GEOFYSIKSAMARBEJDET

Geologisk Institut
Aarhus Universitet

SSV-KONCEPTET
BAGGRUND, ANVENDELSE OG EKSEMPLER

OKTOBER 2009

Indhold

1. FORORD

2. INTRODUKTION
   - 2.1. Hvad indeholder denne kogebog •4
   - 2.2. Hvad er SSV •5
   - 2.3. Hvorfor er SSV-modulet udviklet •5
   - 2.4. Hvad kan SSV-modulet bruges til og hvordan? •6
   - 2.5. Hvor kan SSV-modulet bruges? •7

3. GEOFYSIK
   - 3.1. Hyppigst anvendte geofysiske metoder i SSV. •10
   - 3.2. Jordarternes elektriske egenskaber •11
   - 3.3. Fladedækkende data •12
   - 3.4. Hvilke elektriske modstande kan ler have? •14

4. BORINGER
   - 4.1. Lertykkelse vurderet fra boredata •15
   - 4.2. Usikkerheder •15
   - 4.3. Grænsen mellem ler og sand •16
   - 4.4. Borerapporter og prøvebeskrivelser •16
   - 4.5. Andre faktorer •17
   - 4.6. Eksempler •18

5. INPUT TIL AARHUS WORKBENCHEN
   - 5.1. Oversigt over SSV-konceptet •20
   - 5.2. Opstart •21
   - 5.3. Boringsbeskrivelser (Borehole Editor) •21
   - 5.4. Opsætning af SSV-kørsel (Run Job) •24

6. OUTPUT FRA WORKBENCHEN
   - 6.1. Komplet beskrivelse •28
   - 6.2. Visualisering af temaer •29

7. CASE 1 - HADSTEN, MC ÅRHUS
   - 7.1. Baggrund og formål •33
   - 7.2. Geologisk baggrund •33
   - 7.3. Datagrundlag og indledende analyse •33
   - 7.4. Parametertest •36
   - 7.5. Kvalitetssikring •36
   - 7.6. Geologisk heterogenitet - Spørring •37

8. CASE 2 - SSV ANVENDT PÅ MEP OG SKYTEM DATA FRA EN KORTLÆGNING VEST FOR HELSINGØR, MC ROSKILDE

8.1. Indledning •40
8.2. Undersøgelsesområdet •40
8.3. Geologiske forhold •40
8.4. Datagrundlag •41
8.5. Lertykkelseskort beregnet med SSV-metoden •42
8.6. Diskussion •44
8.7. Konklusion •45
8.8. Bilag til case 2 •46

9. REFERENCER

1. FORORD

Brugen af geofysiske metoder til at vurdere beskyttelsesgraden af grundvandsmagasiner tog for alvor fart med udviklingen af det kontinuerte PACES-system. I mange år anvendte man en simpel oversætter-funktion til at omsætte modellerne til lertykkelser. Omkring år 2004 blev der i regi af Geofysiksamarbejdet igangsat en udvikling af et nyt koncept der skulle optimere denne oversætter-funktion ved at integrere information fra boringer og geofysik.

En del kortlægninger blev gennemført med det der kom til at hedde SSV (geoStatistical estimation of Structural Vulnerability), men samtidig blev det også klart at det var svært at bruge og at tidsforbruget til boringsbeskrivelsen var meget stort. I 2008 blev der derfor nedsat et lille udvalg der skulle se på optimeringer i Aarhus Workbench hvor SSV-modulet var implementeret og samtidig skulle der fremstilles en kogebog, der skulle gennemgå hvordan modulet anvendes hensigtsmæssigt, så nye brugere lettere kunne komme i gang.

Det er resultatet af dette arbejde der præsenteres i denne første rapportudgave.

Rapporten er skrevet af Anders Vest Christiansen (GeoFysikSamarbejdet), Esben Auken (GeoFysikSamarbejdet), Verner Søndergaard (GEUS), Kurt Møller (Miljøcenter Roskilde) og Stine Rasmussen (Miljøcenter Århus). Desuden har Lars Jacobsen (Orbicon) bidraget til casen fra Helsingør-området.

2. INTRODUKTION

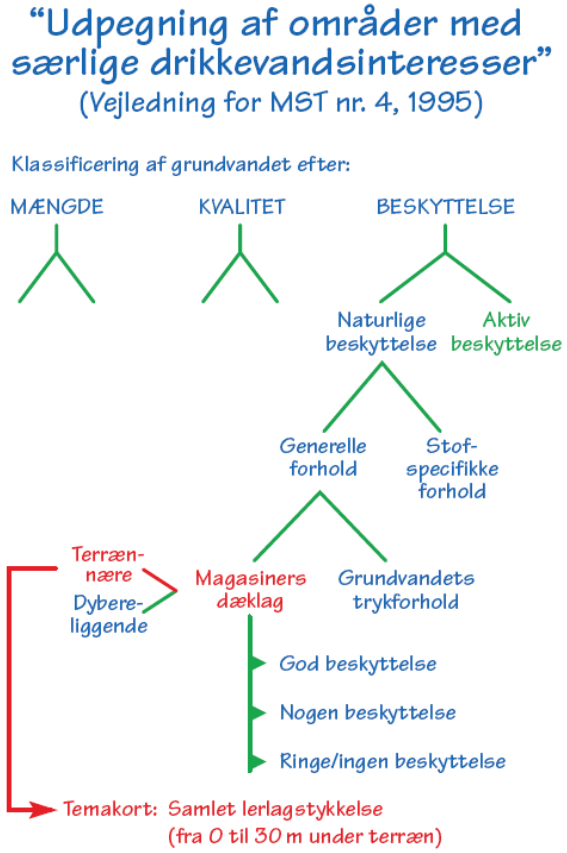
Tykkelsen af lerlag over grundvandsmagasinerne udgør mange steder i landet en vigtig parameter i forhold til beskrivelsen af grundvandsmagasiners sårbarhed. Som led i den nationale grundvandskortlægning og kortlægningen af grundvandets sårbarhed i områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD-områder) og i oplande til vandværker uden for OSD-områderne er det derfor væsentligt, at lertykkelsen kortlægges på grundlag af alle tilgængelige oplysninger.

Denne rapport har til formål at beskrive, hvordan man helt konkret i et område anvender det såkaldte SSV-modul i Aarhus Workbenchen til beregning af den samlede tykkelse af lerdæklag ud fra en integreret anvendelse af geofysiske målinger og oplysninger om lerlag fra boringer. SSV er en forkortelse for betegnelsen *geoStatistical estimation of Structural Vulnerability*.

Rapporten her er tænkt som en slags kogebog med konkrete opskrifter på, hvordan man griber opgaven an, når man står med en given mængde geofysiske målinger og et givet antal boringer i et bestemt område, og man ønsker at anvende SSV-modulet til fremstilling af lertykkelseskort for et eller flere dybdeintervaller i det pågældende område.

Der er vigtigt at understrege, at der ikke her gives nogen anbefalinger om, hvordan lerdæklagstykkelser bør indgå i det videre arbejde med indsatsplaner og andre planer for beskyttelse af grundvandet. For en sådan udredning henvises til vejledninger eller beskrivelser andetsteds, idet en lang række informationer ud over netop lerdæklag er relevante i dén sammenhæng.

Til belysning af i hvilken sammenhæng lerlagstykkelsen optræder er der i figur 1 gengivet en planche fra: "Geofysik og Grundvandskortlægning, kursusnoter fra Sandbjerg, Oktober 2000". Planchen illustrerer, at den samlede lerlagstykkelse blot er ét blandt mange temaer, som har betydning, når grundvandets naturlige beskyttelse skal beskrives, men i mange tilfælde et særdeles vigtigt tema.



Figur 1. Planchen illustrerer, hvordan lerlagstykkelsen er én blandt mange parametre, som kan bidrage til at belyse grundvandets naturlige beskyttelse og dermed bl.a. også nitratsårbarheden.

2.1. Hvad indeholder denne kogebog

Det er hensigten med denne kogebog at gøre det lettere at komme i gang med at anvende SSV-modulet til udarbejdelse af kort over tykkelsen af lerdæklag i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Kogebogen består af 3 dele, hvor første del omfatter forord og 3 kapitler, der indeholder en introduktion samt nogle overvejelser vedrørende forudsætningerne for at anvende geofysik og boringer som grundlag for beregningerne i SSV-modulet.

Anden del af kogebogen består af kapitlerne 5 og 6, der er helt centrale og omfatter selve beskrivelsen af input og output til og fra SSV-modulet i Aarhus Workbenchen. I disse kapitler gives henholdsvis

beskrivelser af de væsentligste parametre, der skal angives forud for en kørsel med programmet, og beskrivelser af, hvordan man kan bruge og forstå det output, der kommer ud af kørslen.

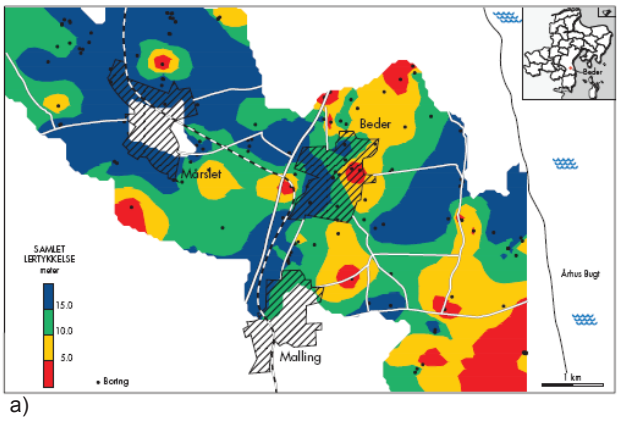
Den tredje og meget væsentlige del af kogebogen består af 2 cases, som forhåbentlig kan gøre beskrivelserne i øvrigt i kogebogen helt konkrete. Disse cases har til formål at illustrere de forskellige trin og overvejelser hele vejen fra opsætningen af et SSV-job frem til brugbart output, og hvordan det kan gøres med fokus på forskellige visualiseringer af resultaterne. Det er valgt at illustrere brugen af SSV-modulet med cases fra to forskellige egne af Danmark og dermed anvendelse af forskelligt datagrundlag med henblik på at gøre kogebogen så alsidig og praktisk anvendelig som muligt. Hensigten er desuden, at kogebogen i et appendiks skal kunne udvides med flere cases, når sådanne måtte blive relevante hen ad vejen.

2.2. Hvad er SSV

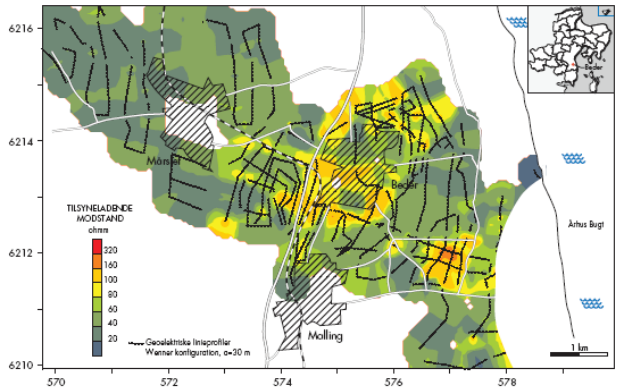
SSV-konceptet beskriver en måde, hvorpå man kan optimere samtolkningen af geofysiske og geologiske data i forbindelse med beregning af den akkumulerede tykkelse af lerlag inden for et valgt beregningsinterval. Dette kunne eksempelvis være i dybdeintervallet 0 – 30 m under terræn, men beregningerne kan lige så vel gennemføres for andre og dybereliggende niveauer. SSV-modulet udregner en funktion, der er i stand til at oversætte de geofysiske målinger til lerlagstykkelser på en måde, så der opnås bedst mulig overensstemmelse mellem den SSV-beregnede lertykkelse og de lerlagstykkelser, der helt konkret er observeret og beskrevet i det enkelte områdes boringer. Resultatet af SSV-beregningerne er således afhængigt af både tæthed og kvalitet af et områdes boringer såvel som af tæthed og kvalitet af de geofysiske målinger.

2.3. Hvorfor er SSV-modulet udviklet

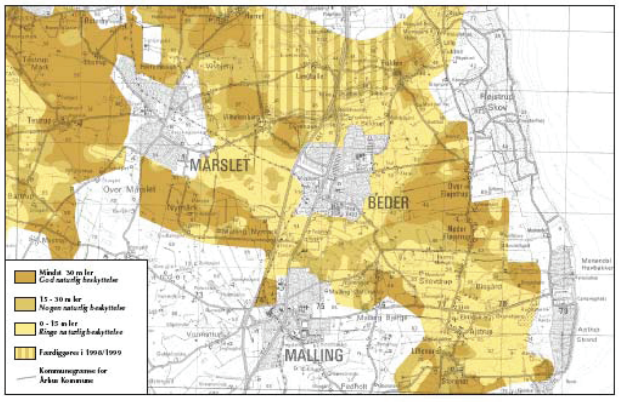
SSV-modulet er udviklet, fordi der har været et stigende behov for og ønske om at kunne udarbejde kort over tykkelsen af lerlag over grundvandsmagasinerne baseret på såvel geofysiske målinger som på informationer fra boringer og efter rimeligt ensartede principper. Geofysiske målinger udføres nu i meget betydeligt omfang, og derfor har behovet for at integrere og optimere udnyttelsen af de mange geofysiske data været stadigt mere påtræn-



a)



b)



c)

Figur 2 a) viser lertykkelsen baseret på boringer, b) viser geoelektriske målinger (tilsyneladende modstand for Wener-konfigurationen, a=20m) i samme område, og c) viser en manuel sammenstilling af informationer på de to kort i a) og b) til et kort over den samlede lerlagstykkelse.

gende, således at resultater herfra sammen med boringsoplysninger samlet kan indgå på en fagligt kvalificeret måde, også i beregningen af lertykkelser. Samtidig er det vigtigt, at proceduren omkring beregning af lertykkelser kan beskrives kvantitativt og mere præcist sammenlignet med den ofte benyttede praksis, hvor beregninger af lertykkelser ud fra geofysiske målinger er blevet efterjusteret "manuelt" med oplysninger fra boringer.

Eksempler på, hvordan lertykkelseskort typisk er blevet fremstillet, spænder lige fra udelukkende anvendelse af informationer fra boringer over anvendelse af rene geofysiske måleresultater til forskellige hybridløsninger, hvor man manuelt sammenstiller informationer fra både boringer og geofysiske målinger. I Figur 2 er vist nogle eksempler på forskellige udgaver af kort, som har været brugt til på hver sin måde at afspejle den samlede lertykkelse for samme område.

En væsentlig og temmelig afgørende grund til at udvikle SSV-modulet har været det stigende krav om løbende opdatering og sammenstilling af informationer. Rene manuelle fremstillinger af korttemaer, eller hybridløsninger, hvor man foretager manuelle ændringer i automatisk fremstillede korttemaer, medfører oftest problemer opdateringsmæssigt. Krav om løbende ajourføring vil ikke kunne indfries, hvis der stilles store krav til den manuelle efterbehandling af et tema, hver gang en ny boring eller geofysisk måling er udført i et område. Enhver manuel justering eller tilretning af korttemaer skal i så fald nøje beskrives, og det er i praksis ikke muligt at gøre tilstrækkeligt detaljeret til at sikre, at fremtidige ajourføringer kommer til at omfatte og indeholde alle tidligere, manuelle ændringer. Med SSV-modulet er proceduren og alle parametre fuldt dokumenterede og en opdatering kan foretages med en begrænset indsats.

2.4. Hvad kan SSV-modulet bruges til og hvordan?

Indledningsvis skal her omtales nogle af de vendinger og begreber, der bruges i forbindelse med lertykkelsesberegninger og anvendelsen af SSV-modulet.

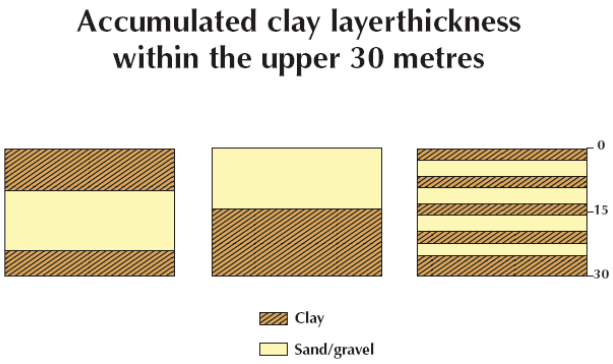
Den samlede tykkelse af lerlag i et givet dybdeinterval omtales også ofte som lerdæklagstykkelsen for det givne dybdeinterval. Vendingen "dæklag" referer til, at man med lertykkelsen har ønsket at beskrive forhold, der har betydning for de geologiske enheder, der ligger nedenunder, naturligvis specielt de lag, der udgør grundvandsmagasinerne i et område. Det er oplagt, at der kan være tale om lerdæklag i mange niveauer og dybdeintervaller, specielt når man arbejder i områder med dybereliggende magasiner.

Den væsentligste grund til at operere med begrebet "den samlede lerlagstykkelse" i et givet dybdeinterval er, at det kun sjældent lader sig gøre at kortlægge den individuelle tykkelse af hvert enkelt forekommende lerlag over et større område.

Boringstætheden er hertil normalt for ringe og den geologiske heterogenitet alt for stor. Forskelligheden i beskrivelsen af boringerne er samtidig for stor til, at man ud fra de givne jordprøvebeskrivelser vil kunne identificere de enkelte lerlag lithologisk og stratigrafisk og korrelere dem fra boring til boring. Hertil kommer, at man sjældent med sikkerhed vil kunne identificere hvert eneste lerlag individuelt, end ikke ud fra fladedækkende geofysiske målinger. Derimod vil man ofte have større succes med at opgøre en samlet tykkelse af de observerede lerlag i et givet dybdeinterval for et større område.

Den samlede lerlagstykkelse er en slags parameter for et bestemt dybde- eller koteinterval på samme måde som middelmodstanden eller den hydrauliske ledningsevne. Den er altså ikke et egentligt geologisk lag med en veldefineret overside eller underside, sådan som vi normalt opfatter en geologisk enhed eller et lag. Denne erkendelse har betydning ved udnyttelsen af information om den samlede lerdæklagstykkelse i f.eks. en geologisk model eller en grundvandsmodel, hvor man må finde alternative måder at indbygge informationen på i forhold til de gængse lagmodeller.

En samlet lertykkelse i et bestemt dybdeinterval kan tilskrives mange forskellige geologiske scenarier som illustreret i Figur 3.



Figur 3. En samlet lertykkelse på 15m (f.eks. som illustreret her i dybdeintervallet fra 0 – 30m under terræn) kan skyldes mange forskellige scenarier. Den samlede lertykkelse inden for et bestemt interval, , skal ikke opfattes som noget egentligt lag men nærmere som en parameter i stil med intervalmodstanden i det aktuelle dybdeinterval (som den jo også er en funktion af!).

2.5. Hvor kan SSV-modulet bruges?

Som beskrevet i Miljøstyrelsens Zoneringsvejledning fra 2000 er tykkelsen af lerdæklag over grundvandsmagasinerne mange steder i landet en væsentlig faktor, når man skal beskrive grundvandsmagasinernes sårbarhed i forhold til specifikke forureningsrisici. Rent statistisk er der - i dele af Danmark - konstateret en tydelig korrelation mellem en stigende tykkelse af lerdæklag over grundvandsmagasiner og et faldende nitratindhold i grundvandet - (forventes uddybet i et senere selvstændigt dokument/notat).

På den enkelte boringslokalitet skal man dog ikke altid forvente en sådan simpel sammenhæng mellem observeret lerlagstykkelse og nitratindhold i grundvandet. Dette skyldes samspillet mellem en række forskellige faktorer:

- Det kan ikke forudsættes, at det grundvand man prøvetager i en boring, er infiltreret direkte ned gennem de lag, man har beskrevet i den aktuelle boring, idet grundvandet kan være infiltreret og strømmet til boringslokaliteten fra andre steder i oplandet, hvor tykkelsen af lerdæklagene er væsentlig anderledes
- Placeringen af filterindtaget i en boring har stor betydning for, hvilke analyseresultater man får på de udtagne vandprøver. En filterplacering i stor dybde kan meget vel betyde, at der ikke findes nitrat i vandprøver under et areal med lerdæklag af ringe tykkelse, medens man ville have fået et andet resultat, hvis filterindtaget havde været placeret lige under grundvandsspejlet.

Hvor store tykkelser af lerdæklag, der skal til for at yde grundvandet en god beskyttelse, afhænger af hvilke typer leraflejringer, der er tale om, jf. zoneringsvejledningen. Samtidig har det også stor betydning, hvor sammenhængende lerlagene er over større strækninger, hvor homogent sammensatte de er, og om de er oppressede etc.

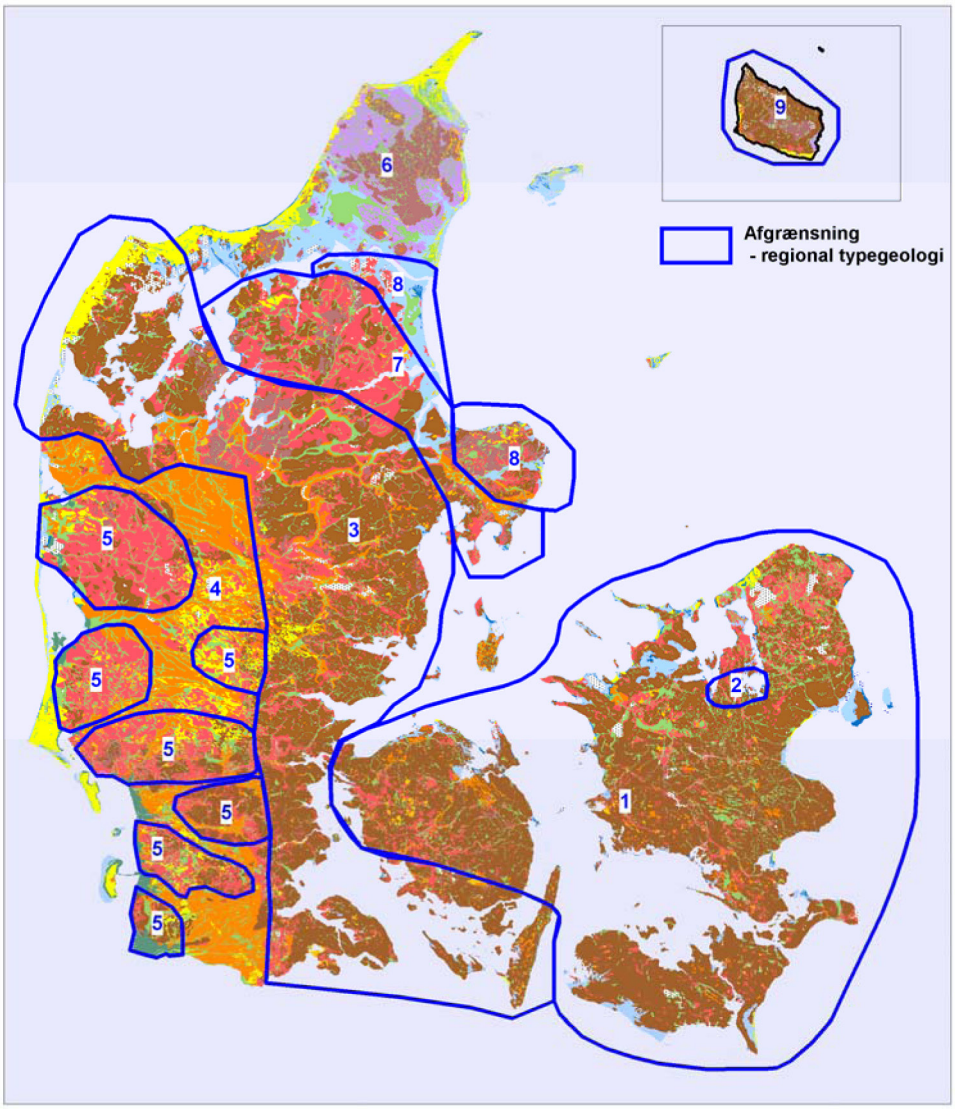
Den udprægede heterogenitet, der af naturlige årsager ofte forekommer i både geologi og med hensyn til eksisterende viden, betyder, at en tilstrækkelig detaljeret beskrivelse af lerlagenes udbredelse og tykkelse forudsætter en stor datatæthed.

Med udgangspunkt i de geologiske forhold i Danmark kan der ikke gives et helt generelt svar på, hvor det er relevant at beregne lerdæklagstykkelser, men med udgangspunkt i zoneringsvejledningens kort over regionale grundvandstyper (se Figur 4) kan visse områder dog som udgangspunkt fremhæves som oplagte:

Sjælland, Fyn og Jylland øst for hovedopholdslinien – bortset fra dele af Djursland, Himmerland og området nord for Limfjorden - er som udgangspunkt relevante at udføre lertykkelsesberegninger i. På figuren herunder svarer dette til områdetyperne I(1), II(2) og III(3).

I Vestjylland og i den nordlige del af Jylland vil det dog også ofte være relevant at foretage en beregning af lerdæklagstykkelsen. Typisk har man dog behov for at udføre beregningerne for lerdæklag på større dybder, specielt i Vestjylland uden for bakkeøerne, hvor de mest betydningsfulde magasiner findes langt under terræn.

SSV-modulet kan benyttes, uanset hvilke dybder der fokuseres på. Jo større dybde, lerdæklagene skal beregnes for, jo vanskeligere bliver det imid-

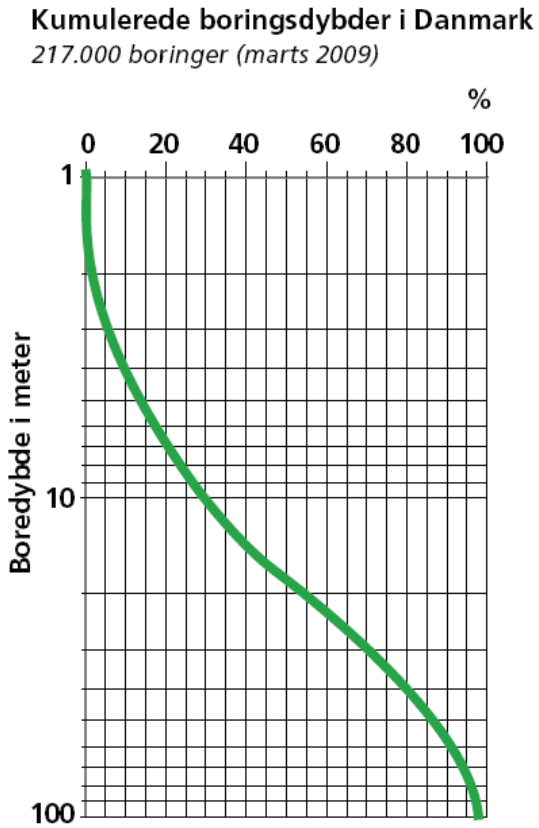


Figur 4 Figuren viser oversigt over regionale typer af grundvandsmagasiner med forskellige dæklag (efter figur f.1 side 150 i Vejledning Nr 3, 2000 fra Miljøstyrelsen om Zonering)
Type I(1) område: Relativt uforstyrrede lerlag, som dækker grundvandsmagasinerne.
Type II(2) område: Lerlag af varierende tykkelse over umættede grundvandsmagasiner.
Type III(3) område: Morænelер forstyrret af isens bevægelser dækker.

lertid. Det hænger sammen med både boringstæthed og geofysikkens begrænsninger.

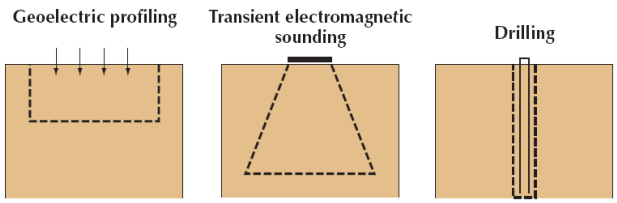
Boringstætheden aftager med dybden som det ses i Figur 5. Således er 50% af alle boringer mindre end 20m dybe, når man tager udgangspunkt i samtlige registrerede, beskrevne boringer i Danmark. Kun 5% af alle boringer er dybere end 75m! Det er derfor oplagt, at hvis man f.eks. vil beregne den akkumulerede lertykkelse i dybdeintervallet 30 – 60 m, så vil i gennemsnit kun ca. 10% af alle de boringer, man har til rådighed kunne bidrage med information hele vejen ned gennem dette dybdeinterval på grund af for ringe boredybde.

På større dybde vil tolkningen af de fladedækkende, geofysiske målinger generelt også være forbundet med større usikkerhed på bestemmelsen af lagparametre, bl.a. fordi målingerne for de fleste metoder midler over et større og større volumen, jo dybere man kommer. Hertil skal man lægge, at antallet af anvendelige geofysiske metoder, aftager med stigende kortlægningsdybde. PACES-målinger kan f.eks. ikke benyttes i dybden 30 – 60 m



Figur 5. Kumulerede boringsdybder i Danmark. Af figuren kan bl.a. aflæses, hvor mange af boringerne i Jupiter-databasen, der når ned i en bestemt dybde: f.eks. er ca. 70% mindre end 30 m dybe!.

under terræn. I Figur 6 er illustreret, hvordan forskellige kortlægningsmetoder gennem forskellige kortlægningsvoluminer har hver deres muligheder og begrænsninger.



Figur 6. Forskellige kortlægningsmetoder og deres kortlægningsvolumen.

Disse udfordringer forhindrer naturligvis ikke, at man kan anvende de foreliggende oplysninger optimalt også i områder med dybtliggende grundvandsmagasiner, men det er vigtigt at evaluere, hvilke muligheder man har og hvilken metodetilgang, der bedst lader sig anvende ved beregning af lertykkelser i disse tilfælde.

3. GEOFYSIK

SSV-modulet har til formål at transformere geofysisk tolkede data til lerlagstykkelser på en måde, så der samtidig bliver den bedst mulige overensstemmelse med de observerede lerlagstykkelser i det aktuelle områdes boringer.

Arbejdet i SSV-modulet forudsætter altså at både boringsoplysninger og tolkede geofysikdata foreligger.

SSV-modulet forudsætter ligeledes, at de tolkede geofysikdata kan relateres til geografisk velbestemte målepunkter, og at der til hvert enkelt målepunkt er knyttet en lagtolkning bestående af et antal lag, som hver især er beskrevet ved henholdsvis en lagtykkelse/lagdybde og en lagegenskab (f.eks. den elektriske modstand) samt en usikkerhed på hver af disse lagparametre.

Da usikkerheden på den beregnede lerlagstykkelse er en væsentlig parameter for vurdering af slutresultatet, er det afgørende, at de geofysiske data og tolkninger, der indgår i beregningerne i SSV-modulet også omfatter angivelse af usikkerhed på de tolkede lagparametre. Usikkerheden på de anvendte geofysiske tolkninger, der dels hidrører fra usikkerhed på selve målingerne og dels fra anvendelsen af 1D-modeller i tolkningsprocessen for elektriske og elektromagnetiske målinger, videreføres og indgår i beregningen af den samlede lertykkelse og usikkerheden på denne. Mangelagstolkninger har ingen usikkerhed på lagtykkelser og er derfor ikke velegnede i forbindelse SSV-beregninger af lertykkelse.

I dette kapitel vil der blive fokuseret på, hvilke forskellige typer geofysiske data, der p.t. er mest anvendelige til beregning af lertykkelser og hvorfor.

3.1. Hyppigst anvendte geofysiske metoder i SSV.

De umiddelbart mest anvendelige geofysikdata i forbindelse med beregning af lerlagstykkelser er elektriske (ofte også kaldet galvaniske eller blot DC) og elektromagnetiske målinger. Tolkningen af disse data foreligger normalt som lagmodeller, der er bestemt ved tykkelse og elektriske modstand af hvert lag i den anvendte tolkningsmodel for hvert enkelt målepunkt.

Den galvaniske metode

Den galvaniske metode eller DC-metoden i form af PACES eller MEP, har hidtil været den metode, der umiddelbart forekommer mest anvendelig, hvis man vil kortlægge de øverste lerdæklag oven over grundvandsmagasinerne. Det skyldes stor følsomhed og detaljeringsgrad tæt på jordoverfladen aftagende med dybden. PACES-udgaven er begrænset til at kunne bruges i forbindelse med kortlægning af de øverste 20 – 30 meter under jordoverfladen, medens MEP-udgaven oftest vil kunne nå ned i mindst dobbelt så stor dybde.

De ældre 3-kanals PACEP-målinger er som følge af den begrænsede informationsmængde fra kun 3 dataværdier i hvert målepunkt ikke specielt velegnede til beregning af lertykkelser i SSV-modulet.

For PACES-metodens vedkommende bør man være meget opmærksom på, at den geologiske lagfølge har stor betydning for metodens indtrængningsformåen. LCI-tolkning med 3-lags 1D-modeller langs en målelinie vil i geologisk heterogene områder afsløre, at dybden til nederste tolkede lagtop stedvis kan være ganske få meter, og dermed vil det være tredje lag, dvs. nederste lag, som fylder resten af beregningsintervallet. Man bør derfor vurdere konkret i hvert kortlægningsområde, til hvilken dybde man med rimelighed kan forvente pålidelig information fra PACES-tolkningerne afhængig af geologien og vurderet ud fra de foreliggende geofysiske tolkningsresultater og de konkrete indtrængningsdybder.

Man bør samtidig være opmærksom på, at såvel ækvivalens som lagundertrykkelse er fænomener, der optræder i forbindelse med anvendelse af både PACES- og MEP-målinger. Ækvivalens betyder kort beskrevet, at produktet af et lags modstand og tykkelse er godt bestemt, medens de to parametre hver for sig er dårligt bestemt, hvilket igen betyder at de lagtykkelser man benytter i SSV-beregningerne for sådanne lag er forbundet med stor usikkerhed. Lagundertrykkelse optræder ofte når et lags modstand ikke afviger særlig meget fra henholdsvis laget ovenover og nedenunder, hvilket medfører at man ikke ser laget medmindre det er meget tykt.

Ved en umiddelbar betragtning af geofysiske tolkningsresultater kan det være vanskeligt at vurdere omfanget af disse fænomener, men SSV-beregnede lertykkelser, der ikke ser ud til at stemme overens med foreliggende observationer i boringer, kan meget vel være forårsaget af sådanne forhold.

Den elektromagnetiske metode
Den elektromagnetiske metode benyttes i en række udgaver i forbindelse med geologisk kortlægning. Hyppigst anvendt i Danmark er TEM-metoden, der udføres dels som jordbaserede single-site TEM-sonderinger og dels som luftbårne liniebaserede SkyTEM-sonderinger. Sidstnævnte er nu den hyppigst forekommende måde at udføre TEM-kortlægning på. SSV-modulet understøtter anvendelsen af TEM- og SkyTEM-målinger i forbindelse med beregning af lertykkelser. Der er også udført andre typer helikopter-bårne EM-målinger, som der er mulighed for at udnytte i SSV-modulet. Herudover vil EM31 og EM38-målinger i princippet kunne bruges, hvis disse er lagfølgetolket, og hvis man udelukkende går efter at kortlægge de øverste 1 – 3 meter under terræn. EM31/38-målinger er typisk udført i forbindelse med landbrugets kortlægning af jordens bonitet, men da disse målinger ikke bliver indrapporteret til nogen central database er der ikke umiddelbart adgang til at udnytte de mange målinger, der er foretaget.

Information fra det største dybdeinterval fås fra TEM- og SkyTEM-målinger, der har en dybdeindtrængning på op til et par hundrede meter. Dog skal man være opmærksom på, at dette betydelige dybdeinterval normalt tolkes med modeller på højst 5 lag. Hvis det nederste modellag (eksempelvis en velbestemt, god elektrisk leder) findes i f.eks. 120 meters dybde, så vil de 120 meter sedimenter mellem jordoverfladen og den gode leder derfor være beskrevet ved højst 4 separate lag. Dette betyder, at detaljeringen i bestemmelse af lagtykkelser normalt falder med dybden. Lertykkelsesberegninger baseret på TEM-målinger på større dybder bør således i de fleste tilfælde foretages for stigende dybde- eller koteintervaller i overensstemmelse med en faldende detaljeringsgrad nedefter.

Single-site TEM-sonderinger og de tidligst udførte SkyTEM-målinger har en begrænset opløsningsevne inden for de allerøverste meter, dvs. ned til omkring 10 meters dybde afhængig af geologi og modstandskontraster. Med de nyeste konfigurationer af SkyTEM-systemet, hvor der kan måles til meget tidlige tider (omkring 11 - 12 mikrosekunder) ved anvendelse af kombineret super-lavt og lavt moment eller ved anvendelse af kombineret lavt og højt moment har det dog i praksis vist sig, at der også kan opnås forholdsvis sikker information om selv meget terrænnære og relativt tynde lag. På Lolland og i Nordjylland er SkyTEM-kortlægninger med sådanne konfigurationer udført, og foreløbige tolkninger peger i retning af, at SkyTEM sandsynligvis efterhånden vil kunne bruges til at få en ganske god regional beskrivelse af også ganske terrænnære geologiske forhold.

3.2. Jordarternes elektriske egenskaber

Forudsætningen for, at elektriske og elektromagnetiske metoder kan anvendes, er, at forskelle i specifik elektrisk modstand (herefter blot benævnt elektrisk modstand) også afspejler geologiske forskelle, og at bestemmelse af sedimenternes (jordlagenes) elektriske modstande i et vist omfang muliggør en geologisk identifikation af de aktuelle sedimenter.

Et sediments elektriske egenskaber afspejler først og fremmest de indgående jordpartiklers (mineraler/bjergartsfragmenter) og vandindholdets elektriske modstand.

Archie's formel kan bruges til at få en overordnet idé om sandede sedimenters elektriske modstand:

$$\rho_f = F \rho_w$$

hvor ρ_f er sedimentets formationsmodstand (lagets modstand), F er formationsfaktoren (varierer fra ca. 3 til ca. 8 i sandede sedimenter i Danmark), og ρw er porevandets elektriske modstand.

Bemærk her, at en fordobling af den målte elektriske ledningsevne i grundvandet (på grund af karbonat, nitrat, sulfat, klorid og andre betydende ioner) fra 30 mS/m til 60 mS/m vil medføre en halvering af et sandmagasins elektriske modstand fra 133 Ωm til 67 Ωm ved en formationsfaktor på 4! Vær derfor opmærksom på de store regionale forskelle i grundvandets elektriske ledningsevne.

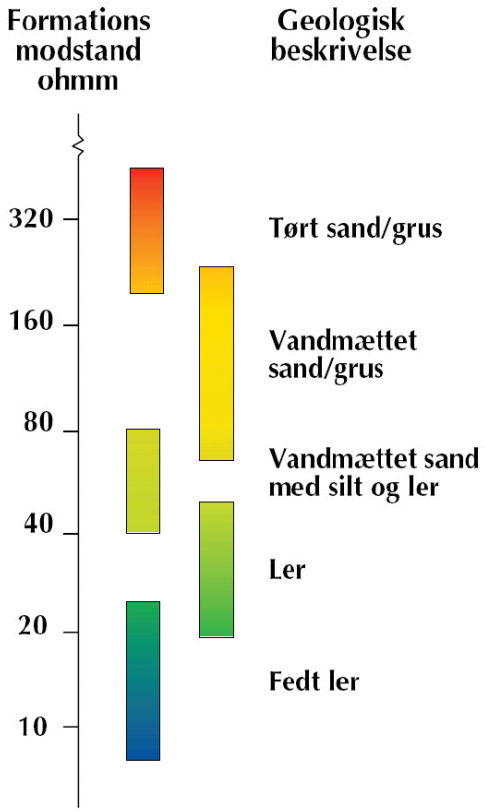
En forudsætning for at Archie's formel skal være gældende, er, at den elektriske strøm udelukkende løber gennem porevandet i sedimentet. Når vi har med lerholdige sedimenter at gøre, er forholdene dog mere komplicerede, idet lermineralerne også bidrager til at lede den elektriske strøm og altså må betragtes som ledende partikler, der sammen med ionindholdet i porevandet bidrager til at mindske den elektriske modstand hos det pågældende sediment. Forskellige lermineraler har forskellig effekt på de elektriske egenskaber ved et sediment. Lermineralet montmorillonit fører f.eks. til en betydeligt lavere elektrisk modstand hos et sediment end lermineralet kaolinit gør.

I et lag af rent sand er matrix, dvs. jordpartiklerne, isolatorer, og her er det først og fremmest porøsiteten, vandindholdet og porevandsmodstanden, der tilsammen afgør lagets elektriske egenskaber. Tørt, rent sand udviser således en meget høj elektrisk modstand ofte på adskillige tusinde Ωm, medens vandmættet sand har betydeligt lavere modstand, som afhænger af vandets mineralindhold og porøsiteten i laget. Sand under grundvandsspejlet kan ofte have elektriske modstande på et godt stykke under 100 Ωm.

I sedimenter med et vist lerindhold bidrager både lermængde og lertype til at reducere lagets elektriske modstand. Derfor har meget fede tertiære lerlag meget lave elektriske modstande på nogle få Ωm, medens moræneler af den sandede type kan have ganske høje modstande, der er på niveau med den elektriske modstand i visse vandmættede sandaflejringer i områder med højt ionindhold i grundvandet.

For at kunne give fornuftige bud på formationsmodstanden i de hyppigst forekommende sedimenter i et område er det vigtigt, at man dels forholder sig til vandets ionindhold/ledningsevne (en idé herom kan fås fra vandanalyser i boringer) og dels størrelsesordenen af sedimenternes lerindhold og så vidt muligt også typen af ler.

På Figur 7 er vist nogle meget overordnede modstandsintervaller for danske sedimenter, hvor der sagtens kan være betydelige udsving fra egn til egn og fra den ene type geologi til den anden.



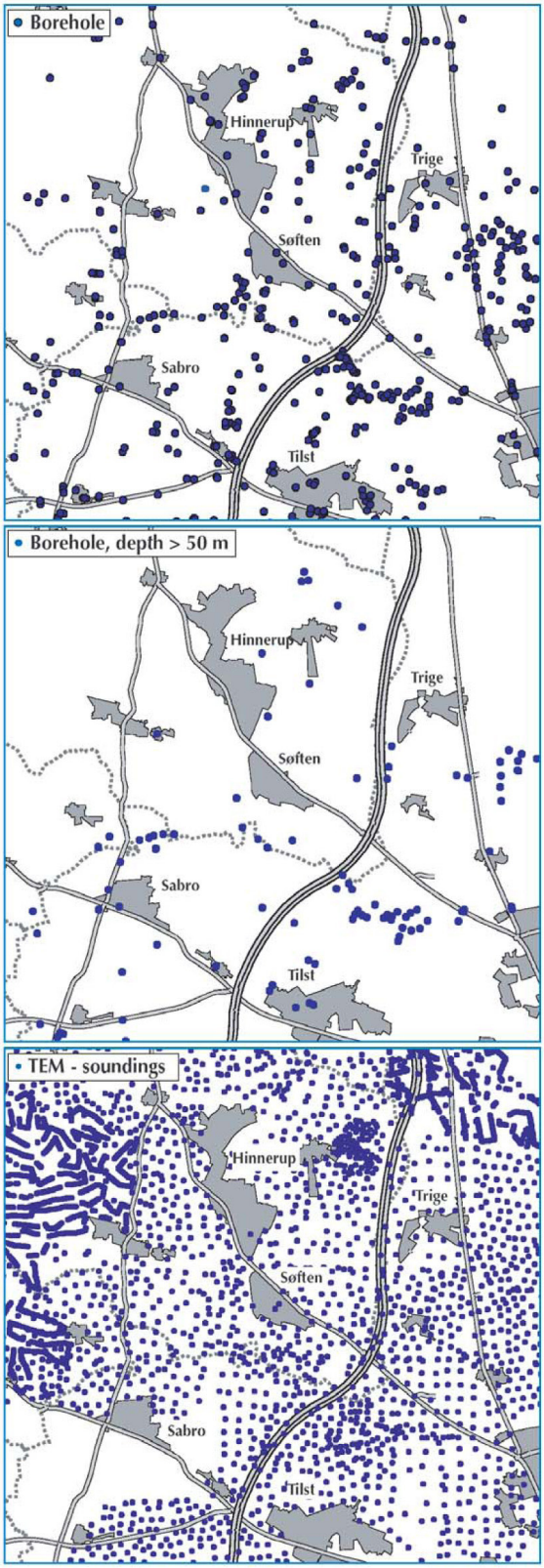
Figur 7. Typiske modstande for danske sedimenter.

3.3. Fladedækkende data

Baggrunden for at benytte geofysiske metoder i den geologiske kortlægning i almindelighed og kortlægningen af lertykkelser i særdeleshed er, at der de fleste steder i Danmark er for få boringer jævnfør Figur 8.

Der vil normalt heller ikke kunne udføres tilstrækkeligt med nye undersøgelsesboringer til at disse sammen med eksisterende boringer vil kunne give en tilstrækkelig og ensartet datadækning, så man alene herudfra kan beskrive geologien med en detaljeringsgrad, der modsvarer den aktuelle heterogenitet i et område.

Geofysik giver først og fremmest strukturelt overblik og binder informationer fra spredte boringer sammen. Den optimale udnyttelse af geofysik forudsætter, at der findes pålidelige, lithologiske beskrivelser fra et antal rimeligt fordelte boringer, for



at transformationen fra geofysiske parametre til meningsfulde geologiske informationer skal kunne foretages med et tilfredsstillende resultat.

Fladedækkende geofysiske målinger giver mulighed for i SSV-modulet at beregne lertykkelser i de dybdeniveauer, som ens geofysiske data og boringer giver grundlag for. Jo mere spredt de geofysiske datapunkter ligger, og jo færre boringer der er til rådighed, jo tyndere bliver det datagrundlag, som lertykkelseskortet i sidste ende hviler på. I princippet er der to yderpunkter, når man diskuterer datagrundlag og lertykkelsesberegninger.

Det ene yderpunkt er, at der næsten ingen geofysiske data er i et område, så bliver resultatet tæt på hvad man ville få udelukkende ved gridning af lertykkelser fra de eksisterende boringer. Man ender altså stort set med et boringsbaseret lertykkelseskort.

Den anden yderlighed er, at der findes en tæt datadækning med geofysik og næsten ingen boringer. Her vil resultatet nærme sig dét, man ville få ved benyttelse af en simpel omregning fra elektrisk modstand til ler eller ikke-ler (eksempel: ved modstande under 50 Ωm omregnes lag til ler og ved modstande over 70 Ωm omregnes lag til ikke-ler, medens lag med mellemliggende modstande omregnes med et gradvist aftagende bidrag til den samlede lertykkelse). I denne situation ender man med et næsten rent geofysikbaseret lertykkelseskort.

Det ideelle er situationen, hvor man har en tæt geofysisk datadækning og et fornuftigt net af boringer med pålidelig information. På den baggrund har man mulighed for at fremstille et lertykkelseskort med en stor datatæthed, hvor transformationen af de geofysisk beregnede modstande i hvert geofysisk målepunkt transformeres til samlet lertykkelse med den bedst mulige udnyttelse af boringsinfor-

Figur 8. Her er vist 3 kort fra samme område. På det øverste kort ses samtlige boringer i området, der viser relativ god boringsdækning. På det midterste kort ses, at kun en mindre del af alle boringer er dybere end 50m, og tillige meget ujævnt fordelt (kildepladser etc.). På det nederste kort ses dækningen med TEM-sonderinger i samme område.

mationen, og hvor beregningen af lertykkelser i boringspunkterne udgør et væsentligt grundlag for vurderingen af kvaliteten af det resulterende lertykkelseskort.

3.4. Hvilke elektriske modstande kan ler have?

Man skal forholde sig til lerlags mulige modstande i et område både når man skal give inputværdier til opstarten af SSV-beregningen, og når man skal vurdere resultaterne af en SSV-beregning. Virker resultaterne rimelige, og er de beregnede elektriske modstande, som definerer grænserne for, hvornår et geofysisk modellag medregnes helt eller delvist som ler forventelige?

Den iterative beregningsproces vil normalt føre til, at inputværdierne ændres til at være nogle, som giver en fordeling af lertykkelser i området, der bedst tilpasser de lertykkelser, som er beskrevet i områdets boringer. Imidlertid er det mest hensigtsmæssigt at inputværdierne ikke er helt skæve, da der kan være områder, hvor boringsinformationen er svag, og derfor ikke vil medvirke særligt stærkt til at justere på de valgte inputparametre for øvre og nedre grænse for lers elektriske modstand.

Derudover er det vigtigt at vurdere resultaterne af SSV-beregningerne nøje for at se, om der i dele af et område måske er beregnet meget usædvanlige afskæringsmodstande for ler, enten meget høje værdier eller meget lave værdier. Dette kan være udtryk for, at nogle af de beskrevne lerlag fra boringerne er for usikre eller direkte misvisende. Det kan også være udtryk for, at der er for langt mellem de beskrevne boringer til at de kan medvirke til på fornuftig vis at transformere de mange variationer i et geofysisk datasæt til stærkt varierende lerlagstykkelser i et heterogent område. Med andre ord kan enten usædvanlige afskæringsmodstande for lerlag eller dårlig overensstemmelse mellem de beregnede lerlagstykkelser og lertykkelser observeret i boringer også være udtryk for stærk heterogenitet i et område, hvilket i sig selv er et væsentligt resultat for en vurdering af f.eks. sårbarheden.

Informationer fra logs kan være med til at give bedre bud på størrelsesorden og variationer i den elektriske modstand for lerlag et område, hvilket er af stor værdi i forbindelse med udarbejdelse af lertykkelseskort baseret på en kombination af boringsoplysninger og elektriske eller elektromagnetiske målinger.

4. BORINGER

Dette afsnit omhandler bestemmelsen af lerlagstykkelser i boringer i det område, hvori man vil gennemføre beregning af lerlagstykkelser ved hjælp af SSV-modulet.

Afsnittet er en let forkortet udgave af indholdet i en rapport om dette emne udarbejdet i november 2005 i regi af Geofysiksamarbejdet med Flemming Jørgensen dom hovedforfatter: "Strukturel sårbarhedskortlægning – vurdering af lertykkelser i boringer". Dog er der med baggrund af erfaringer indhentet gennem udarbejdelse af lertykkelseskort i perioden mellem 2005 og 2009 foretaget enkelte ændringer i anbefalingerne i ovennævnte rapport. Den væsentligste er, at det anbefales, at der foretages et indledende automatisk udtræk af lerlagstykkelser fra boringsdatabasen Jupiter med baggrund i definerede kriterier for, hvilke lagtyper, der henregnes under ler, og med anvendelse af en standardiseret måde at tilordne usikkerheder på angivelse af lagtykkelser. Det skal dog understreges, at det fortsat stærkt anbefales at foretage en så grundig efterfølgende manuel gennemgang af det automatiske udtræk som muligt, da der er mulighed for varierende fortolkning af mange af boringsdatabasens oplysninger.

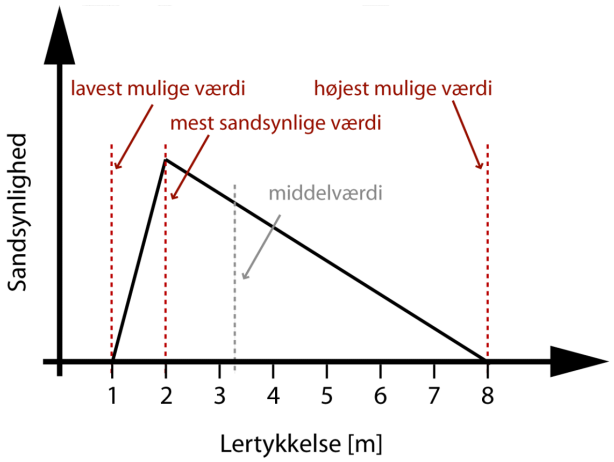
4.1. Lertykkelse vurderet fra boredata

Når den akkumulerede lertykkelse i en boring skal estimeres i forhold til sårbarhed ligger udfordringen principielt i, at bestemme hvor grænsen mellem "sand" og "ler" ligger set ud fra et hydraulisk synspunkt. Grænsen mellem "sand" og "ler" er et vidt begreb, som ikke kan defineres præcist, men det er dog en brugbar parameter, da de fleste brøndborere anvender disse beskrivelser i et eller andet omfang. Samtidig giver begreberne indikationer om den hydrauliske ledningsevnes størrelse. Generelt set vil der være brugbar information at hente fra de fleste borerapporter og prøvebeskrivelser. Der skal blot tillægges reelle usikkerhedsintervaller. Men i nogle tilfælde kan usikkerhederne være af så betydelig karakter, at boringens data må kasseres.

Når man arbejder i større områder med adskillige hundrede boringer er det oftest nødvendigt at effektivisere bestemmelsen af lerlag i boringer gennem et automatisk trin og et manuelt trin. Den grove udsortering kan ofte foretages automatisk ved at udsøge lerlag i boringsoplysningerne i databasen. Efterfølgende er det vigtigt at vurdere udsøgningsresultatet i forhold til oplysningerne i borerapporter og beskrivelser samt eventuelt forekommende logs individuelt. Estimatet på usikkerheder for alle angivelser af lertykkelser bør også vurderes omhyggeligt, da bestemmelsen i den automatiske udsøgning i Aarhus Workbench alene baserer sig på information fundet i Jupiter-databasen.

4.2. Usikkerheder

Lertykkelsesvurderingen bliver subjektiv, fordi en lang række forhold skal tages i betragtning. Forhold som boremetode, brøndborer, boringens alder, antal prøver, geologiske forhold og prøvebeskrivelsesmåde er særligt vigtige at forholde sig til, men også fejlkilder som lokaliseringens præcision eller eventuelt ombyttede borerapporter skal tages med i vurderingerne. Subjektiviteten betyder, at der er en vis usikkerhed forbundet med lertykkelsesvurderingen. Beregningskonceptet arbejder med endelige, brugerdefinerede sandsynlighedsfordelinger. Det vil sige, at sandsynlighedsfordelingen ikke behøver være symmetrisk som f.eks. en gaussfordeling er det. Endvidere skal lertykkelsen ikke opgives som middelværdien i usikkerhedsintervallet, men derimod som den mest sandsynlige værdi.



Figur 9. Sandsynlighedsfordeling for en lertykkelse med illustration af de forskellige termer.

Den mest sandsynlige værdi for dette eksempel er 2 meter ler, og det vurderes at værdierne ligger inden for intervallet 1-8 meter. Usikkerhedsintervallerne for den vurderede lertykkelse må naturligvis ikke være større end intervallerne for lertykkelsen totalt (f.eks. 0-20 m). Da det er den mest sandsynlige værdi, og ikke middelværdien der anvendes, kan man godt i det ekstreme tilfælde forestille sig, at man angiver den mest sandsynlige værdi til 0,1 m ler og intervallet til f.eks. 0-5 meter. Det er naturligvis i praksis meget vanskeligt at bestemme lertykkelser med tilhørende usikkerheder. Ved vurderingerne må man give sit bedste bud ud fra en samlet betragtning af ovennævnte usikkerhedsforhold. En stor usikkerhed, f.eks. forbundet med få og dårligt beskrevne prøver fra en direkte skylleboring, giver naturligvis et stort usikkerhedsinterval, hvorimod en snegleboring med velbeskrevne prøver for hvert gennemboret lag kun vil give et lille usikkerhedsinterval. Samtidig skal det dog også understreges, at usikkerhedsintervallerne ikke må bruges til at gå let hen over den geologiske vurdering. Det giver f.eks. ikke meget mening at beskrive en boring som indeholdende 5 meter ler med et interval på 0-20 m, fordi man er usikker på hvad brøndboreren har skrevet i rapporten. Har man kun meget lidt information er det måske bedre helt at udelade boringen. Det er vigtigt, at der bliver taget stilling, da det er kvaliteten af de beskrevne lertykkelser i boringer der danner grundlaget for SSV sammen med geofysikken. De vurderede usikkerheder indregnes i beregningsmodulet, således at den estimerede lertykkelse vægter højest, og fordelingsfunktionen bestemmer vægtningsforløbet til hver side.

4.3. Grænsen mellem ler og sand

"Ler" og "sand" er alment anvendte begreber. De benyttes af både brøndborere og geologer i beskrivelsen af jordprøvers kornstørrelseskarakteristika. Den hydrauliske ledningsevne er mange gange større for sand end den er for ler, så derfor kan man overordnet set betragte ler som impermeabelt sammenlignet med sand. I virkelighedens verden er "sand" dog ikke blot sand og "ler" ikke blot ler. Der er en gradvis overgang mellem sand og ler, hvori også siltfraktionen indgår, men siltbetegnelsen benyttes ikke i samme omfang som "sand" og "ler" i beskrivelserne. I praksis vil en finkornet jordprøve med en sammenhængende plastisk konsistens blive beskrevet som "ler". Vandindholdet i prøven spiller en meget væsentlig rolle for bedømmelsen af prøver der befinder sig i området omkring silt-ler-grænsen. Mere eller mindre usammenhængende prøver vil generelt blive beskrevet som "sand" eller evt. "silt". Lerindholdet i en prøve defineret som værende "ler" er højere end 10-15 %. Typisk dansk moræneler har et lerindhold på 12-25 %, mens morænesand har lerindhold på under 12 %. Smeltevandsler har normalt relativt højt lerindhold, mens fedt paleogent ler kan have meget høje lerindhold, der når over 50-80 %. En joker i jordprøvebeskrivelserne er som nævnt siltindholdet. Prøver af silt kan sommetider give jordprøver en "leragtig" karakter og foranledige fejlvurderinger. Dette gælder f.eks. for tertiært glimmersilt og for visse smeltevandssedimenter.

Det forudsættes, at det der i jordprøvebeskivelserne beskrives som "sand" er hydraulisk ledende og dermed sårbart, mens det der er "ler" er impermeabelt og dermed beskyttende. "Sand" omfatter derfor også f.eks. kalk, grus og sten.

4.4. Borerapporter og prøvebeskrivelser

Under borearbejdet registrerer brøndborerne i en borerapport den gennemborede lagserie. Borerapporten indeholder normalt jordprøvebeskrivelser og ofte også andre mere indirekte observationer, der opleves under selve borearbejdet. Dette kunne f.eks. være laggrænser, kornstørrelsesvariationer i gennemborede, manglende prøver m.m. Brøndborernes rapporter er vigtige da de indeholder observationer iagttaget i felten og som ofte ikke kommer videre over i PCJupiter. Borerapporter kan findes i amternes og GEUS' borearkiver og er ikke en del af boredatabasen PCJupiter. I princippet skal brøndboreren udtage prøver til geologbeskrivelse på GEUS for hver 5. meter eller hver gang et lag gennembores.

Langt de fleste boringer er gamle, og denne praksis har ikke altid været anvendt. På en stor del af boringerne er der enten ikke indsendt boreprøver til GEUS, eller også er der kun indsendt meget få prøver pr. boring. I tilfælde med kun få indsendte prøver er GEUS' beskrivelser kun af begrænset værdi, da det ikke vides med sikkerhed, om prøverne er re-

præsentative for den gennemborede lagfølge. Bl.a. derfor er det altid nødvendigt at vurdere sine lertykkelsesværdier ud fra både borerapport og GEUS' geologbeskrivelser.

4.5. Andre faktorer

Ovenfor er der primært taget stilling til de usikkerhedsmomenter, der direkte vedrører prøveudtagning og prøvebeskrivelser. Det er naturligvis helt grundlæggende også at inddrage forhold som f.eks. boremetodens egnethed til at frembringe repræsentative prøver, boringens alder, geologiske forhold og brøndborerens omhu, erfaring og ekspertise. Nogle af disse forhold gennemgås kort i det følgende.

Boremetode

Boremetoden er meget vigtig, da forskellige metoder giver meget varierende prøvekvaliteter. Tørboringer giver de bedste prøver, ofte med intakte cuttings af ler og relativt uforstyrrede prøver af sand og grus. Tørboringer omfatter bl.a. snegleboringer og slagboringer og står i modsætning til skylleboringer med anvendelse af boremudder. Skylleboringerne giver generelt dårligere prøver, men det har vist sig, at den såkaldte "omvendte skylleboring" eller "lufthæveboring" kan give tilfredsstillende, repræsentative prøver. De fleste nyere vandforsyningsboringer udføres som lufthæveboringer. Ved "direkte skylleboringer" fås ofte meget dårlige prøver, som kan være svære at tolke "rigtigt" for GEUS. Derfor er det ved disse boringer i særlig grad vigtigt at kigge på brøndborerens optegnelser, da han indirekte har kunnet "mærke" hvad der er blevet gennemboret.

Prøveantal, prøveintervaller og prøvers repræsentation

Ved de fleste boringer er antallet af prøver indsendt til GEUS mindre end antallet af væsentlige geologiske lag. Brøndboreren har typisk foretaget sin egen vurdering af lagfølgen og indsendt et begrænset antal af prøver, der repræsenterer lagfølgen afvejet i forhold til den på boretidspunktet gældende praksis for indsendelse af boreprøver. Ved brøndborerens udvælgelse af prøver går der en del oplysninger tabt; oplysninger som muligvis er registreret i borerapporten. Det er meget vigtigt for tolkningen af lagfølgen at brøndborerens udvælgelse er sket på en måde så sættet af boreprøver repræsenterer lagfølgen ordentligt.

Boringens alder

Boringens alder er vigtig, fordi der op gennem tiden har været anvendt forskellige retningslinjer for hvordan boringer har skullet udføres, og ikke mindst for hvordan håndteringen af prøver og prøvebeskrivelser (inkl. tolkninger) skulle foretages.

Brøndborer

Brøndborere har gennem tiden arbejdet meget lokalt og mange brøndborere går igen når man gennemser et områdes borerapporter. Et generelt kendskab til brøndborerens arbejdskvalitet, kan bidrage til bedre usikkerhedsvurderinger i gennemgangen af boringerne.

Geologiske forhold

De danske geologiske forhold varierer meget fra region til region. I nogle områder er der tydelige forskelle på sandede og lerede aflejringer med en deraf følgende lille usikkerhed i bedømmelserne mellem sand og ler. I andre områder af Danmark, hvor der forekommer forholdsvist meget silt (f.eks. tertiært glimmersilt) er der mindre konsistens i de forskellige brøndboreres og geologers bedømmelser af, hvornår et materiale er sand, silt eller ler. Her er usikkerhederne selvfølgelig særligt store. Andre steder hvor der er store forskelle i opfattelserne af hvad der er sand og hvad der er ler kan være i områder præget af kridt- og kalkbjergarter.

Testboringer, ellogs og borehulslogs

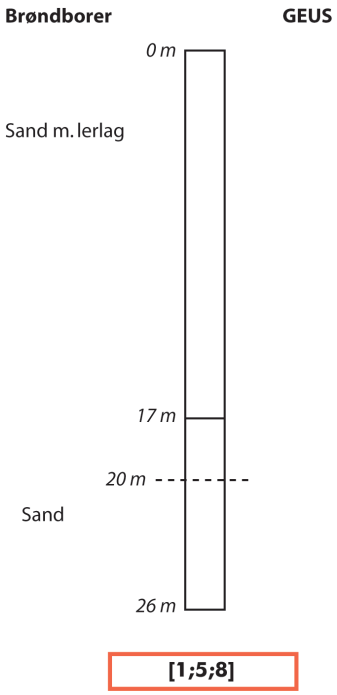
For at teste boreprøvebeskrivelserne fra brøndborerne såvel som fra GEUS, kan det være en god idé at udføre nye boringer. Dette gøres fordi der nogle steder kan være tvivl om, hvilken type af lag forskellige, gennemgående beskrivelser refererer til. Typisk vil man, når et område gennemgås, opdage et eller flere sammenlignelige lag i en del af boringerne, uden at det præcist vides, om der er tale om noget, der i beskyttelsesmæssig forstand kan karakteriseres som værende sand eller ler. For eksempel kunne det dreje sig om et mere eller mindre gennemgående lag, der i brøndborerbeskrivelserne primært fremgår som sandet moræneler, men af GEUS er tolket som morænesand. Et sådant lag vil være relevant at undersøge nærmere med nye boringer. I andre tilfælde kan det overvejes, at gennemføre elektrisk logging i eksisterende borehuller. Data fra

nye boringer eller ellogs, der angiver sammenhænge mellem lithologier og elektriske modstande, kan også benyttes som en del af selve konceptkørslen. Her anvendes modstandsniveauer for grænsen mellem "sand" og "ler" som direkte input, eller som en verifikation af kørselsresultaterne. De kan endvidere benyttes ved en verifikation af de geofysiske data.

4.6. Eksempler

I det følgende gennemgås nogle få eksempler på hvordan lertykkelsesvurderinger kan foretages. Eksemplerne omhandler primært boringer, hvor det kan være vanskeligt, at udføre vurderingerne på grund af få eller dårligt beskrevne prøver. Der er ikke medtaget eksempler på velbeskrevne boringer, hvor vurderingerne er relativt uproblematiske. Der er heller ikke medtaget forhold som boremetode, brøndborer, lokal geologi m.m. Disse forhold skal naturligvis også tages i betragtning i praksis. I alle eksempler er det den akkumulerede lertykkelse inden for de øverste 20 m, der vurderes.

Eksempel 1



Figur 10. Simpel brøndborerbeskrivelse, ingen GEUS beskrivelse. Den røde ramme angiver den vurderede lertykkelse med usikkerhedsintervaller

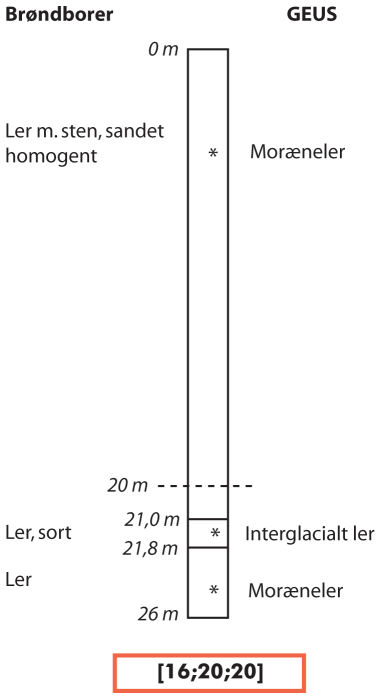
I Figur 10 ses en skitse af en 26 m dyb boring. Der er kun brøndboreroplysninger, og ingen geologiske prøvebeskrivelser fra GEUS. Boringsbeskrivelsen fra brøndboreren er simpel og forenklet. Det kan forventes, at geologien er væsentligt mere kompliceret. I de øverste 17 m er lagserien beskrevet som "sand med lerlag". Lagserien indeholder derfor en vis mængde ler og da lagserien overordnet er beskrevet som sand, må lerindholdet være mindre end sandindholdet. Et bud på lerindholdet indenfor de øverste 17 m kunne derfor være 4 m med et relativt stort usikkerhedsinterval på f.eks. 1-7 m. Fra 17 til 26 m er der observeret sand uden yderligere beskrivelse. Der kan i dette sandlag findes indslag af ler, uden at dette er observeret eller beskrevet. En sandsynlig lertykkelsesvurdering kunne derfor være 1 m med et usikkerhed på 0-1 m i det 3 meter tykke interval ned til 20 m. For de øverste 20 m bliver lertykkelsesvurderingen altså samlet set 5 m med et usikkerhedsinterval på 1-8 m.

Eksempel 2

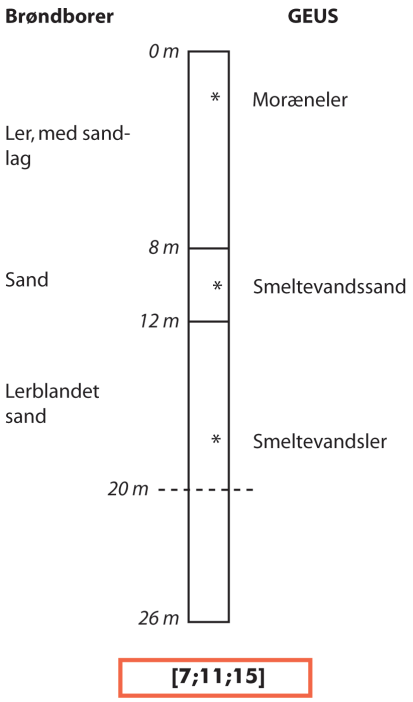
I Figur 11 ses en boring, der er bedre beskrevet af brøndboreren. Dette ses særligt ved, at der internt i lerlaget er beskrevet et andet lerlag mellem 21,0 og 21,8 m. Denne præcise dybdebeskrivelse og skelnen mellem lertyper antyder, at også resten af lagserien er velbeskrevet, og der er dermed mindre risiko for, at der forekommer ubeskrevne sandlag i den øvrige del af boringen. Således kan man her angive lertykkelsen med stor nøjagtighed og lille usikkerhed for hele det vurderede interval. Endvidere beskriver brøndboreren, at de øverste 21 m består af homogent, fast ler. I denne boring vil den mest sandsynlige akkumulerede lertykkelse indenfor de øverste 20 m af lagserien være tæt på 20 m. En vurdering kunne umiddelbart være 20 m med et vist usikkerhedsmoment hidrørende fra beskrivelsen som "sandet". Noget af lagserien kunne være et materiale, der af brøndboreren blev betragtet som værende ler, men som i realiteten skulle have været vurderet som sand. Dette giver en usikkerhed på måske 4 m, således at usikkerhedsintervallet kan angives at være 16-20 m.

Eksempel 3

I boringen i Figur 12 er lertykkelsen i det øverste lag svær at vurdere fordi brøndboreren har skrevet "ler med sandlag". Det samme gælder for det nederste



Figur 11. God brøndborerbeskrivelse med GEUS beskrivelse. Den røde ramme angiver den vurderede lertykkelse med usikkerhedsintervaller



Figur 12. Uklar brøndborerbeskrivelse og uoverensstemmelse med GEUS-beskrivelsen. Den røde ramme angiver den vurderede lertykkelse med usikkerhedsintervaller

lag, som er beskrevet som "lerblandet sand". GEUS' tolkning er vigtig her fordi dette sand angives som ler og ikke sand. Alt i alt er der meget stor usikkerhed på denne boring og en vurdering kunne være 11 m med et usikkerhedsinterval på 7-15 m. Det er rimeligt at tro at over halvdelen af det øverste lag består af ler (måske 5 m), og at det meste af det nederste lag består af ler (måske 6 m).

5. INPUT TIL AARHUS WORKBENCHEN

For at få det optimale udbytte af en SSV-kørsel i Aarhus Workbench er det vigtigt, at brugeren har fuld klar over de forskellige håndtag der er i programmet og hvordan man skruer på dem. De følgende to kapitler vil i detalje gennemgå input- og output-siden til SSV-modulet i Aarhus Workbench. Tanken er, at brugeren med dette i hånden er i stand til bedre at sætte en konkret SSV-kørsel op samt bedre at forstå de visualiserede resultater. Information omkring de enkelte knapper på brugerfladen kan hentes via hjælpen (F1) i programmet.

I det store hele består SSV-modulet i Aarhus Workbench af 3 dele:

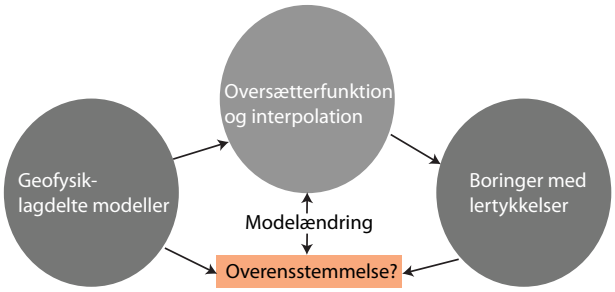
- Beskrivelse af boringer. I forbindelse med denne rapport er der lavet en del optimeringer af arbejdsgangen her.
- Opsætning af SSV-kørsel. Det er her man sætter hele forbindelsen mellem geofysikken og boringsinformationen op. Her er der lavet mindre ændringer, der primært retter sig på overskueligheden for brugeren.
- Visualisering af resultater. I denne del er der også kun lavet mindre ændringer der sigter mod at lette overblikket for brugeren.

Inden de egentlige beskrivelser af input til SSV-modulet følger her en kort oversigt over konceptet.

5.1. Oversigt over SSV-konceptet

SSV-konceptet baserer sig som allerede beskrevet på integration af boringer og geofysik. Overordnet set kan man inddele konceptet i tre dele der er internt forbundne som vist i Figur 13. På den ene side har vi de geofysiske lagdelte modeller, og på den anden side har vi boringsinformationen med de beskrevne lertykkelser. Ideen er herefter:

- Ud fra en given oversætterfunktion eller vægtfunktion kan vi lave den geofysiske lagmodel om til en lertykkelse.
- Ved at interpolere den fundne lertykkelse fra geofysik-punkterne til boringspunkterne har vi et mål for den geofysiske lertykkelse i boringspunkterne.
- I boringspunkterne kan vi nu sammenligne den forudsagte lertykkelse fra geofysikken med den beskrevne lertykkelse i boringerne.
- Ud fra graden af overensstemmelse opdateres oversætterfunktionen ("Modelændring") i et iterativt forløb, således at der for hver iteration fås en bedre overensstemmelse mellem lertykkelsen fra geofysikken og lertykkelsen som beskrevet.



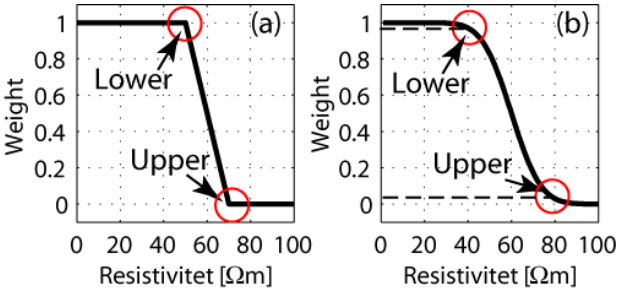
Figur 13. Grafisk fremstilling af SSV-konceptet.

Hvis man tænker på SSV-modulet ud fra en inversionsmæssig tankegang er de beskrevne lertykkelser i boringerne data og funktionen der oversætter geofysikken til lertykkelser er modellen. Vi inverterer for den optimale model ved at bruge de geofysiske modeller i forwardberegningen

Et par begreber skal forklares yderligere her.

Oversætterfunktion - model

Oversætterfunktionen der omdanner de geofysiske lagdelte modeller til lertykkelser er egentlig en vægtfunktion der tildeler den elektriske modestand en vægt afhængig af værdien. I Figur 14 ses to eksempler på oversætterfunktioner. Af beregningsmæssige årsager er det den bløde variant i Figur 14b der anvendes i SSV-modulet. Funktionen er defineret af to værdier. Den øvre (upper) modstandsværdi angiver den højeste elektriske modestand for ler (vægt 0), mens den nedre (lower) angiver den grænse hvorunder alt er ler (vægt 1). Imellem den øvre og den nedre værdi er vægten mellem 0 og 1, og altså en blanding af ler og ikke-ler.



Figur 14. Oversætterfunktionen. I a) ses en funktion som typisk blev anvendt inden SSV-konceptet, hvor værdier under 50 ohmm er ler, over 70 ohmm er det ikke-ler, og funktionen er lineær derimellem. I b) ses den bløde funktion der anvendes i SSV-modulet.

Grid
For at oversætter-funktionen kan variere over undersøgelsesområdet tilskrives de to værdier i funktionen til et grid hvis tæthed kan varieres. I et grid med 8x7 nodepunkter er der altså 8x7x2 (112) modelparametre. Imellem nodepunkterne bestemmes værdierne for oversætterfunktionen ved lineær interpolation fra de fire omkringliggende nodepunkter.

Bånd og a priori
Geofysiske data inverteres ofte med LCI-konceptet, hvor der tilføres bånd imellem nabo-modeller således at den laterale modelvariabilitet svarer til den forventede variation i geologien. Helt tilsvarende er der også i SSV-konceptet indført bånd imellem noderne i griddet, sådan at værdierne ikke varierer urealistisk meget fra node til node.

Udover bånd kan man også tilføre a priori information til noderne hvis man har viden der muliggør dette (viden om niveauet for oversætter-funktionen i området).

SSV trin-for-trin
Følgende er en trin-for-trin oversigt over en SSV-beregning:

- I hvert geofysik-punkt beregnes en lertykkelse baseret på værdierne i den aktuelle oversætterfunktion.
- For de fundne lertykkelser beregnes det eksperimentelle semivariogram hvortil der tilpasses et analytisk semivariogram. Det fundne semivariogram udtrykker hvordan lertykkelserne i geofysikpunkterne afhænger af afstanden.
- Ved hjælp af det fundne semivariogram bruges kriging-metoden til at forudsige lertykkelsen i boringspunkterne. Til denne forudsigelse inddrages kun geofysik-punkter indenfor en angivet søgeradius. I kriging medtages usikkerheden på lertykkelsen bestemt fra geofysikken OG usikkerheden på selve interpolationen.
- De beregnede lertykkelser sammenlignes med de beskrevne værdier for boringen.
- Oversætterfunktionen ændres herefter i en retning så der kan opnås en bedre overensstemmelse mellem geofysikken og boringerne.
- Og så startes der fra toppen igen...

Ovenstående løkke gentages indtil der er en tilfredsstillende overensstemmelse mellem geofysikken og boringerne (eller til den ikke kan blive bedre...).

5.2. Opstart
Inden man starter SSV-modulet skal et par indledende ting være klar:

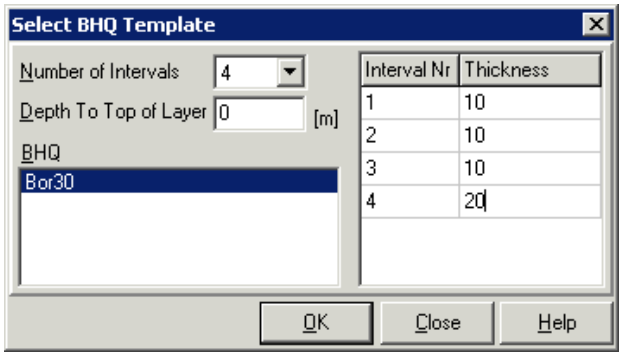
- Et workspace - enten nyt eller eksisterende.
- Adgang til en eller flere GERDA-databaser med geofysiske data med relevante database-udtræk (DBQ'er).
- En Jupiter database med boringer og et udtræk af de boringer der skal indgå i SSV-kørslen.
- Et kort med relevante GIS-temaer indlæst.

5.3. Boringsbeskrivelser (Borehole Editor)
Med denne kogebog er der lavet en meget væsentlig opdatering af boringseditoren. I den hidtidige version var det sådan, at brugeren manuelt skulle indtaste alle lertykkelsesoplysningerne om alle boringerne. I arbejdet med denne kogebog blev det hurtigt besluttet, at der skulle en opdatering til, sådan at man kan få et bud på lertykkelsen ud fra den lithologiske beskrivelse i Jupiter.

For at lave en lertykkelsesbeskrivelse af boringerne skal man først tage stilling til følgende:

- Hvilken boringsdatabase skal der trækkes fra (BHQ-udtræk)?

- Hvor mange og hvor tykke intervaller skal lertykkelsen beskrives for?



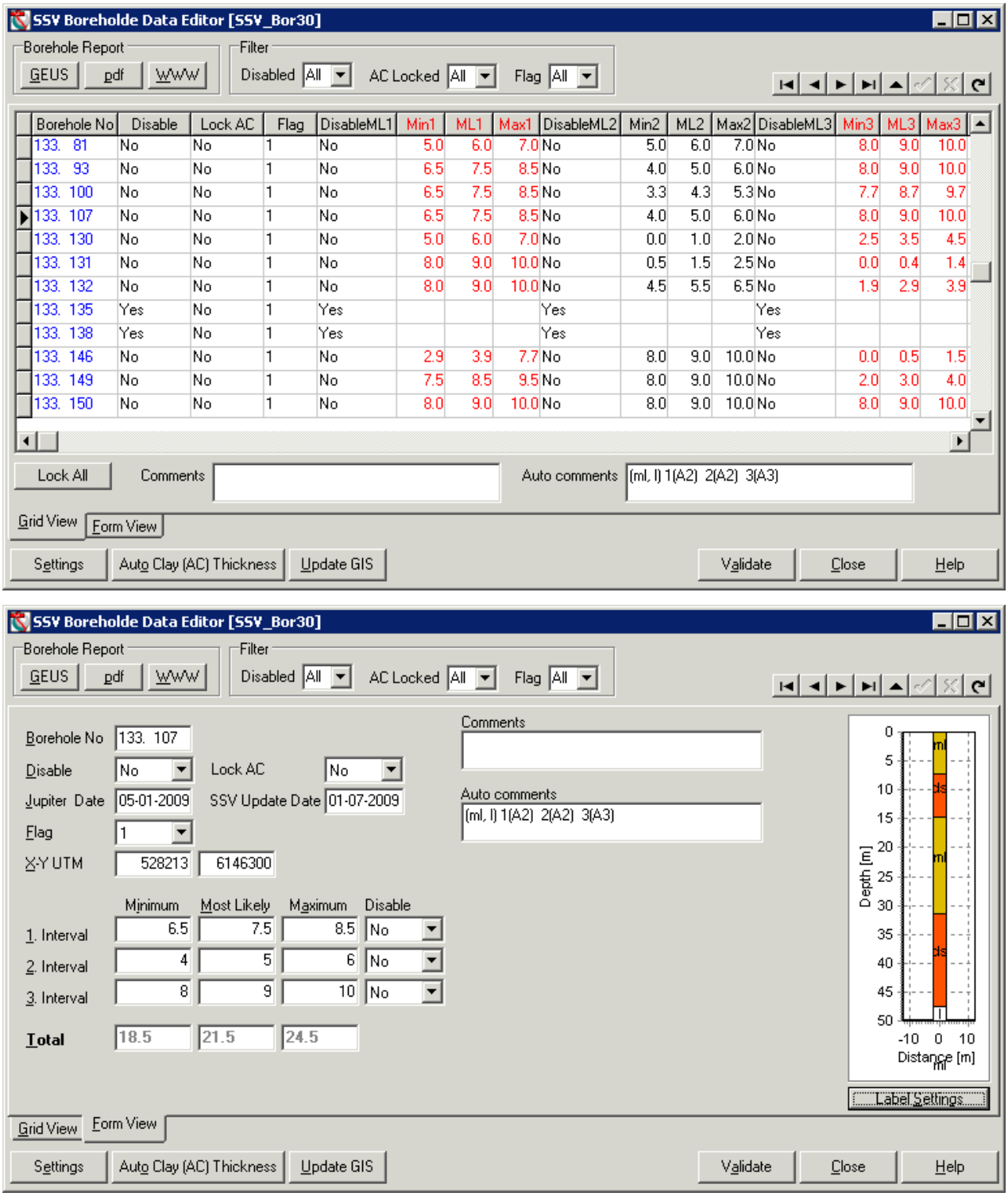
Figur 15 Borehole BHQ selection. På denne form vælges den BHQ (der peger på en Jupiter) der skal anvendes til boringsbeskrivelsen. Desuden vælges antallet og finheden af intervallerne til lertykkelsesbeskrivelsen.

Disse oplysninger indtastes i vinduet vist i Figur 15.

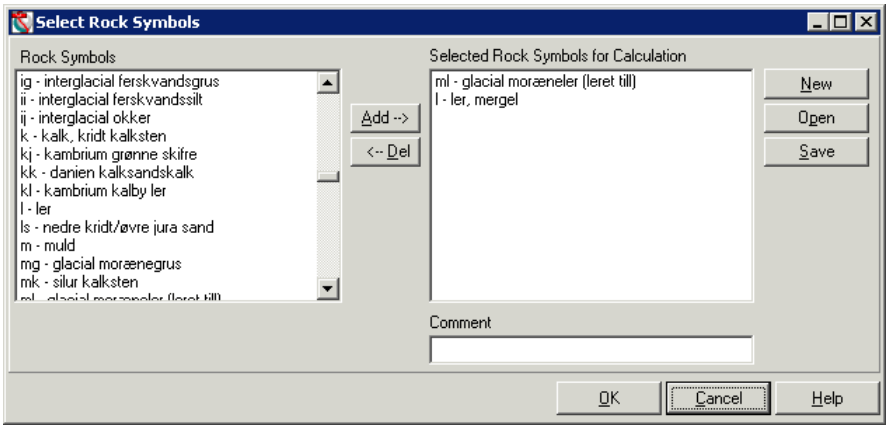
Ud fra det valgte antal intervaller kan man lave forskellige kombinationer af lertykkelsesberegninger. I det viste eksempel i Figur 15 kan man anvende alle intervallerne individuelt eller kontinuerte kombinationer heraf – f.eks. 0-20 m eller 20-50 m. Set ud fra et fleksibilitetssynspunkt er det derfor en fordel at have mange tynde intervaller frem for ét sammenhængende interval. Med flere tynde intervaller kan man f.eks. undersøge om de 20 meter ler der er fundet primært er i de øverste 0-30 m., eller i de nederste 20 m. Der er naturligvis mere arbejde ved at beskrive i mange intervaller end i få.

Erfaringerne fra arbejdsgruppen peger på, at intervaller af 10 meters tykkelse er passende til de fleste formål, men der kan vælges intervaller af forskellig tykkelse.

Automatiske lertykkelsesudtræk
Når man har valgt sine intervaller får man et vinduet op kaldet **Borehole Data Editor** vist i Figur 16.



Figur 16. Borehole Data Editor. Grid View med alle boringer i oversigtsform (øverst) og Form View med den enkelte boring i detalje (nederst). I de viste vinduer er der kørt en automatisk beregning af lertykkelserne.



Figur 17. Opsætning af det automatiske lertykkelsesudtræk.

Herefter skal man tage stilling til hvordan (om) man vil trække et bud på lertykkelsen ud vha. sql-forespørgsler til Jupiter-databasen. Dette gøres under **Auto Clay (AC) Thickness** hvorefter man får et vindue op som vist i Figur 17.

I det viste eksempel trækkes alle lag ud hvori i "ml" og "l" indgår, men alle lithologier kan vælges.

Den vanskeligste del ved det automatiske lertykkelsesudtræk er ikke lertykkelsen selv, men derimod at få et estimat på usikkerheden af lertykkelsen. I den aktuelle udgave af Workbenchen sættes usikkerheden til 10% af intervallets længde til begge sider. En lertykkelse på 5 meter i et interval der er 10 meter langt tilskrives altså et usikkerhedsestimat på 1 meter til begge sider, som det fremgår af Figur 16.

I en senere version af Aarhus Workbench skal dette ændres så der i den automatiske proces tilskrives usikkerhed baseret på bl.a. boringstypen, alderen, positioneringen og antal prøver pr. meter. Boringstyperne inddeles på dette grundlag i 5 kvalitetskategorier som derefter tildeles stigende usikkerhed efter faldende kvalitet.

Herefter er det naturligvis en god ide at gennemgå de automatiske udtræk af lertykkelser. Til at hjælpe den proces har man Jupiter-informationen samt eventuelt scannede pdf'er af de originale borerapporter. Begge dele er i SSV-modulet linket til DGU-boringsnummeret i Jupiter-databasen. Har man en internetforbindelse kan man desuden tjekke informationerne om boringen direkte på GEUS hjemmeside via **WWW**-knappen på Borehole Editoren. Til hver boring er der desuden knyttet et **Lock AC** og Comments felt der kan bruges i gennemgangen af boringerne. **Lock AC** låser boringsbeskrivelsen så den ikke bliver genberegnet hvis det automatiske lertykkelsesudtræk køres igen. **Disable**-felterne kan bruges til at udelade hele boringer eller enkelte intervaller fra boringer når SSV-kørslen igangsættes.

5.4. Opsætning af SSV-kørsel (Run Job)

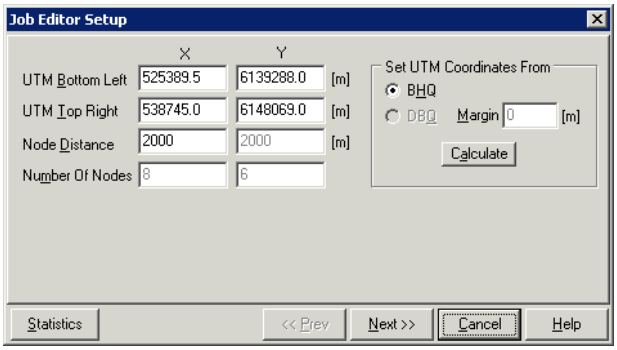
Når boringsbeskrivelsen er gennemgået og accepteret er næste skridt at sætte kørslens forskellige parametre op. Der er fem ting man skal igennem:

- Grid-størrelse
- Start-værdi for oversætter-funktion
- Bånd (constraints) imellem noderne i griddet
- Søgeradius
- Intervaller i lertykkelsesvurderingen

Grid-størrelse

Griddets finhed har betydning for hvor komplekse variationer man kan have i oversætter-funktionen. Jo flere noder i griddet, jo større kompleksitet er mulig. Kompleksiteten i oversætter-funktionen afhænger af geologien - en mere kompleks og lateralt varierende geologi kræver et grid med flere noder. Griddets finhed har dog også indflydelse på regnetiden, og det er generelt set en god ide at holde sig under 1000 noder. Figur 18 viser vinduet hvor man indstiller griddet.

En node-afstand på 1000 m er default, og man kan med fordel teste nodeafstande på 500 m og 2000 m også. Som for inversion af geofysiske data er det primære kriterium, at vi vil have den simplest mulige model der tilpasser data (sml. geofysik: hvis en 4-lagsmodel tilpasser data ligeså godt som en 5-lagsmodel, vælger vi 4-lagsmodellen). Det kriterium man skal kigge på, er derfor primært data-residualet. Hvis data-residualet er næsten ens for 2000 m node afstand og 1000 m node-afstand vælges modellen med 2000 m node-afstand. Evt. testes på 750 m og/eller 1500 m for en mere detaljeret tilpasning.

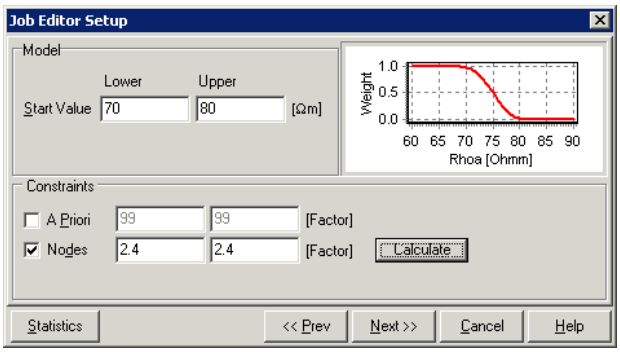


Figur 18. Indstilling af nodeafstand.

Oversætter-funktion

Når griddet er sat op skal man vælge start-værdier til sin oversætter-funktion. Oversætter-funktionen definerer hvordan grænsen mellem ler og ikke-ler som beskrevet i boringerne bedst muligt beskrives i det geofysiske rum (modstandsværdier fra de geofysiske modeller). Oversætter-funktionen er beskrevet med to parametre, en øvre og en nedre værdi, og har et blødt forløb derimellem, som vist i Figur 14 og Figur 19.

Ofte er det ikke parametre man har nogen information om, og i det tilfælde vælges blot default-værdierne. Har man information om omtrentlige værdier for grænsen mellem ler og ikke-ler, enten fra tidligere SSV-kørsel eller fra andre kilder, kan man med fordel indtaste disse tal, da man derved kan spare regnetid og sikre, at inversionen fremkommer med et konsistent resultat.



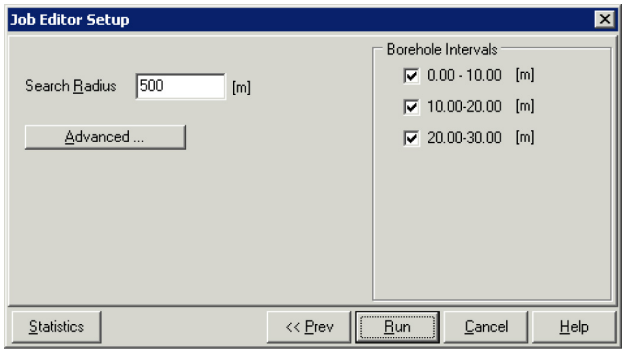
Figur 19. Indstilling af startmodel for oversætterfunktion og bånd imellem noder.

Bånd (constraints) imellem noder

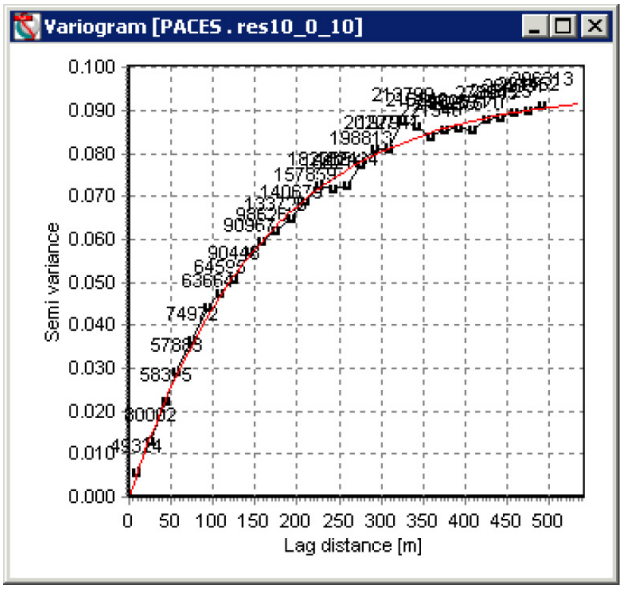
Båndet mellem noderne bestemmer hvor meget modelparametrene for oversætterfunktionen (øvre og nedre) kan variere fra node til node i x-retningen og i y-retningen. Dette er helt sammenligneligt med LCI-tolkningskonceptet. Et lille tal betyder at båndet er stramt og et stort tal at båndet er løst. Tallet beskriver den faktor man ca. vil tillade en modelparameter at variere fra node til node. Se Figur 19 for eksempel på indstilling. Indstillingen af båndet har en stor grad af trial-and-error i sig, og man kommer generelt langt med at bruge de foreslåede værdier.

Søgeradius

Endelig skal man have indstillet sin søgeradius (se Figur 20). Søgeradiussen angiver hvor langt væk fra boringen man vil inkludere geofysikken for at foretage sin sammenligning af tilpasningsgraden. Ideelt set betyder den ikke alverden da der løbende foregår en geostatistisk tilpasning i programmet der vægter geofysikken ned efter afstanden til boringerne. Med andre ord skal søgeradius blot være "stor nok". Set ud fra et geofysisk synspunkt skal søgeradius sættes så den mindst svarer til den største korrelationslængde i de geofysiske modeller, typisk er dette fra 300 m og op. Man kan få en ide om korrelationslængderne i geofysikken ved f.eks. at lave et semivariogram af modstanden af de øverste 10 m fra geofysikken, som vist i Figur 21. Søgeradiussen bør dog aldrig sættes lavere end linjeafstanden i geofysikken, da man ellers mister noget af den rumlige information i data.



Figur 20. Indstilling af søgeradius.



Figur 21. Variogram over den elektriske modstand i de øverste 10 meter fra en PACES-kortlægning. I dette tilfælde er korrelationslængden omkring 500 meter hvor kurven flader ud.

Intervaller

Endelig skal man beslutte for hvilke af de intervaller der er beskrevet lertykkelser for man vil lave en SSV-beregning (se Figur 20). Det kan som nævnt tidligere være en fordel både at lave SSV-kørslen for hele det dækkede interval og kørsler for sub-intervaller. Denne opdeling kan give mere detaljeret information om hvor i lagpakken leret befinder sig. Laver man sådanne kørsler i sub-intervaller bør man anvende samme opsætning for alle intervaller såvel som for det samlede interval.

Forslag til arbejds-flow

Tabel 1 er tænkt som et redskab til at sætte en SSV-kørsel over, tjekke relevante kvalitetsparametre samt optimere opsætningen.

Cellestørrelse	Bånd	Søgeradius	Startmodel	Datares.	Modelpar
2000	Default	700	Default	1.20	✓
1000	Default	700	Default	0.80	✓
500	Default	700	Default	0.75	(✓)
1000	Strammere	700	Default	1.10	✓
1000	Default	700	Default	0.80	✓
1000	Løsere	700	Default	0.65	×
1000	Default	400	Default	0.78	✓
1000	Default	700	Default	0.80	✓
1000	Default	1000	Default	0.81	✓
1000	Default	700	Lavere	0.82	✓
1000	Default	700	Default	0.80	✓
1000	Default	700	Højere	1.03	×

Tabel 1. Forslag til arbejds-flow med en SSV kørsel. De grå markeringer indikerer hvilken parameter der testes for, og den grønne markering den valgte. De angivne værdier for dataresidual er tænkte til at illustrere eksemplet.

Først testes betydningen af cellestørrelse. I det tænkte eksempel har den store cellestørrelse et stort dataresidual og afvises. Både cellestørrelse på 1000 m og 500 m tilpasser data til samme grad, men cellestørrelsen på 500 m viser tendens til urealistiske modelparametre for oversætterfunktionen. Cellestørrelsen på 1000 m vælges.

Dernæst testes betydningen af båndene imellem noderne i griddet. Strammes båndet op forringes data-residualet betydeligt. Med løsere fås godt nok et bedre dataresidual, men modelparametrene i oversætterfunktionen er urealistiske. Default-værdien vælges.

Herefter testes søgeradius. Alle søgeradier giver sammenlignelige resultater og alle må derfor antages at være "store nok". Er beregningstiden rimelig er der dog ingen grund til at vælge den mindste søgeradius, da det forøger risikoen for fejltolkninger pga. begrænset statistisk sammenhæng fra boringerne til geofysikken.

Afslutningsvis kan man lave et tjek på startmodellens betydning. Dette er naturligvis ikke afgørende hvis man har et tilfredsstillende resultat allerede, men kan udføres hvis man er usikker på resultaterne. I det tænkte tilfælde viser det sig, at startmodellen kun har en betydning hvis man starter den for højt, hvilket giver urealistiske modelparametre for oversætterfunktionen og en dårligere boringstilpasning.

De enkelte skridt i arbejds-flowet kan naturligvis udvides med supplerende værdier/tests afhængig af delresultaterne i den givne undersøgelse. Ofte vil resultaterne give anledning til revision af boringer, hvorefter man er nødt til validere resultatet af ovenstående diagram. Inkludering af nye boringer i undersøgelsesområdet vil ligeledes give anledning til ændret datagrundlag og resultatet skal da verificeres.

6. OUTPUT FRA WORKBENCHEN

Det primære output fra SSV er naturligvis et optimeret lertykkelseskort. Herudover producerer SSV en række temaer, der med stor fordel kan visualiseres og anvendes til kvalitetskontrol af SSV-kørslen og direkte i tolkningen af data. I det følgende gennemgås alle de mulige temaer systematisk med kommentarer til brugen. Dette efterfølges af en anbefaling til et sæt af temaer der med en passende visualisering giver et godt overblik over en SSV-kørsel.

Temaerne falder i tre kategorier afhængigt af tilhørsforholdet:

- **Temaer der relaterer til boringspunkterne:**
- Den beskrevne lertykkelse (observerede data)
- Usikkerheden på den beskrevne lertykkelse i meter
- Lertykkelsen beregnet fra geofysikken (beregnede data)
- Usikkerheden på den beregnede lertykkelse i meter
- Dataresidualet, absolut i antal meter (forskellen mellem observerede og beregnede data)
- Dataresidualet, normeret med usikkerheden (relativt, et residual mindre end 1 indikerer tilpasning bedre end den beskrevne usikkerhed og omvendt hvis residualet er større end 1)

- **Temaer der relaterer sig til geofysik-punkterne:**
- Beregnet lertykkelse
- Usikkerheden på den beregnede lertykkelse i meter

- **Temaer der relaterer sig til node-punkterne for oversætter-funktionen:**
- Nedre værdi for oversætterfunktionen
- Usikkerhed på nedre værdi
- Øvre værdi for oversætterfunktionen
- Usikkerhed på øvre værdi

6.1. Komplet beskrivelse

Det følgende er en komplet beskrivelse af alle tilgængelige temaer fra en SSV-kørsel i Aarhus Workbench.

Temaer i boringspunkterne

Alle temaer i boringspunkterne visualiseres nemmest med punkttemaer, evt. med tekst-labels der angiver værdien. For at vise flere temaer på én gang kan de forskellige værdier vises ved at anvende forskellige størrelser på punkterne.

Den beskrevne lertykkelse er helt simpelt de lertykkelser der kommer fra boringsbeskrivelsen for det interval SSV-kørslen er lavet på. Usikkerheden på den beskrevne lertykkelse angives som halvdelen af usikkerhedsintervallet. Er lertykkelsen angivet til 9 meter med et usikkerhedsinterval på 5-10 m vil usikkerheden blive angivet til 2,5 m.

Lertykkelsen i boringspunkterne beregnet ud fra geofysikken fremkommer automatisk i en SSV-kørsel ved interpolation (kriging) fra lertykkelsen beregnet i geofysikpunkterne. Den medfølgende usikkerhed er en kombination af usikkerheden på geofysikkens parametre selv, usikkerheden på oversætterfunktionens parametre samt usikkerheden der ligger i interpolationen. Dvs., at jo længere væk en boring er fra geofysikken, jo større usikkerhed vil der være på lertykkelsen beregnet fra geofysikken.

Endelig er der to temaer der angiver tilpasningsgraden mellem den beskrevne lertykkelse og den beregnede lertykkelse. Det ene tal angiver blot forskellen i hele meter, det andet tal normerer dette tal med usikkerheden på både den beregnede lertykkelse og den beskrevne lertykkelse, således at en værdi på 1 indikerer, at de to lertykkelser stemmer overens inden for datausikkerheden. Et tal mindre end 1 indikerer en tilpasning bedre end usikkerheden og omvendt for et tal større end 1. Et punkttema over den normerede datatilpasning vil fremhæve boringer, hvor der er særlig uoverensstemmelse imellem geofysikken og boringsbeskrivelsen. Denne information kan anvendes til at udpege områder eller boringer, der kræver yderligere undersøgelser.

Temaer i geofysikpunkterne

Lertykkelsen i geofysikpunkterne er det centrale tema fra en SSV-kørsel. Det er dette tema der giver et overblik over lertykkelsen i SSV-området. Temaet visualiseres nemmest på et regulært grid ved hjælp af funktionen "Grid Theme". Temaet kan evt. samgriddes ("Combined Theme") med lertykkelsen fra boringerne. Sammen med lertykkelsen bør man også fremstille et griddet kort over usikkerheden på lertykkelsen. Temaet angiver usikkerheden i meter.

Med et kort over usikkerheden på den geofysiske lertykkelse, har man mulighed for at vurdere, hvor meget tillid man kan lægge på lertykkelseskortet.

Temaer i nodepunkter for oversætterfunktionen
Temaerne der relaterer sig til oversætterfunktionen i nodepunkterne lader sig lettest visualisere med punkttemaer. For at vise flere temaer på én gang kan de forskellige værdier vises ved at anvende forskellige størrelser på punkterne.

Værdien af oversætter-funktionens øvre og nedre parameter giver tal for overgangen mellem det, geofysikken ser som ler hhv. ikke-ler. Talværdierne skal naturligvis give mening i forhold til forventede værdier for denne grænse.

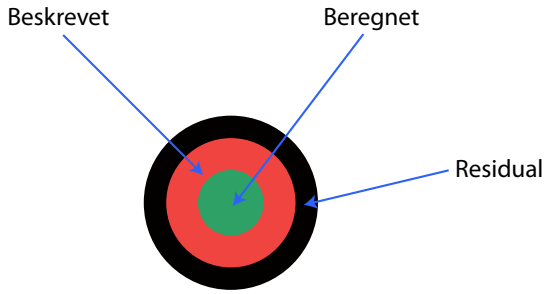
Usikkerhederne for værdierne giver et indblik i hvor godt oversætter-funktionen er bestemt. En godt bestemt oversætter-funktion betyder, at der er stor enighed omkring ler og ikke-ler grænsen imellem boringerne og geofysikken - flyttes værdierne i oversætterfunktion bare lidt vil det betyde store forskelle i tilpasningen. Tilsvarende betyder store usikkerheder, at det er svært at sige noget konkret omkring grænsen mellem ler og ikke-ler, eller med andre ord, at det ikke betyder det store om funktionen har de givne værdier eller blot værdier i nærheden af det angivne.

6.2. Visualisering af temaer

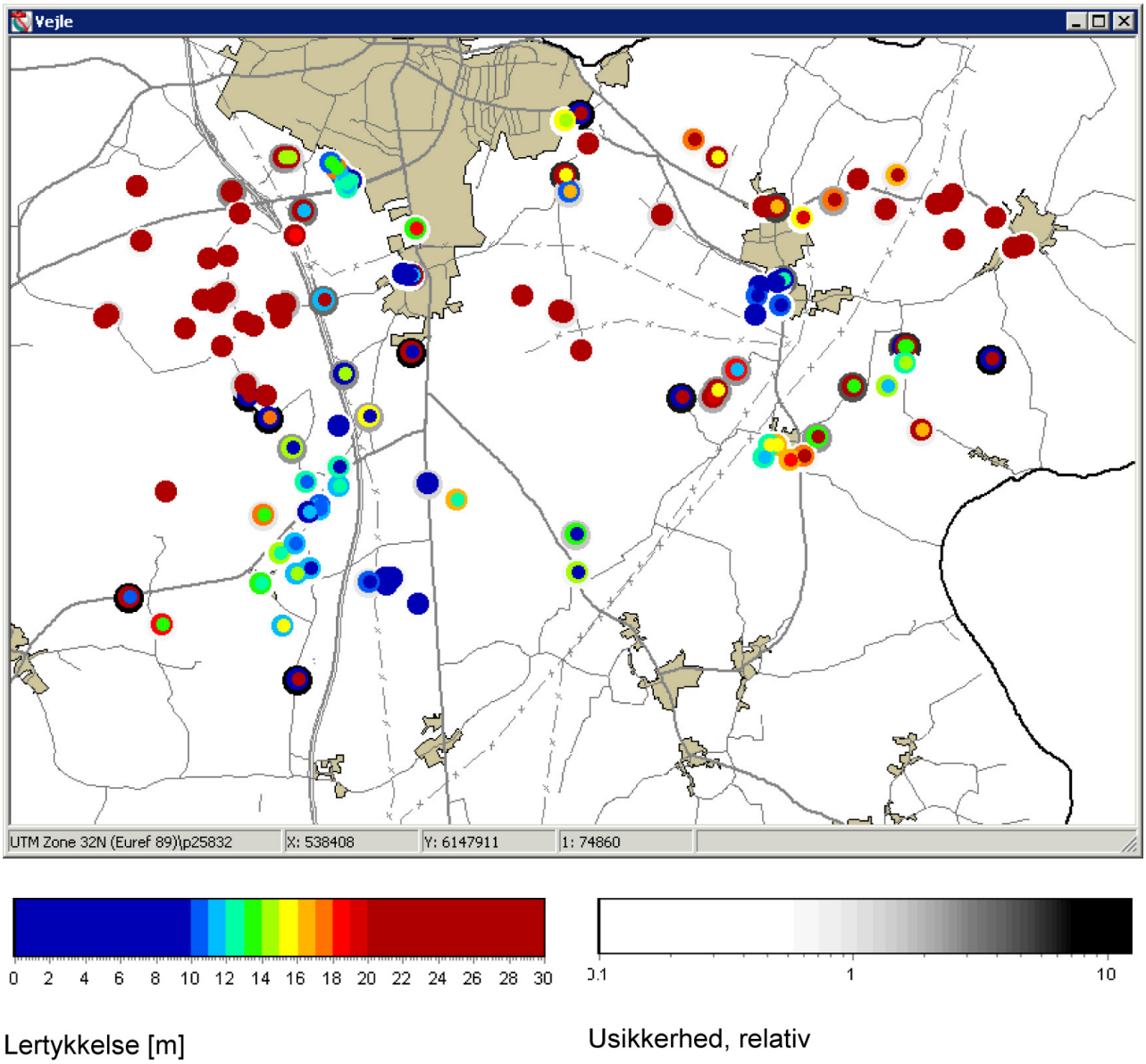
Visualiseringen af temaer er med det opdaterede modul i Aarhus Workbench forsøgt automatiseret. Man kan også vælge at visualisere hvert enkelt tema manuelt, men her vil jeg fokusere på den automatiske procedure. Peter Thomsen, Rambøll, har bidraget indirekte til denne del gennem hans flotte visualiseringer præsenteret på Geofysisksamarbejdets temadag i 2005, som har fungeret som forlæg til den automatiske visualisering præsenteret her.

De viste figurer er alle frembragt vha. den automatiske visualisering der startes når et SSV-job er kørt færdig.

Visualisering af information i boringspunkterne
Ideen her er, at anvende punktemaer med forskellig størrelse på punkterne, så flere ting kan visualiseres på én gang. Med tre ringe i punkterne kan de tre vigtigste temaer for boringspunkterne visualiseres på én gang som vist i Figur 22 og Figur 23.

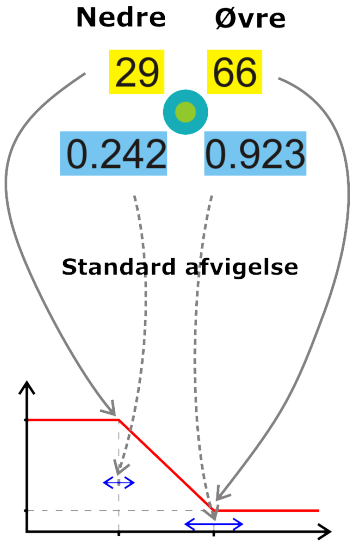


Figur 22. Koncept for visualisering af information i boringspunkterne. Den inderste cirkel er den beregnede værdi, den mellemste cirkel den beskrevne værdi og den yderste cirkel er det usikkerheds-normaliserede residual for forskellen mellem beskrevet og beregnet.

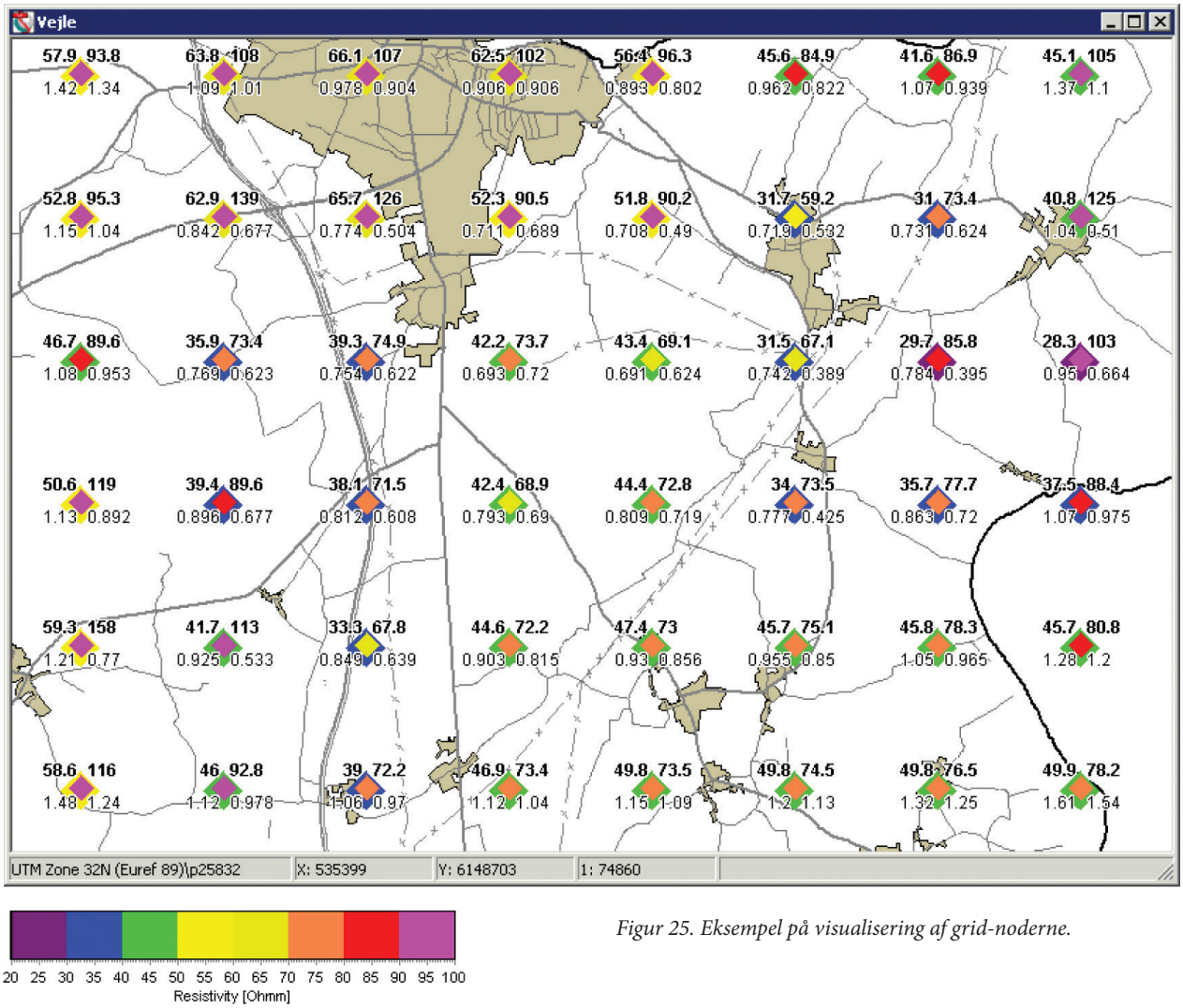


Figur 23. Eksempel på visualisering af boringspunkterne. Bemærk hvor let det er at udpege de få boringer med en grå-sort yderste ring, der indikerer dårlig tilpasning mellem geofysikken og de beskrevne lertykkelser.

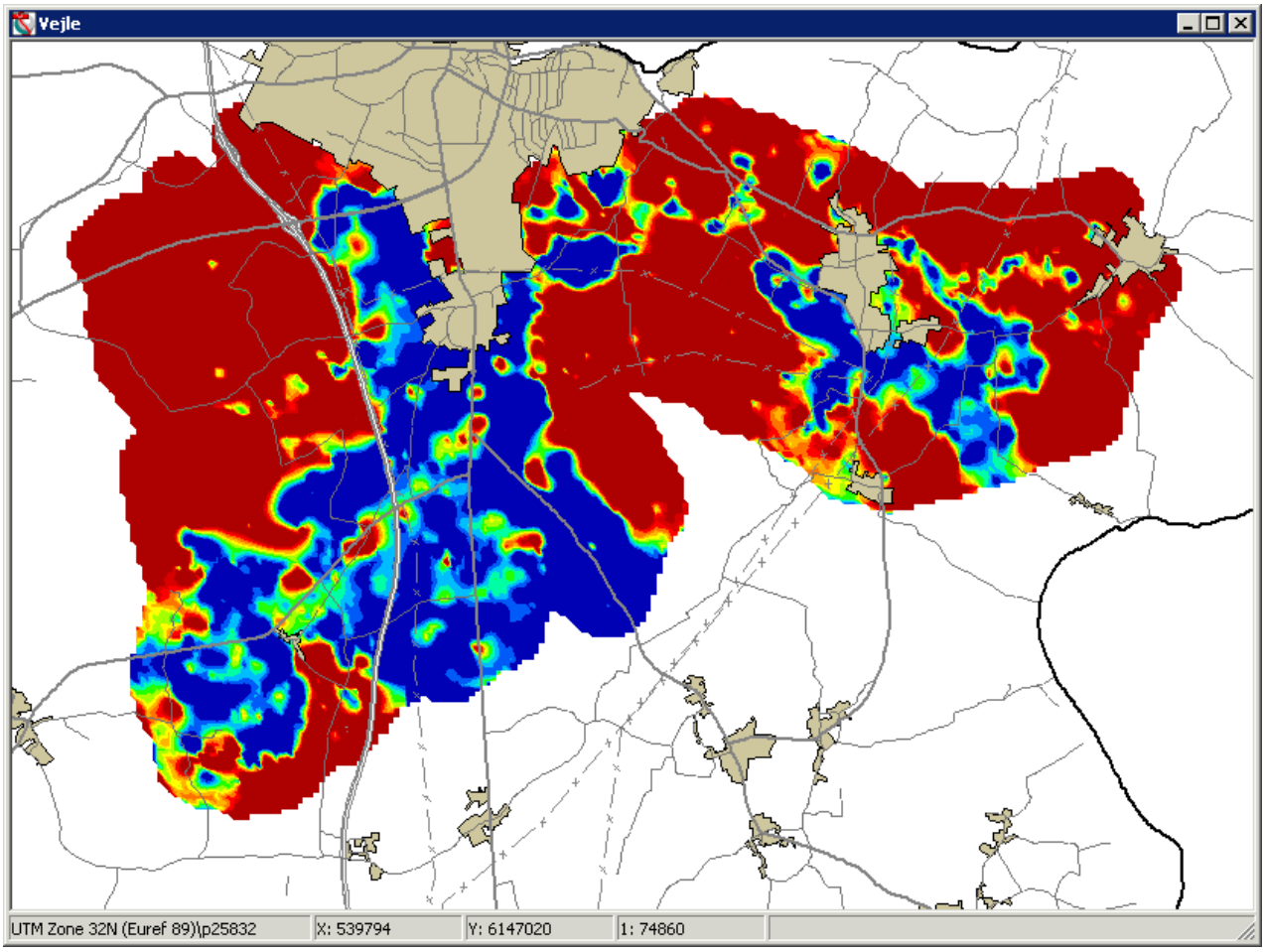
Et eksempel på visualisering af grid-noderne er vist i Figur 24 og Figur 25. Igen udnyttes det, at flere ting kan visualiseres ved at lægge flere temaer oven på hinanden.

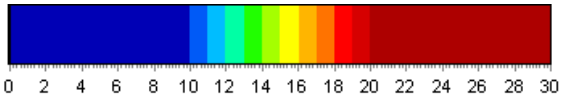


Figur 24. Koncept for visualisering af information i node-punkterne. Den inderste cirkel er den øvre værdi for oversætter-funktionen og den ydre cirkel er den nedre værdi for oversætter-funktionen. De underste blå kasser angiver den relative usikkerhed på de fundne værdier som anskueliggjort på figuren nederst.



Figur 25. Eksempel på visualisering af grid-noderne.





Figur 26. Eksempel på visualisering af lertykkelsen i geofysikpunkterne.

Et eksempel på visualisering i geofysikpunkterne er vist i Figur 26. Her er kortet lavet som en ganske almindelig gridning af værdierne i geofysik-punkterne. Herved opnås en fladedækkende effekt

7. CASE 1 - HADSTEN, MC ÅRHUS

7.1. Baggrund og formål

Som led i indsatsen for at beskytte nuværende og fremtidige drikkevandsressourcer i Områder med Særlig Drikkevandsinteresser (OSD), foretages der en national grundvandskortlægning af grundvandsressourcen. Heri kortlægges nuværende og fremtidige grundvandsmagasiners beliggenhed, udbredelse og mægtighed samt den naturlige beskyttelse overfor nitrat. Efterfølgende udarbejdes en plan for hvilke handlinger, der skal til, for at sikre den nuværende og fremtidige drikkevandsinteresse i specifikke indsatsområder.

Nærværende case omfatter kortlægningsområde "Hadsten", der er et OSD bestående af 5 indsatsområder; Houlbjerg, Skjød, Lyngå, Selling og Hadbjerg. Hadsten kortlægningsområde dækker ca. 188 km^2 /3/

Kortlægning af den naturlige beskyttelse overfor nitratpåvirkning af nutidige og fremtidige grundvandsmagasiner i Hadsten, omfatter udarbejdelse af et nitratsårbarhedskort for de øverste 30 m af jordlagene og indbefatter inddragelse af geofysiske, geologiske, hydrologiske og kemiske data.

I geologiske forhold som kortlagt ved Hadsten, er et vigtigt mellemprodukt mod nitratsårbarhedskortet, et sammentolket lertykkelseskort. Udarbejdelse af det sammentolkede lertykkelseskort for Hadsten indbefatter inddragelse af PACES data, som giver en fladedækkende kortlægning af elektriske modstandsforhold i jordlagene, samt boringer, der giver punktspecifikke lithologiske oplysninger om jordlagene.

7.2. Geologisk baggrund

I det følgende gennemgås kort de geologiske forhold i Hadsten efter Århus Amt, 2006.

Geologien er præget af istidens gletsjere, som har dannet et morænelandskab med en kompleks lagdeling af kvartære sand- og lerlag oven på den tertiære undergrund.

I den største del af kortlægningsområdet ligger meget tykke lag af fedt tertiært ler tæt på jordoverfladen. Flere steder findes der imidlertid nogle meget markante, begravede dalstrukturer, som i løbet af istiderne er blevet skåret ned i den fede ler, og efterfølgende fyldt op med forskellige aflejringer afsat af istidens gletsjere og smeltevandet fra disse gletsjere. De begravede dale har ofte ikke sat sig synlige spor i det nuværende landskab.

Mange steder i de begravede dale finder man lag af smeltevandssand og -grus, som er vandførende, og som derfor udgør et godt grundlag for en indvinding af grundvand til drikkevands¬formål. Mange steder i de begravede dale finder man dog også aflejringer, som ikke giver grundlag for vandindvinding. Det drejer sig helt overvejende om smeltevandsler og -silt samt moræneler og morænesand. Da der således er tale om meget komplekse aflejringer, hvor lerlag hyppigt veksler med sand- og gruslag, kan det selv på baggrund af en grundig kortlægning være vanskeligt at afdække de geologiske forhold helt præcist.

Fra de højtliggende, tertiære lerplateauer, der omgiver de begravede dale, forekommer der mange steder grundvandsdannelse til dybereliggende grundvandsmagasiner i de begravede dale, idet tynde sand- og gruslag på plateauerne sørger for at transportere nedsivende nedbør i retning mod grundvandsmagasinerne i de begravede dale.

7.3. Datagrundlag og indledende analyse

Boringer

SSV beregningen for de øverste 30 m jordlag er foretaget med input fra 428 boringer. Boringer er tilvalgt og fravalgt ud fra oplysninger om boredybde og lithologi efter nedenstående retningslinjer:

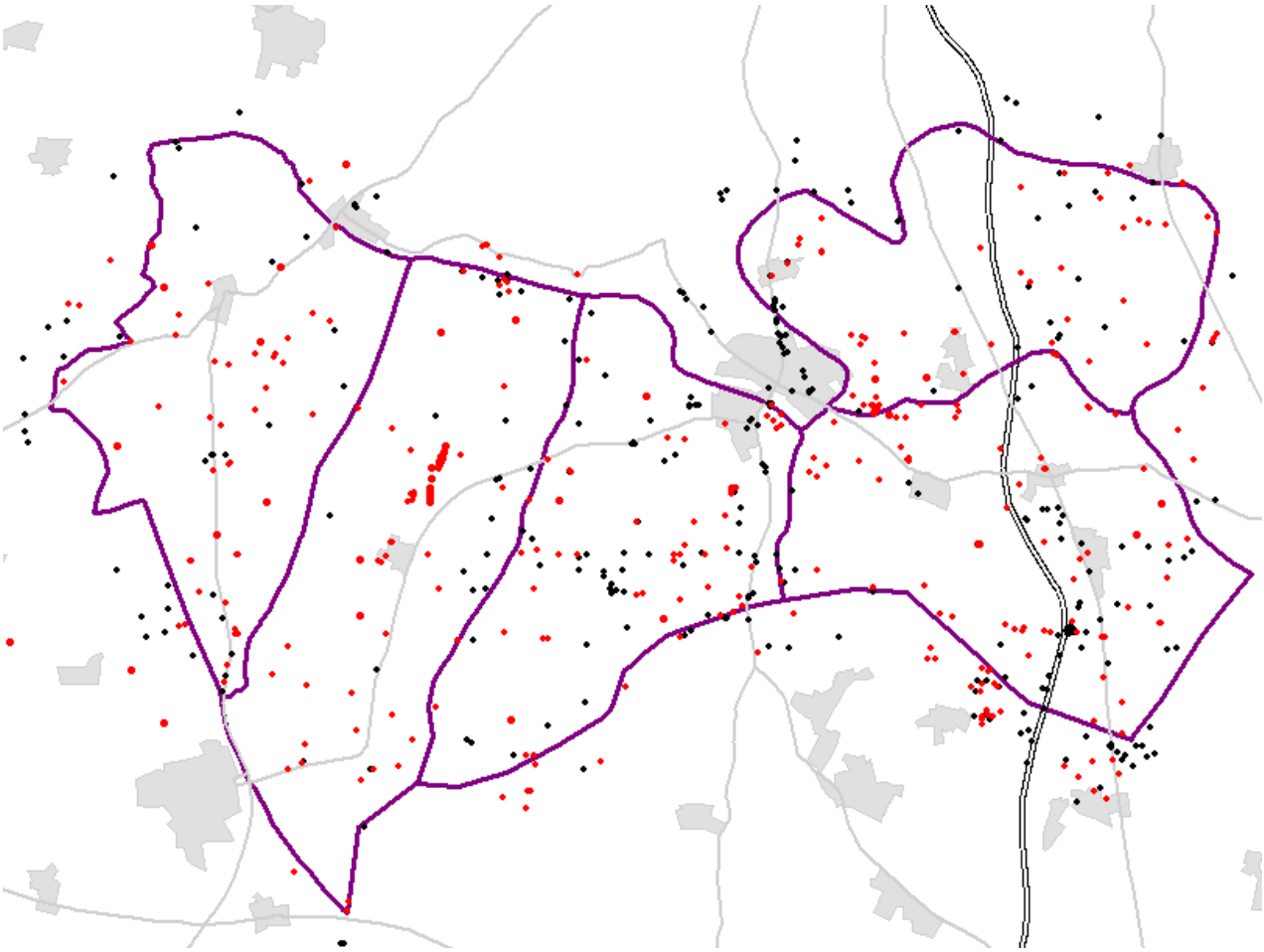
* Hvis der er over 15 m ler i de intervaller hvor der er information skal oplysninger om lermængden medtages. Hvis der derimod er under 15 m skal den diskuteres og vurderes.

Boringer med oplysninger i f.eks. de første 20 m og ikke de sidste 10 m vil automatisk blive fravalgt af SSV-modulet. Hvis boringen skønnes at være vigtig for SSV-beregningerne, blev der fortaget et kvalificeret skøn af lermængden i de sidste meter af boringen.

	Boring A	*Boring B*	*Boring C*	*Boring D*	*Boring E*	*Boring F*
Interval 0-10m	*Lithologi*	*Lithologi*	*Lithologi*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*
Interval 10-20 m	*Lithologi*	*Lithologi*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Lithologi*
Interval 20-30 m	*Lithologi*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Ingen lithologi beskrivelse*	*Lithologi*	*Lithologi*
Aktion	*Boringen perfekt*	*	*Boringen perfekt*	*Boringen perfekt*	*Boringen perfekt*	*

I Figur 27 viser boringstætheden til SSV–beregning i form af røde markeringer. Boringer markeret med sort er fravalgte.

Vurdering af lertykkelser med tilhørende usikkerheder samt indtastning i SSV-editoren er meget tidskrævende, og for at minimere dels arbejdsbyrden og dels risikoen for fejlagtig indtastning, udviklede Århus Amt hjælpeprogrammet 'SSV Access', der både beregner den kumulerede lertykkelse ud fra Århus Amts boredatabase BORIS samt udfylder SSV-boringseditoren automatisk.



Figur 27. Placering af boringer i Hadsten områder. Sorte og røde punkter viser samtlige boringer i Hadsten området mens de røde punkter symboliserer boringer anvendt i SSV beregningerne.

Boringsbeskrivelserne blev efter den automatiske udtrækning, manuelt finjusteret ud fra nedenstående betragtninger:

Boringernes lertykkelser vurderes ud fra:

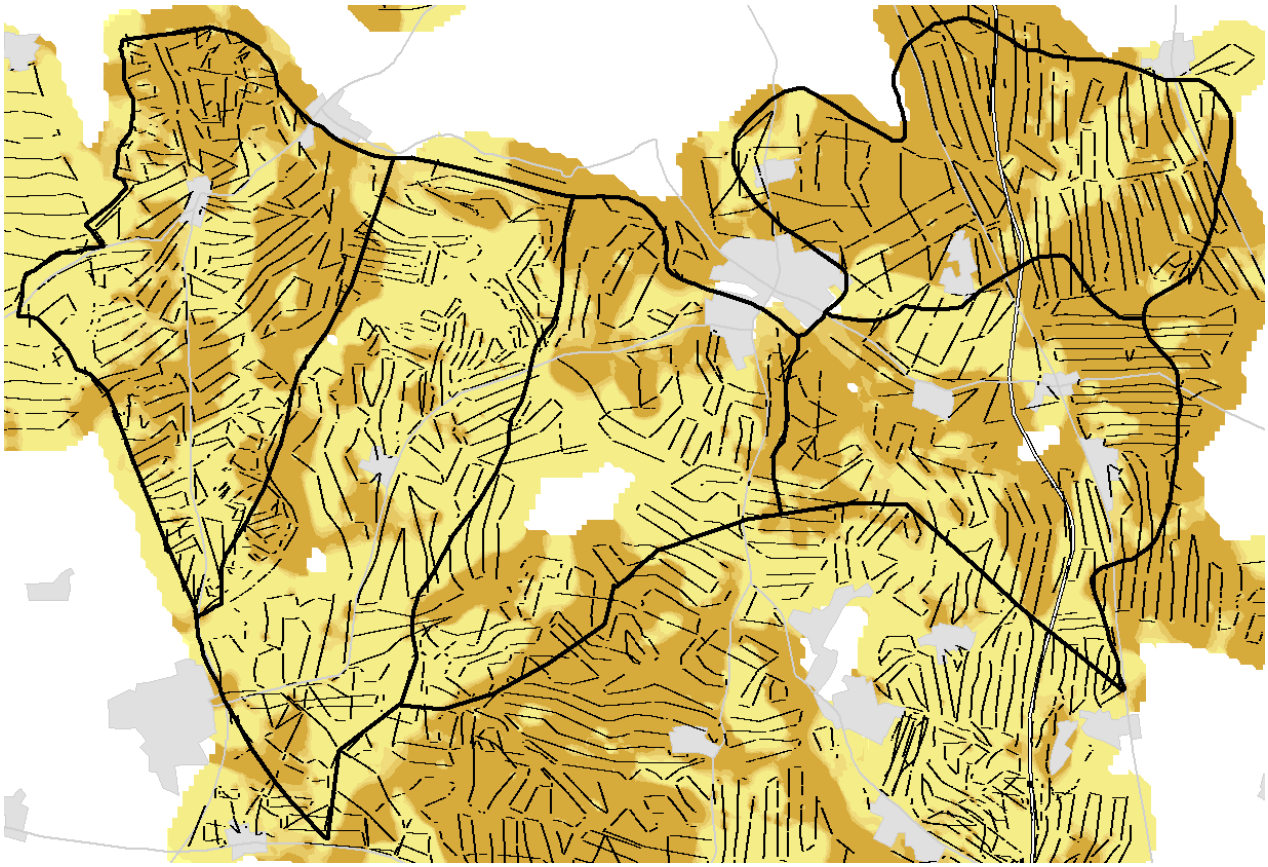
- Jordlagssymboler fra GEUS (ds, ml, dl etc.) eller SESAM
- Er boringen ikke GEUS-beskrevet benyttes jordlagssymbol fra brøndborer (l, s, g etc.)

Fastsættelse af usikkerheden på lermængden på baggrund af:

- Vurdering af mængden af ler i 'blandede' aflejringer (f.eks. moræneler, sandet ler, ler med sandslirer, leret sand etc.).
- Detaljeringsgraden af boringens beskrivelse.
- Brøndborers beskrivelser sammenholdes med en eventuel GEUS/SESAM-beskrivelse og vurdering af eventuelle uoverensstemmelser mellem disse.
- Antallet af ukendte lag.
- Anvendte boremetode.
- Prøveintervaller, prøveantal og prøvetagningsprocedure.
- Anvendte brøndborer.
- Boringens alder.
- Tilstedeværelsen af brønd.

PACES data

Det geofysiske input til SSV består ca. 65.000 PACES-modeller. Med de geofysiske data, i form af tolkede lags modstandsforhold, er der opnået et indledende overblik over fordelingen af de geofysiske lertykkelser og derved givet en indikation på udbredelsen af lerdæklaget i kortlægningsområdet (Figur 28).



Figur 28. Placering af udførte PACES linjer og en indledende geofysisk lerdæklagstykkelse baseret udelukkende på PACES med afskæringsmodstand på 50/70 Ωm.

Til beregning af den indledende geofysiske lerlagstykkelse ud fra lagenes modstandsforhold, anvendtes oversætterfunktionen for hele området med afskæringsværdier på 50 og 70 Ωm. Afskæringsmodstanden er fastsat ud fra en analyse af de geofysiske data, kendskab til områdets geologiske forhold, modstandsforhold af givne aflejringstyper og forventelige erosions-opblandede aflejringer fra omkringliggende geologiske aflejringer.

7.4. Parametertest

Forud for de egentlige SSV-beregninger, blev der gennemført en række parametertests af gridnodeafstand, bånd (constrains) og søgeradius med startmodel 50/70 Ωm:

- Gridnodeafstand: 300, 500 og 700 m
- Bånd: 1.3, 1.5, 1.7 og 1.9
- Søgeradius: 300, 400 og 500 m

For gennemgang af parametrene henvises til afsnit 5.

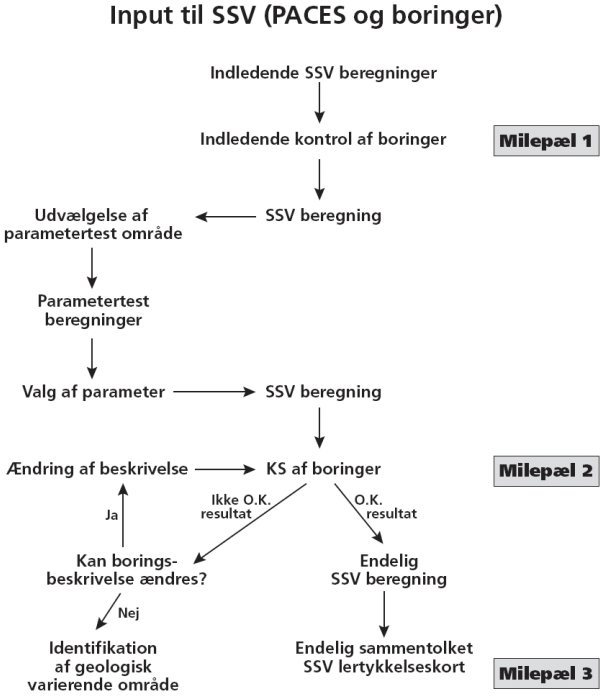
Da SSV-området for Hadsten er stort, kunne parametertestene ikke foretages på det samlede beregningsområde. Et delområde hvor PACES-lertykkelseskortet og lermængden i boringerne stemte nogenlunde overens blev udvalgt som parametertestområde. Herved vil forskellen mellem beregningerne afspejler forskelle i parameterinput og ikke forskel i lermængden.

Det besluttedes at arbejde videre med gridnodeafstand på 500 m, bånd på 1.7 og søgeradius 400 m

7.5. Kvalitetssikring

Gennemførelse af SSV-beregninger foretages i flere tempi med mellemliggende kvalitetskontrol og vurderinger af resultatet (milepæle), som vist i flowdiagrammet i Figur 29.

Kvalitetssikringen fokuserer især på boringerne, da subjektivitet indvirker på vurderingen af lertykkelsen med tilhørende usikkerhed og ikke i de geofysiske data hvis usikkerhed er indarbejdet i modellerne (se afsnit 3). Kvalitetssikringen består i, at kontrollere og foretage en eventuel revurdering af angivelsen af lermægtigheden og usikkerheden på denne.



Figur 29. Flowdiagram over arbejdsprocedure for SSV beregninger.

Kvalitetssikring af beregnede lermægtigheder i boringer er foretaget i 3 delprocesser:

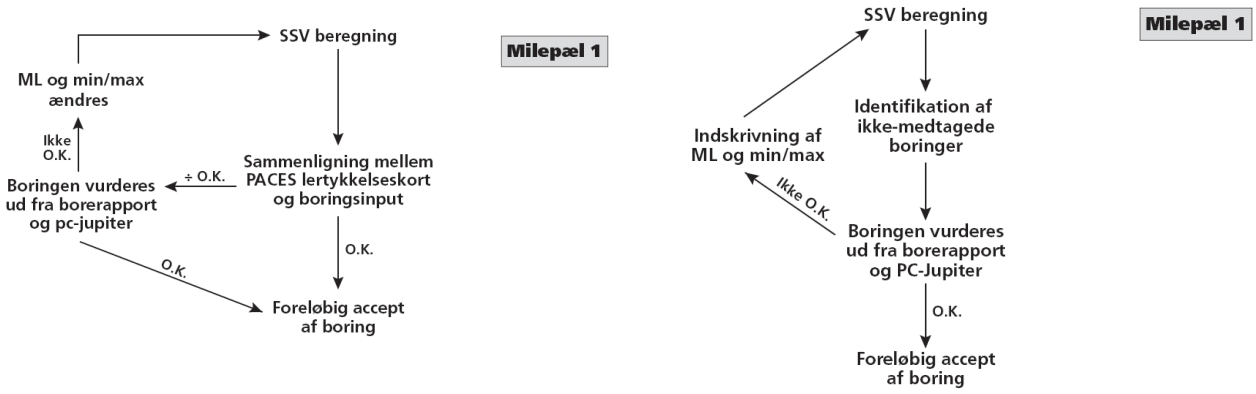
- Indledende kontrol af boringer (Milepæl 1 på Figur 29)
- Kontrol af boringer efter SSV-beregninger (Milepæl 2 på Figur 29)
- Identifikation af områder med stor geologisk variation (Milepæl 3 på Figur 29).

Den indledende kontrol af boringer (Milepæl 1) foretages forud for den første SSV-beregning. Kontrollen omhandler dels identifikation af boringer hvor den forberedende boringsbeskrivelse afviger væsentligt fra lertykkelseskortet udarbejdet udelukkende fra PACES og dels sikring af, at alle boringer, der er relevante for beregningerne medtages (se Figur 30).

En indledende sammenligning mellem PACES-lertykkelseskortet og boringernes input, er en kontrol af den indledende (automatiske) boringsbeskrivelse. Ved store afvigelser mellem input og PACES-

lertykkelseskort, kontrolleres boringen i boringsdatabasen, brøndborerrapporten og der foretages eventuelle justeringer i beskrivelsen.

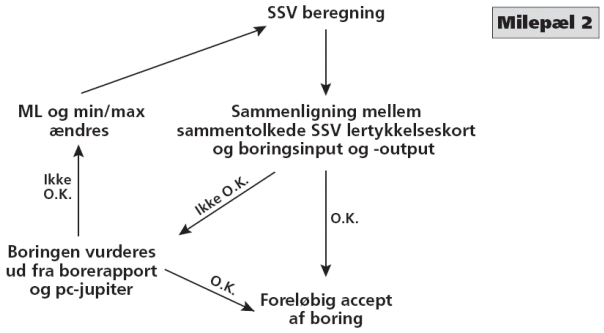
Boringer med beskrivelser til mindre end 30 m medtages per automatik ikke i beregningerne. Indledningsvist analyseres fordelingen af inkluderede og ikke-inkluderede boringer. I områder med lille boringstæthed og med lokalisering af ikke-inkluderede boringer, vurderes det om enkelte ikke-inkluderede boringer kan beskrives til 30 m og derved medtages i beregningerne.



Figur 30. Udsnit af flowdiagram vedr. indledende kvalitetssikring af boringer hidrørende Milepæl 1. Der foretages dels en vurdering af boringens lertykkelse i forhold til et indledende PACES lertykkelseskort, og dels en vurdering af ikke-medtagede boringer.

SSV-beregningen foretages gentagne gange i arbejdsprocessen mod fuldførelse af et samlet SSV-lertykkelseskort. Efter hver beregning kontrolleres boringsinput og output op mod det beregnede lertykkelseskort om tilpasningen af boringsdata til de geofysiske data er acceptabel (jf. Milepæl 2 i Figur 29 – se Figur 31 for udsnit at flowdiagrammet).

Kvalitetssikringen gøres konkret ved, at den beregnede SSV-lertykkelse præsenteres sammen med boringer hvor input og output er angivet med label. Hver boring vurderes, og boringer grupperes i acceptable/uacceptable alt afhængig af om der er overensstemmelse eller uoverensstemmelse med det beregnede lertykkelseskort. De uacceptable boringer analyseres ved inddragelse af viden fra boringsdatabasen og brøndborerapporter, og eventuelle ændringer i borings-beskrivelsen foretages.



Figur 31. Udsnit af flowdiagram over kvalitetskontrol af SSV beregningerne hidrørende Milepæl 2.

7.6. Geologisk heterogenitet - Spørring

Uagtet gentagne revurderinger af boringers lertykkelse og deres usikkerhed med efterfølgende SSV-genberegning, kan det fortsat resultere i uoverensstemmelser mellem det beregnede lertykkelseskort, input og output i boringerne.

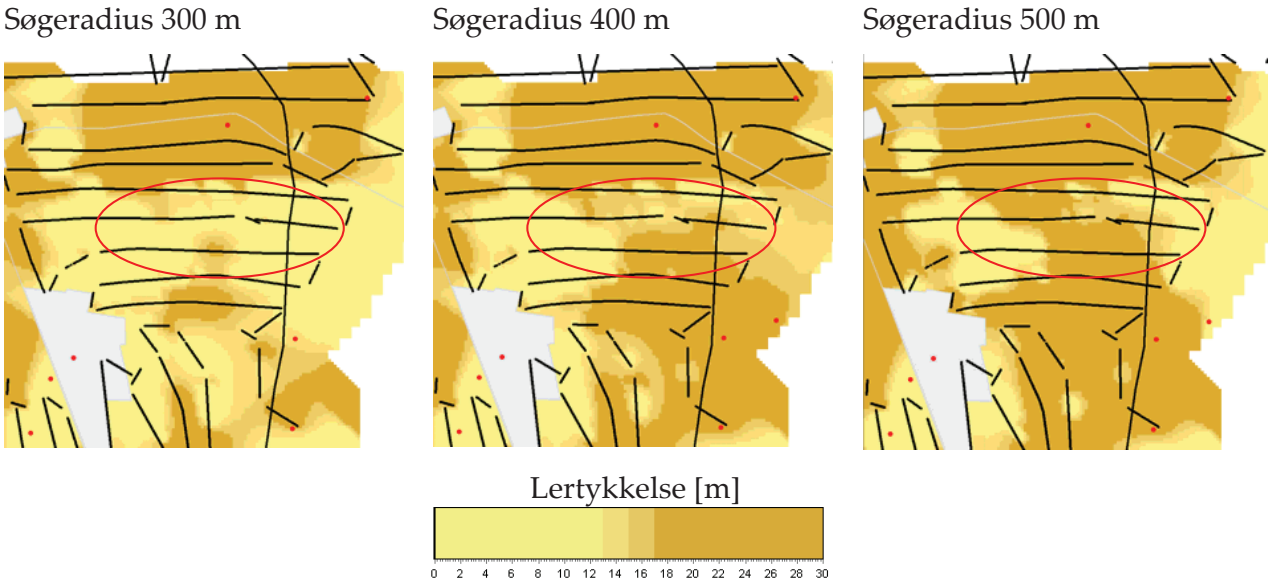
Uoverensstemmelser mellem det beregnede output, PACES og boringsoplysninger for velafgrænsede, specifikke områder er et udtryk for geologisk

heterogenitet. I områder med stærkt varierende geologi inden for få meter, kan SSV ikke beskrive lertykkelsen fuldt ud hvis ikke borings- og datatætheden er meget høj. SSVs force ved denne type geologi, at netop derfor at kunne identificere problemstillingen således at der kan foretages en tilbundsgående analyse med eventuelt supplerende dataindsamling hvis det viser sig nødvendigt.

Et eksempel på denne problemstilling er vist i nedenstående område.

Allerede under gennemførelse af parametertest for søgeradius viste et område nordøst for Spørring at have radikale forskelle i den beregnede lertykkelse alt afhængig af valg af søgeradius. Resultatet er vist i nedenstående Figur 32, hvor mængden af ler stiger med stigende søgeradius.

Indledningsvist blev boringsinput og beregnet output analyseret. De markante ændringer kunne skyldes farveskift på farveskalaen grundet en lertykkelse, der lå tæt på grænsen for farveskift ved 13, 15 og 17 m ler. Hvis boringer er dårlig beskrevet med dertilhørende stor usikkerhed, kan beregningerne medføre forskellige værdier inden for dette spektrum. Dette viste sig ikke, at være tilfældet.

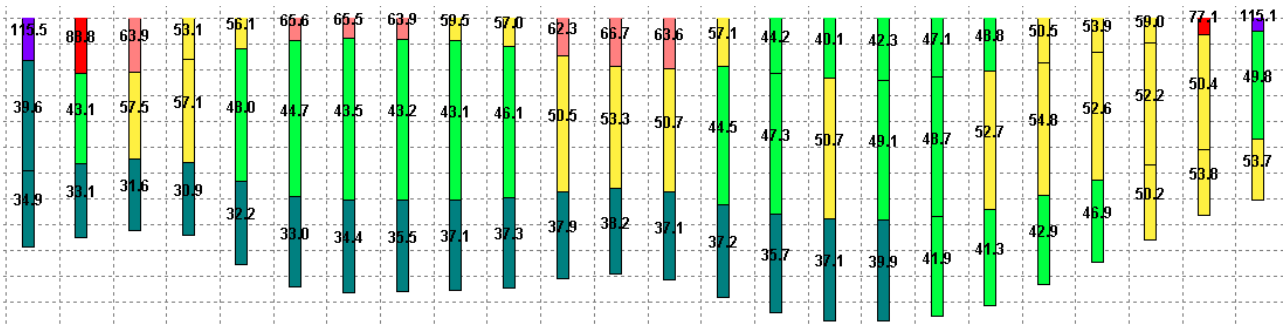


Figur 32. Forskel i resultatet er lertykkelsen alt afhængig af valg af søgeradius. Røde prikker er boringer og mørkegrå linjer er PACES-linjer.

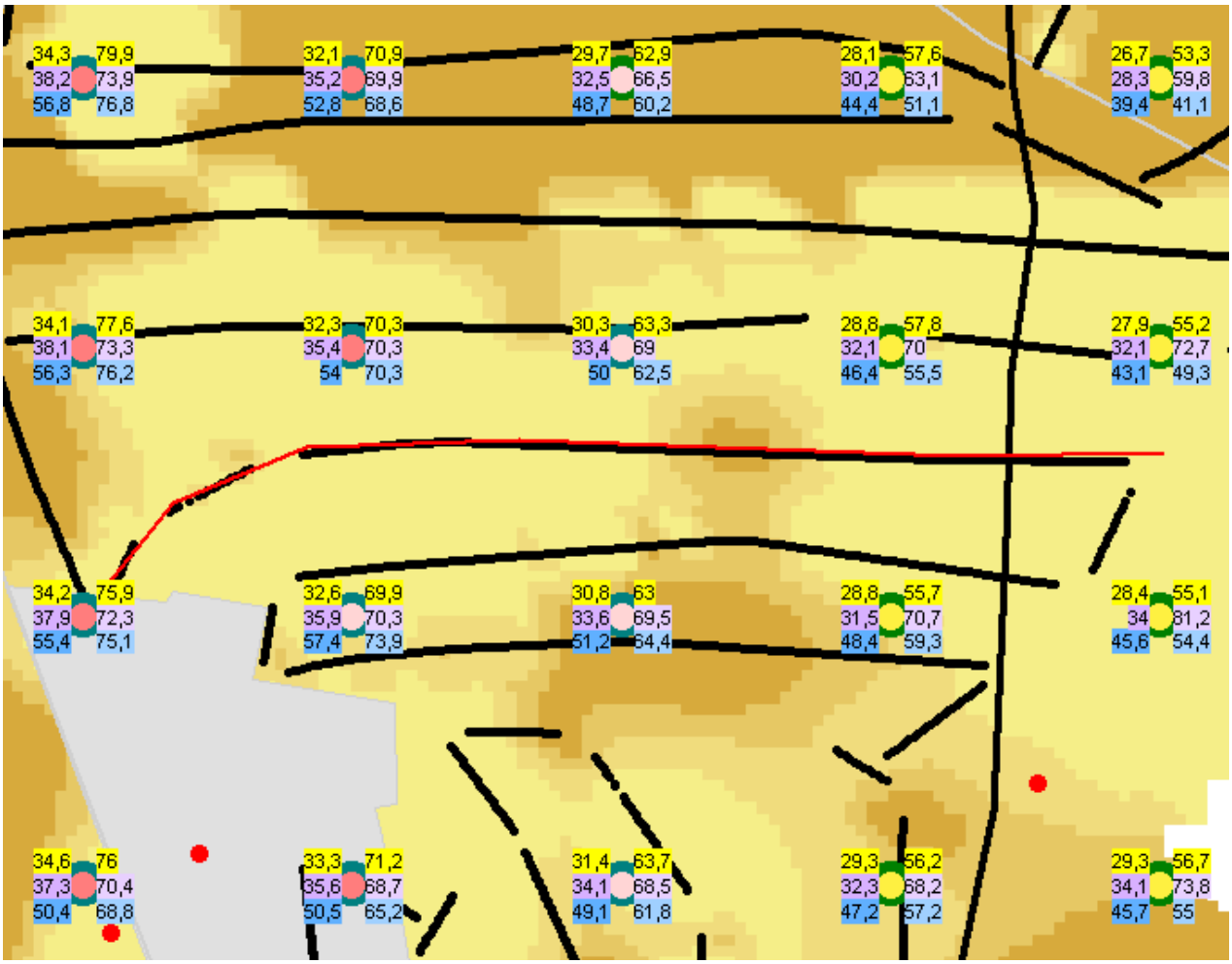
Figur 33 viser et PACES-profil fra området med angivelse af modstanden af lagene. Modstandsvariationerne gennem profilet ligger mellem 45 – 70 ohmm. Sammenholdes det med afskæringsmodstanden for de tre kørsler (Figur 34), kan variationerne i lrindholdet ved de tre kørsler forklares.

Inkonsistensen i afskæringsmodstandene er stigende mod højre, hvilket skyldes randeffekt. Væk fra randeffekten ses konsistent øvre afskæringsmodstand, hvorimod nedre afskæringsmodstand stiger markant ved kørsel med søgeradius 500 m. Sammenholdes det med modstandsværdierne i PACES profilet (Figur 33), vil der uundværligt være en stigning i lerindholdet når nedre afskæringsmodstand stiger fra 35 til 55 ohmm.

Ovennævnte eksempel illustrerer netop vigtigheden i, at kunne integrere de geofysiske modstandsforhold med eksakte lithologiske oplysninger i områder, hvor modstandsforholdene ligger omkring en skæringsværdi, og at man i processen omkring SSV-beregninger skal foretage parametertest for at problemstillinger bringes for dagen.



Figur 33. Modstandsprofil af PACES. Placering af profilet ses i nedenstående Figur 34



Figur 34. Oversætterfunktion for de tre kørsler. Øverst 300 m, dernæst 400 m og nederst 500 m. Modstandsværdien for nedre afskæring til venstre, og øvre afskæring til højre. Rød streg illustrerer placeringen af PACES-profilet, røde markeringer er boringer, Se farveskala Figur 28.

8. CASE 2 - SSV ANVENDT PÅ MEP OG SKYTEM DATA FRA EN KORTLÆGNING VEST FOR HELSINGØR, MC ROSKILDE

8.1. Indledning

Som et led i den nationale grundvandskortlægning har Miljøcenter Roskilde udført geofysiske kortlægninger i et større område vest for Helsingør.

Der er inden kortlægningsarbejdet blev sat i gang gennemført en analyse af det eksisterende datagrundlag, som udelukkende bestod af boringer. Ved analysen stod det klart, at de dybe boringer (>30 m) var temmelig uensartet og skævt fordelt. Generelt ses de dybe boringer placeret tæt på kysten i randen af kortlægningsområdet, hvor vandindvindingen også finder sted.

I de centrale dele af området med skove og åbent land er der kun et meget begrænset antal af dybe, veldokumenterede boringer. Det centrale område er interessant for en fremtidig vandindvinding, især fordi grundvandsdannelsen her formodes at være stor.

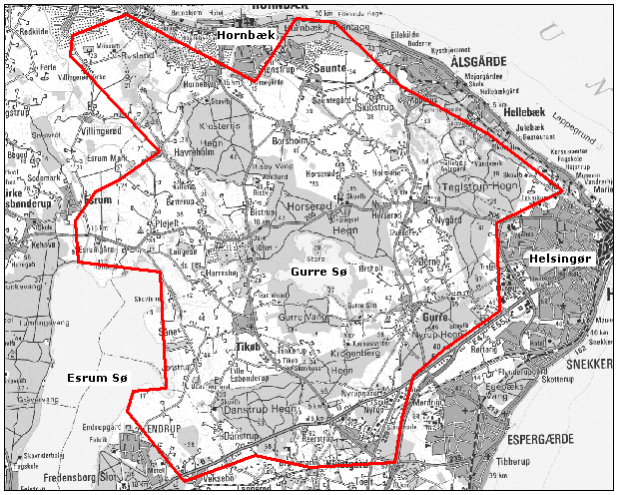
Med det forholdsvis beskedne antal boringer, var det oplagt at indsamle nye geofysiske data i området, for at forbedre datagrundlaget til den geologiske model.

Således er der i perioden fra 2005 til medio 2008 gennemført en større geofysisk kortlægning, som har omfattet indsamling og databehandling af både SkyTEM /1/ og MEP data /2/.

For at understøtte den geologiske model og samtidig få et umiddelbart overblik over den naturlige beskyttelse af grundvandsforekomsterne i kortlægningsområdet, valgte Miljøcenter Roskilde at få udarbejdet lertykkelseskort baseret på hhv. SkyTEM-data og MEP-data ved brug af SSV-metoden.

8.2. Undersøgelsesområdet

Undersøgelsesområdet (Figur 35) er kendetegnet ved relativ meget bebyggelse og dertil hørende infrastruktur i randområderne. I de centrale dele findes åbent land samt flere større skovområder. Hele kortlægningsområdet dækker et areal på ca. 110 km^2.



Figur 35. Helsingør undersøgelsesområde.

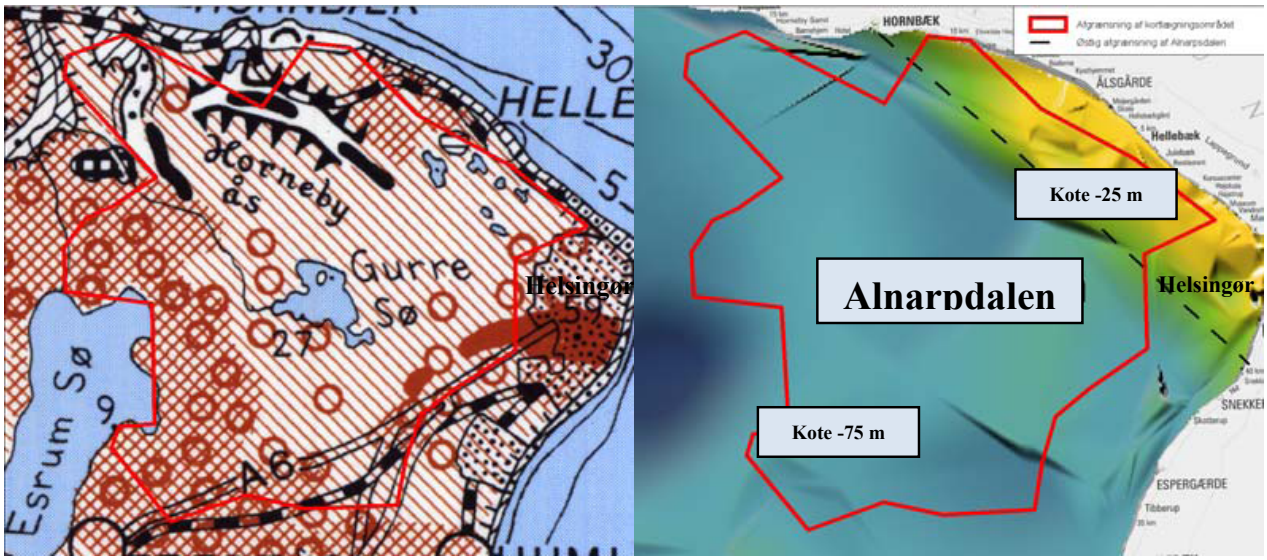
Topografisk er der moderat variation i området, men et randmorænestrøg og højtliggende morænelandskaber fra istiden træder tydelig frem på Figur 36.

Centralt i området ligger Gurre Sø, med vandspejlskote ca. 26 meter over havniveau og en middeldybde på blot 2 meter. Det har altid været lidt af en gåde, hvordan denne sø, der afvander mod nordvest gennem Gurre Å til Kattegat kan være vandfyldt, når den ligger så relativt højt i terrænet. Søen er ikke grundvandsfødt, som fx Esrum sø mod vest, så noget må udgøre en impermeabel bund under søen. Men hvad - og i hvilken udstrækning?

8.3. Geologiske forhold

Undersøgelsesområdet er præget af en dyb begravet dal kaldet Alnarpdalen. Dalen er ca. 15 km bred og strækker sig fra byen Alnarp i Sverige, tværs over Øresund ind mellem Nivå og Helsingør. Den munder ud i Kattegat mellem Hornbæk og Udsholt og fortsætter et godt stykke ud under havet.

Kalkoverfladen udgør dalbunden. Bunden findes mellem kote -70 og -90 meter de dybeste steder og ca. i kote -25 meter nær kysten ved Ålsgårde. Den stiplede sorte streg på Figur 36angiver den nedforkastede nordøstlige afgrænsning af Alnarpdalen.



Figur 36. Til venstre: Per Smeds landskabskort viser et moræne- og dødislandskab. Bemærk det krumme randmorænestrøg mod sydøst og tunneldalen med rester af åse mod nord. Til højre: Kort over kalkens overflade. Alnarpdalens nordøstlige flanke strækker sig langs den sorte stiplede linje.

Dalen er fyldt op med kvartære aflejringer og er således ikke synlig i landskabet i dag. Tykkelsen af kvartæret, der består af ler- og sandaflejringer, er på helt op til 120 meter, med de største tykkelser centralt i Alnarpdalen og de mindste tykkelser ud mod kysten mellem Hornbæk og Ålsgårde.

8.4. Datagrundlag

Boringer
Det samlede antal boringer i kortlægningsområdet og i en omkringliggende bufferzone er ca. 575 stk. Alle boringer er gennemgået og vurderet. I dette tal indgår dog ikke DAPCO boringer (shot hole fra seismik), da disse generelt altid er af for ringe kvalitet og dybde. De er derfor ikke interessante i SSV sammenhæng.

Som nævnt er fordelingen af boringer til dybder større end 30 meter temmelig uensartet og skævt fordelt. Generelt ses de dybe boringer placeret tæt på kysten i randområderne, hvor vandindvindingen også finder sted.

I de centrale områder med skove og åbent land er der kun et fåtal af dybe, veldokumenterede boringer.

SkyTEM
Der er i efteråret 2005 udført SkyTEM-målinger langs de flyvelinjer som er vist på bilag 1/ /1/. Efter udlugning af de koblede og ikke brugbare sonderinger var spildprocenten på hele 58 %. Dette tal lyder højt, men er ikke unormalt for et område med denne infrastruktur.

Da det totale antal af målte sonderinger med SkyTEM-metoden er stort, var antallet af gode brugbare sonderinger, der kunne arbejdes videre med, stort. De godkendte og brugbare sonderinger er ligeledes vist på bilag 1.

Målingerne giver et overblik over de modstandsmæssige egenskaber i de øverste 200 til 250 meter af lagserien.

Kortlægningen opløser tydeligt grænsen mellem det ferske og salte grundvand i kalken. Her ses en fin korrelation mellem udbredelsen af Alnarpdalen og det saltholdige grundvand, der findes i stor dybde centralt i dalen jf. bilag 2. Hvis man altså ikke i forvejen kendte til dalens udbredelse, ville disse nye data afsløre dalstrukturen, som altså har stor betydning for beliggenheden af grænsen mellem det ferske og salte grundvand.

Til gengæld har kortlægningen ikke umiddelbart medført en fastlæggelse af kalkoverfladen. Dette skyldes for små modstandskontraster mellem de elektriske modstande i Alnarpsandet og kalken med det ferske grundvand.

Den øvre del af lagserien er ofte svær at opløse med metoden, men flere sammenhængende områder med høje og lave modstandsværdier fremkommer dog på de optegnede middelmodstandskort over området. Vi har altså allerede et godt første bud på et sårbarhedskort over området, alene ved en skanning med SkyTEM-metoden.

MEP
For at opnå en bedre opløsning af de øverste 50 meter af jordlagene, er der i 2007 udført 120 km MEP i området vist på bilag 3/ /2/. Alle linjer er målt med et ABEM SAS 4000 måleudstyr samt en ES10-64 selectorboks. Der blev benyttet gradient målekonfiguration og udlæg på 4 kabler á 100 meters længde med elektrodeudtag for hver 5 meter.

Alle MEP data blev efter afslutning af feltarbejdet tolket til geofysiske modeller i Aarhus Workbench. Der blev på baggrund af disse mange tolkninger lavet en række middelmodstandskort. Disse kort bidrager, som tilfældet var med SkyTEM-målingerne, med vigtige oplysninger om en meget varierende geologi i området.

8.5. Lertykkelseskort beregnet med SSV-metoden

Tilgang til SSV-arbejdet
Overordnet bestod SSV-arbejdet af følgende 4 trin:

1 Sortering og beskrivelse af områdets boringer med hensyn til summeret lerindhold samt en angivelse af et usikkerhedsinterval, der baseres på en vurdering af borings alder, prøvebeskrivelseskvalitet osv.
2 Beslutning om ønsket beregningsdybde baseret på geofysikkens opløsningsevne, niveau for betydende lerlag og antallet af brugbare boringer ved en given beregningsdybde.
3 Iterative SSV-beregninger, hvor parameterindstillingerne for inversionsberegningerne justeres. Herunder vurderes boringsbeskrivelserne løbende, og eventuelle justeringer af beskrivelserne foretages.
4 SSV-beregning med endelige indstillinger og tilrettede boringsbeskrivelser samt produktion af temakort.

Til analyse af beregningsresultaterne findes der i Workbenchen en række temaer, hvor det er muligt at vurdere de benyttede indstillinger. Ved parameterjusteringen i nærværende projekt, blev følgende temaer vurderet individuelt og op mod de øvrige kørsler:

- Den absolutte fejl i meter på lertykkelsen mellem de vurderede og beregnede lertykkelsesværdier i boringerne.
- Den relative fejl på lertykkelsen mellem de vurderede og beregnede lertykkelsesværdier i boringerne.
- De fundne værdier for oversætterfunktionen sammenlignet med de indstillede startværdier.

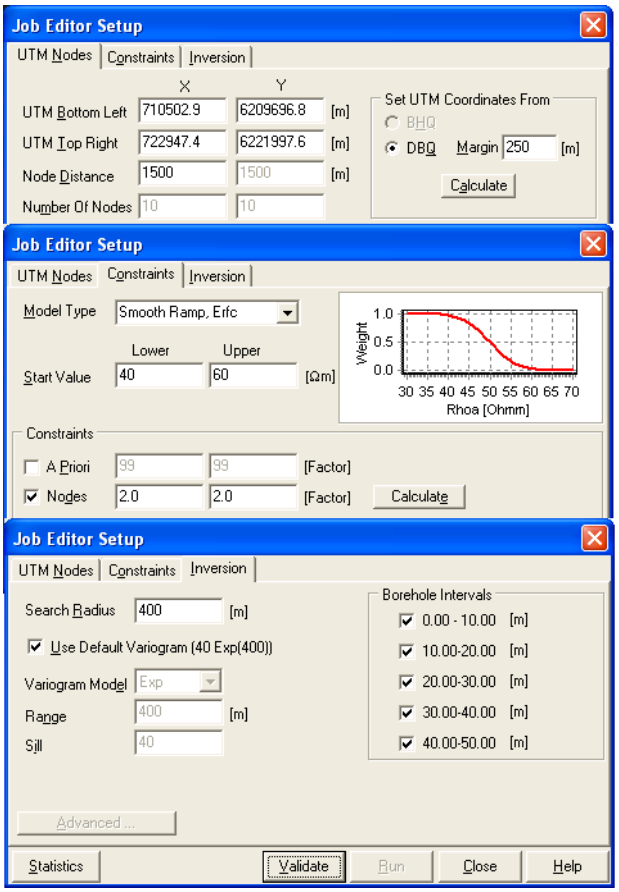
Det er vigtigt at have for øje, at både beskrivelsen af boringer og den iterative proces er omfangsrige og svære at overskue for et stort område som dette. Derfor er det meget vigtigt at understrege, at en systematisk tilgang til opgaven er tvingende nødvendig.

SSV baseret på SkyTEM-data
Som nævnt er SkyTEM-dataene optaget i efteråret 2005, og kendetegnende for disse data er, at indholdet af information i de øverste 30 m af lagpakken er begrænsede og ikke altid tilstrækkeligt detaljerede. Det skyldes at den daværende opsætning og konfiguration af systemet betød, at opløseligheden i de overfladenære jordlag var ringe. Dette er siden blevet forbedret.

På den baggrund blev det besluttet, at gennemføre beregningerne helt til 40 eller 50 m dybde afhængig af antal og fordeling af boringer ved hhv. 40 og 50 m. Af bilag 4 fremgår fordelingen af boringer til 40 og 50 m under terræn.

Til en dybde på 50 m vil der falde 13 boringer fra i forhold til en beregningsdybde på 40 m. Således

indgår der i beregningerne til 50 meters dybde i alt 64 boringer, hvilket blot svarer til ca. 11 % af det samlede boringsantal i området med MEP-målinger. Det blev på trods af dette tab af boringer med dybden besluttet at udføre beregningerne til 50 meters dybde her også.



Figur 37. Parameterindstillinger for de endelige SSV-kørsler baseret på SkyTEM-data.

Efterfølgende blev der foretaget 26 kalibreringskørsler, hvor nodeafstanden, afskæringsværdierne og båndene blev justeret.

Som resultat heraf blev de resulterende parameterindstillinger som vist i Figur 37. I bilag 5 ses det resulterende geofysiske lertykkelseskort baseret på SkyTEM-målinger og boringer.

Generelt ses en rimelig overensstemmelse mellem lertykkelsen, hvor der findes geofysiske data og lertykkelsen i boringerne i området.

Resultatet viser, at der i områderne nord-nordvest for Helsingør og syd-sydvest for Gurre Sø generelt findes et lerdække på mere end 15 m, mens der i den øvrige del af området hovedsageligt ses lertykkelser under 10 m.

SSV baseret på MEP-data

Konfigurationen, hvormed MEP-data er optaget, giver fin opløsning i hele dybdeintervallet fra 0-50 m. Det giver derfor god mening at fortage SSV-beregninger til alle dybder i intervallet.

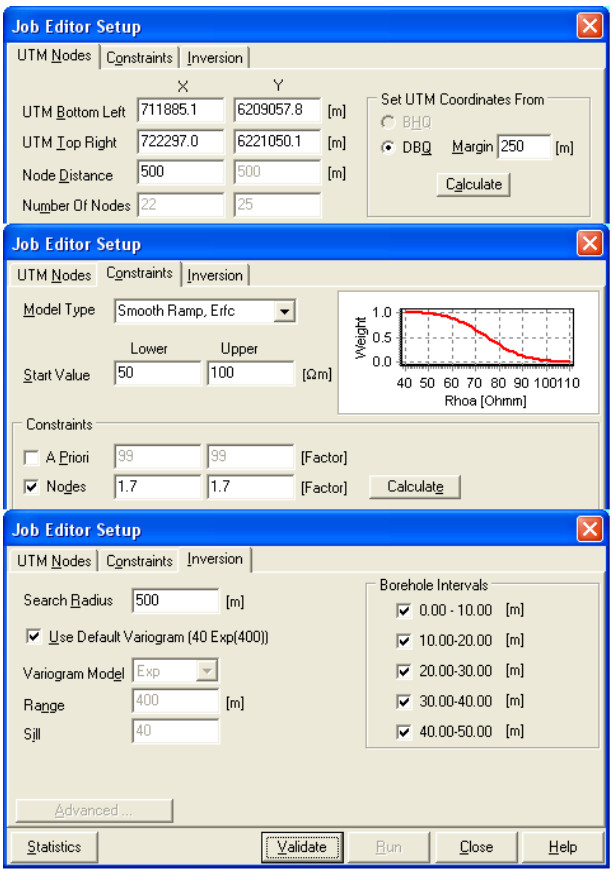
Forud for de indledende kørsler blev det besluttet, at de allerede beskrevne boringer fra SSV-kørslerne på SkyTEM-data skulle danne grundlag for de tilsvarende kørsler på MEP-data.

For at beslutte beregningsdybden i området med MEP-målinger blev fordelingen af boringer endnu en gang undersøgt, og antallet af boringer 70, 38 og 30 boringer ved en beregningsdybde til hhv. 30, 40 og 50 m under terræn (jf. bilag 6).

Således ville det have været mest nærliggende, at foretage SSV-kørslerne til kun 30 m dybde, men ved sammenligning mellem kørsler til 30 m (bilag 7) og SkyTEM-kørslerne til 50 m blev der observeret en divergens.

Dette gav anledning til nok et nærstudie af boringerne. Her kunne det konstateres, at der under 30 m dybde fremkommer betydelige lerlag, som giver anledning til divergensen i beregningerne. Det blev herefter besluttet, at SSV-beregningerne baseret på MEP-dataene ligeledes skulle fortages til 50 m under terræn, hvilket samtidig betød en accept af en reduktion af brugbare boringer på ca. 60 %.

Efterfølgende blev der foretaget 15 kalibreringskørsler, hvor nodeafstand, afskæringsværdier, søgeradius og båndene blev justeret.



Figur 38. Parameterindstillinger for de endelige SSV-kørsler baseret på MEP-data.

Resultatet heraf og de resulterende parameterindstillinger er vist i Figur 38.

I bilag 7 og 8 ses det resulterende geofysiske lertykkelseskort ud fra MEP-data til henholdsvis 30 og 50 m dybde. Bemærk især den tiltagende lertykkelse med dybden ved Endrup.

Der ses en rigtig god overensstemmelse mellem lertykkelsen, hvor der findes geofysiske data og lertykkelsen i de beskrevne boringer i området. Således vurderes det, at relationen mellem boringer og MEP-data er god, og at de geofysiske lertykkelser også er valide, hvor der er færre eller ingen boringer tilstede.

Resultaterne viser, at der er store variationer i mængden af ler indenfor kortlægningsområdet, og at forekomster af ler er karakteriseret ved:

- at de største mægtigheder af ler findes i det sydvestlige område ved Endrup, med lertykkelser på mellem ca. 30 og 45 m.
- at der i området omkring Gurre Sø og syd herfor samt i et nordvestlig til sydøstlig strøg i den nordlige del af området findes lertykkelser på mellem ca. 15 og 30 m.
- at der i den nordligste og nordvestlige del af området, samt i et sydvestlig til nordøstlig strøg i den sydøstlige del af området (langs randmorænen ved Nyrup Hegn), findes lertykkelser på mindre end 15 m.

Sammenligning af SSV-resultater baseret på SkyTEM-data og MEP-data

Ved at sammenholde bilag 5 og bilag 8 ses en rigtig god overensstemmelse mellem resultatet af SSV-kørslerne på henholdsvis SkyTEM-data og MEP-data til 50 m dybde. Dette understøttes af bilag 9. Her er de resulterende lertykkelseskort lagt over hinanden.

8.6. Diskussion

Med erfaringerne fra nærværende projekt er der fremkommet nogle emner af generel karakter, som bør tages op til overvejelse.

Boringsbeskrivelser

Som det er forskrevet blev boringerne i nærværende projekt gennemgået af en enkelt erfaren geolog, som beskrev boringerne med mest mulig objektivitet. Beskrivelsen skete ved "tolkning" og vurdering af boringsrapporterne, hvorefter tykkelser og usikkerheder blev tastet direkte ind i Workbenchens beskrivelsesark. Efterfølgende har der rejst sig et spørgsmål om objektivitet og dokumentation, når boringsbeskrivelserne foretages, som instrueret. Baseret på flere SSV-projekter har det vist sig, at man ved en vægtning af boringernes informationer med fordel kan lave en mere objektiv vurdering af boringerne og samtidig opnå en dokumentation for de valg, der er blevet foretaget.

Oversætterfunktion

I det kortlagte område vest for Helsingør, ses der områdevis nogen variation i modstandsniveauerne for hvad, der i boringerne beskrives som aflejrin-

ger med et lerindhold. Således ses for eksempel, at moræneler i et område er mere ledende end moræneler i et andet område, hvilket der ikke er noget usædvanligt i. Derimod er det en udfordring for justeringen af de modstandsmæssige afskæringsværdier, der i SSV-kørslerne her gøres for hele området i et hug.

En løsning kunne være, at dele området op i mindre delområder, hvori man individuelt kan justere afskæringsværdierne i overensstemmelse med geologien og derved opnå forbedrede lokale lertykkelseskort. Disse kan så afslutningsvis stykkes sammen til et samlet kort.

En anden løsning kan være, at justere boringsbeskrivelserne efter geofysikken, hvilket favoriserer geofysikken frem for boringsinformationerne, som udgør den direkte information. Dette er som udgangspunkt ikke ønskeligt.

Intervaller for lertykkelser
For at opnå et mere detaljeret billede af fordelingen af ler med dybden, bør der implementeres en mulighed for at udtegne lertykkelsen i alle beregningsintervallerne, altså fx 0-10, 10-20, 20–30 m osv.

Endvidere bør det overvejes, om mindre beregningsintervaller kunne implementeres nær overfladen, mens intervallerne i tråd med geofysikkens opløsningsevne bliver større nedefter.

Begge dele med tanke på et værktøj, der i højere grad kan bidrage med input til fx grundvandsmodeller eller direkte kan bruges, når risikoen fra punktkilder skal vurderes i forbindelse med indsatsplaner.

8.7. Konklusion

Undersøgelserne vest for Helsingør har vist, at man kan komme rigtig langt med at kombinere forskellige geofysiske metoder og udføre SSV-beregninger på data efterfølgende.

Erfaringer fra Helsingør-området tyder på, at SkyTEM, selv til de mere overfladenære målinger, er en god metode til at give en overordnet skanning af et område.

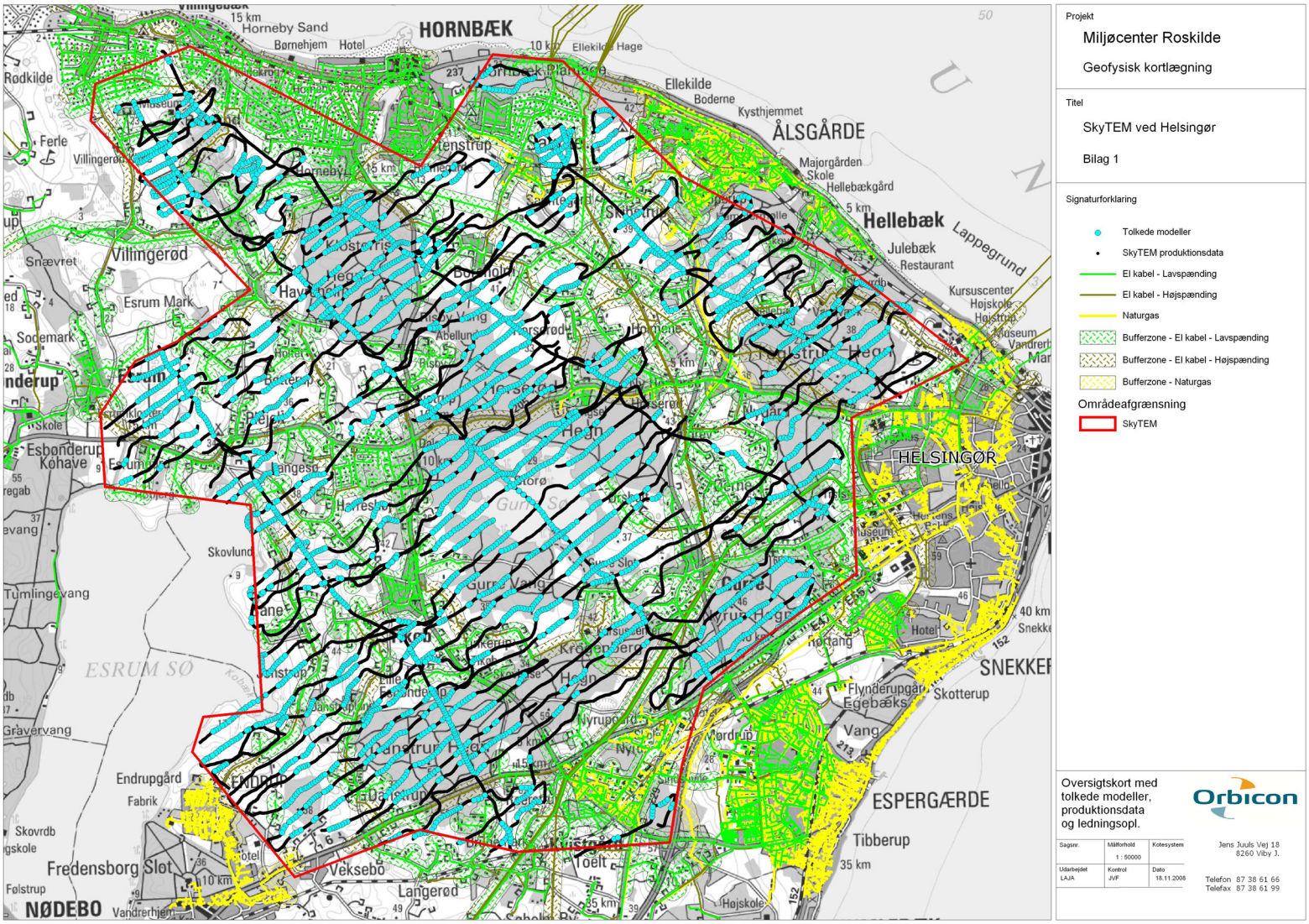
Hvis den kvartære lagfølge er tyk (mere end 30 meter) kan det være nyttigt at udføre MEP for at få en bedre opløsning af de terrænnære og lidt dybere geologiske forhold. Samtidig er MEP en robust metode, der giver en bedre dækning op i mod kulturelle støjkilder, der jo ellers er ren gift for SkyTEM-metoden.

Ved opsætning af en geologisk model er det en stor hjælp at have de geofysiske lertykkelseskort fra SSV-kørslerne tilgængelige ved sin side. De er især nyttige når man skal træffe afgørelser om den horisontale og vertikale udstrækning af sårbare eller mere velbeskyttede områder.

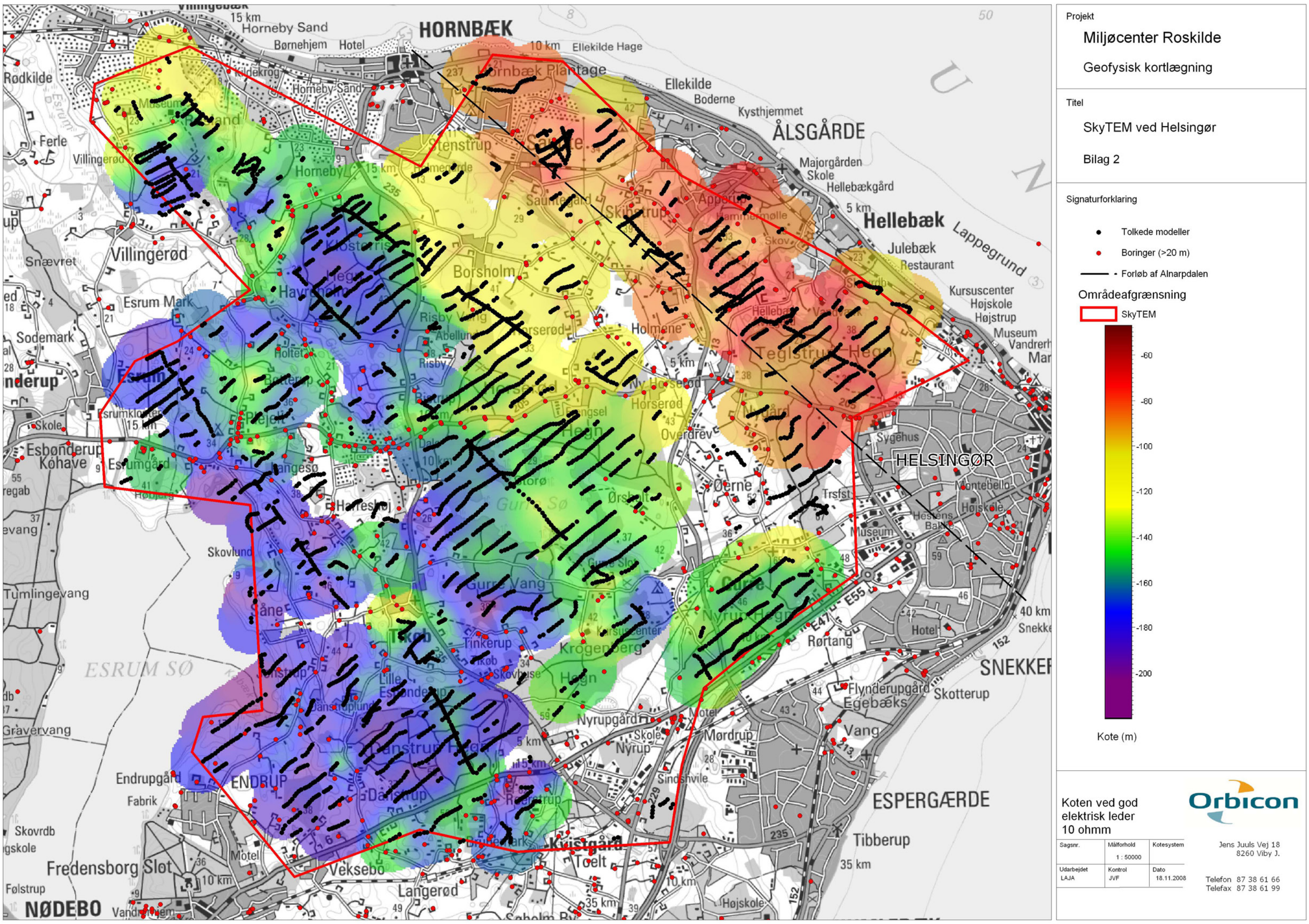
Med en kombination af geofysiske metoder og SSV har vi nu fundet det hidtil ukendte lerlag som bevirker at Gurre sø "kan holde på vandet". Det er da ny viden, der også kan bruges i en fremtidig vandplan for området!

8.8. Bilag til case 2

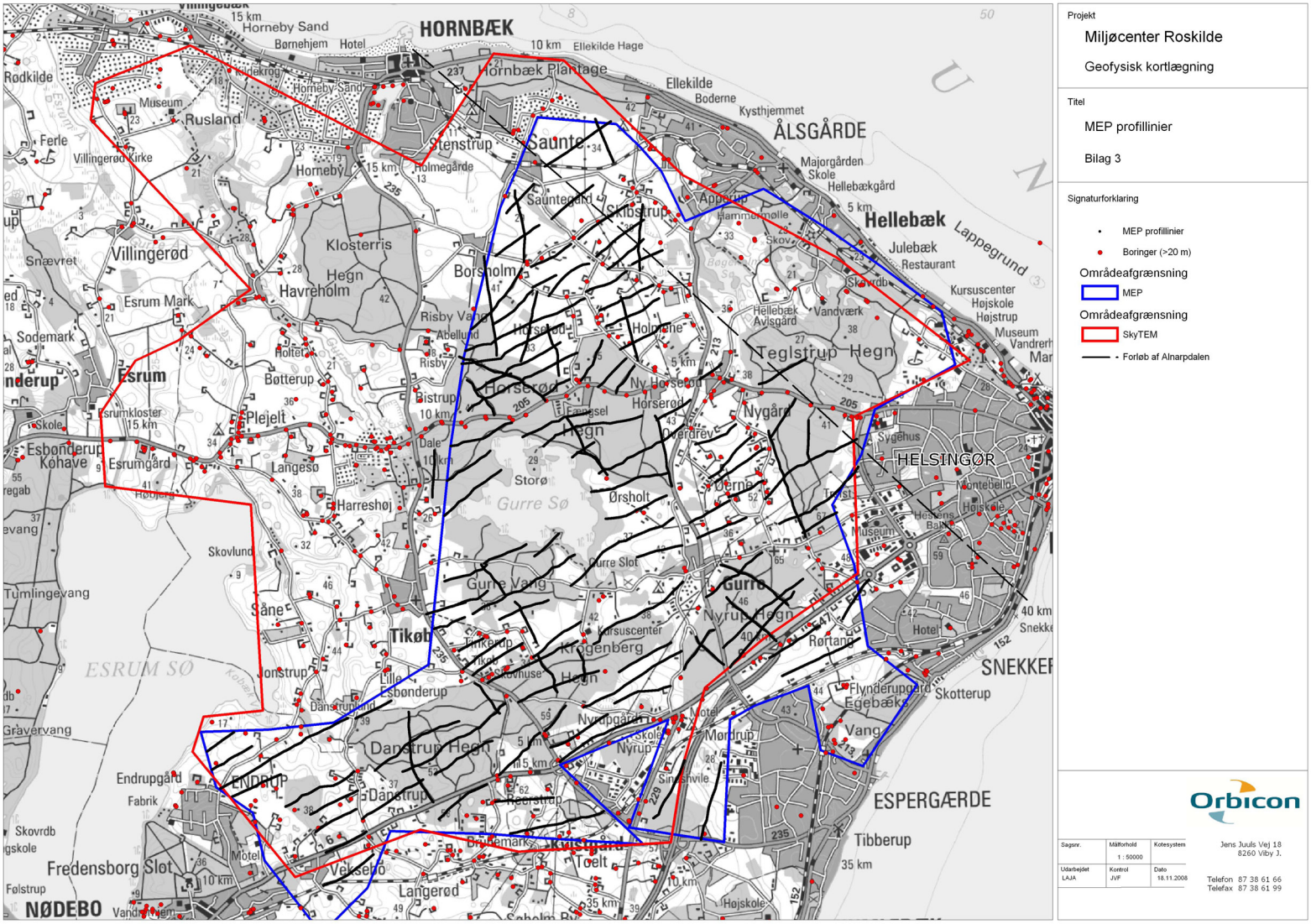
Bilag 1



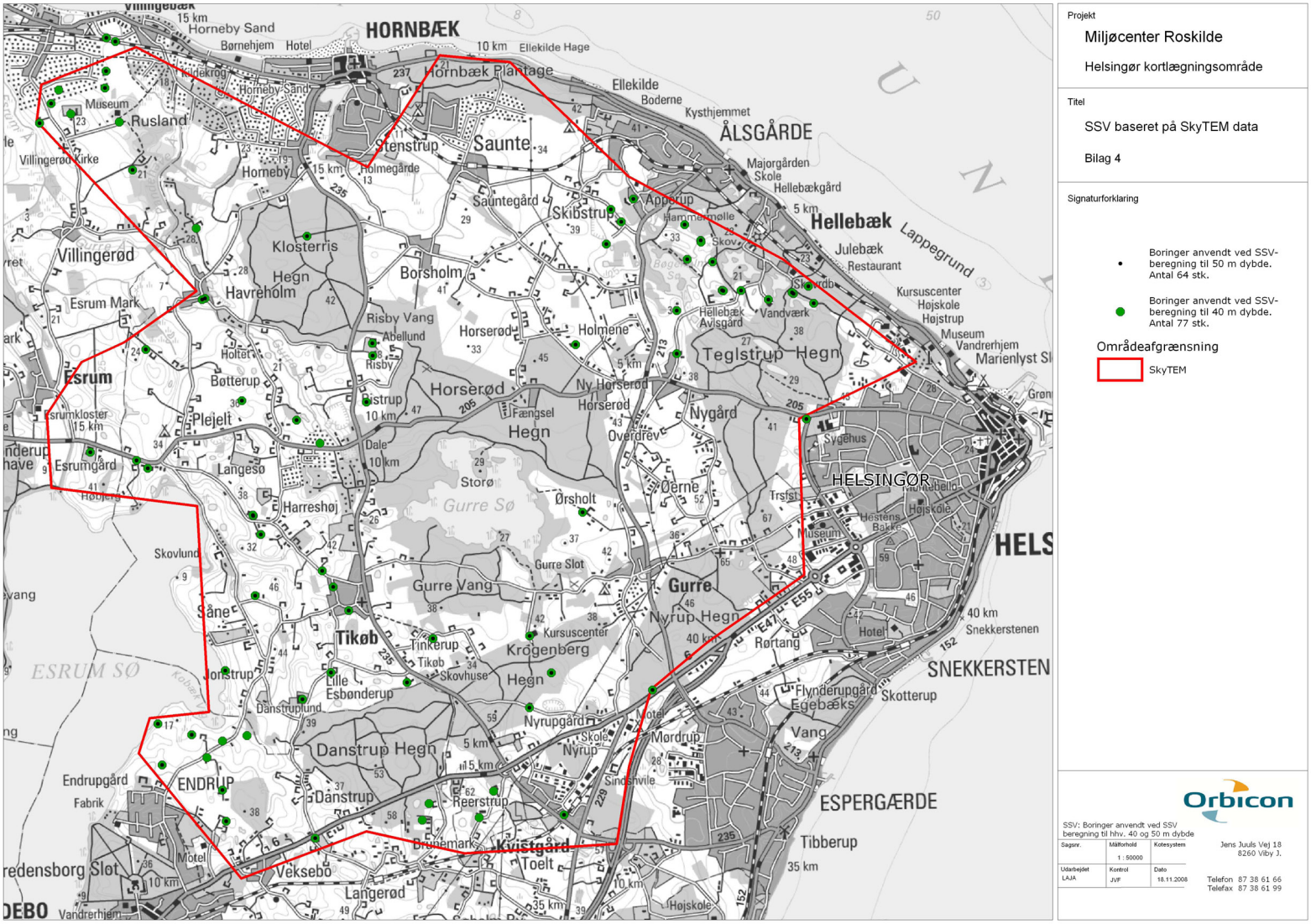
Bilag 2


Projekt
Miljøcenter Roskilde
Geofysisk kortlægning
Titel
SkyTEM ved Helsingør
Bilag 2
Signaturforklaring
Tolkede modeller
Boringer (>20 m)
Forløb af Alnarpdalen
Områdeafgrænsning
SkyTEM
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
Kote (m)
Koten ved god elektrisk leder 10 ohmm
Orbicon
Sagsnr.
Målforhold
1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet
LAJA
Kontrol
JVF
Dato
18.11.2008
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99
HORNBÆK
ÅLSGÅRDE
Hellebæk
HELSINGØR
SNEKKERSTEN
ESPERGÆRDE
ESRUM SØ
NØDEBO
Fredensborg Slot

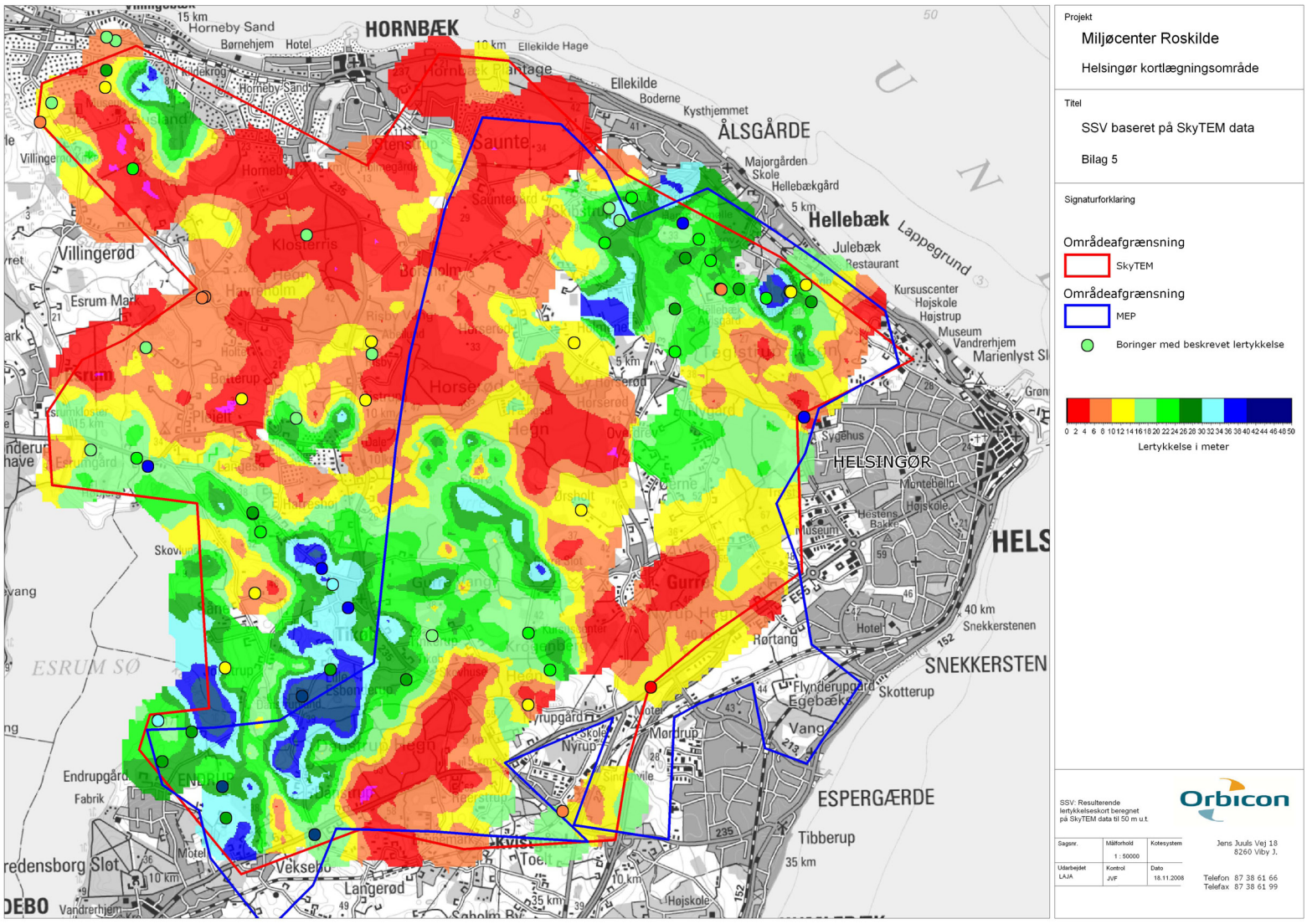
Bilag 3


HORNBÆK
Hornbæk Plantage
Ellekilde
ÅLSGÅRDE
Hellebæk
Julebæk Restaurant
Kursuscenter Højskole Højstrup
Helsingør Højskole
Teglstrup Hegn
Nygård
HELSINGØR
Gurre Sø
Gurre
Tikøb
Kregenberg
Dansrup Hegn
Dansrup
ESPERGÆRDE
Tibberup
SNEKKER
Skotterup
Egebæk
Vang
Mørdrup
Nyrup
Endrupgård
ENDRUP
Fredensborg Slot
NØDEBO
Langerød
Havreholm
Klosterris
Esrum
Esrum Mark
Plejelt
Langesø
Harreshøj
Tumlingevang
Gravervang
Skovlund
Søne
Jonstrup
Esbønderup
Bøtterup
Bistrup
Risby
Horserød
Ny Horserød
Holmene
Ørsholt
Ørnerev
Gurre Slot
Gurre Vang
Nyrup Hegn
Rørtang
Flynderupgård
Vang
Tibberup
Veksebo
Toelt
Brudemark
Skovrdb
Hammermølle
Hellebæk Avlsgård
Vandværk
Sygehus
Museum
Hotel
Møtel
Skole
Kirkekro
Horneby Sand
Børnehjem
Villingerød Kirke
Villingerød
Snævret
Sodemark
Esrumkloster
Esrumgård
Kohave
Esbønderup
Rodkilde
Ferle
Rusland
Museum
Stenstrup
Saunte
Holmegårde
Horneby
Skibstrup
Hornbæk Plantage
Ellekilde Hage
Kysthjemmet
Majorgården
Skole
Hellebækgård
Lappegrund
Kursuscenter
Højskole
Højstrup
Museum
Vandrerh
Mar
Ny Horserød
Nygård
Overdrev
Trøst
Hessens Bolig
Helsingør Højskole
Museum
Hotel
Snekke
Kregenberg
Lille Esbønderup
Danstrupgård
Nyrupgård
Skole
Nyrup
Endrupgård
Fabrik
Skovrdb
Fredensborg Slot
Følstrup
Vandmøllen
Langerød
Højskole
Tibberup
35 km
10 km
5 km
15 km
ESRUM SØ
Projekt
Miljøcenter Roskilde
Geofysisk kortlægning
Titel
MEP profillinier
Bilag 3
Signaturforklaring
MEP profillinier
Boringer (>20 m)
Områdeafgrænsning
MEP
Områdeafgrænsning
SkyTEM
Forløb af Alnarpdalen
Orbicon
Sagsnr.
Målforhold
1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet
LAJA
Kontrol
JVF
Dato
18.11.2008
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99

Bilag 4


HORNBÆK
Hornbæk Plantage
Ellekilde
ÅLSGÅRDE
Saunte
Stenstrup
Skibstrup
Hellebæk
Lappegrund
Villingerød
Klosterris
Hegn
Borsholm
Havreholm
Esrum Mark
Esrum
Horserød
Holmene
Teglstrup Hegn
Nygård
HELSINGØR
Plejelt
Langesø
Harreshøj
Gurre Sø
Gurre
Gurre Vang
Nyrup Hegn
Tikøb
Krogenberg
Hegn
ESRUM SØ
Danstrup Hegn
Danstrup
ENDRUP
Kvistgård
Toelt
Veksebo
Langerød
SNEKKERSTEN
ESPERGÆRDE
Tibberup
Projekt
Miljøcenter Roskilde
Helsingør kortlægningsområde
Titel
SSV baseret på SkyTEM data
Bilag 4
Signaturforklaring
Boringer anvendt ved SSV-beregning til 50 m dybde. Antal 64 stk.
Boringer anvendt ved SSV-beregning til 40 m dybde. Antal 77 stk.
Områdeafgrænsning
SkyTEM
Orbicon
SSV: Boringer anvendt ved SSV beregning til hhv. 40 og 50 m dybde
Sagsnr.
Målforhold
1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet
LAJA
Kontrol
JVF
Dato
18.11.2008
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99

Bilag 5



Projekt

Miljøcenter Roskilde

Helsingør kortlægningsområde

Titel

SSV baseret på SkyTEM data

Bilag 5

Signaturforklaring

Områdeafgrænsning

SkyTEM

Områdeafgrænsning

MEP

Boringer med beskrevet lertykkelse

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50

Lertykkelse i meter

SSV: Resulterende lertykkelseskort beregnet på SkyTEM data til 50 m u.t.

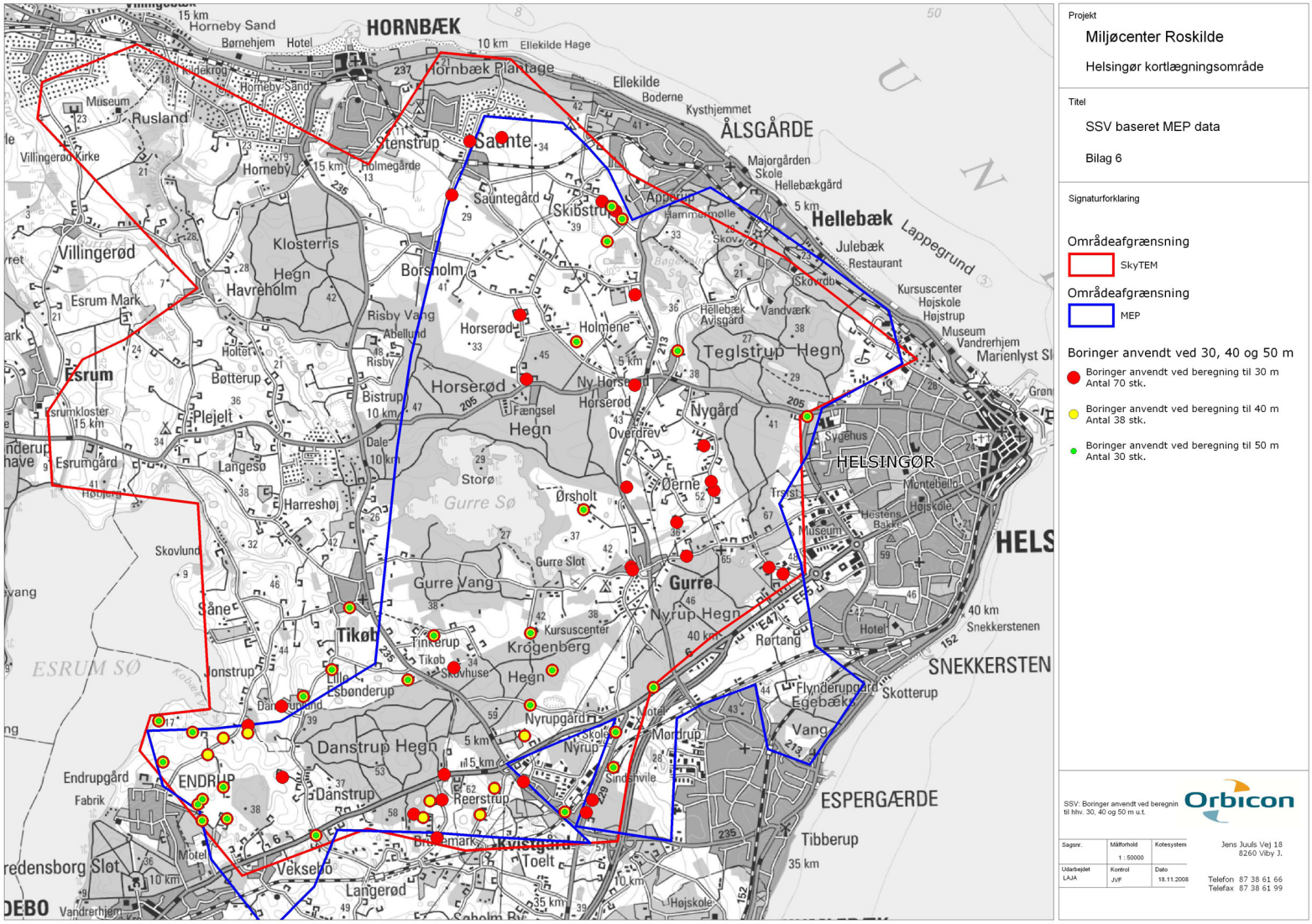
Orbicon

Sagsnr.	Målforhold	Kotesystem
	1 : 50000	
Udarbejdet	Kontrol	Dato
LAJA	JVF	18.11.2008

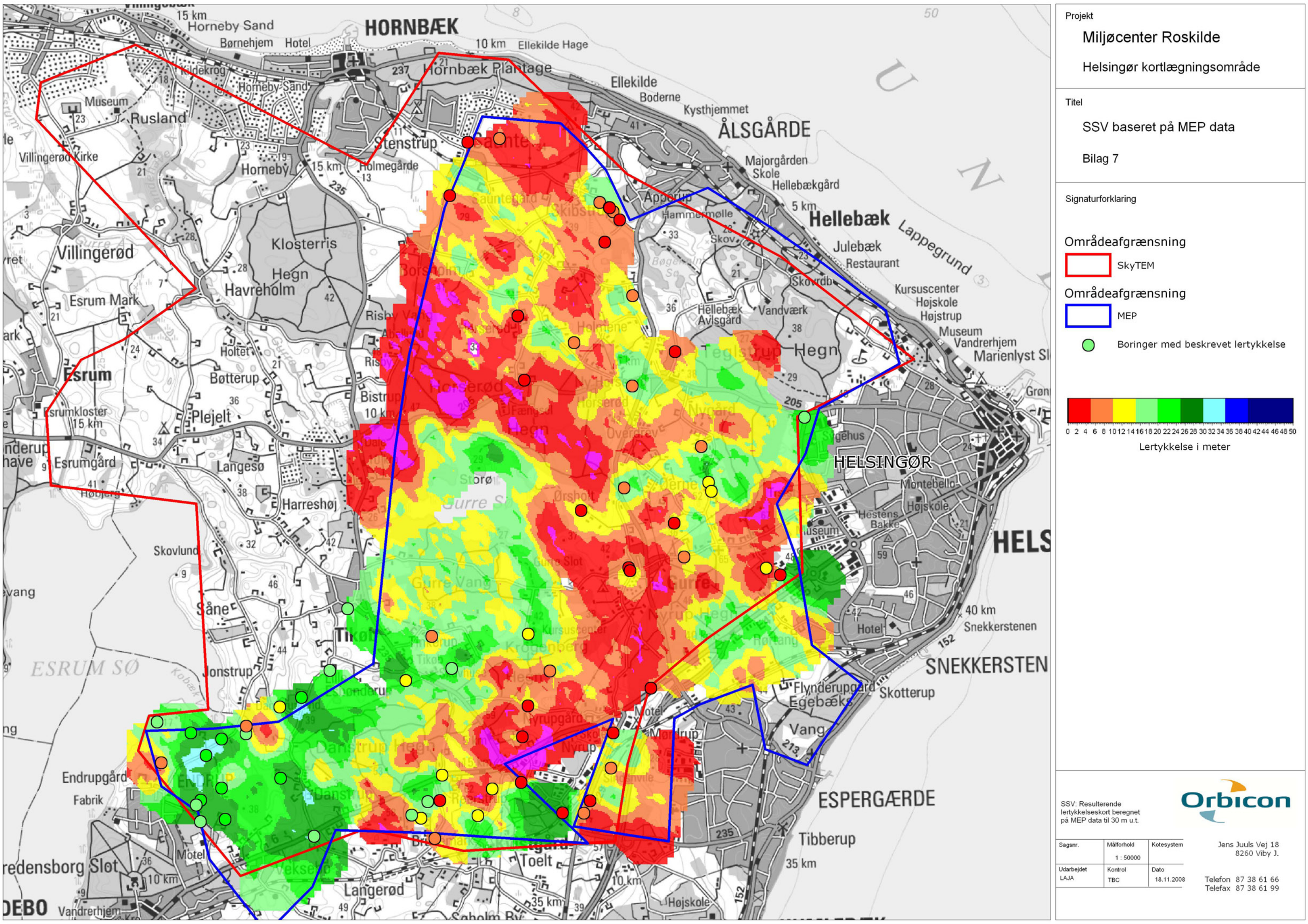
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.

Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99

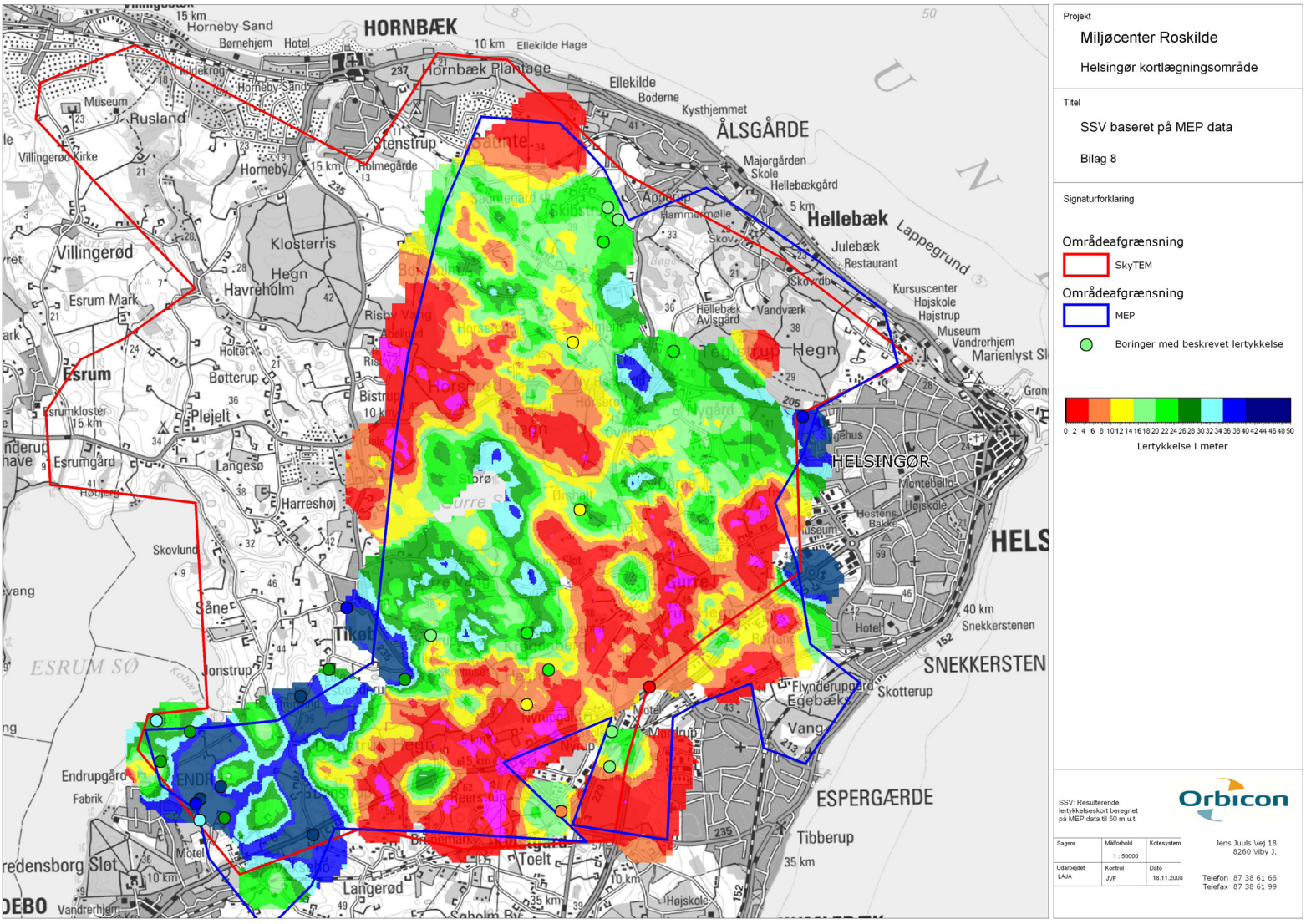
Bilag 6


Projekt
Miljøcenter Roskilde
Helsingør kortlægningsområde
Titel
SSV baseret MEP data
Bilag 6
Signaturforklaring
Områdeafgrænsning
SkyTEM
Områdeafgrænsning
MEP
Boringer anvendt ved 30, 40 og 50 m
Boringer anvendt ved beregning til 30 m Antal 70 stk.
Boringer anvendt ved beregning til 40 m Antal 38 stk.
Boringer anvendt ved beregning til 50 m Antal 30 stk.
SSV: Boringer anvendt ved beregnin til hhv. 30, 40 og 50 m u.t.
Orbicon
Sagsnr.
Målforhold
1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet
LAJA
Kontrol
JVF
Dato
18.11.2008
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99
HORNBÆK
ÅLSGÅRDE
Hellebæk
HELSINGØR
SNEKKERSTEN
ESPERGÆRDE
Villingerød
Esrum
Tikøb
Gurre
ENDRUP
Danstrup
Gurre Sø
ESRUM SØ

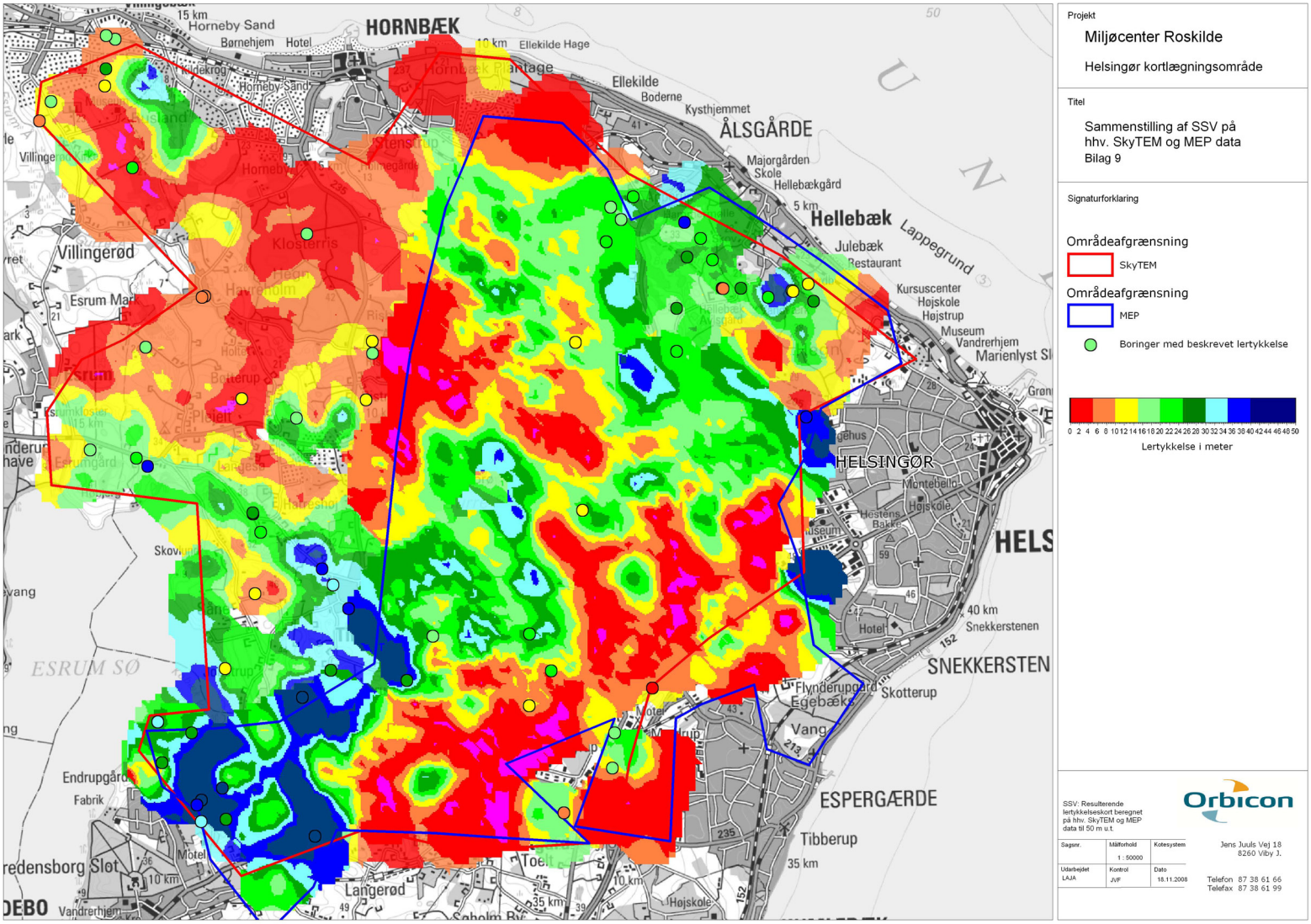
Bilag 7


Projekt
Miljøcenter Roskilde
Helsingør kortlægningsområde
Titel
SSV baseret på MEP data
Bilag 7
Signaturforklaring
Områdeafgrænsning
SkyTEM
Områdeafgrænsning
MEP
Boringer med beskrevet lertykkelse
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50
Lertykkelse i meter
SSV: Resulterende lertykkelseskort beregnet på MEP data til 30 m u.t.
Orbicon
Sagsnr.
Målforhold 1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet LAJA
Kontrol TBC
Dato 18.11.2008
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99
HORNBÆK
Hornbæk Plantage
ÅLSGÅRDE
Hellebæk
HELSINGØR
SNEKKERSTEN
ESPERGÆRDE
ESRUM SØ
Villingerød
Klosterris
Havreholm
Esrum
Tibberup

Bilag 8


HORNBÆK
ÅLSGÅRDE
Hellebæk
HELSINGØR
SNEKKERSTEN
ESPERGÆRDE
Villingerød
Esrum
ESRUM SØ
Projekt
Miljøcenter Roskilde
Helsingør kortlægningsområde
Titel
SSV baseret på MEP data
Bilag 8
Signaturforklaring
Områdeafgrænsning
SkyTEM
Områdeafgrænsning
MEP
Boringer med beskrevet lertykkelse
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50
Lertykkelse i meter
SSV: Resulterende lertykkelseskort beregnet på MEP data til 50 m u.t.
Sagsnr.
Målforhold
1 : 50000
Kotesystem
Udarbejdet
LAJA
Kontrol
JVF
Dato
18.11.2008
Orbicon
Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.
Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99

Bilag 9



Projekt

Miljøcenter Roskilde

Helsingør kortlægningsområde

Titel

Sammenstilling af SSV på hhv. SkyTEM og MEP data
Bilag 9

Signaturforklaring

Områdeafgrænsning
SkyTEM

Områdeafgrænsning
MEP

Boringer med beskrevet lertykkelse

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50

Lertykkelse i meter

SSV: Resulterende lertykkelseskort beregnet på hhv. SkyTEM og MEP data til 50 m u.t.

Sagsnr.	Målforhold	Kotesystem
	1 : 50000	
Udarbejdet	Kontrol	Dato
LAJA	JVF	18.11.2008

Orbicon

Jens Juuls Vej 18
8260 Viby J.

Telefon 87 38 61 66
Telefax 87 38 61 99

9. REFERENCER

/1/Frederiksborg Amt, Processering og tolkning af SkyTEM-data vest for Helsingør, september 2006, Orbicon.

/2/Miljøcenter Roskilde, MEP-kortlægning ved Helsingør, juli 2008, Orbicon.

/3/Århus Amt. "Midtvejsrapport: Redegørelse for grundvandsressourcen i Hadsten-området." Internt dokument (2006).