langs profilerne (Figur 48–52) kan i de øverste 15–20 m observeres en lateral variation i resistiviteterne inden for intervallet 30–50(60) Ohmm, der ud fra borerne se ud til at svare til morænelersaflejringer. Denne variation kan eventuelt forårsages af sandlag, der er for tynde til at blive opløst, som det kan ses i profilet ved Flakkebjerg (Figur 52).

I den østlige del af området, som hører til Næstved kortlægningen er modstandsniveauet i intervallet 0–5 m's dybde (Fig 46 og 47) generelt lavere, og det spættede udseende kommer ikke frem i samme grad. Ud fra kortet over de overfladenære aflejringer i 1 m's dybde og den generelle viden om geologien i området, er der ikke noget belæg for, at modstandsniveauet ikke skulle være det samme i hele området helt terrænnært. Springet i modstandsniveauet følger grænsen mellem de to kortlægninger.

En mulig forklaring på forskellene i modstandsniveau kan være, at Næstved kortlægningens første anvendelige gatecentertid er 9,2 mikrosekunder, mens den er 7,2 mikrosekunder i Slagelse kortlægningen. Som det fremgår af Kapitel 7 vil en tidligere første anvendelig gatecentertid forøge opløsningen af de overfladenære lag, herunder også "evnen" til at se helt overfladenære højmodstandslag. Det ligger uden for formålet med denne rapport at afdække, hvad der præcist forårsager denne forskel i modstandsniveauet mellem de to kortlægninger.

8.6 Sammenfatning

Dalmose-Fuglebjerg området dækkes delvist af Næstved SkyTEM kortlægningen fra 2011 og Slagelse SkyTEM kortlægningen fra 2012.

I nogle områder er der god overensstemmelse mellem lertykkelseskortet fremstillet på baggrund af boringer og observerede resistivitetsfordelinger, mens der i andre områder ses en uoverensstemmelse, som primært i det vestlige område skyldes relativt tynde sandlag, som er observeret i boringer, men ikke opløses i SkyTEM, og i det østlige område skyldes det et dybtliggende relativt tyndt sandlag, som er observeret i boringer, der enten har en underestimeret tykkelsen i boringerne eller at det overliggende moræneler har så høj resistivitet, at det svarer til sandlags resistivitet. Der er behov for en detaljeret analyse af resistiviteterne fra SkyTEM-kortlægningerne, boringer og borehulslogs i området for at afdække aflejringerens resistivitetsforhold.

Sammenholdes de to lokaliteter ved Flakkebjerg og Fårdrup med nærliggende SkyTEM-målinger, ses det, at morænelerslagene har resistiviteter i intervallet 30–60 Ohmm, men det ikke muligt at lave en detaljeret sammenligning, da SkyTEMs vertikale og horisontale opløsning ikke rækker til dette.

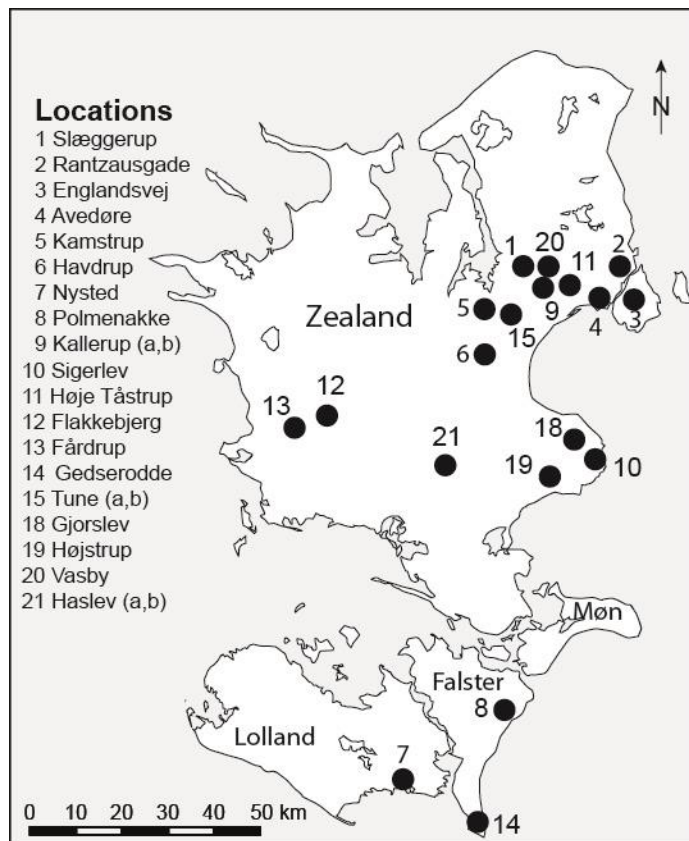
Heterogeniteter på en skala ned til 50–200 m, som skyldes relativt tynde sandaflejringer ved terræn overlejrende morænelerslag, fremstår klart fra Slagelseskortlægningens middelmodstandskort for intervallet 0–5 m, mens det ikke fremgår tydeligt i Næstved kortlægningen. Denne forskel kan skyldes, at Næstved kortlægningens første anvendelige gatecentertid er 9,2 mikrosekunder, mens den er 7,2 mikrosekunder i Slagelse kortlægningen.

9. Overfladenær morænelers egenskaber

Inden for de senere år er der sket en vidensudvikling indenfor morænelers egenskaber og udbredelse. Det kan inddeles i følgende fire grupper:

1. Detailundersøgelser af makroporers betydning i overfladenær moræneler i forbindelse forurening, klimaændringer og grundvandsdannelse.
2. Undersøgelser af sandlinser i moræneler.
3. Kortlægning af moræneler, geomorfologi og prækvartære aflejrings betydning for sprækkedannelse og deres udbredelse (PM konceptet).
4. Forsøg udført for at vise frost og tøs betydning for sprækkedannelse (inddrages ikke).

Undersøgelserne har især været koncentreret på Sjælland, men en del resultater fra det øvrige land findes også bl.a. i forbindelse med etablering af VAP markerne og forskningsprojekter (Klint, 2009)



Figur 53. Kort over undersøgte lokaliteter på Sjælland, Lolland og Falster (Fra Klint et al., 2013).

9.1 Indledning

På Sjælland er der undersøgt 21 feltlokaliteter med beskrivelse af leraflejring, deres egenskaber og strukturer i bl.a. udgravninger (Figur 53). For at kunne få den optimale datadækning som grundlag for denne undersøgelse er valgt to områder på Sjælland med følgende karakterer:

- a. Ondulerende moræneflade over kalkmagasin på Stevns.
- b. Ondulerende moræneflade over smeltevandsandmagasin i Hedeland.

Områdetyper med tilsvarende egenskaber træffes også på Fyn og Østjylland. De to områders udstrækning falder sammen med to polymorfologiske enheder i henhold til Klint et al., (2013) (se afsnit 11). For de to områder er vurderet relationer mellem terrænoverflade- bund af rodzone- grundvandsmagasin, hvor moræneler ligger over magasinet. Der er foretaget en begrænset sammenstilling af data angående jordbund, som både har en lokal og landsdækkende variabilitet.

Der er foretaget analyse af makroporers udbredelse i moræneler ud fra de eksisterende undersøgte lokaliteter, og analyse af relationer til hele arealet blandt andet ved kortlægning af lertykkelsen ud fra boringer og evt. eksisterende geofysik. En oversigt over alle eksisterende makroporedata, som har betydning for grundvandsmagasinerne, er etableret.

Der er foretaget beskrivelse af geologiske makroporedata: Morænelers makropore karakterer som sprækkeafstand (spacing) og dybde, sandlinsers egenskaber, betydning af den reducerede zone, eksisterende værdier for hydraulisk ledningsevne og evt. viden om matrixtransport.

Der er sammenstillet data om den reducerede zones tykkelse (zonen hvor pesticider generelt ikke nedbrydes) i områderne baseret på nitrat/iltdata og farveforskel i leraflejringerne mellem den oxiderede og reducerede zone i boreprøver og feltprøver.

Påviste eksisterende pesticider i grundvandsmagasinerne i de to områder kortlagt for underbygge opfattelsen af morænelers beskyttende egenskaber (eksisterende overvågningsdata) (se afsnit 6).

Resultaterne fra de to områder med forskellige grundvandsmagasiner omfatter:

- Status for viden om makropore/sprækkedata i overfladenær moræner med vurdering om sprækkers forløb vertikalt nedad og horisontalt i lagene.
- Status for viden om sandlinsers mulige størrelser og udbredelse samt muligheder for kortlægning.
- Vurdering af morænelers tykkelsesforhold set i forhold til dannelse og senere deformation.
- Vurdering af PM-konceptet som grundlag for et evt. koncept for SFO.

9.2 Stevns området

Stevns området, der indgår i denne undersøgelse er afgrænset, som det ses på figur 54. Området er en del af en moræneflade, som ligger på en kalkoverflade. Relationerne mellem det udbredte moræner og kalkoverfladen kendes fra en lang række boringer, tre udgravninger, Stevns Klint og enkelte geofysiske undersøgelser. Området afgrænses mod øst af Tryggevælde å/Stevns å.

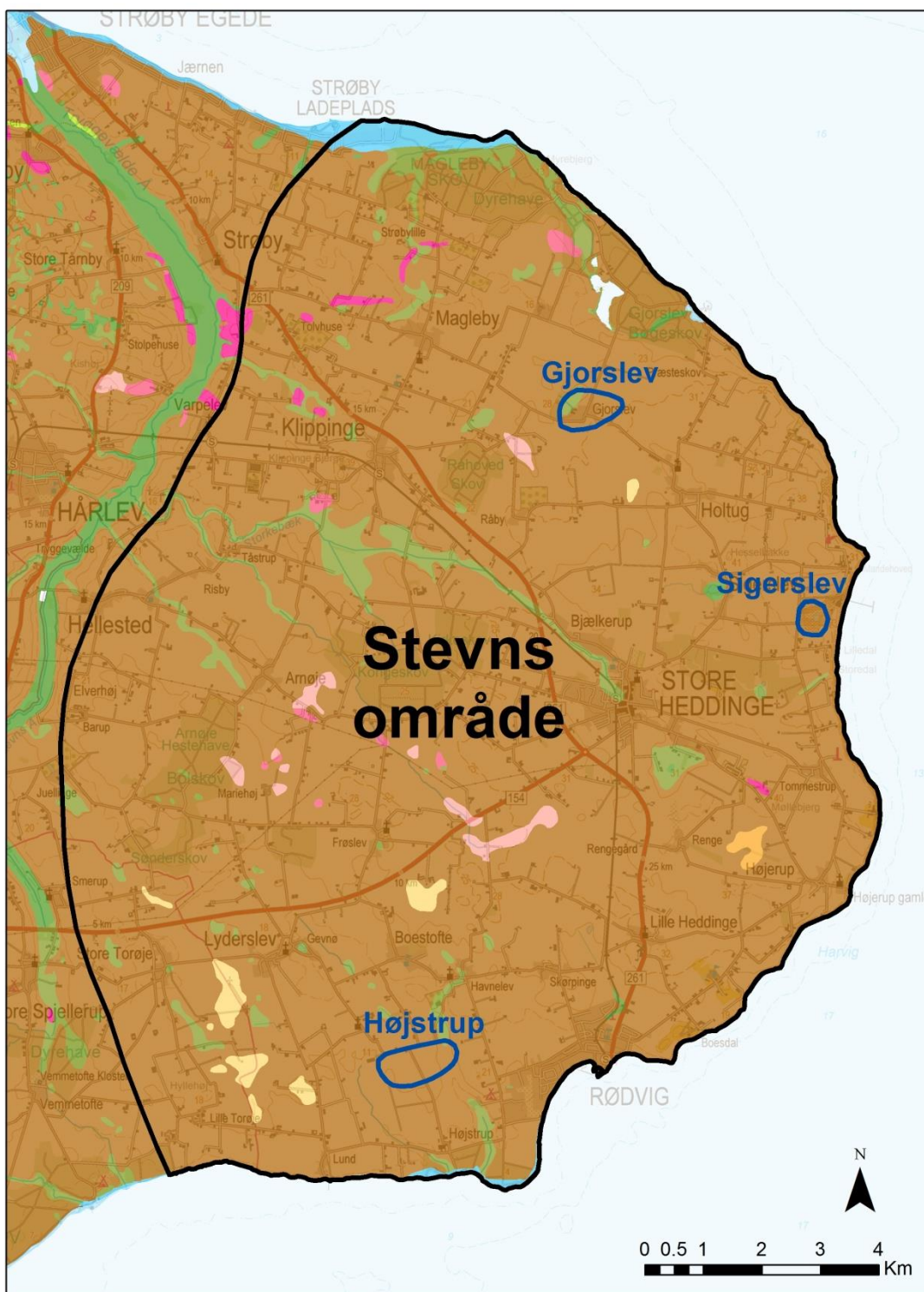
Områdets terræn fremstår som en forholdsvis plan morænelersflade, der ligger højest mod øst omkring kote + 25-30 m, hvorefter det hælder mod øst til kote + 20-25 m. Denne type moræneflade er karakteristisk for det meste af sydøst Sjælland, herunder Stevns og området omkring Køge. Morænefladen er meget 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.

Inden for området findes der tre velundersøgte lokaliteter: Gjorslev og Højstrup lokaliteterne, som blev undersøgt i forbindelse med det første KUPA projekts lerdel fra 2004 (GEUS & DJF, 2004b) og Sigerslev lokaliteten, der blev undersøgt i forbindelse med et EU-projekt i 1998 (Rosenbom & Jakobsen, 2005) og ved senere GEUS-undersøgelser (Figur 58). Lokaliteterne dækker overvejende den østlige del af området.

Området er klassificeret som den polymorfologiske klasse: Ondulerende moræneflade på kalkmagasin – M (M) K (Klint et al., 2013) (se afsnit 11).



Figur 54. Kort over Stevns området.



Figur 55. Kort over de geologiske forhold i 1 m's dybde. Området er helt domineret af moræneler (brun). Desuden ses mindre områder med smeltevandssand og grus (rød/orange) og smeltevandsløber (gul/lyserød) samt ferskvandsaflejringer (grøn) langs åerne (GEUS, 2013).

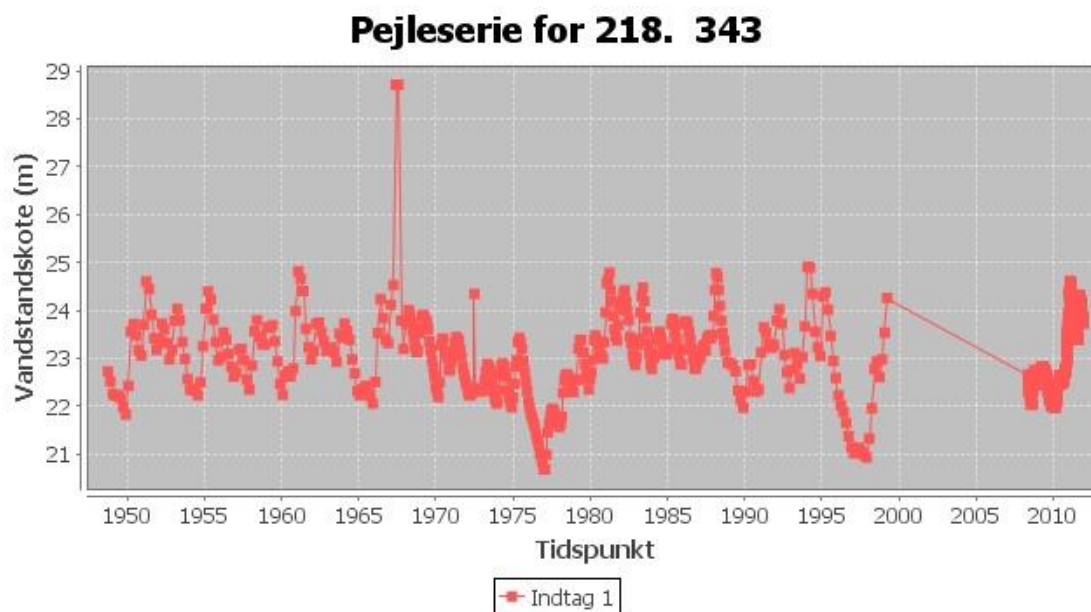
Det geologiske kort viser udbredte morænelersaflejringer med enkelte områder med smeltevandssand (Figur 55).

9.2.1 Jordbund

Jordbundsforholdene er præget af lerede jorde (se figur 1 i bilag 2). Efter JB-klassifikationen er det JB nr.6. Fin sandblandet lerjord og JB nr. 7: Lerjord, som findes i området, ca. halvt af hver. Figur 2 i Bilag 2 viser desuden, at lerindholdet i C-horisonten, dvs den nederste del af jordbundsprofilen, ligger på 10-15 % i det meste af området og kun pletvis, er der områder med ler % på mellem 2-4.

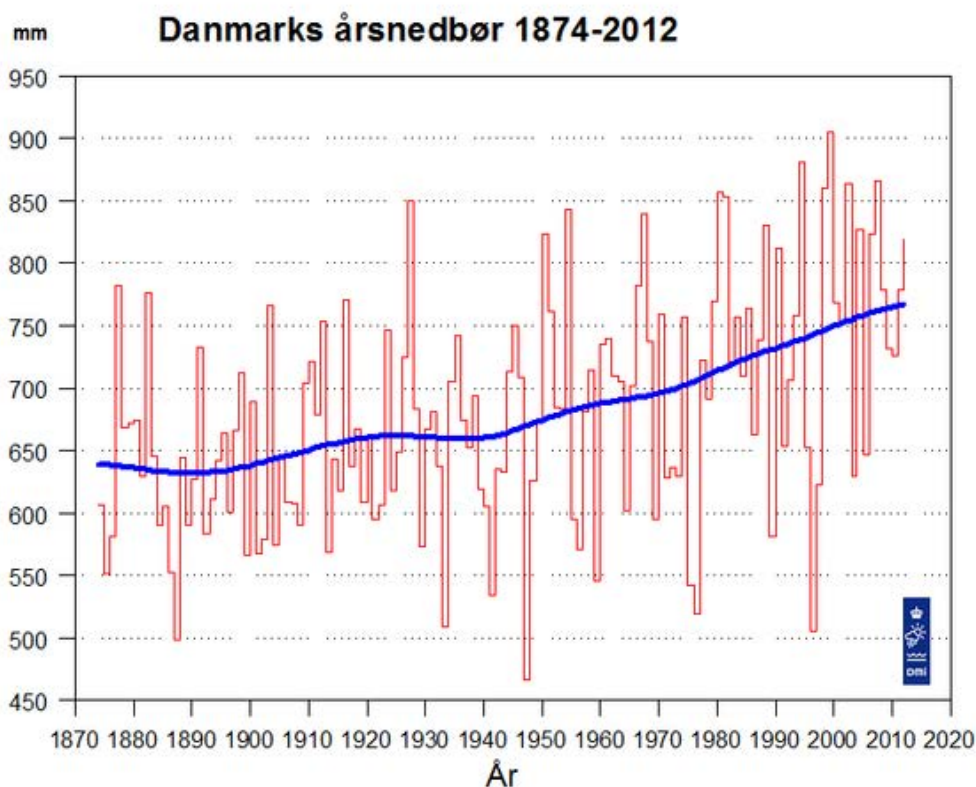
9.2.2 Grundvand og grundvandsmagasiner

Grundvandsmagasinet består af kalkaflejringer fra både Danien (tertiær) og Maastrichtien (Kridt) tidsafsnittene, der selv om de er forskellige i sammensætning og strukturer, kan regnes som et samlet magasin. Kalkaflejringerne er gennemsat af både vertikale og horisontale sprækkesystemer, som er baggrund for højpermeable forhold og store ydelser ved oppumpning. Ved Sigerslev kalkgrav f.eks. findes et horisontalt og tre vertikale sprækkesystemer, men de øverste 9 m består af nedknuste og stærkt opsprækkede lag dannet af istidens gletsjeres bevægelse hen over området (Rosenbom & Jakobsen, 2005). Grundvandet i magasinet er for det meste artesisk, og grundvandspotentialet befinder sig i det overliggende moræneler.



Figur 56. Pejleserie i boring 218.343 ved Lille Heddinge på Stevns, som hører til det Nationale Pejlestationsnet (fra GEUS Jupiter database, 2013).

Boringen 218.343 hører til det Nationale Pejlestationsnet med en pejleserie tilbage til 1948 (Figur 56). Boringen ligger på det sydlige Stevns lige nord for Lille Heddinge i kote + 24,91 m. Der er gennemboret 8 m moræneler, der ligger ovenpå grundvandsmagasinet af Danien Bryozokalk. Grundvandspejlet er spændt og ligger i moræneleret med en variation mellem lige under terræn til ca. 3 m under terræn. Der ses særlig lav grundvandstand i de tørre år 1975-1976 og 1996, som slår igennem 3-4 år efter. Den stigende nedbør de sidste 100 år (Figur 57), herunder også på Stevns giver umiddelbart kun en svag stigning i grundvandsstanden (Thorling et al., 2013), hvilket også vil forventes i et lerområde, hvor megen overskudsnedbør strømmer af overfladisk, i overfladesandlag og i dræn (Gravesen et al., 1992, Roosmalen et al., 2007). Relationerne mellem grundvandspejl og moræneler over kalkmagasin forventes at være meget ensartede indenfor Stevns området, og en lignende variation i grundvandsstanden er derfor sandsynlig.



Figur 57. Nedbørsfordeling fra 1874 til 2012 i Danmark, som viser en stigende tendens fra ca. 650 mm i 1874 til ca. 750 mm i 2012 (Fra DMI's Hjemmeside, 2013).



Figur 58. Stevns Kalkbrud ved Sigerslev set mod vest. Forrest ses skrivekridtet og i baggrunden det 8 m tykke morænelerlag, som ligger ovenpå på skrivekridtet (Foto: Merete Binderup).

Inden for området ligger GRUMO-område Store Heddinge (35.13), hvor udvikling i grundvandsmængde og grundvandskvalitet følges (GEUS, 2012). GRUMO området ligger øst for Store Heddinge by. Der er udarbejdet en grundvandsmodel for området bl.a. på grundlag af pejletidsserier for grundvandspotentialiet i Københavns Energis boringer (Storstrøms Amt, 2003). Potentialiet ligger omkring Store Heddinge i kote + 30-35 m og dermed tæt under terræn. Grundvandstrømningen radierer herfra mod lavere-liggende områder både ved Østersøen og åerne. Vandindvindingen til Store Heddinge Vandværk dominerer området, men en sænkning af grundvandsspejlet kan vanskeligt registreres omkring vandværket, antagelig på grund af den høje grundvandstrøm i det højtydende magasin.

9.2.3 Lertykkelser

Kortet over områdets lertykkelser er baseret på 683 boringer fra Jupiter databasen på GEUS (Figur 59). Der er kortlagt moræneler (ML) og smeltevandsler (DL) fra terræn til det regionale kalkmagasin, som består af Danien bryozokalk (BK) og Maastrichtien skriveskridt (SK). Lertykkelsesvariationen er kortlagt i intervallerne 0-5 m, 5-10 m, 10-15 m og 15-31 m. Interpolationen og kontureringen er foretaget med programmet Xtools.

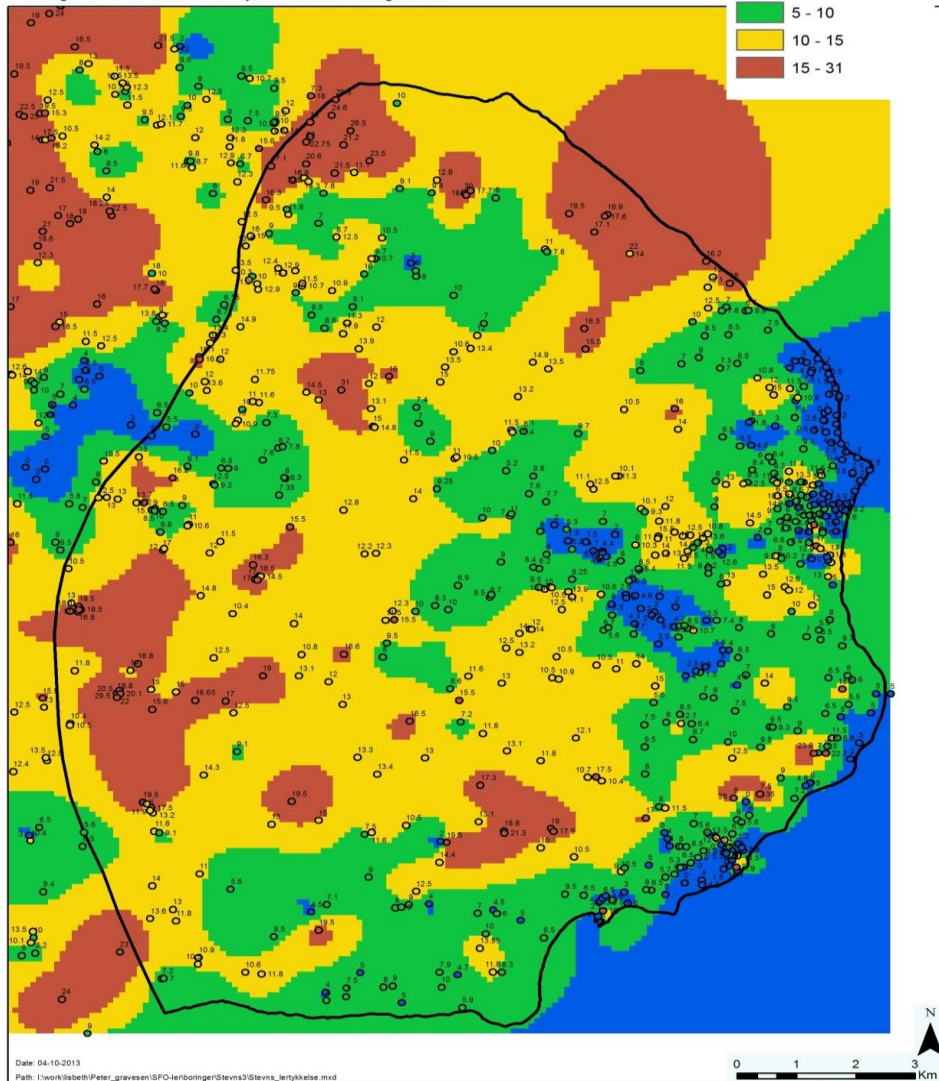
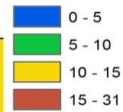
De største tykkelser over 15 m er beskedent udbredt og findes især i områdets udkant. Store dele af området har tykkelser mellem 10 m og 15 m. Tykkelser mellem 5 m og 10 m findes langs kysten og mod nordvest omkring Store Heddinge. Tykkelser mellem 0 og 5 m ses også ved kysten og omkring Store Heddinge.

Geofysiske målinger er ikke anvendt til at fremstille kortet.

Boringer der ligger til grund for gridet er hvor der er "ml", "ll", "mll", "dl", "di", "l", "x", "b" eller "m" over "bk", "kk", "lk", "k", "sk" eller "zk". Boringen er med uanset hvor tykt et x, b eller m lag der er.

Stevns

Lertykkelse i meter



Figur 59. Kort over lertykkelser inden for Stevns området.

9.2.4 Lokalteter: Leregnskaber og makroporer

Nedenfor er de tre lokaliteter i Stevns området kortfattet gennemgået med fokus på makroporer og redoxforhold. Flere detaljer kan findes i Bilag 4.

Højstrup lokaliteten

Egenskaber

Området ved Højstrup befinder sig i samme geomorfologiske landskabstype som Gjorslev og Sigerslev nemlig morænefladen. Den geologiske lagfølge i området er stort set identisk med Gjorslev med moræneler overlejrende bryozokalk og med stedvise små sandlinser indlejret i moræneleret.

Til belysning af områdets geologiske opbygning er der udført en ca. 10 x 10 m stor og 5 m dyb udgravning morænefladen (Figur 60). Ydermere blev der udført en lang række nedslivningstests (Rosenbom et al., 2009), samt installeret en stor mængde borer ned til kalkoverfladen i forbindelse med en undersøgelse af sandlinsers fordeling i moræneler (Pedersen, 2004). Endelig er der udført omfattende geofysisk opmåling af området.



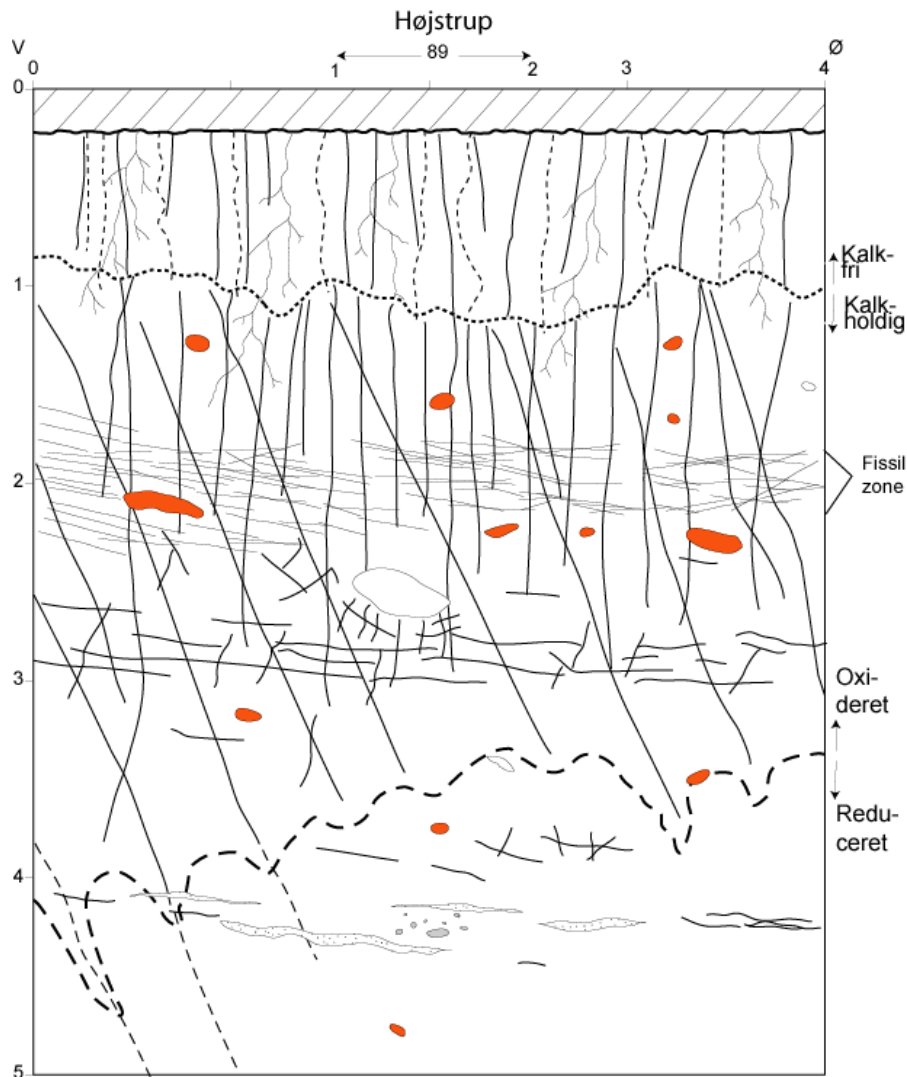
Figur 58. Udgravning ved Højstrup (Foto: K.E.S. Klint).

Under en tynd muldhorisont træffes kalkfrit moræneler til ca. 1 m's dybde, hvorefter moræneleret er kalkholdigt. Den oxiderede zone med gulbrunt moræneler strækker sig til mellem 3,5 m og 4 m's dybde, hvorunder det grå reducerede moræneler findes til ca. 5 m's dybde. Selve grænsen, redoxgrænsen, er uregelmæssig (Figur 61). Der er ca. 12 m moræneler ovenpå kalken i området (se yderligere i bilag 4).

Makroporer

Der optræder mange rodgange og regnormehuller i den øverste meter (300-500 m² i 75 cm dybde) aftagende fra ca. 1 – 1,4 m under terræn. I den øverste del og aftagende ned til ca. 2 m's dybde optræder vertikale udtørringssprækker med tilfældig strygning, ellers dominerer to sprækkesystemer området (Figur 61).

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 afstand (spacing) på ca. 12 cm i 2 m's dybde voksende til ca. 50 cm i 4 meters dybde og ca. 2 m i 5 m's dybde.
2. System 2 består af horisontale/subhorisontale sprækker med vekslende spacing. Specielt imellem 1,8 m og 2,3 m's dybde optræder disse sprækker meget tæt med spacing på 1-4 cm. Længere nede øges spacingen til 2-8 cm og under 3,7 m er moræneleret stort set massiv bortset fra enkelte lodrette sprækker og tynde horisontale sandlinser, der især findes i 4 m's dybde.



Figur 61. Tværprofil ved Højstrup med makroporer og redoxforhold (Fra Klint, 2004).

Gjorslev lokaliteten

Egenskaber

Området omkring Gjorslev er domineret af en udstrakt svagt bølget moræneflade med 7 til 15 m moræneler direkte overlejrende primært opsprækket bryozokalk. Til belysning af områdets geologiske opbygning er der udført en ca. 8 x 9 meter stor og 4.5 meter dyb udgravning, hvori der foretoges opmåling af den geologiske lagserie, sprækkefordeling og indsamlet prøver til diverse hydrauliske, texturelle og strukturelle opmålinger.

Under et tyndt muldlag træffes ca. 1 m tykt kalkfrit ler. Nedad er moræneleret kalkholdigt og gulbrunt i den oxiderede zone til ca. 4 m's dybde, hvorunder der findes reduce-

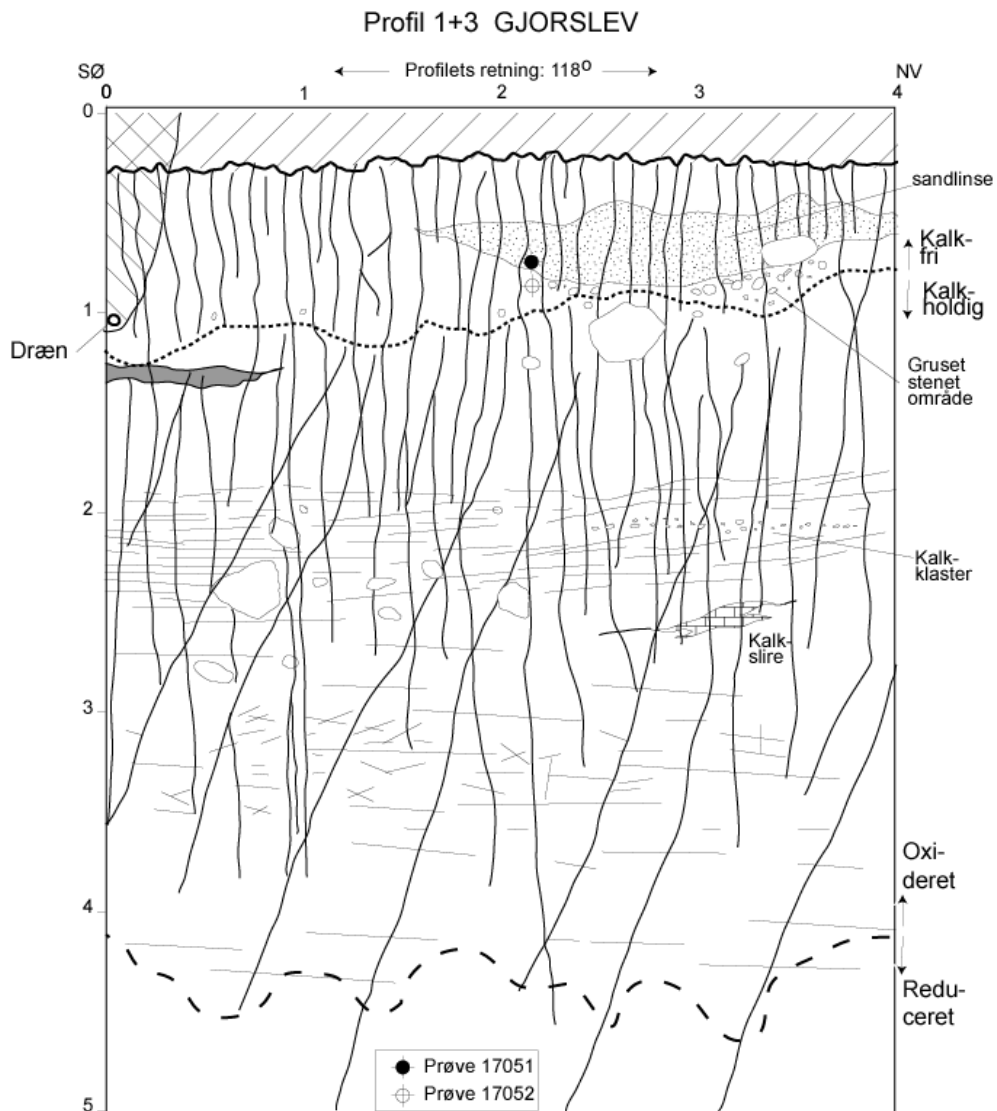
ret gråt moræneler til ca. 5 m's dybde. Redoxgrænsen har et uregelmæssigt forløb (Klint, 2004). Der er en del kalkklaster og - slirer i moræneleret (se også bilag 4).

Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshearede kalkslirer 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). Der findes muligvis to baltiske tills overlejrende hinanden i stil med stratigrafien i Sigerlev og Højstrup.

Makroporer

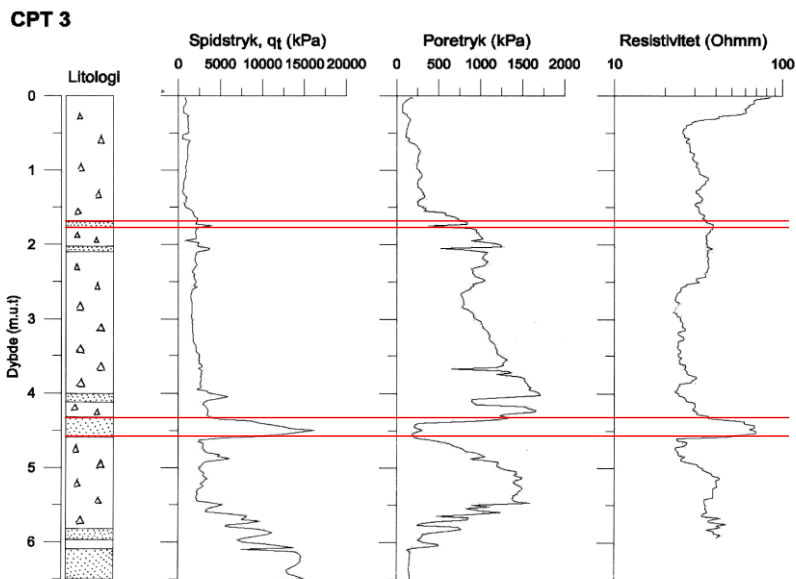
Der optræder mange rodgange og regnormehuller i den øverste meter (300-500 m² i 75 cm dybde) aftagende fra ca. 1 – 1,2 m under terræn. I den øverste del og aftagende ned til ca. 2 m's dybde optræder vertikale udtørningsprækker med tilfældig strygning, ellers dominerer to sprækkesystemer området (Figur 62).

1. System 1 består af systematisk orienterede stejlthældende 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 afstand (spacing) på ca. 10 cm i 2 m's dybde voksende til ca. 50 cm i 4 m's dybde og ca. 1,5 m i 5 m's dybde.
2. System 2 består af horisontale/subhorisontale sprækker med vekslende spacing. Specielt imellem 1,8-3,5 m's dybde optræder disse sprækker meget tæt med spacing på 1-4 cm. Imellem 3,5 og 4 m's dybde øges spacingen til 4-10 cm, og under 4 m er moræneleret stort set massivt med få dybe sprækker.

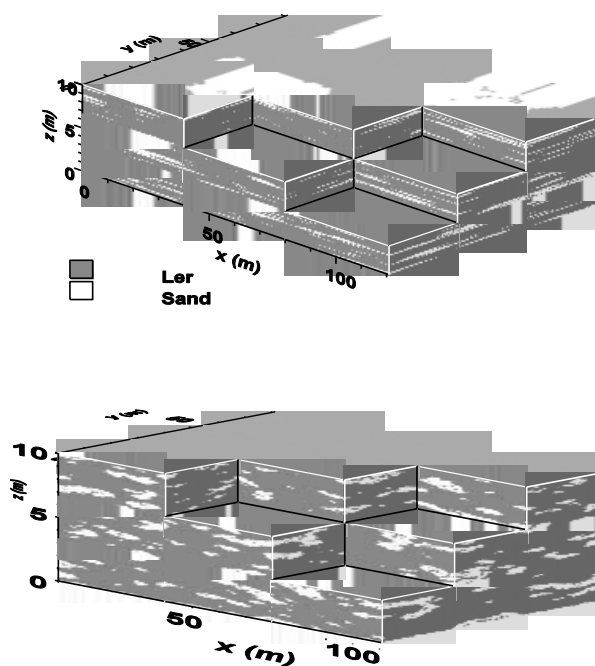


Figur 62. Makroporefordeling og redoxzoner i profil fra Gjorslev. (Fra Klint, 2004).

I forbindelse med undersøgelse af sandlinser i moræneleret ved i Højstrup, blev der udført en række CPT boringer (Nilsson & Pedersen, 2004, Pedersen, 2004), hvor det ved hjælp af CPT parametrene var muligt at indtolke sandlinser i det ellers ensartede moræneler (Figur 63). Sandlinser i moræneler fra både udgravning og CPT-boringer er blevet modelleret, og modellen viser de mulige sandlinser i tre dimensioner (Figur 64)(Nilsson & Petersen, 2004, Petersen, 2004),



Figur 63. Et eksempel på logmønstre for de tre CPT parametre (spidstryk, poretryk og resistivitet), hvor sandlinser/lag (eksempler ses afgrænset ved røde streger) er tolket som indslag i moræneleret (Fra Nilsson & Petersen, 2004).



Figur 64. Konditioneret simulering af sandlinser (sorte) 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).

Sigerslev kalkgrav lokaliteten

Egenskaber

Ved Sigerlev kalkgrav er der i forbindelse med en undersøgelse af sand/kalk linser fordeling i moræneler udført en opmåling af den geologiske lagserie ovre kalken i kalkgraven (se figur 65).

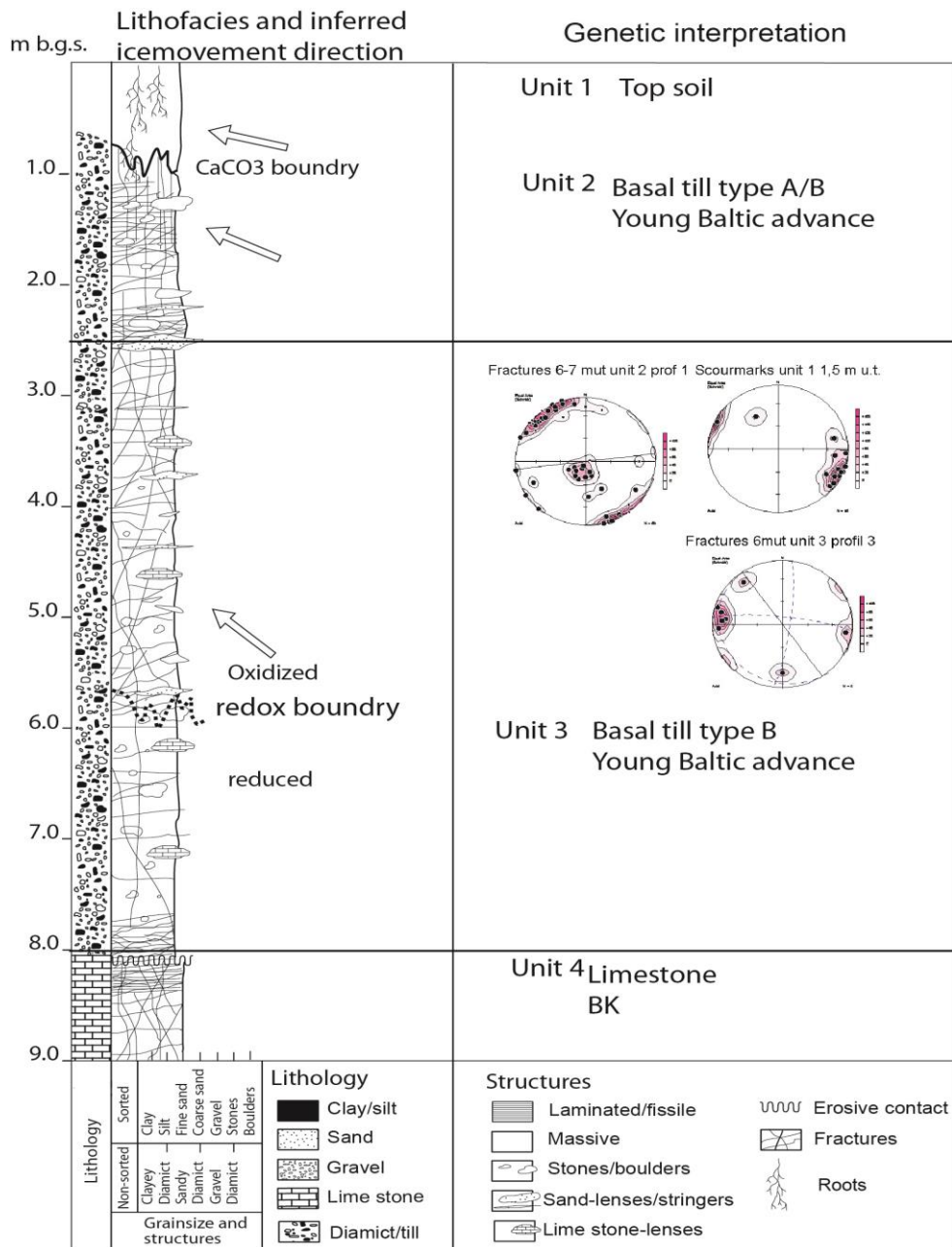
Området omkring Sigerslev kalkgrav er domineret af udstrakt svagt bølget moræneflade med 6 m til 9 m moræneler direkte overlejrende primært opsprækket bryozokalk. Til belysning af områdets geologiske opbygning og for registrering af sand/kalklinser blev der afrenset et ca. 40 meter langt profil i gravens sydlige del, samt et mindre profil vinkelret herpå. Der opmålte en lithologisk log og udført fabric/skurestribe analyse samt opmålt sprækker i to profiler.



Figur 65. Oversigt over profil 1 i Sigerslev kalkgrav. Bemærk farveskift imellem den øvre till enhed samt redoxgrænsen midt i profilet.

Under muldlaget er der oxideret olivenbrunt moræneler til 5,7 m's dybde, som afløses af reduceret olivengråt moræneler til 8 m's dybde. Herefter træffes Danien kalk (se også bilag 4).

Der ses en signifikant orientering af skurestriber med en fortrukken orientering ØSØ-WNW. 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 ØSØ imod WNV. Moræneenheden er generelt middel til svagt konsolideret. Moræneleret er derfor klassificeres som en basal till type A/B (Klint, 2001)(Figur 66).



Figur 66. Lithologisk log med sprækker og redoxforhold fra Sigerlev.

Makroporeforhold

Moræneleret optræder som en markant, massiv, velkonsolideret moræneler med store kalklinser og stedvise sandlinser indlejret i moræneleret, og der optræder talrige lodrette og horisontale sprækker. Enheden findes hele vejen ned til kalkoverfladen ca. 8 m under terræn. Omkring 5-6 m under terræn skifter moræneleret farve fra olivenbrun til olivengrå, men der er ellers ingen synlige markante forskel i matrix, mens sprækkemængden aftager. Der blev opmålt ca. 35 sprækker ca. 6-7 m under terræn, og der ses en markant orientering af stejlt hældende konjugerende sprækker med en NØ-SV retning.

Ud fra sprækkernes orientering tolkes disse dannet enten som extensionssprækker af et isfremstød fra NØ eller som konjugerede shearsprækker fra et isfremstød fra SØ. Sammenholdt med den generelle hældning af kalklinser imod sydøst er enheden tolket som en baltisk till, afsat af et isfremstød fra SØ. Fremstødet korreleres til en tidlig fase af det Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987).

9.2.5 Redoxforhold i leraflejringerne

Den sjællandske morænelersaflejringer kan karakteriseres ved række kemiske parametre ned gennem den umættede zone til grundvandsspejlet og grundvandsmagasinet (Ernstsen, 1990, Ernstsen & Rosenberg, 2004). (se afsnit 4).

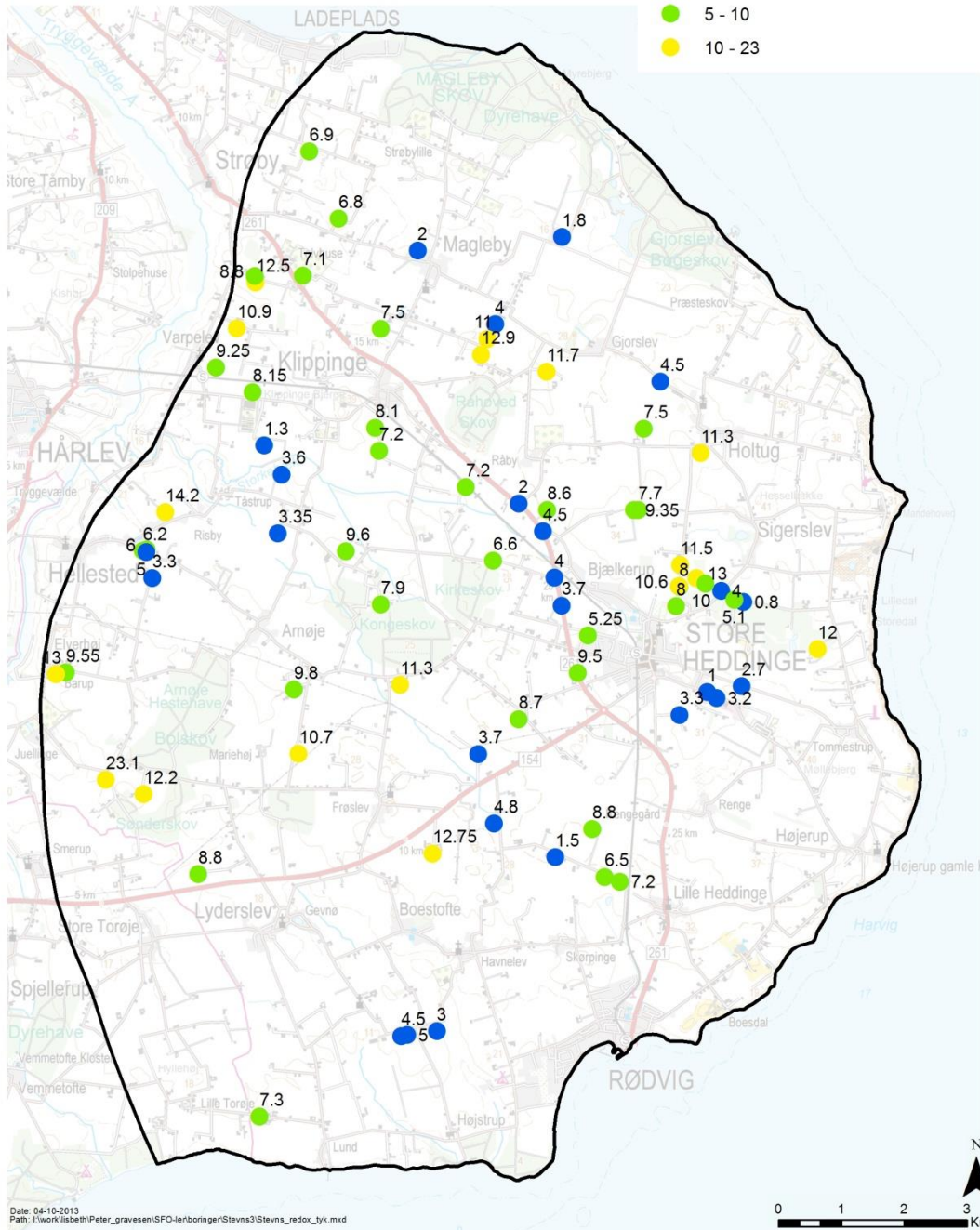
Redoxforholdene er undersøgt på de tre lokaliteter på Stevns. For at analysere de regionale forhold på Stevns halvøen er data fra Jupiter databasen anvendt. Leraflejringer fra den oxiderede zone har gule, brune og gulbrune farver, mens de i den reducerede zone er grå, olivengrå eller grøngrå. Ud fra de geologiske beskrivelser fra boringer er det muligt at udsøge data om tykkelserne af de oxiderede og reducerede zoner. For geologiske boringsdata, som er indlæst i Jupiter databasen før ca. 1985, kan dette kun ske ved at gennemgå borejournaler og beskrivelser manuelt, da farvedata for prøverne ikke er blevet indlæst. Fra slutningen i 1980'erne er boreprøvernes farver indlæst i databasen, og kan derfor udtrækkes fra databasen (se figur 67)(Gravesen & Fredericia, 1984).

De viste borer er dem hvor der udelukkende er "ml", "l", "mi", "dl", "di", "i", "x", "b" eller "m" hen over "bk", "kk", "lk", "k", "sk" eller "zk" og hvor der er farveangivelse på lerlaget. Borer med x, b eller m i toppen er med uanset lagets tykkelse. Farverne "olgå", "loigå", "molgå", "bugå", "lbugå", "mbugå", "gå", "lgå", "mgå", "bgå", "gugå", "lgugå", "higå" og "lgøgå" regnes for reduceret. Tykkelsen er top af kalken minus top af første reducerede lerlag.

Stevns

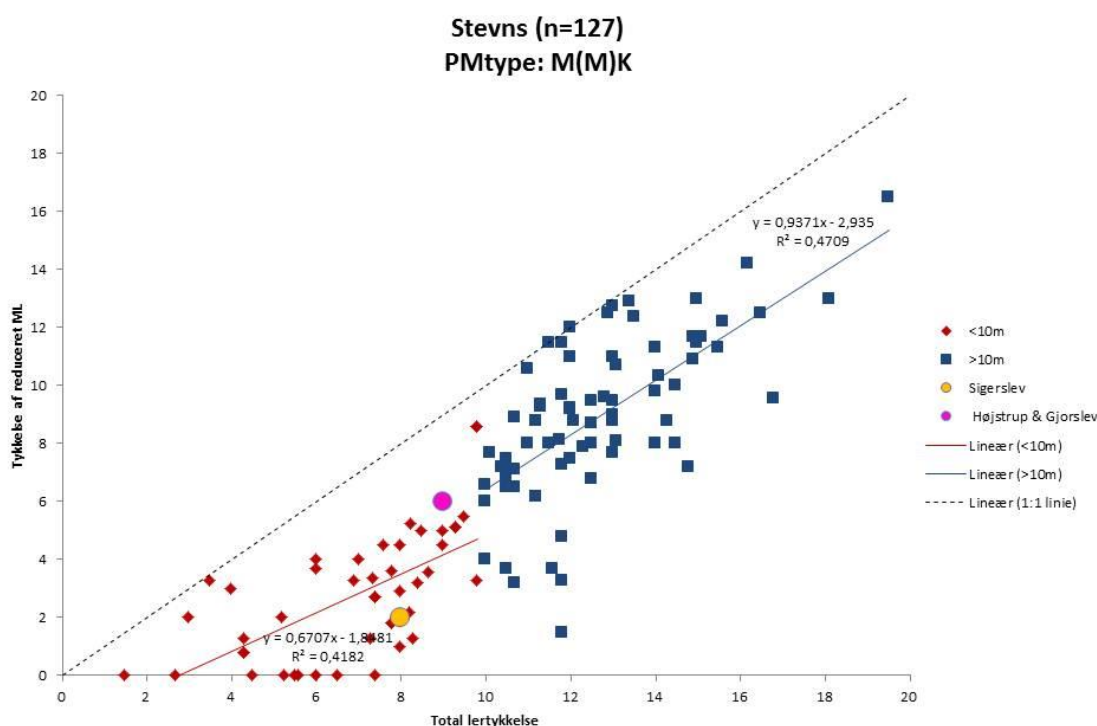
Reduceret lertykkelse i meter

- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 23



Figur 67. Kort der viser fordeling af borer med reduceret lertykkelse på basis af registrerede farveforhold fra boreprøver i udsøgte borer fra Jupiter databasen.

Der er udarbejdet et plot, der viser sammenhængen mellem den totale tykkelse af moræner ovenpå kalken mod tykkelsen af den reducerede andel af moræneleret (Figur 68). De to parametre er fundet ud fra data fra de tre feltlokalteter Højstrup, Gjorslev og Sigerslev og fra 127 borerer fra Jupiter databasen. Metoden til at bestemme tykkelser er beskrevet i afsnit 9.2.3. Boringerne er udvalgt ud fra følgende kriterier: 1. Boringer udtrukket fra databasen på grundlag af farvekoder for ler, 2. Boringer med grundvandskemiske analyser, hvor der kunne foretages beregning af vandtype/redoxklasse, 3. Boringer hvori der er fundet pesticider over den tilladte grænseværdi i grundvandet.



Figur 68. Diagram som viser fordeling af den totale lertykkelse i forhold til den reducerede lertykkelse.

Der er valgt at markere borerer med mindre end 10 m's lertykkelse fra borerer med større tykkelse. Dette skyldes, at den største dybde hvor der er fundet dybe sprækker i Stevns området, er ved Sigerslev, hvor de kan følges til 8 m's dybde for at ende på kalkoverfladen. Dette kan ikke betragtes som den maximale dybde, men erfaringer fra et stort antal feltlokalteter tyder på, at sprækker de fleste steder på Sjælland er ganske få eller forsvinder omkring 10 m's dybde, selv om dette ikke direkte er påvist (Klint, 2001, 2004, 2009, Klint & Jakobsen, 1997, Klint & Gravesen, 1999, Nilsson & Klint,

2009). Ud over sprækkesystemerne betyder mange små tynde sandlinser i moræneleret også en del for det samlede makroporesystem.

Dannelse af sprækker og sandlinser er en fysisk proces, som sker ved gletsjeres bevægelser og aflejring af moræneler samt ved udtørring, mens dannelse af redoxzoner i aflejringerne er en geokemisk proces, som startede da den sidste gletsjeris smeltede væk fra Danmark for ca. 11.700 år siden. Ilt og iltende stoffer har bevæget sig nedad (i luft eller opløst i vand) i morænelerslagene og dannet det gulbrune oxiderede moræneler, som er adskilt fra det grå reducerede moræneler ved aflejringerens redoxgrænse. Hvis den oxiderede zone er op til 3,5 m tyk kan denne proces være sket udelukkende gennem aflejringerens matrix (dvs. uden makroporetransport) med en gennemsnitlig hastighed på ca. 0,3 mm pr år, som er beregnet efter Robertson et al.(1996).

Moræneler i Danmark har mange lighedspunkter med moræneler i Canada (Robertson et al., 1996), og der peges på, at i nitratbelastede områder kan denne nedadgående bevægelse tænkes at have været hurtigere.

Grænsen varierer ofte en del i dybden, hvilket tyder på forskellige hastigheder. Der er imidlertid ikke taget højde for makroporerens betydning, som kan forårsage en større hastighed og mere varieret billede. Fotoet fra Gedser (Figur 11) viser, hvordan iltning kan ske ned langs sprækkerne, samtidig med at processen også foregår i matrix oppefra og ud fra makroporerne. Disse forhold kendes f.eks. også fra andre lokaliteter i Danmark og fra Canada (Lindhardt et al. 2001, McKay & Fredericia, 1995). Derudover kan ydre faktorer påvirke redoxzonens beliggenhed (Se under Hedeland området).

Figur 68 viser derfor, hvordan ilt og nitrat i matrix og makroporer kan have medvirket til udviklingen af den oxiderede/reducerede zone ned til 10 m's dybde. I en række tilfælde er der ingen (0 m) reduceret zone i moræneler op til 7 m samlet lertykkelse, hvilket svarer til en bevægelse af redoxgrænsen på i gennemsnit på mindst 0,6 mm pr. år siden istiden. Til dette skal tilføjes at feltundersøgelser viser, at selv ved tykkelse af den reducerede zone på op til 3 m er der flere eksempler på, at zonen kan være gennemskåret af sprækker (Klint et al., 2013).

Over 10 m's samlet lertykkelse er der - med udtagelser - *kun omkring 3 m reduceret tykkelse med sprækker*, og den reducerede lertykkelse vokser med voksende total lertykkelse.

9.2.6 Redoxforhold i grundvandet (Ilt - og nitratindhold)

De eksisterende grundvandskemiske data fra kalkmagasinet under morænelerslagene i boringer er analyseret og henført til iltnings/reduktionsforhold, redoxklasse og grundvandstype (Tabel 8). Tidsserierne er tolkede vedrørende landbrugspåvirkning og iltningforhold i de udvalgte grundvandsindtag på Stevns. Analysedata fra før 1989 er ikke medtaget.

Iltningforholdene er i denne undersøgelse opdelt i 6 klasser:

Kraftigt iltende (KI), Svagt iltende (SI) samt Iltende (I) (hvor det ikke har kunnet afgøres om det er kraftigt eller svagt) og tilsvarende:

Kraftigt reducerende (KR), Svagt reducerende (SR) samt Reducerende (R) (hvor det ikke har kunnet afgøres om det er kraftigt eller svagt).

De grundvandskemiske data er klassificeret i overensstemmelse med Hansen et al. (2009) og kun analyser, der kan bestemmes entydigt er medtaget, og det betyder, at f.eks. blandingsvand ikke indgår. Iltzonen er specielt karakteriseret ved, at den ud over ilt indeholder nitrat i koncentrationer, der svarer til udvaskningen fra rodzonen. Dybere nede i grundvandet findes den anoxiske nitratreducerende zone. I den anoxiske nitratreducerende zone er nitrat under omsætning, og nitratkoncentrationerne er derfor lavere end den oprindelige udvaskning fra rodzonen. Det dybeste reducerede grundvand opdeles i den svagt og stærkt reducerede zone, hvor både ilt og nitrat er omsat, og grundvandskvaliteten i stadigt større grad er påvirket af lokale geokemiske og hydrogeologiske forhold.

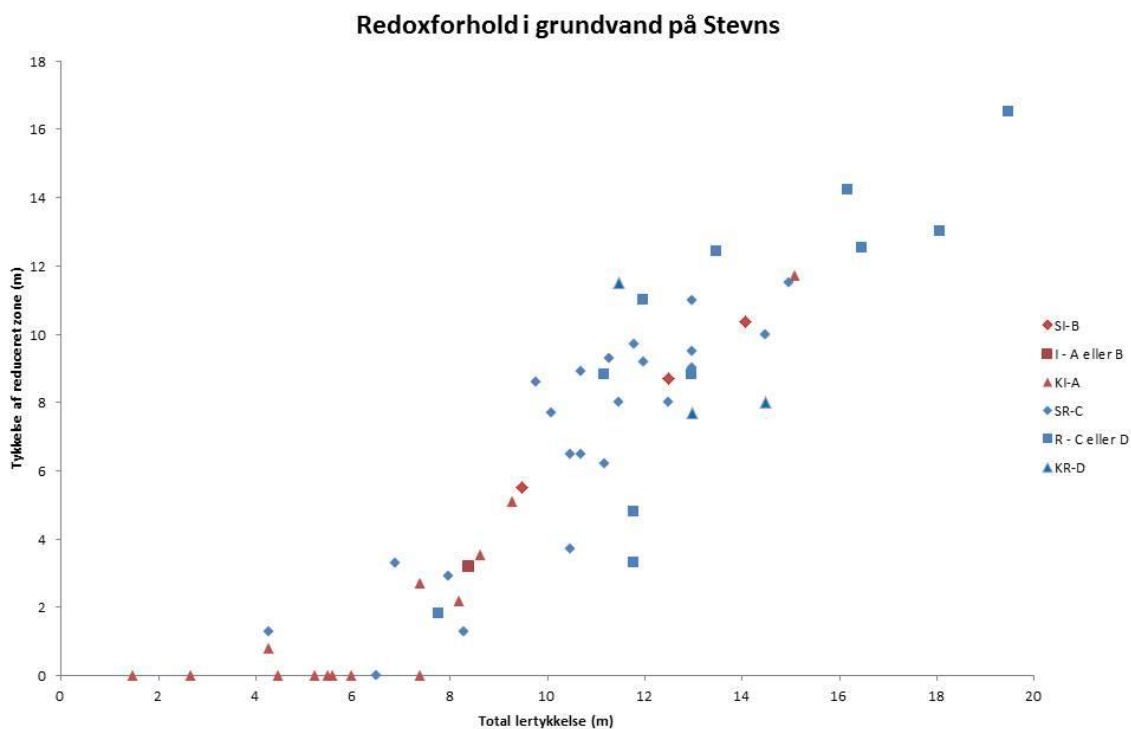
Beskrivelse af grundvandet	Vandtype	Zone i magasinet	Kemiske karaktertræk i grundvandet
Iltholdigt/iltet	A	Iltzone	$O_2 > 1 \text{ mg/l}$
Anoxisk nitratholdig	B	Anoxisk nitratreducerende zone	$NO_3 > 1 \text{ mg/l}$ og $O_2 \leq 1 \text{ mg/l}$
Svagt reduceret	C	Jern/Sulfat reducerende zone	$NO_3 \leq 1 \text{ mg/l}$, $O_2 \leq 1 \text{ mg/l}$ og $SO_4 > 20 \text{ mg/l}$
Stærkt reduceret	D	Metan zone	$NO_3 \leq 1 \text{ mg/l}$, $O_2 \leq 1 \text{ mg/l}$ og $SO_4 \leq 20 \text{ mg/l}$

Tabel 8. Vandtyper opdelt efter redoxforholdene i grundvandet (Hansen m.fl., 2009).

I udgangspunktet har vandtypebestemmelserne således fulgt Geovejledning nr. 6,, Tabel 1 (Hansen et al., 2009).

En gennemgang af analyser af den uorganiske kemi i grundvandet i området førte således frem til en opdeling i seks redoxgrupper og klassificering i fire redoxklasser/ vandtyper, som anvendes ved grundvandsovervågning. Redoxgrupper og Vandtyper/ redoxklasser er kombineret og sammenholdt med den totale lertykkelse og den reducerede lertykkelse.

Der er 38 boringer, hvor ilt og nitrat findes i grundvandsmagasinet, og hvis disse sammenholdes med oxidations og reduktionsforholdene i leraflejringerne (Figur 69), viser det sig, at i 53 % af boringerne er der kun oxideret ler over magasinet, Lerlagene må antages for at være uden beskyttelsesmæssig betydning og er gennentrængelige for hurtig transport af nedsivende vand med pesticider og andre stoffer.



Figur 69. Diagram som viser total lertykkelse i forhold til tykkelse af reduceret ler fordelt på redoxforhold og redoxzoner.

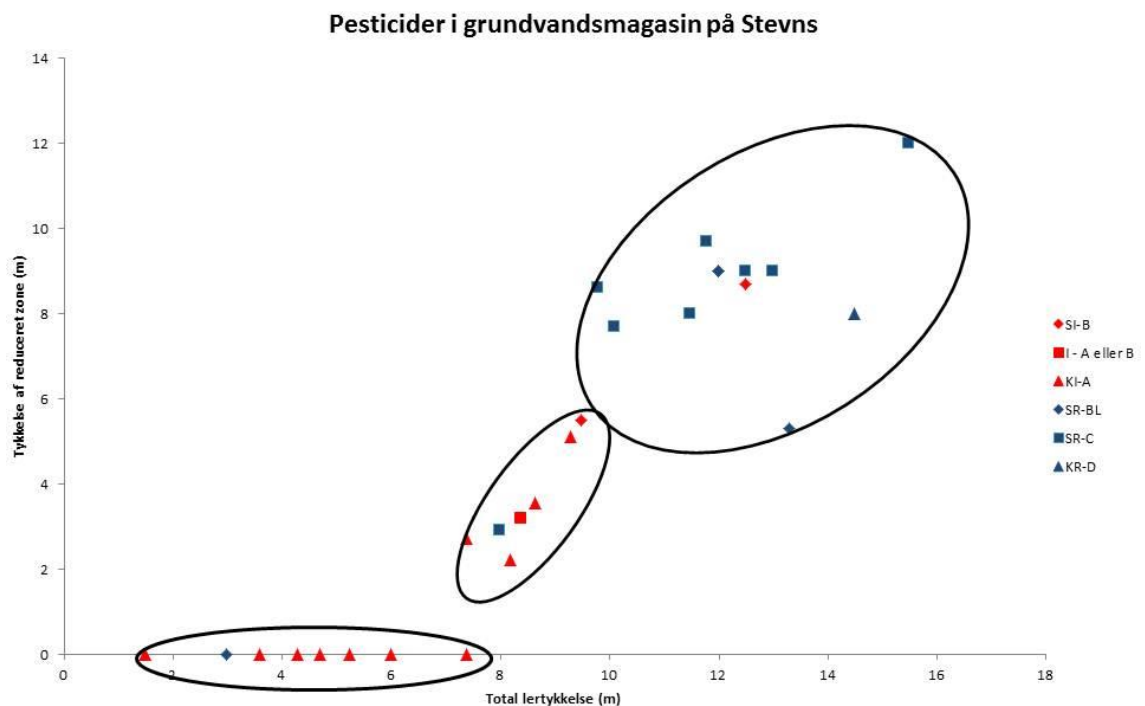
Figur 69 viser, at de iltede grundvandstyper, herunder de kraftigt iltede især forekommer, hvor den reducerede zone er mellem 0 m og 10 m samlet lertykkelse, men der

forekommer også svagt reduceret grundvand i dette interval. Over 10 m's lertykkelse dominerer reducerede grundvandsforhold, såvel kraftigt reduceret som svagt reduceret .

9.2.7 Pesticidfund i borer

I afsnit 7 er de generelle pesticidforhold på Stevns gennemgået.

Der er udarbejdet et plot, som viser de borer, hvor der er fundet pesticider over grænseværdien i grundvandet fordelt på vandtyper/redoxklasser og i forhold til total lertykkelse og reduceret lertykkelse (Figur 70). Boringerne fordeler sig i tre grupper.



Figur 70. Diagrammet viser de borer, hvor der er fundet pesticider over grænseværdien i grundvandet fordelt på vandtyper/redoxklasser og i forhold til total lertykkelse og reduceret lertykkelse.

En gruppe på x-aksen er karakteriseret ved, at moræneleret udelukkende er oxideret i helt op til 7,5 m's tykkelse samtidig med at grundvandet er kraftigt iltet. En gennemgang af placeringen af de indtag, hvorfra grundvandsprøverne blev udtaget, viser, at de

sidder lige under morænelerslagets underside eller max. 1-2 m under. Dette kan tyde på, at transport af pesticider kan være sket ved bevægelse gennem makroporerne i den oxiderede moræneler til grundvandet antagelig på grund af voldsomme regnskyl med hurtig og kraftig nedsivning, hvorfor en binding eller nedbrydning af pesticiderne under de iltede forhold kun har haft begrænset effekt for tilbageholdelsen. Dette er mest sandsynligt situationen ved morænelerstykkelser på et par meter.

En anden gruppe viser overvejende reducerede forhold under lertykkelser på op til 16 m og tykkelsen af den reducerede zone på mindst 6 m. Der er en betydelig afstand mellem undersiden af lerlaget og grundvandsfilteret. Disse pesticidfund er det vanskeligt at forudsige transportvejene for, og det kræver et indgående lokalkendskab for at fremkomme med sandsynlig spredningsmodel herfor.

Den tredje gruppe, som ligger mellem de to andre, har især iltet vand, men også svagt reduceret. I de prøver, hvor der er under 3 m reduceret ler og filteret sidder lige under morænelerets undergrænse kan pesticiderne være tilført gennem transport gennem makroporer. Hvordan mekanismen for de sidste iltede prøver har været med op til 6 m reduceret leret, kan ikke besvares umiddelbart.

9.2.8 Sammenfatning

Stevns området indeholder tre feltlokaliteter: Højstrup, Gjorslev og Sigerslev, som overlejrer et kalkmagasin. Makroporer gennemsætter næsten altid moræneler på lokaliteterne, og på Sigerslev lokaliteten når de helt ned til kalken. Makroporerne omfatter bioporer, sprækker og sandlinser, der, hvis de udgør et samlet transportnetværk, kan føre vand og pesticider til grundvandet. I nogle tilfælde kan særligt store og dybe sprækker alene fungere sådan. Transport gennem matrix i moræneleret forgår også men almindeligvis langsommere.

Antallet af makroporer aftager ned gennem den oxiderede zone i moræneleret mod redoxgrænsen. Redoxgrænsen ligger omkring 4 m til 6 m's dybde selv om dybereliggende redoxgrænser er registreret ned til 7-8 m. Enkelte sprækker kan nå ned til 10 m dybde i det reducerede moræneler, hvor de må forventes at ophøre. Små sandlinser kan også forsætte nedad i det reducerede moræneler.

Redoxgrænsens beliggenhed og dannelse synes at hænge sammen med udbredelsen nedad af makroporerne, da de fleste ophører ved denne grænse. Oxidationen har også

forgået i matrix, men måske især i makroporerne, hvilket ses af de jern- og manganoxiderede "halos" omkring sprækker i det reducerede moræneler.

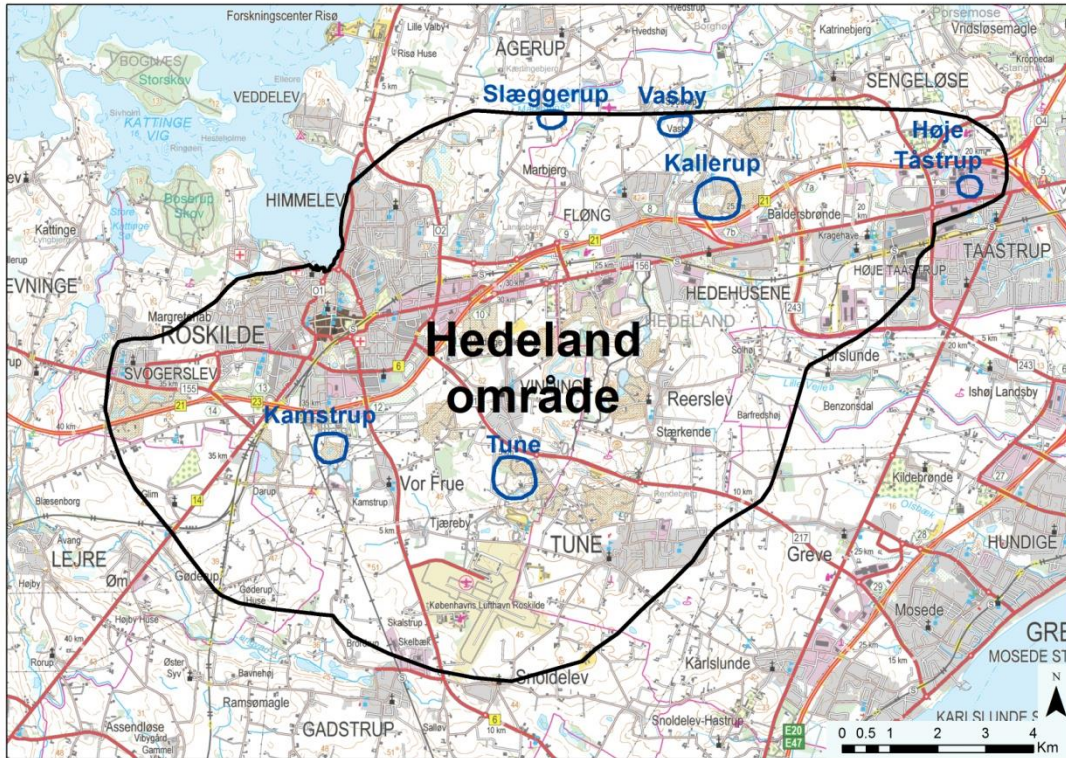
Tilstedeværelse af pesticider i grundvandet i Stevns området viser, at dele af området er følsomt for udvaskning.

9.3 Hedeland området

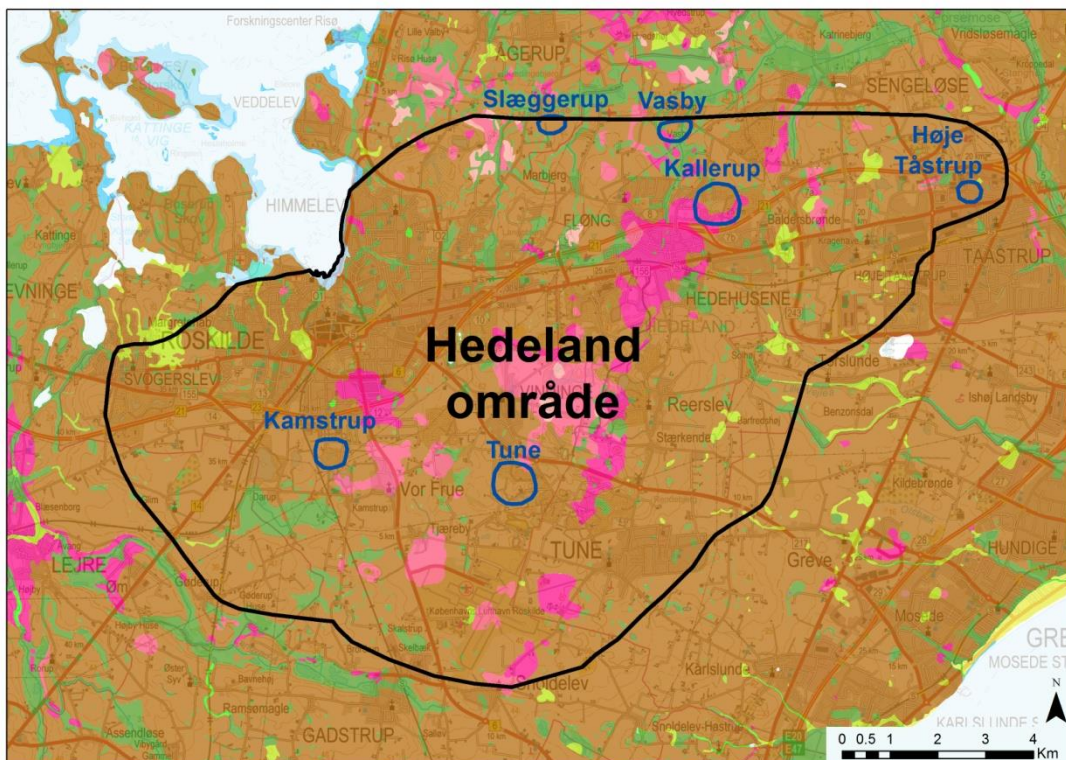
Inden for Hedeland området, der ligger mellem Roskilde og København, findes en udbredt moræneflade, hvor moræneler ligger ovenpå smeltevandsand- og grus (Hedeland Formationen). Under denne formation findes ofte yderligere morænelers - og smeltevandssandlag inden Danien kalken nås. Der findes seks lokaliteter med opmålingsdata, mange boringer samt nogen geofysik. Slæggerup er en tidligere VAP lokalet, som nu er nedlagt, mens Kamstrup, Tune, Kallerup, Høje Tåstrup og Vadsby lokaliteterne har GEUS undersøgt gennem de sidste 10 år i forbindelse med forsknings-, undervisnings- og rådgivningsopgaver.

Morænelersfladen ligger overvejende i i kote + 30-50 m, men der findes flere terræn niveauer. Området gennemskæres af flere vandløb som Baldersbæk, Lille Vejleå og Maglemose å. Området er præget af de store grusgrave ved Hedehusene, hvoraf nogle stadig udnyttes, mens andre er blevet genetableret og udnyttes til andre formål (Figur 71).

Området følger klassifikation efter Klint et al., 2013, som er en ondulerende moræneflade på sandmagasin. M (M) S (se afsnit 11).



Figur 71. Hedeland området omkring og øst for Roskilde.



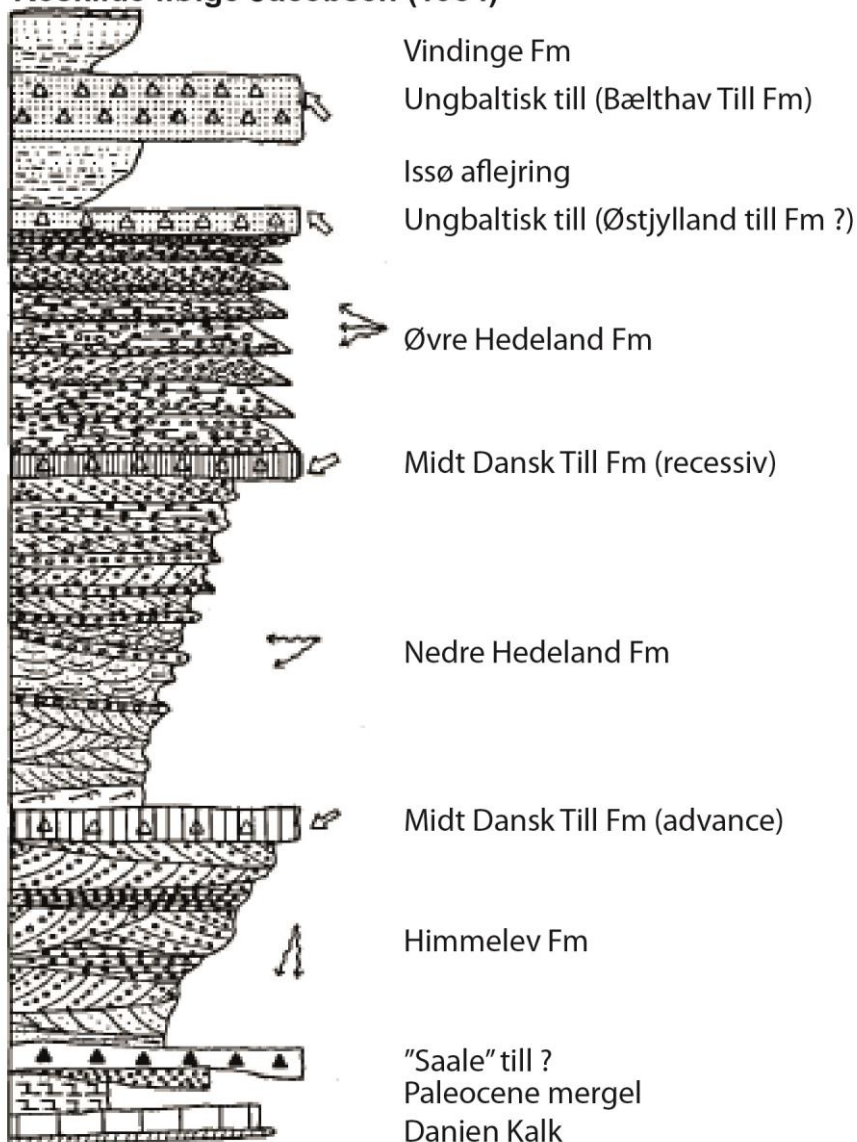
Figur 72. Kort over de geologiske lag i 1 m's dybde. Moræner (brun) dominerer området, men større områder med smeltevandssand- og grus er også til stede (rød/lyserød). Post-

glaciale ferskvandsaflejringer er vist med grønt. Enkelte områder med smeltevandsler er markeret med olivengul)(GEUS, 2013).

Det geologiske kort viser, hvorledes moræneler er vidt udbredt men også, at i en del af området når sand og grus op til terrænoverfladen (Figur 72).

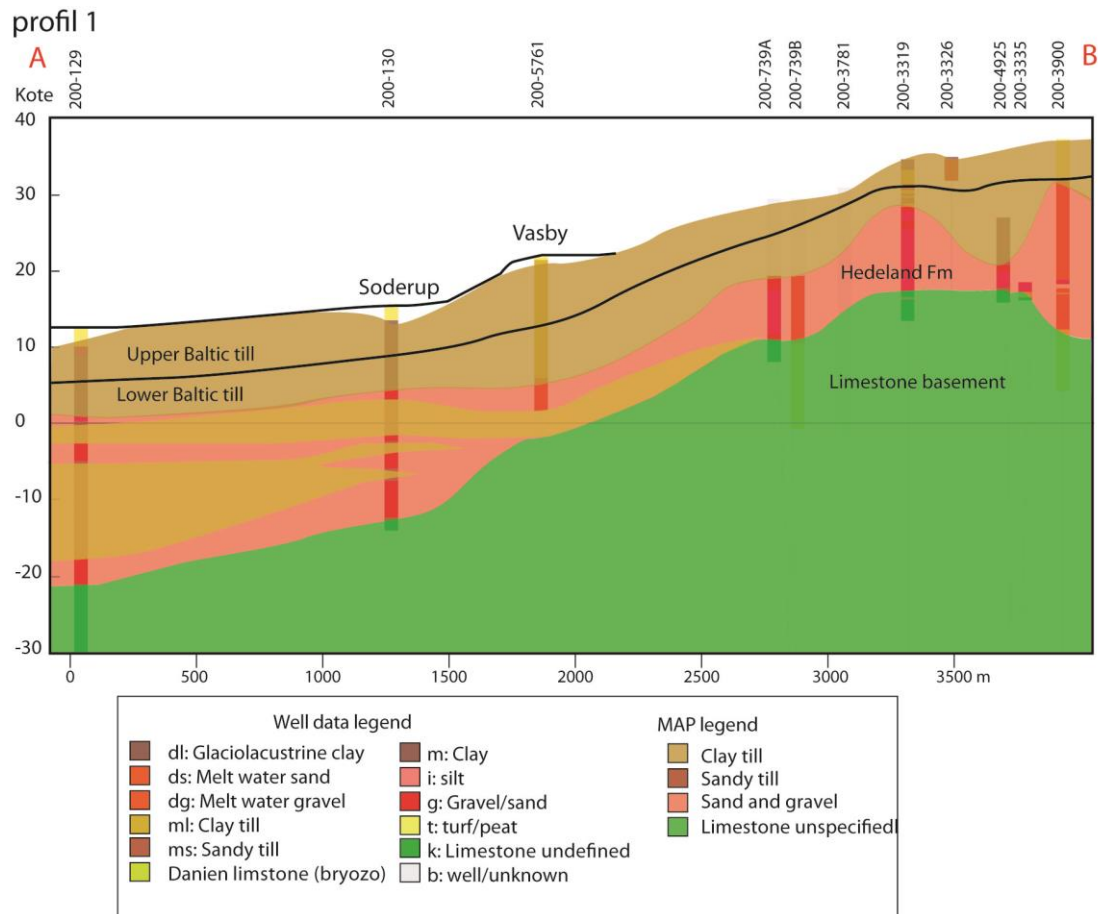
Et generelt profil gennem området ses i figur 73, hvor især de store sand-grusforkomster dominerer.

Opbygning af de glaciale aflejringer i Hedelands området ved Roskilde ifølge Jacobsen (1984)



Figur 73. Generelt profil fra Hedelandområdet, som er sammensat af profiler fra forskellige steder i området (Fra Jakobsen, 1984).

På tværprofilen (Figur 74) vises det, at sand-gruslagene splitter op og bliver tyndere i dele af området, og moræneleraflejringerne har en større andel. Desuden ses, hvordan kalkoverfladen falder markant i niveau fra øst mod vest samt fra nord mod syd.



Figur 74. Øst-vest profil gennem Vasby lokaliteten.

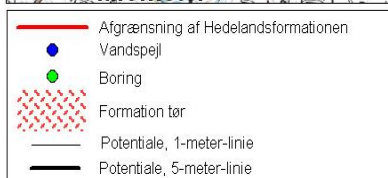
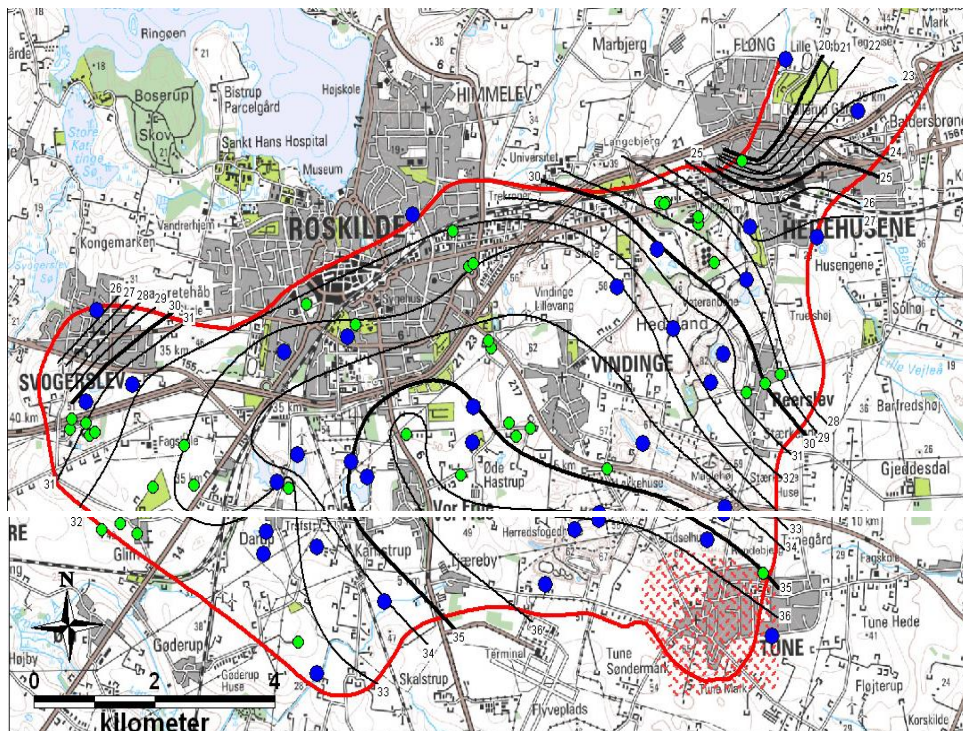
På figur 76 ses Hedeland Formationens aflejringer under oxideret og stedvis reduceret moræneler.

9.3.1 Jordbund

Jordbundsforholdene er overvejende præget af lerjord (Figur 1, bilag 2). Efter JB-klassifikationen er det JB nr. 6.: Fin sandblandet lerjord (10-15 %) som dominerer, mens JB nr.5: Grov sandblandet lerjord og Jb nr. 7: Lerjord findes langs randen af området. I C-horisonten, som er den nederste del af jordbundsprofilen, er der op til 15 % ler, men der er også mange områder, som har et indhold på 2-4 % (Figur 2, bilag 2).

9.3.2 Grundvand og grundvandsmagasiner

Grundvandsforholdene i Hedeland området er præget af indvinding og de mange råstofgrave. Under det udbredte moræneler findes hovedmagasinet, Hedeland Formationen, som også er de sand-gruslag, der graves råstoffer i. Et potentialekort for grundvandsspejlet fra 2006 kan ses på figur 75 (Niras, 2006). Grundvandspotentialet er højest ved Tune og Vor Frue omkring kote + 35 m, men falder mod nordøst til Hedehusene til kote + 25 m, og mod nordvest til + 30 m ved Roskilde og Svogerslev. Pumpningen præger kraftigt strømningsretningen. Grundvandsspejlet er frit og ligger også som søoverflader i grusgravene. Det betyder, at der kan være en umættet zone i formationen under morænelerslagene. I selve morænelerslagene er der mange mindre isolerede sekundære sandmagasiner.



Figur 4
Potentialeforhold
i Hedelands-
formationen
Sag nr.: 08.704.00



Roskilde Amt



KØBENHAVNS AMT

Okt. 2006



Figur 75. Potentialekort for Hedeland området (Fra Niras, 2006).



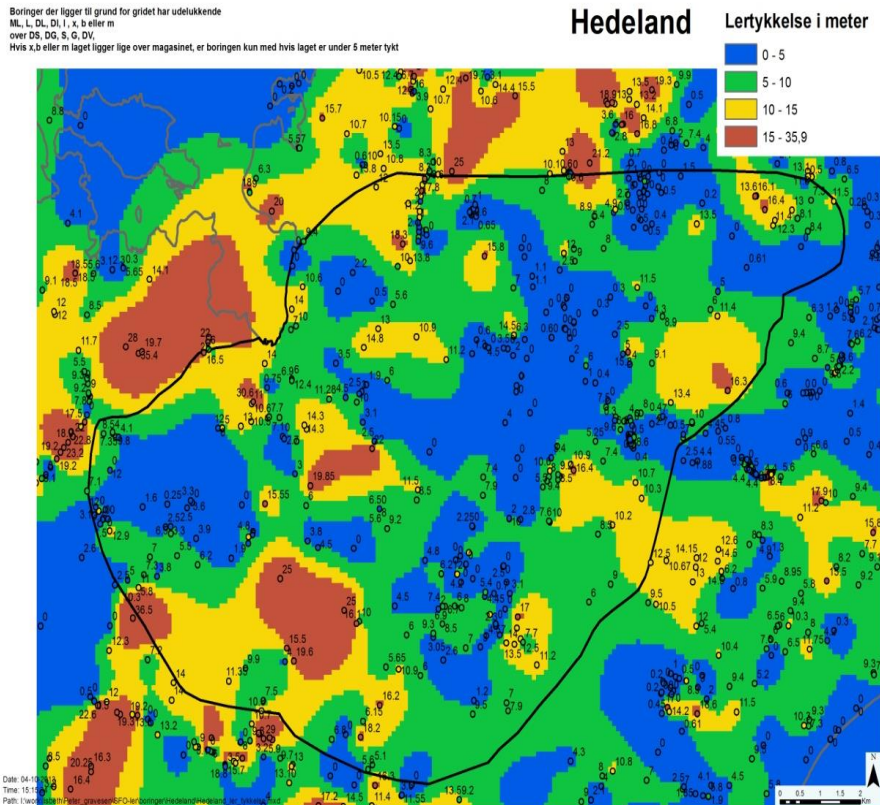
Figur 76. Grusgrav i Hedeland (Foto: M. Binderup).

9.3.3 Lertykkelser

Lertykkelseskortet er udarbejdet på basis af 384 borerer fra GEUS Jupiter database. Lertykkelsen er kortlagt som tykkelsen af moræneler (ML) og smeltevandsler (DL) fra terræn til det regionale sand-grusmagasin (DS, DG). Lertykkelsens variation er kortlagt i intervallerne 0-5 m, 5-10 m, 10-15 m, 15- 35,9 m. Interpolation og konturering er udført med programmet Xtools.

Tykkelser mellem 15 og 35,9 m ses kun i beskedent omfang og i isolerede områder. Tykkelser på 10-15 m er lidt mere udbredt, og det er de to tyndeste intervaller, som dominerer i området, især er der store områder med meget tynde lerlag eller helt uden lerlag.

Geofysiske data har ikke indgået ved fremstillingen (Figur 77).



Figur 77. Kort over lertykkelser indenfor Hedeland området.

9.3.4 Lokalteter og lertyper

Beliggenheden af de seks lokaliteter ses på figur 69. Lokaliteterne er nogenlunde jævnt fordelt over området. Nedenfor vil de blive gennemgået, men flere data om hver lokalitet findes i Bilag 5.

Kamstrup lokaliteten

Egenskaber

I Kamstrup grusgrav ved Roskilde fremstår en række meget lange, vertikale morænelersprofiler i råstofgraven. Tykkelsen af moræneleret er generelt lille i området, men på et ca. 100 meter langt profil i gravens nordende fremstod et 5-8 meter tykt morænelersprofil velblottet i 1999 (Figur 78). Der optræder to tydelige morænelerslag adskilt af udshearede sandlinser i grusgraven. Begge enheder er klassificeret som basale tills,

afsæt dels under et Ungbaltisk isfremstød fra sydøst, og dels under et senere genfremstød også fra sydøst.

Fra muldlaget til 3,9 m's dybde er moræneleret oxideret, olivenbrunt, med kalkklaster og få sandlinser. Fra 3,9 m til 6,6 m er moræneleret reduceret, olivengråt, med kalkklaster og få sandlinser. Herunder er der smeltevandssand og grus til 8 m's dybde. (se yderligere i bilag 5).

Makroporefordeling

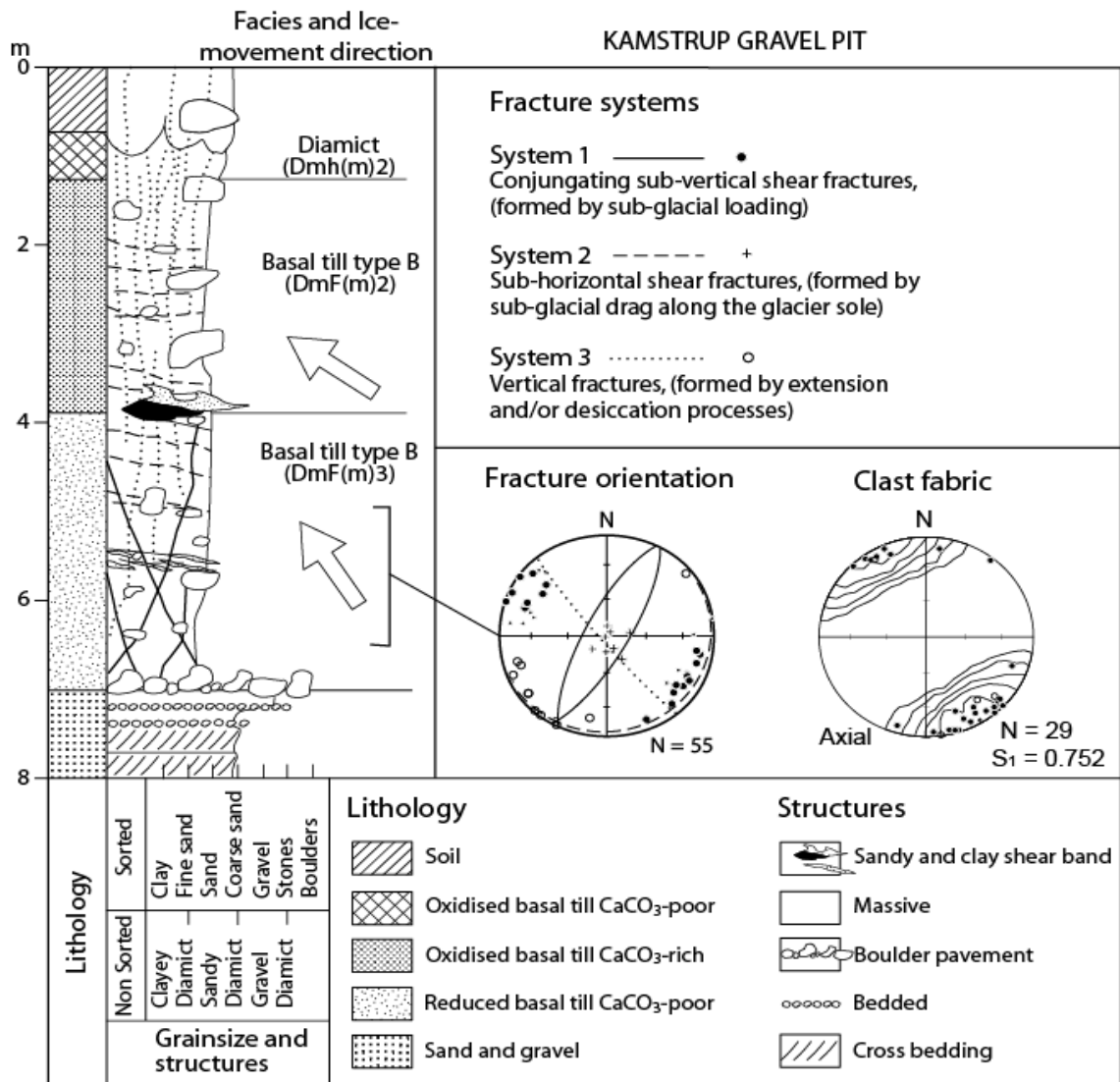
Der er opmålt sprækker ned til 5-7 m, og på figur 78 ses resultatet af opmålingen.

Fordelingen af makroporer ved Kamstrup danner en klassisk konfiguration. I alt tre sprækkesystemer er kortlagt:

System 1: Konjurerende subvertikale extensions sprækker udgør det primære sprækkesystem på denne lokalitet. Sprækkerne stryger generelt NØ-SV med en stejl hældning og lille vinkel imellem de to konjurerede sprækkesæt. Disse sprækker er dannet vinkelret på isbevægelsesretningen og gennem sætter hele lagpakken.

System 2: Består af subhorisontale shearsprækker dannet ved horisontalt shear under afsættelse af moræneenheden.

System 3: Består af vertikale udtørringssprækker/ekstensionssprækker dannet mere eller mindre vinkelret på system 1 sprækkerne. De aftager hurtig med dybden.



Figur 78. Lithologisk log fra Kamstrup Grusgrav med sprækkefordeling og oxidationsforhold.

Tune lokaliteten

Egenskaber

Ved Mindstrupgård nord for Tune ligger en grusgrav, der blev opmålt i forbindelse med et sprækkekursus i 2004. Et mere end 200 meter langt N-S orienteret profil var blottet på dette tidspunkt (Figur 79). Profilet var mellem 9 og 14 m højt og repræsenterede tykkelsen af moræneler ned til en sand-grusforekomst (Hedeland Formationen).

Derudover registreredes tykkelsen af den reducerede zone ved hjælp af fotografier.

Resultatet viser, at de øverste lag består af to till-enheder, der er afsat under isfremstød fra sydøst. De to morænelerslag er adskilt af et tyndt lag af smeltevandssand, der strækker sig igennem det meste af graven ca. 6-7 m under terræn (Figur 80).

Under muldlaget findes oliventbrunt, oxideret moræneler til 5,4 m's dybde. Herunder er der til 6,3 m's dybde olivengråt reduceret moræneler med oxiderede zoner omkring markante sprækker. Et 1-2 cm tyndt sand kan følges gennem hele profilet. Oxideret olivenbrunt moræneler følger til 9,5 m's dybde. Herunder er der smeltevandssand og grus (se yderligere i bilag 5).



Figur 79. Panorama af grusgravsprofil ved Tune. (Foto: K.E.S. Klint).

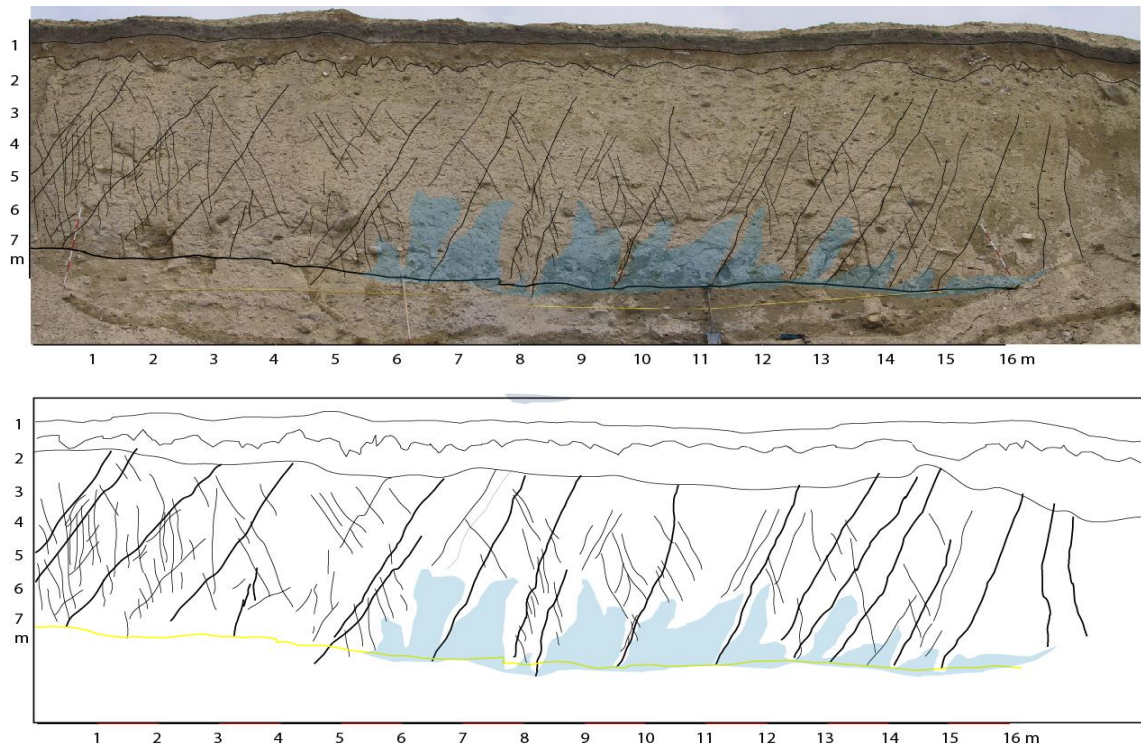
Makroporer

Der er udført to opmålinger og en detaljeret udtegnning af sprækkesystemerne i et 30 meter langt profil (Figur 80).

Der optræder et meget karakteristisk sæt af konjugerede shearprækker med en strygning fra NNW imod SSØ. De to konjugerede sprækkesæt hælder henholdsvis stejlt imod øst og vest. Der ses også klassiske lodrette en-échelon sprækker eller "Riedel shears", hvilket angiver en isbevægelsesretning fra SSØ imod NNW på dannelsesstidspunktet. Da sprækkerne gennemsætter hele lagpakken, må de være dannet efter morænelersenhederne er afsat af gletchere, der overskred området fra SØ. Det kan derfor tænkes, at isbevægelsesretningen mod slutningen af glaciationen har ændret sig til en mere N-S gående retning.

Ud over de stejle shearsprækker ses lavthældende/subhorizontale shearsprækker igennem hele lagserien og vertikale udtørningsprækker i den øverste del af morænelersenheden. Det er bemærkelsesværdigt, at i gravens nordlige ende, hvor lagtykkelsen er tæt på 14 meter, er de vertikale sprækker dårligere udbredt og strækker sig kun ca. 6 meter ned i lagserien, hvorimod den sydlige del af profilet, der kun er 9-10 meter tyk, er næsten fuldstændig gennemsat af sprækker. Samtidig stiger tykkelsen af den reducerede grå moræneler i den nordlige del, mens moræneleret i den sydlige del er

helt oxideret. Der ses således en tydelig sammenhæng mellem graden af opsprækning, total lertykkelse og tykkelse af den reducerede zone i denne grusgrav.



Figur 80. Tune grusgrav ved Mindstrupgaard. Markante sprækkesystemer ses tydeligt og forekomsten af reduceret moræneler (gråt), som ligger i det oxiderede moræneler (brunt) (Foto og tolkning K.E.S. Klint).

Kallerup lokaliteten

Egenskaber

Kallerup Grusgrav ligger nord for Holbækmotorvejen øst for Hedehusene. Der er i forbindelse med REMTEC projektet udført en række opmålinger af sandlinser i moræneler i denne grusgrav.

I gravens nordvestlige hjørne ses et ca. 300 m langt Ø-V strygende profil blottet fra overfladen til bunden af graven ca. 12 m under terræn (Figur 81). Profilet består af to ca. 6-8 m tykke basale tills overlejrende 4-6 m flow-till og smeltevandsand og grus. Ca. 14 m under terræn optræder tertiære kalkbjergarter i gravens nordvestlige hjørne.

De to øvre basale tillenheder kan begge relateres til det Ungbaltiske fremstød fra SØ og er klassificeret som basale traction tills type B. (Kessler et al., 2012).

Der er opmålt sandlinsefordeling og sprækkefordeling i morænelersaflejringerne (Kessler et al., 2012, 2013).



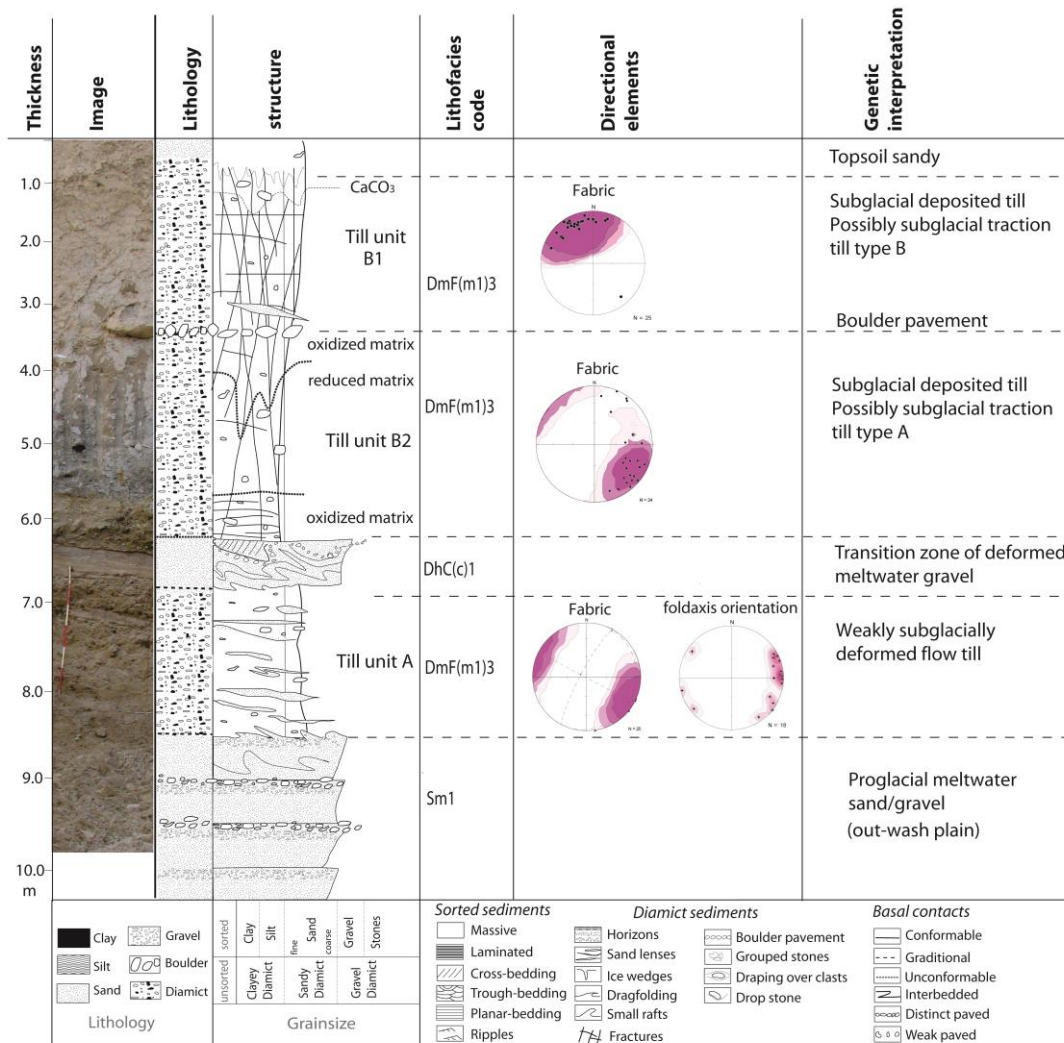
Figur 81. Oversigt over Kallerup grusgrav. Bemærk de reducerede partier i dele af profilet. (Foto K.E.S. Klint).

Under muldlaget træffes oxideret, olivenbrunt moræneler til 3,4 m's dybde med en stenbrolægning ved lagets undergrænse. Til 6,3 m findes stedvis olivengråt, reduceret moræneler med oxiderede zoner omkring markante sprækker. Ned til 9,5 m's dybde findes morænesand, som er olivenbrunt og oxideret. Herunder er der smeltevandssand og grus, som hviler på Danien kalk. (se yderligere i bilag 5).

Makroporer

Redox zonen optræder sporadisk i graven, men generelt er morænefladen gennemsat af sprækker i hele sin tykkelse.

De to øverste morænelerlag er generelt gennemsat af sprækker, men områder med svagere opsprækning optræder, især hvor matrix er reduceret (Figur 82). Det nedre moræneler er delvist foldet i en stor antiklinal i profilets østlige del, men erosivt overlejret af det øvre moræneler med den karakteristiske brolægning ved basis. Generelt opmålt sprækkespacing i dybdeintervallet 4,5 m til 6,5 m u.t., og den kumulative sprækkespacing for 1 og 2 ordenssprækker er beregnet til at ligge fra 20 til 60 cm i denne dybde. Spacingen er dog højere i de reducerede områder. Makroporer udgøres ud over sprækkerne af talrige sandlinser især i den nedre flowtill (till unit A figur 82).



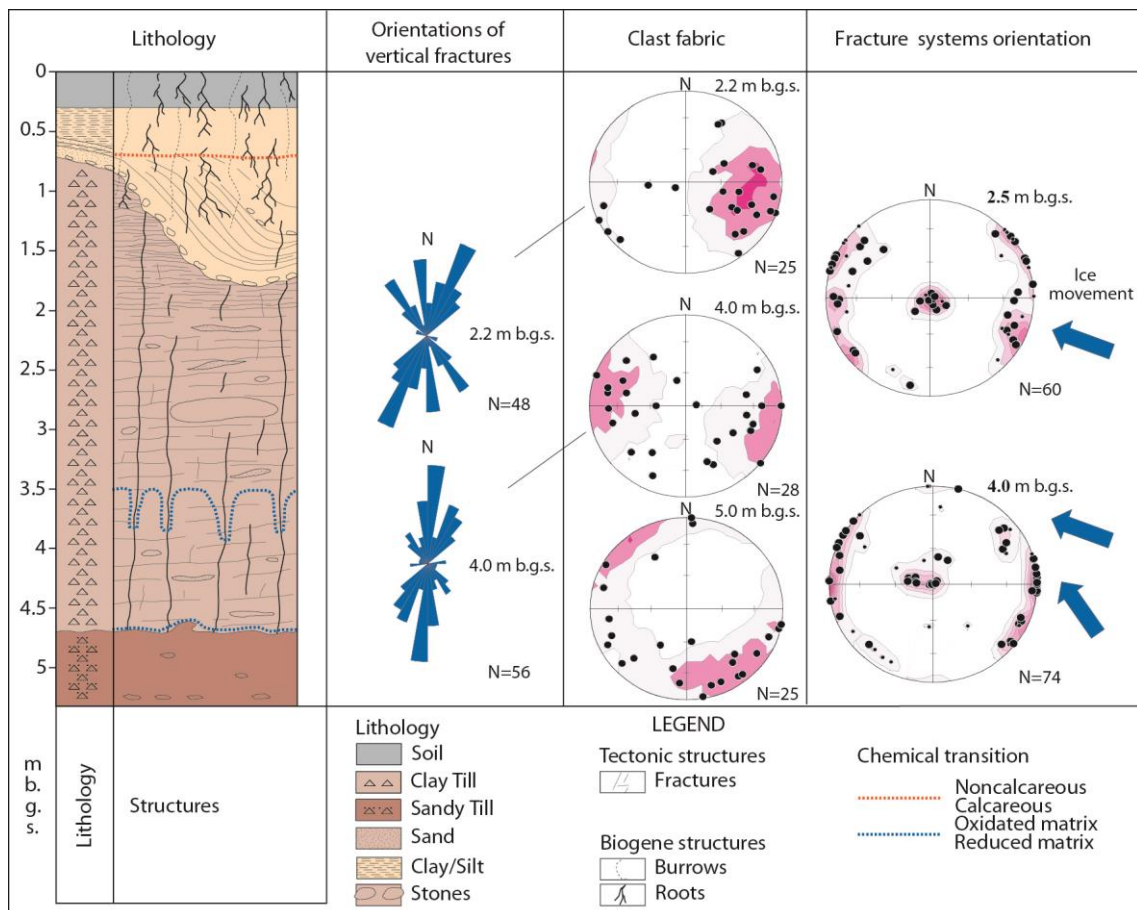
Figur 82. Opmåling af profil fra Kallerup Grusgrav med makroporer og redoxzoner (Fra Kessler et al., 2012).

Slæggerup lokaliteten

Egenskaber

Slæggerup ligger ca. 8 km nordøst for Roskilde. Der er i forbindelse med VAP projektet udført en udgravning til 5,5 m under terræn i moræneler, syv monitoringsboringer til 5,5 m under terræn og fire pejleboringer til 11 – 12 m under terræn (Lindhardt, et al., 2001). I et dybere niveau findes oxideret morænesand afsat under det Ungbaltiske isfremstød i Weichsel. En betydelig del af de at terrænnære aflejringer består dog af smeltevandsler og i mindre grad smeltevandssand. Forsøgsmarken er kuperet med en højdeforskel mellem højeste og laveste punkt på ca. 4,5 m. Ca. 20 m under terræn optræder tertiære kalkbjergarter.

Ned til 1,5 m under terræn findes muld og søaflejringer. Derefter træffes olivenbrunt, oxideret moræneler med sandlinser til 3,5 m's dybde. Dette overligger moræneler, der er reduceret og stedvis olivengrå med oxiderede zoner omkring markante sprækker til 4,7 m's dybde. Herunder er der oxideret, olivenbrunt morænesand til 8,7 m's dybde (delvis data fra borer). Boringer viser ligeledes, at der er reduceret olivengråt moræneler til 14,2 m's dybde, som ligger på smeltevandssand og grus. (se også bilag 5).



Figur 83. Profil gennem udgravningen ved Slæggerup med målte sprækkesystemer og oxidationszoner. (Fra Lindhardt et al., 2001).

Makroporefordeling

Der optræder to til tre sprækkesystemer ved Slæggerup (Figur 83).

Moræneleret er stærkt opsprækket i den øvre del, og fra 2 til 3 m under terræn optræder en nærmest fissil struktur med subhorisontale sprækker med en sprækkespacing under 5 cm. Derunder øges sprækkeafstanden ned til morænesandet, der optræder generelt usprækket. Der optræder, et måske to systemer af subvertikale sprækker med en generelt stigende sprækkeafstand ned imod sandenheden, hvor sprækkerne forsvinder ca. 5 m under terræn. Sprækkerne er overordnet parallelle og tolkes dannet

som belastningssprækker vinkelret på isbevægelsesretningen, der her har været først fra SØ mod NV og senere overvejende fra øst mod vest, da sprækkerne blev dannet.

Høje Tåstrup lokaliteten

Egenskaber

Høje Tåstrup lokaliteten ligger ved Teknologisk Institut i Høje Tåstrup, hvor et område på ca. 100 x 200 meter har været undersøgt i detaljer i forbindelse med forskningsprojektet Byer i Vandbalance. I den forbindelse er der udført to store udgravninger til henholdsvis 5 m og 8,5 m under terræn. Forinden er grunden blevet opmålt bl.a. ved spydkartering, der er udført MEP profilering og installeret en lang række monitoringsboringer til 20 m's dybde.

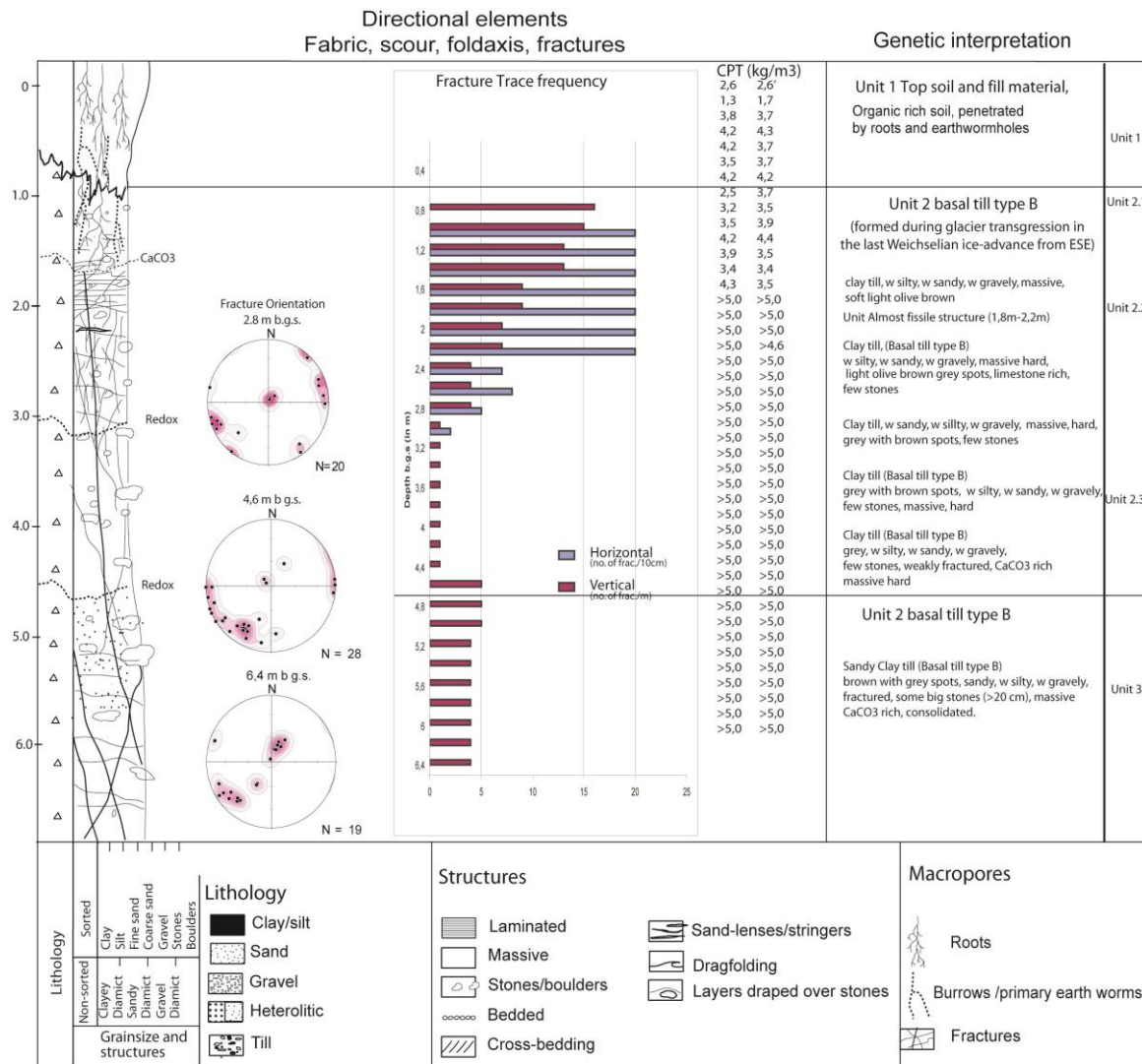
Den geologiske opbygning på Høje Tåstrup Lokaliteten består af næsten samme opbygning som ved Kallerup lokaliteten.

Undersøgelserne viser, at der under muldlaget er ca. 3 m oxideret moræneler. Herunder er der en ca. 4-5 m tykt reduceret moræneler ned til ca. 8 m under terræn, der stedvis er gennemsat af sprækkezoner i oxideret moræneler. Under denne moræneler optræder talrige linser af smeltevandssand i generelt sandet oxideret umættet moræneler.

Lagserien kan opdeles i fem tillenheder (se figur 84). Enhed 1 består af muldhorisonten ned til ca. 0,5 m u. t. Herunder optræder enhed 2 ned til ca. 5 m u. t. Enheden 2 er klassificeret som en øvre basal till type B, der strækker sig ned til ca. 6 m u. t. Denne enhed bliver gradvist mere leret nedadtil. Enhed 3 består ligeledes af en basal till type B, dog med et markant større sandindhold. Den strækker ned til 8-9 m u. t.

Fremstødene for enhed 1 og 2 korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987).

Under enhed 3 optræder en væsentligt mere heterogen tillenhed med vekslende lerindhold fra næsten ren smeltevandsler til morænesand og indslag af smeltevandssand. Enheden er kun erkendt i 2 dybe boringer, der blev installeret på grunden. Denne enhed tolkes som en flow till med talrige indslag af glaciolacustrine og fluviale sedimente samt glacialtektonisk deformerede sandlinser. Ca. 20 m under terræn optræder prækvartæroverfladen med stærkt opsprækket kalk, givetvis Danien kalk. Grundvandsspejlet ligger tæt på kalkoverfladen.



Figur 84. Lithologisk log med sprækkefordeling og redoxzoner i udgravning i Høje Tåstrup.

Makroporefordeling

Fordelingen af sprækker er illustreret på figur 84. Sprækketætheden er målt ved at tælle sprækkesporsfrekvensen for vertikale og horisontale sprækker samt opmåling af sprækkeorienteringen af de primære sprækker.

Sprækkefordeling i enhed 2

Denne enhed er generelt oxideret og kraftig opsprækket i de øverste 4 m. Dog falder densiteten hurtigt i den reducerede zone. Imidlertid optræder 8-10 m brede vertikale zoner med lokale oxiderede forhold omkring sprækkezoner, der gennemsnætter den reducerede zone.

Enhed 2 kan underopdeles i tre underenheder med specifikke sprækkefordelinger og typer:

Underenhed 2.1 udgør de øverste ca. 2 m ned til kalkgrænsen. Denne zone er domineret af vertikale udtørringssprækker med en gennemsnitsafstand tæt på 10 cm.

Underenhed 2.2 udgør intervallet fra kalkgrænsen ned til redoxgrænsen 3-4 meter under terræn. Denne zone er domineret af vertikale-subvertikale glacialtektoniske sprækker og udtørringssprækker.

Udtørringssprækkerne er generelt vertikale og danner polygoner, der stopper ved grundvandspejlet. De glacialtektoniske sprækker fortsætter længere ned. De har en generel strygning NV-SØ og hælder ca 70 grader imod NØ samt en spacing omkring 10-25 cm i den øvre del aftagende nedadtil.

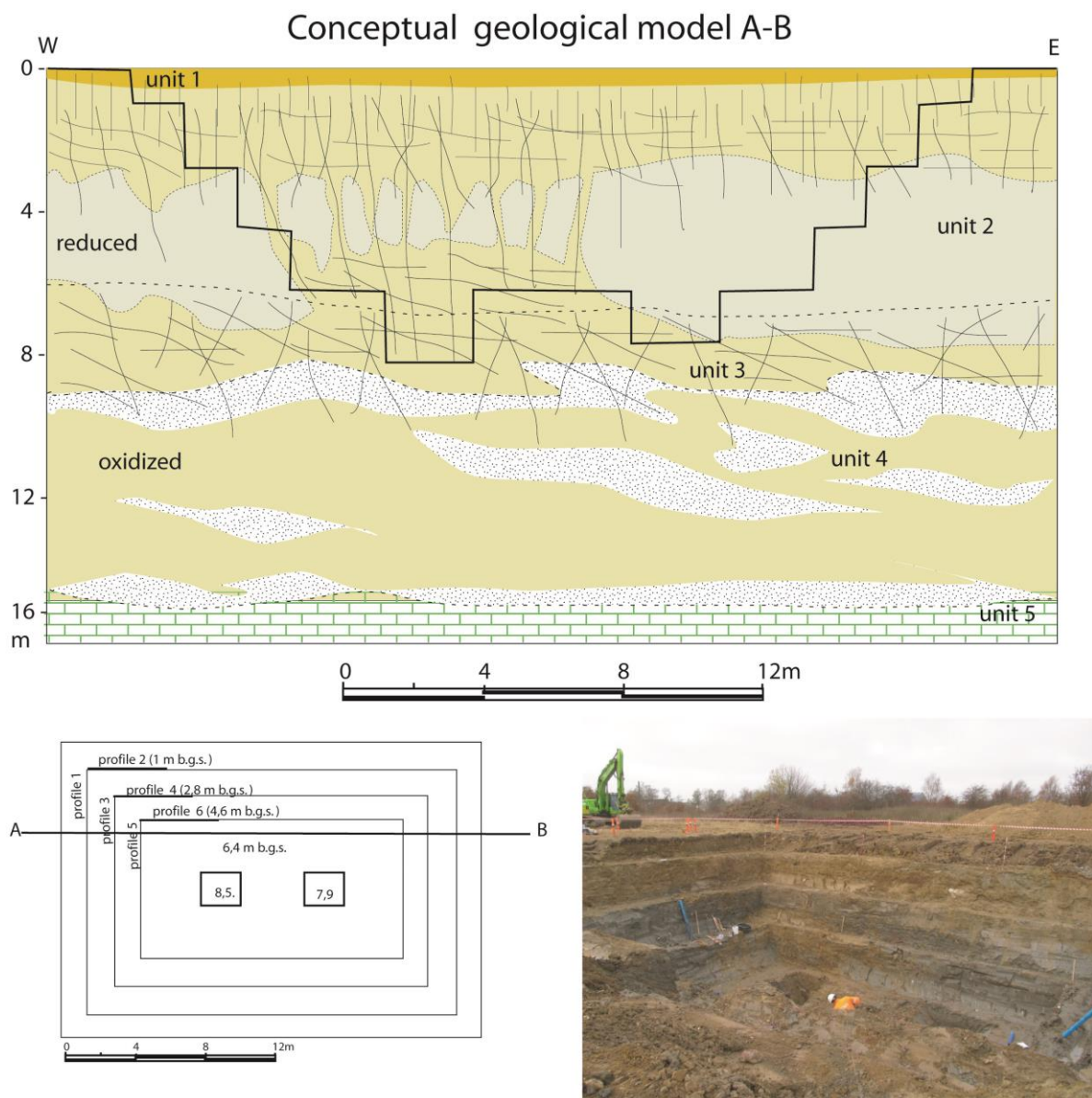
Subhorizontale shearsprækker optrådte i profilets øvre del med en gennemsnitsafstand på 3-4 cm, men også aftagende nedadtil.

Underenhed 2.3 strækker sig i den reducerede moræneler ned til ca. 5-6 meter under terræn. Denne zone er domineret af glacialtektoniske sprækker strygende NV-SØ med en gennemsnitsafstand omkring 1 m ved 4,4 m u. t.

Sprækkefordeling i enhed 3

Denne enhed strækker sig fra ca. 5-6 m under terræn til ca. 8-9 m under terræn, hvor geologien er mere kompleks. Denne zone er domineret af stejltstående glacialtektoniske sprækker strygende NV-SØ med en gennemsnitsafstand omkring 25 cm i den oxiderede del. Derudover stiger antallet af subhorizontale shearsprækker i denne dybde.

Den komplekse opbygning kan ses af figur 85.



Figur 85. Viser konceptuel geologisk model over T1-grunden i Høje Tåstrup, samt billede af den store udgravning til 8 m under terræn. Bemærk fordelingen af reducerede og oxiderede områder samt sprækkernes fordeling i samme.

Vadsby lokaliteten

Egenskaber

Vadsby blev undersøgt i forbindelse med forskningsprojektet REMTEC samt i forbindelse med oprensning af en større forurening. Der er således udført 3 udgravninger til 4,5 m's dybde samt installeret et stort antal borer på hele grunden.

Vadsby er beliggende på den nordlige flanke af Hedeland området, der domineres af flere smeltevandssletter. Disse smeltevandssletter er overskredet to gange under de

Ungbaltiske isfremstød, og Hedeland Formationen er således overlejret af to morænelerslag i det meste af området, således også i Vadsby. Selve Hedeland Formationen er her kun repræsenteret af et tyndt lag smeltevandssand dannet under af/nedsmeltning af den sidste is i området, der har efterladt et kuperet dødislandskab sydvest og nordøst for lokaliteten.

På figurerne 86 og 87 ses geologiske tværsnit fra lokaliteten på Vadsbyvej. Under fyldlaget findes i den vestlige del 1-3 m oxideret olivenbrunt flydemoræne. Ned til 4,7 m er der reduceret, olivengråt moræneler. Reduceret moræneler forsætter til 16 m's dybde. Omkring 8-9 m under terræn optræder sandlinser og brolægninger i flere borer, og det tolkes, at moræneleret kan opdeles i to morænelerslag af hver ca. 8 m's tykkelse, der henføres til De Ungbaltiske Isfremstød. Under disse lag findes der igen moræneler, indtil der i ca. 16 m u. t. optræder endnu et smeltevandssandlag, ofte mellem to oxiderede lag af morænesand. Det underste smeltevandssandlag er nogle steder i direkte kontakt med kalken, og andre steder overlejrer de et nedre reduceret morænelerslag, inden kalken nås.

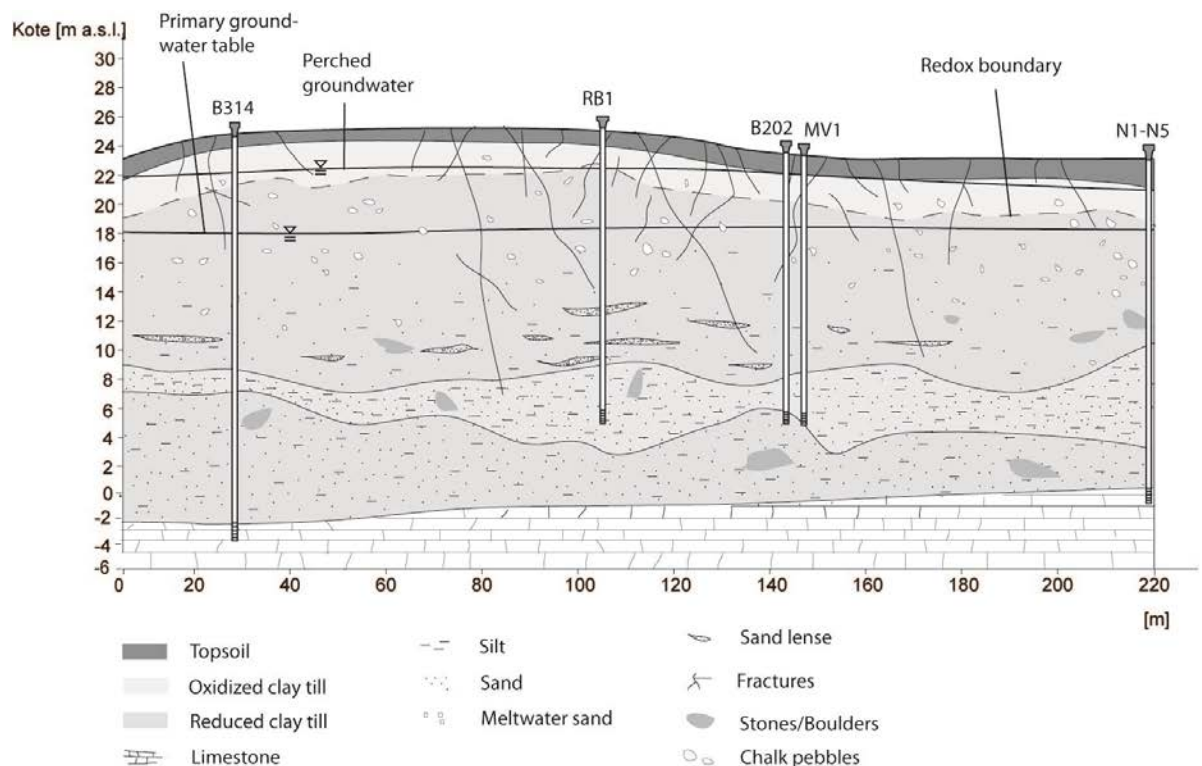
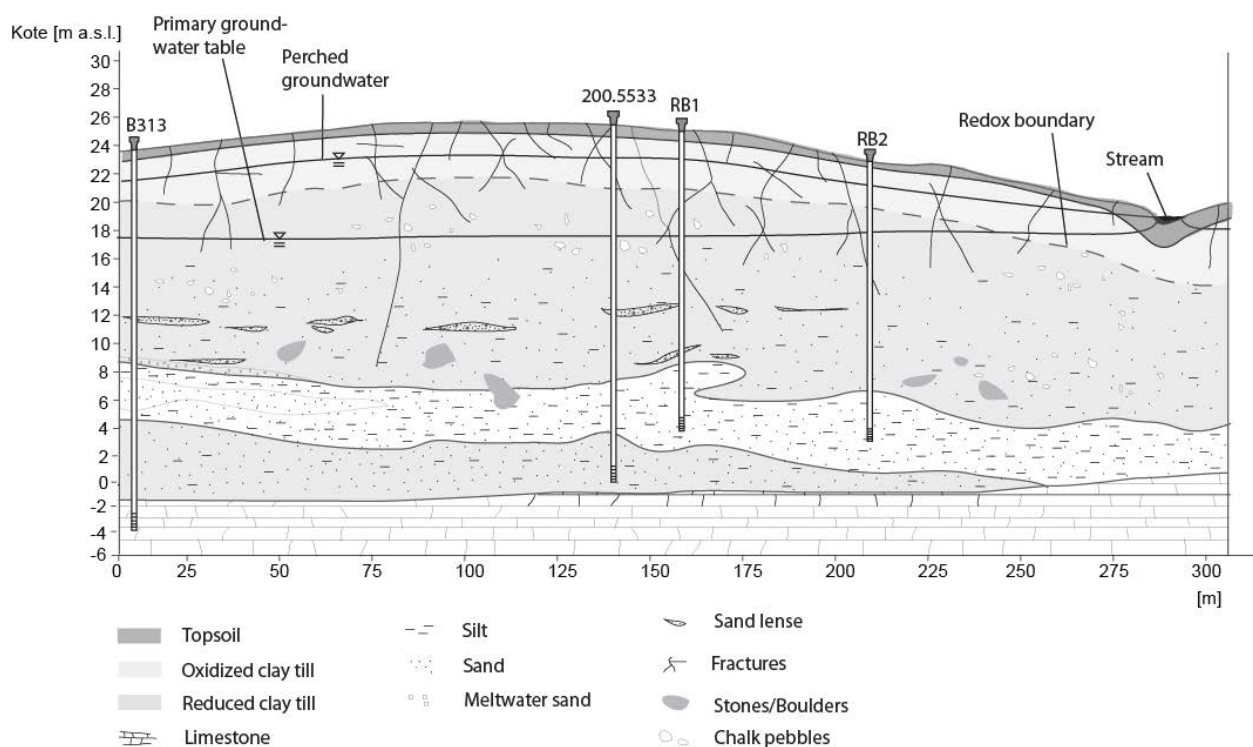


Figure 86. Geologisk profil med nord mod venstre og syd mod højre.



Figur 87. Geologisk profil med vest til venstre og øst til højre.

Makroporefordeling

Sprækkeudviklingen i den øvre moræne i Vadsbyområdet er tolket dannet som subglaciale belastningssprækker og subhorisontale shearsprækker. Ved overgangen til den reducerede moræneler aftager sprækkerne i intensitet.

9.3.5 Redoxforhold i leraflejringerne

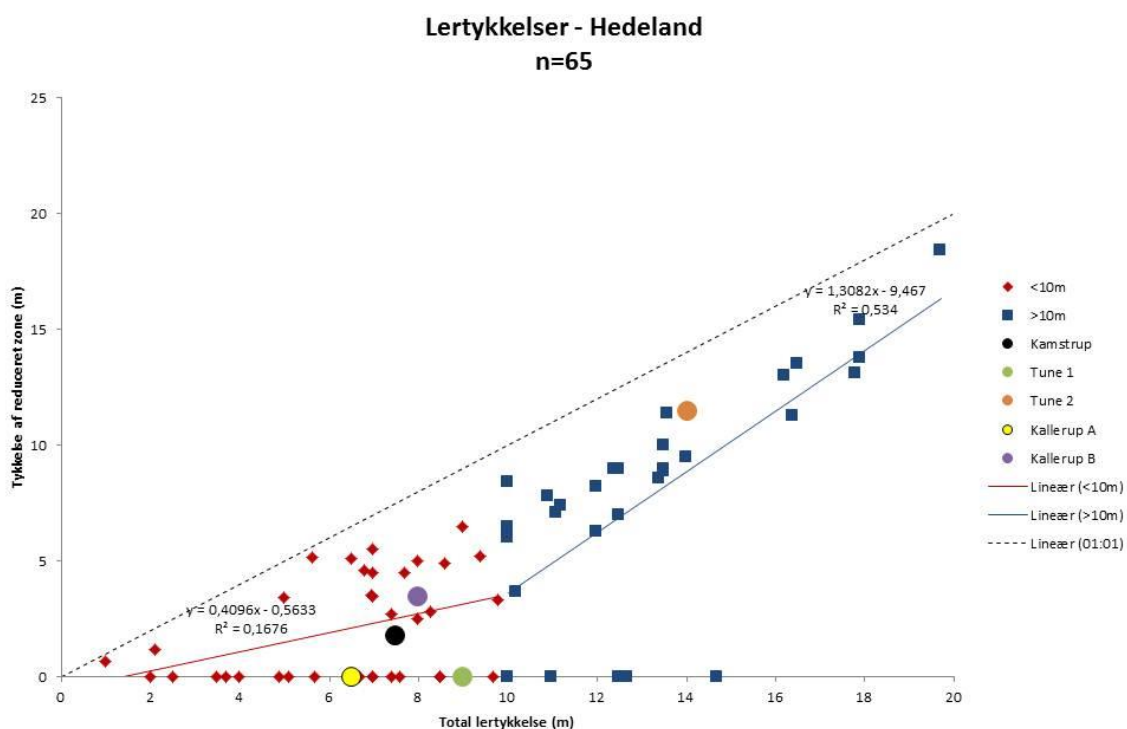
Lertykkelser og redoxzoner

Der er udarbejdet et plot med sammenhængen mellem den totale tykkelse af moræneler over første betydende sandmagasin (evt. sekundært) mod tykkelsen af den reducerede del af moræneleret. De to parametre er fundet ud fra data fra de seks feltlokaliteter: Kamstrup, Tune, Slæggerup, Kallerup, Vadsby og Højteåstrup og fra 65 borerer fra Jupiter databasen. Metoden til at bestemme tykkelser er beskrevet i afsnit 9.3.3. Boringerne er udvalgt ud fra følgende kriterier: 1. Boringer udtrukket fra databasen på grundlag af farvekoder for leret, 2. Boringer med grundvandskemiske analyser hvor der kunne foretages beregning af vandtype/redoxklasse, 3. Boringer hvori der er fundet pesticider over den tilladte grænseværdi i grundvandet.

Der er valgt, at markere boringer med mindre end 10 m's lertykkelse fra boringer med større tykkelse. Dette skyldes, at den største dybde, hvor der er fundet dybe sprækker i Hedeland området er ved Tune, hvor de kan følges ned til 10 m's dybde for at ende i sandaflejringer. Dette kan ikke betragtes, som den maximalt opnåelige dybde, men erfaringer fra et stort antal feltlokaliteter tyder på, at sprækker de fleste steder på Sjælland er ganske få eller forsvinder omkring 10 m's dybde.

Hedeland områdets geologiske opbygning er mere sammensat end Stevns, da der er lagserier med flere morænelerslag mellemljret af sand- og grus lag over kalklagene. Der er flere og tykkere sandlinser i moræneleret. Desuden er der registreret gentagelse af oxiderede og reducerede enheder på alle lokaliteter, men også i en lang række boringer i området. Desuden viser HøjeTåstrup profilet, at oxideret ler ligger mellem lag af reduceret ler i mellem 3,5m og 8,5 m's dybde, og den største koncentration af de lodrette sprækker netop ligger i disse oxiderede dele.

I Hedeland området er der vekslen mellem mættede og umættede forhold i grundvandsmagasinet, og grundvandsindvinding og afsænkning af vandstanden på grund af grusgravningsaktiviteter kan være en årsag. De ydre påvirkninger vil forcere den nedadgående bevægelse af redoxgrænsen. Yderligere vil en egentlig umættet zone i de underliggende grundvandsmagasiner resultere i forcerede bevægelser.



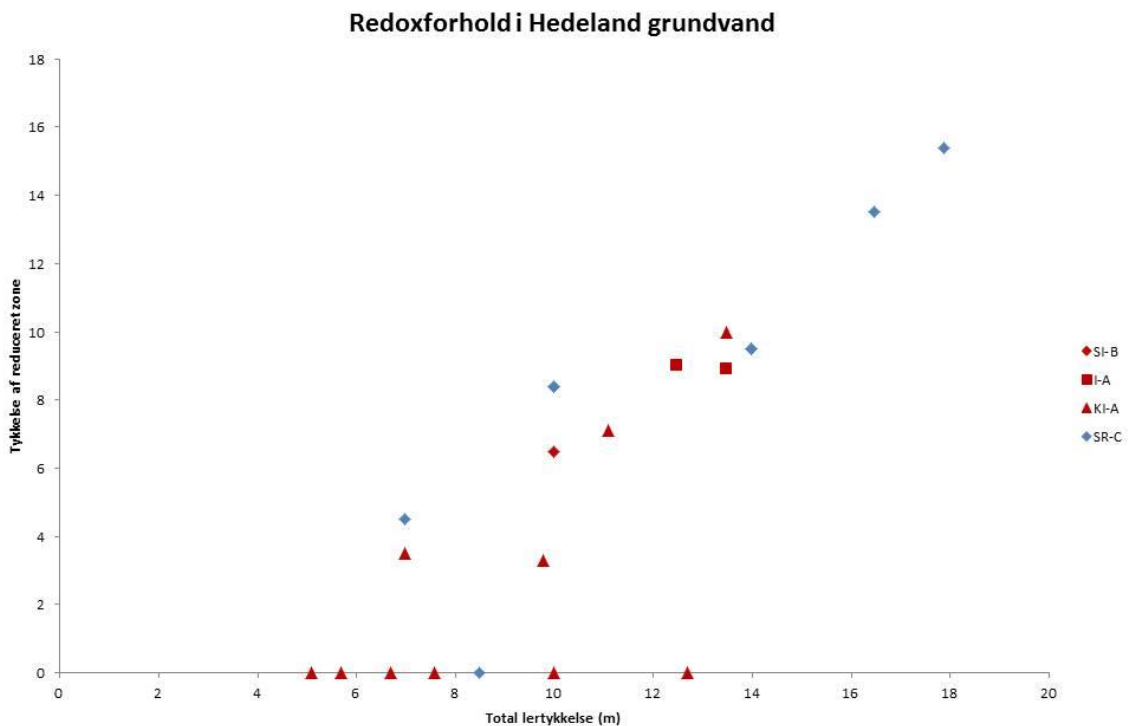
Figur 88. Diagram som viser fordeling af den totale lertykkelse i forhold til den reducerede lertykkelse.

Figur 88 viser, at der i op til 10 m's samlet lertykkelse er der en del tilfælde af 0 m til 3 m reduceret ler, hvor der træffes sprækker, og i enkelte tilfælde op til 6 m reduceret ler. Redoxgrænsens beliggenhed i matrix antages at have bevæget nedad sig siden sidste istid, som beskrevet under Stevns, men 10 m's oxideret tykkelse svarer til 0,9 mm pr. år. Sammenhængen mellem sprækker og reduceret ler til mindst 8,5 m dybde i Høje Tåstrup viser, at redoxgrænsens bevægelse nedad kan have sammenhæng med makroporezoner. I Hedeland skal der også peges på, at udbredte sandlinser og sandlag, som ofte forekommer med forbindelse til sprækkesystemerne (Kessler et al., 2012, 2013), har indvirkning på det samlede makroporesystems betydning for redoxforholdene.

Over 10 m's lertykkelse stiger den reducerede zone med den stigende lertykkelse.

9.3.6 Redoxforhold i grundvand (Ilt- og nitratforhold)

En gennemgang af analyser af den uorganiske kemi i grundvandet i området førte frem til en opdeling i seks redoxgrupper og klassificering i redoxklasser/ vandtyper svarende til på Stevns. Inddeling i disse klasser kræver at de kemiske analyser indeholder de relevante parametre. Vandtyper/ redoxklasser er sammenholdt med den totale lertykkelse og den reducerede lertykkelse (se afsnit om Stevns, 9.2.6).

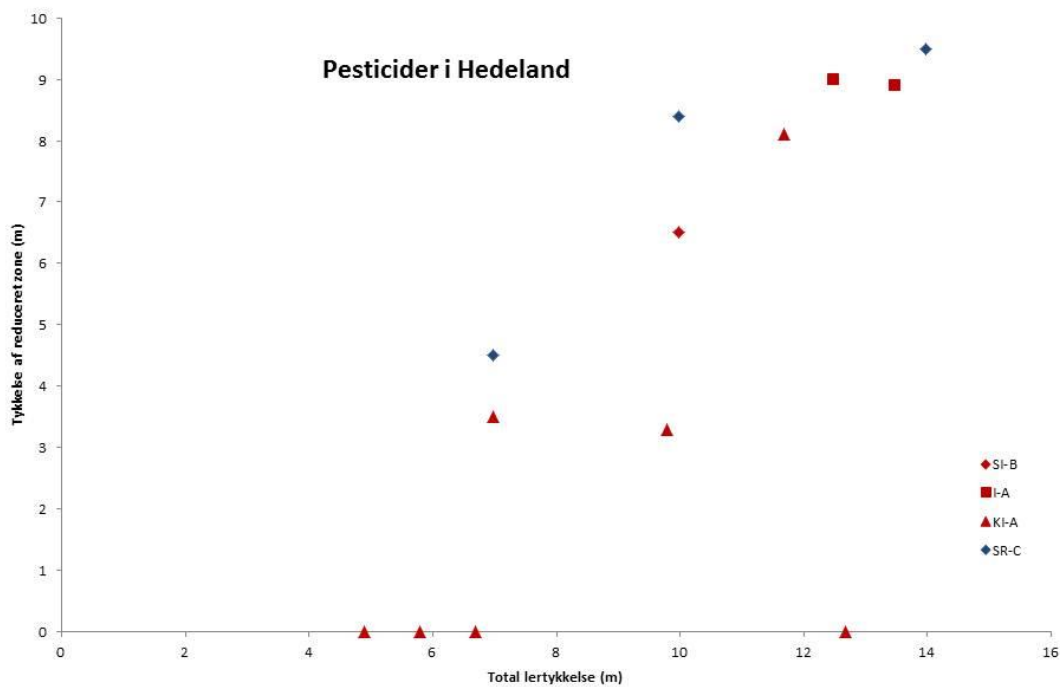


Figur 89. Diagram som viser total lertykkelse i forhold til tykkelse af reduceret ler fordelt på redoxforhold og redoxzoner.

Figur 89 viser, at de kraftigt iltede og iltede grundvandstyper forekommer, hvor den reducerede zone er 0 m og under 10 m maximal lertykkelse, men der er også forekomst af svagt reduceret grundvand i dette interval. I intervallet med 10-14 m's samlet lertykkelse dominerer iltet og kraftigt iltet grundvand med op til 10 m reduceret zone, men herover er det svagt reducerede grundvandsforhold, som findes ved op til 19 m's lertykkelse.

9.3.7 Pesticidfund i borer

Der er udarbejdet et plot, som viser de borer, hvor der er fundet pesticider over grænseværdien i grundvandet fordelt på vandtyper/redoxklasser og i forhold til total lertykkelse og reduceret lertykkelse. (Figur 90)(Se afsnit om Stevns, 9.2.7).



Figur 90. viser de borer, hvor der er fundet pesticider over grænseværdien i grundvandet fordelt på vandtyper/redoxklasser og i forhold til total lertykkelse og reduceret lertykkelse.

Boringerne fordeler sig i tre grupper. Den første gruppe består af pesticider i grundvandet under 0 m reduceret ler, hvor et indtag findes lige under morænelerets nedre grænse, men to indtag ligger 6 m under lerets nedre grænse. Det kan være vanskeligt at tolke disse forhold, men i det første tilfælde kan det skyldes, at pesticiderne er ført igennem makroporerne i det oxiderede ler til grundvandet antagelig under kraftige regnskyl.

Den anden gruppe har 10 m samlet lertykkelse og over 7 m reduceret ler. I disse tilfælde er pesticiderne ført af sted med horisontal strømning i grundvandet, men da der er tale om iltede og kraftigt iltede forhold må dette overvejes i forhold til den sammensatte geologiske opbygning i Høje Tåstrup.

Den tredje gruppe pesticider findes under 7-10 m moræneler og 4-5 m reduceret ler og grundvandet er kraftigt iltet. Dette kunne svare til de geologiske forhold i Høje Tåstrup.

9.3.8 Sammenfatning

Hedeland området indeholder seks feltlokaliteter: Kamstrup, Tune, Slæggerup, Kallerup, Vadsby og Høje Tåstrup, hvor moræneler ligger på sandmagasiner. For Hedeland området kan siges, at redoxforholdene og pesticidforholdene afspejler de sammensatte geologiske og hydrogeologiske forhold.

Makroporer gennemsætter næsten altid moræneleret, og de omfatter bioporer, sprækker og sandlinser, der, hvis de udgør et samlet transportnetværk, kan føre vand og pesticider til grundvandet. I nogle tilfælde kan særligt store og dybe enkelte sprækker også fungere sådan. Transport gennem matrix i moræneleret forgår også men almindeligvis langsommere.

Antallet af makroporer aftager ned gennem den oxiderede zone i moræneleret mod redoxgrænsen. Redoxgrænsen ligger almindeligvis omkring 3,5 m til 5 m's dybde selv om dybereliggende redoxgrænser er registreret ned til 7-8 m. Enkelte sprækker kan nå ned til 10 m dybde i det reducerede moræneler, hvor de må forventes at ophøre. Små sandlinser kan også forsætte nedad i det reducerede moræneler, og i Hedeland området forekommer mange sandlag.

Redoxgrænsens beliggenhed og dannelse synes at hænge sammen med udbredelsen nedad af makroporerne, da de fleste ophører ved denne grænse. Oxidationen har også forgået i matrix, men måske især i makroporerne, hvilket ses af de jern- og manganoxiderede "halos" omkring sprækker i det reducerede moræneler.

Gentagelse af oxidation-reduktions forholdene i Hedeland området adskiller dette område fra Stevns området, hvor der kun er et oxidationssystem. Ved gentagelsen synes

særlige sprækkeforhold i det øverste reducerede moræneler samt tilstedeværelsen af sandlag at spille ind, men systemet er ikke fuldt forstået.

Tilstedeværelse af pesticider i grundvandet i Hedeland området viser, at dele af området er følsomt for udvaskning.

10. Samlende konklusioner for områderne

I de to områder Stevns og Hedeland er henholdsvis tre og seks undersøgte feltlokaliteter blevet gennemgået med hensyn til egenskaber, makroporer, redoxforhold og pesticider, og data om lagtykkelser og redoxforhold er sammenstillet på en ny måde. Derfor foretages en samlende konklusioner for områderne.

10.1 Makroporedata: sprækker og sandlinser

Stevns området: På en lokalitet, Sigerslev kan sprækker i moræneleret følges ned til kalken i 8 m's dybde, mens der for Højslev og Gjorslev er tale om sprækker til ca. 5 m's dybde.

Sprækkemønstrene på de tre lokaliteter er følgende:

Højstrup og Gjorslev er meget ens, selv om de geografisk ligger langt fra hinanden (Figur 61 og 62):

Terræn til ca. 1 m	Lodrette bioporer og udtørringssprækker, mange
Ca. 1m til ca. 2 m	Lodrette Tektoniske sprækker, mange
Ca. 2 m til 2,5-3 m	Horisontale og lodrette tektoniske sprækker, mange
Ca. 2,5-3 m til 4 m	Lodrette tektoniske sprækker, færre
Ca. 4 m	Redoxgrænsen
Ca. 4 m til 5 m	Lodrette tektoniske, meget få
Ca. 5 m og ned	Ingen viden

Sigerslev indeholder de samme makroporeenheder, men i lidt forskellige dybder (Figur 66). blandt andet ligger redoxgrænsen i 6 m's dybde, hvor den adskiller mængden af lodrette tektoniske sprækker.

Sandlinser forekommer i alle tre profiler. Tykkere sandlag og linser er ikke til stede i området, hvilket boringsdata også viser. Imidlertid findes små tynde, afgrænsede sandlinser (klasse: Sand stringers efter Kessler et al., 2013) i gennem hele profilet alle tre steder, men især i bunden af den oxiderede zone. Desuden er der en del kalkklaster og - linser i moræneleret.

Morænelerslagene blev aflejret i slutningen af Weichsel istiden under det Ungbaltiske isfremstød og kan eventuelt være dannet indenfor to forskellige faser. (19000-17000 år før nu).

Lokaliteterne i Dalmose-Fuglebjerg området: Flakkebjerg og Fårdrup har en sprækkeopbygning meget lig med Stevns lokaliteterne.

Hedeland området. De seks lokaliteter viser store sprækkevariabilitet blandt andet på grund af en mere heterogen geologisk opbygning end på Stevns. Sprækkerne når i de fleste tilfælde ned til et potentielt vandførende sandlag på op til 2 m's tykkelse, og der flere tilfælde, hvor de passerer igennem dem og forsætter i et underliggende morænelerslag.

Imidlertid er der sammenlignelige forhold på Kamstrup, Tune, Kallerup og Slæggerup lokaliteterne:

Terræn til ca. 1m	Lodrette bioporer og udtørringssprækker, mange
Ca. 1m til ca.2 m	Lodrette tektoniske sprækker, mange
Ca. 2 m til ca. 4m	Horisontale og lodrette tektoniske sprækker, mange
Ca. 4m	Første redoxgrænse
Ca. 4m til 7-10 m	Lodrette tektoniske sprækker i reduceret ler samt anden redoxgrænse i varierende dybde, aftagende sprækkemængde
Under 10 m	Stedvis lodrette sprækker, få

Lokaliteterne Høje Tåstrup og Vadsby har lidt afvigende sprækkeforhold, men få dybe sprækker ned til 8,5 m - 10 m's dybde.

10.2 Makroporer og dybden

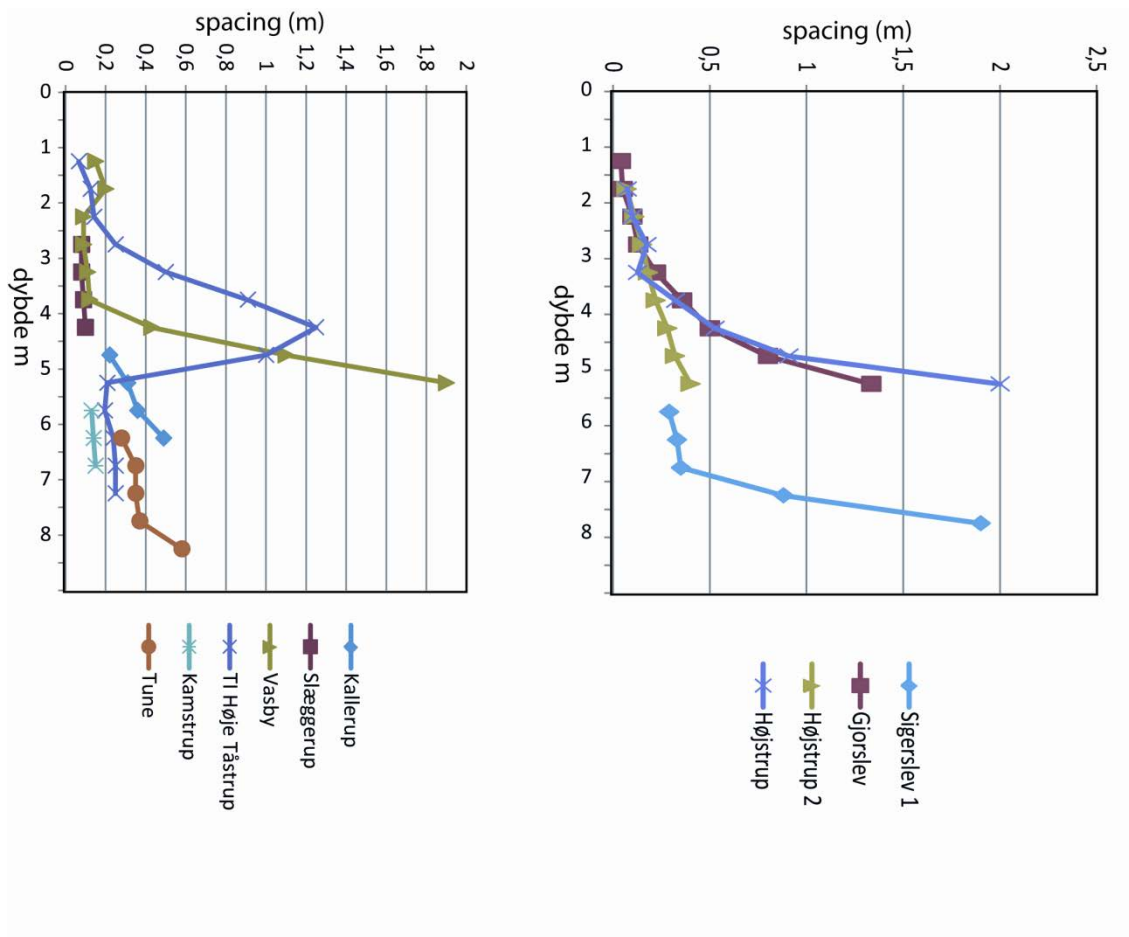
Udviklingen af makroporerne i dybden ned mod grundvandsmagasinerne er vigtig for om strømning kan forekomme.

Figur 91 viser sprækkedybden og gennemsnitsafstanden (spacing) imellem alle stejlt-hældende sprækker, hvis de var anbragt parallelt med hinanden. Dette er en udemærket måde at illustrere sprækkeafstandens ændring med dybden (Jørgensen et al., 2003, Ruland et. al, 1991).

Figur 91 b viser forholdene på Stevns, hvor der på Højslev og Gjorslev sker en hurtig ændring af sprækkeafstanden omkring 4 m's dybde ved redoxgrænsen, og afstanden mellem de lodrette sprækker stiger til mellem 1,5 m og 2 m's afstand. På Sigerslev ser sprækkeændringen også at ske omkring redoxgrænsen, hvor der sker en hurtig ændring til ca. 2 m's afstand.

De horisontale sprækker er ikke medtaget i dette diagram, da tætheden af horisontale sprækker afhænger af morænelerets struktur (lagdelt, massivt, shearet).

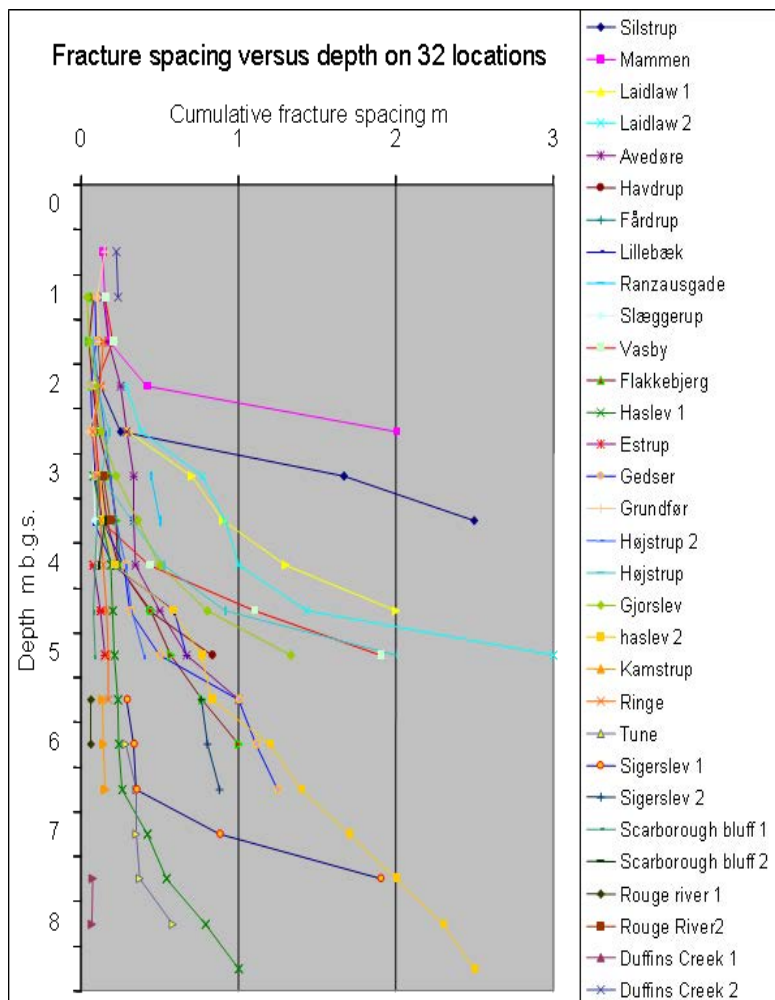
De horisontale sprækker optræder især i morænelerslagenes øverste 3 m (fryse-tø sprækker) samt i bunden af lerlagene som tektoniske sandslirer. De har en stor betydning for udvikling af horisontal strømning i perioder med højt grundvandsspejl, men ellers er det de stejlethældende sprækker, der styrer nedsivning til grundvandet.



Figur 91. Sammenhæng mellem dybde og sprækkeafstand (spacing) på lokaliteterne i: a. Hedeland området, b. Stevns området.

Figur 91 a viser Hedeland området. Vadsby lokaliteten ligner Stevns forholdene. På Høje Tåstrup stiger afstanden til 2 m ved 4 m's dybde, men falder igen til 0,2 m under den første redoxgrænse. For Slæggerup er der en afstand på under 0,2 m ned til 4,5 m's dybde, mens der for de øvrige lokaliteter gælder, at der er op til 0,6 m's i 6-8 m's dybde. Disse forhold er i oxideret ler på større dybde.

Figur 92. viser samme tema som figur 91, men for flere danske og udenlandske feltlokaliteter. Det er tydeligt, at for næsten alle lokaliteter øges spacingen markant med dybden inden for ca. 9 m's dybde, og figuren viser også ændringer mellem 4 m og 6 m's dybde omkring redoxgrænsen.



Figur 92. Variation af gennemsnitlig afstand mellem sprækker (spacing) i forskellig dybde på 32 lerlokaliteter, heraf 6 udenlandske. Sprækkeopmålingen er udført efter samme principper og metoder (Fra Klint, 2009).

Samlet danner makroporerne et tre-dimensionalt netværk til mindst 10 m's dybde med størst intensitet indenfor de øverste 3-4 m, men som aftager i antal nedad. De fleste undersøgelser har fulgt makroporesystemerne ned til 5-6 m i udgravninger, hvor også deres tre-dimensionelle optræden er bedømt. Fra ca. 6 m og ned til grundvandsmagasinerne under 10 m's dybde kan det sandsynliggøres, hvordan spækkesystemerne vil udvikle sig ud fra de få eksempler, som kendes der går dybere ned. Hvis morænelerslaget er tykkere er der kun begrænset viden om makroporerne.

10.3 Morænelers tykkelse og oxidationsforhold

For hvert område er relationerne mellem den totale lertykkelse og oxidationsforholdene behandlet. Dette er væsentligt, fordi det er antaget, at der er en sammenhæng mellem den oxiderede lertykkelse og dybden af makroporer. Dybden til redoxgrænsen kan variere flere meter, ligesom grænsen kan variere op til 0,5-1 m indenfor kortere afstande. Desuden kan redoxgrænsen fremtræde både horisontalt som vertikalt langs sprækker (Figur 93).

Oxidation langs dybe sprækker er vigtig, fordi dette kan være indikativt for, hvordan redoxgrænsen bevæger sig nedad i lerlagene. Fænomenet er fundet på mange af lokaliteter i Danmark og kendes f..eks. også i Canada (Lindhardt et al., 2001, Ruland et. al, 1991).

Omkring spækkerne er der en tynd zone ("halo"), som indeholder gulbrune iltede produkter af jernholdige mineraler og sorte produkter fra manganholdige mineraler, og der kan også være nedbrydningsprodukter af organisk stof (Figur 94 og 95).



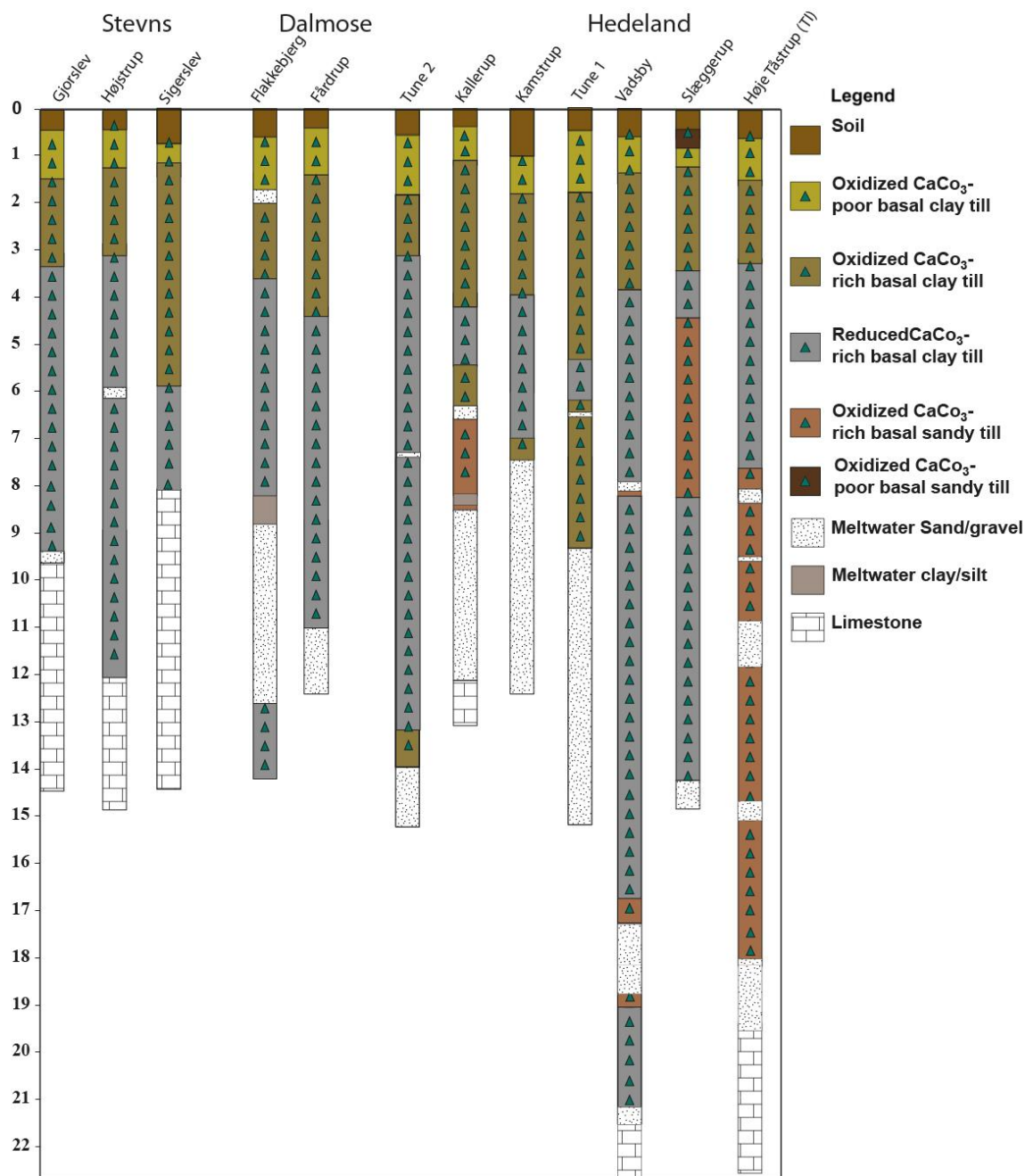
Figur 93. Kystblotning fra Gedserodde på Sydfalster med velblottede sprækker. Bemærk grænsen mellem den oxiderede zone (brun og gulbrun) og den reducerede zone (grå): redoxgrænsen. Linjen bølgjer gennem moræneleret, og den oxiderede del følger rodzoner og sprækker langt ned i den reducerede zone (Foto: K.E.S. Klint).



Figur 94. Overfladeudfældning på sprække. Her jernoxider (rust). (Foto: K.E.S. Klint).



Figur 95. Mangan - og jernudfældninger på sprækkeoverflade. (Foto: K.E.S. Klint).

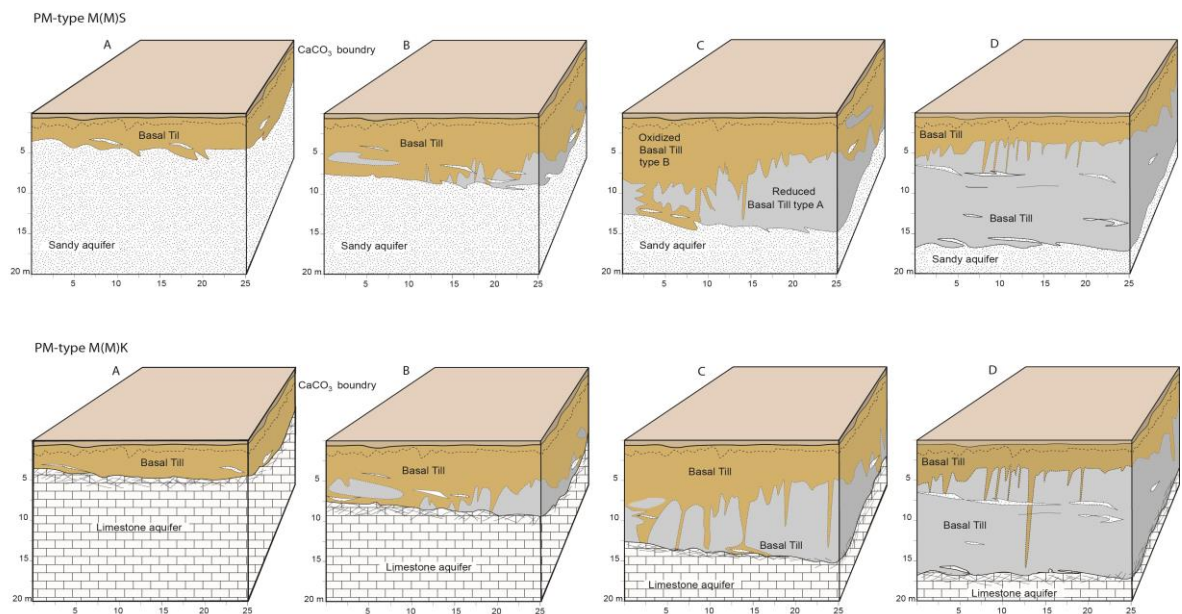


Figur 96. Variation af lertykkelse, dybde til redoxgrænsen i lerlagene og relation mellem kalkindhold og redoxforhold Stevns området, Hedeland området og Dalmose-Fuglebjerg området.

Stevns området

I Stevns området kan morænelerstykkelsen være op til mindst 20 m, men er almindeligvis mindre. På de tre lokaliteter (Figur 96) er der mellem 8 og 12 m ler. Tykkelsen af den oxideret og reduceret zone varierer noget, men figur 68. viser, at det reducerede ler kan være 0 m eller ret tyndt i området.

Forholdene i Dalmoose-Fuglbjerg området ligner Stevns (se figur 96), selv der er tale om et sandmagasin under morænelerslagene (Figur 97).

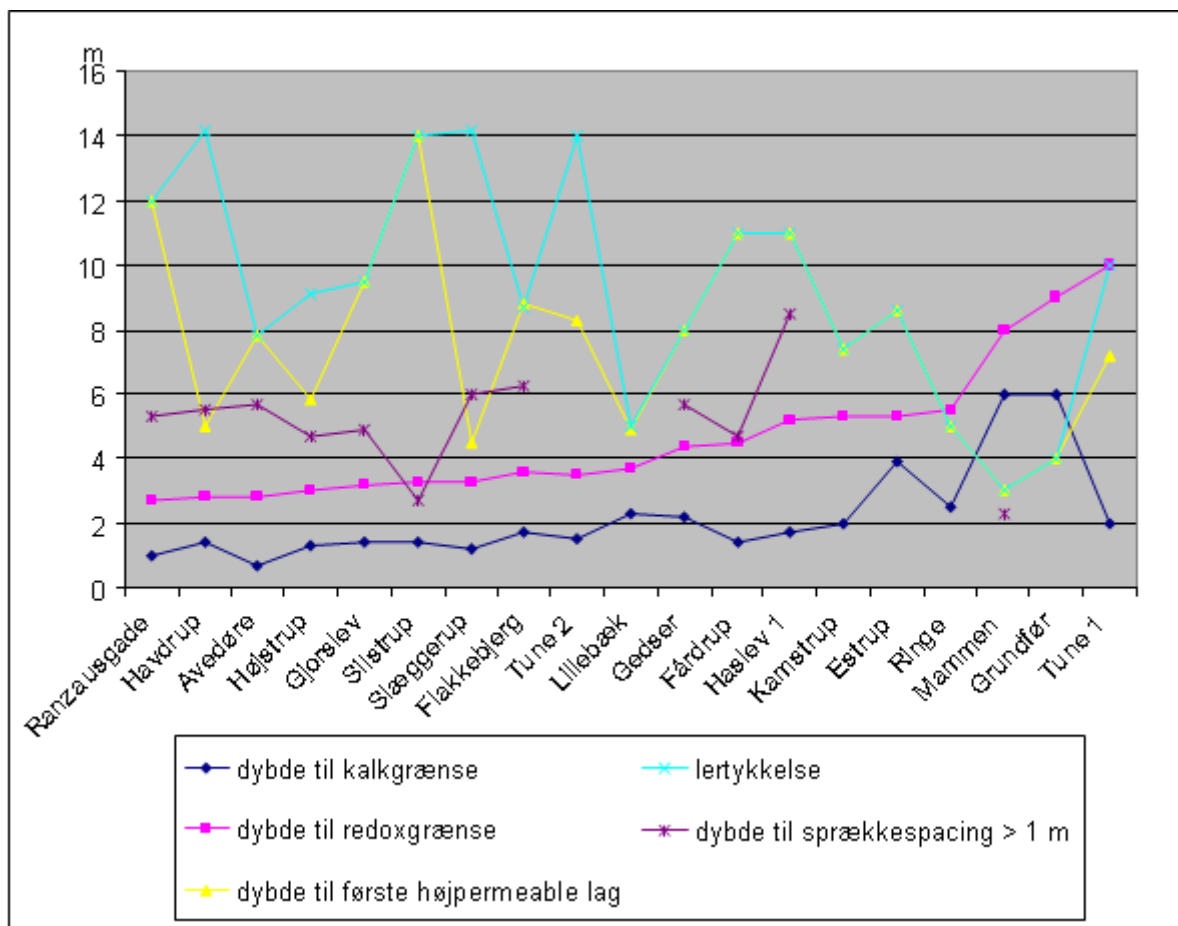


Figur 97. Eksempler på forskellige typer af oxidationsforhold i moræneler over sand (øverste række) og over kalk (nederste række).

Hedeland området

I Hedeland området viser figur 77 og 88 også, at lagtykkelser op mod de 20 m eller mere forekommer, men i modsætning til Stevns området indeholder moræneleret her mange mindre sandlag. Ligesom i Stevns er der mange tilfælde, hvor der lige under terræn er tykt oxideret ler, som her kan nå ned til 10 m's dybde (Figur 88).

Feltlokaliteter og en række boreriger viser gentagelser af oxideret-redoxgrænse-reduceret situationen, dog således at det nedre reducerede ler kun i nogle tilfælde findes. Det øvre reducerede ler er ofte fragmenteret (Figur 85). Dette betyder, at tektoniske sprækker når ned i det nedre oxiderede ler samt i sand-gruslag derunder. De nedre moræneenheder er desuden ofte udviklet som morænesand.



Figur 98. Relationer mellem lertykkelse, dybden til redoxgrænsen i lerlagene, dybde til redoxgrænsen, dybde til sprækkespacing større end 1 m og dybde til første højerpermeable lag. (Fra Klint, 2009).

Figur 98 viser relationerne mellem en række parametre på danske feltlokaliteter, der bl.a. viser, at tykkelsen af den oxiderede zone og redoxgrænsens beliggenhed ikke varierer afhængigt af, hvor tykt morænelerlaget er. Nyere undersøgelser har dog vist, at der er en positiv korrelation mellem den reducerede zones tykkelse og morænelers tykkelser over 8-10 m (Klint et al., 2013).

10.4 Pesticider i grundvandet

Inden for Stevns og i Hedeland områderne forekommer pesticider og nedbrydningsprodukter i samme andel af de borer, hvor der er analyseret for pesticider, i ca. 60 %. I Dalmoose findes der pesticider i ca. 20 % af de undersøgte borer.

Grænseværdien for pesticider for drikke- og grundvand på 0,1 µg/l var i de to områder Hedeland og Stevns overskredet i ca. 30 % af de analyserede boringer, mens grænseværdien var overskredet i ca. 10 % i Dalmose.

I Hedeland området findes ikke tykkere lerlag end på Stevns, og der er ikke forskel på udbredelsen af pesticider i de to områder. I Dalmose er den gennemsnitlige tykkelse af lerlagene i boringer med fund næsten fem gange så stor som på Stevns og i Hedeland.

Den mulige sårbarhed overfor pesticider i Hedeland og på Stevns er ikke afhængig af dybden til kalklag. Kalkdybden betyder alene, at pesticidfund i Stevnsområdet forekommer ca. 10 m højere sammenholdt med Hedeland, hvor kalken ligger dybere.

Antallet og tykkelsen af sandlag har formodentlig stor betydning for udvaskning af pesticider i Hedeland og i Dalmose, mens det formodentlig er den tynde og oxiderede moræneler på Stevns, det har betydning for udvaskning og transport af pesticider og nedbrydningsprodukter til de dybereliggende grundvandsmagasiner.

10.5 Makroporer, redoxforhold og lertykkelser

Det er påvist fra mange lokaliteter i Danmark og udlandet, at der er en væsentlig aftagen af sprækkemængden fra den oxiderede zone til den reducerede zone (f.eks. Ruland et al., 1981, McKay & Fredericia, 1995, Klint, 2001, 2004, 2009, Klint & Gravesen, 1999, Harrar et al., 2007), hvilket denne rapport også demonstrerer. Det vil antagelig også betyde en aftagen i bulk hydraulisk ledningsevne og forbindelsesnetværket mellem sprækkerne og sandlinserne. Transport af forurening til grundvandsmagasinerne er derfor især kontrolleret af den reducerede zones tykkelse og strukturer.

Ud fra ovenstående gennemgang af forholdene på de to områder, ser det ud til, at der er generelle relationer mellem makroporer, lertykkelser og redoxforhold.

De tektoniske sprækker og sandlinser er dannet under sidste istid, mens frost-tø sprækker og udtøringsprækker er dannet efter istiden og dannes stadig i dag, mens bioporer er dannet gennem postglacial tid og nutid.

Grundvandspejlets fluktuationer har især haft betydning efter istiden. Den umættede zone har ændret sig fra tidsrummet, hvor store dele af landet var dækket af skov til ca. 6000 år før nu, hvor man begyndte at dyrke jorden og fælde skoven (Rasmussen et al., 2007). Skovens store behov for vand sænkede grundvandspejlet, mens kornplanternes mindre forbrug hævede det relativt.

I den oxiderede zone findes alle typer makroporer, mens der i den reducerede zone næsten kun er tektoniske sprækker og sandlinser. Dannelse af sprækker og sandlinser er en fysisk proces, bioporer en biologisk proces, mens dannelse af en oxideret zone er en geokemisk proces.

Tilstedeværelse af de mange sprækker og sandlinser, som er dannet først, tyder på, at det er makroporerne, som er med til at styre udviklingen af den oxiderede zone, da de tidligt især har skabt mulighed for transport af ilt i luft og vand. Oxiderede forhold omkring de dybere sprækker viser, at iltningen forgår her samtidig med, at den også foregår i matrix. Senere dannede makroporer har været med til at forcere processen. Når mængden af makroporer aftager væsentlig vil processen aftage i hastighed, da videre bevægelse overvejende vil ske i matrix. Dette understøttes også af faldet i den hydrauliske ledningsevne ned mod redoxgrænsen. Det vil betyde, at processerne der medvirker til redoxzonens nedadgående bevægelse, sandsynligvis fremover vil foregå langsommere.

Der er imidlertid en række andre faktorer, som er medvirkende til, hvordan relationerne mellem lagtykkelser, sprækker og geokemi har udviklet sig, bl.a. andet den geologiske dannelseshistorie. Nedenfor er der derfor beskrevet to forskellige situationer, en mere simpel, som kunne være for Stevns og Dalmoose-Fuglebjerg områderne og en mere kompliceret, som kunne være for Hedeland området.

Model 1

Modellen tænkes gældende for forhold, hvor overfladenært moræneler (ox-re) ligger direkte ovenpå grundvandsmagasiner af kalk (Stevns) og sand og delvis overpå lavpermeabile lerlag

Fra slutningen af sidste istid (ca. 16 000 år før nu) til slutningen af Senglacial (11700 før nu).

Terrænnære morænelersaflejringer var gennemsat af vertikale, tektoniske sprækker, horisontale shear sprækker og indeholdt sandlinser overvejende dannet af et isfremstød i sidste istid, Weichsel, fra de Ungbaltiske fremstød (ca.17000-16000 før nu). Gennem det meste af Senglacial lå der stadig usmeltede dødislegemer, og der var udbredt permafrost, bortset fra i nogle kortvarige varmeperioder. Moræneleret var sandsynligvis gråt, kalkholdigt i matrix og reduceret til terræn, selv om en begyndende iltning i omkring og under gletsjerne og i varmeperioderne ikke kan udelukkes.

Fra start af Postglacial (11700 år før nu) til ca. 6000 før nu.

Der begyndte en udvaskning af kalken i moræneleret, hvilket først førte til forøget porøsitet. Dannelse af fryse-tø sprækker og udtørningsprækker begyndte, ligesom dannelse af bioporer fra dyr og planter startede. Frem til ca. 6000 år før nu, var store dele af Danmark dækket af skov, hvilket prægede grundvandets fluktuationer. De mange træer var vandkrævende, og en sænking af grundvandet kan tænkes. Rester af store rødder fra dette tidsafsnit kendes. I den umættede zone skete en iltning af moræneleret i matrix relativt hurtigere end i den mættede zone, da ilt diffusion i luft sker væsentligt hurtigere end i vand. Fra makroporerne formodes der også at være påbegyndt en oxidation.

Fra ca. 6000 før nu til nutid.

Omkring ca. 6000 år før nu begyndte rydning af skov, og landbrug med dyrkelse af korn startede. Presset på grundvandet blev mindre på grund af de mindre krav fra kornproduktionen. Ilttransport nedad i makroporerne og matrix i både luftform og opløst i vand gjorde, at redoxfronten bevægede sig nedad, så den nu befinder sig ved den nedre grænse for de fleste makroporer i form af sprækker og sandlinser. Grænsen ligger generelt i 3 – 5 m's dybde, selv dybere beliggenhed også kendes. Sprækkerne, som findes i den reducerede zone, har en stor afstand mellem sig (spacing), der hurtigt når op på 2 m. Hvor dybt sprækker når ned er vanskeligt at sige på grund af manglende data, men omkring 10 m's dybde ligner en realistisk grænse. Hvis det er makroporerne, som er med til at styre redoxgrænsens nedadgående bevægelse, ser denne bevægelse ud til at ville foregå meget langsomt i fremtiden. Under 10 m's dybde vil det antageligt primært være transport gennem matrix og sandlinser, der vil dominere.

Model 2

Modellen tænkes gældende for forhold med gentagne oxidations-reduktionsovergange i moræneler og morænesand over sandmagasiner + kalkmagasiner (Hedeland)

Modellen kan delvis beskrives som model 1, men væsentlig forskel er, at model 2 består af en gentagen af oxiderede-reducerede forhold præget af tilstedeværelsen af sandlag og store sandlinser, som kan ses på både feltlokaliteter og i borer.

De dybestliggende morænelerslag i Hedeland området er muligvis fra Saale istiden (sluttede for ca. 140.000 år siden)(Jakobsen, 1985) og en udvaskning og oxidation af disse lag kan være sket i Eem istiden (ca. 130000-115000 år siden) samt i del af den tidlige del af Weichsel istiden (sidste istid).

Området er også blevet overskredet af gletschere fra det Gammelbaltiske fremstød for ca. 55000 år til 50000 år siden, hvorefter der var en lang isfri periode på ca. 28000 år. Der synes ikke at være spor efter denne nedisning i Hedeland området, selv om enkelte indikationer af ældre moræneler fra det baltiske område er fundet (Jakobsen, 1985). Aflejringerne i Hedeland er tolket til at bestå af moræneler og smeltevandsaflejringer (Hedeland Formationen) fra Hovedfremstødet i sidste istid (ca. 27000-19000 år siden inkl. genfremstød) og fra de Ungbaltiske Isfremstød (ca. 19000-17000 år siden).

Fra sidste istid til slutningen af Senglacial (11700 år før nu).

Det geologiske set-up er en gentagen af lag med moræneler og morænesand overlappende sandlag dannet ved Weichsel isfremstødene: Hovedfremstødet i flere faser og det Ungbaltiske fremstød to faser. De sidstnævnte skete kort tid efter Hovedfremstødet og med et landskab med dødis og permafrost, har udvaskning og iltning har ikke været sandsynlig i dette tidsrum. Derfor er udgangspunktet model 1 med underliggende forhold.

Terrænnære morænelersaflejringer var gennemsat af vertikale tektoniske sprækker, horisontale shear sprækker og indeholdt sandlinser overvejende dannet af det isfremstød fra de Ungbaltiske fremstød, men dybereliggende sprækker kan eventuelt stamme

fra Hovedfremstødet. Gennem det mest af Senglacial lå der stadig usmeltede dødislegemer, og der var udbredt permafrost, bortset i nogle kortvarige varmeperioder. Moræneleret var gråt, kalkholdigt i matrix og reduceret til terræn, selv om en begyndende iltning i varmeperioderne ikke kan udelukkes.

Fra starten af Postglacial (11700 år før nu) til ca. 6000 før nu

Der begyndte en udvaskning af kalken i det øvre moræneler, hvilket først førte til forøget porøsitet. Dannelse af fryse-tø sprækker og udtørings-sprækker begyndte, ligesom dannelse af bioporer fra dyr og planter startede. Frem til ca. 6000 år før nu, var store dele af Danmark dækket af skov, hvilket prægede grundvandets fluktuationer, de mange træer var vandkrævende og en sænkning af grundvandet kan tænkes. Rester af store rødder fra dette tidsafsnit kendes. I den umættede zone skete en iltning af moræneleret i matrix og ved hjælp af makroporer. Det kan tænkes, at skiftende mættede - umættede forhold i både primære og sekundære i grundvandsmagasiner i de forskellige sandlag allerede begyndte at påvirke oxidationsforholdene.

Fra ca. 6000 år før nu til nutid

Omkring for ca. 6000 år siden begyndte rydning af skov, og landbrug med dyrkelse af korn startede. Vandstanden må være steget på grund af kornproduktionen. Iltransport nedad i makroporerne og matrix i både luftform og opløst i vand gjorde at redoxfronten bevægede sig nedad, men på en anden måde end under model 1.

På grund af en koncentration i af sprækker og sandlinser har redoxzonen bedre kunnet bevæge sig ned gennem områder, hvor den reducerede zone "fragmenteredes", og sprækkerne var i kontakt med større sandlinser og sandlag, som medvirkede til endnu en iltningzone. I den reducerede zone på stort set alle feltlokaliteter i Hedeland findes sprækker med gulbrun oxidationsudvikling omkring sprækkerne, som forsætter ned i en ny oxidationzone, og eksempler på "fragmenteringen" ses også flere steder, men især i Høje Tåstrup, Kallerup og Tune grusgrav.

Transport ved stempelstrømning i matrix kan også have været medvirkende på grund af forbindelse mellem de små sandlinser og store sandlag, især da de nedre oxiderede zoner primært består af morænesand med mange sandlinser.

Sprækkerne ser i denne model også ud til at stoppe eller aftage ved ca. 10 m's dybde antagelig i sandlag. Den anderledes transport gennem makroporerne og matrix gør, at den øvre iltede zone varierer mellem 3 og 5 m, mens den reducerede zone er meget variabel fra fraværende til 10 m og stedvis optræder som indslag i det oxiderede ler/sand. Under den oxiderede morænesand kan der stedvis igen træffes reduceret moræneler.

Sprækkerne i det øvre oxiderede moræneler ophører for det meste ved den øvre redoxgrænse, men ellers tiltager deres afstand. De spækker, som fortsætter ned i den reducerede zone har en voksende afstand mellem sig (spacing), der hurtigt når op på 2 m. Hvor dybt sprækker når ned er vanskeligt at sige på grund af manglende data, men omkring 10 m's dybde ligner en grænse, hvor de fleste sprækker er forsvundet. Makroporerne er sandsynligvis med til at styre redoxgrænsens nedadgående bevægelse, og denne bevægelse ser ud til at være vanskelig at vurdere i denne model, men vil nok også foregå meget langsomt i fremtiden.

10.6 Hovedkonklusioner

- Morærelers makroporer: Bioporer, sprækker og sandlinser har den største udbredelse indfor de øverste 3-5 m af jordlagene. Dybe enkelte sprækker kan nå ned til 10 m og stedvis antagelig dybere. Sandlinser kan træffes i flere horisonter.
- Antallet af sprækker aftager nedad i jordlagene og afstanden (spacingen) mellem lodrette sprækker vokser med dybden til f.eks ca. 2 m i 5 m's dybde på flere lokaliteter.
- Morænelers tykkelse er ikke styrende for redoxgrænsens beliggenhed. Redoxgrænsen kan variere meget dybdemæssigt og kan stedvis følges ned langs dybere sprækker i den reducerede zone.
- Redoxgrænsens beliggenhed ser ud til overvejende at være bestemt af, hvor de fleste makroporer forsvinder og deres netværk stopper. Derved kan redox-

grænsen bruges som indikator for, hvortil væsentlig nedadgående vandtransport i makroporer aftager.

- Sammenhængen mellem den oxiderede zone-redoxgrænsen-den reducerede zone og den totale lertykkelse og betydningen for makroporefordeling i dybden ser således ud til at kunne bruges som værktøj for vurdering af den mulige transport gennem moræneler ned mod grundvandspejlet.

11. Det Poly Morfologiske Koncept (PM konceptet)

PM konceptet bygger på, at aflejringer ældre end istiderne, de prækvartære aflejringer, havde et relief, som blev modificeret af overskridende gletscheris gennem istiderne. Istidernes gentagne isfremstød og tilbagesmeltning har derefter skabt en række landskaber til forskellig tid, som nu ligger oven på hinanden. Der er flere geomorfologiske landskaber; derfor det kaldes det for det Poly Morfologiske koncept.

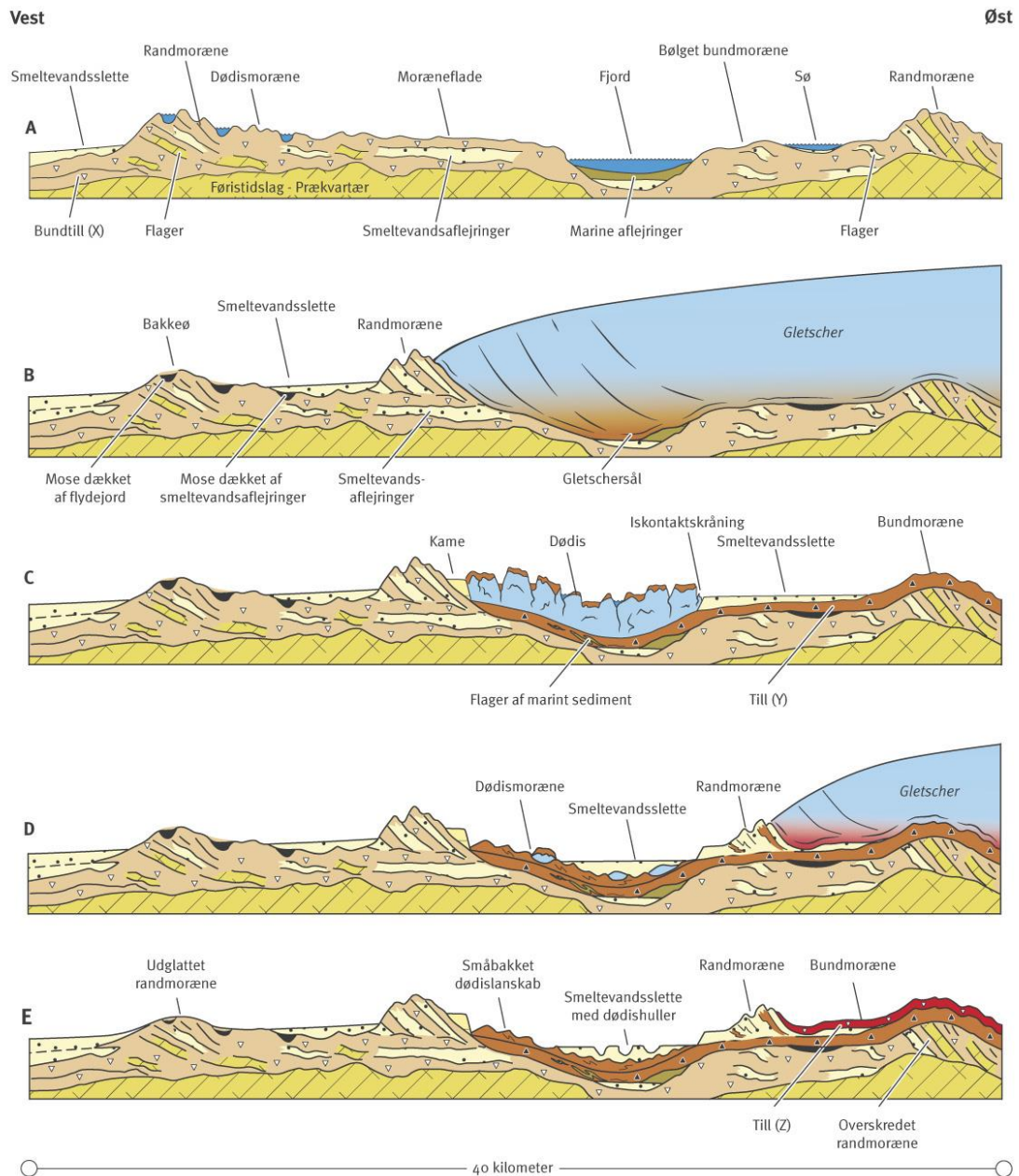
De geomorfologiske enheder forventes at have potentielt ensartede forhold i et egentligt heterogenisk geologisk miljø. Relationer mellem de kvartære og prækvartære enheder kan også forventes at have betydning for sprækkeudbredelse og sandlinser i moræneler. Metoder til regionalisering af sprækkers udbredelse er tidligere foreslået (Gravesen et al., 2001, Henriksen et al., 2000), men det poly morfologiske koncept ser ud til at være en operational metode, der inddrager flere relevante parametre.

11.1 Indhold

Den geologiske variabilitet i et givet område er essentiel for vurderingen af sårbarhed. I stærkt forstyrrede områder som f.eks. randmoræner med mange foldede og forkastede lag, kan der være mange "huller" gennem eventuelle lerlag. Her er betydningen af sprækker mindre væsentlig. Sådanne områder vil umiddelbart opfattes som meget følsomme, og punktobservationer lader sig ikke opskalere. Områder med store ensartede moræneflader og ganske få variationer i geologien vil derimod opfattes som mere homogene, og her vil sprækkeudviklingen antagelig være mere systematisk udbredt og i højere grad afhænge af lertykkelsen.

Det har også vist sig, at ikke kun den geomorfologiske ramme, men også de underliggende lag synes at have indflydelse på fordelingen af sprækker i moræneler. Således virker det sandsynligt, at områder dækket af en subglacial afsat landskabsform, som f.eks. en bundmoræne, der igen overlejrer en landskabsform domineret af højpermeable bjergarter, såsom en smeltevandsslette eller en opsprækket kalkoverflade, er kraftigere opsprækket end en tilsvarende landskabsform, der overlejrer en lavpermabel landskabsform som f.eks. issøler eller marint ler. En forståelse af det kvartære landskabs dannelse på forskellige tidspunkter er derfor vigtig, ligesom opfattelsen af hvor-

dan den prækvartære overflade er udformet er grundlaget. En model for dannelse af det kvartære landskab kan ses på figur 99.



Figur 99. Udvikling af de kvartære aflejringer gennem isfremstød og tilbagesmeltning (Fra Houmark-Nielsen et al., 2005).

Ved udarbejdelse af det polymorfologiske kort indgår der en række eksisterende data-samlinger og eksisterende kort som:

1. Jupiter boringsdatabasen (Gravesen & Fredericia, 1984, GEUS, 2013a).

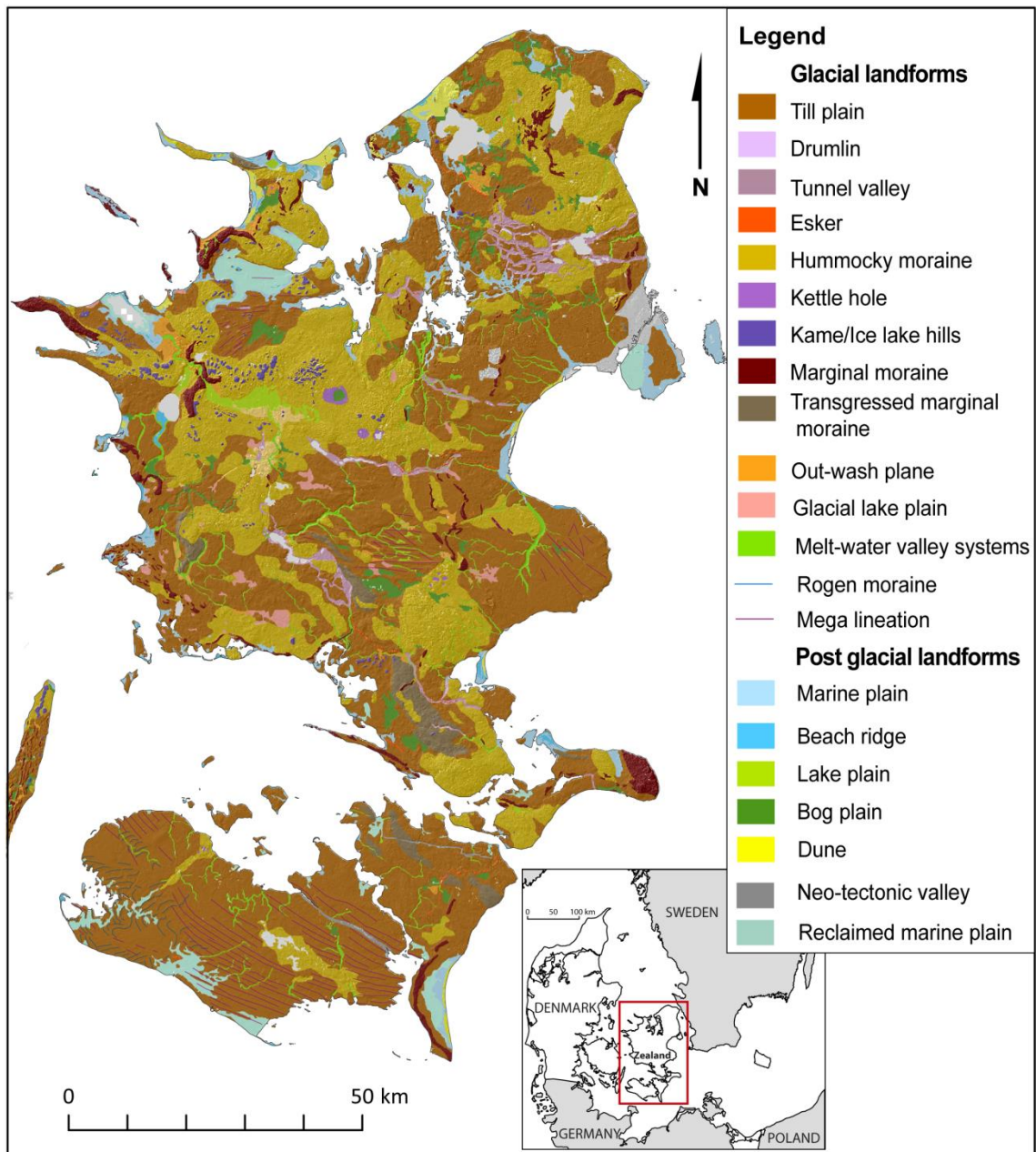
2. Gerda geofysikdatabasen (Møller et al., 2009, GEUS, 2013b).
3. De Geologiske Basisdatakort i 1:50.000 (Andersen & Gravesen, 1989).
4. De Kvartærgeologiske Kort i 1:25.000 (Jakobsen et al., 2011, Gravesen et al., 2006).
5. Det Geomorfologiske Kort i 1:250.000 (Jakobsen, 2012).
6. Den digitale terrænmodel (GST, 2013).
7. Det Prækvartære Kort over Danmark i 1: 500.000 (Håkansson & Pedersen, 1992).
8. Kort og geologiske modeller fra Grundvandskortlægningen (GEUS, 2011)
9. Data fra eksisterende litteratur.

Et eksempel på det geomorfologiske kort ses på figur 100.

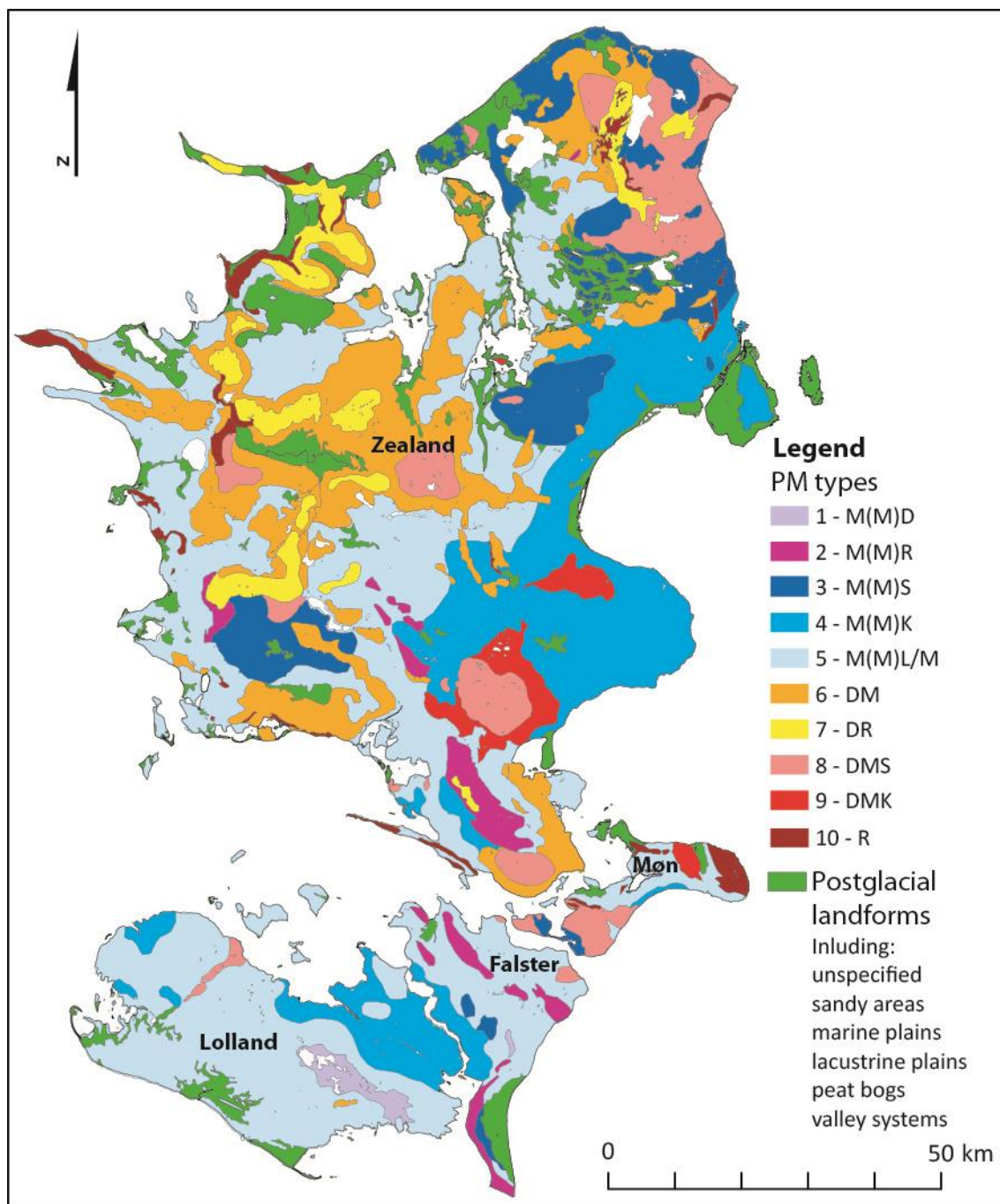
Der er en række enheder, som er grundlaget i det polymorfologiske kort. Det er de basale geomorfologiske landformer: Moræneflade: M, Dødismoræneflade: D, Randmoræne: R, Hedeslette: S som gælder for de kvartære forhold, og for de prækvartære aflejringer er det: Kalkaflejringer: K, og Leraflejringer: L .

Disse enheder kan så kombineres ind i PM typer, hvor to eller flere enheder ligger over hinanden. M(M)K betyder således en eller flere moræneflader ovenpå kalkaflejringer, M(M)S betyder en eller flere moræneflader ovenpå hedeslettesand, og DM betyder dødislandskab ovenpå moræneflade.

En nærmere beskrivelse af konstruktionen af det polymorfologiske kort kan læses i Klint et al. (2013). Det polymorfologiske kort er foreløbigt blevet udarbejdet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn i målestoksforhold 1:200 000 (Figur 101), og de forskellige kombinationer af geomorfologiske enheder er omtalt i figurteksten.



Figur 100. Geomorfologisk kort over Sjælland, Lolland, Falster og Møn (Fra Klint et al., 2013 og Jakobsen, 2012).



Figur 101. Polymorfologisk kort over Sjælland, Lolland, Falster og Møn (Fra Klint et al., 2013). Kortet er opdelt i følgende landskabskonfigurationer: 1. Moræneflade over dødislandskab M(M)D, 2. Moræneflade over randmoræne M(M)R, 3. Moræneflade over smeltevandsslette M(M)S, 4. Moræneflade over kalkoverflade M(M)K, 5. Moræneflade over leraflejringer M(M)L(M), 6. Dødislandskab over moræneflade DM, 7. Dødislandskab over smeltevandsslette DS, 8. Dødislandskab over moræneflade og smeltevandsslette, 9. Dødislandskab over moræneflade og kalkaflejringer, 10. Randmoræne R. Derudover er postglaciale landformer både marine områder (hævet havbund og inddæmmede områder) og ferskvandsaflejringer indtegnet.

En beskrivelse af en række PM-områders karakterer findes i bilag 1.

11.2 Muligheder for anvendelse

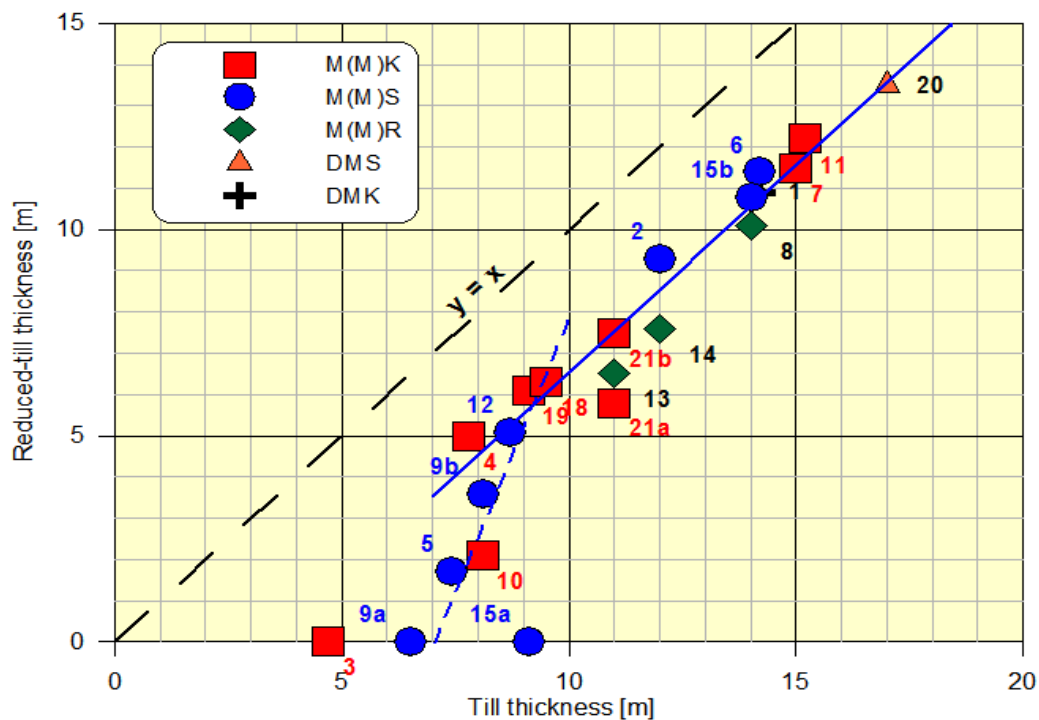
Inddeling af landarealet i enheder med ensartet opbygning kan anvendes til blandt andet en analyse af mulige sprækkerforekomster i de forskellige morænelers enheder. I Tabel 9 gives en generel oversigt over mulige relationer imellem landskabselement, morænelerstyper og potentielle sprækkeforekomster. Disse relationer er ikke direkte påvist, men er baseret på en bedømmelse ud fra erfaringer med det glaciale landskabs dannelse og dynamik, herunder sprækkedannelse (Klint et al., 2013).

PM type	Mulig udvikling af sprækker i moræneler som er mindre end 10 m tykt	
1 M(M)D	M-H	Moræneflade med stor skala heterogenitet i de underliggende dødismoræneaflejringer, som giver lokale veldrænede forhold og dannelse af lokale sprækker i den overliggende moræneflades bundmoræne.
2 MR	M-H	Lignende forhold som 1 med mindre randmorænen er domineret af ler.
3 M(M)S	M	Generelt veldrænede forhold i den underliggende smeltevandslette som kan medvirke til udstrakt sprækkedannelse.
4 M(M)K	M	Samme som 3, men dræningsforholdene i kalkaflejringerne kan variere i højere grad afhængig af sprækketype og sprækkedannelse i kalkaflejringerne herunder producerende færre gennemgående sprækker.
5 M(M)L	L	Lav permeabelt ler dannet is ø eller hav, som ligger under en moræneflade kan medvirke til ringe dræning under moræneleret og dominerende blød deformation som resulterer i ringe sprækkedannelse.
7 DR	H	Høj geologiske heterogenitet på grund af højt indhold af sandlinser kan forventes i dødislandskab på grund af en usystematisk aflejring af moræneaflejringer og smeltevandsaflejringer. Kombineret med heterogeniteten i underliggende randmoræne aflejringer anses denne PM type for at være blandt de mest heterogene.
8 DMS	M-H	Skønt dødislandskabs moræneaflejringer overlejrende en bølgende moræneflade har en potential heterogenitet, er denne PM type ofte karakteriseret af bundmoræne under dødistopografien, der danner en nogenlunde vandret horisont over en smeltevandslette.
9 DMK	M-H	Som 8 men med underliggende kalkaflejringer
10 R	M-H	Randmoræner varierer i heterogenitet fra mellem i systematisk deformerede rygge til høj mere heterogene afsmeltningmoræner opblandet med andre aflejringer.

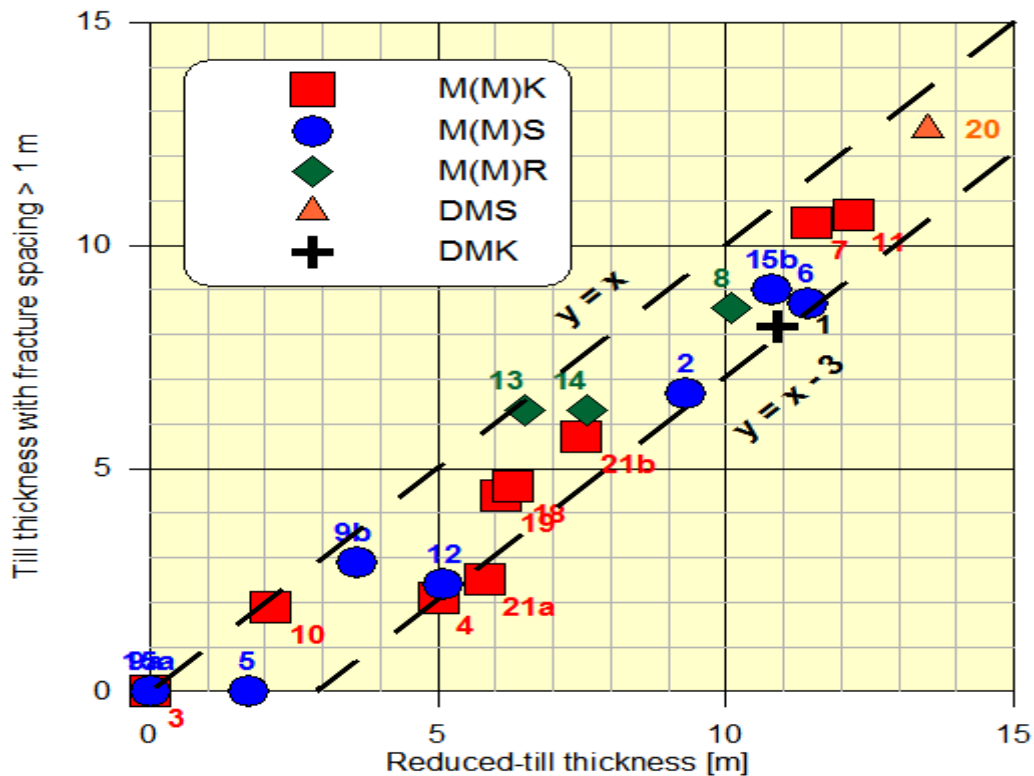
Tabel 9. Relationer mellem PM enheder (se figur 101) og sandsynlige sprækkefordelinger i moræneler bedømt ud fra erfaringer og ekspertise indenfor kvartærgeologi, men forholdene er ikke verificeret. Aflejringerens kompleksitet er vurderet som L: lav, M: mellem og H: høj. (Fra Klint et al., 2013).

Relationer mellem reduceret morænelerstykkelse og total morænelerstykkelse indenfor PM områder er vist i figur 102. Denne form for analyse er foretaget ved behandling af lokaliteter og borer i Stevns og Hedeland områderne.

Figur 103 viser relationer mellem morænelerstykkelse med sprækkemellemrum større end 1 m og reduceret morænelerstykkelse indenfor PM områder. Figuren antyder, at reduceret moræneler indeholder sprækker ned til 3 m under redoxgrænsen.



Figur 102. Relationer mellem total morænelerstykkelse og reduceret morænelerstykkelse i forskellige PM områder (Fra Klint et al., 2013).



Figur 103. Relationer mellem morænelerstykkelser med sprækkemellemrum (spacing) større end 1 m og reduceret morænelerstykkelse (Fra Klint et al., 2013)

11.3 Sammenfatning

Det Poly morfologiske koncept er en nyskabelse, fordi det kombinerer flere geologiske/geomorfoligske enheder, så det er muligt at inddele Danmarks areal i delarealer med ensartede opbygning. Desuden kan gives vurderinger om sprækkeforhold i leraflejring ud fra den geologiske opbygning.

De polymorfologiske kort er indtil videre kun fremstillet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn, men PM-konceptet fremstår også som et muligt grundlag for inddeling af resten af lerarealet i Danmark ud fra de overordende terrænnære landformer og øvrige data, hvilket er nødvendigt for at have det fulde billede af leraflejringerens udbredelse og variation.

Konceptets styrke er, at det anvender kombinationen af data fra feltlokalteter: makroporer og redoxforhold med lertykkelser fra borer og geofysik, og dette kan også bruges til at opstille konceptuelle modeller for PM-områderne. Det polymorfologiske korts sammenstilles i lille målestok (1:200.000), men da de geologiske forhold er variable selv indenfor de udpegede polymorfologiske områder, er det muligt at opdele disse

yderligere ud fra detailoplysninger om arealerne såsom feltlokaliteter, boringer og geofysik, som er beskrevet i afsnittene 7, 8, 9 og 10. Dette kortlægningsniveau kan fungere som ramme for udpegning af pesticidfølsomme områder.

12. Relationer til VAP lermarkerne

12.1 Indledning

Der findes tre VAP lermarker: Silstrup og Estrup i Jylland og Faardrup på Sjælland. De geologiske forhold på Estrup lokaliteten er forskellig fra Stevns og Hedeland områderne (Saale moræneler over sand), men området indgår alligevel, da der er fællestræk til de to andre områder med Weichsel moræneler.

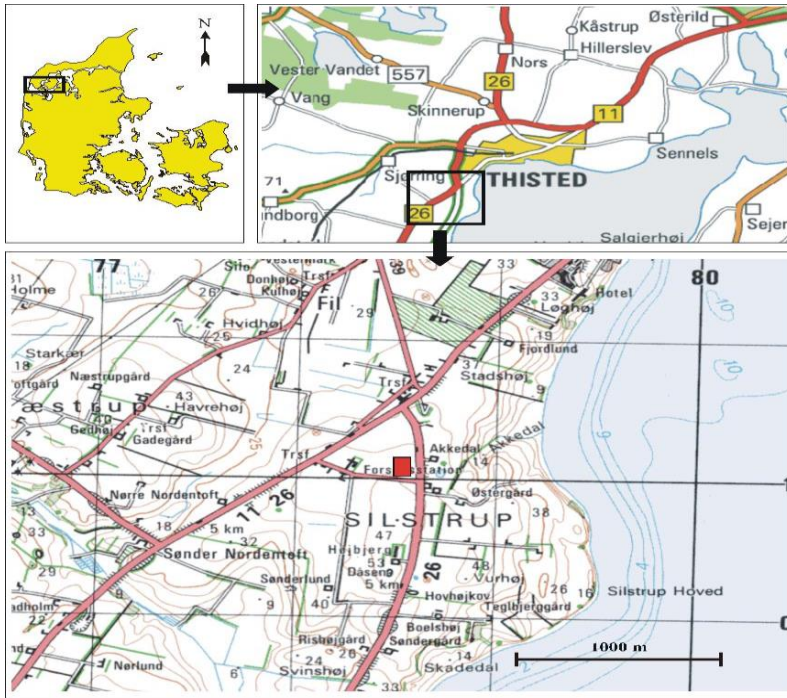
12.2 VAP markernes karakterer

Områderne er beskrevet i Lindhardt et al.(2001). Herunder er geologi, makroporer og geokemi kort beskrevet for de tre lokaliteter. Yderligere oplysninger kan ses i bilag 6. Faardrup er også beskrevet i forbindelse med den geofysiske vurdering, afsnit 8. Mere materiale ses i bilag 2.

SILSTRUP

Silstrup ligger syd for Thisted (Figur 104), og er beliggende lige nord for Hovedopholds-linjen, som blev dannet af Hovedisfremstødet i slutningen af sidste istid, Weichsel (ca. 19000 år siden). Gletsjeren har ved sin bevægelse fra NØ til SV skubbet de foranliggende aflejringer op i flager, der består af moræneler, morænesand og de meget ældre aflejringer som oligocænt glimmerler og -silt samt eocænt moler (Figur 105 og 106). Disse flager, som også er foldede, kan iagttages i klinten lige nedenfor lokaliteten mod øst omkring Silstrup Hoved, hvor der i den komplekse opbygning kan spores forskellige isfremstød (Gry, 1940).

Området er således en del af et randmoræneområde med forstyrrede lag dannet ved glacialtektonik. Området er endnu ikke klassificeret i forhold til PM-konceptet, men det må forventes, at det enten tilhører klassen MR: Moræneflade over Randmoræne eller R: Randmoræne..



Figur 104. Kort over Silstrup VAP-lokalitetens beliggenhed (Rød firkant) samt Silstrup Hoved. (Fra Lindhardt et al., 2001)



Figur.105. Silstrup klintens hældende flager med eocænt moler til højre (nord) og oligocænt glimmerler til venstre (syd). (Foto: M. Binderup).

Baseret på grundlag af en udgravning og boringer omkring udgravningen samt oplysninger i Lindhardt et al (2001) kan området karakteriseres geologisk på følgende måde i fire enheder:

Enhed 1. Fra terræn til 0,5 m under terræn

Mørk gråbrun muld og muldholdigt ler med højt organisk indhold, store mængder bioporer samt mange udtøringsprækker.

Enhed 2. Fra 0,5 m til 1,5 m under terræn

Kalkfrit moræneler i gulbrune og brune farver med bioporer og stedvis findes udtøringsprækker. Der træffes en del rødgyule og rødbrune pletter, og leret er ofte broget. Der er mange horisontale sprækker fra 0,8 m til 1,5 m. Moræneleret er forvitret, udvasket og oxideret.



Figur 106. Hældende flager af moler og glimmerler i Silstrup klinten. Bevægelsen er forgået langs en forkastning (overskydningsplan) mellem moler og glimmerler, og det ældre lyse moler er skudt hen over det yngre mørkebrune glimmerler. (Foto M. Binderup).

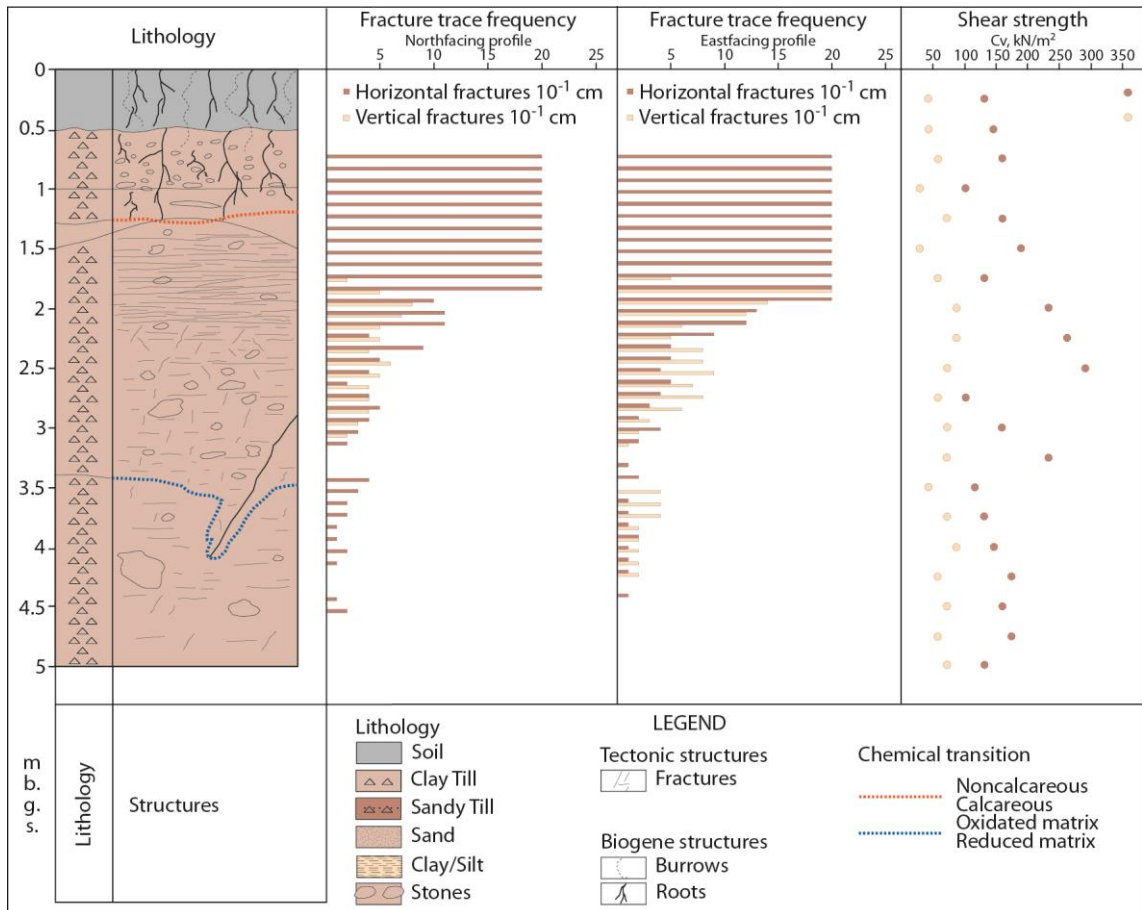
Enhed 3. Fra 1,5 m til mellem 2,4 m og 4,8 m under terræn

Kalkholdigt moræneler i gulbrune og brune farver. Der findes talrige små lodrette og sublodrette sprækker, men mængden er aftagende nedad. Horisontale og subhorisontale sprækker træffes især mellem 1,5 m og 2,5 m's dybde. Leret er oxideret, og især omkring sprækker er der en særlig stærk gulfarvning p.g.a. oxidation af jernholdige mineraler. Der er et stort indhold af kalk- og flintgruskorn.

Enhed 4. Fra 2,4 m/4,8 m til 13 m u. terræn

Enheden består af kalkholdigt olivengråt og gråt moræneler med mange kalk- og flintgruskorn og tertiære lerklaster (glimmerler og fedt grønt ler). Der træffes spredte horisontale sprækker ned til 5 m, og de antages at bliver færre nedad. Enheden indeholder også oligocænt, mørkt gråbrunt, glimmerler og-silt, og både dette ler og moræneleret indgår i de opskubbede flager. Boringsdata antyder, at redoxgrænsen skærer henover både moræneler og glimmerler. Der er kun få makropore data (til 3,5 m- 4,5 m) fra denne reducerede morænelersenhed i form af en sublodret sprække med gul jernoxidation rundt om, og denne begyndende oxidation af leret antydes også i intakte boreprøver. Det tyder på fortsat nedadgående oxidation.

De opskubbede flager er begrænset af forkastningsplaner (overskydninger), der kan forventes at have samme orientering som i Silstrup Hoved klinten (Retning: Ca. 166 ° og hældning på mod N og NØ). Forkastninger kan være lukkede ved lerudtværing under bevægelsen af lagene, men de kan også være åbne og fungere som transportvej for vand og stoffer.

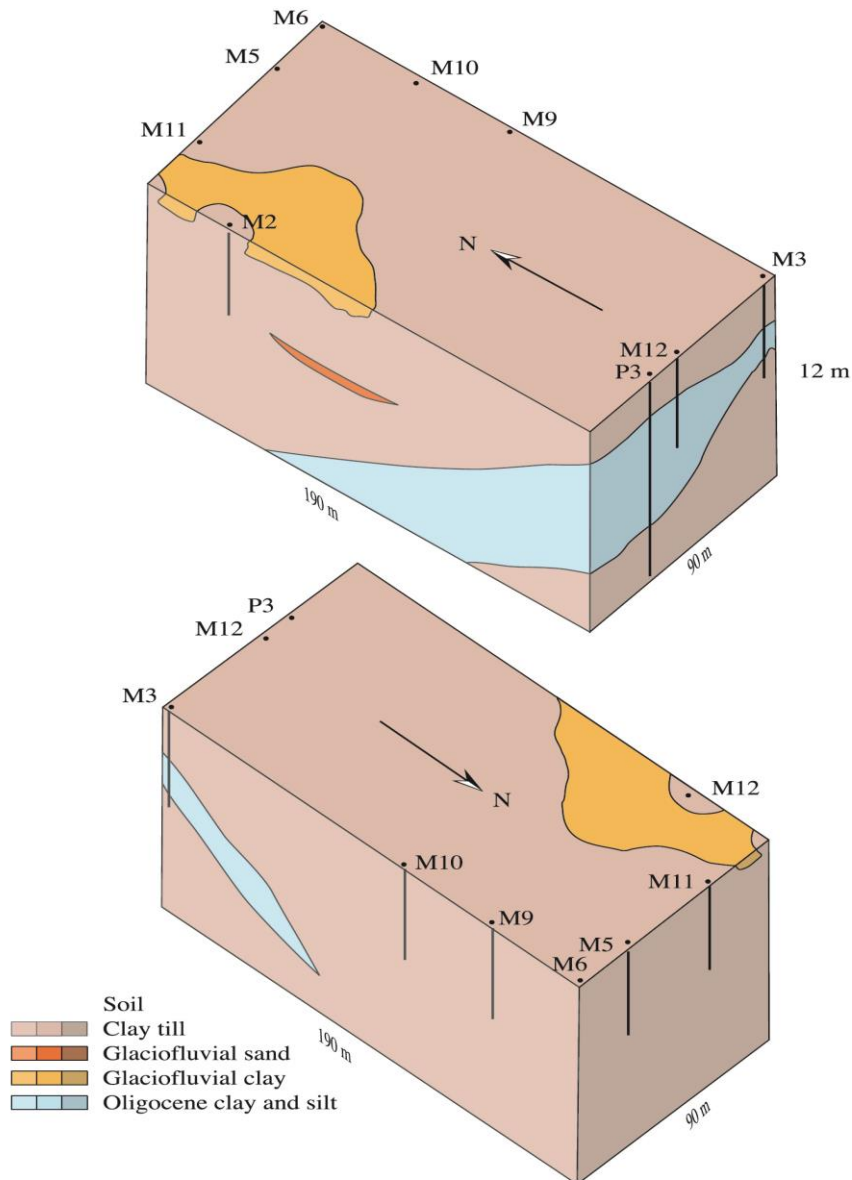


Figur 107. Profil fra udgravningen ved Silstrup med sprækkedata og geotekniske parametre (Fra Lindhardt et al., 2001)..

Makroporer

Horisontale og subhorisontale sprækker er de dominerende, og de er formodentlig dannet efter morænelerets dannelse og deformation, mens forkastninger og flagedannelse er sket ved isens tilstedeværelse.

Generelt øges sprækkeafstanden nedad mellem de lodrette sprækker i udgravningen. Efter en spacing på under 1 m ned til redoxgrænsen, øges spacing til ca. 2,5 m under 3 m's dybde (Figur 92). Samtidig forsvinder de horisontale sprækker gradvis ned mod redoxgrænsen, og kun få er tilbage derunder (Figur 107).



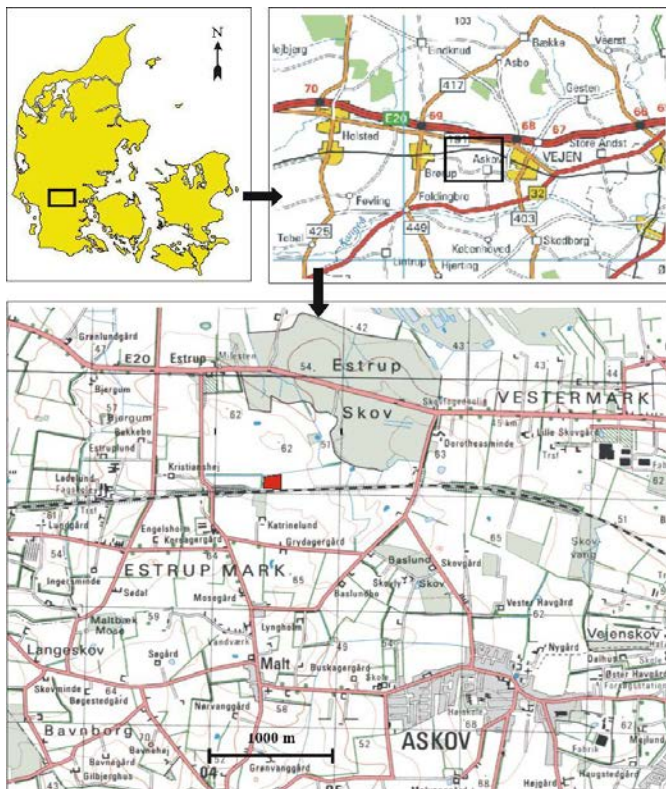
Figur 108. Blokdiagram som skematisk viser de geologiske forhold ved Silstrup.(Fra Lindhardt et al., 2001)

På figur 108 vises den geologiske opbygning af Silstrup. Blokdiagram-modellen er en skematisk måde at vise de geologiske forhold på i tre dimensioner, men det er ikke de faktiske forhold, som der f.eks. kan måles på. Der er flere oplysninger i Bilag 6.

Silstrup er et centralt og vigtigt eksempel på en situation ved en randmoræne, hvor forholdene er følsomme over for pesticidudvaskning (Brüsch et al., 2013).

ESTRUP

Estrup marken ligger mellem Vejen og Holsted, tæt ved Askov (Figur 109). Lokaliteten ligger vest for Hovedopholdslinjen for Weichsel isen udbredelse på en bakkeø (Vejen Bakkeø). Bakkeøerne er erosionsrester af Saale landskabet, som blev dannet i Weichsel istiden. Det betyder, at aflejringerne er fra næstsidste istid og måske ældre. De øverste lag er tolket til at være fra slutningen af Saale istiden (Warthe). Der har derfor været ca. 140000 år, hvor området ikke har været dækket af is, og der har i denne periode været muligheder for udvaskning og iltning af lagene. Isfremstødet i Warthe dannede en grå til olivengrå morænelersaflejring, som kaldes Lillebælt Till'en (Houmark-Nielsen, 1987).



Figur 109. Beliggenhed af Estrup lokaliteten (Rød firkant). (Fra Lindhardt et al., 2001).

Området er ikke klassificeret som PM-område, men må forventes være en moræneflade over smeltevandssand-slette (MS).

Se også bilag 6.

De geologiske forhold i området er komplekse, og der er forskel på informationer i udgravning og boringer. Alligevel er det baseret på grundlag af en udgravning og boringerne omkring udgravningen samt oplysninger i Lindhardt et al. (2001) forsøgt at karakterisere området geologisk med nedenstående 5 (+ 2) enheder. Bemærk af dybder og tykkelser af de forskellige enheder varierer betydeligt.

Enhed 1. Fra terræn til ca. 0,3 m

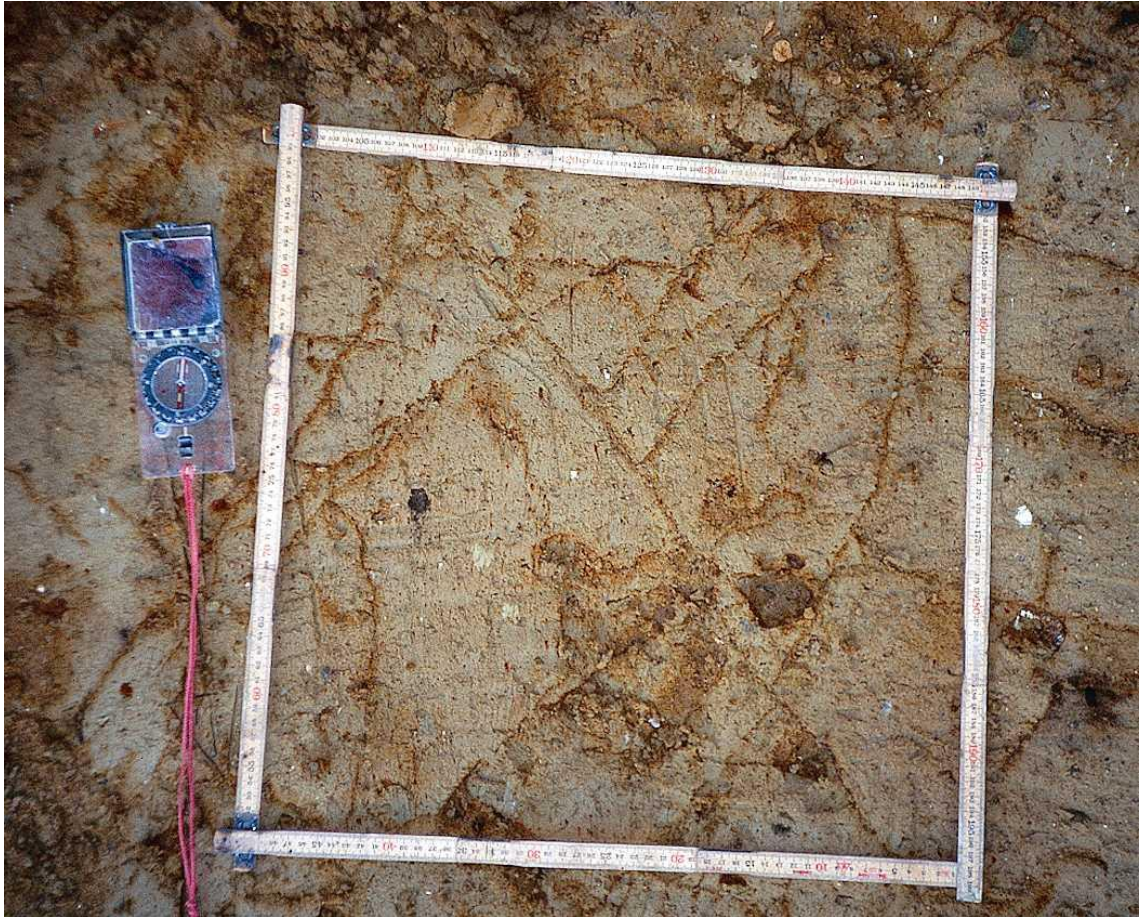
Sortbrun muld og mørkt gråbrunt muldholdigt ler, kalkfrit og med højt organisk indhold. En del rødder og sandlinser.

Enhed 2: Fra ca. 0,3 m til mellem 1,0 m og 4,5 m under terræn

Kalkfrit, gulbrunt og gråbrunt, oxideret moræneler med rødder og gravegange ned til 2 m og med permafrost strukturer dannet uden for en isfront. Moræneleret er forvitret. I dybden optræder både horisontale og vertikale sprækker med gulfarvning og sortfarvning pga oxidations påvirkning af både jern- og manganminerale. Sprækkerne danner et tre-dimensionalt netværk. Indslag af morænesand forekommer.

Enhed 3. Fra ca. 1 m/4,5 m til mellem 3,4 m og 9 m under terræn: Til redoxgrænsen

Ned til redoxgrænsen findes gulbrunt og gråbrunt oxideret moræneler med mange horisontale og lodrette sprækker med haloer af gul og sort på grund af iltning af jern- og manganminerale (Figur 110). Dette ses både i udgravningen og boringerne. Sprækkerne er dannet i et tre-dimensionalt netværk. Sprækkemængden aftager nedad og ender med forholdsvis få ved 5 m's dybde. Moræneleret er overvejende kalkholdigt og indeholder kalkgruskorn.



Figur 110. Krydsende sprækker i den oxiderede zone. Moræneleret indeholder hvide kalkgruskorn. (Foto: K.E.S. Klint).

Indenfor enhed 3 ligger 3 mere afgrænsede enheder, som både kan ses i udgravningen og delvis i boringerne.

Enhed 3a. Fra terræn til redoxgrænsen

Fra terræn til 5,6 m's dybde findes et søbassin med kalkholdigt smeltevandsler liggende på moræneler. Over leret følger gytjeholdigt ler og rødbrun og sort tørv med mange planterester. Dette bassin kan være af interstadial, interglacial eller Postglacial alder.

Enhed 3b. fra 1 m til 1,5 m under terræn

I udgravningen er også fundet en søaflejring af ler og silt under moræneler, og dette bassin og aflejringerne er antageligt dannet i en isfri periode i Sen Saale.

Enhed 3c. Fra terræn til redoxgrænsen

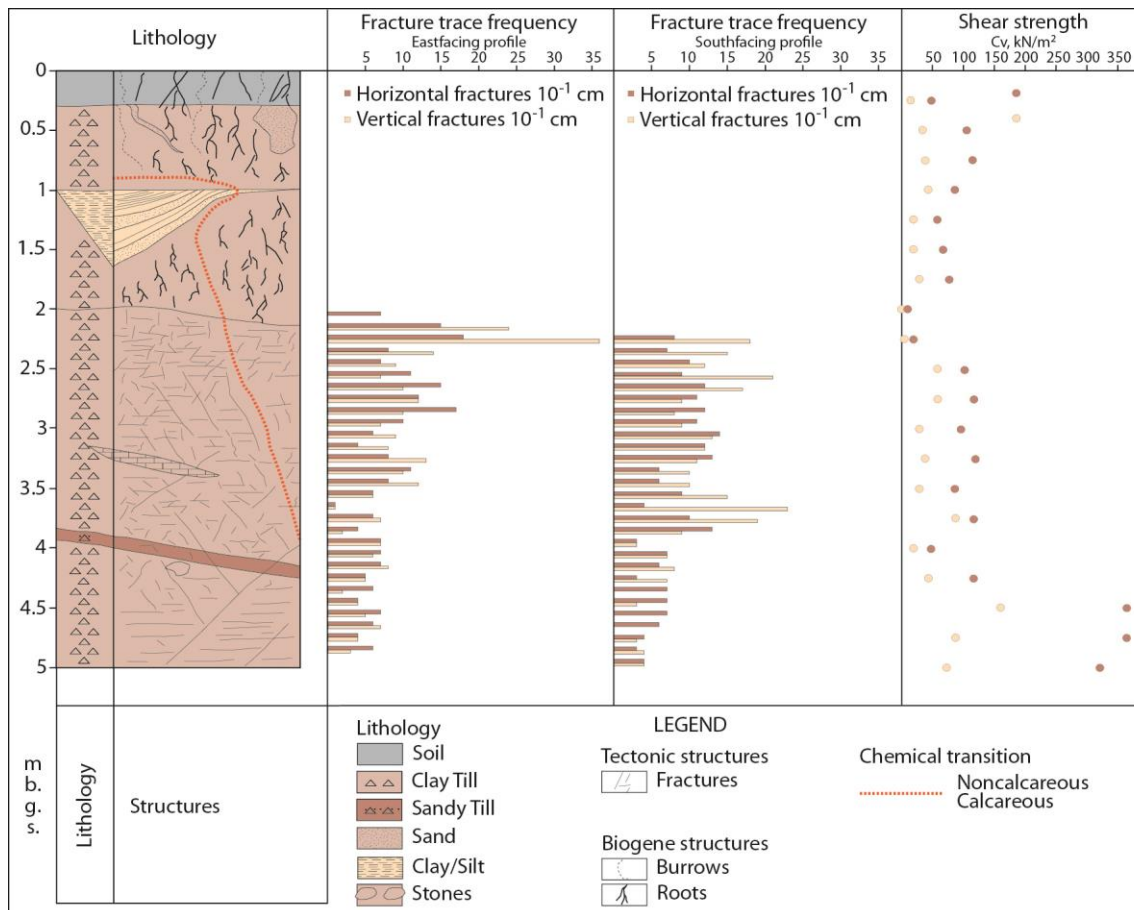
Kanaler ned til 7,5 m's dybde med henholdsvis kalkfrit smeltevandssand og - grus og kalkholdigt smeltevandsler og – silt skærer området flere steder. Desuden findes store linser med kalkfrit smeltevandssand.

Enhed 4. Fra 3,4 m/9 m til 10 m under terræn

Kalkholdigt, gråt og olivengåt, reduceret moræneler undertiden med rødgyule pletter. En del kalkgruskorn og kalkslirer samt mange sandlinser. Ingen sprækkedata.

Enhed 5. Fra 10 m til 23 m under terræn (fra boringer)

Reduceret, mørkegråt og gråt kalkholdigt moræneler veksler med reduceret olivengråt morænesand. Ingen sprækkedata.



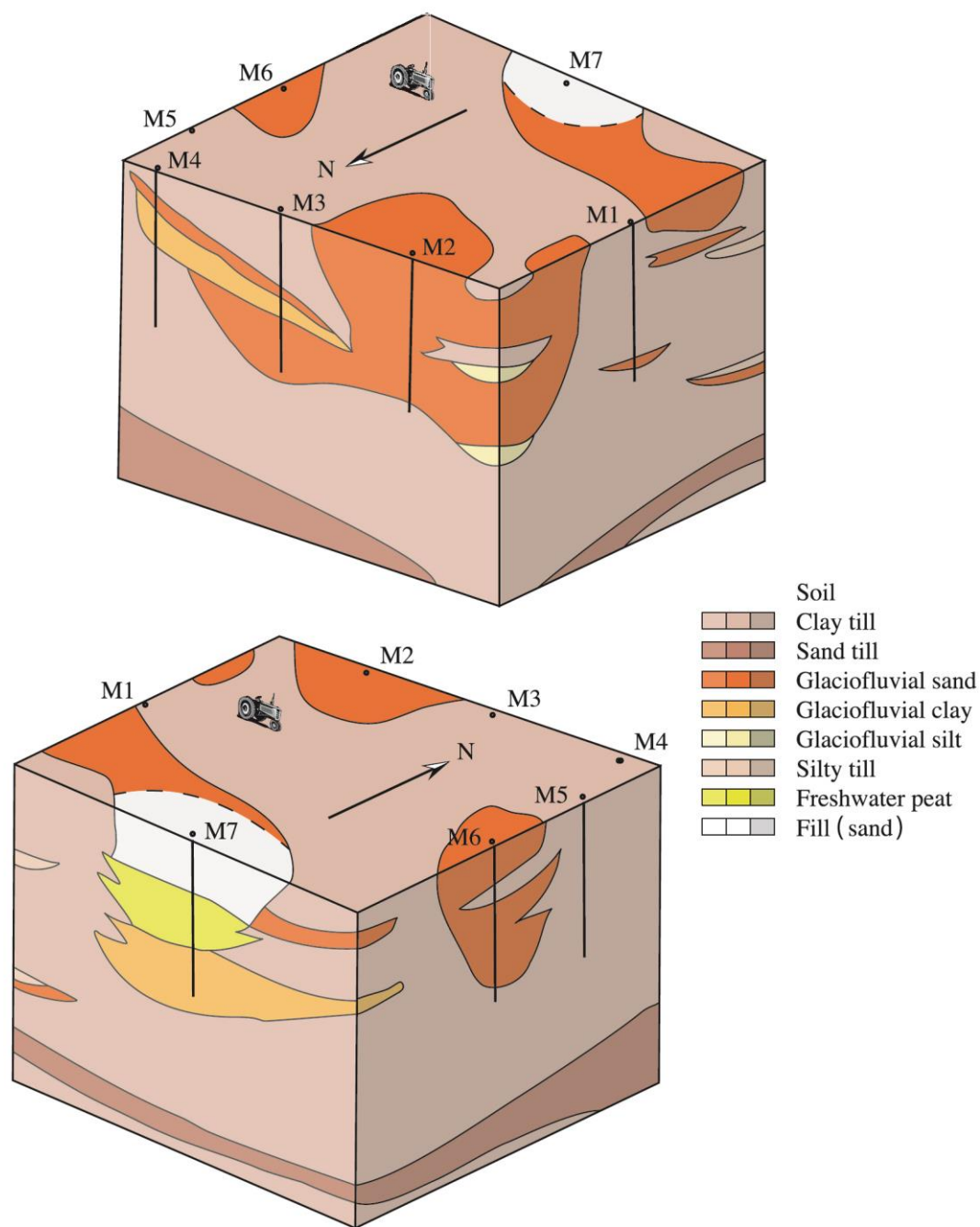
Figur 111. Sprækkeudbredelse i udgravningen fra Estrup samt med geotekniske parametre. Den gule signatur viser søbassinet fra Sen Saale. (Fra Lindhardt et al., 2001).

Makroporer

Makroporer er til stede indenfor de øverste 2 m u.t., selv om det var umuligt at måle deres orientering på grund af morænelerets plastiske tilstand. Orienteringen af sprækker fra 2,5 m til 5 m under terræn virkede tilfældig, og antallet af store lodrette sprækker var for få til, at der kunne måles systematiske forhold (Figur 111). Makroporer og sprækker synes generelt at være dannet ved processer i gletsjerfrie perioder fra Eem interglacial til Postglacial tid såsom ved udtørring og fryse-tø ændringer.

Områdets redoxgrænse i moræneleret ligger stedvis dybt, og figur 92 viser, at sprækkeafstanden er under 0,5 m i 5 m 's dybde, men da redoxgrænsen / sprækkers tilstedeværelse i udgravningen ligger under bunden, er det vanskeligt at bedømme forholdene, selv det synes klart, at der er overvejende kun er tale om mindre sprækker i Estrup, som aftager i mængde mod de 5 m's dybde.

Det er overvejende sandsynligt, at både det oxiderede og reducerede moræneler begge høre til Lillebælt Til enheden, som er udbredt fra Holsted-Vejen området og ned til den dansk-tyske grænse (Frederiksen & Sjørring, 1980, Sjørring, 1981, Friborg, 1996). Oxidationen går generelt længere ned end f.eks. på Sjælland (længer tid til rådighed), men da moræneleret er kompakt, er der kun udviklet små sprækker med begrænset netværk. Det meget tætte oxiderede, kalkholdige moræneler (delvis) og det kalkholdige reducerede moræneler må anses for ikke at være specielt gennemtrængeligt for vand.



Figur 112. Blokdiagram som viser de geologiske forhold på Estrup. (Fra Lindhardt et al., 2001).

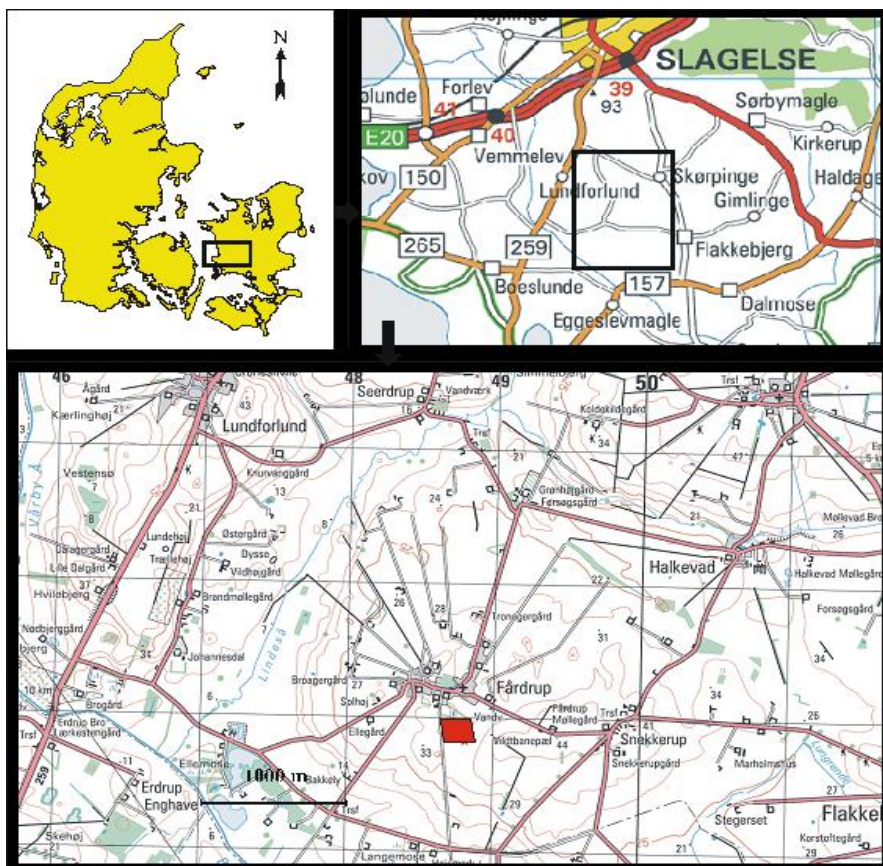
På figur 112 vises den geologiske opbygning af Estrup. Blokdiagram-modellen er en skematisk måde at vise de geologiske forhold på i tre dimensioner, men det er ikke de faktiske forhold, som der kan måles på.

Estrup lermarken er et godt eksempel på en Bakkeø situation i den sydlige del af Jylland, hvor det specielle kompakte Saale moræneler har stor betydning for transport af vand og forurening.

FÅRDRUP

Fårdrup lokaliteten ligger syd for Slagelse nordvest for Flakkebjerg lokaliteten (Figur 113). Området er en moræneflade, som delvis er afgrænset af åerne Lindeså og Bjerger Å. Se også bilag 2 og 6.

Fårdrup ligger på et fladt plateau bestående af en bundmoræneflade med en relativ lille geologisk variabilitet. De terrænnære aflejringer er dannet af en Ungbaltisk isstrøm i slutningen af Weichsel istiden, der har overskredet en ældre randmoræne. Randmoræneaflejringerne ligger højt mod vest ved Slots Bjergby. Weichsel morænerleret er mere end 18 m tykt og ligger over regionalt smeltevandssand grundvandsmagasin.



Figur 113. Beliggenhed af Fårdrup marken (Rød firkant). (Fra Lindhardt et al., 2001)

Området er PM-klassificeret som M (M) R: moræneflade oven randmoræne.

Baseret på grundlag af en udgravning og boringer omkring udgravningen samt oplysninger i Lindhardt et al (2001) kan området karakteriseres geologisk på følgende måde i 4 (+1) enheder:

Enhed 1. Fra terræn til ca. 0,4 m

Mørkebrun muld og muldblandet ler og sand har et beskedent organisk indhold, og enheden er kalkfri. Der er talrige ormehuller og rodkanaler.

Enhed 2. Fra ca. 0,4 m til ca. 1,5 m

Der træffes oxideret, gulbrunt og olivenbrunt, kalkfrit moræneler og underordnet morænesand. Aflejringerne optræder diskontinuert, idet det underliggende kalkholdige ler stedvis når helt op under mulden. Der er talrige gravegange og rodhuller, men de aftager med dybden. Mange horisontale sprækker nederst i enheden.

Enhed 3. Fra ca. 1,5 m til mellem 4,5 m og 6.2 m.

Enheden består overvejende af olivenbrunt og brungult moræneler, som er oxideret og kalkholdigt, men der træffes også lag af gulbrunt, kalkholdigt morænesand. Der er kun få bioporer, som når ned i denne enhed. Der er talrige horisontale og subhorisontale sprækker især mellem 1,8 m og 2,3 m's dybde, hvorefter de aftager nedad til redoxgrænsen, som i udgravningen er i 4,2 m's dybde. Store lodrette sprækker er færre i antal og få forsætter ned i den reducerede zone. Der er gule jernoxiderede haloer omkring sprækkerne. Der er også sandlinser i enheden især ved nedre grænse.

I udgravningen ligger redoxgrænsen i 4,2 m's dybde, og over denne findes enhed 3a.

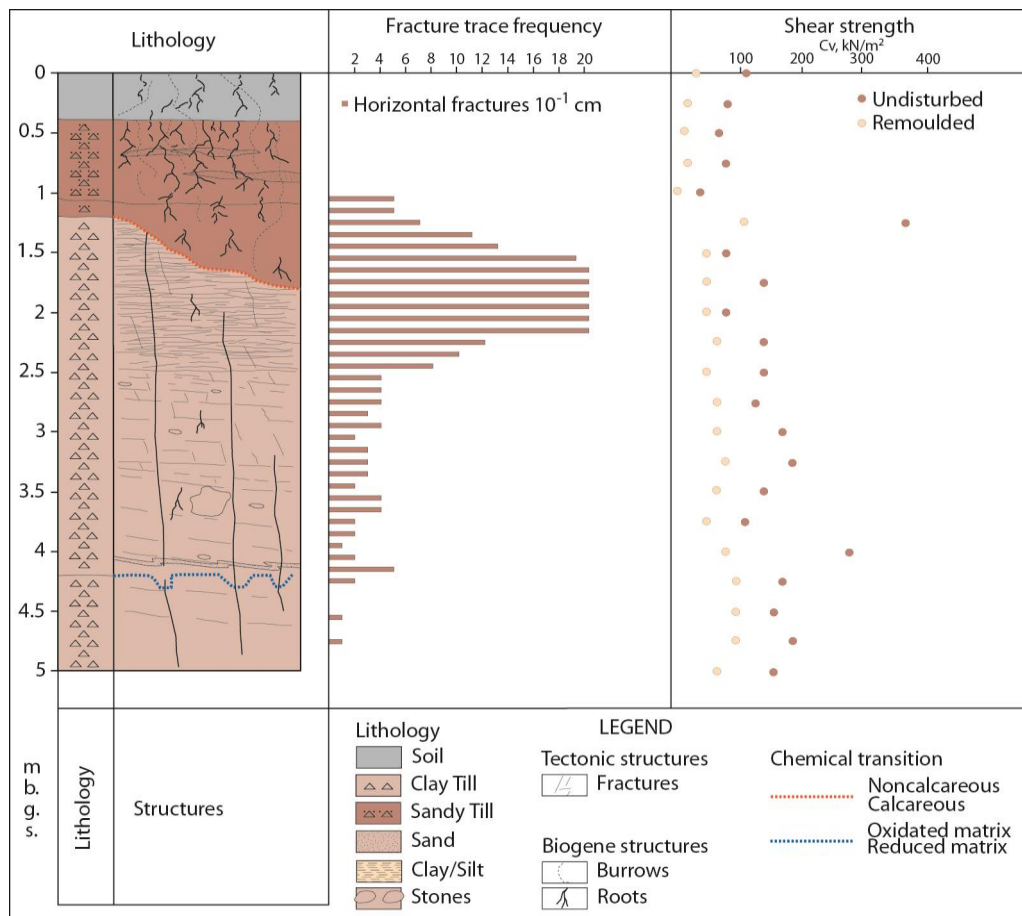
Enhed 3a. Fra terræn til redoxgrænsen

Kanaler med kalkholdigt smeltvandssand og - grus sammen med kalkholdigt smeltvandsler skærer morænelerslagene. Derudover er der også større sandlinser.

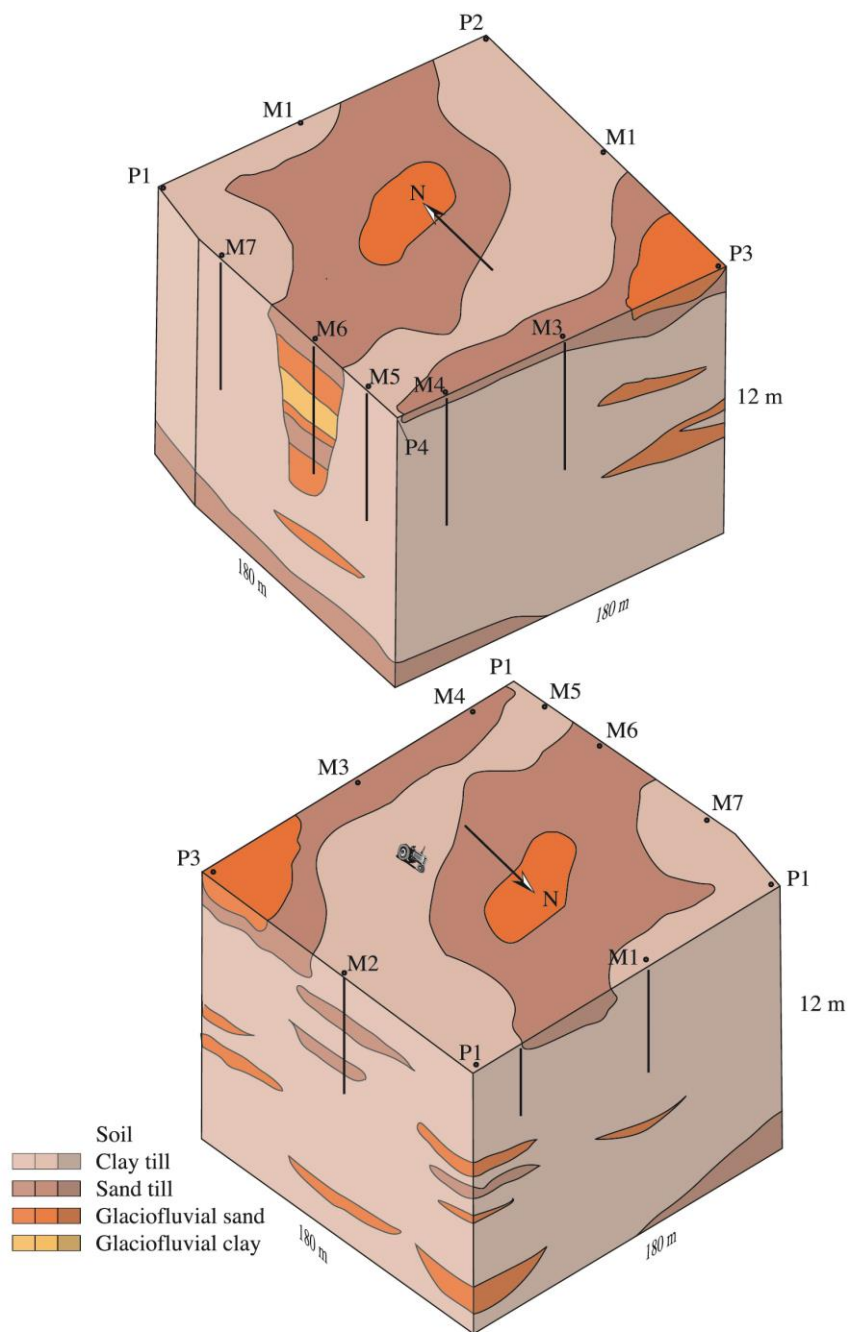
Enhed 4. Fra 4,5 m/6,2 m til ca. 13 m

Kalkholdigt, reduceret, olivengråt og gråt moræneler indeholder få morænesandslag. Få horisontale sprækker findes i enheden, og lodrette sprækker fra enhed 3 når ned i moræneleret. Belægninger af oxiderede jern- og manganmineraller findes omkring sprækkerne et stykke ned. Der er få sandlinser (Figur 114).

De store lodrette sprækker har en spacing ned til redoxgrænsen på omkring 0,5 m, med spacing øges til 2 m i 5 m's dybde (Figur 92).



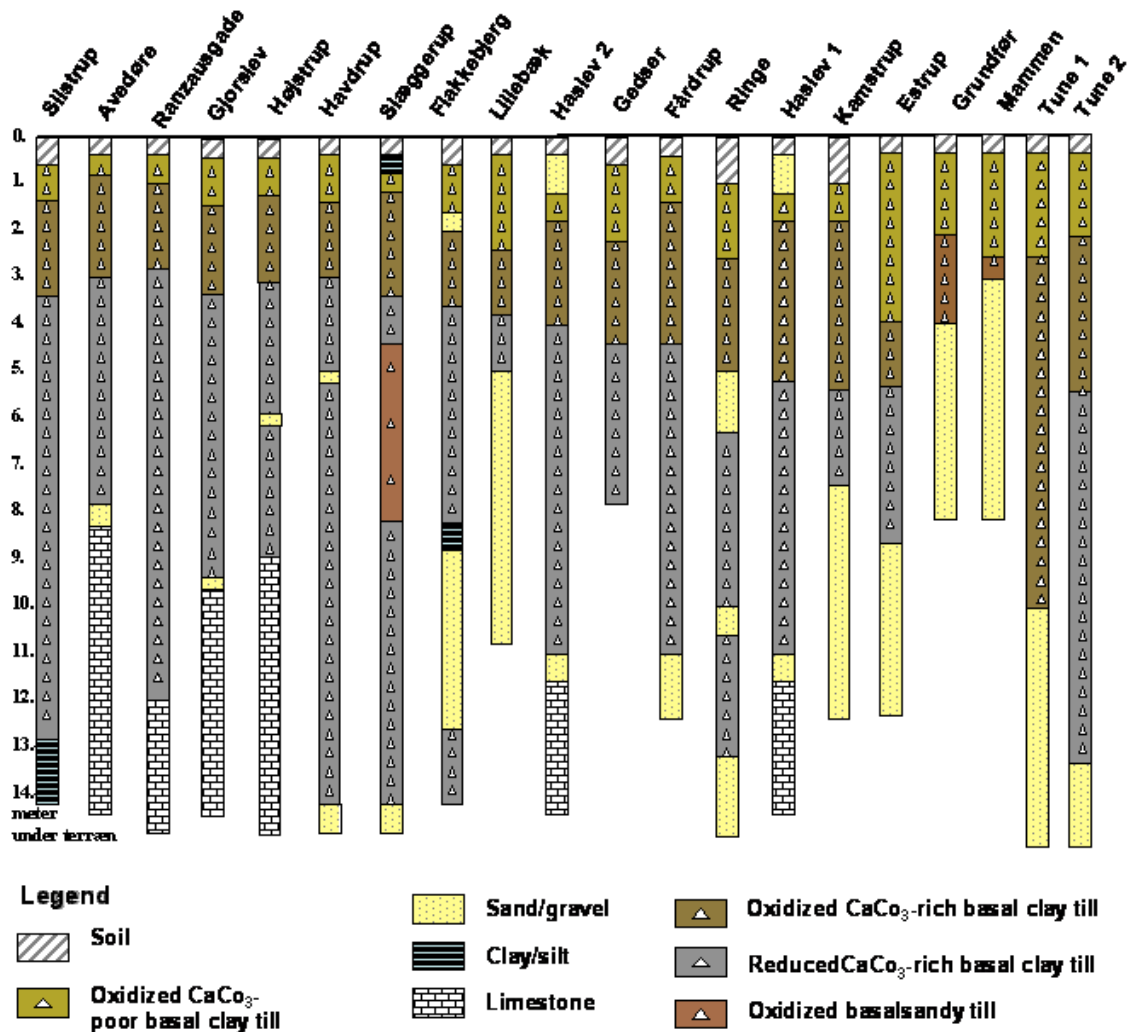
Figur 114. Profil fra udgravningen ved Fårdrup med fordeling af sprækker og geotekniske parametre (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 115. Blokdiagram som viser de geologiske forhold på Fårdrup (Fra Lindhardt et al., 2001).

På figur 115 vises den geologiske opbygning af Fårdrup. Blokdiagram-modellen er en skematisk måde at vise de geologiske forhold på i tre dimensioner, men det er ikke de faktiske forhold, som der kan måles på.

Fårdrup lokaliteten har en klassisk midtsjællandsk opbygning med tykke morænelerslag over et sandmagasin.



Figur 116. Data fra en række lokaliteter, herunder Silstrup, Estrup og Fårdrup. (Fra Klint, 2009).

På figur 116 ses relationer mellem morænelerstykkelser, kalkholdighed og redoxforhold m.m. for en række feltlokaliteter i Danmark inklusiv VAP mærkerne.

12.3 VAP-lermarkerne og de undersøgte områder

Ved sammenstilling af geologi og morænelerskaraktererne fra Stevns området, Hede-land området og VAP lermarkerne fremkommer et mønster, som gør det muligt at placere dem i forhold hinanden i relation til mulig følsomhed overfor udvaskning af pesticider og/eller deres nedbrydningsprodukter til grundvandet. Dette mønster afspejler sig bl.a. også i forhold de enkelte områders/lokaliteters placering i PM koncept-områderne.

De enkelte lokaliteter indenfor henholdsvis Stevns og Hedeland områderne viser overordnede ensartede karakterer, og områderne er placeret i hvert sit PM-område. Ved sammenligningen bedømmes de tre VAP-lokaliteter også i forhold til en mulig PM-placering.

Ved denne sammenligning, som foretages nedenfor, er det vigtigt at huske, at der på VAP- markerne regelmæssigt måles og modelleres pesticidudvaskning til grundvandet ud fra data indhentet i horisontale og lodrette borer (det øverste grundvand). Sådanne udvaskningsforsøg er ikke foretaget på Stevns og Hedeland områdernes lokaliteter, hvor der heller ikke er foretaget modellering, men få forskningsforsøg foreligger. Til gengæld kendes grundvandsmagasinerne forhold og indhold af udvaskede pesticider i Stevns og Hedeland områderne. Desuden er det vigtigt at understrege, at en sammenligning mellem små områder (de tre marker) med større områder, som har flere lokaliteter, kun kan være en forløbige vurdering.

Det er derfor morænelerslagenes geologiske, strukturelle og geokemiske egenskaber, der er sammenholdes og foretages i en ekspertvurdering af.

Det fremkomne mønster angives som mulig faldende følsomhed overfor pesticidudvaskning.

1. Silstrup VAP lokaliteten

På Silstrup lokaliteten er det oxiderede moræneler gennemsat af makroporer fra 2,4 m til 4,8 m's dybde. Herunder findes glacialtektonisk forstyrrede aflejringer af reduceret moræneler og glimmerler (og måske moler) til mindst 13 m's dybde. De glacialtektoniske processer har givet ophav til sprækker og forkastninger. Grundvandsmagasinet ligger dybt omkring lokaliteten.

Pesticiddata viser, at der udvaskes til mindst 3,5 m's dybde, og muligheder for videre transport er til stede. Silstrup lokaliteten er antagelig den mest følsomme i forhold til udvaskning til grundvandet.

Området kan PM klassificeres som R: Randmoræne. I et randmorænekompleks er det vanskeligt at bedømme og forudsige de interne geologiske forhold, når lagene er glacialtektonisk forstyrrede.

Stevns og Hedelandsområderne har med hensyn til påviste pesticider over grænseværdien i grundvandsmagasinerne vist sig at have en større andel af fund end Dalrose-Fuglebjerg området med Fårdrup lermarken. De geologiske opbygninger i områderne er også forskellige fra Silstrups opbygning.

2. Stevns området: Højstrup, Gjørlev og Sigerslev lokaliteterne.

De tre lokaliteter i Stevns området har oxideret, makroporerig moræneler til mellem 4 m og 6 m, og stedvis i området ligger der oxideret moræneler med makroporer direkte på kalkgrundvandsmagasinet eller med kun få m reduceret ler i mellem. I andre dele af området findes imidlertid tykkere reduceret moræneler, som kan beskytte grundvandet (se figur 68). Dette betyder sandsynligvis, at dele af Stevns området har en pesticidfølsomhed, der kan være som Silstrups eller eventuelt mere følsomt, mens andre dele af området er velbeskyttet og mindre følsomt.

Området er PM klassificeret som moræne flade over kalkmagasin: M (M) K.

3. Hedeland området: Kallerup, Tune, Kamstrup, Slæggerup, Vadsby og Høje Tåstrup lokaliteterne.

Hedelands områdets lokaliteter er præget af tilstedeværelsen af mange tynde sandlag og sandlinser samt ofte gentagelse af oxiderede-reducerede forhold i moræneleret over det regionale grundvandsmagasin. Det øverste oxiderede, makroporerige moræneler over første sekundære grundvandsmagasin rækker 4 m - 5 m ned og kan ligge på reduceret ler, men moræneleret kan også være gennemoxideret til 10 m's dybde (figur 88). Et nedre oxideret moræneler ser ud til at have forbindelse til det øvre gennem passager med stor hyppighed af dybe sprækker i det reducerede ler (se figur 85). De dele af Hedeland området, hvor der er oxideret moræneler med mange sandlinser som dominerer, er sandsynligvis lige så følsomt som de følsomme områder på Stevns og Silstrup, mens andre områder med tykke lag af reduceret moræneler yder bedre beskyttelse.

Området er klassificeret som moræneflade over sandmagasin: M (M) S.

4. Fårdrup VAP lokaliteten.

Lokaliteten har oxideret makroporerigt moræneler til mellem 4,5 m og 6,2 m ´s dybde efterfulgt af reduceret moræneler til ca. 18 m ´s dybde, hvor der træffes et regionalt sandmagasin. Pesticidanalyser fra marken og de regionale analyser for hel Dalmore- Fuglebjerg området viser, at dette område er mindre følsomt end de tre foregående, hvilket underbygges godt af den geologiske opbygning med op til ca. 12 til 14 m reduceret moræneler med antagelig få eller ingen makroporer.

Området er Klassificeret som Moræneflade over randmoræne: M (M) R.

5. Estrup VAP lokaliteten.

Estrup lokaliteten, som aldersmæssigt skiller sig ud fra de øvrige lokaliteter, har en geologisk struktur med meget overfladenært homogent moræneler og fedt ler fra søbassiner. Der er sammenhængende makroporer i de øverste lag, men antageligt meget få sammenhængende makroporer og ingen større sprækker i dybden, men aflejringerne er oxideret til stor dybde. Den samlede lertykkelse er på ca. 23 m, hvilket betyder at reduceret moræneler kan nå tykkelser på ca. 14 m. Desuden viser pesticidforsøgene på Estrup Marken, at der stort ingen nedadgående transport er på lokaliteten. Estrup lokaliteten fremstår derfor overraskende som den mindst følsomme af de undersøgte.

Lokaliteten er ikke PM klassificeret, men vil formodentlig være moræneflade over sandmagasin: M (M) S, altså ligesom Hedeland området, men med en væsentlig forskellig geologisk opbygning.

Table 8.3. Detections of pesticides and their degradation products in water samples from the groundwater monitoring screens at the five PLAP sites (see Table 8.4 for details). Pesticides applied in spring 2012 are not included in the table.

Risk	Parent	Tylstrup	Jynde vad	Silstrup	Estrup	Faarstrup	
High	Azoxystrobin	Grey	Grey	Red	Blue	Red	
	Bentazone	Grey	Grey	Red	Blue	Red	
	Bifenox	Grey	Blue	Red	Red	Red	
	Ethofumesate	Grey	Grey	Blue	Grey	Red	
	Fluazifop-P-butyl	Grey	Grey	Red	Red	Red	
	Glyphosate	Grey	Blue	Blue	Red	Blue	
	Metalaxyl-M	Red	Red	Red	Red	Red	
	Metamitron	Red	Red	Red	Grey	Red	
	Metribuzin	Red	Red	Red	Red	Red	
	Pirimicarb	Grey	Grey	Blue	Blue	Blue	
	Propyzamide	Grey	Grey	Red	Red	Blue	
	Rimsulfuron	Blue	Red	Red	Red	Blue	
	Tebuconazole	Blue	Blue	Red	Red	Blue	
	Terbutylazine	Blue	Blue	Red	Blue	Red	
Low	Dimethoate	Grey	Grey	Blue	Grey	Grey	
	Epoxiconazole	Grey	Blue	Grey	Grey	Grey	
	Flamprop-M-isopropyl	Grey	Grey	Blue	Blue	Blue	
	Fluroxypyr	Grey	Grey	Blue	Blue	Blue	
	Ioxynil	Grey	Grey	Grey	Grey	Blue	
	MCPA	Grey	Grey	Grey	Blue	Grey	
	Mancozeb	Blue	Grey	Grey	Grey	Grey	
	Phenmedipham	Grey	Grey	Grey	Blue	Blue	
	Propiconazole	Grey	Grey	Grey	Blue	Blue	
	Prosulfocarb	Grey	Grey	Blue	Grey	Grey	
	Pyridate	Grey	Grey	Blue	Grey	Grey	
	Triflurosulfuron-methyl	Grey	Grey	Blue	Grey	Grey	
	None	Aclonifen	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
		Aminopyralid	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
Amidosulfuron		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Boscalid		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Bromoxynil		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Clomazone		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Chlormequat		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Clopyralid		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Cyazofamid		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Desmedipham		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Diflufenecan		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Fenpropimorph		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Florasulam		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Iodosulfuron-methyl		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Linuron		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Mesotrione		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Metrafenone		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Metsulfuron-methyl		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Pendimethalin		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Picolinafen		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Thiacloprid		Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	
Thiamethoxam	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey		
Triasulfuron	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey		
Tribenuron-methyl	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey		

■ Pesticide (or its degradation products) detected in water samples from groundwater monitoring screens in concentrations exceeding 0.1 µg/L.
■ Pesticide (or its degradation products) detected in water samples from groundwater monitoring screens in concentrations not exceeding 0.1 µg/L.
■ Pesticide (or its degradation products) not detected in water samples from the groundwater monitoring screens.

Figur 117 Oversigt over udvaskede pesticider og nedbrydningsprodukter til grundvandet (Fra Brüs ch et.al. 2013)

Resultater af udvaskningsforsøg på VAP-markerne kan ses på figur 117. Silstrup lokaliteten fremstår med flest påviste pesticider og nedbrydningsprodukter over grænseværdien i grundvandet og desuden også med de højeste koncentrationer (Brüsch et al., 2013). Silstrup-marken vurderes derfor den mest følsomme lermark i Danmark, mens Estrup-marken vurderes som den mindst følsomme.

13. Opsummering for hele rapporten

13.1 Makroporer, oxidation, lertykkelser og geologiske modeller

Kendskabet til makroporer i moræneler stammer fra 33 danske og udenlandske lokaliteter, hvor de fleste er fra Østdanmark. Biopore- og sprækketyper er beskrevet og klassificeret, mens sandlinser først for nylig har fået en klassifikation.

Tabel 10 giver en oversigt over 31 Lokaliteter, heraf 22 danske, hvor der systematisk er opmålt sprækker med samme metode og registret andre makroporer. Det betyder, at områderne kan sammenlignes direkte, når det drejer sig om geologisk variabilitet og forekomst af makropore/sprækker. I nogle af områderne findes der udover sprækkedata også en lang række af hydrauliske og kemiske data. Der er foretaget infiltrationsforsøg på flere af områderne, og de generelle transports - og nedbrydningsprocesser er godt beskrevet.

Lerlokalteter hvor der systematisk er opmålt sprækker					
Lokalitet	Landskabstype	Antal udgravninger	Antal profiler	Maksimal sprække dybde	Antal sprækkesystemer
Danske lokaliteter					
1. Silstrup, VAP	Randmoræne over marint ler	1	4	< 4 m	2
2. Estrup, VAP	Moræneflade (Bakkeø)	1	4	> 5 m	3
3. Ringe	Småbakket moræneflade over dødislandskab	4	24	> 5 m	3-4
4. Lillebæk	Småbakket moræneflade	1	4	> 4 m	3
5. Slæggerup, Tidligere VAP	Dødislandskab o. moræneflade	1	4	> 5 m	3
6. Rantzausgade	Moræneflade over kalk	1	4	> 3.5 m	3
7. Englandsvej	Moræneflade over kalk	1	1	> 6 m	5
8. Avedøre	Moræneflade over kalk	2	8	> 5.5 m	5
9. Kamstrup	Moræneflade over smeltvandsslette	1	1	> 7 m	3
10. Havdrup	Moræneflade	1	1	> 5 m	3
11. Haslev	Moræneflade over kalk	1	4	> 9 m	3
12. Flakkebjerg	Moræneflader over smeltvandsslette	3	18	> 6 m	4

13. Fårdrup, VAP	Småbakket moræneflade på randmoræne	1	4	> 5 m	3
14. Mammen	Småbakket moræneflade over smeltevandssand.	1	4	< 2 m	2
15. Grundfør	Småbakket moræneflade på sandur	1	4	> 3 m	2
16. Gjorslev	Moræneflade over kalk	1	4	>5 m	3
17. Højstrup	Moræneflade over kalk	1	4	> 5 m	3
18. Gedserodde	Randmoræne	Kystklint	1	> 6 m	3
19. Vasby	2 Moræneflader på sandur	1	4	>5 m	3
20. Polmenakke	Randmoræne	Kystklint	1	> 6 m	3
21. Tune	Moræneflade over smeltevandsslette	1	2	>8 m	2
22. Sigerslev	Moræneflader på kalk	Kalkgrav	2	~7,5 m	3
Udenlandske lokaliteter					
23. Laidlaw Canada	Ler slette (issøsedimenter over bundmoræne og skifer)	4	16	Max 6m	1
24. Duffins creek Canada	Moræneflade over smeltevandsslette	Flodbrink	1	> 8 m	3
25. Scarborough Bluffs Can.	Moræneflader over søsedimenter	Kystklint	4	~6 m	3
26. Rouge River Can.	Moræneflade over randmoræne over skifer.	Flodbrink	4	~10 m	3
27. Kluczewo Polen	Issøsedimenter over moræneflade/smeltevandsslette	3	6	~5 m	1+2
28. Solheimer jökull, Island	Moræneflade over smeltevandsslette	Flodbrink	1	~2 m	2
29. Slettjökull, Island	Moræneflade over smeltevandsslette	Flodbrink	2	~2 m	3
30. Kötlujökull, Island	Dødislandskab over moræneflade/smeltevandsslette	Flodbrink	2	~1 m	1
31. Kluszcowo, Polen	Issøler/dødis/bundmoræne/smeltevandsslette	2	8	7	3
I alt 31 lokaliteter		43 blotninger	146 profiler		

Tabel 10. Undersøgte lerkaliteter indtil 2009 (Fra Klint, 2009).

Sidenhen er yderligere kommet følgende to lokaliteter til:

Kallerup: Moræneflade over smeltevandsslette, 1 udgravning, 1 profiler.

Høje Tåstap: Moræneflade over smeltevandsslette, 1 udgravning, 2 profiler.

Udgangspunktet for vurdering af makroporeforhold er derfor rimeligt godt.

Oxidationsforhold i moræneler er ligeledes undersøgt på feltlokaliteterne, selv om der er dele af de processer, som foregår, der bør undersøges nærmere. De karakteristiske farveforhold med gule og brune farver i den oxiderede zone over redoxgrænsen og grå farver i den reducerede zone under redoxgrænsen er egenskaber, der kan udnyttes ud fra farvebeskrivelser af boreprøver i de mange borer i Jupiter databasen (p.t. ca. 300.000 borer).

Sammenhængen mellem udbredelse af sprækker i dybden og relationerne til redoxgrænsens beliggenhed kan sammenholdes med den totale lertykkelse for at udpege områder med forskellige egenskaber.

Forståelsen for den geologiske opbygning kan beskrives i en konceptuel model med lagenes dannelse og senere påvirkninger, f.eks. indenfor hvert PM-område. Dette kan være særlig nødvendigt, når de geologiske, strukturelle og geokemiske er mere komplicerede.

13.2 Geofysisk kortlægning: Udbredelse, tykkelser og interne strukturer

Den geofysiske kortlægning i forbindelse med Grundvandskortlægningen er især foretaget indenfor OSD- områderne (Områder med Særlige Drikkevandsinteresser), men der har vist sig behov for, at også stedvis kortlægge indenfor OD-områderne (Områder med Drikkevandsinteresser).

Der har været anvendt en række forskellige metoder, som er blevet analyseret i denne rapport i forhold til at kunne kortlægge overfladenære leraflejringer. Analyserne af metoderne har vist, at en stor del af dem er egnet til at indgå i en pesticidfølsomhedskortlægning i det omfang morænelerstykkelse og horisontal udbredelse er vigtige parametre. Derimod kan de geofysiske data ikke på nuværende tidspunkt vise makroporefordeling og type indenfor deres udbredelse (ned til 10 m's dybde), men nogle metoder kan påvise horisontale sandlag eller sandlinser. Data om oxidationsforholdene er det heller ikke generelt muligt at indsamle, f.eks. om redoxgrænsens beliggenhed. Både mulighederne for at påvise makroporer og redoxforhold i moræneler ved geofysiske metoder arbejdes der på p.t.

13.3 Det Poly morfolgiske koncept (PM konceptet) og arealafgrænsninger

PM konceptet bør bearbejdes videre, da det ser ud til, at kunne fungere som grundlaget for en arealudpegning. Den sjællandske kortlægning bør suppleres op med konceptuelle modeller, og resten af lerarealet i Danmark kortlægges med PM-konceptet. En start kunne være, at udpege de områder, hvor der under moræneleret ikke findes grundvandsmagasiner. Det kan være området med tykke lag af smeltevandsler i Nordjylland og Sønderjylland eller med fede plastiske lerarter på Nordvestsjælland, Fyn og Østjylland, som ligger direkte under moræneler

13.4 Pesticidfund

Pesticidfund over grænsedærdien i grundvandet i Stevns området og Hedeland området i næsten lige stort antal viser, at begge områder er følsomme for pesticidudvaskning, selv om det er to forskellige geologiske situationer. I Stevns området er det en relativ tynd, oxideret opsprækket moræne med kun små sandlinser, der overlejrer kalk, mens der er mange sandenheder i oxideret og reduceret moræneler og morænesand i Hedeland området.

I Dallose-Fuglebjerg området er der påvist færre pesticidfund over grænseværdien i grundvandet. Dette kan skyldes, at den samlede tykkelse af lerlagene i boringerne er langt større end i de to andre områder.

13.5 Relationer til VAP lermarkerne

VAP-lermarkerne: Faardrup (Sjælland), Silstrup (Nordjylland) og Estrup (Midtjylland) er blevet sammenlignet med Stevns og Hedeland områdets lokaliteter. Dette er alene gjort ud fra geologiske og geokemiske data, da der ikke er det samme pesticidgrundlag i områderne. Forsøget på at placere i forhold pesticidfølsomhed i grundvandet viste, at en overordnet vurdering godt kunne foretages.

14. Konklusioner

14.1 Vurderinger af mulighederne for at udpege pesticidfølsomme områder (SFO) som er mere følsomme end VAP lermarkerne

Grundlaget for mulighederne for at udpege pesticidfølsomme områder (SFO), som er mere følsomme end VAP lermarkerne, er baseret på leraflejrings karakterer fra terræn til grundvandsmagasinerne, samt at det er ved simuleringer på lerjorde er vist, at 36 % af Danmarks areal er følsomt for udvaskning af pesticider fra bunden af rodzonen (2 m), hvilket er en potentiel kilde for transport af pesticider til grundvandet (GEUS & DJF, 2009).

De mange pesticider (forbudte, regulerede og tilladte) har forskellige egenskaber over for sorption og nedbrydning, og derfor vil de opføre sig forskelligt i de geologiske aflejringer og grundvandsmagasinerne i modsætning til f.eks. nitrat. Det er vigtigt at have disse egenskaber i mente, men snart mange års erfaring viser, at mange typer pesticider kan udvaskes til grundvandet.

Der er derfor i denne sammenhæng forsøgt at anskue pesticiderne under et, og der er set på, hvordan leraflejringerens egenskaber kan vurderes som enten beskyttende mod udvaskning eller som medie for transport til grundvandsmagasinet.

Først er der konklusioner for en række delopgaver, hvorefter hovedkonklusionen for den samlede opgave gives.

Del konklusioner for de forskellige delopgaver.

Den generelle gennemgang af de geofysiske metoder, som hidtil er anvendt under grundvandskortlægningen, viser følgende:

Interne strukturer i moræneler

Meget detaljerede undersøgelser med MEP med enhedselektrodeafstande på 1–2 m kan kortlægge resistivitetsvariationer, som kan relateres til zoner med interne strukturer i morænelersaflejringer, f. eks. større horisontale sandlag/slirer. Lodrette og vandrette sprækker og andre makroporer, herunder mindre sandlinser, kan ikke kortlægges.

Tykkelse af moræneler

SkyTEM-metoden har vanskeligt ved opløse meget tynde højmodstandslag, der er helt terrænnære. Derfor er SkyTEM-metoden dårligt egnet som et værktøj ved udpegning af områder med morænelersaflejringer lige under terræn. Morænelersaflejringerne kan være dækket af et tyndt sandlag, som ikke kan opløses i data.

Flyvehøjden for SkyTEM-systemerne spiller en betydende rolle for metodens evne til at opløse tykkelsen af første lag. Det kan ses i analyserne ved, at SKYTEM₉-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 30 m, er bedre til at opløse tykkelsen af første lag end SKYTEM₇-systemet, analyseret med en flyvehøjde på 40 m.

Ud fra analysen af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag kan konkluderes, at

- PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 5 m tykt morænelersdække.
- PACES-, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 10 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de mest højtopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.
- SkyTEM₃, MEP_{G2}- og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 15 m tykt morænelersdække. MEP_{W5} og de øvrige mest højtopløselige SkyTEM systemer er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.
- De højtopløselige SkyTEM-systemer og MEP_{G5}-systemerne er bedst egnede til at kortlægge et ca. 20 m tykt morænelersdække. De øvrige SkyTEM systemer, på nær de allerældste generationer, er egnede i områder, hvor aflejringerne generelt er konduktive.

Horisontal udbredelse af moræneler

Når ovenstående vurdering af metodernes evne til at kortlægge tykkelsen af et morænelerslag tages i betragtning, fremstår PACES-metoden og de højtopløselige SkyTEM-systemer med første anvendelige gatecentertid mindre end 10 mikrosekunder, som egnet til kortlægning af udbredelsen af henholdsvis tynde morænelersaflejringer med tykkelser på 5-10 m, og lidt tykkere morænelersaflejringer. Et fremtidigt SkyTEM-system med første gatecentertid i 3 mikrosekunder fremstår generelt som velegnet.

Sammenligning af geofysisk kortlægning med geologiske forhold i Dalmose-Fuglebjerg området viser følgende:

Dalmose-Fuglebjerg området dækkes delvist af Næstved SkyTEM kortlægningen fra 2011 og af Slagelse SkyTEM kortlægningen fra 2012.

I nogle områder er der god overensstemmelse mellem lertykkelseskortet fremstillet på baggrund af boringer og observerede resistivitetsfordelinger, mens der i andre områder ses en uoverensstemmelse, som primært i det vestlige område skyldes relativt tynde sandlag, som er observeret i boringer, men ikke opløses i SkyTEM. I det østlige område skyldes det et dybtliggende relativt tyndt sandlag, som er observeret i boringer, der enten har en underestimeret tykkelsen i boringerne, eller at det overliggende moræneler har så høj resistivitet, at det svarer til sandlags resistivitet. Der er behov for en detaljeret analyse af resistiviteterne fra SkyTEM-kortlægningerne, boringer og borehulslogs i området for at afdække aflejringernes resistivitetsforhold.

Sammenholdes de to lokaliteter ved Flakkebjerg og Fårdrup med nærliggende SkyTEM-målinger, ses det, at morænelerslagene har resistiviteter i intervallet 30–60 Ohmm, men det ikke muligt at lave en detaljeret sammenligning, da SkyTEMs vertikale og horisontale opløsning ikke rækker til dette.

Heterogeniteter på en skala ned til 50–200 m, som skyldes relativt tynde sandaflejringer ved terræn overlejrende morænelerslag, fremstår klart fra Slagelseskortlægningens middelmodstandskort for intervallet 0–5 m, mens det ikke fremgår tydeligt i Næstved kortlægningen. Denne forskel kan skyldes, at Næstved kortlægningens første anvendelige gatecentertid er 9,2 mikrosekunder, mens den er 7,2 mikrosekunder i Slagelse kortlægningen.

Geologiske forhold i Stevns området og Hedeland området

- Makroporer gennemsætter næsten altid moræneler, og de omfatter bioporer, sprækker og sandlinser, der udgør et samlet 3-dimensionelt transportnetværk, som kan føre vand og pesticider til grundvandet. I nogle tilfælde kan særligt store og dybe enkelt sprækker også fungere sådan. Transport gennem matrix i moræneleret forgår også, men er almindeligvis langsommere.

- Antallet af makroporer aftager ned gennem den oxiderede zone i moræneleret mod redoxgrænsen. Redoxgrænsen ligger almindeligvis omkring 3,5 m til 5 m's dybde selv om dybereliggende redoxgrænser er registreret ned til ca. 7-8 m. Enkelte sprækker kan når ned til 10 m dybde i det reducerede moræneler, hvor de erfaringsvis forventes hurtigt at ophøre. Små sandlinser kan også forsætte nedad i det reducerede moræneler, og i Hedeland området forekommer særligt mange sandlag.
- Redoxgrænsens beliggenhed og dannelse synes at hænge sammen med udbredelsen nedad af makroporerne, da de fleste ophører ved denne grænse. Transport af ilt i makroporerne siden sidste istid har antagelig været den væsentligste årsag til redoxzonen bevægelse ned, selv om oxidationen også har forgået i matrix. Iltningen i makroporerne ses af de jern- og manganoxiderede "halos" omkring sprækker, som kan følges ned i det reducerede moræneler. Konklusionen er derfor, at det tyder på, at det er den nedre grænse for størstedelen af makroporerne, der især styrer redoxgrænsens beliggenhed.
- Gentagelse af oxidation-reduktions forholdene i Hedeland området adskiller dette område fra Stevns området, hvor der kun er et oxidationssystem. Ved gentagelsen synes særlige sprækkeforhold i det øverste reducerede moræneler samt tilstedeværelsen af sandlag at spille ind, men systemet er ikke fuldt forstået.
- Tilstedeværelse af pesticider i grundvandet i de to områder viser at dele af områderne er følsomme for udvaskning.
- Samlende kan siges, at 10 m morænelerstykkelse kan være en ledetråd. Gennemoxideret moræneler på op til 10 m tykkelse eller 7 m oxideret og 3 m reduceret (hvor der også er sprækker) synes ikke at yde tilstrækkelig beskyttelse af grundvandet, men hvis det reducerede ler bliver tykkelse vokser beskyttelsen. Generelt øges den reducerede zones tykkelse med øget total lertykkelse.

Det Poly Morfologiske Koncept

- Konceptets indhold er et forsøg på at sammenholde terrænforhold og aflejringer i flere niveauer ned gennem jordlagene inklusiv aflejringer, som er grund-

vandsmagasiner. Ud fra teoretiske overvejelser om dannelse af moræner og sprækker i leraflejringer samt forholdene i sand og kalklag er det vurderet hvordan sprækkedannelse og sprækkeintensivitet vil forekomme i forskellige geologiske situationer. PM konceptet er indtil videre afprøvet for Sjælland, Lolland, Falster og Møn med fremstilling af et polymorfologisk kort i 1:200.000.

- Nærværende undersøgelse har taget udgangspunkt i PM konceptet ved udvælgelsen af de områder der skulle undersøges, og konceptet ser ud til at være et godt værktøj at arbejde videre med. Der har dog vist sig en større variabilitet end først tænkt med konceptet, da de to områder Stevns og Hedeland blev undersøgt i detaljer mht. lagene dybere under terræn. Imidlertid er der muligheder for at verificere konceptet ved at se på moræner-kalk situationer som på Lolland, Falster, Møn og Djursland og moræner-sand situationer i dele af Djursland og Himmerland. Af større områder indenfor konceptet er det især dødislandskaber, som ikke er inddraget og analyseret.
- De polymorfologiske kort kan fremstilles i målestoksforhold 1:25.000, hvor flere relevante detaljer kan inddrages, og det er antagelig denne målestok, der kan danne udgangsforhold for inddeling af lerområdet i pesticidfølsomme områder.

Relationer til VAP-markerne

- De tre lermarkers egenskaber blev beskrevet i etableringsrapporten fra 2001, men supplerende vurderinger er udført i dette arbejde.
- Der er foretaget en sammenligning mellem VAP- markernes geologiske, strukturelle og geokemiske opbygning med de tilsvarende egenskaber, som lokaliteterne har indenfor Stevns og Hedeland områderne for ud fra dette at bedømme mulig følsomhed i forhold til hinanden. Denne sammenligning bygger derfor ikke på målt pesticidudvaskning, da sådanne data ikke findes fra Stevns og Hedeland lokaliteterne, men alene lokaliteternes fysiske og geokemiske egenskaber, selv om der er påvist større mængder pesticidfund i Stevns og Hedeland områderne end i Dallose-Fuglebjerg området.

- Ud fra forsøg med pesticidvaskning er Silstrup-marken vurderet til at være den mest følsomme lermark i Danmark, mens Estrup-marken er vurderet til at være den mindst følsomme.
- Ved denne opgave er mulig følsomhed i forhold til hinanden (VAP-marker og område-lokaliteter) vurderetsom faldende følsomhed som følger: 1. Silstrup (VAP-mark), 2. Dele af Stevns området, 3. Dele af Hedeland området, 4. Dele af Stevns området, 5. Dele af Hedeland området, 6. Fårdrup (VAP-mark), 7. Estrup (VAP-mark). Inddelingen skal opfattes således, at 1, 2 og 3 opfattes som antagelig næsten lige følsomme, 4, 5 og 6 som antagelig næsten lige følsomme og 7 som antagelig mindst følsom.

Hovedkonklusion om muligheder for udpegning af pesticidfølsomme områder

- Ud fra den samlede gennemgang og kendskab til de eksisterende data og nye forskningsresultater kan det konkluderes, at det er muligt at udvikle en metode til at udpege områder, der er mere følsomme eller lige så følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler til grundvandet som VAP-lermarkerne.
- Der ikke er udarbejdet en metode til at identificere de særligt pesticidfølsomme lerjorde i denne rapport, men der peges på de data/elementer, som skal indgå. For at udarbejde en konsolideret metode vil det forudsætte nye undersøgelser til at tilvejebringe ny viden fra områder der ikke er undersøgt, metodeudvikling/modellering og yderligere pesticidmålinger til validering. Det vil forudsætte, at flere lerområder undersøges, da der kan være områder (landskabslementer) mere følsomme end de nu undersøgte, f.eks. Djursland, omkring Limfjorden og Lolland-Falster. Desuden vil metoden skulle vurderes ud fra resultater af målinger af godkendte pesticider.
- Af Grundvandskortlægningens resultater er det især oplysninger om leraflejrings udbredelse og tykkelse, som er vigtige for at vurdere hvilke data, som kan indgå i et koncept for pesticider. Grundvandskortlægningens geofysiske metoder og målinger har vist sig at kunne kortlægge udbredelsen og tykkelsen af tynde lerlag (5-20 m). Påvisning af, hvor der er risiko for sprækker eller andre mindre vandrette og vertikale makroporestrukturer, kan ikke ske ved hjælp af geofysiske målinger, dog ser større horisontale sandlag/sandliser ud til at kunne påvises..

- Projektet viser endvidere, at der er en sammenhæng mellem makroporeddybde og redoxgrænse. De fleste makroporer stopper ved redoxgrænsen, da redoxgrænsens beliggenhed og nedgående bevægelse er afhængig af tilstedeværelsen af især sprækker.
- Derfor er nøglen til relationerne mellem makroporeddybde og redoxforhold i morænelersaflejringerne afgørende, og gennemoxiderede lag op til 10 m tykkelse ser ud til at være de mest følsomme, oxiderede lag på 7 m sammen med reducerede lag på 3 m ($7\text{ m} + 3\text{ m} = 10\text{ m}$) er noget mindre følsomme, og reducerede lag på mere end 3 m er i alle sammenhænge lag mindre følsomme (f.eks. 7 m oxideret og + 4 m).
- Makroporeddybden kan almindeligvis registreres i udgravninger (begrænset antal), men oxiderede lerlag, redoxgrænsen og reducerede lerlag kan også findes i borer i Jupiter databasen, hvor der p.t. er op mod 300.000 borer. Da naturen er heterogen er der selvfølgelig afvigelser fra dette med f.eks. gentagelser af oxidationszoner, men som kernen i en metode er det med den nuværende viden et robust udgangspunkt.
- Nye væsentlige elementer for et det videre arbejde, som er fundet i dette projekt, er: 1) Anvendelsen af det Poly Morfologiske koncept ved udarbejdelse af polymorfologiske kort, 2) Vurderingen af, at redoxgrænsens beliggenhed er styret af størstedelen af makroporerens ophør nedad i morænelerslagene, og dermed kan bruges nøgleparameter (proxi), 3) En pesticidfølsomheds kort lægning sandsynligvis kan baseres på lertykkelser og – udbredelser (geofysik, borer), oxideret-reduceret tykkelse i lerlagene (boringer), redoxgrænses beliggenhed (boringer), samt viden om pesticid- og iltforhold i grundvandsmagasinerne.

Elementerne/data i en metode/koncept, der sandsynligvis kan gælde for hele det danske lerområde, er følgende:

- PMkoncept-område kortlægning i relevant målestok Modelkoncept for hvert PM-område
- Morænelertykkelse og udbredelse fra borer og geofysik
- Tykkelse af oxideret og reduceret moræneler fra daglok. og borer

- Redoxgrænsens beliggenhed (makroporeddybde) fra borer og daglok.
- Pesticidindhold i grundvandsmagasiner fra borer
- Ilt indhold i grundvand fra borer
- Anvendelse og sammenstilling af ovenstående data kan bruges til at etablere en Følsomhedsklassifikation, som et samlende grundlag for udpegning af pesticidfølsomme områder. Hvis disse elementer kombineres, kan der forventeligt opdeles i arealer med forskellig følsomhed.

Rækken af eksisterende datasamlinger med de centrale og nødvendige data for at udvikle en metode vil være:

- a. Udgravninger: Leregenskaber fra eksisterende udgravninger.
- b. Borer fra Jupiter boringsdatabasen
- c. Geofysik fra Gerda databasen fra bl.a. Grundvandskortlægningen
- d. Geokemi i aflejringer fra felt – og laboratorieforsøg
- e. Geokemi i grundvandet i Jupiterdatabasen fra GRUMO, LOOP, Boringskontrol og AA.
- f. Pesticiddata fra grundvandet i Jupiterdatabasen og VAP-registrene fra GRUMO, LOOP, Boringskontrol, AA og VAP.
- g. VAP-mark data i Jupiterdatabasen og VAP-registrene
- h. Eksisterende Grundvandskortlægning, herunder geologisk modeller og om nitratfølsomme områder.

Datagrundlaget er således overvejende eksisterende i arkiver, databaser og kortlægninger, men nedenfor er anført opgaver med at finde ny information fra områder der ikke er inddraget denne undersøgelse og sætte og vurdere denne eksisterende information sammen på en ny måde for at udarbejde, beskrive og konsolidere metoden.

Det bør derfor være en efterfølgende opgave, at udarbejde den detaljerede metode til, hvordan en udpegning skal foregå, hvilket kan forgå sideløbende med de opgaver der omtales nedenfor. PM koncept i justeret og udbygget udgave

som grundlag for konceptuelle modeller og arealafgrænsninger vil være en frabar vej.

14.2 Behov for nye informationer og de økonomiske behov

Nedenfor beskrives de aktiviteter som foreslås at efterfølge nærværende projekt:

1. Vurdering af PM områder med tilsvarende forhold som på Stevns og Hedeland områderne på Sjælland, Lolland, Falster og Møn. Opstilling af konceptuelle modeller for områder indenfor de allerede opstillede PM områder til anvendelse på alle lerområder. Opgaven skal konsolidere og generalisere de allerede indhentede resultater i nærværende projekt.
2. Udarbejde PM inddeling for resten af lerområderne i Danmark samt justering af konceptet, hvis det er nødvendigt, samt opstilling af konceptuelle modeller for nye områder. Bearbejdelse af resten af opmålte feltlokaliteter og relevante boringer i forhold til makroporer og redoxgrænsens beliggenhed. Fokus på nye boringer i områder med gentagelse af redoxzoner. Modellering af relevante konceptuelle modeller. Denne opgave er den vigtigste for at komme frem til et landsdækkende koncept og for at kunne etablere en følsomhedsklassifikation.
3. Vurdering af lerområder, hvor de geologiske forhold peger på, at der ikke er grundvandsmagasiner under moræneler/smeltevandsler, hvorfor de kan udgå fra videre overvejelser. Opgaven vil antagelig pege på områder, som ikke vil være følsomme
4. Screening af pesticider over grænseværdien på Sjælland i andre PM områder fra tidligere og nu. Screening af pesticider over grænseværdi resten af landets lerområder fra tidligere og nu. Screeningen vil være med som grundlag for, hvor der skal rettes fokus hen mht. følsomhed overfor pesticider.
5. Etablering af en følsomhedsklassifikation baseret på: makroporer, oxidationsforhold, lertykkelse, lerudbredelse og pesticidfund samt PM-koncept. Alle gamle og nye data vil indgå. Klassifikationen skal pege på udpegning af pesticidfølsomme lerområder og skal derfor baseres på landsdækkende lerområde data (Indsamlet ovenfor).

Disse fem opgaver er vurderet til at koste ca. 1,8 mio. kr, exl. Moms og de kan fordeles over 2 år.. En plan for tid og økonomi, hvis opgaven påbegyndes i indeværende år, kunne se ud som følger:

2014

Opgave 1: kr. 300.000,-. Opgave 1 færdiggøres i 2014

Opgave 2: kr. 600.000,-. Opgave 2 fortsætter i 2015

Opgave 3: kr. 100.000,-. Opgave 3 færdiggøres i 2014

2015

Opgave 2: kr. 300.000,-. Opgave færdig i 2015

Opgave 4: kr. 200.000,-. Opgave færdig i 2015

Opgave 5: kr. 300.000,-: opgave færdig i 2015

Hele projektet kunne i givet fald forventes færdigt medio 2015

Det kan desuden overvejes om følgende opgaver skal udføres:

- Oprettelse af "deldatabase" med relevante boringsdata: ler, sand, kalk, pesticider, redoxgrænse, PM m.m.

- Vurdering af anvendelse af den geofysiske metode DualEM421.

- Der kan eventuelt foretages analyser af tilladte og regulerede pesticiders sorptions og nedbrydnings egenskaber i leraflejringer for at gøre en metode endnu mere robust.

15. Referencer

Listen indeholder både referencer i hovedteksten og bilagene.

- Aamand, J., Rasmussen, J.J. & Jacobsen, O.S., 2004: Opdeling af pesticider i forhold til deres sorptions- og nedbrydningsegenskaber. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, 34 sider.
- Andersen, L.J. & Gravesen, P., 1989: Cyclogram Maps in the Interpretation of Pumping Tests. Recent Advances in Groundwater Hydrology. American Institute of Hydrology, 589-604 + kort.
- Arias-Estevez, M., Lopez-Periago, E., Martinez-Carballo, E., Simal-Gandara, J., Mejuto, J. C., & Garcia-Rio, L., 2008: The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 123(4), 247-260.
- Auken, E., Christiansen, A.V., Jacobsen, B.H., Foged, N., & Sørensen, K.I. 2005: Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting* 53, 497-506. doi: 10.1111/j.1365-2478.2005.00486.x.
- Beven, K. & Germann, P., 2013: Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research* Vol 49, 3071-3092.
- Brüsch, W. & Rosenberg, P., 2008: Fund af glyphosat og AMPA i drikkevand fra små vandforsyningsanlæg i Storstrøms Amt. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1163, 204 sider.
- Brüsch, W., Johnsen, A.R. & Larsen, C.L., 2013: Kortlægning af belastningen med pesticider i grundvandet indenfor Region Sjælland. GEUS-NOTAT til Region Sjælland, nr. 05-VA-13-01, 40 sider.
- Brüsch, W., Kjær, J., Rosenbom, A.E., Juhler, R.K., Gudmundsson, L., Plauborg, F., Nielsen, C.B. & Olsen, P., 2013: The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Monitoring results May 1999-June 2011. GEUS & University of Aarhus, 107 sider + bilag.
- Buchanan, I., Liang, H. C., Khan, W., Liu, Z. K., Singh, R., Ikehata, K., & Chelme-Ayala, P., 2009: Pesticides and Herbicides. *Water Environ Res*, 81(10), 1731-1816.
- Christiansen, A.V., & Auken, E. 2008: Presenting a free, highly flexible inversion code. In: Society of Exploration Geophysics Annual Meeting, 78th, SEG, Tulsa, OK. Las Vegas.
- Christiansen, A.V., & Auken, E. 2012: A global measure for depth of investigation. *Geophysics* 77, WB171-WB177.
- COWI 2012: SkyTEM kortlægning i Næstved-området. Naturstyrelsen Nykøbing (GEUS, database for grundvandsrapporter).
- COWI 2013: SkyTEM kortlægning i Slagelse-området. Naturstyrelsen Nykøbing (GEUS, database for grundvandsrapporter).
- Dahlin, T. 1996: 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break* 14, 275-283.
- Dahlin, T., & Loke, M. H. 1998: Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237-249.

- Dahlin, T., & Zhou, B. 2004: A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379-398.
- Danielsen, J. E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergaard, V. H., & Sørensen, K. I., 2003: The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *Journal of Applied Geophysics* 53, 181-198.
- Det Strategiske Miljøforskningsprogram (SMP), 2000: Pesticider og Grundvand. Temanummer fra Grundvandsgruppen.. Miljøforskning Nr. 42, 43 sider.
- Ernstsen, V., 1990: Nitratreduktion i moræneler. NPO-forskning fra Miljøstyrelsen, Nr. B2, 56 sider.
- Ernstsen, V., & Rosenberg, P. 2004: Geologi, geokemi, mineralogi og sorption af pesticider i unge lerholdige sedimenter. i GEUS & DJF (red.: Ernstsen, V.), 2004b: Afprøvning af undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af et zoneringskoncept for danske lerjorde: Statusrapport. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, Bilag 11, 32 sider.
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P., & Elsner, M., 2013: Evaluating Pesticide Degradation in the Environment: Blind Spots and Emerging Opportunities. *Science*, 341(6147), 752-758.
- Fredericia, J., 1990: Saturated hydraulic conductivity of clayey till and the role of fractures, *Nordic Hydrology*, Vol. 21, 119-132.
- Friberg, R., 1996: The landscape below the Tinglev outwash plain: a reconstruction. *Bull. Geol. Soc. Denm.* Vol. 43, 34-40.
- Gamble, D. S., 2013: Discoveries Leading to Conventional Chemical Kinetics for Pesticides in Soils: A Review. *Advances in Agronomy*, Vol 120, 120, 381-419.
- GEUS, 2013a: Jupiter Boringsdatabasen. GEUS Hjemmeside. www.geus.dk.
- GEUS, 2013b: Gerda geofysikdatabasen. GEUS Hjemmeside: www.geus.dk.
- GEUS & DJF (red. Nygaard, E.), 2004a: Særligt pesticidfølsomme sandområder: Forudsætninger og metoder for zoneringskoncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, 93 sider + 225 sider bilag
- GEUS & DJF (red.: Ernstsen, V.), 2004b: Afprøvning af undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af et zoneringskoncept for danske lerjorde: Statusrapport. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, 25 sider + 175 sider bilag.
- GEUS & DJF (red.: Gravesen, P. & Rosenberg, P.), 2009: Særligt pesticidfølsomme lerområder: Datagrundlag og mulige vej mod zoneringskoncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, 70 sider + 81 sider bilag.
- GEUS (red.: Mielby, S.), 2011: Den nationale grundvandskortlægning i Danmark. Faglige resultater fra GEUS 2010. GEUS, 59 sider.
- Gravesen, P., 1993: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1115 I Struer. Geologisk Basisdatakort. Danm. Geol. Unders. Kortserie nr. 22, 3 sider + kort.
- Gravesen, P. & Fredericia, J., 1984 (eds.): ZEUS geodatabasesystem. Borearkivet. Databeskrivelse, kodesystem og sideregistre. Danm. Geol. Unders. Serie C, No.3, 259 sider.
- Gravesen P., Klint K.E.S., Ernstsen V. & Jakobsen P.R., 2001: Opskalering af morænelers egenskaber. *Vand og Jord*. 8. 4, 126-129.
- Gravesen P., Klint K.E.S., Jacobsen O.S., Harrar W.G. Felding G., Jørgensen P. Fomsgaard I. & Spliid N.H., 2000: Transport af vand og pesticider i opsprækket moræneler. I Pesticider og grundvand, Temanummer fra Grundvandsgruppen Miljøforskning 42 under det strategiske miljøforsknings program april 2000, 6-9.
- Gravesen, P., Pedersen, S.A.S., Klint, K.E.S. & Jakobsen, P.R., 2006: Geologiske kort i Danmark – hvad viser de kvartærgeologiske kort, *GeologiskNyt* 2/06, 10-14.
- GST, 2013: Den Digitale højdemodel i Danmark, (DEM).

- Geofysiksamarbejdet 2002a: Indflydelsen af tredimensionale modstandsfordelinger på den endimensionale tolkning af TEM data. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2002b: Test og sammenligning af transient elektromagnetiske instrumenter i Danmark. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2002c: LCI-tolkning af geoelektriske data – verificering af metoden. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2003a: Anvendelse af TEM-metoden ved geologisk kortlægning. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- GeofysikSamarbejdet 2004: Lateralt sambunden tolkning af transiente elektromagnetiske data. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- GeofysikSamarbejdet 2005a: Processering og tolkning af MEP-data målt med Gradient-array-konfigurationer. <http://gfs.au.dk/standarder/mep/>
- GeofysikSamarbejdet 2005b. Strukturel sårbarhedskortlægning – vurdering af lertykkelser. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2007: Mangelagstolkning af TEM-data. Test og sammenligninger. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2008a: Vejledning i udførelse af PACES målinger. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- GeofysikSamarbejdet 2008b: Vejledning og kravspecifikation for MEP-målinger. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- GeofysikSamarbejdet 2008c: Spatially constrained inversion of SkyTEMdata. Concept and examples. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2009: SSV-konceptet, baggrund, anvendelse og eksempler. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2011a: Vejledning og kravspecifikation for SkyTEM-målinger, processering og inversion. Version 2.5. <http://gfs.au.dk/standarder/skytem/>
- Geofysiksamarbejdet 2011b: Himmerland – Vurdering af SkyTEM metoden til sårbarhedskortlægning. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Geofysiksamarbejdet 2012: Refinement of the national TEM reference model at Lyngby June 2012 (update from Nov. 2011). <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>
- Gry, H, 1040: De istektoniske forhold i moleromraadet. Meddr Dansk Geol., Foren, Bd. 9n Hf. 5, 586-627
- Folketingets Miljø- og Planlægningsudvalg, 2003: Pesticidplan 2004-2009,. Oktober 2003.
- FOOTPRINT, 2009: FOOTPRINT – Functional TOOlS for Pesticide RIsk assessmeNt and management, <http://www-eu-footprint.org/>
- Hansen, B., Iversen, C.H., Nielsen, A.M. & Søndergaard, V., 2008: Status for udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder og indsasområder mht. nitrat. Amtens arbejdsrapport. GEUS Særudgivelse, 47 sider.
- Hansen, B, Mossin, L., Ramsay, L., Thorling, L., Ernstsen, V., Jørgensen, J. & Kristensen, M., 2009: Kemisk grundvandskortlægning. Geo-vejledning 6, Særudgivelse fra GEUS, 112 sider.
- Harrar, W.G., Murdoch L.C., Nilsson B. & Klint, K.E.S., 2007: Field characterization of a solute plume in a fractured glacial till. Hydrogeology Journal 15, 1473-1488.
- Henriksen H.J., Barlebo H.C., Ernstsen V., Hansen M., Harrar W.G., Jakobsen P.R. Klint K.E.S. & Trolborg L. 2000: Anvendelse af regionale pesticidmodeller som

- prognoseværk-tøj. I Pesticider og grundvand, Temanummer fra Grundvandsgruppen Miljøforskning 42 under det strategiske miljøforsknings program april 2000, 40-42.
- Hermansen, B., Pedersen, S.A.S. & Bjerregaard, C., 1999: Digitalt kort over Danmarks jordarter 1:200.000. Version 1.0. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 1999/47. CD.
- Houmark-Nielsen, M., 1987: Pleistocene Stratigraphy and Glacial History of the Central Part of Denmark. Bull. Geol. Soc. Denmark, Vol. 36, part 1-2, 1-189.
- Houmark. Nielsen, M., Krüger, J. & Kjær K., 2005: De seneste 150.000 år i Danmark. Geviden, nr. 2, 2-19.
- Håkansson, E. & Pedersen, S.A.S., 1992: Geologisk kort over den danske undergrund. VARV, 1992.
- HydroGeophysicsGrop 2012: SkyTEM survey Norsminde & Lillebæk. NiCA project 2011. <http://gfs.au.dk/publikationer/rapporter/>.
- Høyer, A.S., Møller, I. & Jørgensen, F 2013: Challenges in geophysical mapping of glaciotectonic structures. Geophysics 78, B287-B303.
- Jacobsen, O.H. & Kjær, J., 2007: Is tile drainage water representative of root zone leaching of pesticides. Pest Management Science 63, 417-428.
- Jacobsen, C. S., van der Keur, P., Iversen, B. V., Rosenberg, P., Barlebo, H. C., Torp, S., Vosgerau, H., Juhler, R. K., Ernstsens, V., Rasmussen, J., Brinch, U. C., & Jacobsen, O. H., 2008: "Variation of MCPA, metribuzine, methyltriazine-amine and glyphosate degradation, sorption, mineralization and leaching in different soil horizons." Environ. Pollut., 156(3), 794-802.
- Jakobsen, E.M., 1985: En råstofgeologisk kortlægning omkring Roskilde. Dansk Geol. Foren., Årsskrift for 1984, 65-78.
- Jakobsen, P.R, Hermansen, B. & Tougaard, L., 2011: Danmarks digitale jordartskort. Danm. og Grønland. Geol Unders. Rapport 2011/40.
- Jakobsen, P.R., 2012: Det digitale Geomorforlogiske kort over Danmark. 1:200 000. Sjælland, med omliggende øer og Bornholm, ver.1.0, GEUS.
- Jakobsen, P.R. & Klint. K.E.S 1999: Fracture Distribution and Occurrence of DNAPL in a Clayey Lodgement Till. Nordic Hydrology, Vol. 30, No, 4/5, 285-300.
- Jensen, J.B., 1985: Sen-Elster smeltevandsler – en mulig ledehorisont i det vestlige Jylland. Dansk Geol. Forening, Årsskrift for 1984, 21-35.
- Jørgensen P.R., Klint K.E.S. & Kistrup J.P. 2003: Monitoring Well Interception with fractures in Clayey Till. Groundwater Vol 41, No 6, 772-779.
- Jørgensen, P.R., Hoffmann, M., Kistrup, J.P., Bryde, C., Bossi, R. & Villholth, K.G., 2002: Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis. Water resources Research, Vol. 38, no.11,
- Kessler, T.C., Klint, K.E.S., Nilsson, B. & Bjerg, P.L., 2012: Characterization of sand lenses embedded in tills. Quaternary Science Reviews 53, 55-71.
- Kessler, T.C., Comunian, A., Oriani, F., Renard, P., Nilsson, B., Klint, K.E. & Bjerg, P.L., I trykken: Modeling Fine-Scale Geological Heterogeneity-Examples of Sand lenses in Tills. Ground Water.
- 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. 40 sider + 6 artikelmanuskripter.
- Klint K.E.S. 2004: Undersøgelse af de geologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør. I: Afprøvning af Undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af zoneringskoncept for danske lerjorde. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA. Editor Vibeke Ernstsens. GEUS & DJF, Bilag 2, side 1-24.

- Klint, K.E.S., 2009: Fordeling af sprækker i moræneler og polymorfologiks analyse. I: GEUS & DJF (red.: Gravesen, P. & Rosenberg, P.), 2009: Særligt pesticidfølsomme lerområder: Datagrundlag og mulige vej mod zoner. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, bilag 2, 5-31.
- Klint, K.E.S., Abildtrup, C.A., Gravesen, P., Jakobsen, P.R. & Vosgerau, H. 2001: Sprækkers oprindelse og udbredelse i moræneler i Danmark. *Vand og Jord* 8, 3, 111-119.
- Klint, K.E.S., & Fredericia, J., 1995: Sprækkeparametre i moræneler, *Vand & Jord*. 2. årg. okt. 1995, 208-214.
- Klint, K.E.S. & Gravesen P., 1999: Fractures and Biopores in Weichselian Clayey Till Aquitards at Flakkebjerg, Denmark. *Nordic Hydrology*. Vol. 30, No, 4/5, 267-284.
- Klint, K.E.S & Jakobsen, P.R., 1997: Sprækker i moræneler ved Haslev "Undersøgelse af sprækkers optræden, oprindelse og udbredelse på tjæreforurenet grund i Haslev (tidligere Haslev Gasværk)". Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). Intern rapport. no. 154, 25 sider.
- Klint, K.E.S, Nilsson, B., Troldborg, L. & Jakobsen, P.R., 2013: A poly morphological landform approach for hydrogeological applications in heterogeneous glacial sediments. *Hydrogeology Journal* Vol. 21, no. 6, 1247-1264.
- Kjær, J., Rosenbom, A.E., Brüsch, W., Juhler, R.K., Gudmundson, L., Plauborg, F., Grant, R. & Olsen, P., 2012: The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Monitoring results May 1999-2010. GEUS and Aarhus University, 109 sider + bilag.
- Knudsen, C., 1998: Heavy minerals exploration in Miocene sediments, Jylland. Danm. og Grøn. Geol. Unders. Rapport 1998/45, 44 sider + bilag.
- Koerdel, W., Egli, H., & Klein, M., 2008: Transport of pesticides via macropores (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chem.*, 80(1), 105-160.
- Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J., 1988: Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse. Bulletin Dansk Geoteknisk Forening, nr. 1, 144 sider.
- Lindhardt, B., Abildtrup, C., Vosgerau, H., Olsen, P., Torp, S., Iversen, B.V., Jørgensen, J.O., Plauborg, F., Rasmussen, P. & Gravesen, P., 2002: The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Site Characterization and Monitoring design, 73 sider + bilag.
- Loke, M.H., Dahlin, T. 2002: A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics* 49, 149-162.
- Malaguerra, F., Albrechtsen, H.-J., Thorling, L- & Binning, P.J., 2012: Pesticides in water supply wells in Zealand, Denmark: A statistical analysis. *Science of the Total Environment* 414, 433-444.
- Malinovski, D., & Klint K.E.S. 1997: Geotekniske undersøgelser af moræneler ved Flakkebjerg, (foreløbige resultater af geotekniske undersøgelser ved Flakkebjerg, SMP 96). Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) Intern rapport. no. 127, 21 sider.
- McKay, L.D. & Fredericia, J., 1995: Distribution, origin, and hydraulic influence of fractures in a clay-rich glacial deposit. *Can. Geotech. J.* 32, 957-975.
- McKay, L., Fredericia, J., Lenczewski, M., Morthorst, J. & Klint, K.E.S., 1999: Spatial variability of Contaminant Transport in a Fractured Till, Avedøre, Denmark. *Nordic Hydrology*. Vol. 30, No, 4/5, 333-360.
- 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.
- Møller, I., Larsen, G., Ditlefsen, C., & Gravesen, P., 2001: Lerkortlægning – Eksempler på kortlægning af teglværksler, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2001/134, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet, 46 sider.
- Møller, I., Sørensen, K.I. & Auken, E., 2006: 4.5 Geoelectrical methods. In: Burval Working Group: Groundwater Resources in Buried Valleys - a Challenge for Geosciences. Leibniz Institute for Applied Geosciences, Hannover, Germany, 77-87.
- Natur- og Landbrugskommissionen, 2013: Natur og landbrug – en ny start. April 2013, 122 sider.
- Naturstyrelsen, 2013: Miljørapport. Bekendtgørelse om udpegning og administration mv. af drikkevandsressourcer, juli 2013, Miljøministeriet, 29 sider.
- Niras, 2006: Potentialekort for Hedelandsformationen. Udarbejdet for Roskilde Amt og Københavns Amt, 12 sider + bilag.
- Nielsen, M.R., Hagensen, T., Greve, C., Bernth, J.D. & Chalikakis, K., 2008. Status for anvendelse af MRS (Magnetisk Resonans Sondering) i Danmark. ATV Jord og Grundvand, Vintermøde om jord- og grundvandsforurening, 4.-5 marts 2008.
- Nilsson, B. & Klint, K.E.S., 2009: Dybdevariation af hydraulisk ledningevne. I: GEUS & DJF (red.: Gravesen, P. & Rosenberg, P.), 2009: Særligt pesticidfølsomme lerområder: Datagrundlag og mulige vej mod zoneringskoncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, bilag 7, 48-69.
- Nilsson, B. & Petersen, D.L., 2004: Geologisk variabilitet bestemt ved cone penetration testing (CPT). I: GEUS & DJF (red.: Ernstsens, V.), 2004b: Afprøvning af undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af et zoneringskoncept for danske lerjorde: Statusrapport. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA, Bilag 3, 10 sider
- Nilsson B., Sidle R.C., Klint K.E.S., Bøggild C.E. & Broholm K., 2001: Mass Transport and Scale-dependent Hydraulic Tests in a Heterogeneous Glacial Till - Sand Lens - Unconfined Sandy Aquifer System. Journal of Hydrology 243, 162-179.
- Nimmo, J.R., 2012: Preferential flow occurs in unsaturated conditions. Hydrological Processes, 26, 786-789.
- Payraudeau, S., & Gregoire, C., 2012: Modelling pesticides transfer to surface water at the catchment scale: a multi-criteria analysis." Agron. Sustain. Dev., 32(2), 479-500.
- Pedersen, J.B, Effersøe, F., Jørgensen, F. Refsgaard, J.C., Auken, E., Shamper, C & Christensen, A.V., 2013: Mini-SkyTEM – et nyt kortlægningsværktøj. Vand & Jord 20, 118-121.
- Petersen, D.L., 2004: En geologisk og hydrogeologisk undersøgelse af inhomogeniteter i moræneler. Kandidatafhandling, Geologisk Institut, Københavns Universitet, 114 sider + bilagsbind.
- Rasmussen, P., Nielsen, A.B. & Bradshaw, E., 2007: Fra natur- til kulturlandskab. Geviden, nr.1, 2-9.
- Regeringen, 2013: Beskyt vand, natur og sundhed. Sprøjttemiddelstrategi 2013-2015. Miljøministeriet og Fødevareministeriet februar 2013, 34 sider.
- Robertson, W.D., Russell, B.M. & Cherry, J.A., 1996: Attenuation of nitrate in aquitard sediments of southern Ontario. Journal of Hydrology 180, 267-281.

- Roosmalen, L.v., Christensen, B.S. & Sonnenborg, T.O., 2007: Regional Differences in Climate Change Impacts on Groundwater and Steam Discharge in Denmark. *Vadose Zone Journal* Vol. 6, No. 3, 554-571.
- Rosenberg, P., Esbensen, K. & Juhler, R. K., 2013: Afslutning af vurderingen af det oprindelige KUPA Sand koncept mht. sorptionens afhængighed af jordparametre. Danm. og Grøn. Geol. Unders., Rapport. Nr. 2013/26, GEUS. 28 sider.
- Rosenbom, A.E. & Jakobsen, P.R., 2005: Infrared Thermography and Fracture Analysis of Preferential Flow in Chalk. *Vadose Zone Journal* 4, 271-280.
- Rosenbom, A.E., Therrien, R., Refsgaard, J.C., Jensen, K.H., Ernstsen, V. & Klint, K.E.S. 2009: Numerical analysis of water and solute transport in variably-saturated fractured clayey till. *Journal of Contaminant Hydrology* 104, 137-152.
- Rosenbom, A. E., Ernstsen, V., Flühler, H., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C. & Wydler, H., 2008: Fluorescence Imaging Applied to Tracer Distributions in Variably Saturated Fractured Clayey Till. *Journal of Environmental Quality* Vol. 37, no. 2, 448-458.
- Rowe, R.K. & Booker, J.R., 1990: Contaminant migration through fractured till into an underlying aquifer. *Can. Geotech. J.* Vol. 27, 484-493.
- Ruland, W.W., Cherry, J.A. & Feenstra, S, 1991: The Depth of Fractures and Active Ground-Water Flow in a Clayey Till Plain in Southwestern Ontario. *Ground Water* Vol. 29, nr. 3, 405-417.
- Schamper, C., Jørgensen, F., Auken, E. & Effersøe, F. Resolution of thin and shallow geological layers using airborne transient electromagnetics. *Geophysics*. Submitted.
- Side, R. C., Nilsson, B., Hansen, M. & Fredericia, J., 1998: Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. *Water Resources Research* Vol. 34, no. 10, 2515-2527.
- Sjørring, S., 1981: Pre-Weichselian Till Stratigraphy in Western Jutland, Denmark. *Medd. Rijks.Geol. Dienst.*, vol. 34, 62-68.
- Sjørring, S. & Frederiksen, J., 1980: Glacialstratigrafiske observationer I de vestjyske bakkeøer. *Dansk Geol. Foren., Årsskrift for 1979*, 63-77.
- Storstrøms Amt, 2003: NOVA 2003. Grundvandsovervågning 2003, 77 sider + bilag.
- Sørensen, K. I., 1996: Pulled Array Continuous Electrical Profiling: First Break 14, 85-90.
- Sørensen, K. I. & Auken, E., 2004: SkyTEM - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system: *Exploration Geophysics* 35, 191-199.
- Sørensen, K.I, Auken, E, Christensen, N.B, & Pellerin L., 2005: An Integrated Approach for Hydrogeophysical Investigations: New Technologies and a Case History. In: Butler D K (ed.) *Near-Surface Geophysics 2, Investigations in Geophysics* 13, 585-603. Society of Exploration Geophysics.
- Sørensen, K.I. & Pedersen, F.F., 1991: Den slæbegeoelektriske metode. Råstofkontorets kortlægningsserie 9, Skov- og Naturstyrelsen.
- Thorling, L., Brüsck, W., Hansen, B., Larsen, C., L., Mielby, S., Trolborg, L. & Sørensen, B-L., 2013: Grundvand, Status og udvikling 1989-2012. Teknisk rapport, GEUS 2012, 157 sider + bilag.

- Thomsen, R., Søndergaard, V.H. & Sørensen, K.I., 2004: Hydrogeological mapping as a basis for establishing site-specific groundwater protection zones in Denmark. *Hydrogeology Journal* 12, 550-562.
- Totsche, K. U., Rennert, T., Gerzabek, M. H., Kogel-Knabner, I., Smalla, K., Spiteller, M., & Vogel, H. J., 2010: Biogeochemical interfaces in soil: The interdisciplinary challenge for soil science. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(1), 88-99.
- Van Overmireen, R.A. & Ritsema, I.L., 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break* 6, 313-324.
- Vangkilde-Pedersen, T., Skjellerup, P., Ringgaard, J. & Jensen, J.F. 2003: Pulled array seismic (PAS) - A new method for shallow reflection seismic data acquisition. EAGE, Stavanger.
- Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sørensen, K., 2008: Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* , 73 (3), F105-F113.doi: 10.1190/1.2895521.

16. Bilag 1. PM konceptet

Oversigt over lokaliteter på forskellige PM-typer:

- MMK: To moræneflader på kalkoverflade: Rantzausgade, Englandsvej, Avedøre, Højstrup, Gjorslev. Haslev, Sigerslev.
- MS: EN Moræneflade på smeltevandsslette (sandur): Mammen, Grundfør.
- MMS: To moræneflader på smeltevandsslette (sandur): Tune, Kamstrup, Flakkebjerg, Havdrup, Lillebæk, Estrup, Vadsby.
- MD: Moræneflade på dødislandskab: Ringe
- DM: Dødislandskab på moræneflade: Slæggerup.
- MR: Moræneflade på randmoræne (overskredet randmoræne): Silstrup, Fårdrup.
- RM: Randmoræne over marint ler Gedserodde, Silstrup.

Kort beskrivelse af de vigtigste PM områder, også sat i sammenhæng med udenlandske lokaliteter.

Moræneflade på kalkoverflade (MK)

Lokaliteter med moræneflade på kalkoverflade er relativt godt repræsenteret med syv lokaliteter: Rantzausgade, Englandsvej, Avedøre, Højstrup, Gjorslev. Haslev og Sigerslev.

Det er inden for dette område, at man ser den største ensartethed imellem de enkelte områder. Avedøre og Kupa lokaliteterne (Højstrup og Gjorslev) er nøglelokaliteter for denne geologiske ramme, og der foreligger et righoldigt materiale om sprækkernes udbredelse og hydrauliske egenskaber. Generelt trænger sprækkerne ikke så dybt ned

på Stevns og i Københavnsområdet. Avedøre er lidt speciel, idet der her er påvist neotektoniske sprækker, der tolkes at gennemsnitte hele lagpakken. Det må bemærkes, at kalkoverfladens hydrauliske egenskaber varierer kraftigt, og specielt ved Haslev måltet meget høj permeabilitet i kalken, hvilket kan sammenholdes med dannelsen af meget dybe sprækker (>10m). Det er derfor ikke uvæsentligt om kalkoverfladen består af f.eks. Skrivekridt eller bryozokalk. Det må umiddelbart konkluderes, at områder med stærkt knust kalk (højpermeabel) er langt mere sårbare end områder med relativt tæt massivt kalk. Så måske kan sårbarheden vurderes ud fra pumpe-test i kalkmagasinet.

To eller flere moræneflader på smeltevandsslette (sandur) (MMS):

Områder med to moræneflader direkte på underliggende smeltevandsletter er også vel repræsenteret med syv lokaliteter: Tune, Kamstrup, Flakkebjerg, Havdrup, Vadsby, Lillebæk, Duffins Creek (Canada) og Estrup.

Her ses nogle af de dybeste sprækker, der er målt (> 10 meter dybe) og specielt Tune Grusgrav er en nøglelokalitet, idet over 200 meter lange profiler er blottet her til en dybde af over 14 meter under terræn. Sprækkedybden i Tune varierer stærkt afhængig af morænelerstykkelsen, og det ses også her, hvordan redoxgrænsen afspejler sprækkedybden. 10 meter moræneler synes at være en magisk tykkelse, idet en tykkere lagpakke tydeligvis resultere i langt mindre sprækker.

Flakkebjerg og Havdrup er ligeledes velundersøgt og udgør nogle af nøglelokaliteterne. Denne geologiske konfiguration tolkes at være generel sårbar for nedslivning, bortset fra Estrup lokaliteten, som adskiller sig fra de andre på grund af lagernes dannelse og alder.

Enkelt moræneflade på smeltevandsslette (sandur) (MS).

Fem lokaliteter: Mammen, Grundfør, Sletjökull, Solheimajökull (Island) og Scarborough Bluff (Canada).

Umiddelbart er denne konfiguration endnu mere sårbar end den ovenstående, idet en relativ tynd basal till overlejrer et højpermeabelt sediment. Både Grundfør, de Canadiske og Islandske lokaliteter var da også gennemsnat af sprækker, men ved Mammen var der kun udtørringssprækker. Dette tolkes at være en speciel situation, idet bundmorænen ved Mammen blev afsat, da isen stod helt op imod Hovedopholdslinien. De sto-

re hedesletter vest for Hovedopholdslinien (her Karup hedeslette), samt de dybe subglaciale smeltevandsdale (Gudenå dalen), der har skåret sig dybt ned i den underliggende sandur (Teppesstrup Formationen) antyder, at der har været et meget højt vandtryk under isen på dette tidspunkt. Det store porevandstryk og de dårlige dræningsbetingelser har forhindret dannelse af sprækker. Samtidig har det dybtliggende grundvandsspejl efter isens bortsmeltning, sammenholdt med et lavt lerindhold, resulteret i hurtig forvitring og opløsning af kalk i matrix. Alt dette betyder, at selvom der ikke er sprækker af betydning ved Mammen, er området alligevel sårbart for nedsivning. Dette bekræftes også af det manglende drænbehov.

Moræneflade på dødislandskab (MD).

Her findes kun én lokalitet, nemlig Ringe.

Ringe er til gengæld en af de bedst beskrevne områder i Danmark med data fra over 100 borer og 4 store udgravninger samt fuldskala infiltrationsforsøg. Denne lokalitet er karakteristisk ved sin ekstreme variabilitet. På trods af et lerdække på ca. 5-8 meter er der områder med store sprækker lige ved siden af områder med ingen eller meget få sprækker. Som en af de største forureningsgrunde herhjemme kan man roligt sige at området er sårbart. Der foreligger da også meget varierede hydrauliske data fra denne lokalitet. Generelt må det forventes, at bortsmeltning af begravet is indlejret i et overskredet dødislandskab vil fremkalde sætninger og indsynkninger i den ovenliggende moræneflade, så der vil opstå talrige sprækker/forkastninger.

Dødislandskab på moræneflade (DM).

To lokaliteter: Slæggerup og Kötlujökull (Island).

Området ved Slæggerup (VAP-lokalitet) er præget af stor variabilitet i dødisedimenterne og mere systematisk fordeling af makroporer i morænefladen. Den relative ujævne topografi med mange afløbsløse lavninger (dødishuller) og relativt store variation i sedimenterne gør det vanskeligt at generalisere (opskalere) observationer fra udgravninger. Ved Kötlujökull på Island er området præget af ingen eller svag opsprækning grundet højt porevandstryk under afsætning af bundmorænen. Sammenlagt placerer både Slæggerup sig i den svagere opsprækkede del, og det er spørgsmålet, om der er en sammenhæng imellem højt porevandstryk under isen og stagnering af gletcheren,

som så resulterede i svagere opsprækning. Tilstedeværelsen af mange mosehuller og småsøer i dødislandskaber rundt om tyder også på en generel langsom nedsivning. Så måske er denne landskabstype knap så sårbar.

Enkelt moræneflade på randmoræne (MR) (overskredet randmoræne).

Der er fire lokaliteter: Silstrup, Gedserodde, Fårdrup og Rouge River (Canada).

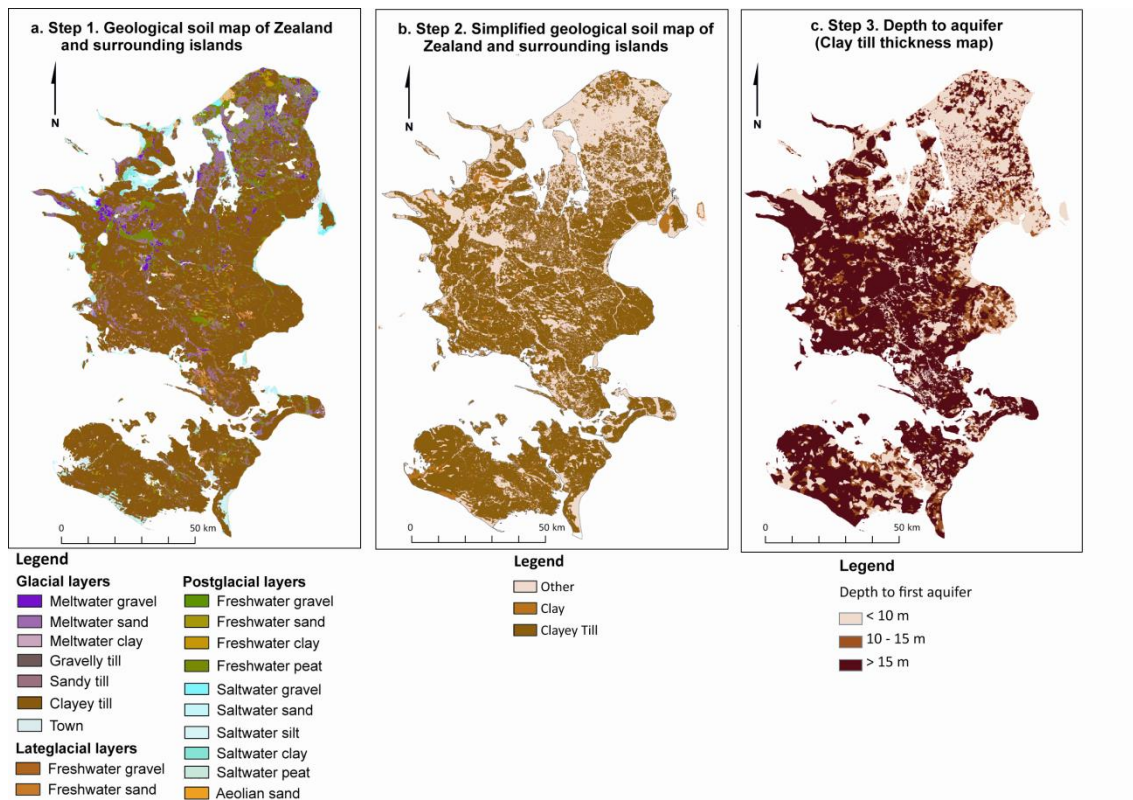
På disse lokaliteter ses mange store sprækker med en noget ujævn fordeling. Disloce-rede skiver af moræneler og smeltevandssand/grus danner "afløb" ned til grundvandet. Da disse områder er præget af bakker ses specielt i perioder med højt grundvandsspejl et meget kraftigt lateralt strømning.. Det betyder, at nedsivningen nok skal finde hen til "afløbene". Det betyder generelt, at områder præget af isoverskredne randmoræner må anses for at være mere sårbare på bestemte tidspunkter af året.

Samtidig er der stor variation af graden af opsprækning. På Silstrup er moræneleret svagt opsprækket, men samtidig er der den største nedsivning på VAP-lerlokaliteterne observeret netop på Silstrup. Det skyldes naturligvis, at udgravningen er placeret et sted, hvor moræneler overlejrer marint oligocænt glimmerler. Kystklinten nærved (Silstrup Hoved) er da også karakteristisk ved, at hele randmorænen består af disloce-rede skiver med vekslende permeabilitet. Der vil derfor også være områder med store sprækker og højere permeabilitet.

Kortlægning af randmoræner og deres interne opbygning er en stor udfordring, og ge-nerelt må sådanne områder anses for at være relativt sårbare.

Videre udvikling

Ovenpå det polygeomorforlogiske kort kan der så yderligere foretages tolkninger ved at kombinere forskellige datatyper. Eksempelvis kan der gennem generalisering af det geologiske jordartskort i med kombination af et kort over dybden til første betydende grundvandsmagasin udarbejdes et kort som viser PM typer, morænelerstyper og ler-tykkelser (Figur 1.1).



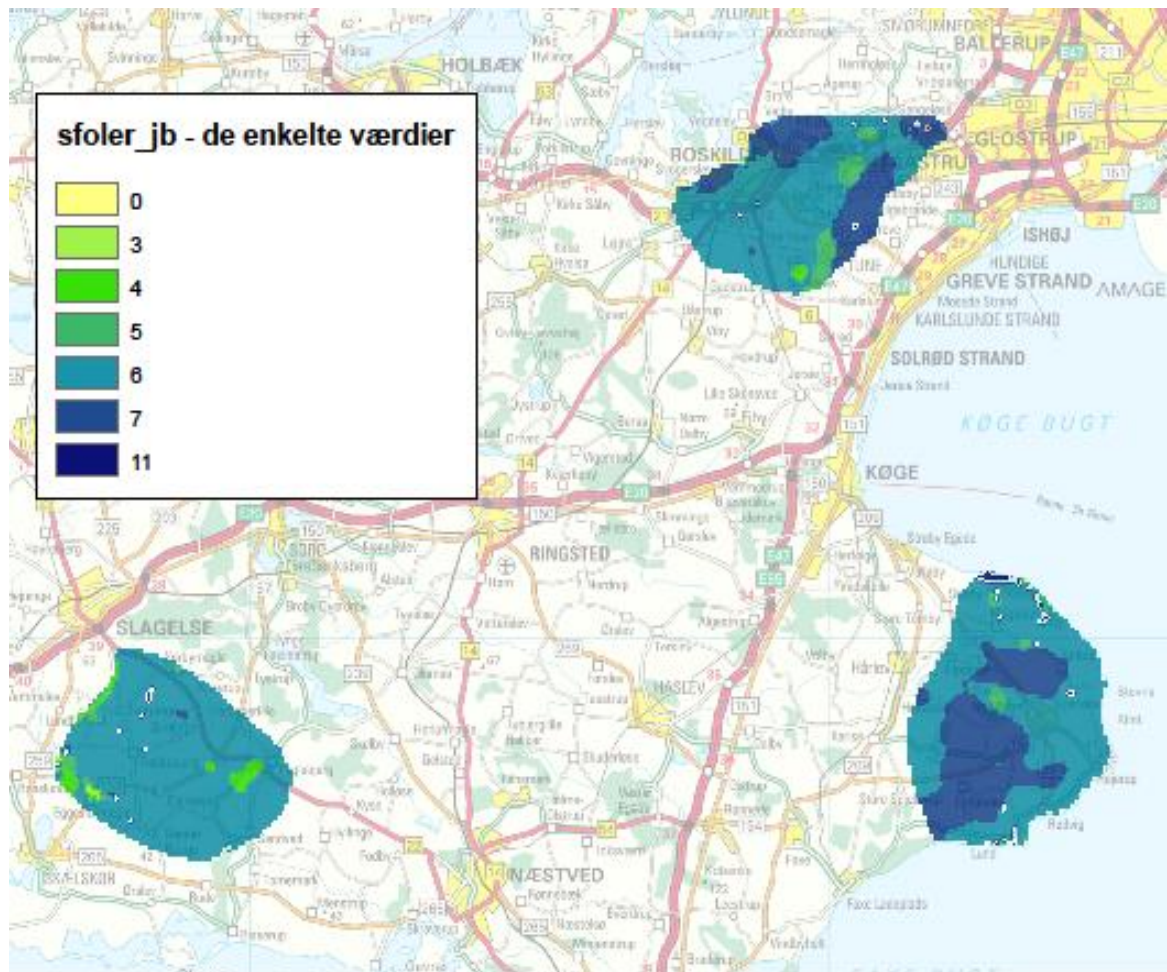
Figur 1.1. Tematiske kort som kan "lægges over" det polymorfologiske kort til udarbejdelse af et nyt tematisk kort (Fra Klint et al., 2013)

Nye forbedrede højdemodeller kan også benyttes til at tolke eventuelle glaciale overprægninger (f.eks. af dødissedimenter) og isbevægelsesretninger (drumlins og megaligneationer) og dermed indgå i tolkningen af sprækkeudbredelsen.

17. Bilag 2. Feltlokaliteter i forbindelse med geofysisk kortlægning: Dalmose-Fuglebjerg

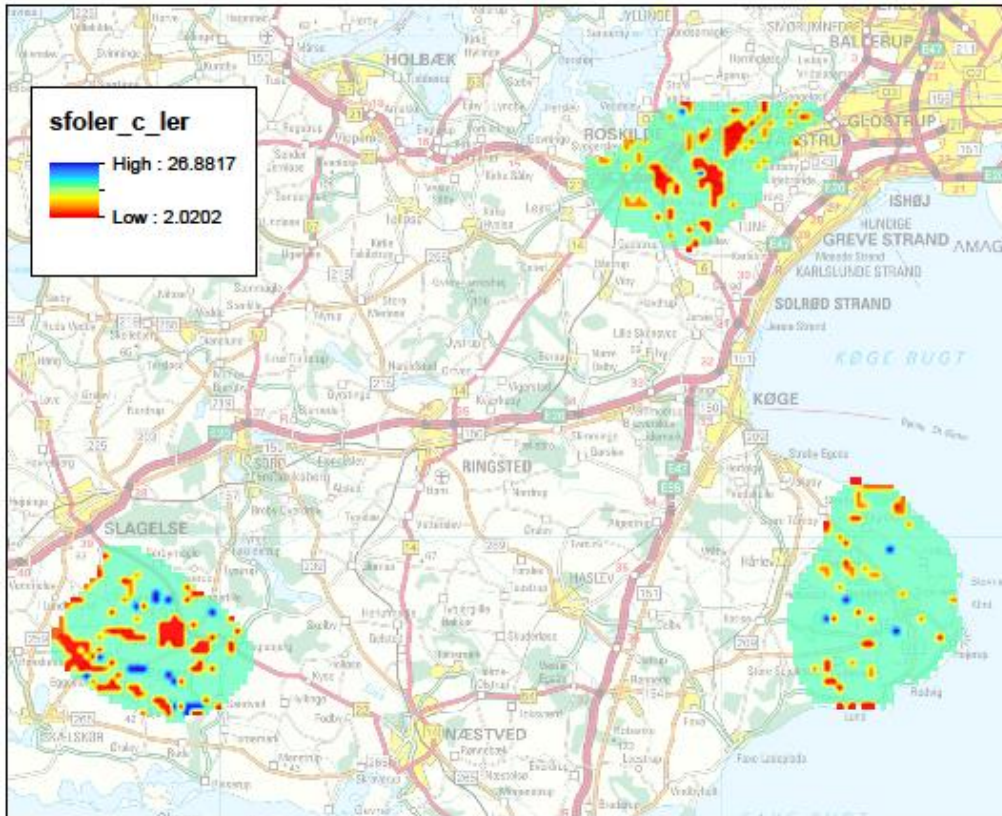
Bilaget indeholder supplerende materiale om de to lokaliteter Fårdrup og Flakkebjerg. Først er der imidlertid to kort, som viser jordbundsforholdene indenfor alle tre områder.

Jordbundsforhold i Dalmose-Fuglebjerg, Stevns og Hedeland områderne



Figur 2.1. De tre arealer inddelt efter JB nr. Klassifikation. Legende: nr. 3: Grov lerblandet sandjord, Nr. 4: Fin lerblandet sandjord, Nr. 5: Grov sandblandet lerjord, Nr. 6: Fin sandblandet lerjord, Nr. 7: Lerjord, Nr. 11: humus (Århus Universitet, 2013).

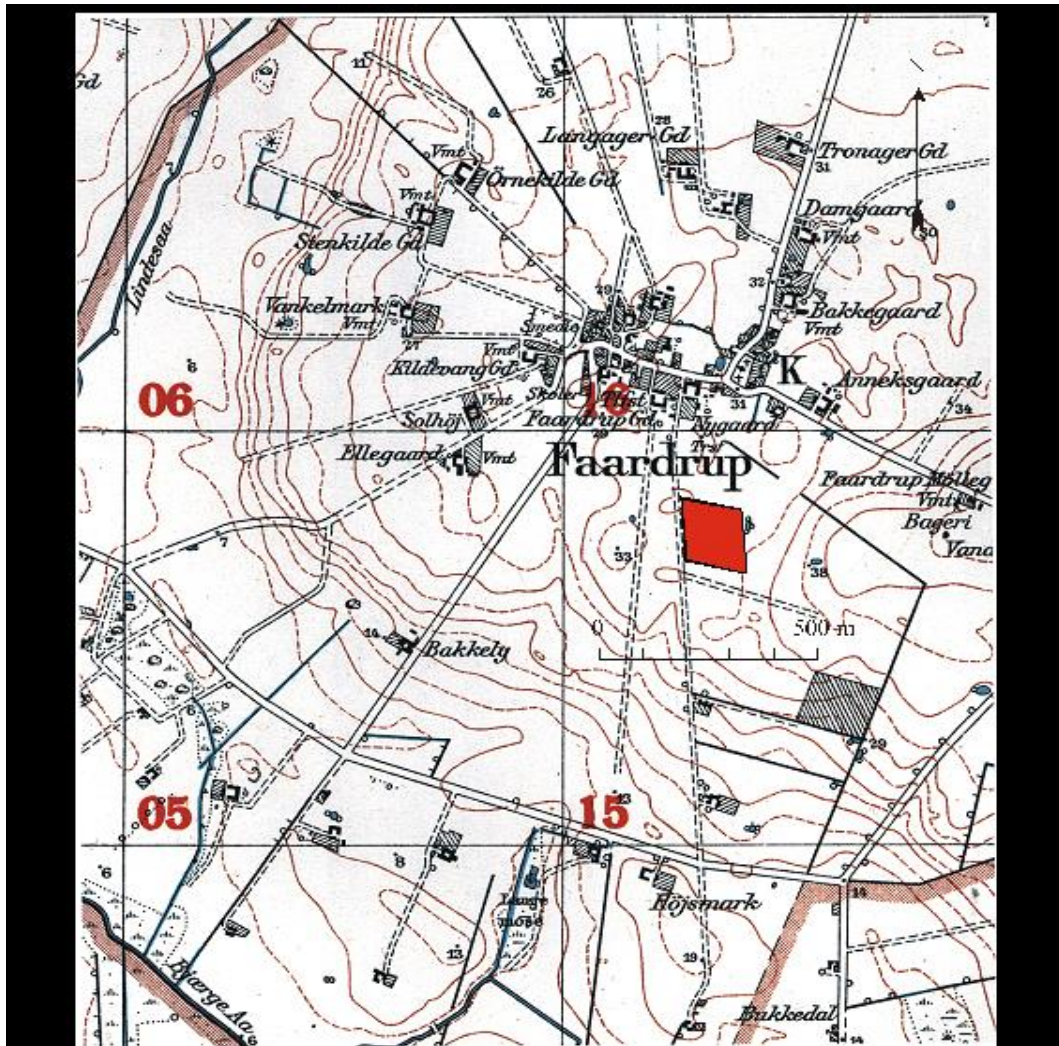
(www.difgeodata.dk/datasaml/jord2.html).



Figur 2.2. Ler % i C-horisonten i der tre områder (Århus Universitet, 2013).

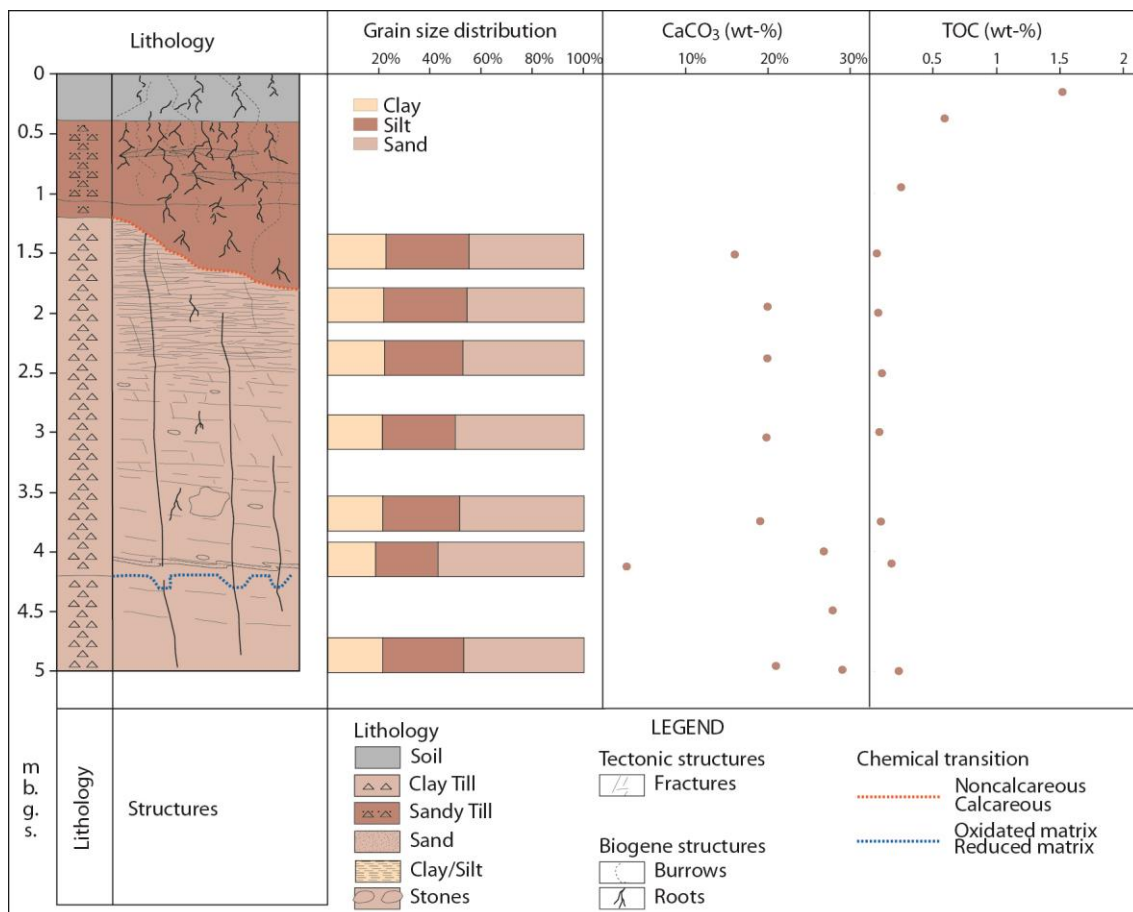
Fårdrup

Fårdrup ligger tæt på Flakkebjerg og er kendetegnet ved den samme overordnede geologi. Der er udført en udgravning til 5,5 m under terræn i moræneler, syv moniteringsboringer til 5,5 m under terræn og fire pejleboringer til 11 – 12 m under terræn.

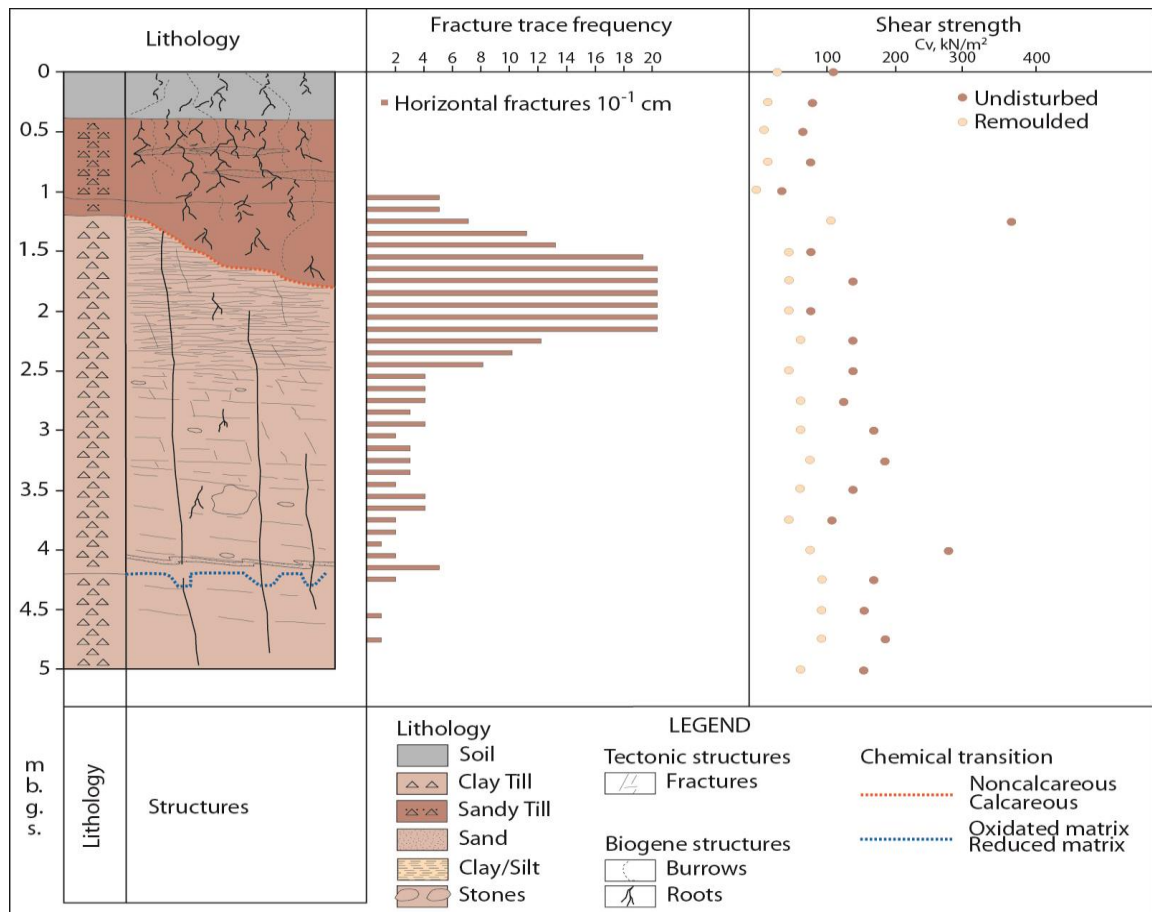


Figur 2.3. Fårdrops beliggenhed. (Fra Lindhardt et al., 2001).

Den er beliggende på et moræneplateau med en relativt lille geologisk variabilitet (Figur 2.3). Det opmålte profil består af moræneler med enkelte sandslirer og –linser. Moræneleret er således klassificeret som to basale tills, afsat under gletschere, der kom fra henholdsvis NØ og SØ i Sen-Weischel. Der er konstateret mindst tre sprækkesystemer i de øverste 5 meter moræneler (Figur 2.4 og 2.5).



Figur 2.4. Geologisk profil med kornstørrelsefordeling, kalkindhold og organisk indhold fra udgravningen ved Fårdrup. (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 2.5. Fårdrup profilet med horisontal sprækkehyppighed og geotekniske parametre. (Fra Lindhardt et al., 2001)

Flakkebjerg

Udgravningen på Flakkebjerg lokaliteten havde følgende lagfølge:

Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 m under terræn: Muld

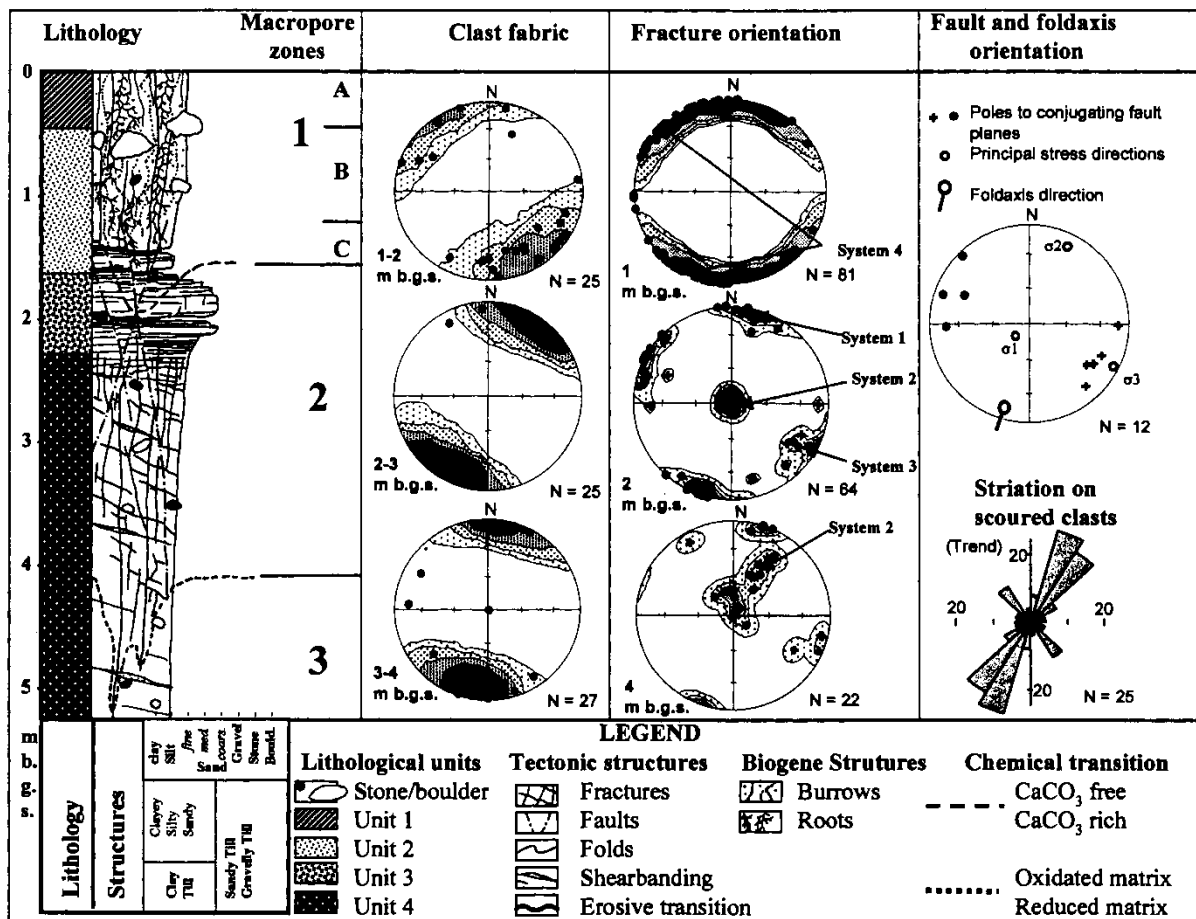
0,5 - 1,4 m under terræn: Moræneler, siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt, olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

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

Under 3, 5 m under terræn: Moræneler, siltet, svag sandet, svagt gruset, få sten, massiv matrix, olivengrå, stærk kalkholdig.

Till klassifikation

Som det fremgår af figur 2.6 blev der målt fabric analyse i tre dybdeintervaller 0-2 m, 2-3 m og 3-4 m under terrænen. 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). Sprækkedata se i Tabel 2.1 og 2.2.



Figur 2.6. Lithologisk log med sprækker og redoxforhold fra Flakkebjerg. (Fra Klint & Gra-
vesen, 1999).

FRACTURE INTENSITY				
(No of parallel fractures/m perpendicular to the main strike of the fractures)				
Depth	Vertical shear/dessiccation fractures	Horizontal shear fractures	Conjugating shear fractures and faults	Vertical dessiccation fractures
m b.g.s.	system 1	system 2	system 3	system 4
0	0	0	0	12
0.5	0	0	0	12
1	0	0	0.7	20.5
1.5	0	11	1.85	11.9
2	7.3	22	1.9	0
2.5	4.3	24	1.3	0
3	3.6	18	1.2	0
3.5	3.3	15	1.1	0
4	1.8	7	0.45	0
4.5	1.6	2	0.15	0
5	1.3	2	0	0
5.5	1	2	0	0

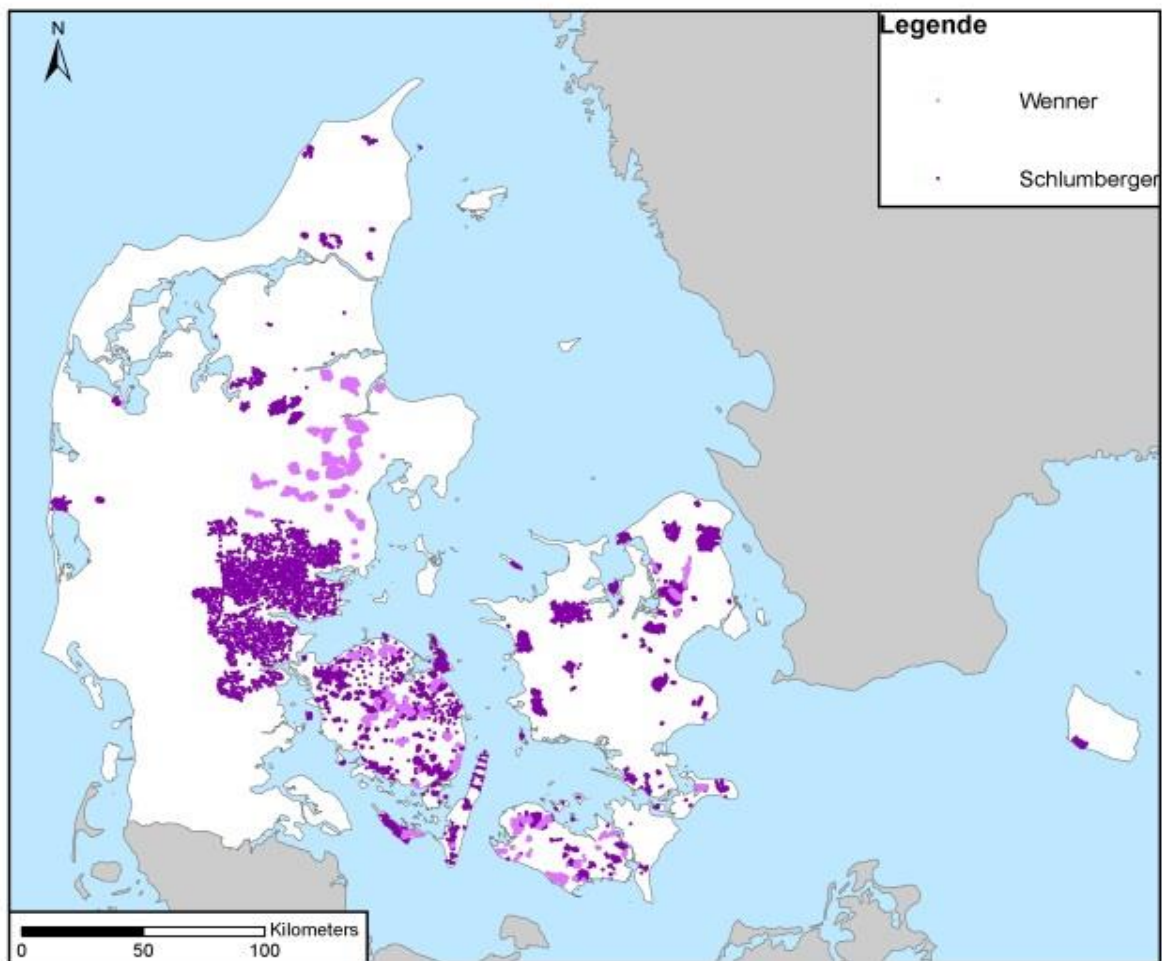
Tabel 1.1. Sprækkedata fra Flakkebjerg. Sprækkeintensiten er beregnet som sprækker/meter (Fra Klint & Gravesen, 1999)

FRACTURE SPACING				
(Average distance between parallel fractures in the individual fracture systems in meters)				
Depth	Vertical shear/dessiccation fractures	Horizontal shear fractures	Conjugating shear fractures and faults	Vertical dessiccation fractures
m b.g.s.	system 1	system 2	System 3	system 4
0	0	0	0	0.08
0.5	0	0	0	0.08
1	0	0	1.43	0.05
1.5	0	0.09	0.54	0.08
2	0.14	0.05	0.53	0
2.5	0.23	0.04	0.77	0
3	0.28	0.06	0.83	0
3.5	0.3	0.07	0.91	0
4	0.56	0.14	2.22	0
4.5	0.63	0.5	6.67	0
5	0.77	0.5	0	0
5.5	1	0.5	0	0

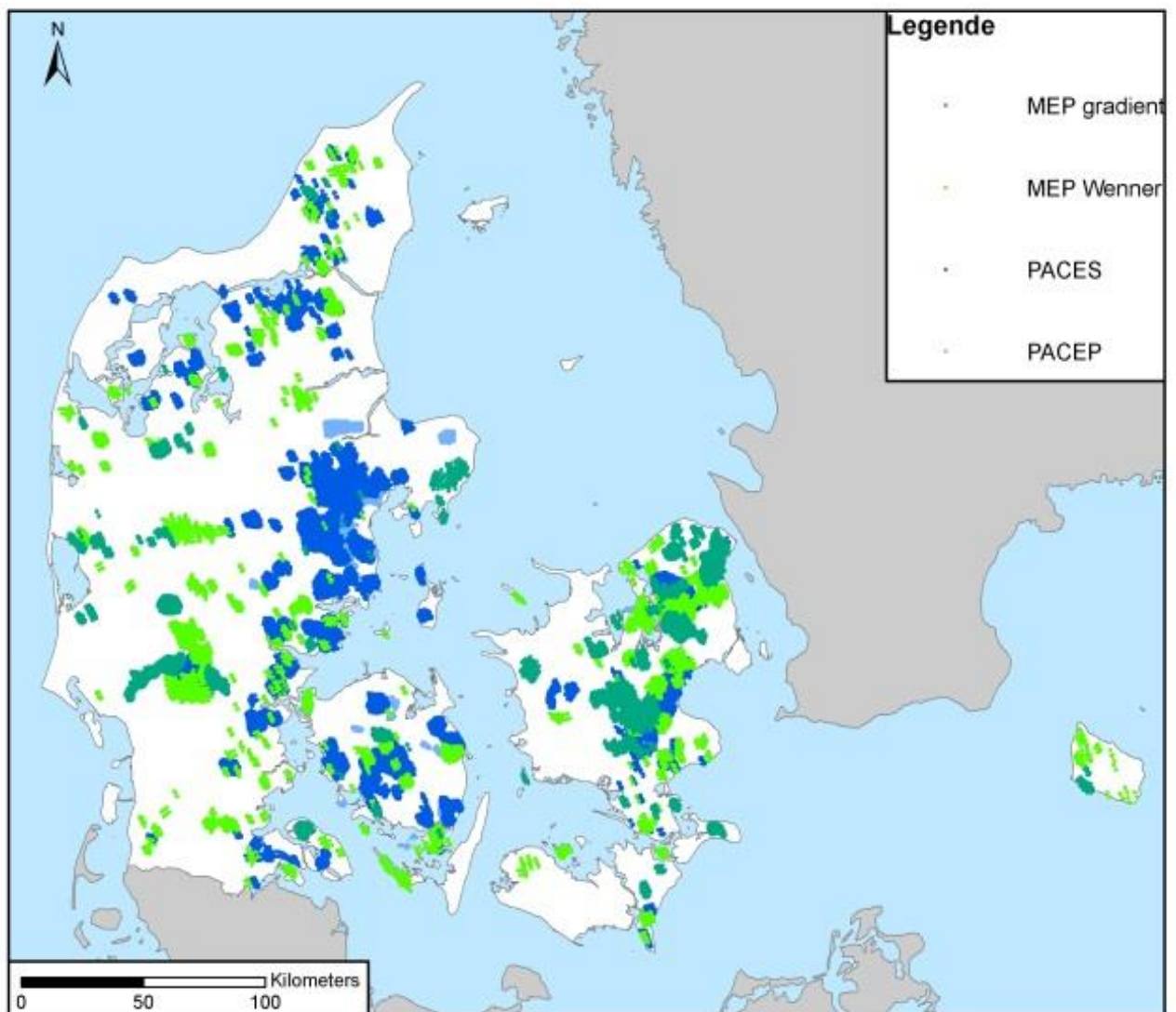
Tabel 2.2. Sprækkedata fra Flakkebjerg. Sprækkeafstand (spacing) med dybden i forskellige systemer (Fra Klint & Gravesen, 1999)

18. Bilag 3. Geofysiske metoder

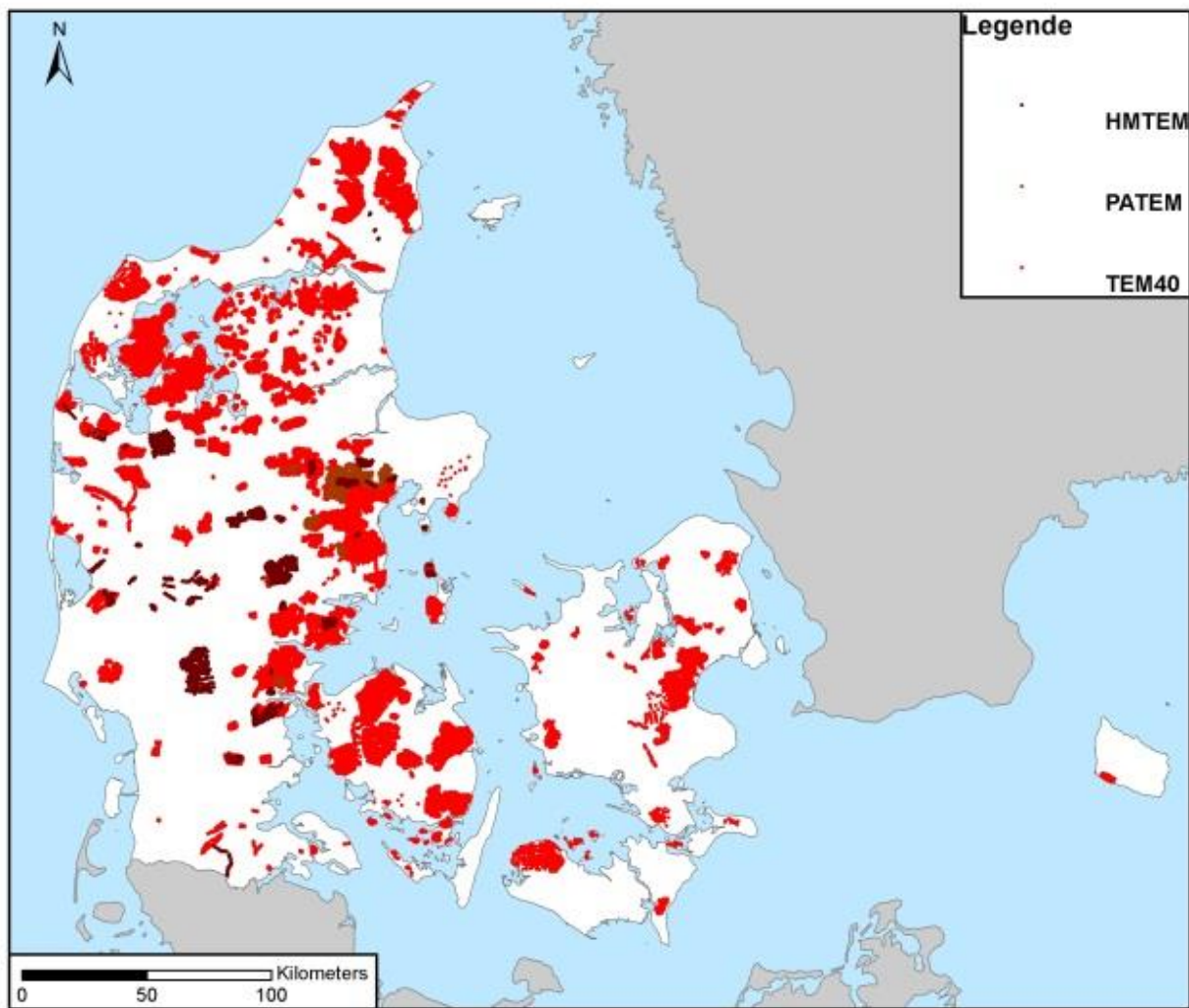
Oversigtskort over arealudbredelse af de forskellige anvendte geofysiske metoder.



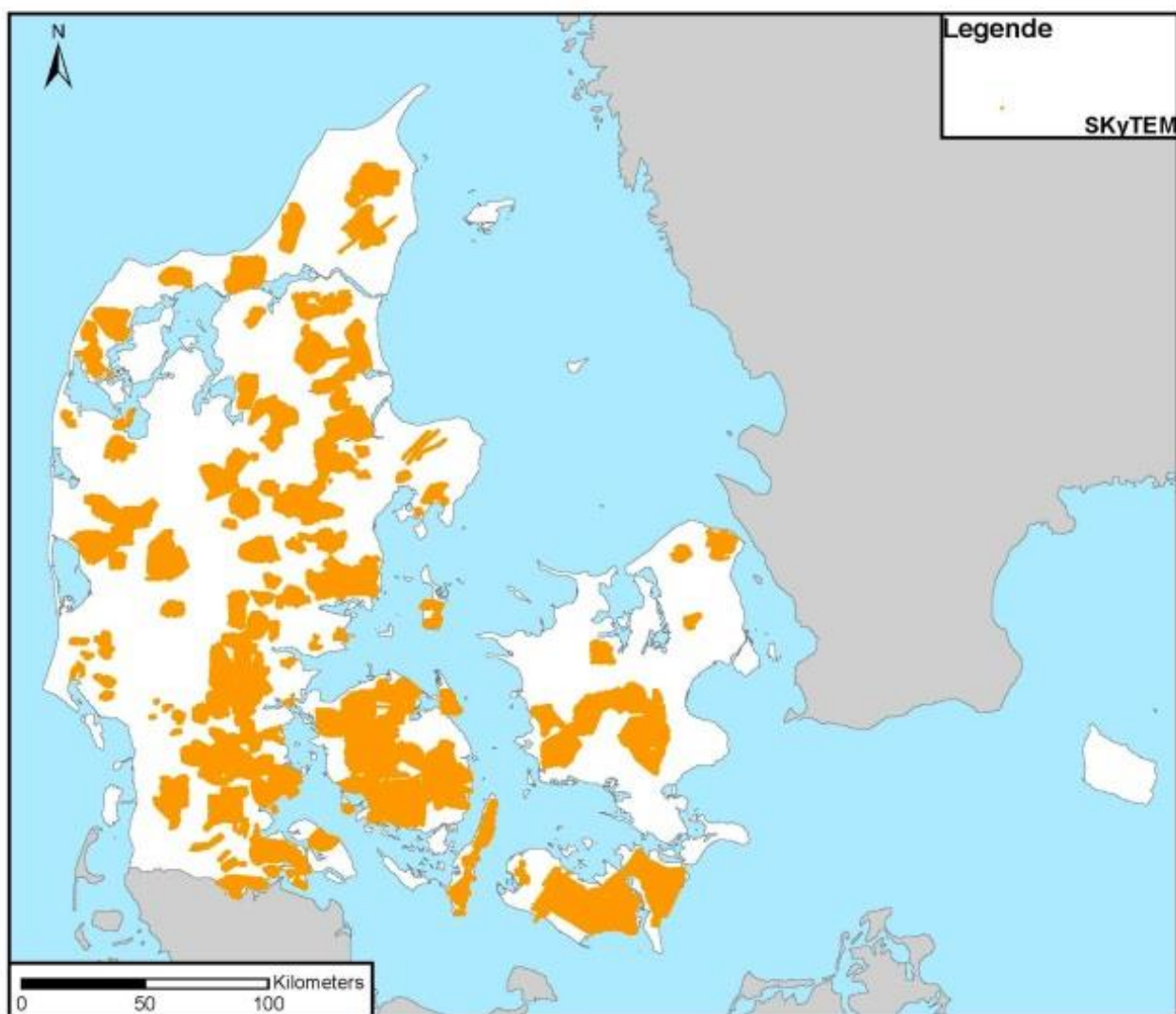
Figur 3.1. Geoelektriske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013): Wenner profilering (lys lilla) og Schlumberger sonderinger (mørk lilla). Der er ca. 90.000 målepositioner fordelt på ca. 15.000 Wenner profiler. Med en gennemsnitlig måleafstand på 30 m giver det 2.700 linjekm. Der er ca. 15.000 Schlumberger sonderinger.



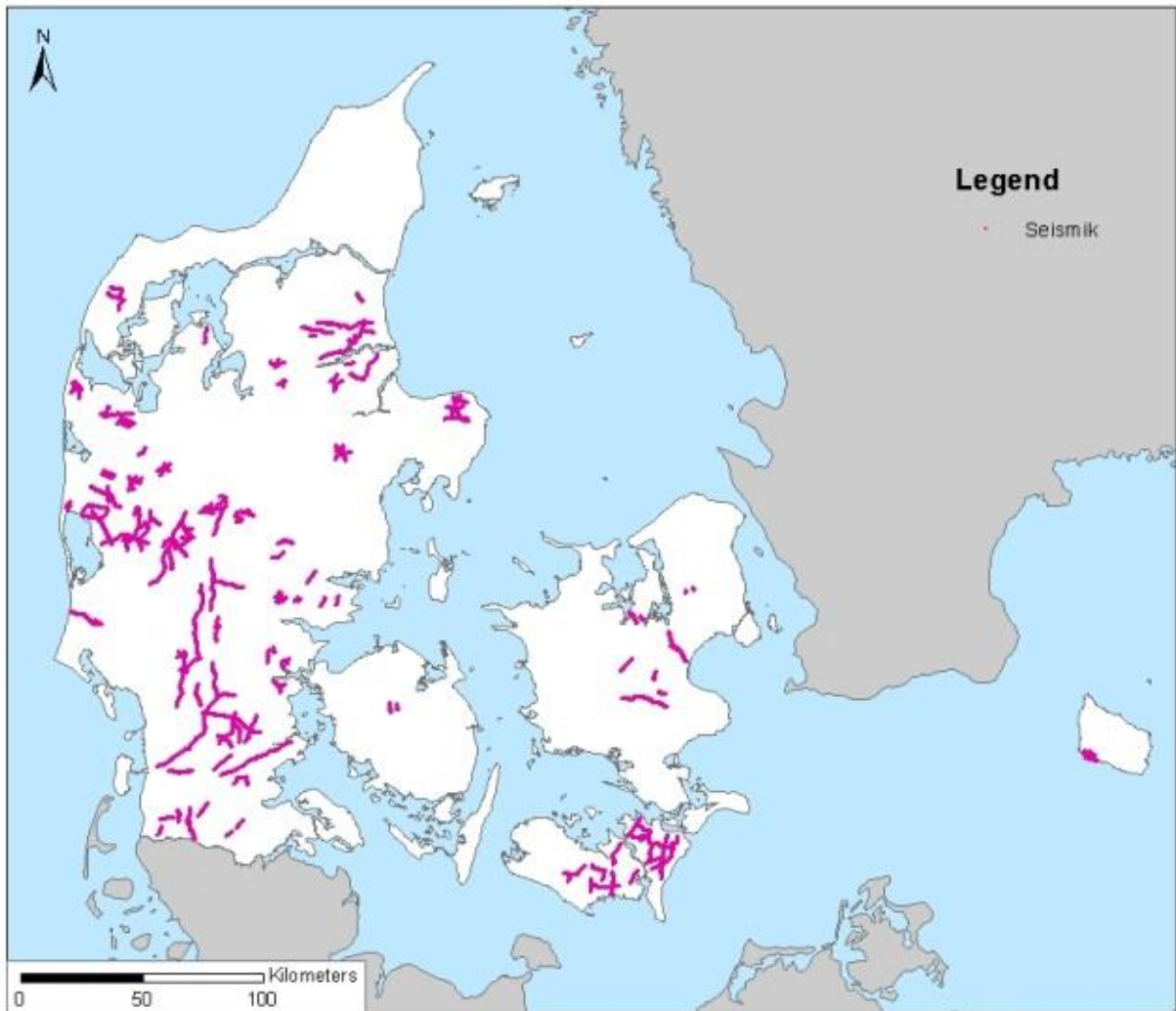
Figur 3.2. Geoelektriske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013): PACES/PACEP og MEP. Der er ca. 123.000 målepositioner fordelt på 56 kortlægninger for PACEP (lys blå) og 930.000 målepositioner fordelt på ca. 300 kortlægninger for PACES (mørk blå). Med en gennemsnitlig målepositionsafstand på 10 m giver det mere end 10.000 linje km PACEP/PACES. Der er målt ca. 5.500 MEP profiler med i alt mere end 1 mio. elektrodepositioner fordelt med ca. 600.000 på Wenner konfigurationer (lys grøn) og 450.000 på gradient konfigurationer (mørk grøn). Med en gennemsnitlig minimumselektrodeafstand på 5 m er der indsamlet mere end 5.000 profilkm MEP.



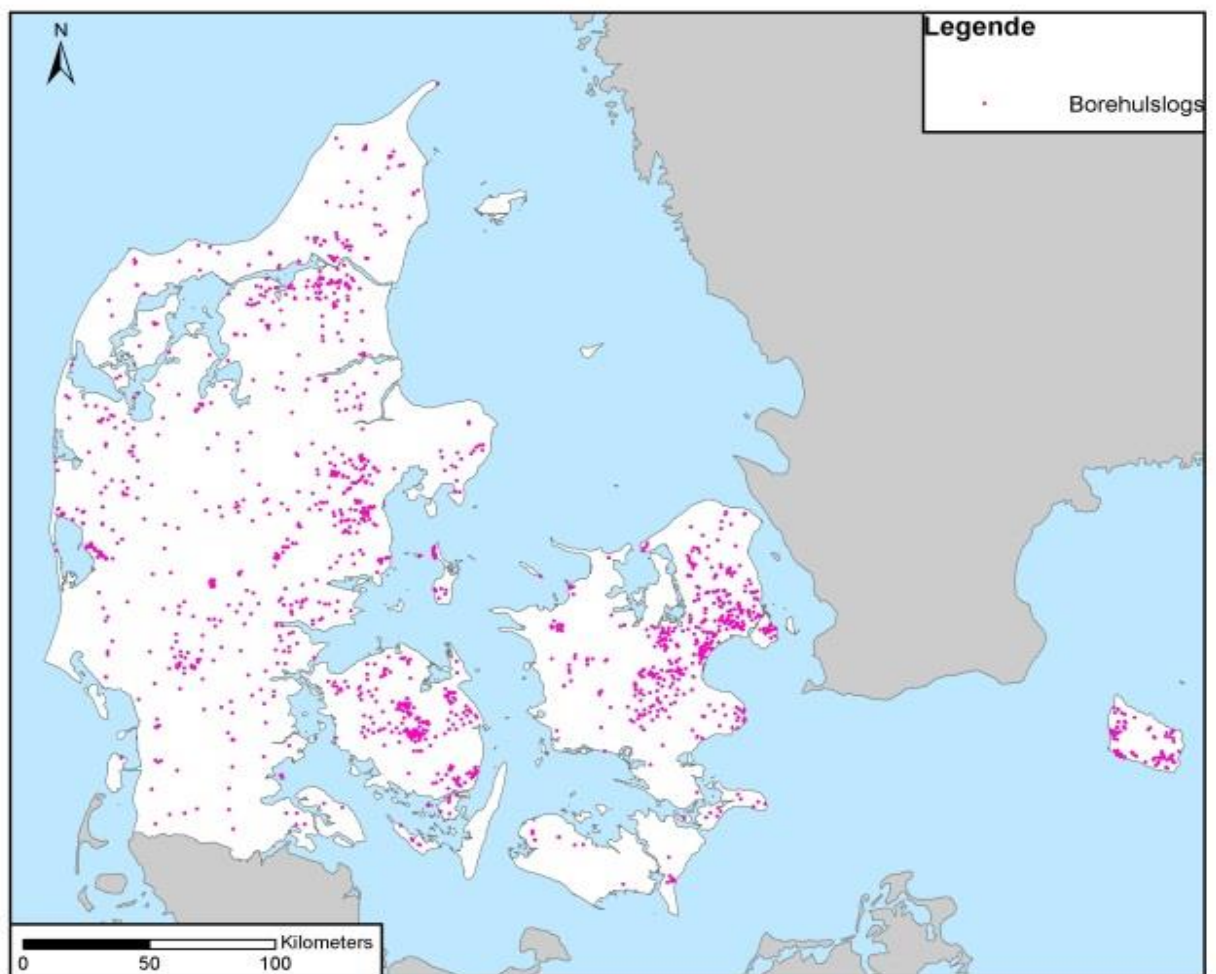
Figur 3.3. Elektromagnetiske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013): Forskellige typer af jordbaseret TEM. Der er i alt ca. 75.000 jordbaserede TEM sonderinger fordelt på ca. 60.000 40x40 TEM sonderinger (rød), ca. 4000 HMTEM (mørk brun) sonderinger og 9500 PATEM sonderinger (lys brun).



Figur 3.4. Elektromagnetiske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013): Sky-TEM. Der er ca. 1,38 mio SkyTEM sonderinger. Med en sonderingsafstand på 20–30 m giver det mellem 30.000 og 40.000 linjekm SkyTEM.



Figur 3.5. Seismiske data udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013). Der er ca 200 seismiske linjer med i alt ca. 315.000 CDP positioner. Med en gennemsnitlig CPD afstand på 5 m giver det mere end 1.500 linjekm seismik.



Figur 3.6. Borehulslogs udtrukket fra GERDA databasen (1/11 2013). Der er udført borehulslogs i ca. 2.100 borehuller.

Analyser af 1D syntetiske modeller til vurdering af geofysiske metoders evne til at kortlægge overfladenære morænelerslag

Suiter af 1D modeller er sat op med udgangspunkt i feltstudier med direkte måling af resistivitet, hvor:

- Første lags resistivitet kan være
 - 25 Ohmm (meget fedt moræneler),
 - 35 ohmm (fedt moræne ler),
 - 50 Ohmm (sandet moræneler) og
 - 70 Ohmm (stærkt sandet moræneler, opsprækket og udvasket)

- Første lags tykkelse varieres fra 1 m til 35 m med logaritmisk stigende lagtykkelse
- Andet lags resistivitet kan være
 - 15 Ohmm (smeltevandsler eller anden fed ler),
 - 60 Ohmm (mættet smeltevandssand, leret eller porevand med højt ionindhold, morænesand),
 - 90 Ohmm (mættet smeltevandssand, morænesand, skrivekridt eller kalk),
 - 150 Ohmm (mættet kalk, skrivekridt),
 - 300 Ohmm (tørt sand, tørt eller mættet kalk)
- Tredje lags resistivitet er 50 Ohmm
- Dybden til toppen af tredje lag er altid 80 m.

Når alle mulige resistiviteter for første og andet lag kombineres er der 20 modelsuiter, hvor laggrænsen mellem første og andet lag varieres.

Analyserne er udført for de geoelektriske metoder og konfigurationer, der har været brugt i Grundvandskortlægningen. SkyTEM-metoden er analyset med seks forskellige første gatecentertider, som repræsenterer SKyTEM systemer fra det tidligste system i 2003 til systemer, der kommer i den nærmeste fremtid. Følgende instrumentsystemer er analyseret

- PACEP
- PACES
- MEP, Wenner konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 5 m, (MEP_{w5})
- MEP, Gradient konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 2 m, (MEP_{G2})
- MEP, Gradient konfigurationer med enhedselektrodeafstand på 5 m, (MEP_{G5})
- SkyTEM, første gatecentertid i 3 mikrosekunder, (SkyTEM₃)
- SkyTEM, første gatecentertid i 7 mikrosekunder, (SkyTEM₇)
- SkyTEM, første gatecentertid i 9 mikrosekunder, (SkyTEM₉)
- SkyTEM, første gatecentertid i 13 mikrosekunder, (SkyTEM₁₃)
- SkyTEM, første gatecentertid i 17 mikrosekunder, (SkyTEM₁₇)
- SkyTEM, første gatecentertid i 27 mikrosekunder, (SkyTEM₂₇)

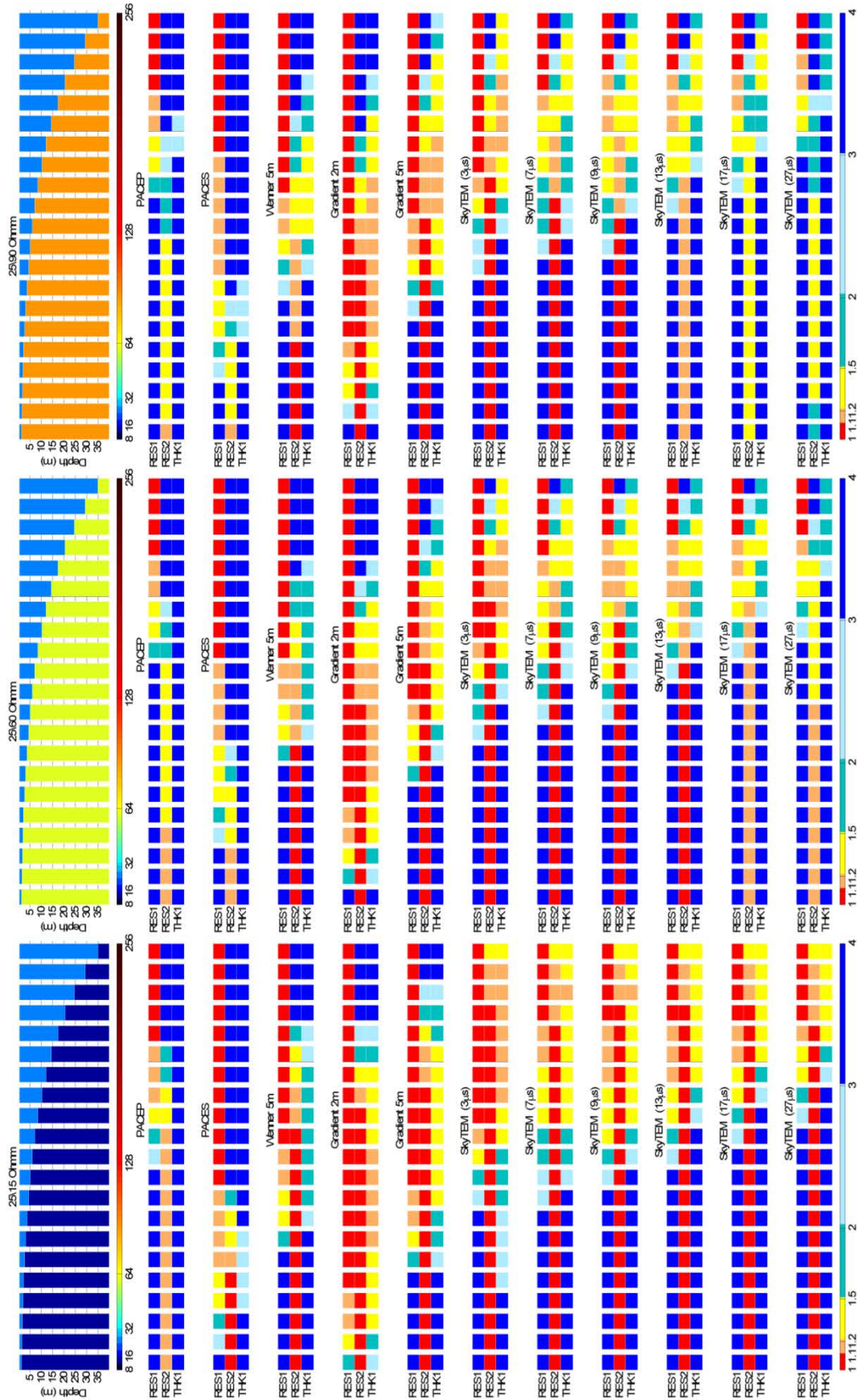
Flyvehøjden sættes til 40 m for SkyTEM₃ og SkyTEM₇ systemerne, da disse systemer flyver hurtigere og derved kommer til at have en højere gennemsnitsflyvehøjde. Flyvehøjden for de resterende fire systemer sættes til 30 m.

For beskrivelser af støjmodeller og antagelser henvises til afsnit 7.4.2 i hoved rapporten.

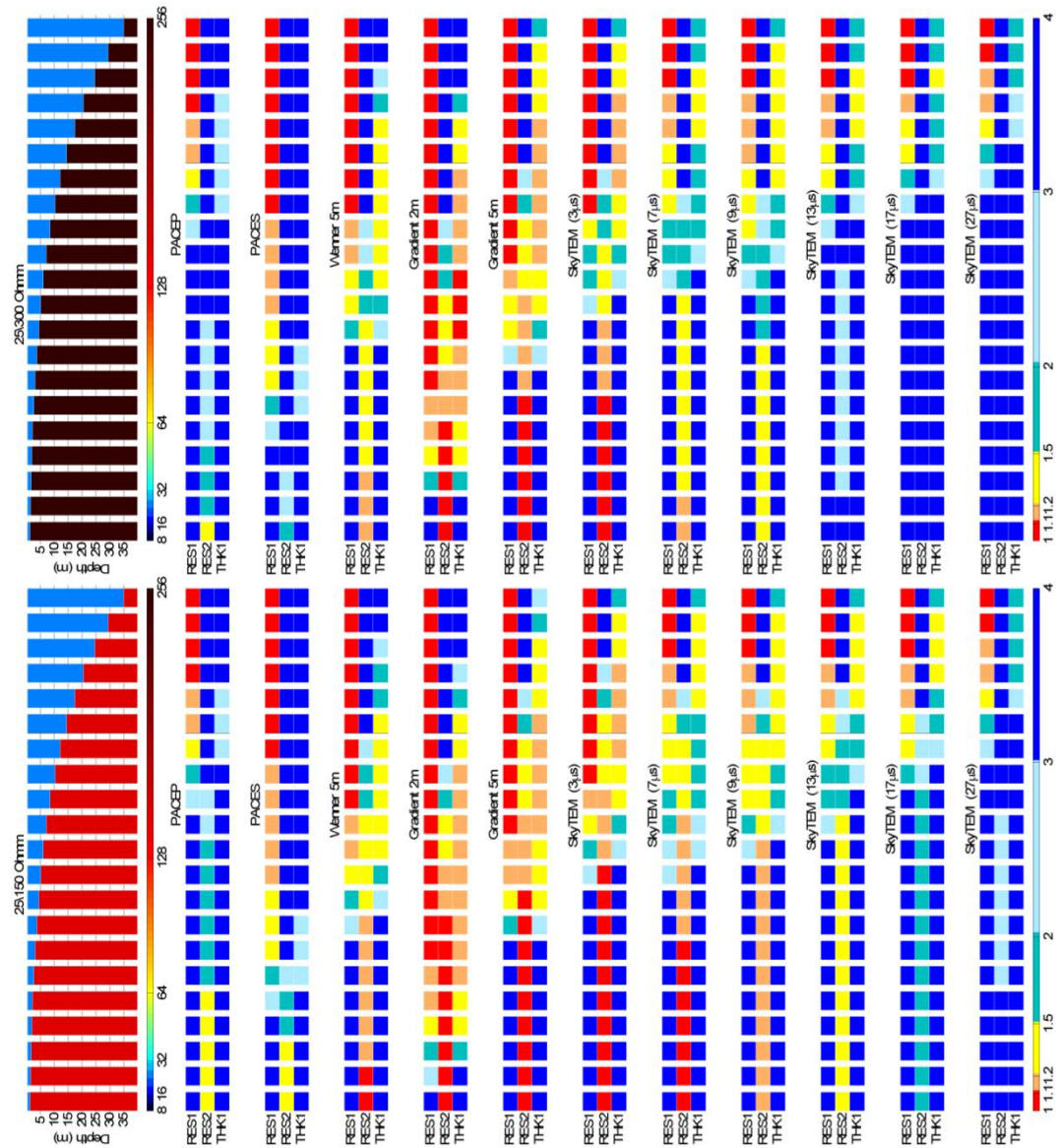
Alle analyser præsenteres som sektioner i Figur 3.7–3.10, hvor hver enkelt modelsuite vises sammen med analyseresultaterne for hvert af instrumentsystemerne, svarende til fremstillingen i Christensen et al (2002).

Den relative usikkerhed på den enkelte parameter, udtrykt som en faktor, angiver hvor godt den enkelte parameter er bestemt. Den relative usikkerhed kan beskrives for intervallerne som,

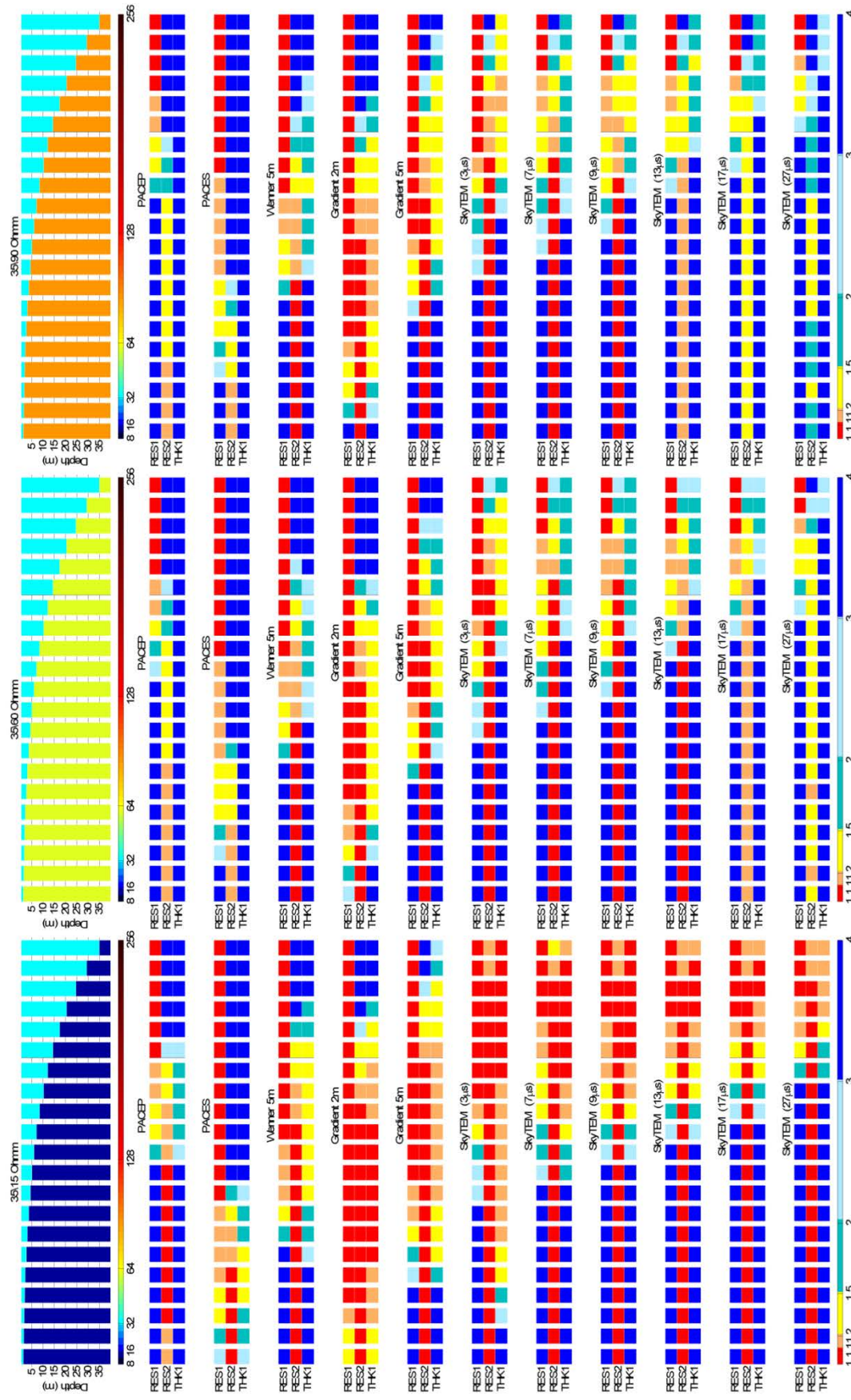
- < 1,1 Velbestemt (rød)
- 1,1–1,2 Godt bestemt (orange)
- 1,2–1,5 Nogenlunde bestemt (gul)
- 1,5–2 Dårligt bestemt (blågrøn)
- > 2 Ubestemt (lys og mørk blå).



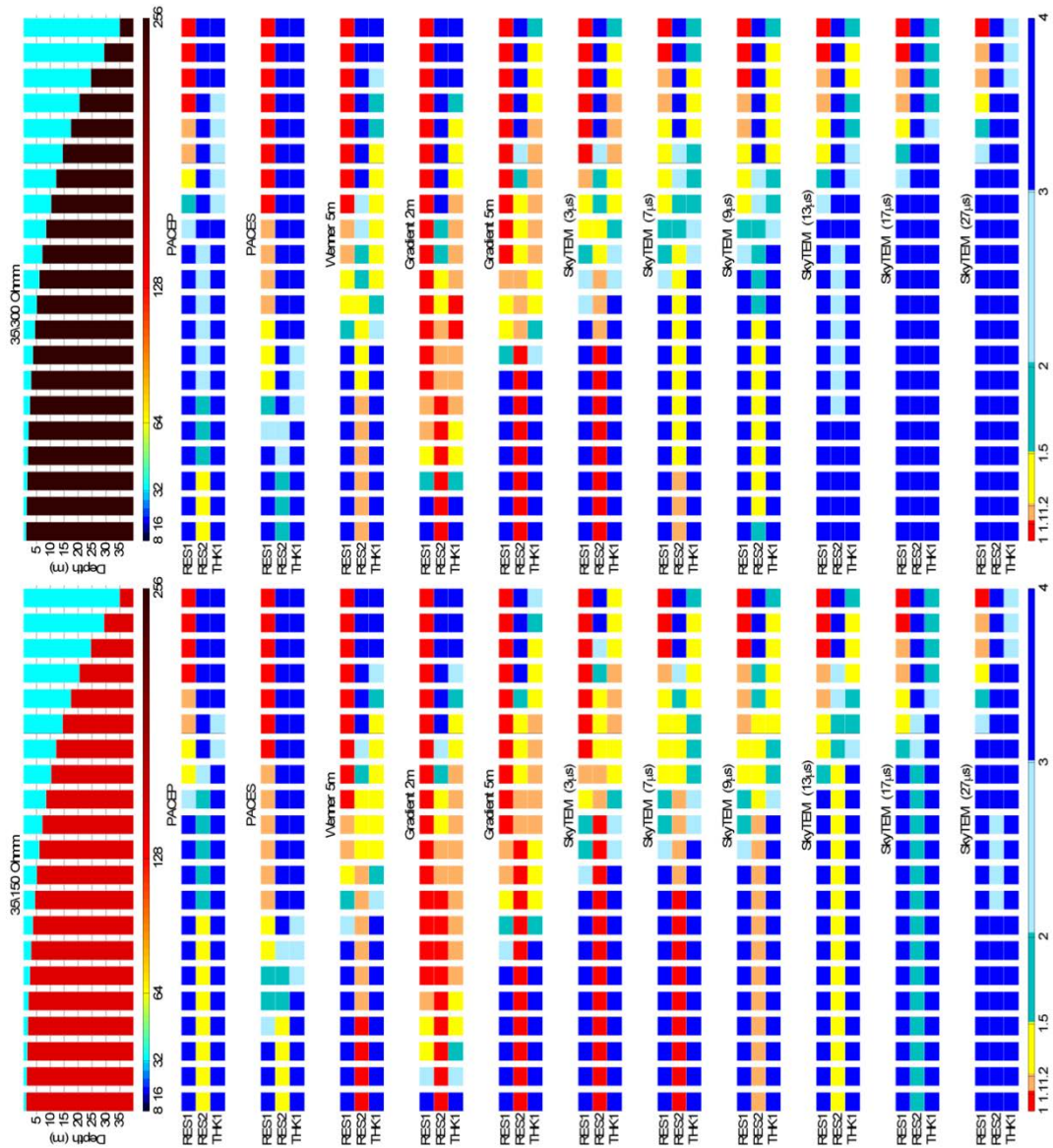
Figur 3.7. Fortsættes med figurtekst på næste side.



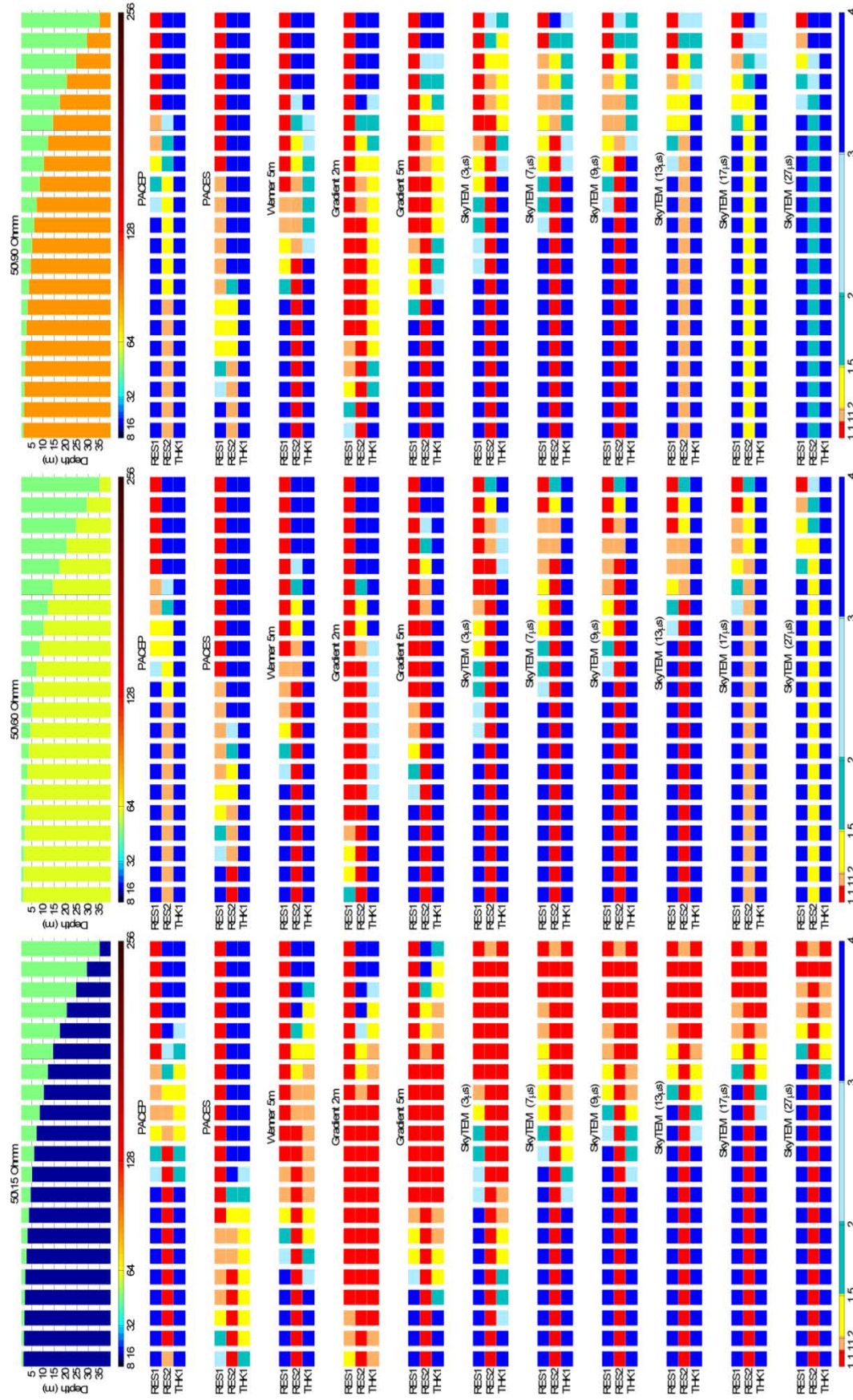
Figur 3.7. 1D modelsuiter og analyser for modeller, hvor første lags resistivitet er 25 Ohmm og andet lags resistivitet er henholdsvis 15 Ohmm, 60 Ohmm, 90 Ohmm, 150 ohmm og 300 Ohmm.



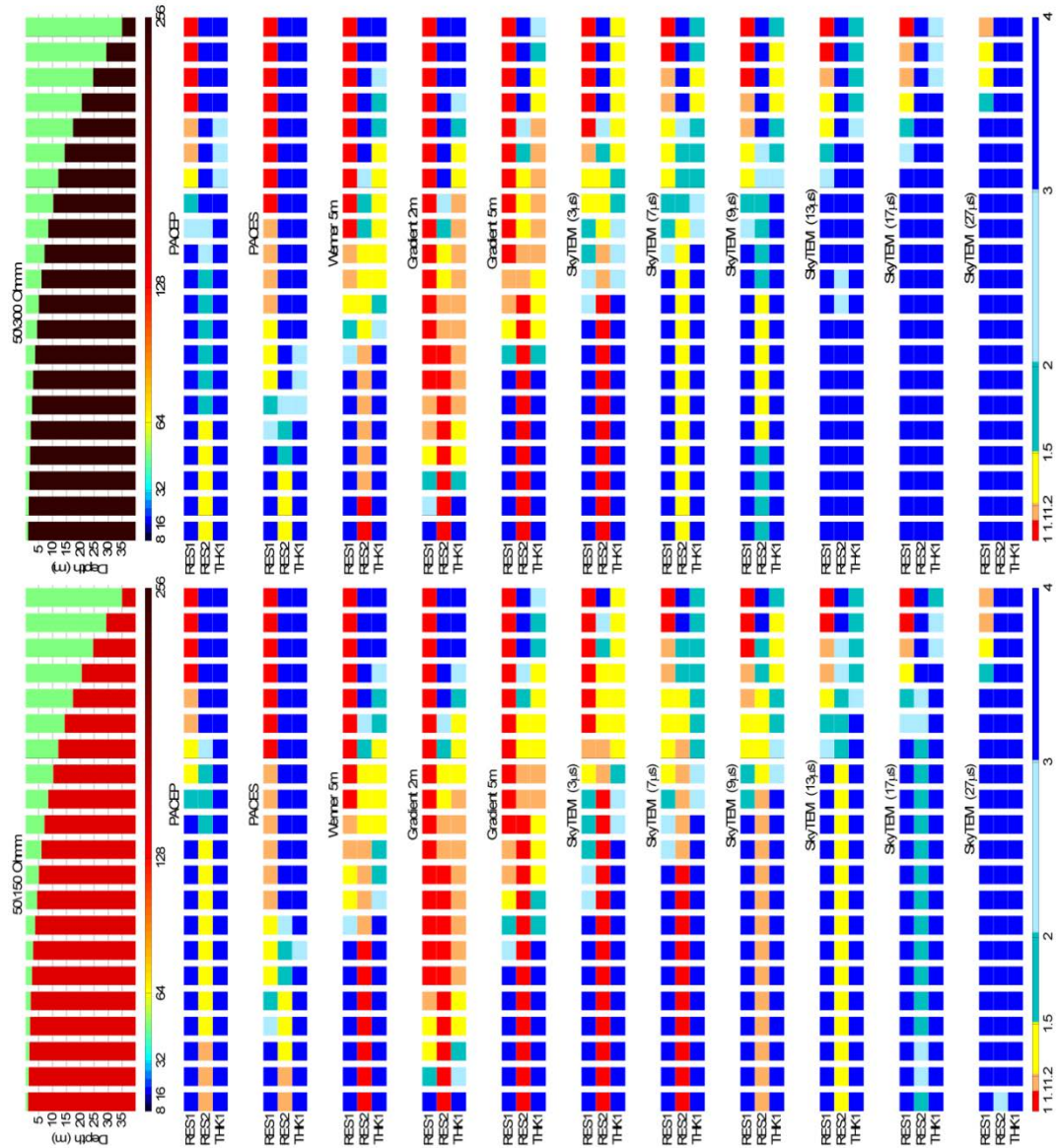
Figur 3.8. Fortsættes med figurtekst på næste side.



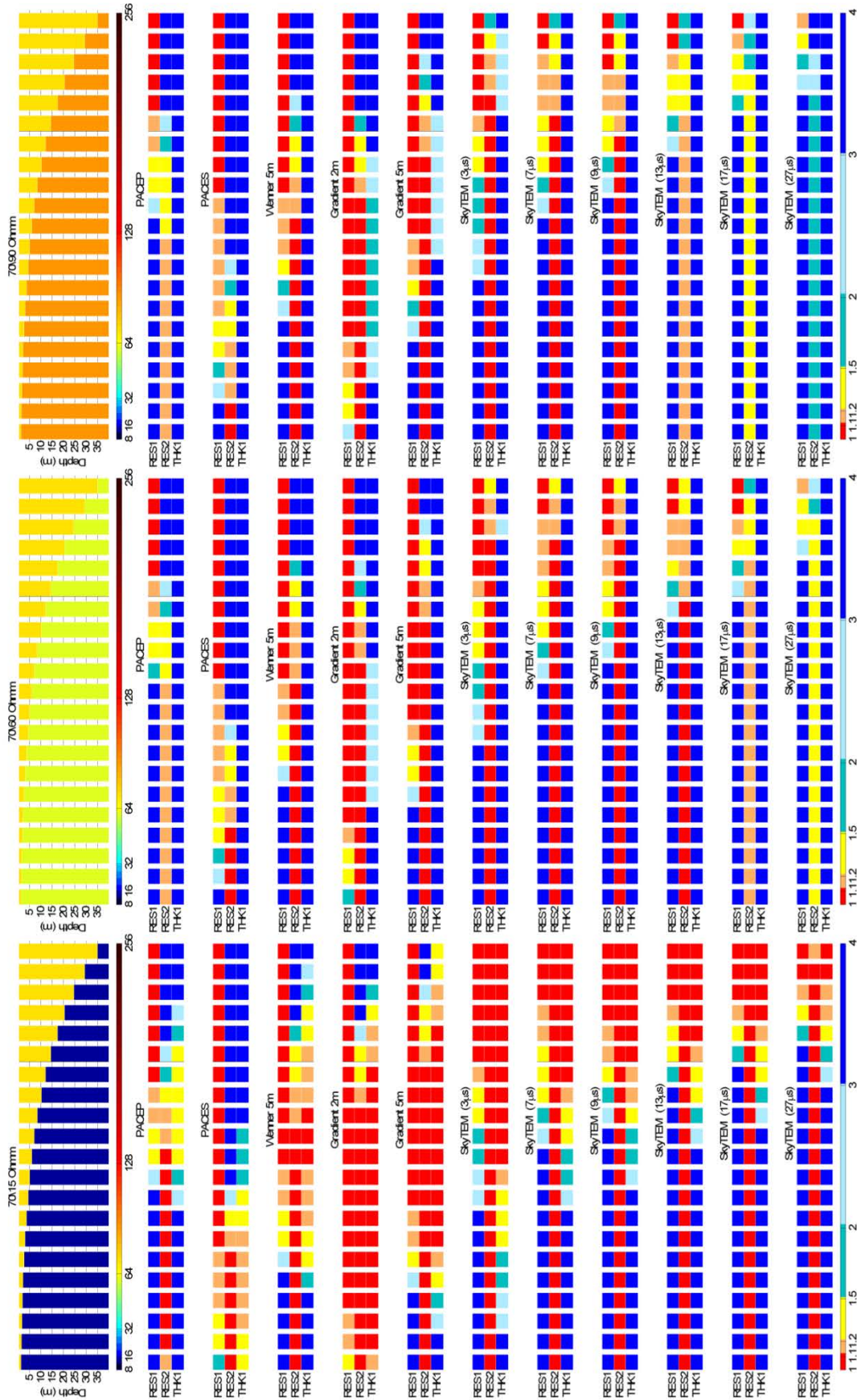
Figur 3.8. 1D modelsuites og analyser for modeller, hvor første lags resistivitet er 35 Ohmm og andet lags resistivitet er henholdsvis 15 Ohmm, 60 Ohmm, 90 Ohmm, 150 ohmm og 300 Ohmm.



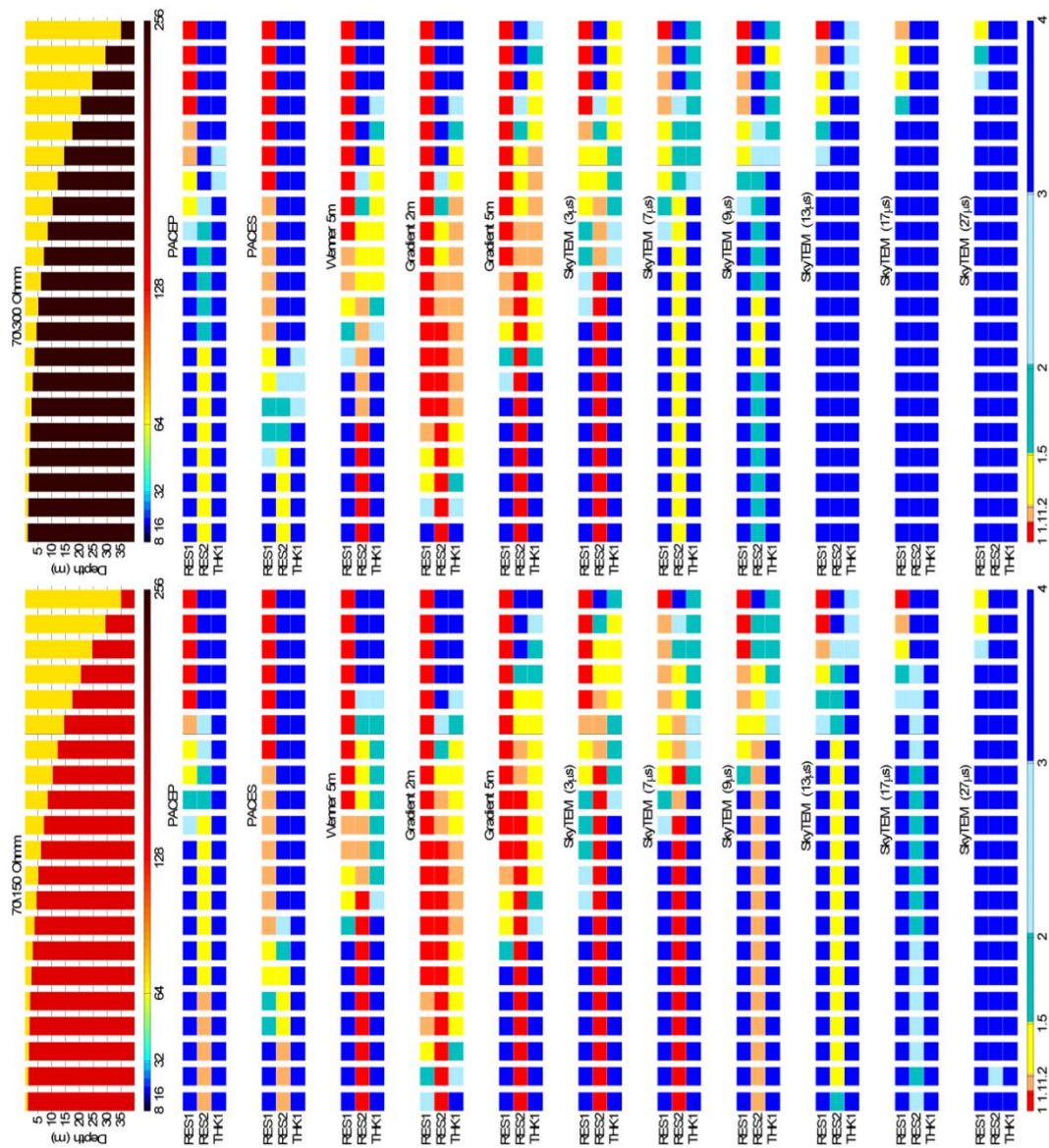
Figur 3.9. Fortsættes med figurtekst på næste side.



Figur 3.9. 1D modelsuiter og analyser for modeller, hvor første lags resistivitet er 50 Ohmm og andet lags resistivitet er henholdsvis 15 Ohmm, 60 Ohmm, 90 Ohmm, 150 ohmm og 300 Ohmm.



Figur 3.10. Fortsættes med figurtekst på næste side.



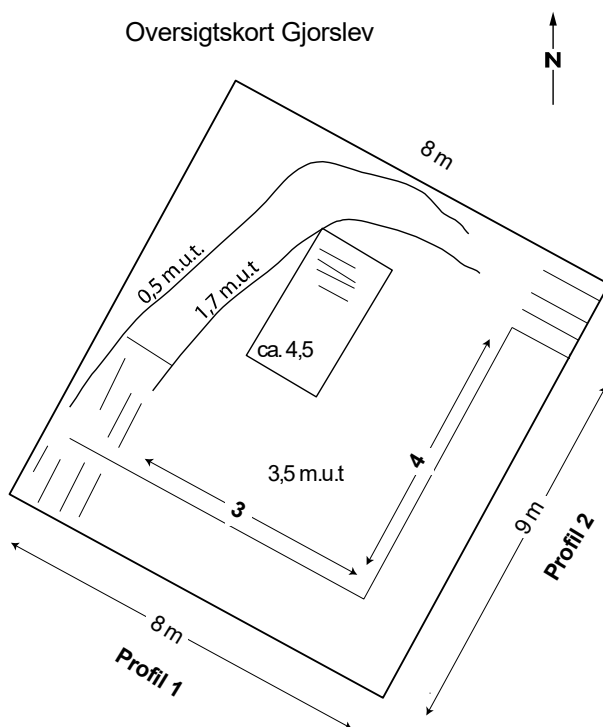
Figur 3.10. 1D modelsuits og analyser for modeller, hvor første lags resistivitet er 70 Ohmm og andet lags resistivitet er henholdsvis 15 Ohmm, 60 Ohmm, 90 Ohmm, 150 ohmm og 300 Ohmm.

19. Bilag 4. Feltlokaliteter på Stevns

På Stevns findes detaljerede opmålinger af tre lokaliteter Gjorslev, Højstrup og Sigerlev. Dette er supplerede materiale.

Gjorslev

Til belysning af områdets geologiske opbygning blev der udført en ca. 8 x 9 m stor og 4.5 meter dyb udgravning, figur 4.1.



Figur 4.1. Oversigt over udgravning ved Gjorslev (Fra Klint, 2004).

Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 m under terræn: Muld

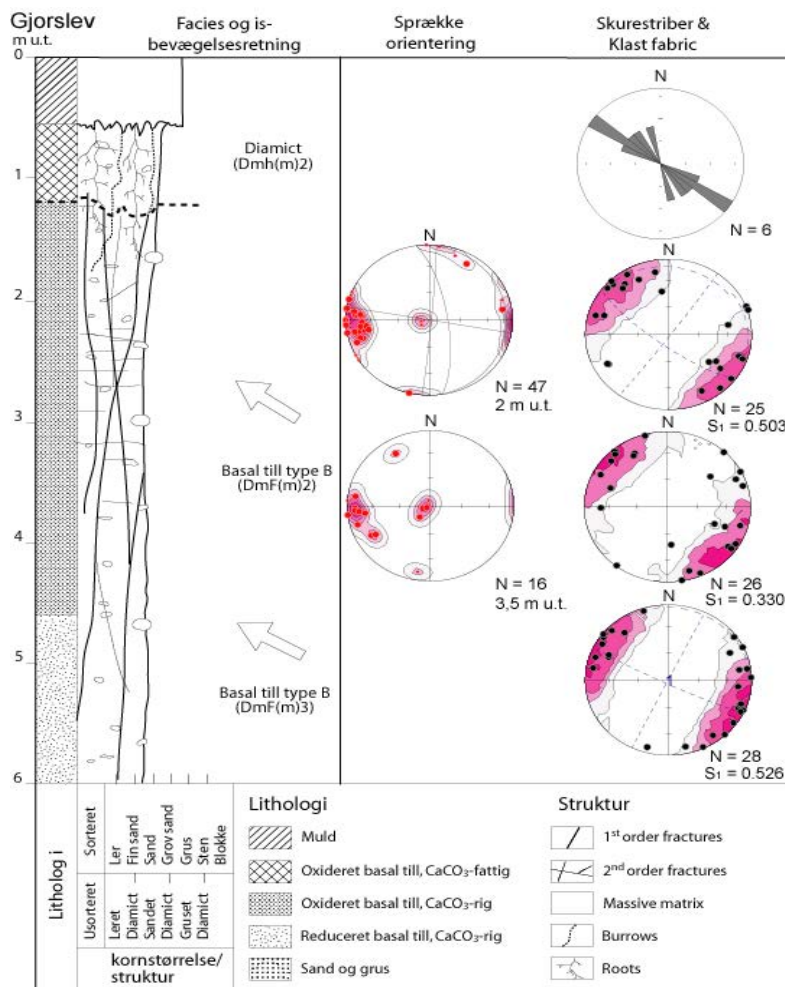
0,5 - 1,4 m under terræn: Moræneler, siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt, olivenbrunt (2.5 Y/5/3) kalkfri.

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

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

Till klassifikation

Som det fremgår af figur 4.2 blev der målt fabric analyse i tre dybde 2 m, 3.5 m og 5 m 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 kalkslirer 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).

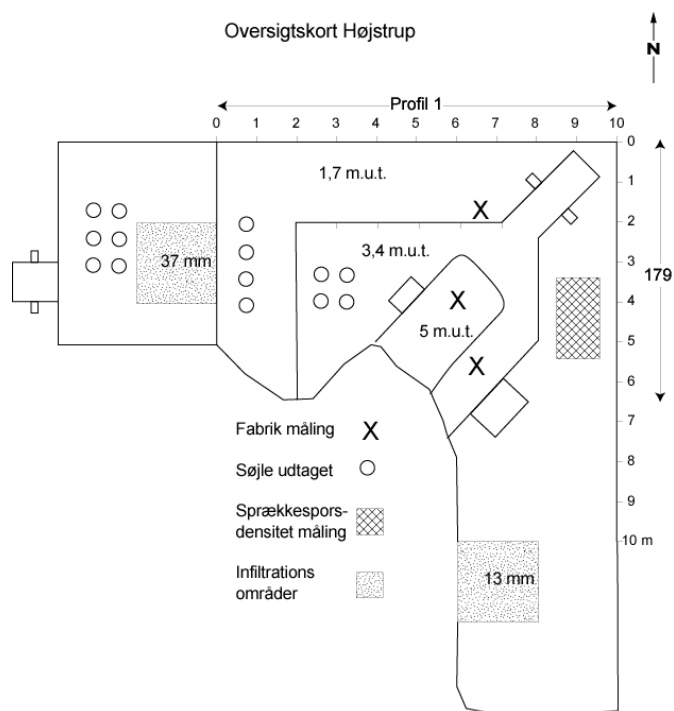


Figur 4.2. Lithologisk log med sprækker og oxidationsforhold fra Gjorslev (Fra Klint, 2004).

Højstrup

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 m stor og 5 m dyb udgravning (Figur 4.3).



Figur 4.3. Oversigt over udgravningen ved Højstrup (Fra Klint, 2004)..

Lithologisk beskrivelse

0 - 0,5 m under terræn: Muldlag

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

1,2 – 3,3 m under terræn :Moræneler, svagt siltet, svagt sandet, svagt gruset, enkelte sten, mange kalk-klaster, general massiv matrix men matrix optræder "fissil" i zone fra

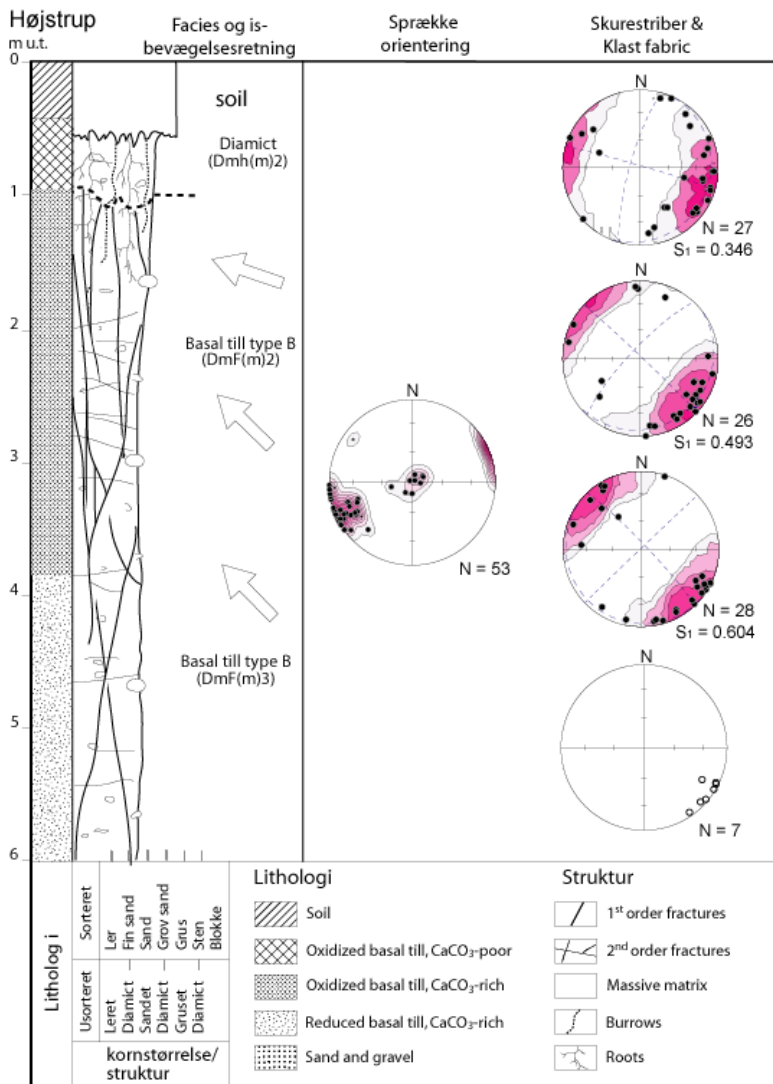
1,8-2,3 m under terræn, olivenbrunt (2.5 Y/5/4) stærkt kalkholdig.

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

Till klassifikation

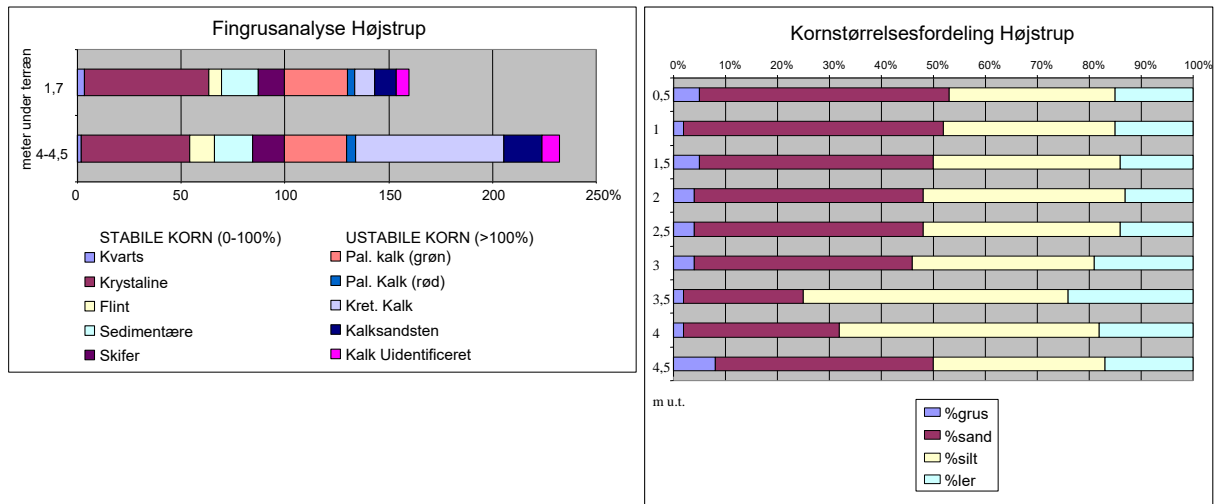
Som det fremgår af figur 4.4, blev der målt fabric analyse i tre dybdeintervaller 1,7 – 3,4 og 5 meter under terræn. Der ses en signifikant orientering af langstrakte klaster med en fortrukken orientering SØ-NW i de to nederste niveauer, mens den øverste måling ikke var signifikant. Der blev ligeledes målt skurestriber på større klaster. Også her fremstår en foretrukken retning SØ-NV. Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshearede kalklire 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 kornstørrelsesvariation for hver 50 cm (Figur 4.5). 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 enten tilskrives afstanden til den underliggende kalksten, idet der naturligt vil være et større indhold af lokale klaster jo tættere man kommer det underliggende basement, eller at der optræder to forskellige baltiske tills direkte oven på hinanden, som det ses i Sigerslev kalkgrav.



Figur 4.4. Lithologisk log med sprækker og redoxforhold fra Højstrup (Fra Klint, 2004).

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.



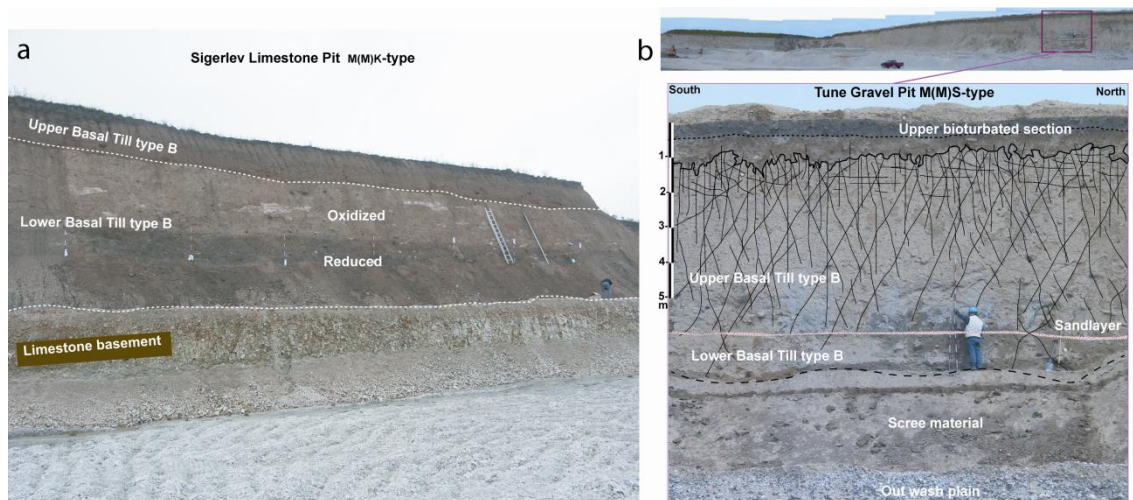
Figur 4.5. Fingrusanalyse samt kornstørrelsesvariation for hver 50 cm med dybden ved Højstrup (Fra Klint, 2004).

Sigerslev kalkgrav

Området omkring Sigerslev kalkgrav er domineret af udstrakt svagt bølget moræneflade med 6 m til 9 m moræneler direkte overlejrende primært opsprækket Bryozokalk. Til belysning af områdets geologiske opbygning blev der rensset et ca 40 meter langt profil i gravens sydlige del (Figur 4.6, 4.7 og 4.8).



Figur 4.6. Oversigt over profil 1 i Sigerslev kalkgrav. Bemærk farveskift imellem den øvre till enhed samt redoxgrænsen midt i profilet. (Foto K.E.S.Klint).



Figur 4.7. Profiler fra a. Sigerslev kalkgrav, b. Tune grusgrav (Fotos K.E.S. Klint).



Figur 4.8 Profil fra Sigerslev kalkgrav (Foto K.E.S. Klint)..

Lithologisk beskrivelse

0 - 0,7 m under terræn: Muld

0,7 – 2,5 m under terræn: Moræneler, siltet, stærkt sandet, gruset, enkelte sten, massivt, olivenbrunt, kalkholdig, stærk opsprækket (fissil) i de øverste 1,5-2,5 m. Konsolideret.

2,5 – 5,7 m under terræn: Moræneler, siltet, sandet, svagt gruset, stenet, mange kalkklaster/kalklinser, general massiv matrix, lys olivenbrunt st. kalkholdig, opsprækket, velkonsolideret.

5,7 – 8,0 m under terræn: Moræneler, siltet, svag sandet, svagt gruset, få sten, massiv matrix, olivengrå, stærk kalkholdig, opsprækket, velkonsolideret.

Under 8 m under terræn: Kalk, Bryozokalk.

Till klassifikation

Der er målt skurestriberetninger 1,5 m under terræn i den øvre till. Der ses en signifikant orientering af skurestriber med en fortrukken orientering ØSØ-WNW. Sammenholdt med de interne strukturer såsom udshearede kalkslirer og kalkklaster er moræneleret tolket afsat som en basal till under en gletsjer, der har overskredet området fra ØSØ imod WNV. Moræneenheden er generelt middel til svagt konsolideret. Moræneleret kan derfor klassificeres som en basal till. type A/B (Klint, 2001). Fremstødet korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987).

20. Bilag 5. Feltlokaliteter på Hedeland området

Supplerende materiale om lokaliteterne i Hedeland området.

Kamstrup

Lithologisk beskrivelse

0 – 0,5 m under terræn. Muldlag

0,5 – 1,4 m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, kalkfri massiv oxideret. Olivenbrun.

1,4 – 3,9 m under terræn: Moræneler, siltet, sandet, svagt gruset, stenet, mange kalkklaster, kalkrig, massiv, oxideret. Lys olivenbrun. Tynd zone med udshearede sand/lerlinser ved 4 m under terræn.

3,9 – 6,6 m under terræn: Moræneler, siltet, sandet, svagt gruset, stenet, mange kalkklaster, stærk kalkrig, massiv, olivengrå, reduceret. Markant brolægning ved basis af morænelersenheden med karakteristiske skurestriber fra SØ mod NV

> 6,6 m under terræn: Smeltevandssand/grus.

Till klassifikation

Moræneleret kan klassificeres som en måske to basale tills, type B (Klint, 2001). Fremstødet korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987), der overskred området fra SØ.

Tune Grusgrav

Lithologisk beskrivelse

0 – 0,5 m under terræn. Muldlag

0,5 – 1,8 m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, kalkfri massiv oxideret. Olivenbrun.

1,8 – 5,4, m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, overkonsolideret, kalkrig, massiv, oxideret. Lys olivenbrun.

5,4 – 6,3 m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, overkonsolideret, stedvis olivengrå, reduceret med oxiderede zoner omkring markante sprækker. Kalkholdig. Markant sandlag ca 1 -2 cm tykt strækker sig i hele profilets længde.

6,3 – 9,5 m under terræn: Moræneler, siltet, sandet, svagt gruset, stenet, overkonsolideret, stærk kalkholdig massiv, olivenbrun, oxideret.

> 9,5 m under terræn: Smeltevandssand og grus.

Tykkelsen af den reducerede zone registreredes ved hjælp af fotografier.

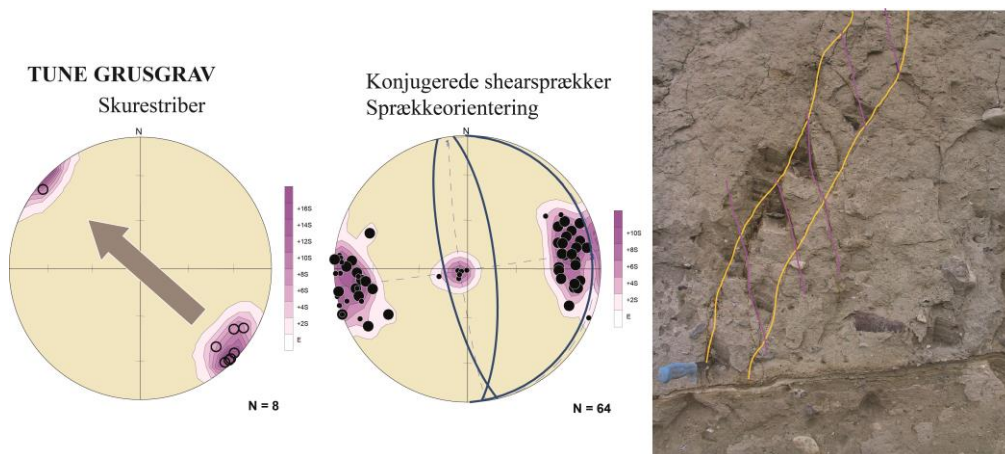
Till klassifikation

Under muldlaget består de øverste lag af et (måske to) morænelerslag, der er afsat under isfremstød fra sydøst. De to morænelerslag er adskilt af et tyndt lag af smeltevandssand, der strækker sig igennem det meste af graven ca. 6-7 m under terræn (Figur 5.1)

Moræneleret kan klassificeres som en basal till type B (Klint, 2001). Fremstødet korreleres til det såkaldte Ungbaltiske fremstød (Houmark-Nielsen, 1987) (Figur 5.2). Det tynde sandlag der strækker sig igennem hele profilet tolkes dannet ved en kortvarig "ice bed separation", hvor isen under særligt højt vandstand har løftet sig fra underlaget kortvarigt. Herved er der aflejret et tyndt sandtæppe (sand sheet efter Kessler et al 2012). Da vandtrykket faldt, har "isen sat sig" igen, og afsætningen af den basale till er fortsat.



Figur 5.1. Profil fra råstofgrav nær Tune i Hedelandsområdet. De to landmålerstokke er tilsammen 3 m høje. (Foto K.E.S. Klint).



Figur 5.2. Sprækkefordeling Tune grusgrav ved Mindstrup gård. (K.E.S. Klint).

Kallerup grusgrav

Lithologisk beskrivelse

0 – 0,5 m under terræn. Muldlag

0,5 – 1,3 m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, kalkfri massiv oxideret. Olivenbrun.

1,3 – 3,4 m under terræn: Moræneler, siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, overkonsolideret, kalkrig, massiv, oxideret. Lys olivenbrun. Markant brolægning strækker sig i hele profilets længde ved basis af denne enhed.

3,5 – 6,3 m under terræn: Moræneler, st. siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet til stærk stenet, konsolideret/svagt konolideret, stedvis olivengrå, reduceret med oxiderede zoner omkring markante sprækker. St. Kalkholdig.

6,3 – 9,5 m under terræn: Morænesand, leret, st. siltet, gruset, stenet, svagt konsolideret, stærk kalkholdig massiv til båndet med talrige udshearede sandlinser, olivenbrun, oxideret.

8,5 – 13/14 m under terræn: Smeltevandssand/grus.

Ca 13-14 m under terræn optræder prækvartær overfladen. Her i form af Danien kalk.

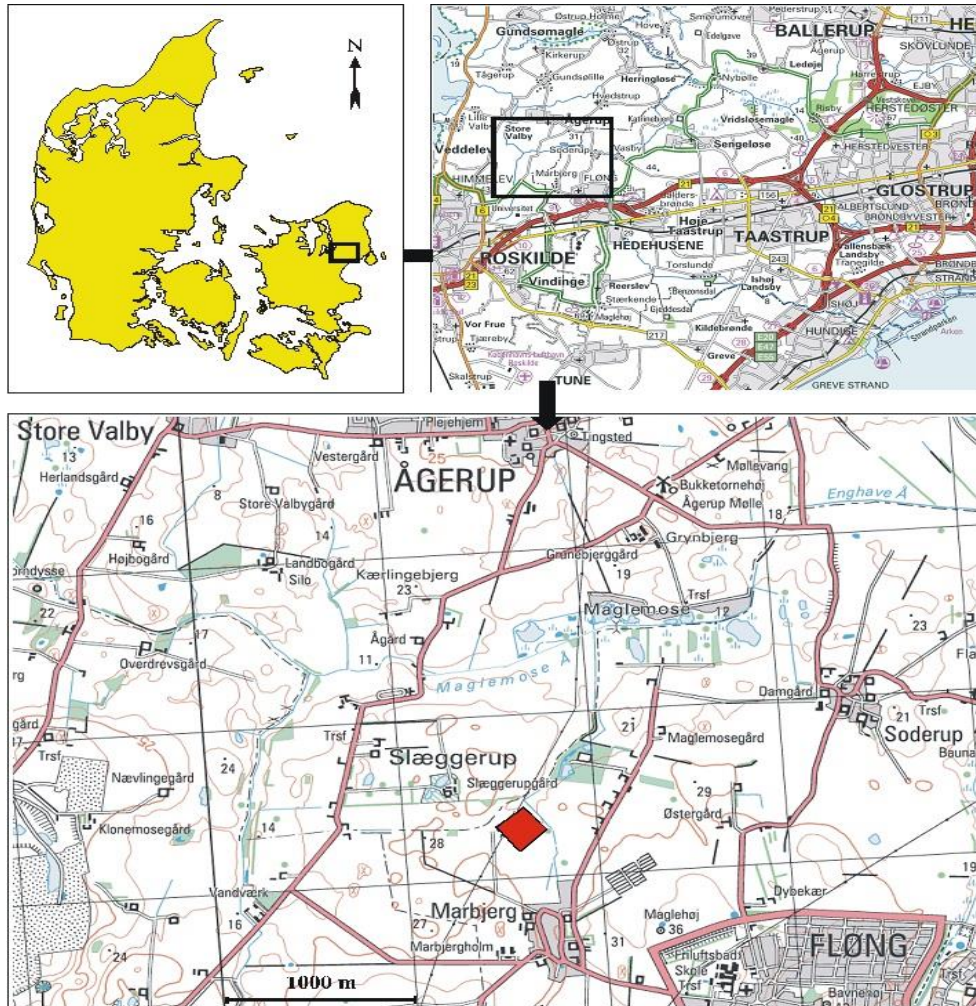
Till klassifikation

De to øvre basale tillenheder kan begge relateres til det Ungbaltiske fremstød fra SØ (Houmark-Nielsen, 1987) og er klassificeret som basale traction tills type B. (Kessler et al., 2012). Redox zonen optræder sporadisk i graven, men generelt er morænefladen gennemsat af sprækker i hele sin tykkelse.

Den nedre tillenhed A er derimod tolket dannet af materiale udsaltet fra en gletsjer og afsat foran en fremrykkende gletsjer ved flydeprocesser, hvorefter enheden er over-

skredet og yderligere deformeret af gletsjeren. Enheden tolkes således som en flyde-
moræne eller flow till.

Slæggerup



Figur 5.3. Beliggenhed af Slæggerup lokaliteten. (Fra Lindhardt et al. 2001).

Slæggerup ligger ca. 8 km nordøst for Roskilde (Figur 5.3). Der er i forbindelse med VAP projektet udført en udgravning til 5,5 m under terræn i moræneler, syv monite-
ringsboringer til 5,5 m under terræn og fire pejleboringer til 11 – 12 m under terræn. Det opmålte profil består af moræneler og i et dybere niveau oxideret morænesand afsat under det Ungbaltiske isfremstød i Weichsel. En betydelig del af de at terrænnæ-
re aflejringer består dog af smeltevandsler og i mindre grad smeltevandssand. For-
søgsmarken er kuperet med en højdeforskel mellem højeste og laveste punkt på ca.

4,5 m. Ca. 20 m under terræn optræder Tertiære kalkbjergarter. Der optræder ligeledes tre sprækkesystemer ved Slæggerup.

Lithologisk beskrivelse

0 – 0,3 m under terræn. Muldlag.

0,3 – 1,5 m under terræn: smeltevandsler/silt, lys olivenbrun, med rødde, kalkfattig over 0,7 m dybde, Lokal søaflejring.

1,5 – 3,6 m under terræn: Moræneler, st. siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet, massiv normal til overkonsolideret, olivenbrun.

3,6 – 4,7 m under terræn: Moræneler, st. siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet til stærk stenet, svag til normal konsolideret, stedvis olivengrå, reduceret, kalkholdig.

4,7 – 8,5 m under terræn: Morænesand, leret, st. siltet, gruset, stenet, svagt konsolideret, stærk kalkholdig massiv til båndet med talrige udshearede sandlinser, olivenbrun, oxideret.

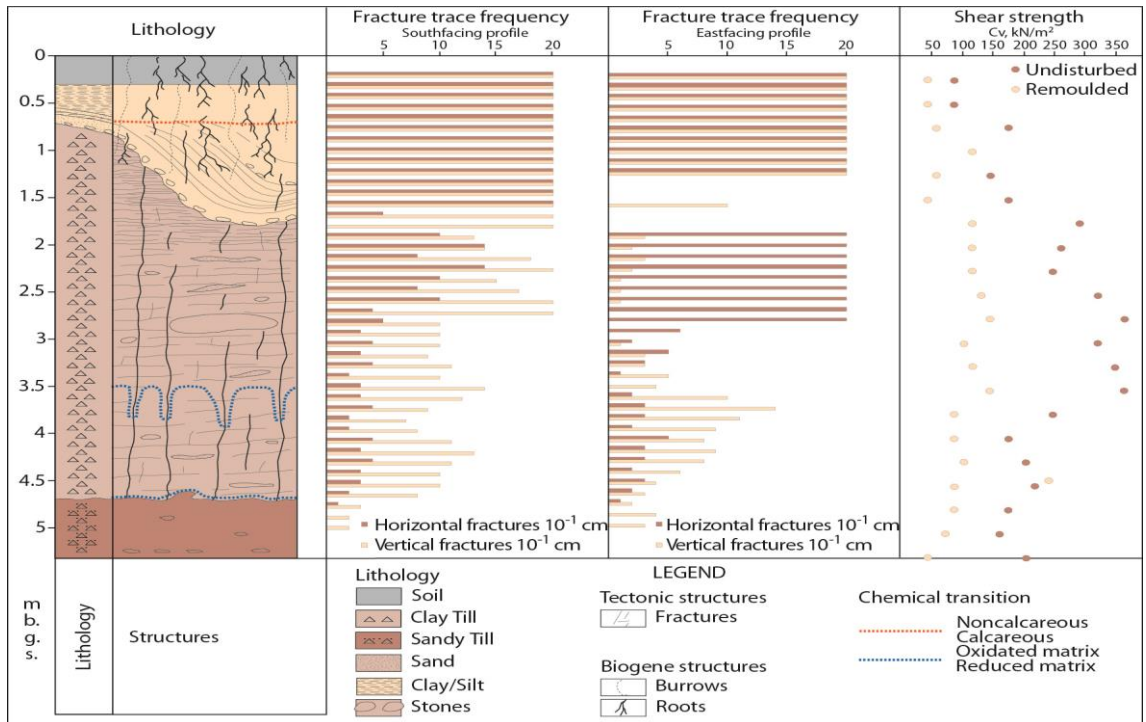
8,5 – 14,2 m under terræn: Moræneler, st. siltet, st. sandet, svagt gruset, stenet til stærk stenet, konsolideret, stedvis olivengrå, reduceret, st. kalkholdig.

Under 14,2 m under terræn: Smeltevandssands og grus.

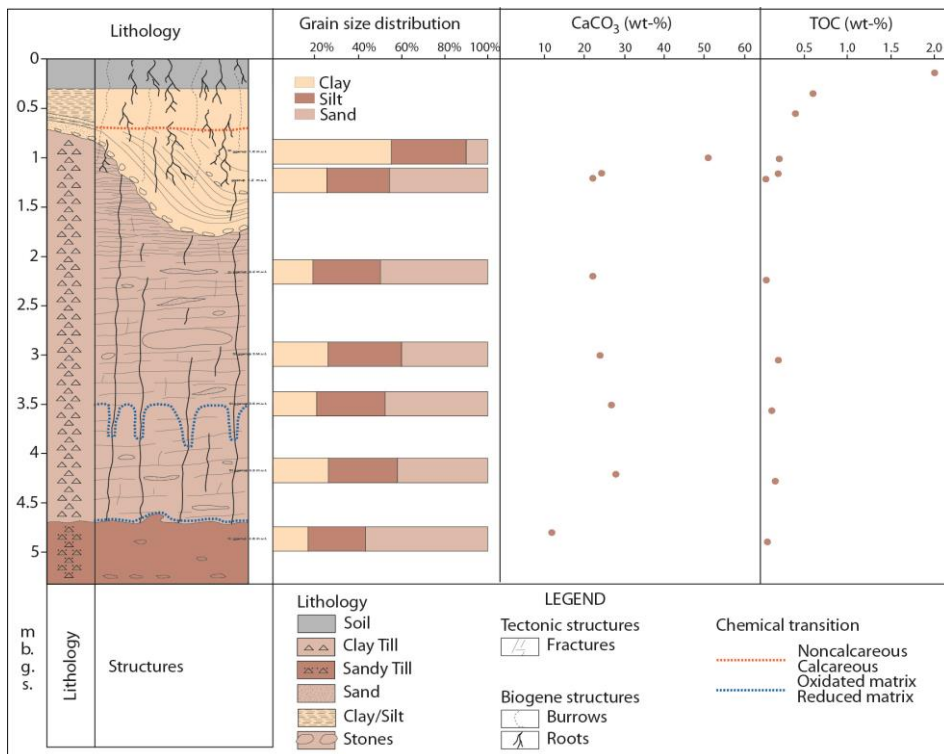
Till klassifikation

Lagserien ved Slæggerup er meget variabel. Området er generelt småbakked med mange små afløbsløse lavninger og en klassisk dødistopografi. Overfladen er primært domineret af moræneler, men lacustrine søaflejringer udfylder lavningerne.

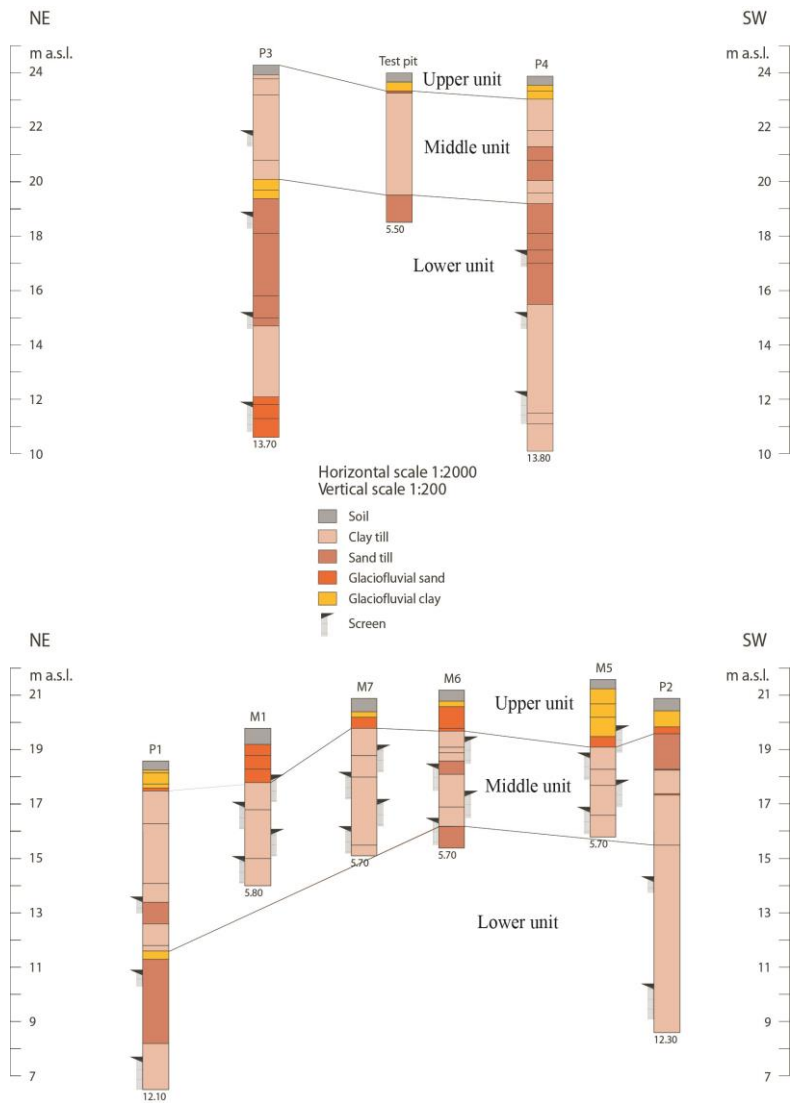
Lagserien kan opdeles i fem lithologiske enheder med stedvise søaflejringer (1) overlajrende moræneler (2). Under moræneleren optræder en knap 4 m tyk morænesandsenhed (3) og under den moræneler (4) ned til smeltevandssand (5) ca. 14 m under terræn. Den øvre moræneler indeholder talrige små sandlinser og har en generel svag klastefabric. Imidlertid optræder den normalt konsolideret og kraftig opsprækket ned til morænesandet. Morænesandet har en generel tilfældig orientering af klaster samt dårlig konsolidering (enhed 3) og tolkes afsat som flow till, mens den øvre moræneler tolkes afsat som basal till under en gletscher, der har overskredet området fra SØ (Ungbaltisk fremstød). Den nedre morænelersenhed kendes kun fra borer og kan derfor ikke klassificeres (Figur 5.4 og 5.5). Borningsdata fra omkring udgravningen ses på figur 5.6 og 5.7.



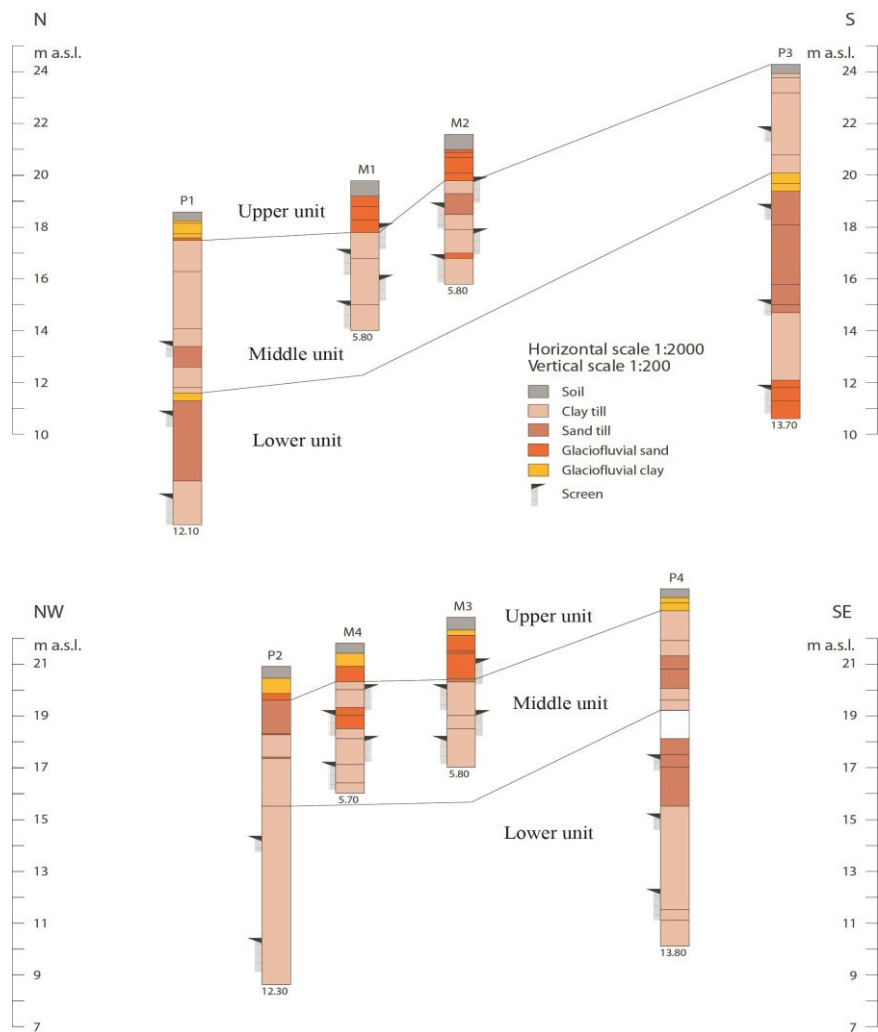
Figur 5.4. Slæggerup profilet med fordeling af sprækker med dybden, sprækkehyppighed og geotekniske parametre (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 5.5. Kornstørrelsesfordeling, kalkindhold og organisk indhold i Slæggerup profilet. (Fra Lindhardt et al., 2001).



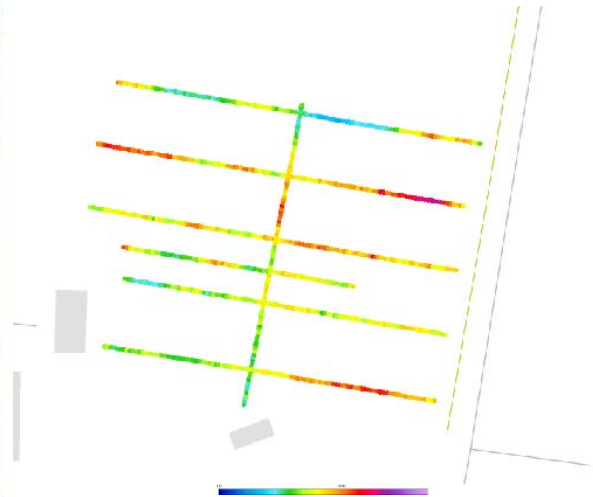
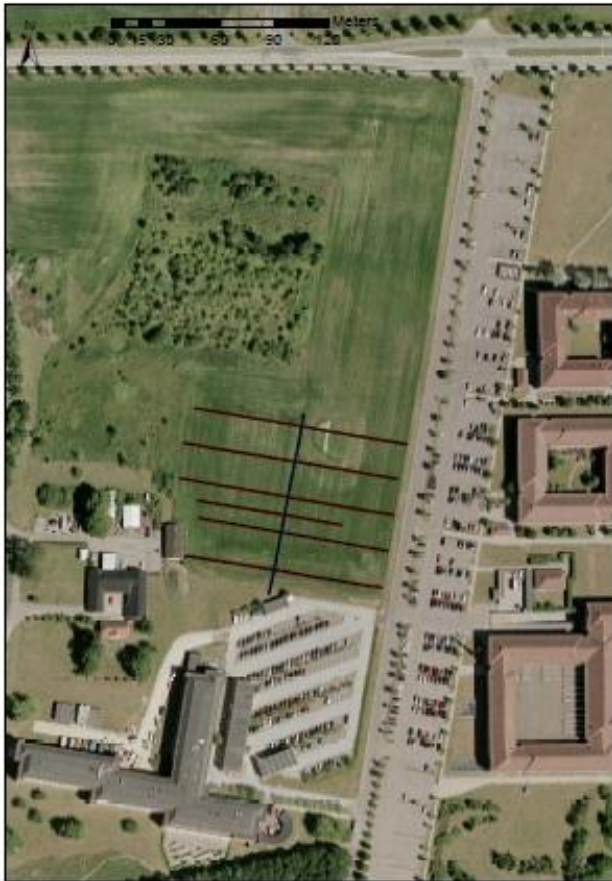
Figur 5.6. Boringer omkring Slæggerup udgravningen (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 5.7. Boringer omkring Slæggerup udgravningen (Fra Lindhardt et al., 2001):.

Høje Tåstrup

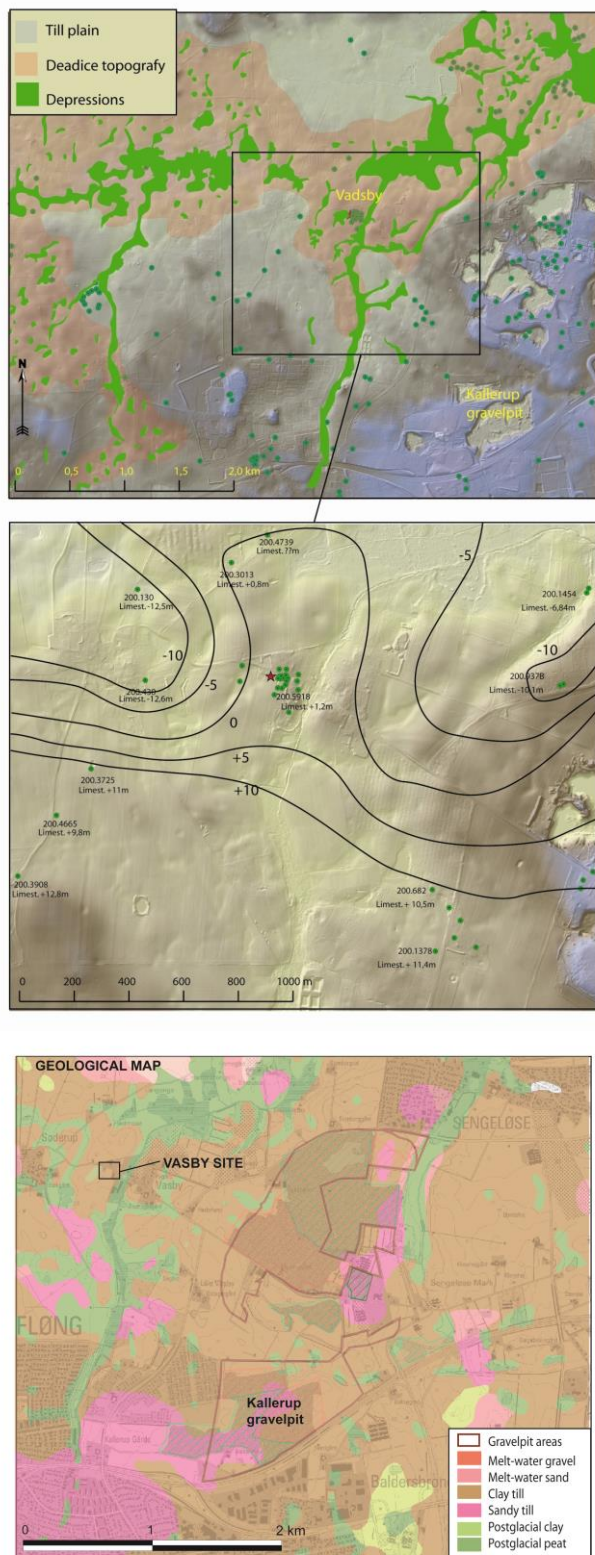
Beliggenheden af Høje Tåstrup lokaliteten ses på figur 5.8.



Figur 5.8. Lokalisering af forsøgsgrunden ved Teknologisk institut i Høje Tåstrup. De anførte linjer markerer marken og position af MEP-profiler.

Vadsby

Lokaliteten i Vadsby ligger på en nord-syd gående bakketop. Bakken er afgrænset imod vest af en lavning, hvor der afhængigt af årstiden findes en sø. Søen tolkes dannet som et dødishul. Imod øst er bakken afgrænset af en smeltevandsdal, hvori Vadsby å strømmer. (Figur 5.9 og figur 5.10).



Figur 5.9. Geomorfologisk kort og geologisk kort over Vadsby, Kallerup området, samt topografien af prækvartæroverfladen (Kalkoverfladen).

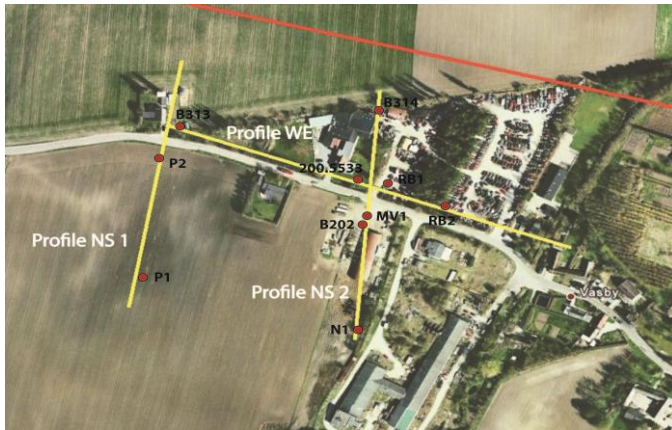


Figure 5.10: Placering af de geologiske tværprofiler.



Figur 5.11. Foto af profiler i udgravningen ved Vadsby (Foto K.E.S.Klint).

Lithologisk beskrivelse (se figur 5.11)

0 – 0,5 m under terræn. Muldlag

0,5 – 0,9 m under terræn: Moræneler silt, lys olivenbrun, med. rødder, kalkfattig over 0,9 m dybde, lokal søaflejring optræder i områdets vestlige del.

0,9 – ca. 3 m under terræn: Moræneler, st. siltet, sandet, svagt gruset, stenet, massiv normal til overkonsolideret, olivenbrun.

3 – 4,7 m under terræn: Moræneler, st. siltet, sandet, svagt gruset, stenet til stærkt stenet, svag til normal konsolideret, olivengrå, reduceret, kalkholdig.

4,7 – ca. 16 m under terræn. Ca. 6-8 m under terræn optræder flere steder en sandlinse og andre steder en markant brolægning. Det tolkes at denne zone danner overgang til en underliggende moræneenhed i stil med det billede der ses i både Kallerup og Høje Tåstrup. Denne enhed varierer i tykkelse fra ca. 6 m til 8 m og indeholder en del sandlinser, der har været stærkt medvirkende til at transportere forurening helt ned til kalkoverfladen.

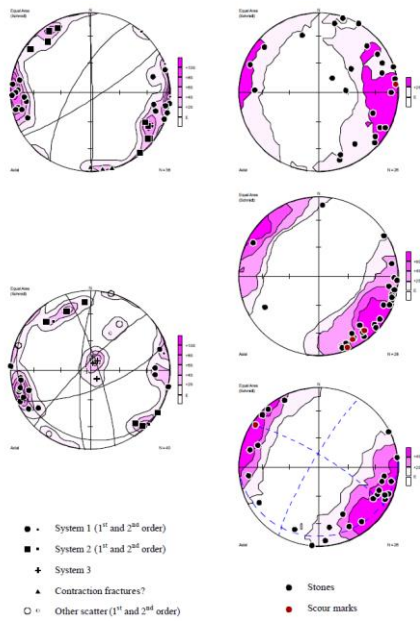
Ca. 16 m under terræn ses i store dele af området en større (flere meter tyk) sandlinse/sandlag samt oxideret morænesand, der lokalt strækker sig helt ned til kalkoverfladen, men andre steder overlejres et nedre morænelerslag.

Endelig optræder kalkoverfladen 22-23 m under terræn.

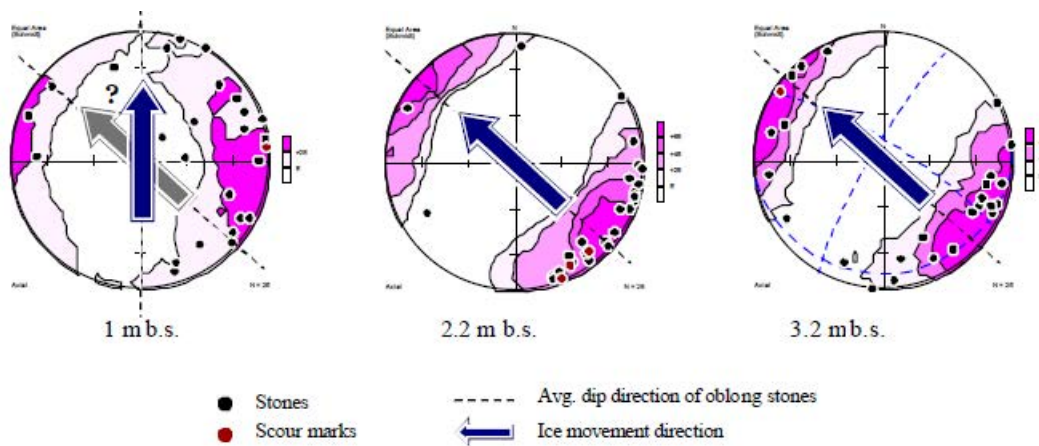
Till klassifikation

Det øvre morænelerslag optræder velkonsolideret med variende grad af opsprækning, og er klassificeret som en basal till type B (Klint, 2001) (bundmoræne) afsat under et isfremstød, der overskred området fra sydøst. I områdets vestlige del optræder en lavning med mere end 2 m smeltevandsler og tørv, over moræneler. Den geologiske lagfølge varierer således en del indenfor selve området, men generelt ses det, at de højestliggende områder er domineret af vel til overkonsolideret opsprækket moræneler, hvorimod de lavere områder har et dække af flydemoræne (flowtill) samt smeltevandsler og sand overlejret af Postglacial tørv og ferskvandsler/sand. Moræneenhederne længere nede kendes kun fra boringer og er således ikke klassificeret.

Sprække- og makroporedata ses på figur 5.12. og 5.13.



Figur 5.12. Lithologisk log med sprækkeorienteringer og klast fabrik data fra Vadsby.

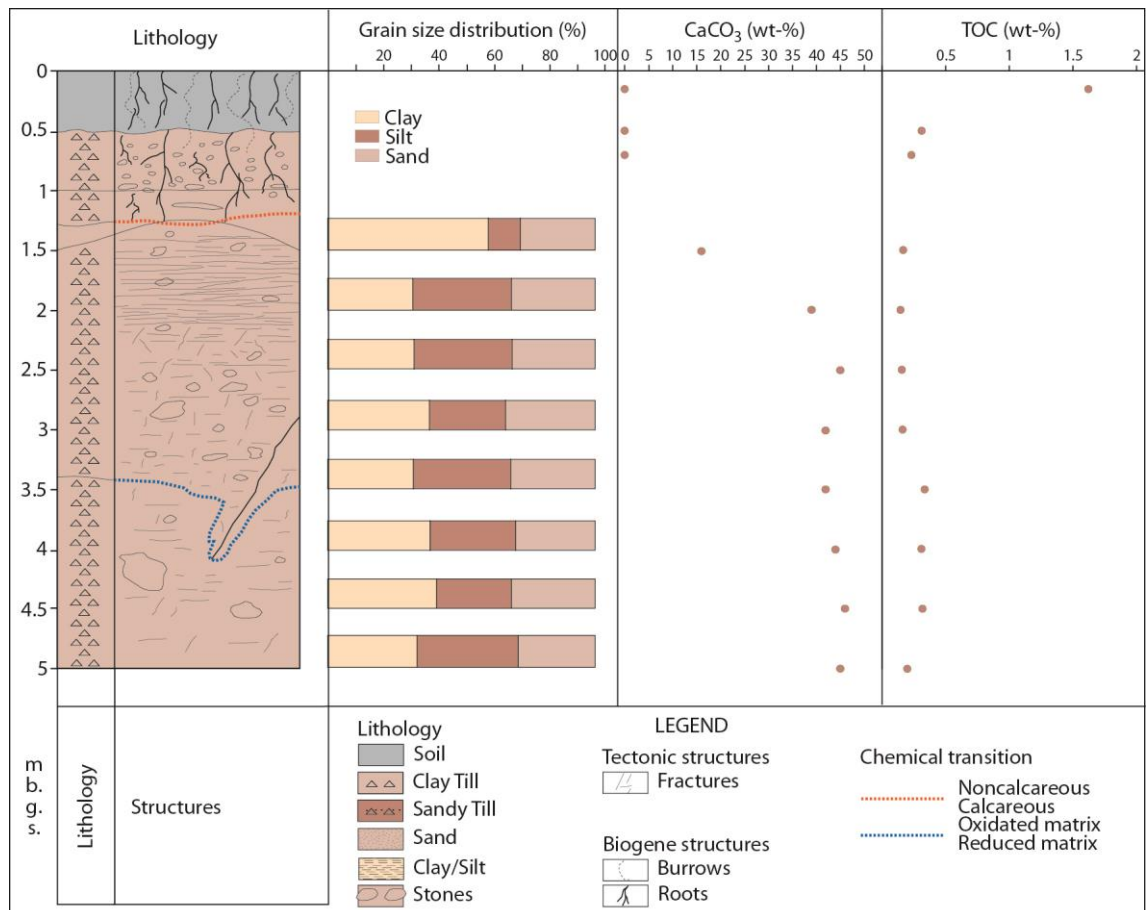


Figur 5.13. Skurestribe fordeling i profil ved Vadsby

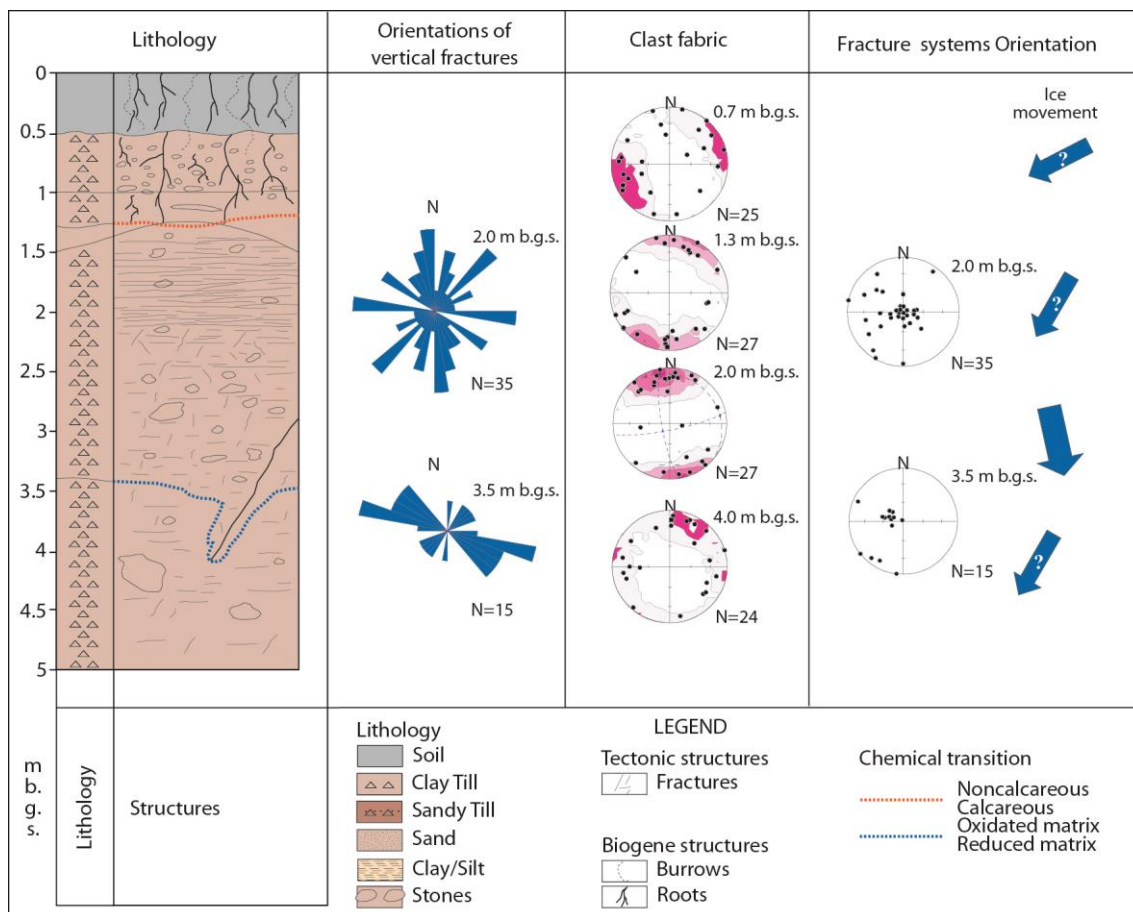
21. Bilag 6. VAP lerrokaliteter

Silstrup marken

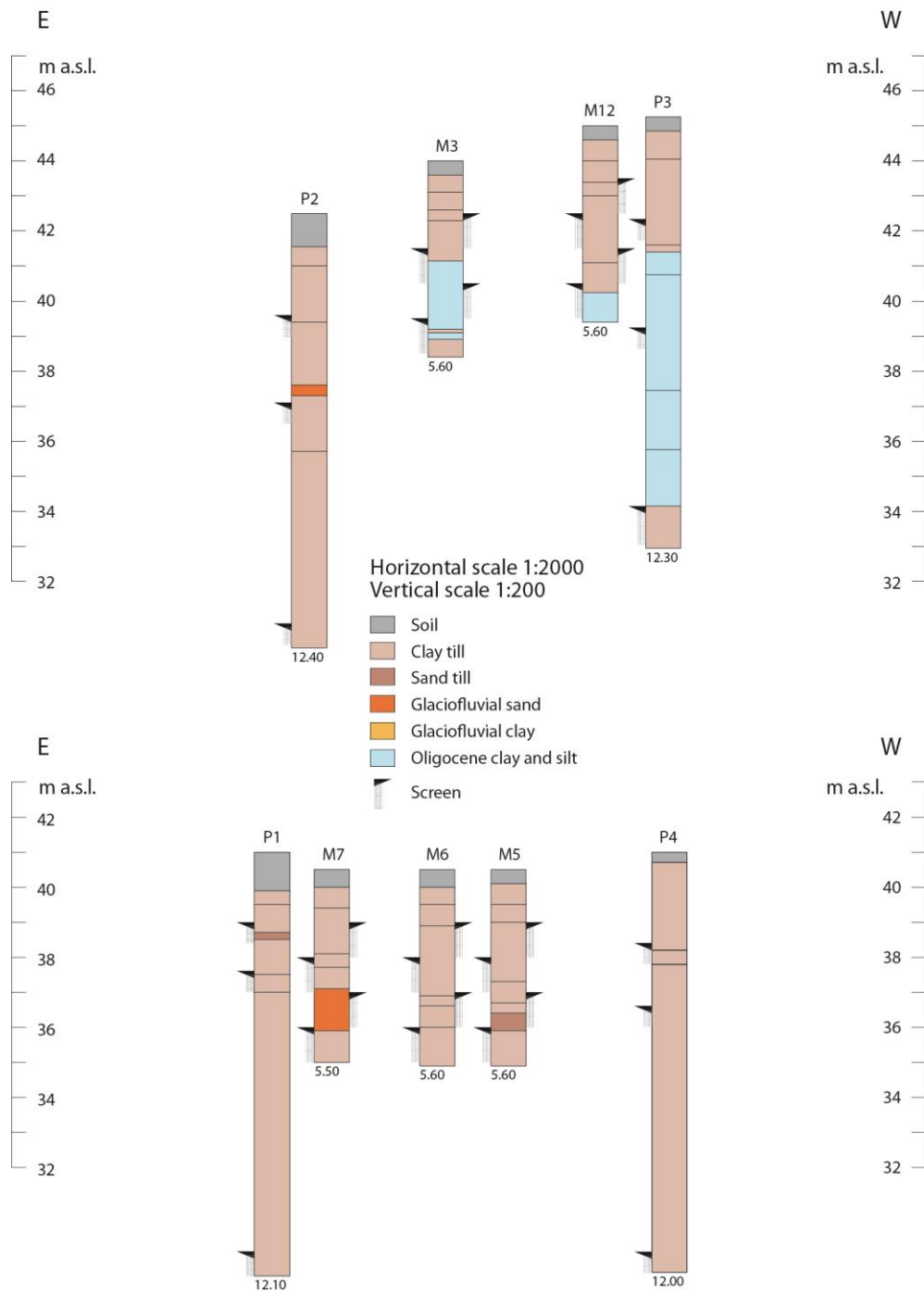
Supplerende figurer.



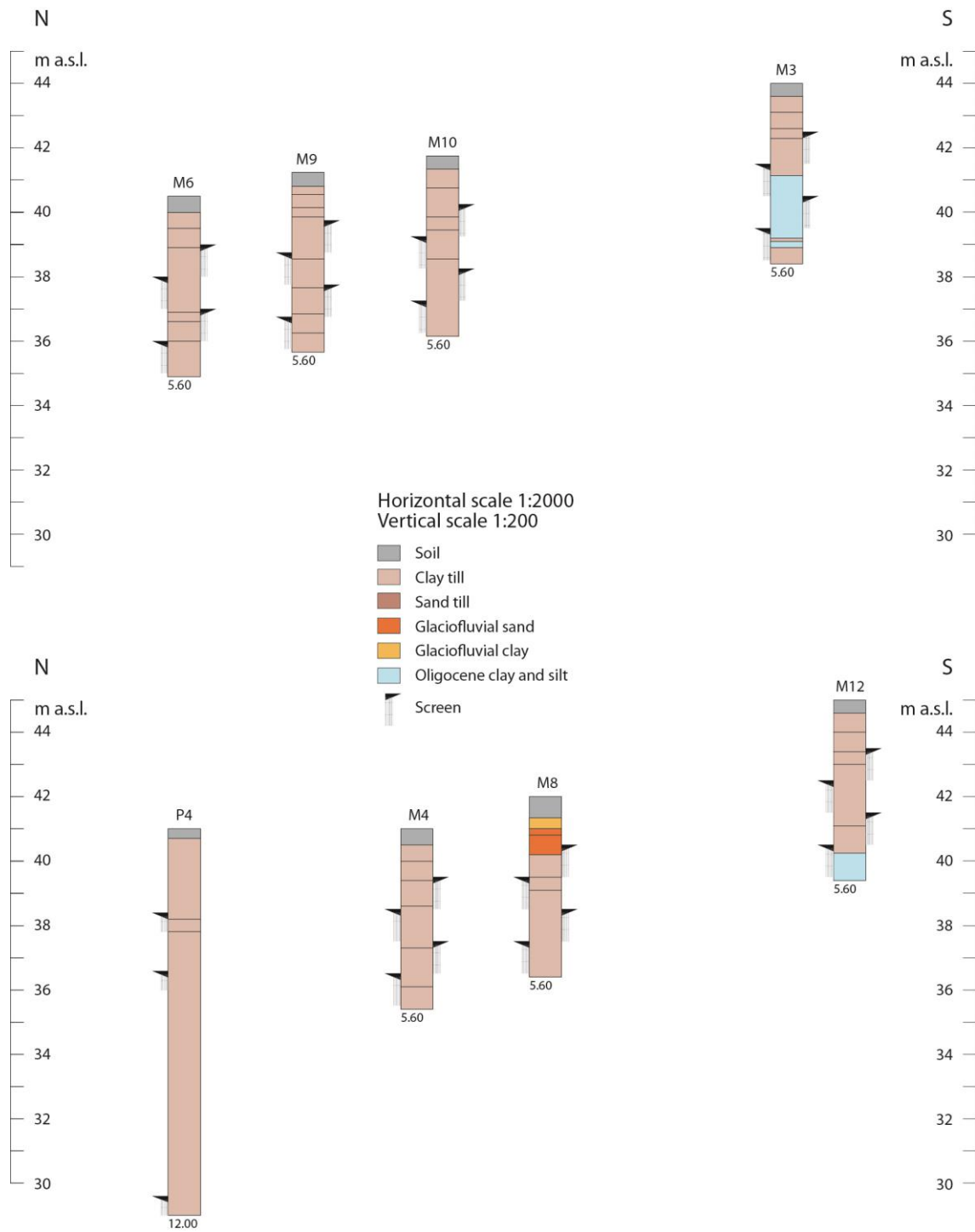
Figur 6.1. Profil fra udgravningen ved Silstrup (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 6.2. Profil fra udgravningen ved Silstrup (Fra Lindhardt et al., 2001).



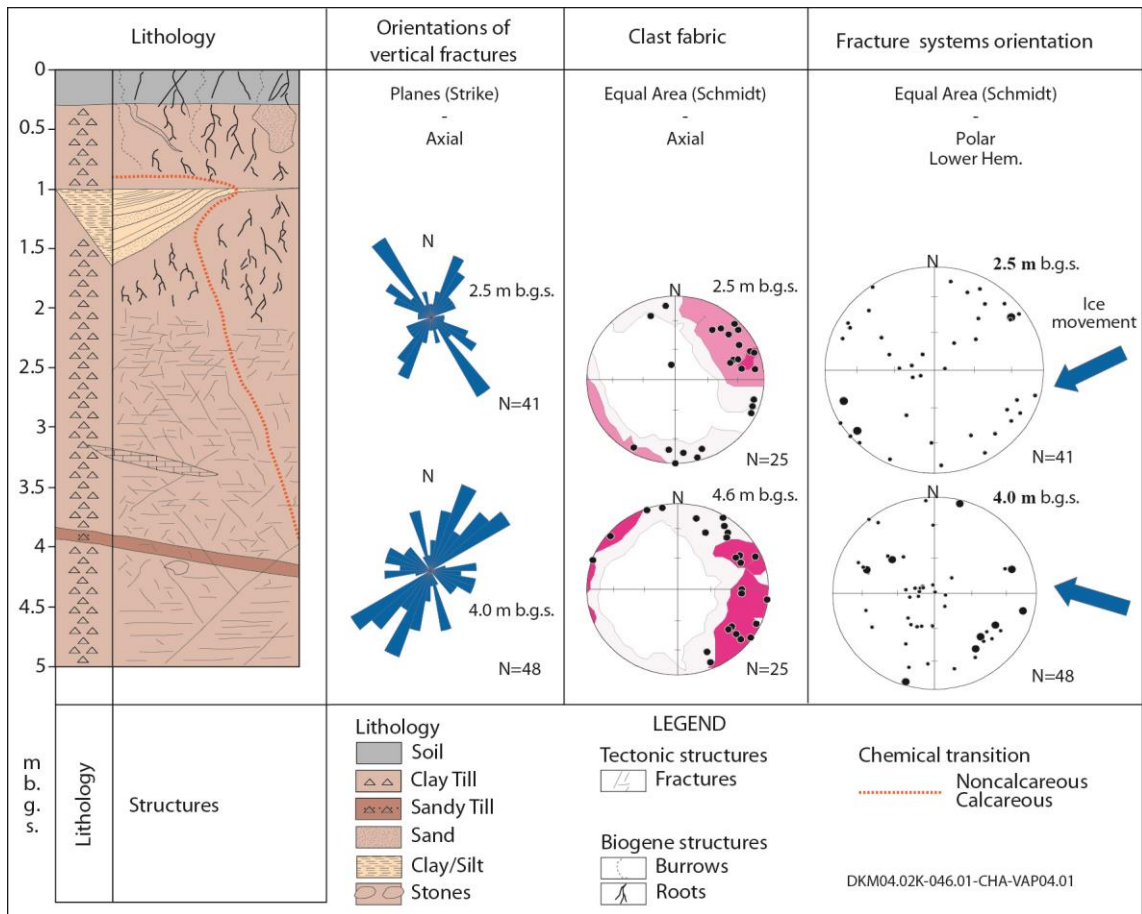
Figur 6.3. Boringer omkring Silstrup marken (Fra Lindhardt et al., 2001).



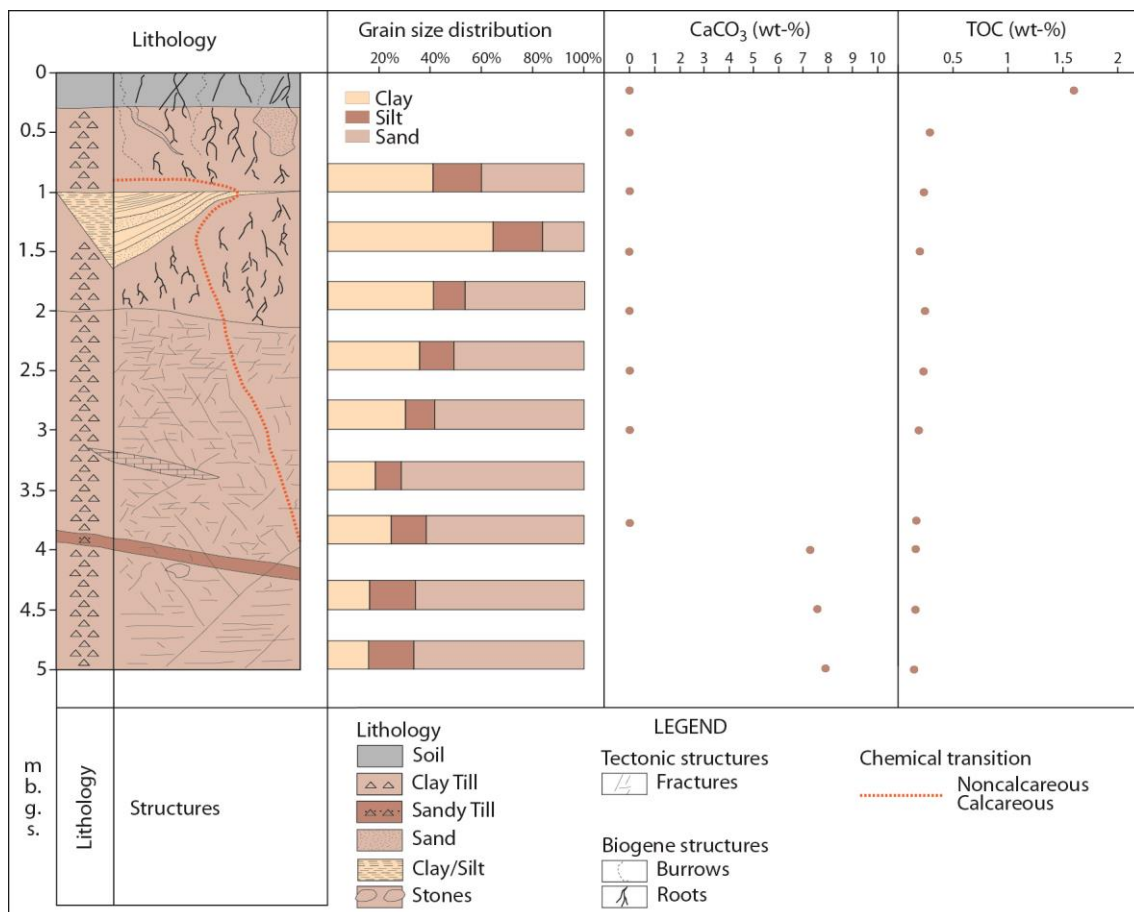
Figur 6.4. Boringer omkring Silstrup Marken (Fra Lindhardt et al., 2001).

Estrup marken

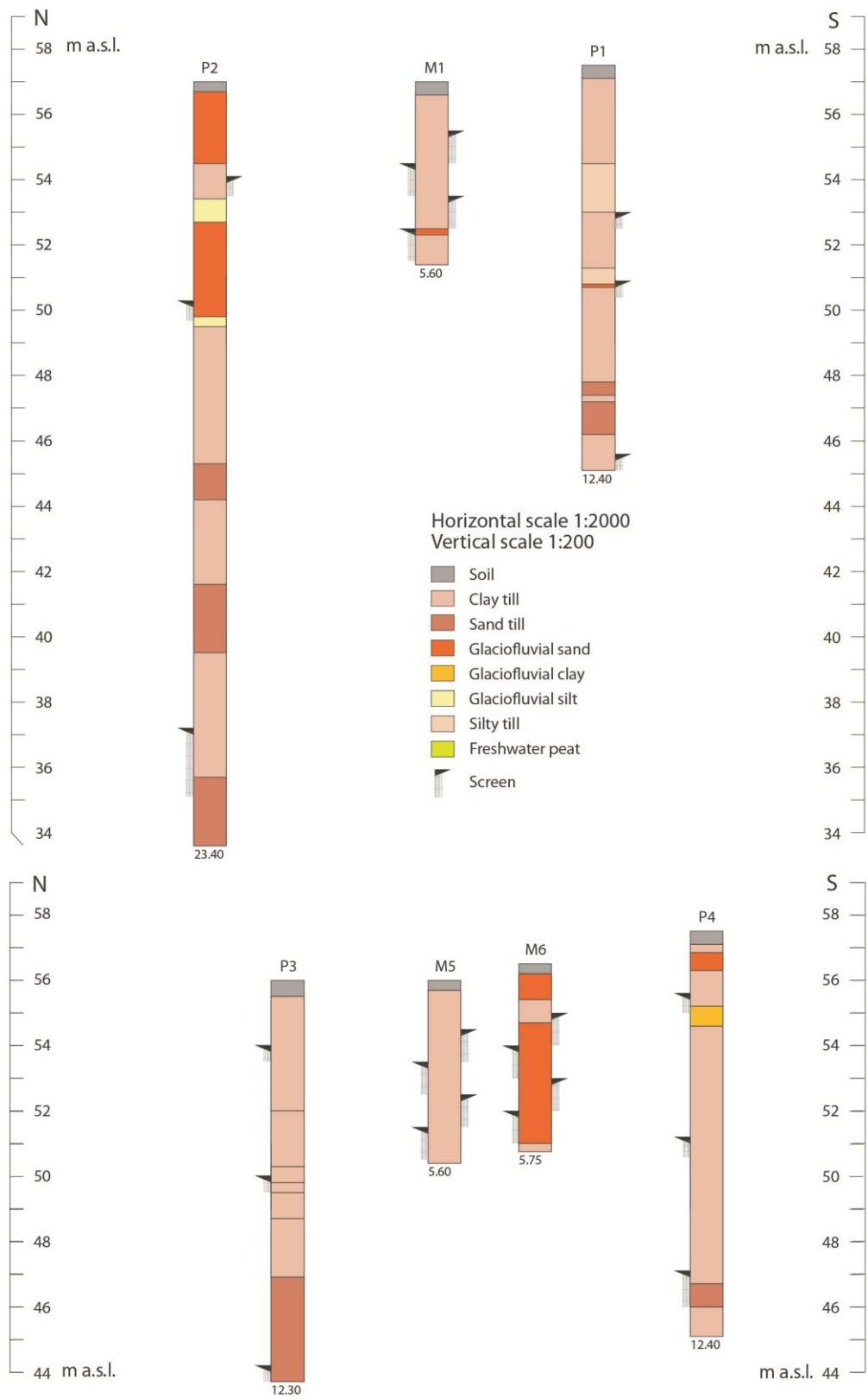
Supplerende figurer.



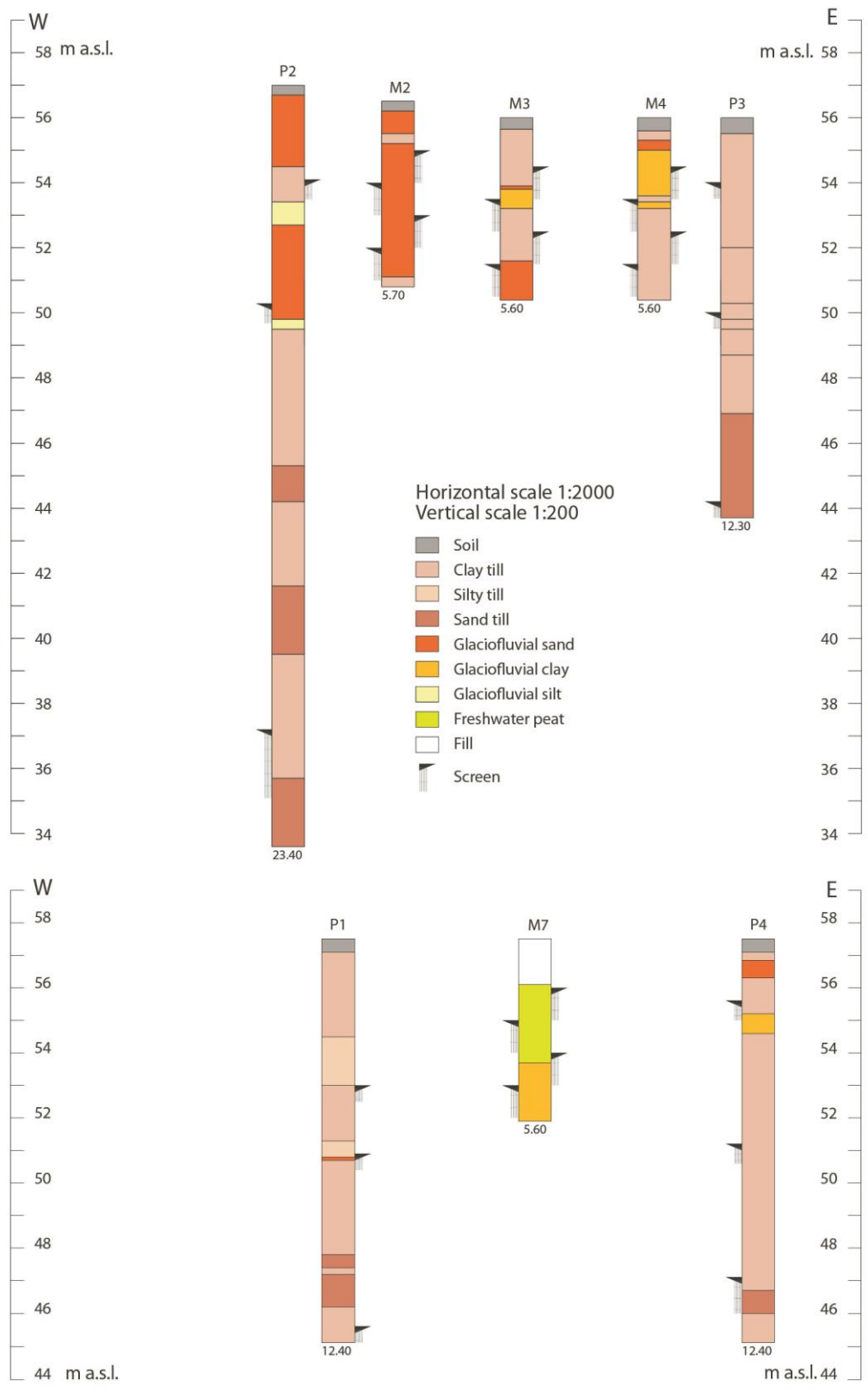
Figur 6.5. Profil fra udgravningen ved Estrup (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 6.6. Profil fra Estrup udgravningen (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 6.7. Boringer omkring Estrup marken (Fra Lindhardt et al., 2001).



Figur 6.8. Boringer omkring Estrup marken (Fra Lindhardt et al., 2001).