Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3

Undersøgelse af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger

> Lene H. Poulsen, Christian Wittrup, Kurt Klitten & Flemming Larsen



DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE MILJØMINISTERIET

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3

Undersøgelse af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger

> Lene H. Poulsen, Christian Wittrup, Kurt Klitten & Flemming Larsen



INSTITUT FOR MILJØ & RESSOURCER, DTU DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE MILJØMINISTERIET

Indhold

Forord					
1.		Indledning	8		
	1.1	Introduktion	8		
	1.2	Målsætninger for delprojekt	9		
2.		Resume	11		
3.		Skrivekridts elektriske ledningsevne	16		
	3.1	Resistivitet i Skrivekridt	.16		
	3.2	Overgangszonens karakter	.19		
	3.3	Sammenfatning om overgangszonen i Skrivekridt	.23		
4.		Teoretiske TEM modeller	25		
	4.1	Teoretiske 1D-modeller	.27		
	4.2	Beregningen af TEM-sonderinger	.33		
	4.3	Tildeling af usikkerhed på data	.34		
	4.3.1	Usikkerhed som følge af de geologiske forhold	.34		
	4.3.2	Usikkerhed som følge af elektromagnetisk støj	.35		
	4.4	Tolkning af modelrespons / Inversion	.36		
	4.5	Præsentation af metodestudiet	.37		
	4.6	Konklusion af modelstudiet	.38		
5.		TEM-kortlægning i projektområdet	41		
	5.1	Placeringen af TEM-sonderingerne	.41		
	5.2	Tolkning af TEM-profiler	.42		
	5.2.1	Profil 1	.44		
	5.2.2	Profil 2	.50		
	5.2.3	Profil 3	.54		
	5.2.4	Profil 4	.57		
	5.2.5	Profil 5	.61		
	5.2.6	Protil 6	.64		
	5.3	Sammenfattende kort	.69		
6.		Sammenfattende resultat af TEM-kortlægningen	70		
7.		Litteratur	77		
Appendiks A - TEM 79					
Appendiks B – HMTEM 90					

Bilag 1 - 53

Bilag til kapitel 4:

Bilag 1	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 1, type 1 og 2
Bilag 2	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 1, type 3 og 4
Bilag 3	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 2, type 1 og 2
Bilag 4	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 2, type 3 og 4
Bilag 5	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 3, type 1 og 2
Bilag 6	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 3, type 3 og 4
Bilag 7	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 4, type 1 og 2
Bilag 8	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 4, type 3 og 4
Bilag 9	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 5, type 1 og 2
Bilag 10	Teoretisk studie af fersk-saltvandsgrænsen. Gruppe 5, type 3 og 4

Bilag til kapitel 5:

- Bilag 11 TEM- og HMTEM-profiler og delprofiler og prækvartærets bjergarter med forkastninger/anomalier.
- Bilag 12 TEM- og HMTEM-profiler og Basis Danien (top Skrivekridt).
- Bilag 13 TEM- og HMTEM-profiler og Prækvartærets højdeforhold.
- Bilag 14 Profil 1's placering på kort
- Bilag 15 Profil 1_1
- Bilag 16 Profil 1_2
- Bilag 17 Profil 1_3
- Bilag 18 Profil 1_4
- Bilag 19 Profil 1_5
- Bilag 20 Profil 2's placering på kort
- Bilag 21 Profil 2_1
- Bilag 22 Profil 2_2
- Bilag 23 Profil 2_3
- Bilag 24 Profil 3's placering på kort
- Bilag 25 Profil 3_1
- Bilag 26 Profil 3_2
- Bilag 27 Profil 3_3
- Bilag 28 Profil 4's placering på kort Bilag 29 Profil 4_1
- Bilag 30 Profil 4_2
- Bilag 31 Profil 5's placering på kort
- Bilag 32 Profil 5_1
- Bilag 33 Profil 5_2
- Bilag 34 Profil 5_3

Bilag 35 Profil 6's placering på kort

Bilag 36 Profil 6_1 Bilag 37 Profil 6_2

Kortbilag med kote til, resistivitet af og dybde til øvre og nedre god leder:

- Bilag 38 Kote af øvre gode leder vist på basis Danien
- Bilag 39 Kote af nedre gode leder vist på basis Danien
- Bilag 40 Kote af øvre gode leder og inddeling af detailkort 1 4
- Bilag 41 Detailkort 1 kote til øvre leder
- Bilag 42 Detailkort 2 kote til øvre gode leder
- Bilag 43 Detailkort 3 kote til øvre gode leder
- Bilag 44 Detailkort 4 kote til øvre gode leder
- Bilag 45 Kote af nedre gode leder og inddeling af detailkort 5 8
- Bilag 46 Detailkort 5 kote til nedre gode leder
- Bilag 47 Detailkort 6 kote til nedre gode leder
- Bilag 48 Detailkort 7 kote til nedre gode leder
- Bilag 49 Detailkort 8 kote til nedre gode leder
- Bilag 50 Modstanden af den øvre gode leder vist på basis Danien
- Bilag 51 Modstanden af den nedre gode leder vist på basis Danien
- Bilag 52 Dybden til den øvre gode leder vist på basis Danien
- Bilag 53 Dybden til den nedre gode leder vist på basis Danien

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet, som en del af en samlet serie af seks delrapporter udgivet i forbindelse med rapportering af projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland". Projektet er finansieret af Københavns Energi, Københavns Amt, Frederiksborg Amt og Roskilde Amt, og gennemført i et samarbejde mellem Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Institut for Miljø & Ressourcer ved Danmarks Tekniske Universitet. Projektet er gennemført i perioden fra august 2002 til november 2005.

Det overordnede formål med projektet er at tilvejebringe en bedre viden om karakteren af saltvandsgrænsen og dybden til denne i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland med henblik på at kunne vurdere mulighederne for en bæredygtig udnyttelse af den dybere og uforurenede del af disse grundvandsmagasiner. Indenfor de tre amter er projektet geografisk begrænset til det område, hvor Skrivekridt og Danienkalk udgør den prækvartære overflade, dog undtaget Hornsherred på grund af manglende data.

Projektet har været opdelt i to faser. Den første fase havde som hovedformål at systematisere og analysere eksisterende data og viden om saltholdigt grundvand i projektområdet, men inkluderede også ny dataindsamling i form af udførelse af borehulslogging og TEMkortlægning. Projektets anden fase har fokuseret på et værkstedsområde ved Karlslunde, hvor undersøgelserne hovedsageligt har drejet sig om to nye dybe projektboringer. Endvidere er Danienkalkens og Skrivekridtets hydrauliske egenskaber undersøgt såvel i felten som i laboratoriet. Endelig har denne fase også omfattet supplerende borehulslogging, samt opstilling af en konceptuel og en numeriske hydrogeologisk model i Karlslunde området til beregning af udvaskning og diffusion af saltvand fra Skrivekridtet og Danienkalken over geologisk tid. Formålet med anden fase har således især været at belyse de parametre og forstå de processer, som over geologisk tid har kontrolleret udvaskningen af residualt saltvand fra formationerne. En sådan forståelse er en forudsætning for at kunne udvikle en metode for prognosticering af fremtidig kloridbelastning af eksisterende og nye grundvandsindvindinger fra Danienkalk og Skrivekridt.

Nærværende delrapport omhandler den geofysiske kortlægning af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne ved hjælp af TEM-sonderinger udført under fase 1. Projektets øvrige rapporter fremgår af nedenstående oversigt:

Hovedrapport:

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport

Resume af delprojekternes resultater og konklusioner samt perspektivering.

Delrapporter:

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 1

Kortlægning af Danienkalk-Skrivekridt grænsen samt forkastninger i denne.

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 2 Undersøgelse af saltvandsgrænsen ved hjælp af geofysisk borehulslogging.

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3 Kortlægning af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger. Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 4 Simulering af nuværende og historiske strømnings- og potentialeforhold.

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 5 Grundvandstyper i kalkmagasinerne.

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6 Saltvandsudvaskning i Danienkalk og Skrivekridt - Detailundersøgelser i Karlslunde værkstedsområde.

Til projektet har været knyttet en styregruppe, som har haft følgende sammensætning:

Gyrite Brandt, Københavns Energi Arne Mogensen, Frederiksborg Amt Niels-Christian Terkildsen, Frederiksborg Amt Susanne Hartelius, Københavns Amt Susanne Andreasen, Københavns Amt Merete Olsen, Roskilde Amt

Projektgruppen har haft følgende medlemmer:

Kurt Klitten (GEUS), projektleder fra 15. januar 2003 Thorkild Feldthusen Jensen (GEUS) projektleder indtil 15. januar 2003 (nu Rambøll). Flemming Larsen (DTU) Torben O. Sonnenborg (DTU, derefter KU og nu GEUS) Lene Hjelm Poulsen (DTU, nu GeosErvex) Christian Steen Wittrup (GEUS, derefter DTU og nu GEO) Kenneth Berger (DTU og nu Vestsjællands Amt) Peter Madsen, (stud. polyt. DTU, nu Novozymes) Kristoffer A. Ulbak, (stud. polyt., DTU, nu Københavns Amt) Ellen Prip Bonnesen, (stud.polyt., DTU, nu PhD, DTU)

Derudover har følgende leveret væsentlige bidrag til projektet:

Lars Troldborg (GEUS) Torben Bidstrup (GEUS) Jeppe Rølmer Hansen (GEUS) Erik Clausen (GEUS) Søren Jessen (DTU & GEUS, nu PhD, DTU)

Tidligere projektleder Thorkild Feldthusen Jensen har efterfølgende læst alle rapporterne i udkast, og givet nyttige kommentarer og forslag til forbedringer.

København, den 1. april 2006

1. Indledning

1.1 Introduktion

Som en del af projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er der gennemført en regional, geofysisk kortlægning af grænsefladen mellem fersk- og saltvand i grundvandsmagasinerne i kalkmagasinerne. Denne undersøgelse er dels gennemført på baggrund af resultater fra borehulslogging i projektområdet /2/ og dels ved anvendelse af den transiente elektromagnetiske (TEM) målemetode. TEM-sondering er valgt som metode, da denne er velegnet til at bestemme dybden til en god leder, hvilket i dette tilfælde er saltvandet i kalkformationerne. Med hensyn til en beskrivelse af anvendte TEM systemer og tolkninger henvises til appendiks A og B.

Undersøgelsesområdets geografiske udstrækning fremgår af figur 1-1. Det omfatter hele den del af de tre amter i Nordøstsjælland, hvor prækvartæroverfladen udgøres af enten Danienkalk eller af Skrivekridt. Følgelig følger den vestlige afgrænsning af projektområdet Selandien aflejringernes østlige udbredelsesgrænse (Lellinge Grønsandskalk og Kertemindemergel).



Figur 1-1 Den geografiske udbredelse af projektområdet, hvor Skrivekridtet og Danienkalken udgør den prækvartære overflade. I figuren er også vist den i projektet benyttede zoneinddeling.

I denne delrapport præsenteres den del af kortlægningen af grænsefladen mellem fersk- og saltvandet i kalkmagasinerne, som er gennemført ved hjælp af TEM-sonderinger. Sonderingerne er gennemført i perioden fra november 2002 til april 2003 med firmaet Rambøll som operatør. Tilrettelæggelse af feltarbejdet og tolkning af resultaterne er foretaget af projektgruppen.

Resultaterne af de geofysiske borehulsundersøgelser /2/ og undersøgelserne ved Karlslunde /3/ har dokumenteret, at overgangen mellem fersk- og saltvand i kalkmagasinerne optræder som en overgangszone, hvor koncentrationen af residualt saltholdigt porevand stiger jævnt med stigende dybde. Ved tolkning af TEM-sonderinger bestemmes normalt, "dybden til en god leder", defineret som en relativ skarp grænse mellem et dårligt og et godt ledende lag. Da kontakten mellem fersk- og saltvand forekommer som en overgangszone, hvor der optræder en gradvis ændring af formationens elektriske ledningsevne, har det været nødvendigt at foretage en mere generel analyse af TEM-tolkningsresultater i relation til en sådan overgangszone. Dette er gennemført ved teoretiske beregninger over modeller med realistiske variationer i lagfølgens elektriske egenskaber.

Nærværende rapport har følgende indhold udover det indledende kapitel: Kapitel 2 giver et resume af rapportens indhold og hovedkonklusioner. Kapitel 3 præsenterer de forhold, som kontrollerer den specifikke elektriske modstand (= resistivitet) i kalkbjergarter som grundlag for tolkningerne af TEM-sonderingerne. Diskussionen af kalkbjergarternes resistivitet er kun gennemført for Skrivekridt, idet overgangszonen til saltvand næsten udelukkende optræder i denne formation /2/. Med henblik på anvendelse ved tolkning af TEM-sonderingerne indeholder kapitel 3 tillige en sammenstilling af den opnåede viden om resistiviteten i overgangszonen som resultat fra de geofysiske borehulsundersøgelser.

I kapitel 4 præsenteres resultaterne af det teoretiske studie af TEM-sonderingers respons på en overgangszone med en gradvis faldende resistivitet med større dybde. De teoretiske TEM-sonderinger er beregnet på typiske geologiske lagfølger fra projektområdet, og med forskellige variationer i porevandets klorid koncentration i overgangszonen. På baggrund af disse teoretiske resultater er der udarbejdet retningslinjer for tolkningen af "den gode leder" i forhold til overgangszonen.

Kapitel 5 præsenterer resultaterne af TEM-kortlægningen i projektområdet. I alt er der gennemført 344 sonderinger lokaliseret langs seks profillinier placeret i forskellige dele af projektområdet. I kapitel 6 sammenfattes resultaterne af kortlægningen af saltvandsgrænsen.

1.2 Målsætninger for delprojekt

Det overordnede formål med denne del af projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er at etablere et regionalt billede af beliggenheden af grænsefladen mellem fersk- og saltvand i kalkmagasinerne i den nordøstlige del af Sjælland. Mere specifikt er det hovedformålet:

- At gennemføre et teoretisk studie som understøtter tolkningen af TEMsonderingerne, idet disse er udført i områder, hvor kontakten mellem fersk- og saltvand optræder som overgangszoner med en gradvis øget klorid koncentration med dybden resulterende i en jævn stigning nedefter i formationens elektriske ledningsevne (faldende formations-resistivitet).
- At gennemføre en regional kortlægning af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne med TEM metoden.

2. Resume

Projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er finansieret af Københavns Energi, Københavns Amt, Frederiksborg Amt og Roskilde Amt, og gennemført i et samarbejde mellem Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet. Projektet er gennemført i perioden fra august 2002 til november 2005.

Det overordnede formål med projektet er at tilvejebringe en bedre viden om karakteren af saltvandsgrænsen og dybden til denne i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland med henblik på at kunne vurdere mulighederne for en bæredygtig udnyttelse af den dybere og ikke forurenede del af disse grundvandsmagasiner. I forbindelse med gennemførelse af projektets fase 1 er der blandt andet foretaget en regional kortlægning af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne med den transiente elektromagnetiske metode (TEM), hvis resultater præsenteres i denne rapport.

Ved tolkning af TEM-sonderinger bestemmes normalt "dybden til den gode leder". Denne tolkede geofysiske grænseflade præsenteres som en relativt skarp grænse mellem geologiske lag, som leder en elektrisk strøm relativt dårligt, og et lag som leder en strøm relativt godt. Da kontakten mellem fersk- og saltvand forekommer som en overgangszone¹, hvor kontrasterne mellem lagenes elektriske ledningsevne ikke er skarp, har det været nødvendigt at foretage et teoretisk studie af karakteren af TEM-resultater under sådanne forhold. Dette er gennemført ved teoretiske model- og tolkningsberegninger ved anvendelse af realistiske variationer i lagfølgens elektriske egenskaber.

De teoretiske TEM-sonderinger er beregnet på typiske geologiske lagfølger fra projektområdet, og med varierende gradient/stigning i formationens elektriske ledningsevne med dybden i overgangszonen. Resultaterne af disse modelleringer viser, at ved tolkning af TEM-sonderinger i situationer med en gradvis ændring i den dybeste formations elektriske ledningsevne, er det nødvendigt at definere to gode ledere nederst i den geofysiske model:

 En nedre god leder defineret som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller under 15 ohmm, og hvor alle eventuelle underliggende lag har en endnu mindre resistivitet, og

¹ Overgangszonen mellem ferskvand og saltvand i er i dette projekt defineret ud fra resultater fra de geofysiske borehulsundersøgelser /2/. Grænsen mellem fersk- og saltvand i Skrivekridtet defineres som den dybde, hvor formationsledningsevnen er 25 mS/m eller højere (svarende til en formationsresistivitet på 40 ohmm eller mindre) som en indikation på, at formationens porevand har en koncentration af klorid på ca. 300 mg/l eller mere. Grænsen mellem det ferske og det saltvandspåvirkede grundvand i Skrivekridtet sættes dog ikke altid kategorisk ved ledningsevnen 25 mS/m (eller ved 40 ohmm), idet karakteren af variationen også inddrages i vurderingen. Hvis eksempelvis ledningsevnen (eller resistiviteten) igennem et større dybdeinterval i Skrivekridtet har ligget ret konstant på en noget lavere værdi end 25 mS/m, og der fra en given dybde og oftest i forbindelse med et mergellag pludselig indtræder en med dybden jævnt stigende ledningsevne, da vil dybden, hvor denne stigning indtræffer, blive tolket som grænsen til saltvandspåvirkning uanset at ledningsevnen ved stigningens indtræden er mindre end "grænseværdien" 25 mS/m (eller at resistiviteten er højere end "grænseværdien" 40 ohmm).

- **en øvre god leder** defineret som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller under 40 ohmm, og hvor alle underliggende lag ligeledes har en resistivitet der er mindre, inklusive den nedre gode leder.

Hvor der i den geofysiske tolkningsmodel forekommer både en øvre og en nedre god leder vil der således i den geologiske lagserie optræde niveauer mellem disse med en resistivitet på mellem 40 og 15 ohmm. Alle elektriske ledningsevner og resistiviteter i denne rapport er givet ved formationstemperaturer.

Resistiviteter på 40 ohmm og 15 ohmm optræder i Skrivekridt, hvor der i porevandet er en ionkoncentration ækvivalent med klorid koncentrationer på henholdsvis ca. 400 mg/l og ca. 1200 mg/l klorid (formationsfaktor 4). En ækvivalent klorid koncentration er defineret som den koncentration af klorid som svarer til en observeret elektrisk ledningsevne i vandet under antagelse af, at hele ionstyrken skyldes tilstedeværelsen af klorid.

Resultaterne fra undersøgelse af overgangszonens karakter i Skrivekridtet har vist, at denne i det undersøgte område ved Karlslunde forekommer over en zone, som er mere end 200 m tyk /3/. Med den benyttede opsætning i TEM-sonderingerne i dette projekt (en opsætning, som er standard i Danmark), er indtrængningsdybden omkring 150 m's dybde, mens den ved HTEM metoden er omkring 200 m. Den benyttede TEM opsætning vil således kun give oplysninger om en del af overgangszonen. I enkelte tilfælde har det ikke været muligt at definere en god leder, hvilket må formodes at skyldes en meget lille gradient i saltkoncentrationen nedefter. Bortset fra sådanne få tilfælde viser tolkningsresultaterne fra TEM-sonderingerne, at der indenfor måledybden overalt i projektområdet optræder en god leder med en resistivitet mindre end 15 ohmm, og at der i mange delområder tillige optræder en god leder ovenpå den nedre gode leder, og med en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm.

I de tilfælde, hvor der kun er en nedre god leder, afspejler denne beliggenheden af overgangszonen. I de tilfælde, hvor der også er en øvre god leder, er det sidstnævnte, som afspejler overgangszonens dybdeforhold. De teoretiske modelstudier har påvist, at gradienten af formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen er bestemmende for, om tolkningen af TEM-sonderingerne vil resultere i en eller to gode ledere: 1) hvor gradienten i overgangszonen er større end 5,0 mS/m pr. m vil der kun optræde en god leder, som vil have en resistivitet mindre end 15 ohmm, og 2) hvor gradienten er mindre end eller lig 5,0 mS/m pr. m vil der ovenover den nedre gode leder tillige optræde en leder med en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm.

Situationen 1, hvor gradienten nedefter i formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen er større end 5 mS/m pr. m. Denne situation viser sig ved, at den øvre og nedre gode leder vil være sammenfaldende i tolkningsmodellerne, som derfor kun vil have en god leder. Denne gode leder vil have en resistivitet på eller under 15 ohmm. Afvigelsen mellem grænsen til den tolkede gode leder og grænsen til overgangszonen i de teoretiske modeller vil typisk være 10 m eller mindre, og i så godt som alle tilfælde vil den tolkede gode leder ligge under grænsen til overgangszonen. **Situationen 2**, hvor gradienten nedefter i formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen er mindre end eller lig 5,0 mS/m pr. m. Denne situation er afspejlet i tolkningsresultatet ved, at dette har en øvre god leder med en resistivitet på mellem 15 ohmm og 40 ohmm, og en nedre god leder med en resistivitet på eller under 15 ohmm. Den øvre gode leder vil, jævnfør de teoretiske modelstudier, ligge fra 10 til 35 m nede i overgangszonen. Afstanden mellem den øvre og den nedre gode leder vil være betinget af dels resistiviteten i den geologiske lagserie over overgangszonen og dels af dybden til overgangszonen samt størrelsen af gradienten i overgangszonen. Den nedre gode leder vil med de givne geologiske lagserier ofte forekomme mindre end 50 m under grænsen til den øvre gode leder. Hvor gradienten i overgangszonen er stykvis lineær, forekommer den nedre gode leder mindre end 10 m under skiftet i gradient, som i projektområdet typisk vil ske ved et mergellag (eksempelvis Kølbygård Mergellaget).

Ved tolkning af projektets 344 nye TEM-sonderinger suppleret med enkelte tidligere udførte TEM-sonderinger er der opnået et regionalt billede af fersk-saltvandsgrænsen i kalkbjergarterne i det østlige og nordøstlige Sjælland. Hovedresultaterne af denne kortlægning er sammenfattet for hver af projektområdets seks zoner, se figur 1-1, som følger:

Zone 1 – området ved Alnarpdalen: I dette område udgør Danienkalken den prækvartære overflade, bortset fra et mindre område med Selandien aflejringer mellem Esrum sø og Arresø (nedforkastet blok eller som på Amager en synklinal). Overgangszonen til saltvandet i kalkmagasinerne optræder ifølge TEM-sonderingerne omkring kote -160 m i den centrale del af strukturen og i ca. kote -100 m på sydvestflanken af strukturen. Disse dybder tyder på, at overgangszonen i størstedelen af området må formodes at forekomme fra top Skrivekridt. Dybden til Skrivekridtet kendes imidlertid kun fra to olieefterforskningsboringer nord for Langstrup, hvor top Skrivekridt blev truffet i kote -170 m og -179 m. På baggrund af oplysninger fra fem dybe NORDVAND boringer omkring den nordlige del af Esrum sø, som ganske vist ikke har gennemboret Danienkalken, er det sandsynligt, at Skrivekridtet her ligger i tilsvarende dybde, dvs. kote -150 til -200 m. I flere af disse dybe NORDVAND boringer i zone 1 forekommer grundvandet i den nedre del af Danienkalken at være lettere saltvandspåvirket.

Zone 2 – området mellem Alnarpdalen og Søndersødalen: I dette område udgør Danienkalken ligeledes prækvartæroverfladen. I den østlige del optræder saltvandsgrænsen ifølge TEM-sonderingerne under kote ca. -150 m. I et par dybe boringer i denne zone er overgangszonen til saltvandet endnu ikke truffet ved boringernes bund i henholdsvis kote -111 m (Langstrup) og kote -77 m (Sjælsø). I områdets vestlige del er saltvandsgrænsen i TEM-sonderinger påvist at forekomme mellem kote -50 m og -80 m. Oplysninger fra boringer i denne del af området viser, at overgangszonen til saltvandet her forekommer fra top Skrivekridt, og at denne bjergartsgrænse i nord ligger i kote ca. -90 m stigende mod syd til kote ca. -70 m.

Zone 3 - Søndersødalen: Danienkalken udgør også her den prækvartære overflade. I den vestlige del af området, ved Værebro kildeplads, optræder saltvandsgrænsen ifølge TEM-sonderingerne omkring kote ca. -70 m. Saltvandsgrænsen stiger jævnt videre mod øst til omkring kote -50 m ved Tibberup kildeplads. Boringer ved Søndersø og Tibberup har vist, at saltvandsgrænsen ligger ved toppen af Skrivekridtet.

Zone 4 - Storkøbenhavn og vest for København: Danienkalken udgør også her den prækvartære overflade bortset fra mindre lokaliteter i havne- og City området, hvor der er observeret Selandien aflejringer. De geologiske forhold i denne zone adskiller sig væsentligt fra de tre første zoner, ved at Skrivekridtoverfladen generelt ligger højere, især i den centrale og østlige del, og Danienkalken og de kvartære dæklag her samtidig er tyndere. Ifølge TEM-sonderingerne ligger saltvandsgrænsen højt i den vestlige del af København, ca. i kote -50 m, og den falder imod vest til omkring kote -100 m ved Roskilde Fjord. Da Skrivekridtoverfladen umiddelbart vest for København ligger betydeligt højere end kote -50 m, betyder dette, at saltvandsgrænsen her træffes et stykke nede i Skrivekridtet. Dette er blevet verificeret ved loggingundersøgelser, dels i en lang række boringer på KE´s kildepladser i Vestkøbenhavn, og dels i kommunale indvindingsboringer i Glostrup og Ballerup. I alle disse tilfælde har loggingundersøgelserne vist, at saltvandsgrænsen optræder i relation til et af de regionalt udbredte mergellag i Skrivekridtet. Længere mod vest, hvor Skrivekridtoverfladen dykker, viser boringen ved Hove, at saltvandsgrænsen her træffes ved toppen af Skrivekridtet.

Zone 5 – Amager: Prækvartæroverfladen udgøres af Danienkalk med undtagelse af et mindre område centralt på øen ved Tårnby samt nord for Kastrup ud for Amager Strand, hvor der optræder Selandien aflejringer. Sidstnævnte er påvist at forekomme i relation til to store synklinalstrukturer i Danienkalken og Skrivekridt og ikke som tidligere opfattet i nedforkastede blokke. Carlsbergforkastningen skærer diagonalt gennem øen fra Kalvebodsbrygge gennem Amager fælled og mod sydøst gennem Tømmerup videre ud til midt på sydkysten, se Bilag 11. Vest for Carlsbergforkastningen udgøres prækvartærovefladen af Danien bryozokalk, medens den øst herfor udgøres af Danien Københavnkalk og som nævnt lokalt af Selandien Grønsandsaflejringer.

Der er ikke udført TEM-sonderinger i dette område på grund af dets bymæssige karakter. Loggingundersøgelser i en række boringer i Tårnby og Dragør i 90érne i forbindelse med risikovurderinger for grundvandet i relation til "Øresundsforbindelsen" har imidlertid givet overraskende informationer om saltvandsgrænsen på øen. Denne ligger således i et større område midt på øen og mod syd til Dragør dybere end kote -60 m på trods af, at grundvandsspejlet her igennem mere end 50 år har været sænket til under kote 0 som følge af Tårnby og Dragør vandværkers indvinding. Den store dybde fortsætter mod øst til tæt ved Øresundskysten, hvorimod dybden mindskes kraftigt mod vest, således at saltvandet nær den gamle kystlinie (østgrænsen af de inddæmmede arealer) og mod sydøst nær Carlsbergforkastningen træffes i Danienkalken allerede i kote -20 m. Ingen boringer har nået Skrivekridtet centralt på øen, men det forventes at ligge under kote -100 m, hvorimod det mod syd under Dragør er truffet i kote -64 m.

Zone 6 – Køge Bugt og Stevns: I dette område udgøres prækvartæroverfladen imod vest af Selandien Grønsandsaflejringer (Kerteminde Mergel over Grønsandskalk), i den centrale del af Danienkalk (Bryozokalk) og stedvis langs Øresundskysten af Skrivekridt. Endvidere er det kvartære dæklag i store dele af området forholdsvist tyndt.

TEM sonderingerne indikerer, at i den sydvestlige del er Danienkalken ikke saltvandsførende. Endvidere, at den primære saltvandsgrænse må formodes at træffes ved grænsen til den formodentlig dybtliggende Skrivekridt, hvortil ingen boringer i området er nået ned. En mulig forklaring på de forhøjede kloridtal på kildepladser i området kan være den, at Kerteminde Mergel indeholder residual saltholdigt porevand.

På den sydøstlige halvdel af området, på Stevns, ses dybden til saltvandsgrænsen at blive mindre mod øst, således at den fra at ligge i kote ca. -100 m syd for Herfølge optræder i kote ca. -40 m ved Klippinge øst for Hårlev. Sammenholdes dette med, at Skrivekridtover-fladen generelt hælder fra øst mod vest, synes overgangszonen til saltvand således at optræde i toppen af Skrivekridt, hvilket er verificeret i boringerne i Klippinge og Hårlev. En række undersøgelser tyder dog på, at der lokalt i området Køge -Tryggevælde Å – Herfølge forekommer saltvandsforekomster, som kan være knyttet til forekomsten af forkastninger. Endelig kan der tæt på kysten være tale om salt residualt porevand fra eksempelvis Lithorinahavet.

I den nordøstlige del, hvor Skrivekridtet optræder direkte under de glaciale dæklag, viser TEM-sonderingerne, at saltvandsgrænsen optræder et stykke nede i Skrivekridtet. Bortset fra lokalt i Ishøj området er dette verificeret ved loggingundersøgelser i flere dybe KEindvindingsboringer i området, således ved Karlslunde, Lyksager og Thorslunde. Det samme observeredes ved den 269 m dybe projektboring ved Karlslunde Mose, hvor saltvandsgrænsen optrådte i relation til et mergellag i kote -67 m. Den nye projektboring lige øst for Tune by har derimod verificeret, at når Skrivekridtoverfladen dykker mod vest og overlejres af større mægtighed af Danienkalk vil saltvandsgrænsen ikke længere ligge et stykke nede i Skrivekridtet, men træffes ved top Skrivekridt, som ved Tune lå i kote -44 m.

I den nordvestlige del indikerer TEM-sonderingerne ligesom i den sydvestlige del, at Danienkalken ikke er saltvandsførende, og at den primære saltvandsgrænse må formodes at træffes ved grænsen til det formentligt dybtliggende Skrivekridt. Der foreligger ingen oplysninger om boringer, som har nået ned til Skrivekridtet i denne del af zone 6.

3. Skrivekridts elektriske ledningsevne

I dette kapitel gives en generel præsentation af forhold, som er styrende for den elektriske ledningsevne i sedimenter og dermed for deres resistivitet (=specifik elektrisk modstand). Da overgangszonen fra ferskvand til saltvandet i projektområdet næsten udelukkende træffes i Skrivekridtet, er der i fremstillingen alene set på forholdene i denne formation.

På baggrund af resultater fra en ny dyb undersøgelsesboring ved Karlslunde Mose /3/, samt gennemførte borehulsundersøgelser i dette projekt /2/, præsenteres også en generel model for karakteren af overgangszonen mellem fersk- og saltvand i Skrivekridt.

3.1 Resistivitet i Skrivekridt

Resistiviteten i en bjergart er hovedsaglig bestemt af porevandets resistivitet og den elektriske modstand i kontakten mellem overfladerne af mineraler og porevand. Det er foreslået, at en geologisk formations samlede resistivitet kan beskrives med en model, hvor de enkelte bidrag betragtes som parallelt koblede ledere /4/. En formations samlede resistivitet kan derfor beskrives med følgende ligning:

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_s} \tag{1}$$

Hvor p_f er bjergartens samlede resistivitet [ohmm], p_w er porevandet resistivitet [ohmm] og p_s er resistiviteten i kontakten mellem mineraler og porevand [ohmm].

Visse typer mineraler bidrager væsentlig til bjergartens resistivitet. Således eksempelvis lermineraler, der indeholder et elektrisk dobbeltlag, hvori der kan foregå en transport af ioner. Skrivekridt er imidlertid en relativ homogen karbonatbjergart, med et forholdsvis beskedent indhold af ler /5/, og variationer i bjergartens resistivitet er derfor i højere grad betinget af variationer i porevands resistivitet. Lag af mergel i Skrivekridt kan dog lokalt bidrage betydeligt til formationens elektriske ledningsevne, hvilket bl.a. kan påvises ved geofysisk borehulslogging, se eksempelvis figur 3-2 og figur 3-4.

I overgangszonen mellem fersk og salt porevand i Skrivekridt vil formationens resistivitet således helt overvejende være betinget af koncentrationen af opløste ioner i porevandet. Porevæskens resistivitet vil være afhængig af temperatur og tryk. Ved dybder mindre end 200 m kan der ses bort fra variationen i trykket /6/, mens det er nødvendigt at korrigere for temperaturens effekt på vandets resistivitet. Porevandets evne til at lede en strøm udtrykkes sædvanligvis ved væskens elektriske ledningsevne, som er den reciprokke værdi af den specifikke elektriske modstand (ohmm). Da ledningsevne normalt opgives i mS/m, fås følgende udtryk:

$$o = 1000/\sigma$$

(2)

1

Temperaturens effekt på porevandets elektriske ledningsevne kan beregnes ved formlen:

$$EC_{t} = (0,47 + 0,0213 * t) * EC_{25^{\circ}C}$$
(3)

Hvor EC_t er porevandets elektriske ledningsevne (mS/m) ved temperaturen t, og $EC_{25}^{o}C_{C}$ er den elektriske ledningsevne ved $25^{0}C$ /6/.

Det fremgår af ligning (3), at en væskes elektriske ledningsevne ved 25[°]C er omkring 30 % større end ved en formationstemperatur på omkring 10[°]C. I denne rapport, er alle nævnte elektriske ledningsevner og resistiviteter opgivet ved aktuel formationstemperatur.

For sandbjergarter uden ler er opstillet følgende udtryk for sammenhænge mellem formationens og porevandets elektriske modstand /7/

$$\rho_f = F \cdot \rho_w \tag{4}$$

hvor ρ_f [ohmm] er formationens resistivitet, F [-] er den såkaldte formationsfaktor og ρ_w [ohmm] er porevandets resistivitet.

Formationsfaktoren F afhænger af porøsiteten φ . I ikke cementerede formationer er det påvist /7/:

at $F = \varphi^{-2}$ (5)

Udtrykkene (4) og (5) kan også som en rimelig tilnærmelse benyttes for Skrivekridt, idet begge typer af geologiske formationer har relativt store sammenhængende porerum, hvor opløste ioner kan transporteres frit i porevandet.

Porevandet i Skrivekridt vil være en blanding af ferskt grundvand og en større eller mindre mængde residualt havvand, og det er derfor relevant at se på sammensætningen af havvand. Skrivekridtet blev aflejret i et havområde, som må formodes at have været i kontakt med oceanerne /5/, og dets oprindelige porevand har derfor haft en kemisk sammensætning, som svarer til oceanerne. Oceanisk havvands kemiske sammensætning fremgår af tabel 3-1.

	Na	Mg	К	Ca	CI	Sulfat	HCO3
mg/l	10.770	1.290	412	380	18.800	2.715	67
mill. ækv/l	468	1,2	10,6	2,5	529,6	56,6	1,1
Procent anion					90,1	9,6	0,3

Tabel 3-1 Koncentrationen af ioner i havvand med en oceanisk sammensætning. Fra /6/.

I tabel 3-1 er kun opgivet koncentrationen af de ioner, som optræder i de største koncentrationer i oceanerne. Koncentrationerne udtrykt i mg/l og i tusindedele ækvivalenter per liter [mill. ækv/l]. Koncentrationen af klorid omkring 18.800 mg/l /6/, og porevand med en koncentration af klorid i denne størrelse, vil i rapporten blive omtalt som porevand med en "oceanisk sammensætning". Til sammenligning er grænseværdien for klorid i drikkevand 250 mg/l (nedsat ifølge Drikkevandsdirektivet i 2003 fra tidligere 300 mg/l).

Det fremgår af tabel 3-1, at i havvand med en oceanisk sammensætning, bidrager klorid med omkring 90 % af den samlede sum af anionækvivalenter i vandet. Ved en relativt stor opblanding af oceanisk havvand, vil fejlen ved alene at relatere porevandets elektriske ledningsevne til koncentrationen af klorid således være relativt lille. Dette vil ikke være gældende ved overgangen til ferskvandszonen, hvor andre ioner såsom sulfat og bikarbonat vil udgøre en betydelig del af ionerne i porevandet. Sammenhængen mellem porevandets ækvivalente koncentration af klorid og dets elektriske ledningsevne fremgår af figur 3-1.



Figur 3-1 Sammenhæng mellem porevands koncentration af klorid og dets elektriske ledningsevne./3/. Forsøget er udført ved 25 °C og EC er omregnet til en værdi ved 10 °C med ligning (3).

I intervallet fra 0 til 18.800 mg/l er relationen tilnærmelsesvis en lineær sammenhæng mellem koncentration af klorid og den elektriske ledningsevne. I oceanisk havvand er vandets elektriske ledningsevne omkring 3.600 mS/m ved 10 °C, og i ferskvand (Cl <300 mg/l) er den elektriske ledningsevne mindre end 100 mS/m. Sammenhængen mellem porevandets elektriske ledningsevne og koncentrationen af klorid, kan udtrykkes ved ligningen:

$$Klorid[mg/L] = K \cdot EC[mS/m]$$
(6)

hvor koncentrationen af klorid er opgivet i mg/l, og den elektriske ledningsevne EC er opgivet i mS/m ved 10° C. K er en konstant, som ved denne temperatur og ved en kloridkoncentration i intervallet fra 0 til 1500 mg/l har værdien ca. 4.

Som følge heraf svarer en ledningsevne i porevandet på 100 mS/m ved formationstemperatur til ca. 400 mg/l ækvivalent klorid, som i praksis vil afspejle et kloridindhold på ca. 300 mg/l, idet sulfat og bikarbonat typisk bidrager med ca. 25 % i dette "kloridniveau".

3.2 Overgangszonens karakter

I forbindelse med projektets gennemførelse er der etableret en ny undersøgelsesboring ved Karlslunde Mose /3/. Boringen er placeret ca. 800 m fra kysten, i et område hvor terrænets kote er omkring +2 m. Boringens dybde er 269 m, og mægtigheden af de kvartære lag er her omkring 30 m. Fra dybden 30 m, og til boringens bund 269 m u.t., er der boret i kridt. Den samlede mægtighed af Skrivekridtet vurderes på borestedet at være ca. 2.000 m /8/.

Der er udtaget kerneprøver i hele den gennemborede sekvens af Skrivekridt, og porevandet er centrifugeret fra kernerne. På porevandet er der analyseret for en række parametre, herunder klorid og porevandets elektriske ledningsevne /3/. Porevandets elektriske ledningsevne og formationens ledningsevne, bestemt ved en geofysisk borehulslog af typen induktionslog, fremgår af figur 3-2.



Figur 3-2 Karlslunde Mose boringen. Elektrisk ledningsevne i porevand og i formationen (begge ved aktuel temperatur, dvs. fra 10 °C til 15 °C)). Målingerne på porevandet er foretaget i laboratoriet på centrifugeret vand fra kerneprøverne, og målingerne af formationens elektriske ledningsevne er målt ved geofysisk borehulsundersøgelse (induktionslog). Boringen er udbygget med et jernrør til 100 mut, og induktionslog har derfor ikke kunnet udføres ovenover denne dybde. /3/.

Resultaterne af porevandsanalyserne viser, at der er ferskvand fra terræn og til omkring 70 mut, hvor porevandets elektriske ledningsevne er omkring 60 mS/m. I denne dybde ses et markant spring i porevandets ledningsevne til ca. 90 mS/m, hvorefter ledningsevnen stiger jævnt til ca. 590 mS/m i dybden 104 m u.t.. Dette svarende til en gradient omkring 14 mS/m pr. m. Fra 104 m til bunden ved 269 m u.t. forekommer en stykvis lineær gradient i den

elektriske ledningsevne. På porevandet fra prøverne nær bunden i 269 m dybde er målt værdier omkring 3.800 mS/m ved den aktuelle temperatur, som formodes at være ca. 15 ⁰C på denne dybde. Dette svarer til 4.750 mS/m ved 25⁰C, hvilket er ca. 90 % af den elektriske ledningsevne i oceanisk havvand. Det skønnes, at porevand med en oceanisk sammensætning træffes ca. 50 m dybere end boringens bund, hvilket svarer til kote ca. -320 m /3/. Den stykvise linearitet i den elektriske ledningsevne skyldes forekomsten af lerlag i skrivekridtet, idet sedimentets effektive diffusionskoefficient er mindre i disse, hvilket påvirker koncentrationsgradienten /3/.

Induktionsloggen i boringen ved Karlslunde viser, at formationens elektriske ledningsevne er omkring 100 mS/m i dybden 100 mut. Dette svarer til resultater fra målinger i boringer fra Skrivekridt i området /2/. På grund af stålforingsrør i boringen kunne induktionsloggen ikke måles ovenover 100 m dybde. Fra 100 m og til 269 m stiger formationens elektriske ledningsevne gradvist nedefter til 700 mS/m ved bunden. Dette giver en gradient i formationens elektriske ledningsevne på omkring 3,5 mS/m pr. m. I lighed med resultaterne fra porevandsundersøgelserne ses en stykvis linearitet i formationens elektriske ledningsevne.

Ovennævnte gennemsnitlige gradient på ca. 3,5 mS/m pr. m i formationsledningsevnen i Skrivekridtet I Karlslunde boringen og på omkring 14 mS/m pr. m i porevandets ledningsevne kan sammenlignes med observationerne i en boring i det sydlige England /9/, hvor der er påvist en 300 m overgangszone i Skrivekridtet, og hvor gradienten i porevandets ledningsevne er observeret at være omkring 17 mS/m pr. m /10/.

Jævnfør figur 3-2 ovenfor ses formationsfaktoren i Skrivekridtet fra 100 m til 270 m dybde i Karlslunde boringen at stige fra 4,5 til 5,5 ved porøsiteter omkring 40 %. Da resultater fra projektets geofysiske borehulsundersøgelser om overgangszonen alle vedrører den øverste del af Skrivekridtet, hvor porøsiterne er omkring 45%, kan formationsfaktoren her påregnes at være omkring 4. Denne værdi anvendes derfor i projektet såvel som i denne rapport. I matrix i den relativt homogene øvre Skrivekridt regnes der således med, at porevandets ledningsevne er omkring 4 gange formationens ledningsevne (ligning 4). På basis af ligning (6) og med faktoren K= ca. 4 kan porevands elektriske ledningsevne herefter omregnes til en ækvivalent kloridkoncentration (se nedenfor).

Den direkte sammenhæng mellem bestemte koncentrationer af klorid i porevandet fra Karlslunde Mose boringen og formationsledningsevnen målt med Induktionslog og omregnet til resistivitet, fremgår af figur 3-3. Heraf ses, at ved koncentrationer af klorid omkring 100 mg/l er den målte resistivitet i formationen omkring 60 ohmm og ved koncentration af klorid på omkring 300 mg/l er den målte resistivitet under 40 ohm. Det skal erindres, at porevandet også indeholder andre ioner end klorid. Ved en koncentration på omkring 1.000 mg/l er den målte resistivitet ca. 15 ohmm. Endvidere ses det, at resistiviteten falder til 2 ohmm ved de koncentrationer af klorid på omkring 17.700 mg/l, som der blev påvist i boringens bund.

Resultaterne vedrørende overgangszonen i Skrivekridtet i værkstedsområdet ved Karlslunde /3/ kan udbygges med resultater fra borehulsundersøgelser /2/, med henblik på at opstille en generel, konceptuel model for overgangszonen i projektområdet. Figur 3-4 viser resultaterne af borehulslogs fra to udvalgte boringer i projektområdet, henholdsvis fra Ballerup og fra Æbelholt syd for Arresøen. De viste borehulslogs omfatter målinger af formationernes naturlige gammastråling (gamma-log), elektriske ledningsevne (induktionslog) og resistivitet (resistivitetslog).



Figur 3-3 Karlslunde boringen. Målte koncentrationer af klorid i porevandet (indeholder også andre ioner) og formationens elektriske ledningsevne målt ved induktionslog ved aktuel temperatur /3/.

De geofysiske borehulsundersøgelser i boringen ved Æbelholt viser, at Danienkalken nederst har en formationsledningsevne på omkring 15 mS/m (figur 3-4 A). Dette indikerer en porevandsledningsevne på 75 mS/m, idet formationsfaktoren i Danienkalken kan påregnes at være omkring 5, dvs. lidt højere end øverst i Skrivekridtet pga. lidt mindre porøsitet i Danienkalken. En porevandsledningsevne på 75 mS/m svarer til en ækvivalent kloridkoncentration på omkring 300 mg/l (ligning 6). Overgangszonen mellem ferskvand og saltvand forekommer i denne boring fra kote -80 m ved den geologiske grænse mellem Skrivekridt og Danienkalk, hvor formationsledningsevnen ændres fra 15 mS/m til 25 mS/m svarende til et fald i resistiviteten fra ca. 60 ohmm til 40 ohmm. I overgangszonen viser induktionsloggen at formationens elektriske ledningsevne øges lineært med stigende dybde med en gradient på ca. 3,8 mS/m pr. m. I kote -110 m er formationens elektriske ledningsevne således 140 mS/m, hvilket svarer til en porevandsledningsevne på 560 mS/m (formationsfaktor 4) afspejlende en ækvivalent kloridkoncentration på omkring 2250 mg/l (ligning 6).

I boringen ved Ballerup (figur 3-4 B) ses grænsen mellem Danienkalken og Skrivekridtet i kote -31 m. Formationernes elektriske ledningsevner viser, at det ferske grundvand i Danienkalken fortsætter et stykke ned i Skrivekridtet. I Danienkalken er ledningsevnen omkring 10 mS/m, og i Skrivekridtet ses formationsledningsevnen at stige lineært med dybden fra 10 mS/m i kote -31 m til ca. 25 mS/m i kote ca. -54 m svarende til en resistivitet på 40 ohmm. Herfra og ned til kote -70 m er formationens ledningsevnen øges med dybden med en gradient på 1,2 mS/m, hvorved formationsledningsevnen ved boringens bund i kote -98 m er ca. 55 mS/m. Såvel gammaloggen som induktions- og resistivitetslog viser forekomst af mergellag i Skrivekridtet i form af anomalier i netop de nævnte dybder, hvor ledningsevnen i Skrivekridtet ændres (koterne -54 m og -70 m). Dette indikerer, at mergellagene har be-

tydning for såvel udvaskning af det residuale saltholdige porevand som for diffusionen opad af klorid fra dette. Ferskvandet synes således at have udvasket saltvandet i Danien og den øverste del af Skrivekridtet ned til mergellaget i kote –54 m, og næsten udvasket saltvandet imellem de to megellag ned til kote –70 m. Herunder er fortyndingen antagelig sket kun ved diffusion, hvilket resulterer i den observerede gradient.



Figur 3-4 Gamma-, induktions- og resistivitetslog fra: A) Boring ved Æbelholt Kildeplads (DGU nr. 187.1354); B) Boring fra Ballerup (DGU nr. 200.4386). Udsnittene viser overgangen mellem det ferske og det saltholdige porevand i henholdsvis top Skrivekridt og ved et mergellag i Kridtet.

Tabel 3-2 viser gradienter i Skrivekridtets formationsledningsevne således som de er observeret ved borehulsundersøgelser /2/ i udvalgte boringer langs de seks TEM-profillinjer, som præsenteres i kapitel 5. Gradienterne i formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen ses at variere mellem 1 og 8 mS/m, svarende til porevandsgradienter fra 4 til 32 mS/m pr. m (ved formationsfaktor 4). Observationerne repræsenterer jo maksimalt kun de øverste 70 m af Skrivekridtet, og kan således være forårsaget ikke alene af variation i Skrivekridtets effektive diffusionskoefficient, men også af forskelle i permeabilitet og dermed i udvaskning (advektiv strømning). Hertil kommer en eventuel effekt på saltvandsgrænsen fra oppumpningen på kildepladserne /3/. Det skal erindres, at alle data i tabel 3-2 netop er indsamlet i boringer, som er placeret i eller tæt på større kildepladser, hvor der oppumpes større vandmængder.

TEM-profil	Kildeplads	Boring	Gradient i formations-	
		Dgu-nr.	ledningsevne *	
			[mS/m pr. m]	
1_1	Æbelholt	187.1354	4	
	Æbelholt	187.1376	4	
1_2	Æbelholt	193.1963	2	
1_3	Bjellekær	200.4220	8	
	Egholm	200.4344	3	
1_4	Hove	200.4571	5	
4_1	Bjellekær	200.4220	8	
4_2	Søndersø	200.3749	8	
	Tibberup	200.4423	5	
5_2	Vestskoven, Albertslund	200.4699	4	
5_3	Vestskoven, Albertslund	200.4572	<1	
	Harrestrup Kildeplads	200.4442	<1	
6_2	Ishøj	207.3606	1	
	Ishøj	207.3586	2	
	Ishøj	207.3627	6	

 Tabel 3-2
 Gradient i formationsledningsevne i overgangszonen i Skrivekridt. Fra /2/.

*) Vedr. gradienter, se også tabel 6-1.

3.3 Sammenfatning om overgangszonen i Skrivekridt

På baggrund af undersøgelserne fra Karlslunde Mose boringen /3/ og projektets borehulsundersøgelser i øvrigt /2/ kan følgende konkluderes med hensyn til karakteren af overgangszonen:

Overgangszonen mellem fersk- og salt grundvand viser sig i praksis på borehulslogs som den dybde, hvorfra formationens elektriske ledningsevne er større end 25 mS/m og dens resistivitetet er mindre end 40 ohmm, og hvor formationsledningsevnen stiger gradvist med stigende dybde, eller er konstant over mindre intervaller. Gradienterne i formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen er observeret til at være 1 til 8 mS/m pr. m. I projektområdet er der observeret tre forskellige situationer for overgangszonens optræden /2/:

- Overgangszonens øvre grænse forekommer ved den geologiske grænse mellem Skrivekridt og Danienkalk
- Overgangszonens øvre grænse forekommer ved et mergellag (Kølbygård Merglen), som optræder mellem 10 m og 25 m under grænsen mellem Skrivekridt og Danienkalk
- Overgangszonen øvre grænse forekommer ved mergellag, som ligger dybere i Skrivekridtet.

Generelt kan det således siges, at overgangszonen altid optræder i Skrivekridtet, og at den ligger dybere i Skrivekridtet vest og syd for København, idet dette her ligger højere end under København og nord herfor /2/.

Afvigelse herfra kan optræde lokalt ved optrængning af saltvand i hydraulisk aktive sprækkezoner som følge af sænkning af vandtrykket i kalkmagasinet på grund af grundvandsindvinding /2/.

4. Teoretiske TEM modeller

Som vist i det foregående kapitel er kontakten mellem fersk- og saltvand i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland udviklet som en op mod 250 m mægtig overgangszone, der er karakteriseret ved en faldende resistivitet med stigende dybde. TEM-sonderinger tolkes traditionelt således, at dybden til en "god leder" bestemmes under antagelse af, at denne udgør en skarp grænseflade mellem elektrisk relativt dårligt ledende lag og underliggende lag, som leder elektrisk strøm relativt godt. I forbindelse med TEM-kortlægningen er der derfor ved hjælp af teoretiske modelberegninger gennemført et studie med henblik på at belyse begrebet "den gode leder" i relation til en sådan fersk-saltvandsovergangszone i Skrivekridt.

Formålet med modelstudiet er at vurdere resultater af TEM-sonderinger overfor den situation, at grænsen mellem fersk- og saltvand er en op til 250 m tyk overgangszone med gradvist faldende resistivitet med dybden. Mere præcist er formålet at kunne definere dybden til den kortlagte "gode leder" i forhold til overgangszonens øvre afgrænsning. Samtidig skal der på baggrund af modelstudiet gives en vurdering af usikkerheden på bestemmelsen af parametre såsom de enkelte lags resistivitet og mægtigheder etc.

TEM metoden bygger på, at et magnetfelt - *det primære felt* - varierer i tiden og dermed, som beskrevet ved Maxwell's ligninger, inducerer et elektrisk felt. Dette elektriske felt vil give anledning til, at der løber en elektrisk strøm i jorden, dvs. såvel i den kvartære lagserie som i den underliggende Danienkalk og Skrivekridt. Denne strøm vil igen give anledning til elektriske og magnetiske felter - *de sekundære felter*. Med en induktionsspole måles den tidsafledede feltstyrke af det sekundære magnetiske felt i en række tidsvinduer og det er disse målte data, der udgør TEM-sonderingen. Mere om metoden, se appendiks A.

Feltmålinger af TEM-sonderinger kan simuleres ved hjælp af programmet "*em1dinv*" /11/. Modelstudiet og tolkning af de indsamlede TEM-sonderinger er gennemført med dette program, hvorved resultaterne af såvel teoretiske som reelle TEM-sonderinger umiddelbart kan sammenlignes. Med det benyttede tolkningsprogram kan man simulere TEMsonderinger over 1-D geologiske modeller af lag, der med hensyn til geoelektriske egenskaber er homogene og isotrope. Der kan opstilles modeller med en diskretisering, som indeholder helt op til 20 lag, og hvor de benyttede lag har en mægtighed på mindst 1 m.

I det teoretiske studie opstilles modeller som indeholder en øvre delmodel for de observerede variationer i den geologiske lagfølge ovenover overgangszonen, samt en nedre delmodel der beskriver de geoelektriske forhold i overgangszonen. For at gøre beskrivelsen og diskussionen af modelstudiet enklere, er der benyttet følgende betegnelser for de to typer delmodeller: De generaliserede geologiske lagfølger kaldes "geologiske sekvenser", og overgangszonens opbygning kaldes en "overgangsmodel". Kombinationen af de to typer delmodeller kaldes "modellen". Det teoretiske modelstudie indeholder seks trin, der er illustreret i figur 4-1.

I det første trin opstilles et antal relevante 1-D geologiske sekvenser. De opstillede sekvenser er baseret på erfaringerne fra den geofysiske borehulslogging i projektområdet /2/. Der opstilles i alt 20 sekvenser, som inddeles i fem hovedgrupper. De geologiske lag i sekvenserne tildeles hver en resistivitet. Variationen i de observerede gradienter i den elektriske ledningsevne i overgangszonen repræsenteres med 13 forskellige overgangsmodeller, der omsættes til resistivitet. De 13 overgangsmodeller beregnes for hver af de 20 geologiske sekvenser, hvilket giver i alt 260 beregningsmodeller. Modellerne omtales som de teoretiske eller de geologiske resistivitetsmodeller.





Tolkning af modelrespons / Inversion



Beregning af usikkerhed på data





Figur 4-1 Diagram med de seks trin i den benyttede fremgangsmåde i det teoretiske studie.

I det andet trin beregnes de teoretiske TEM-sonderinger svarende til de 260 teoretiske resistivitetsmodeller. De beregnede TEM-sonderinger svarer til det, som man i felten ville måle i områder med lignende "geologiske sekvenser" og "overgangsmodeller".

I det tredje trin i modelleringen tildeles de teoretiske TEM-sonderinger et sæt beregnede usikkerheder på data. De tildelte usikkerheder er af samme størrelsesorden, som erfaringsmæssigt er på indsamlede feltdata.

I modelleringens fjerde trin tolkes hver af de 260 teoretiske TEM-sonderinger svarende til de 260 "modeller". Dette foregår ved en iterativ inversion af de teoretiske TEM-sonderinger ved hjælp af ovennævnte program "*em1dinv*". Resultatet af denne tolkning er 1D-modeller af lagfølgen, og vil typisk resultere i modeller med 3 til 5 lag. De resulterende 1D-modeller omtales som "tolkede modeller" eller "inverterede modeller".

Trin fem indeholder en præsentation af de inverterede (tolkede) modeller og trin seks udgøres af en sammenligning af disse modeller med de først opstillede teoretiske modeller. På hver af de inverterede modeller defineres "den gode leder", og dybden til denne vurderes i forhold til dybden til overgangszonen på den tilsvarende teoretiske model. Resultatet anvendes ved diskussionen af tolkningsresultaterne fra de opmålte TEM-sonderinger fra undersøgelsesområdet med henblik på fastsættelse af koten til fersk- saltvandsgrænsen.

De enkelte trin i modelleringen omtales mere indgående i de følgende afsnit.

4.1 Teoretiske 1D-modeller

I projektområdet kan den geologiske lagfølge, som omfatter de kvartære lag, Danienkalken og Skrivekridt formationen, generaliseres i geologiske sekvenser med tre overordnede enheder. Disse enheder er:

- Kvartær lagserie med varierende mægtighed og sammensætning
- Danienkalk og/eller Skrivekridt med ferskvand
- Danienkalk og/eller Skrivekridt med en vis andel marint porevand (overgangszonen).

Under overgangszonen vil der findes marint porevand med meget høj koncentration af klorid. Den begrænsede måledybde for de anvendte målekonfigurationer ved TEMsonderingerne resulterer i et målerespons, som kun er påvirket af lagenes resistivitet et stykke ned i overgangszonen. Det er derfor kun relevant at inddrage informationer om de geologiske/geofysiske forhold til og med overgangszonen.

De opstillede 20 geologiske sekvenser er sammenstillet i fem grupper, som hver underinddeles i fire typer, figur 4-2. Gruppe 1-4 er karakteriseret ved en varierende sammensætning og mægtighed af den kvartære lagserie, samt en systematisk ændring i sammensætning og mægtighed af ferskvandszonen i Danienkalk og/eller Skrivekridt. Alle sekvenserne i Grupperne 1-3 indeholder to øvre enheder og en overgangsmodel, medens gruppe 4 og 5 har tre øvre enheder og en overgangsmodel. Overgangsmodellen er sammensat således, at der forekommer en lineær stigning i lagenes elektriske ledningsevne med stigende dybde. I modellerne i Gruppe 5 er overgangszonen imidlertid modelleret som en zone med to forskellige lineære stigninger i den elektriske ledningsevne. Skiftet i gradienten i ledningsevnen sker ved et tyndt mergellag, som imidlertid ikke medtages i modellen som en selvstændig enhed.



Figur 4-2 Resistivitetsmodeller Gruppe 1-5

Hver af de tre første hovedgrupper er underinddelt i fire typer, så effekterne af følgende ændringer af sammensætningen af sekvenserne kan belyses systematisk:

- Type 1 er en udgangsmodel
- Type 2 påviser effekten af tykkelsen af ferskvandszonen i kalkmagasiner
- Type 3 påviser effekten af en ændring i tykkelsen af de kvartære lag
- Type 4 påviser effekten af en ændring i sammensætningen af de kvartære lag

Hertil kommer en type 5 i gruppe 4, som skal illustrere effekten af et tyndt lag skrivekridt med ferskvand ovenover overgangszonen. Den femte gruppe af modeller har fire typer, hvor type 1 er udgangsmodellen, type 2 påviser effekten af to forskellige ledningsevnegradienter i overgangszonen, type 3 og 4 påviser effekten af ændringer i såvel de to ledningsevnegradienter som i tykkelsen af Skrivekridt oven over overgangszonen.

De enkelte grupper beskrives mere uddybende i det følgende.

Gruppe 1 og 2

Sekvenserne i såvel Gruppe 1 som 2 indeholder to enheder ovenover overgangsmodellen. Den øverste enhed repræsenterer de kvartære lag, som har samme variation i sammensætningen og i tykkelsen i de to grupper. Ved de tre første typer repræsenterer denne enhed moræneler med en resistivitet på 30 ohmm, medens den i type 4 i begge grupper er smeltevandssand med en resistivitet på 80 ohmm. Forskellen mellem modellerne i Gruppe 1 og Gruppe 2 er resistiviteten i modellernes andet lag, som er Danienkalk. I Gruppe 1 er modstanden sat til 100 ohmm, mens den i Gruppe 2 er fastsat til at være 200 ohmm. Øvrige parametre er identiske. Overgangszonen er i begge grupper fastsat til at forekomme ved Top Skrivekridt mellem 40 og 90 m under terræn.

Gruppe 3

Modellerne i denne gruppe er analoge til gruppe 1, blot er andet lag valgt til at være Skrivekridt med ferskvand, og dets resistivitet er sat til 60 ohmm. Under det ferskvandsholdige Skrivekridt forekommer en overgangszone i Skrivekridtet, og dybden til denne er som i Gruppe 1 og 2 valgt til at optræde mellem 40 og 90 m under terræn.

Gruppe 4

Sekvenserne i Gruppe 4 indeholder tre lag ovenover overgangszonen. Variationen i det øverste lag (kvartæret) er identisk med de tre foregående grupper. Mellem dette lag (kvartæret) og overgangszonen er nu indlagt to lag som repræsenterer Danienkalken (100 ohmm) og Skrivekridt (60 ohmm). Mægtigheden af de to lag varieres i de fire typer af sekvenser i gruppen. Overgangszonen i Skrivekridtet er valgt til at optræde i de samme dybder, som ved de tre foregående grupper (1, 2 og 3). I denne gruppe 4 er der medtaget endnu en type (type 5), der illustrere effekten af et tyndt lag ferskvandsholdig Skrivekridt over overgangszonen

Gruppe 5

Modellerne i Gruppe 5 er ligesom gruppe 4 opbygget med tre lag ovenover overgangszonen, nemlig moræneler, Danienkalk (100 ohmm) og Skrivekridt (60 ohmm). Det øverste lag holdes konstant i alle fire typer, og Danienkalkens tykkelse holdes konstant i de tre første typer, men mindskes i type 4. Skrivekridtets tykkelse er konstant i de to første typer, men øges ved type 3 og 4. Endelig optræder der et skifte i ledningsevne-gradienten i overgangszonen som følge af et mergellag i de tre sidste typer, og med varierende dybde til dette skifte. De teoretiske beregninger på disse modeller kan derved belyse betydningen af stykvis lineære gradienter i ledningsevnen i overgangszonen i Skrivekridtet og med gradientskifte som ved et mergellag i Skrivekridtet. Overgangszonen i alle fire typer begynder i 70 m eller 80 m dybde.

Modelopbygningen af overgangszonen

Den lineære stigning i formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen er simuleret med en række lag i 1D-modellen, hvis indbyrdes resistivitet trinvis falder med dybden (figur 4-3).

Der er anvendt 13 overgangsmodeller til simulering af overgangszonen for hver af de 20 geologiske sekvenser. I Grupperne 1-4 antages den lineære gradient i formationens ledningsevne at variere fra overgangsmodel til overgangsmodel med værdier fra 0,1 mS/m til 25,1 mS/m pr. m som følger: 0,1; 0,158; 0,251; 0,398; 0,631; 1,0; 1,58; 2,51; 3,98; 6,31; 10,0; 15,8; og 25,1 mS/m pr. m. Denne fordeling i de 13 modeller er valgt logaritmisk med fem værdier per dekade. Størrelsesorden på gradienterne i overgangszonens elektriske ledningsevne er bl.a. valgt ud fra resultater fra induktionslogs i åbne kalk-kridt boringer /2/.

I figur 4-3A og 4-3B angiver den grønne kurve formationens elektriske ledningsevne i overgangszonen. Den blå kurve, figur 4-3B, viser den tilsvarende trinvise 1D model. Vandrette streger angiver lagenes grænser, og lodrette streger angiver formationens elektriske ledningsevne i det pågældende lag. 1D-modellen for de elektriske ledningsevner er ved hjælp af ligning (2) omregnet til en model for resistiviteten i overgangszonen (figur 4-3C), og det er denne model, rød kurve, der anvendes til beregning af TEM-sonderingen for den pågældende geologiske sekvens.



Figur 4-3 Diskretisering af beregningsceller i overgangsmodellerne.

I Gruppe 5 er der som nævnt ovenfor indsat et lag af mergel i overgangszonen i Skrivekridtet og med tilhørende forskellig gradient i formationsledningsevnen over og under mergellaget. Der er som nævnt ovenfor anvendt 3 forskellige dybder af mergellaget i overgangszonen resulterende i tre modeltyper (2, 3 og 4).

Hver af de 20 opstillede geologiske sekvenser blev herefter kombineret med de 13 gradienter for overgangszone, således at der fremkom 260 modeller. Disse modeller benævnes efter sekvensgruppe og -type samt gradient (overgangsmodel). En model der eksempelvis benævnes Model 5, Gruppe 1, Type 1, repræsenterer gradient nr. 5 kombineret med type 1 i gruppe 1.

Som nævnt ovenfor er overgangszonen i modelgruppe 1 og 2 valgt til at optræde ved top Skrivekridt, medens den i modelgrupperne 3, 4 og 5 optræder et stykke nede i Skrivekridt. Ved den anvendte fremgangsmåde til modellering af overgangszonen med lineær stigning i ledningsevnen er udgangsværdien for ledningsevnen i overgangszonen sat til at være lig med ledningsevnen i formationen umiddelbart oven over overgangszonen. Modelgruppe 1 og 2 har her Danienkalk med resistivitet henholdsvis 100 ohmm og 200 ohmm svarende til ledningsevnen henholdsvis 10 mS/m og 5 mS/m, som dermed bliver de respektive udgangsværdier i overgangszonen for de to modelgrupper. For gruppe 3, 4 og 5 ligger overgangszonen i Skrivekridt med resistivitet på 60 ohmm svarende til ledningsevnen 16 mS/m, som dermed bliver udgangsværdien for overgangszonen for disse tre modelgrupper.

Udgangsværdien for resistiviteten i overgangszonen er derfor i modellerne højere end den definerede grænseværdi på 40 ohmm for den øvre gode leder i TEM-sonderingernes tolkningsmodeller. Ovenstående figur 4-3 illustrerer, at selv om ledningsevnen (σ) i overgangszonen stiger lineært med dybden, så er det samme ikke tilfældet med resistiviteten (ρ), idet de to parametre er forbundet ved ligningen $\rho^*\sigma = 1000$. Resistiviteten aftager derfor stærkest i den øverste del af overgangszonen, og betydningen af dette for modellernes resistivitetsvariation i overgangszonen i forhold til den definerede grænseværdi på 40 ohmm for overgangszonen fra TEM-sonderingsresultater er illustreret på figur 4-4 nedenfor.

På figur 4-4 er vist et eksempel på en kombination af de 13 1D-modeller for overgangszonen med én af de 20 geologiske sekvenser (Gruppe 1, type 1). Hver model er her repræsenteret ved en søjle, der viser resistivitetsvariationen i dybden. Ledningsevnegradienterne for overgangszonen går fra høje værdier til venstre mod lavere værdier til højre.



Figur 4-4 Modellerne 1 til 13 i gruppe 1 af typen 1. Hver model er præsenteret ved en søjle og langs den nederste x-akse er angivet modelnummer. Den øverste x-akse viser ledningsevnegradient for overgangszonen. Y-aksen viser dybderne til de enkelte niveauer i modellen. Farvningen af søjlerne viser resistiviteten i de enkelte lag i modellen og dermed resistivitetsvariationen ned gennem de geologiske sekvenser og i overgangszonen. Placeringen af farveskiftene viser dybden til laggrænserne i modellen. Farveskalaen nederst i figuren viser resistiviteten i ohmm, hvor farveintervallerne vokser proportionalt med resistiviteten.

Figur 4-4 viser som nævnt modellen for overgangszonen med forskellige ledningsevnegradienter for type 1 i gruppe 1. I denne gruppe ligger overgangszonen lige under Danienkalken med en resistivitet på 100 ohmm, og derfor begynder overgangszonen øverst med en udgangsværdi på 100 ohmm. Figuren illustrerer, at for meget høje gradienter, > 10 mS/m pr. m, vil resistiviteten i modellen være mindre end 40 ohmm (grønne og blå farver) allerede et par meter under "top overgangszone", men for gradienter <1mS/m/ vil resistiviteten i modellen først være mindre end 40 ohmm i en dybde mere end 15 m under "top overgangszone". Ved meget små gradienter, dvs. <0.25 mS/m pr. m vil resistiviteten i modellen derimod først komme under 40 ohmm ved dybder mere end 50 m under "top overgangszone".

For gruppe 3, 4 og 5, hvor modellernes udgangsværdi er 60 ohmm, vil lag med resistivitet <40 ohmm i modellerne indtræde endnu tættere ved "top overgangszone" end illustreret ved figur 4-4, For gruppe 2 er modellernes udgangsværdi 200 ohmm, og lag med resistivitet <40 ohmm vil derfor ligge lidt dybere i forhold til "top overgangszone" end det var tilfældet ved gruppe 1.

Uanset at udgangsværdien for resistiviteten i modellerne for overgangszonen således er valgt højere end den definerede grænseværdi 40 ohmm for den øvre gode leder, er det

hensigten med det teoretiske modelstudie netop at undersøge, hvorledes de teoretiske TEM-sonderingers inverterede tolkningsmodeller placerer den første gode leder svarende til en resistivitet på 40 ohmm eller mindre i forhold til den modellerede overgangszone. Den valgte fremgangsmåde kan især ved gruppe 1 og 2 med udgangsværdier på henholdsvis 100 og 200 ohmm betragtes som "worst case", idet det ikke kan forventes, at de inverterede modellers øvre gode leder skal ligge tættere på overgangszonen end inputmodellens lag med resistivitet på 40 ohmm gør. Disse forhold skal derfor tages i betragtning, når de inverterede tolkningsmodeller nedenfor skal diskuteres i henseende til deres afspejling af den teoretiske overgangszone.

4.2 Beregningen af TEM-sonderinger

Efter opsætning af de 260 modeller beregnes de tilhørende teoretiske TEM-sonderinger. De beregnede TEM-sonderinger består af en række tider samt tilhørende måleværdier. Tiderne angiver beliggenheden af måletidsvinduerne, relativt til det udsendte primære felt. Måleværdierne angiver størrelsen af den tidsafledede af sekundær feltet og benævnes oftest dB/dt-værdien. dB/dt-værdien omsættes ved hjælp af en simpel beregning til en tilsyneladende resistivitet for hver måletid. Det er disse tilsyneladende resistiviteter eller dB/dt-værdien der indeholder information om geologien. De samhørende værdier mellem måletider og tilsyneladende resistivitet repræsenterer en TEM-sonderingskurve eller TEMmålerespons, og svarer således til de feltdata man ville opnå i et område med den givne geologiske sekvens og overgangszone.

For at gøre resultatet af den teoretiske undersøgelse sammenlignelig med resultatet af feltmålingerne i projektområdet er der ved beregning af de teoretiske TEM-sonderinger anvendt samme parametre som ved tolkningen af de virkelige TEM-sonderinger. For nærmere detaljer, se appendiks A.

Figur 4-5 viser TEM-sonderingskurverne for Model 1, 5, 9 og 13 i Gruppe 1, Type 1. De teoretiske 1D-modeller ses i figur 4-4. Til tidlige tider er kurverne næsten sammenfaldende. Til sene tider, det vil sige efter 10⁻⁴ sekunder forekommer tydelige forskelle mellem respons-kurverne. Der vil derfor ikke være tale om ækvivalente modeller med hensyn til overgangszonen, dvs. forskellige overgangsmodeller med samme TEM-sonderingskurve. Der kan derfor også forventes tydelige forskelle på tolkningsmodellerne ved inverteringen af modelrespons.



Figur 4-5 TEM-sonderingskurver for model 1, 5, 9 og 13 i gruppe 1 type 1 i figur 4-4. De teoretiske modeller ses i figur 4-3.

4.3 Tildeling af usikkerhed på data

For at kunne foretage en kvantitativ analyse af hvor godt TEM sonderinger er i stand til at opløse en lagfølges resistivitetsfordeling, er det nødvendigt at kende usikkerheden på data. Man har en temmelig god ide om usikkerheden på data fra talrige feltmålinger, og det er disse erfaringer der ligger til grund for den teoretiske støjmodel, som opstilles i det følgende. Den teoretiske støj tilskrives de beregnede data (model respons) for de teoretiske modeller

Data fra transiente elektromagnetiske sonderinger indeholder to typer usikkerheder:

- Usikkerhed som følge af inkonsistens mellem den simple 1D-model, der anvendes i tolkningen, og de geologiske forhold.
- Usikkerhed som følge af elektromagnetiske felter fra andre kilder.

4.3.1 Usikkerhed som følge af de geologiske forhold

Inkonsistens mellem den simple 1D-model der anvendes i tolkningen og de faktiske geologiske forhold, herunder tilstedeværelsen af menneskeskabte gode elektriske ledere (kabler, ledninger m.m.) kan betragtes som en slags "støj" i forhold til den forenklede tolkningsmodel. Man tager som regel højde for disse forhold ved at tilskrive alle data en relativ støj, der som her sættes til 5% af de målte dB/dt-værdier. Dette støjbidrag udgør altså et relativt konstant bidrag til støjen.

I de ovenfor beskrevne teoretiske analyser indeholder de geologisk-geofysiske modeller op til 20 lag inklusive de 13 i overgangszonen, medens tolkningsmodellerne kun tillades at indeholde mellem 3 og 5 lag. Der vil i et sådant tilfælde også kunne optræde inkonsistens mellem de teoretiske modeller og de modeller, som anvendes i tolkningen, men det antages, at denne inkonsistens er inkluderet i ovennævnte 5 % geologisk støj. Derved tillades en afvigelse mellem den teoretiske TEM-sonderingskurve for den teoretiske model og TEM-sonderingskurven for tolkningsmodellen.

4.3.2 Usikkerhed som følge af elektromagnetisk støj

Elektromagnetisk støj er en samlet betegnelse for uønskede bidrag til vores målinger fra elektromagnetiske felter i omgivelserne, både naturlige og menneskeskabte. Den naturlige støj stammer hovedsagelig fra lynudladninger i atmosfæren. De menneskeskabte støjkilder er overvejende tænd/sluk-fænomener i lysnettet samt felter fra radiosendere og anden kommunikation. Ifølge erfaringer fra feltmålinger kan summen af de elektromagnetiske støjbidrag, f(t), på de målte *dB/dt*-data beskrives ved følgende formel:

$$f(t) = 10 / \sqrt{t} \left[nV / m^2 \right] \tag{7}$$

hvor *t* er tiden i millisekunder fra starten af slukkerampen, se appendiks A. Som det ses, er støjen en langsomt aftagende funktion af tiden. Den relative usikkerhed, fr(t), er dermed givet som

$$fr(t) = f(t) / (dB / dt)$$
(8)

Til tidlige måletider i TEM-sonderingen, se figur 4-6, udgør dette bidrag til den samlede usikkerhed en meget lille andel. Det modsatte er tilfældet ved sene tider hvor bidraget udgør en stadig større del af den samlede usikkerhed, således at det til meget sene måletider fuldstændig vil dominere og dermed overdøve data. For at afspejle praksis i faktiske feltmålinger vælges det normalt at fjerne data, der har mere end 20 % relativ usikkerhed på de tilsyneladende resistiviteter. En sammenligning med tolkede data fra undersøgelsesområdet viser, at denne reduktion af data giver et meget realistisk billede. Som det er praksis med målte data, er de første tre datapunkter tilskrevet en usikkerhed på henholdsvis 12, 10 og 8 % af *dB/dt* værdierne.

Et eksempel på teoretiske TEM-sonderinger, hvor de tilsyneladende resistivitetsværdier er tilskrevet usikkerheder, ses i figur 4-6. De fuldt optrukne TEM-sonderingskurver er responser for de 1D-modeller, der er fremkommet ved tolkning af de teoretiske måledata. De teoretiske måledata er beregnet som responser for de teoretiske modeller og vist som vertikale pinde, der inkluderer den tildelte usikkerhed. Bemærk, at der ikke er fuldstændig overensstemmelse mellem tolkningskurven (inverteret model respons = fuldt optrukket kurve)

og data (teoretisk model respons = vertikale streger). Dette skyldes, at der optræder flere lag med en mere kompleks resistivitetsfordeling i den teoretiske 1D-model sammenlignet med tolkningsmodellen. Eksemplet belyser inkonsistensen mellem de teoretiske modeller med mange lag og de anvendte tolkningsmodeller med få lag. I denne analyse er de teoretiske data ikke *pertuberet* med støjen, men støjen er *tillagt* data i overensstemmelse med formel (7) og (8), og der er derfor ikke mulighed for at forveksle effekten af elektromagnetisk støj med effekten af de inkonsistente modeller.



Figur 4-6 Data fra de teoretiske modeller 1, 5, 9 og 13 i gruppe 1, type 1, fra figur 4-4 (vertikale pinde med usikkerhedsangivelser) er tilskrevet støj og tolket med 1D modeller med få lag. Responserne fra de tolkede modeller ses som fuldtoptrukne kurver.

4.4 Tolkning af modelrespons / Inversion

De beregnede teoretiske TEM-sonderinger er tolket med tolkningsprogrammet "**SEMDI**" /12/. Tolknings- proceduren svarer til den, som er anvendt ved tolkning af indsamlede feltdata. For yderligere information henvises til appendiks A. Der er dog en enkelt afvigelse fra den vanlige tolkningsprocedure og denne afvigelse beskrives i det følgende:

Ved tolkningen er der foretaget en inversion med fire forskellige startmodeller. Startmodellerne indeholder som udgangspunkt mellem 2 og 5 lag, som alle har en resistivitet mindre end 50 ohmm. Når inversionen er tilendebragt udvælges den model, der har færrest antal lag og et residual på beregningerne, der er lavere end 0,2. Det er dette kriterium, der afviger fra den vanlige tolkningsprocedure. Denne fremgangsmåde er valgt for at sikre at kendskabet til udgangsmodellen ikke påvirker valget af tolkningsmodel og for at sikre et ensartet valg. Residualer på data er beregnet ud fra følgende formel:
$$R_{Data} = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{\left(d_i^{m\hat{a}lt} - d_i^{m\hat{o}lel}\right)^2}{\operatorname{var}(d_i^{m\hat{a}lt})}\right]^{1/2}$$
(9)

N : er antallet af datapunkter i det beregnede respons d_i^{model} : er det *i* 'te datapunkt i responset fra tolkningsmodellen $d_i^{målt :}$ er det *i* 'te datapunkt for de målte data. I dette tilfælde det *i* 'te datapunkt i responset fra den teoretiske 1D-model var($d_i^{målt}$) : er variansen af det *i* 'te datapunkt for de målte data. Dette svarer til usikkerheden for det *i* 'te data opløftet i anden potens.

Tolkningen foregår som en iterativ proces, hvor der minimeres på data residualet.

4.5 Præsentation af metodestudiet

Resultaterne af de 260 model-simuleringer fremgår af bilag 1 til 10. De teoretiske modeller vises øverst, og de inverterede tolkede modeller ses forneden i figurerne. Hver model er præsenteret ved en søjle og langs den nederste x-akse er angivet modelnummer. Den øverste x-akse viser gradient i overgangszonen i de teoretiske modeller. Y-aksen viser dybden i modellerne. Farvningen af søjlerne viser resistiviteten i de enkelte lag i modellerne, mens placeringen af farveskiftene viser dybden til lagenes grænser. Farveskalaen for resistivitet ses i signaturforklaringen i figurernes nederste venstre hjørne. Bemærk, at farveintervallerne vokser proportionalt med resistiviteten.

På de inverterede modeller er medtaget usikkerheder på nogle af model-parametrene fra inversionen af de teoretiske TEM-sonderinger. Usikkerhederne beregnes af inversionsprogrammet "*em1dinv*". De farvede cirkler placeret i centrum af søjlerne angiver usikkerhederne på resistiviteterne, medens cirklerne anbragt ved siden af søjlerne ud for lagenes grænser, angiver usikkerheden på dybden til den pågældende grænse. Usikkerhederne på modelparametrene er beregnet ud fra den "lineariserede model", dvs. at store værdier udelukkende viser, at parameteren er ubestemt (den hvide farve). Der er anvendt følgende kriterium for kvantificering af usikkerhederne af de enkelte parametre i modellen:

< 1,2 er godt bestemt (rødbrun) 1,2 – 1,5 er bestemt (orange) 1,5 – 2 er dårligt bestemt (gul) >2 ubestemt (hvid)

Disse tal kan med en vis tilnærmelse opfattes som en faktor, således at en usikkerhed på 1,5 angiver en usikkerhed på 50 %. Farveskalaen for usikkerhederne findes også i informationsboksen i figurernes nederste venstre hjørne.

4.6 Konklusion af modelstudiet

Som nævnt er et af hovedformålene med modelstudiet at kunne sammenligne dybden til den tolkede "gode leder" med den tilhørende teoretiske models øvre afgrænsning af overgangszonen i Skrivekridtet. Fra borehulslogging kan denne grænse identificeres dels ved et spring i formationens ledningsevne fra som regel <20 mS/m til >25 mS/m, og dels ved, at der herunder som regel ses en jævnt stigende elektrisk ledningsevne /2/. Diskussionen af modelstudierne tager derfor udgangspunkt i en sammenligning mellem denne definition af fersk-saltvandsgrænsen og den resulterende tolkningsmodel fra inversionen af de teoretiske TEM-sonderinger.

På baggrund af sammenligningen mellem de teoretiske resistivitets-modeller over de geologiske sekvenser inklusive overgangszonen og de inverterede tolkningsmodeller kan der defineres to "gode ledere":

Den øvre gode leder er defineret som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller mindre end 40 ohmm, og hvor alle underliggende lag ligeledes har en resistivitet mindre end 40 ohmm. Dette svarer til, at denne leder har en formationsledningsevne på 25 mS/m eller højere. Med en formationsfaktor på 4 svarer dette til en elektrisk ledningsevne i porevandet på mindst 100 mS/m, hvilket betyder at den ækvivalente kloridkoncentration i porevandet under grænsen til den øvre gode leder er mindst 400 mg/l. Ved denne ækvivalente kloridkoncentration bidrager sulfat og bikarbonat med 25 % af ionstyrken, hvorfor 100 mS/m i praksis vil betyde mindst 300 mg/l klorid.

Den nedre gode leder er defineret som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller mindre end 15 ohmm, og hvor alle underliggende lag ligeledes har en resistivitet mindre end 15 ohmm. Dette svarer til, at denne leder har en formationsledningsevne på mindst 67 mS/m, som med en formationsfaktor på 4 svarer til en ledningsevne i porevandet på mindst ca. 270 mS/m. Den ækvivalente koncentration af klorid i porevandet under grænsen til den nedre gode leder vil følgelig være omkring 1.200 mg/l. Sulfat og bikarbonat vil også bidrage, men procentisk ikke tilnærmelsesvist så meget som ved ovennævnte lavere ækvivalent kloridkoncentration.

Med hensyn til de resulterende resistivitets-tolkningsmodellers afspejling af overgangszonens karakter viser de teoretiske studier, at det er muligt at skelne mellem to situationer for gradienten i formationsledningsevnen, nemlig om gradienten er større eller mindre end 5 mS/m.

Situationen 1 (>5 mS/m pr. m), hvor gradienten nedefter i de dybtliggende lags elektriske ledningsevne er større end 5 mS/m pr. m. Denne situation viser sig ved, at den øvre og nedre gode leder vil være sammenfaldende i tolkningsmodellerne, som derfor kun vil have en god leder, og denne leder vil have en resistivitet på 15 ohmm eller mindre. Afvigelsen mellem grænsen til den tolkede gode leder og grænsen til overgangszonen i de teoretiske modeller vil typisk være 10 m eller mindre, og i så godt som alle tilfælde vil den tolkede gode leder ligge dybere end overgangszonen

Til sammenligning viser usikkerhedsanalysen af tolkningsmodellerne at bestemmelsen af dybde til den gode leder er mindre end 1,2. Med en dybde til overgangszonen på omkring 100 m giver dette en usikkerhed på op til 20 m. Altså er usikkerhedsanalysen af bestemmelsen af dybde til den gode leder tilsyneladende et udmærket mål for, hvor godt grænsen til overgangszonen er fastlagt.

Situationen 2 (<5 mS/m pr. m), hvor gradienten i formations ledningsevnen i overgangszonen er mindre end eller lig 5,0 mS/m pr. m. Denne situation er afspejlet i tolkningsresultatet ved, at dette har en øvre gode leder med en resistivitet på mellem 40 ohmm og 15 ohmm, samt en nedre gode leder med en resistivitet på 15 ohmm eller mindre. Afstanden mellem den øvre og den nedre gode leder (tykkelsen af den øvre gode leder) vil være betinget af dels resistiviteten i den geologiske lagserie over overgangszonen, dels dybden til overgangszonen samt endvidere af størrelsen af gradienten i overgangszonen.

Såfremt gradienten i overgangszonen er lineær (Gruppe 1 - 4) gælder, at den tolkede dybde til den nedre god leder er kontrolleret af gradientens størrelsesorden i overgangszonen og af den tolkede resistivitet af lederen. Den nedre gode leder vil med de givne geologiske sekvenser ofte forekomme mindre end 50 m under grænsen til den øvre gode leder. Hvor gradienten i overgangszonen er stykvis lineær (Gruppe 5), forekommer den nedre gode leder mindre end 10 m under skiftet i gradient, som i projektområdet typisk vil ske ved et mergellag, som for eksempel Kølbygård mergelen.

Den øvre gode leder vil i situation 2 ligge fra 10 til 35 m dybere end grænsen til overgangszonen i de teoretiske modeller. Til sammenligning viser usikkerhedsanalysen af tolkningsmodellen, at usikkerheden på bestemmelsen af dybde til den øvre gode leder er mindre end 1,2. Med en dybde til overgangszonen på omkring 100 m giver dette en usikkerhed på op til 20 m. Dette viser, at den teoretiske usikkerhedsanalyse på bestemmelsen af dybden undervurderer de optrædende afvigelser, der som nævnt er op til 35 m.

Sammenfattende om TEM-sonderingers bestemmelse af saltvandsgrænsen fastlagt som den øvre gode leder i situation 2 og som den eneste gode leder i situation 1 kan det konkluderes: Ved små gradienter i overgangszonen vil TEM-saltvandsgrænsen ligge op til 35 m dybere end overgangszonen i de teoretiske modeller, medens den ved store gradienter kun vil ligge op til 10 m dybere end overgangszonen.

Hertil kommer der tilfælde, hvor der i tolkningsresultatet ikke kan identificeres hverken en øvre eller nedre god leder jævnfør de opstillede definitioner på disse. Sådanne tilfælde skyldes, at den dybde, hvorunder resistiviteten vil være mindre end 40 ohmm, vil være større end det benyttede TEM-måleudstyrs nedtrængningsdybde. (max. 150 m ved TEM og max. 200 m ved HTEM). Gradientens størrelse i overgangszonen kan i sådanne tilfælde derfor ikke vurderes.

Eksempel:

Et eksempel på resultater fra situationen, hvor overgangszonens gradient er mindre end 5,0 mS/m, ses i figur 4-7. Figuren viser samtlige teoretiske resistivitets-modeller med en gradient i overgangszonen på 1,58 mS/m pr. m. Figuren giver mulighed for at vurdere ind-flydelsen på dybden til overgangszonen fra variation i den geologiske sekvens ovenover

overgangszonen. På de teoretiske resistivitets-modeller (for oven) og på de inverterede tolknings modeller (for neden) er grænsen til overgangszonen samt den øverste gode leder og den nederste gode leder indtegnet. Modellerne er præsenteret efter typer i gruppe 1 til 4 og yderst til højre er gruppe 5 samlet. Herved kommer modeller med samme dybde til overgangszonen til at stå ved siden af hinanden.

Sammenlignes på figur 4-7 resistivitets-modellerne, som alle har samme gradient i overgangszonen, med de inverterede tolkningsmodeller, kan følgende konkluderes: Varierende resistivitet af Danienkalk (100 eller 200 ohmm) over ferskvandsholdigt Skrivekridt (60 ohmm) influerer relativ lidt på dybden til den øverste gode leder. Derimod hvis tykkelsen af Skrivekridt (60 ohmm) uden saltvand er tyndt i forhold til Danienkalk mindskes dybden til den øverste gode leder, når resistiviteten af den øverste gode leder bliver større. Hvis tykkelsen af det kvartære dæklag er stor, og det tillige har en lav resistivitet, mister metoden indtrængningsdybde, hvorved der kun er en god leder og med en relativ høj modstand (type 3).



Figur 4-7 Geologiske sekvenser i Gruppe 1-4 med en gradient i den elektriske ledningsevne i overgangszonen på 1,58 mS/m pr. m. Grænsen til overgangszonen er vist som en stiplet linje medens den tolkede øvre og nedre gode leder er vist som en fuldt optrukket sort linje.

5. TEM-kortlægning i projektområdet

I forbindelse med kortlægningen af saltvandsgrænsen i projektområdet, er der udført 316 TEM-sonderinger og 25 HøjMoment TEM-sonderinger (HMTEM). TEM-sonderingerne er målt med et digitalt PROTEM 47 system fra GEONIX og HMTEM-sonderingerne er foretaget med samme system suppleret med en sender bygget af Aarhus Universitet. TEMsonderingerne er foretaget i perioden fra 25.11.2002 til 13.2.2003, og HMTEMsonderingerne er udført fra 25.3.2003 til 31.3.2003. Begge målekampagner er udført for projektet af RAMBØLL, medens tolkning af data er udført af projektet ved Lene H. Poulsen.

Udover de i projektet udførte TEM-sonderinger, indeholder nærværende rapport også resultater fra tidligere TEM-kortlægning ved Solhøj Kildeplads, ligeledes udført af RAMBØLL /19/. Tolkningen af Solhøj data er gennemført konsistent med de procedurer, der er benyttet i nærværende delprojekt 3, og resultaterne er derfor medtaget som et supplement til dette projekt. Data fra Solhøj har betegnelsen "SOT" foran deres sonderingsnummer.

5.1 Placeringen af TEM-sonderingerne

Sonderingerne er lokaliseret langs seks profil linjer, hvis placering i projektområdet fremgår af Bilag 11, samt af figur 5-1. Koten for basis Danien (top Skrivekridt) og lokalisering af sonderinger fremgår af Bilag 12, og prækvartæroverfladens højdeforhold er vist sammen med lokalisering af sonderingerne på Bilag 13. Kortet over prækvartæroverfladen er baseret på boringsoplysninger, medens kortet over basis Danien (top Skrivekridt) er et af resultaterne fra delprojekt 1, /13/.



Figur 5-1 Oversigt over placering af de seks TEM-profiler, HMTEM og Solhøj data fra tidligere Rambøll projekt. Som underliggende billede er vist Prækvartæroverfladens bjergarter.

Placeringen af sonderingsprofilerne er i videst muligt omfang lagt så tæt på boringer, hvor der foreligger logs fra geofysiske borehulsundersøgelser /2/. Herved kan der foretages en sammenligning mellem de geofysiske borehulsundersøgelser og tolkningsresultaterne fra TEM-sonderingerne. Ved en sådan sammenligning er der dog et par forhold, som bør tages i betragtning.

Således inddrager en TEM-sondering et stort målevolumen under terræn og midler derfor over et stort område (med diameter = 3-4 gange måledybde), medens boringsinformationer og dermed logging informationer er punktinformationer, som repræsenterer geologi og porevandskemi i et begrænset område. Ganske vist har borehulslogging vist, at lagene og sekvenserne i Danienkalken og i Skrivekridtet under kildepladserne i regelen kan korreleres fra boring til boring og således har en betydelig lateral udbredelse /2/. Men samtidig har de elektriske logs også vist, at der fra boring til boring ofte kan være store forskelle i ledningsevnen af porevandet i kalken og i Skrivekridtet, og dermed også lokale forskelle i gradienten i formationsledningsevnen i overgangszonen /2/.

Der kan derfor ikke forventes en entydig overensstemmelse imellem tolkningsresultatet af TEM-sonderinger mht. ledningsevnegradienten (ud fra om der er en eller to gode ledere), og de observerede gradienter i boringer nær TEM-profillinierne. Hertil kommer, at selv om afstanden imellem dette projekts TEM-sonderinger i gennemsnit kun er 0,7 km (efter frasortering af koblede sonderinger) så er afstanden til boringerne ofte større, idet sonderingerne ikke kan udføres på selve kildepladserne af hensyn til elektromagnetisk støj samt kabler og rør i jorden.

Ved placering af TEM-profilerne er det endvidere tilstræbt, at de krydser eller løber parallelt med formodede forkastninger og zoner med seismiske anomalier. En seismisk anomali er i denne sammenhæng en indikation på sprækker eller mindre forkastning, der ikke umiddelbart kan korreleres til sprækker eller forkastninger på andre seismiske linjer /13/. De to væsentligste forkastninger i området er Roskilde Fjord forkastningen og Carlsberg forkastningen. Carlsberg forkastningen er tegnet på kortet, Bilag 11, med en forholdsvis begrænset udstrækning, og den kan sandsynligvis forlænges i nordlig retning. Forlængelsen af forkastningen er indikeret af den nord-syd gående zone med seismiske anomalier i den nordlige del af undersøgelsesområdet /13/. Af formodede forkastninger skal nævnes Alnarp dalens nord og syd flanke, samt Søndersø dalens nord og sydflanke. Begge disse dale fremgår af Bilag 13.

5.2 Tolkning af TEM-profiler

Til brug for diskussionen i dette kapitel er de resulterende resistivitets-tolkningsmodeller fra TEM- og HMTEM-sonderingerne sammenstillet på et længdeprofil for hver af de seks profillinier (se efterfølgende figur 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 og 5.7). Oplysningerne om terrænkoten fra GPS-målinger i felten ved hver af sonderingslokaliteterne er anvendt til terrænbestemmelsen på hver af de seks profiler. Disse er på x-aksen forsynet med en skala med 5.000 m inddeling, der viser afstanden fra profilets begyndelsespunkt. Lokaliseringen af hver af de seks profillinier og de enkelte sonderinger fremgår af kortbilagene 14, 20, 24, 28, 31 og 35.

Resistivitetsniveauet for hvert af de udtolkede lag ved TEM-/HMTEM-sonderingerne er angivet på længdeprofilerne ved farve varierende fra blå over grøn og gul til rød svarende til en resistivitetsvariation fra 5 ohmm til over 160 ohmm. Som tidligere anført indeholder de tolkede resistivitetsmodeller for hver af sonderingerne fra 3 til 5 lag, hvor hovedinteressen samler sig om henholdsvis "den øvre" og "den nedre" gode leder, samt om dybden til disse. I overensstemmelse med definitionen af disse to geofysiske enheder i foranstående afsnit 4.6., er overfladen af disse derefter indlagt på hvert af profilerne, og de to enheder vist med hver sin farvesignatur. Det skal anføres, at der ved denne sammentegning i visse tilfælde er set bort fra enkeltstående afvigelser fra det generelle billede for derved at opnå en vis konsistens i resultaterne mellem nærliggende sonderinger

Med hensyn til den prækvartære overflade, så kan denne ikke med sikkerhed fastlægges ud fra TEM-/HMTEM-sonderingerne, idet der ikke er tale om en entydig kontrast imellem resistiviteten af vandmættet Danienkalk og resistiviteten af alle typer af kvartære lag. Eksempelvis er der kontrast imellem vandmættet Danienkalk (normalt med resistivitet > 100 ohmm) og moræneler (normalt med resistivitet <60 ohmm), men for eksempel ikke imellem vandmættet Danienkalk og vandmættet smeltevandssand/-grus (80-120 ohmm). På profilerne er der alligevel på basis af TEM-/HMTEM-sonderingernes resistivitetsmodeller og med støtte i dels kortet over prækvartærets højdeforhold, Bilag 13, og dels nærliggende boreoplysninger, indtegnet en grænselinie imellem de kvartære dæklag og Danien-kalken. Da denne grænse ikke er indeholdt i målsætningen for projektet, er der ikke i de efterfølgende diskussioner af resultaterne langs de enkelte profillinier knyttet yderligere kommentarer til hverken fastlæggelsen af denne grænse eller til kvartærets tykkelse, med mindre det har resulteret i en tykkelse af Danienkalken, som forekommer usandsynlig.

En sammenfattende tolkning og vurdering af den øvre og den nedre gode leders optræden langs profillinierne er derefter udført ved at sammenligne med resultaterne fra de geofysiske borehulsundersøgelser af nærliggende boringer. Til brug herfor er der derfor langs hvert af profillinierne vist et yderligere profilbillede, hvor kun de sammentegnede geofysiske enheder fra TEM-/HMTEM-sonderingerne er vist, dvs. det kvartære dæklag og den underliggende ferskvandsholdige Danienkalk, samt den øvre og den nedre gode leder. På dette "andet" profilbillede er boreprofilerne vist som forenklede lagfølger omsat til resistiviteter ved hjælp af de geofysiske logs. Idet et forerør gennem de kvartære dæklag som regel umuliggør en bestemmelse af resistiviteten af disse, så består den simplificerede resistivitets-lagfølge i boringerne af et eller to lag: Et lag med en resistivitet >40 ohmm i Danienkalken, hvor boringen ikke har nået ned til det saltvandspåvirkede grundvand, og et yderligere lag med en resistivitet <40 ohmm i de boringer, som er nået ned til det saltvandspåvirkede grundvand.

Til brug for diskussionen af den øvre og den nedre gode leders optræden langs profillinierne er der på det "andet" profilbillede endvidere også indtegnet beliggenheden af basis Danien (top Skrivekridt) dels ud fra de boringer med logs, hvor denne grænse med sikkerhed er fastlagt, og dels ud fra kortet over basis Danien, Bilag 12, som er fremstillet under delprojekt 1, /13/. Hvor grænsen er skønnet, er den vist som en punkteret linie. Med hensyn til detaljer omkring tolkningsresultaterne fra de enkelte sonderinger og herunder usikkerheden på disse henvises der til bilagene for de delprofiler, som hver af de seks hovedprofillinier er inddelt i. Hovedprofillinierne er kun stykvis lineære, og derfor opdelt i delprofiler, som er tilnærmelsesvis rette linier i landskabet:: Profil 1 således i fem delprofiler, profil 2 i tre delprofiler, profil 3 i tre delprofiler, profil 4 i kun to delprofiler, profil 5 i tre delprofiler og endelig profil 6 i to delprofiler. Lokaliseringen af delprofilerne fremgår af ovennævnte kortbilag 14, 20, 24, 28, 31 og 35.

5.2.1 Profil 1

Profil 1 er lokaliseret fra Arresø i nord til Høje Tåstrup i syd, Bilag 14. Profilets samlede længde er omkring 53 km, og det er inddelt i fem delprofiler med i alt 104 sonderinger, hvoraf 19 ikke giver brugbare data (er koblede). Resultaterne af de enkelte delprofiler er præsenteret i bilagene 15-19. En sammenstilling af resultaterne er givet i figur 5-2.

I den nordlige del af profilet formodes top Skrivekridt at ligge omkring kote -100 m til -120 m, og i den sydlige del af profilet findes denne geologiske grænse omkring kote - 50 m (Bilag 12). Langs hele profilet udgør Danienkalken den prækvartære overflade. Danienkalken ligger mellem kote -25 og -50 m i den nordlige del af profilet og mellem kote -25 og 0 m i den sydlige del (Bilag 13).

Oplysninger fra boringer ved profillinjen:

I det følgende gives der en gennemgang af boringer med log-undersøgelser beliggende langs profilet. De beskrives i rækkefølge fra nord mod syd med hensyn til kvartærets tykkelse, kote til top Danien og til basis Danien, samt eventuelle observationer vedrørende saltvandsgrænsen, se figur 5-2.

Æbelholt Kildeplads (boring 187.1376, 187.1354 og 193.1963)

På denne kildeplads er der log-data fra 3 ca. 120 m dybe boringer (DGU nr. 187.1376, 187.1354 og 193.1963), som alle har gennemboret kontakten mellem Danien og Skrivekridt.

Mægtigheden af de kvartære dæklag i de tre boringer er 30-40 m, og Danienkalken er truffet i kote henholdsvis -38 m, -21 m og -19 m. Top Skrivekridt er truffet i henholdsvis kote -90 m, -80m og -79 m, og mægtigheden af Danienkalken er således 50-60 m.

De udførte resistivitetslogs i boring 187.1354 og 193.1963 viser, at resistiviteten i Danienkalken er meget varierende, men svinger om et interval på henholdsvis 70 ohmm og 50 ohmm. I disse to boringer begynder overgangszonen i kontakten mellem Danienkalken og Skrivekridt, hvilket i det følgende vil blive benævnt "top Skrivekridt". Gradienten af den med dybden øgede kloridkoncentration i overgangszonen, er udtrykt ved hældningen på induktionsloggens elektriske ledningsevne /2/, som i de to boringer er henholdsvis 2 og 4 mS/m pr. m /2/. Ifølge induktions- og resistivitetslog er forholdende anderledes i boring 187.1376. Her har Danienkalken en resistivitet omkring 30 ohmm allerede fra ca. kote -55 m og ned til kote -78 m, hvorfra resistiviteten falder til et niveau på ca. 20 ohmm ved top Skrivekridt i kote -90 m. Dette svarer til en ledningsevne-gradient på ca. 1 mS/m pr. m i de nederste ca. 12 m af Danienkalken. Fra top Skrivekridt og til kote -118 m er hældningen på induktionsloggens elektriske ledningsevne ca. 4 mS/m pr. m /2/ uden dog at udvise et decideret lineært forløb. I Danienkalk bestemmes formationsresistiviteten primært af porevandets resistivitet, (se afsnit 3), og den forholdsvis lave resistivitet i Danienkalken indikerer således en forhøjet klorid-koncentration i porevandet allerede fra kote -58 m, og overgangszonen synes at begynde ca. 12 m over top Skrivekridt, men ganske vist med en kun svag gradient på 1 mS/m pr. m. Denne stiger drastisk ved top Skrivekridt til 4 mS/m pr. m..

Strø Kildeplads (boring 192.1071 og 192.1074)

Ved Strø Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag omkring 22 m, og Danienkalken er truffet i kote -13 m og -11 m. De henholdsvis 80 m og 100 m dybe boringer er afsluttet i henholdsvis kote -71 m og kote -88 m, og uden at Danienkalken er gennemboret. Ved korrelation af induktions- og resistivitetslogs til boringerne på Æbelholt kildeplads, som alle når ned i Skrivekridt, er det påvist /2/ at Strø boring 192.1074 er stoppet et par meter over top Skrivekridt, som her ligger i ca. kote -90 m. Danienkalken ses derved at have en mægtighed på omkring 80 m ved kildepladsen. I boring 192.1074 er der tegn på forhøjet koncentration af klorid i bunden af boringen i kote -85 m, hvilket netop indikerer, at boringen er nået ned tæt på kontakten til Skrivekridtet /2/.

Hørup Kildeplads (boring 192.983, 192.984 og 192.1040)

Ved Hørup Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag 29 m til 23 m. Danienkalken er truffet i kote -10 m (boring 192.983), kote -19 m (boring 192.984) og kote -10 (boring 192.1040). Den dybeste boring er 192.1040 (100 m), som er afsluttet i kote -88 m uden at Danienkalken er gennemboret. Der er således gennemboret 78 m Danienkalk, og først nederst i denne kommer resistiviteten under 40 ohmm og ledningsevnen op omkring 25 mS/m. Der er således først tegn på forhøjet klorid i bunden af boringen, hvilket ligesom ved Strø boringen ovenfor indikerer, at boringen er nået ned tæt på kontakten til Skrivekridt. Det har dog ikke været muligt at korrelere hverken induktions- eller resistivitetslogs i denne dybe boring med boringen ved Strø, hvorfor dybden til top Skrivekridt ikke har kunnet verificeres. Overgangszonen er således endnu ikke truffet i kote –88 m, men synes at ligge lige under bunden af boringen.

Egholm Kildeplads (boring 193.1586, 193.1588 og 200.4344)

Ved Egholm Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag ca. 20 m, og Danienkalken er truffet i koterne -6 m, -2 m og -3 m. Top Skrivekridt er ikke nået i de 90 m dybe boringer 193.1586 og 193.1588, men er truffet i kote -82 m i den 110 m dybe boring 200.4344. Mægtigheden af Danienkalken er således 79 m. Ifølge induktions- og resistivitetslogs i boringerne 193.1586 og 193.1588 er resistiviteten i den øvre del af Danienkalken omkring 80 ohmm. I boring 200. 4344 er resistiviteten af Danienkalken omkring 100 ohmm ned til kote ca. -55 m hvorefter den falder til ca. 40 ohmm ved top Skrivekridt i kote -82 m. En tilsvarende tendens ses i boring 193.1588 der stopper i kote -74 m, medens boring 193.1586 viser en fortsættelse af det generelle niveau på 80 ohmm ned til kote -74 m, hvor boringen stopper. På basis af boring 200.4344 skønnes overgangszonen ved Egholm at starte i toppen af Skrivekridtet, men der er tegn på, at porevandet i den nedre del af Danienkalken har forhøjet koncentration af klorid. Gradienten i overgangszonen er 3 mS/m pr. m /2/.

Bjellekær Kildeplads (boring 200.4220, 200.4236 og 200.3256)

Ved Bjellekær Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag 30 m til 40 m, og Danienkalken er truffet i koterne –21, -22 og -29 m. Danienkalken er kun gennemboret i den 114 m dybe boring 200.4220, hvor Top Skrivekridt er truffet i kote -73 m, og hvor mægtigheden af Danienkalken således er 52 m /2/. Ifølge induktions- og resistivitetslogs i denne boring 200.4220 findes overgangszonen ved top Skrivekridtet, og gradienten i overgangszonen er 8 mS/m pr. m /2/.

Kildedal Kildeplads

Der er ikke udført borehulslogging i boringer på denne kildeplads og der foreligger således ingen oplysninger fra borehulslogging om top Skrivekridt grænsen eller om saltvandsgrænsen.

Hove Kildeplads (boring 200.4571)

Ved Hove Kildeplads (boring 200.4571) er mægtigheden af de kvartære dæklag 7 m, og Danienkalken er truffet i kote +2 m. Danienkalken er gennemboret i den 92 m dybe boring, og Top Skrivekridt er truffet i kote -75 m. Mægtigheden af Danienkalken er således 77 m /2/. Ifølge induktions- og resistivitetslogs træffes overgangszonen fra Top Skrivekridt, og gradienten i overgangszonen er 5 mS/m pr. m /2/.

Katrinebjerg Kildeplads (boring 200.3316)

Ved Katrinebjerg Kildeplads (boring 200.3316) er mægtigheden af de kvartære dæklag omkring 50 m, hvilket er meget i sammenligning med Hove Kildeplads. De nederste ca. 12 m af det kvartære dæklag består af smeltevandssand, sten og grus, der må forventes at have en høj resistivitet, hvorfor de ikke kan skelnes fra Danienkalken ved hjælp af TEM-sonderinger. Danienkalken er her truffet i kote - 40 m. Den kun 63 m dybe boring er afsluttet i Danienkalken i kote -54 m, hvorfor der således kun foreligger oplysninger fra omkring 14 m Danienkalk.

Der er kun udført induktionslog i denne boring, og denne log viser ingen tegn på forhøjede koncentrationer af saltvand i boringen, idet den elektriske ledningsevne af Danienkalken kun er 8-10 mS/m svarende til en resistivitet på ca. 100 ohmm.

Syd for Katrinebjerg Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag kun mellem 5 og 10 m ifølge data fra andre boringer i området, og prækvartæroverfladen ligger over kote 0, medens top Skrivekridt synes at hæve sig op til kote -50 m.





Figur 5-2 Geologisk model for Profil 1.

Tolkning af TEM-profilet.

TEM-profilet ses øverst i figur 5-2. Profilet knækker ved Æbelholt Kildeplads, Hørup Kildeplads, Bjellekær Kildeplads og Hove Kildeplads, se Bilag 14. Æbelholt og Bjellekær kildepladser ligger længst mod øst medens Hørup og Hove kildepladser er beliggende længst mod vest.

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

Langs to sektioner på den nordlige del samt en mindre sektion mod syd, i alt ca. en trediedel af profilet, ses der kun den nedre gode leder, idet TEM-sonderingerne her ikke har vist en øvre gode leder. Langs størstedelen af profilet optræder den nedre gode leder i koteintervallet -100 m til -120 m, men stedvis helt nede i ca. kote -140 m . Lige nord for Æbelholt kildeplads samt ved Bjellekær Kildeplads findes den nedre gode leder over kote -100 m.

Resistiviteten af den nedre gode leder er generelt omkring 5 ohmm. Ved enkelte sonderinger er resistiviteten dog op mod 15 ohmm, hvilket som oftest er forbundet med større usikkerhed på de dybe målinger (tidsmæssigt seneste målinger). Den relativt lave resistivitet af den nedre gode leder og den manglende øvre gode leder tolkes jævnfør de teoretiske modelstudier (se kapitel 4, afsnit 6) som et resultat af, at gradienten i overgangszonens formationsledningsevne er over 5 mS/m pr. m. Der foreligger kun en enkelt dyb boring beliggende på en sektion med kun en nedre leder, og hvor gradienten i overgangszonen har kunnet bestemmes. Det er boring 200.4220 ved Bjellekær, hvor gradienten som nævnt ovenfor er 8 mS/m pr. m, og som derved verificerer tolkningen af gradientens størrelse ud fra antal gode ledere. Det er ganske vist kun en lille sektion lige nord for denne boring, som kun har en nedre god leder. Umiddelbart syd for boringen ses der både en øvre og én nedre god leder.

Ud fra de teoretiske modelstudier er det tillige vist, at den nedre gode leder oftest ligger mindre end 10 m under grænsen til overgangszonen, når der ikke optræder en øvre god leder, dvs. når gradienten i overgangszonens formationsledningsevne er større end 5 mS/m pr. m.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

Fra 0 til 25.000 m langs profilet optræder der kun en sektion på ca. 5 km ved Æbelholt Kildeplads med en øvre god leder, hvor der således ifølge de teoretiske modelstudier kan forventes en formationsledningsevne gradient, som er mindre end 5 mS/m pr. m. Dette er i overensstemmelse med observationerne i de tre dybe boringer på kildepladsen, hvor gradienten på induktionslog netop er 2-4 mS/m pr. m. Dybden til den tolkede øvre gode leder svarer på den sydlige del af kildepladsen stort set til top Kridt, hvor også overgangszonen til saltvandet er observeret i de to boringer. På den nordlige del af kildepladsen og nord herfor træffes den øvre gode leder på mindre dybde, dvs. den dybere del af Danienkalken synes således at være saltvandspåvirket. Dette er bekræftet af de geofysiske logs i den nordlige boring på kildepladsen, idet Danienkalkens resistivitet her tydeligvis er lavere end 40 ohmm. Fra Hørup kildeplads ved st. 25.000 og videre sydpå over Egholm, Bjellekær og Hove kildepladser optræder den øvre gode leder næsten overalt og i meget varienende dybde, dvs. imellem kote -50 m og -100 m.

Ifølge de teoretiske modelstudier skulle gradienten i formationsledningsevnen i overgangszonen således kunne forventes at ligge på 1 – 5 mS/m pr. m langs størstedelen af denne sektion af profillinie 1. Udover den allerede omtalte boring ved Bjellekær lige syd for en lille sektion med kun en leder, så foreligger der kun observerede gradienter i overgangszonen fra to dybe boringer langs denne del af profil 1 med to ledere, nemlig fra henholdsvis Egholm og Hove kildepladser, og gradienterne her er henholdsvis 3 mS/m pr. m og 5 mS/m pr. m. De synes således at verificere forudsigelsen af gradientens størrelsesforhold ud fra TEM-tolkningsresultater.

Den observerede dybde til overgangszonen i de dybe boringer på de tre kildepladser, Egholm, Bjellekær og Hove er henholdsvis kote -82 m, -78 m og -75 m. Dybden til den øvre gode leder bestemt ved TEM-sonderingerne er på de tre lokaliteter henholdsvis: -60 m, -50 m og -60 m. Herved ses sidstnævnte ved alle tre lokaliteter at ligge 15-30 m højere end den observerede grænse. Tilsvarende gælder for den øvre gode leder ved Hørup kildeplads, som ifølge TEM-sonderingerne ligger i kote ca. -60 m, medens overgangszonen i den dybe boring lige netop er mødt i kote – 87 m. Ifølge de teoretiske modelstudier skulle overgangszonen bestemt ved den øvre gode leder fra TEM-sonderinger ligge 10 til 35 m dybere end den teoretiske overgangszone, hvilket således er i modsætning til forholdet imellem observeret grænse og TEM-bestemt grænse.

Sammenfatning:

Mægtigheden af de kvartære dæklag er ifølge TEM-sonderingerne relativt stor i den nordlige del af profilet, fra 0 til 7.000 m, hvilket er bekræftet ved mange boringer i denne del af området. Syd herfor, og til ca. 42.000 m langs profilet, er mægtigheden af de kvartære dæklag generelt mellem 10 og 30 m, hvorimod den i den sydligste del af profilet er typisk omkring 10 m.

Mægtigheden af Danienkalken er 50-60 m ved Æbelholt Kildeplads, omkring 80 m i den centrale del af profilet fra kildepladsen Strø over Hørup til Egholm. Ved Bjellekær forekommer en omkring 20 m dyb erosion i Danienkalken, Søndersø dalen, så formationens mægtighed her kun er ca. 50 m. Syd herfor ved Hove er mægtigheden af Danienkalken igen omkring 80 m. Disse mægtigheder afspejles kun i store træk ved tolkningen af TEMsonderingerne, idet høje resistiviteter ikke nødvendigvis altid afspejler Danienkalk, men også kan være forårsaget af kvartære sand-grus forekomster. Endvidere resulterer resistivitetsforholdene i den nedre del af Danienkalken i, at der udtolkes en "øvre god leder", hvis overgrænse ikke er geologisk betinget, men betinget af porevandets kemi.

Den geologiske grænse mellem Skrivekridt og Danienkalken er indtegnet på det tolkede Profil 1 (Fig. 5.-2). Fra 10.000 m til 45.000 m langs profilet er denne geologiske grænse rimelig veldokumenteret ved geofysiske logs i dybe boringer, og grænsens dybdemæssige beliggenhed varierer fra kote -90 m ved Æbelholt til kote -75 m ved Hove. Nord og syd herfor er den mere usikkert bestemt, men falder yderligere mod nord, se Bilag 12, og stiger yderligere mod syd. Ifølge de geofysiske borehuls-logs i dybe boringer langs profillinien har denne bjergartsgrænse vist sig samtidig at være grænsen til overgangszonen til saltvandet.

Den tolkede, nedre gode leder optræder på størstedelen af strækningen 10.000 til 45.000 m lige omkring eller op til 30 m under Danien-Skrivekridt grænsen. På de delstrækninger af profillinie 1, hvor der også er udtolket en "øvre god leder", ligger denne typisk 30-50 m ovenover den nedre gode leder. På ovennævnte strækning med den veldokumenterede Danien-Skrivekridt grænse som samtidig værende grænsen til overgangszonen, ligger den "øvre gode leder" som regel 20-30 m højere end overgangszonen. Dette er i modstrid med de teoretiske modelstudier, som viste, at en udtolket "øvre gode leder" altid ville være beliggende 10-35 m under modellernes overgangszone defineret ved, at formationsledningsevnen aftager lineært, og at resistiviteten er mindre end 40 ohmm og at formationsledningsningsevnen er større end 25 mS/m.

På de samme delstrækninger af profillinie 1, hvor der også er udtolket en "øvre god leder" skulle gradienten i formationsledningsevnen også ifølge de teoretiske modelstudier forventes at ligge på 1 – 5 mS/m pr. m. Der foreligger observerede gradienter i fem dybe boringer langs de dele af profil 1, som også har en øvre god leder, nemlig 3 fra Æbelholt, samt 1 på Egholm og 1 på Hove kildeplads. Gradienterne her er henholdsvis 2, 4, 4, 3 og 5 mS/m pr. m. Fra sektioner med kun nedre god leder er der kun 1 boring med gradient, Bjellekær, som har 8 mS/m pr. m. Der er således tale om en god verifikation af forudsigelsen af gradientforhold ud fra TEM-tolkningsresultater.

I profilets mest sydlige del formodes Danien-Skrivekridt grænsen at stige mod syd. Den øvre og nedre gode leder ligger her generelt i samme dybde som ved den øvrige del af profilet, hvilket indikerer, at overgangszonen her ligger et stykke nede i Skrivekridtet. Tolkningen af disse forhold er ikke verificeret med boringer med logs, og i øvrigt er der kun få oplysninger fra dybe boringer i denne del af profilet. Den nedre afgrænsning af ferskvandszonen er antagelig betinget af forekomsten af mergellag i denne del af Skrivekridtet.

Under de fleste af kildepladserne er der påvist en øvre god leder over den nedre gode leder. Dette kunne tolkes som en begyndende mobilisering af saltvand under kildepladserne. Der er svage indikationer på stigende koncentrationer af klorid i pumpevandet på enkelte af boringerne på kildepladserne Hørup, Bjellekær og Katrinebjerg /14/.

5.2.2 Profil 2

Profil 2 er lokaliseret indenfor projektzone 6, og går fra Borup i nordvest til Klippinge i sydøst, Bilag 20. Profilets samlede længde er omkring 28 km, og det er inddelt i tre delprofiler. Profilet består af 52 sonderinger, hvoraf de 12 ikke giver brugbare data (koblede). De tolkede TEM-sonderinger fremgår af bilag 21, 22 og 23. Resultaterne er sammenstillet i figur 5-3.

I profilets nordvestlige, hvor der optræder Lellinge Grønsandsformation over Danienkalken, findes der ingen boringer, der har nået ned til Skrivekridt. Men top Skrivekridt må formodes at ligge omkring kote -100 m. I den sydøstlige del på Stevns vides Danienkalken at blive

tyndere, og top Skrivekridt optræder omkring kote -20 (Bilag 12). Den prækvartære overflade langs profillinien optræder mellem kote 0 og +25 m (Bilag 13). Danienkalken udgør den prækvartære overflade langs den østlige 2/3-del af profillinien.

Oplysninger fra boringer ved profillinjen

Følgende oplysninger foreligger om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra logging undersøgelser af boringer i området og beskrevet i rækkefølge fra nordvest mod sydøst:

Kimmerslev Kildeplads (boring 212.250 og 212.1297)

Ved Kimmerslev i nordvest er mægtigheden af de kvartære dæklag omkring 60 m. Lellinge Grønsand Formationen er i boring 212.250 truffet i kote -30 m og formationen har her kun en mægtighed på 2 m, idet Danienkalken er truffet fra kote -32 m og til bunden af boringen i kote -52 meter. I boring 212.1297 træffes Danien fra kote -14 m til bunden af boringen i kote -36 m. Der er ikke tegn på saltvandspåvirkning i nogen af disse to boringer.

Slimminge Kildeplads (boring 212.320 ikke medtaget på profilet)

Ved Slimminge er mægtigheden af de kvartære dæklag 10 m, og Lellinge Grønsand Formationen er truffet i +18 m. Grønsandet har her en mægtighed på omkring 30 m, idet Danienkalken er truffet i kote -12 m, og endnu ikke gennemboret ved boringens bund i kote -24 m. Der er ikke tegn på saltvandspåvirkning i den gennemborede del af lagfølgen.

Bjæverskov Kildeplads (boring 212.396)

De kvartære dæklag har her en mægtighed på 14 m. Lellinge Grønsand Formationen er truffet i +16 m og har her en mægtighed på ca 12 m, idet Danienkalken er truffet i kote +4 m. I boringen er der boret ca. 6 m ned i Danienkalken og der er ikke tegn på saltvandspåvirkning i den gennemborede lagfølge.

Fruedal Kildeplads (boring 212.1031)

De kvartære dæklags mægtighed er 13 m, og de overlejrer her Danienkalken, som er truffet i kote +21 m. Ved bunden af denne boring i kote -65 m er Skrivekridtet endnu ikke nået, så Danienkalken er således her mere end 87 m tyk. Der er ikke observeret saltvandspåvirkning i den gennemborede lagserie.

Hårlev Kildeplads (boring 218.576)

Ved Hårlev er mægtigheden af de kvartære dæklag 10 m og Danienkalken truffet i kote +4 m. Skrivekridtet er truffet i kote -61 m, og mægtigheden af Danienkalken er således omkring 65 m. Den elektriske ledningsevne i Danienkalken er 10 - 15 mS/m (100-67 ohmm), hvilket viser at hele formationen indeholder ferskvand. Skrivekridtets elektriske ledningsevne er fra toppen i kote -61 m til boringens bund i kote -87 m omkring 25 mS/m (40 ohmm), og med en kun ganske svag tendens til stigning med dybden. Formationen synes således svagt saltvandspåvirket fra top Skrivekridt og med en meget lille gradient i overgangszonen, 0,2 mS/m pr. m.

Klippinge Kildeplads (boring 218.29)

Ved denne 75 m dybe boring er mægtigheden af de kvartære dæklag 12 m, og Danienkalken træffes i kote +7 m. Skrivekridtet er truffet i kote -26m, hvorfor mægtigheden af Danienkalken således er omkring 33 m. Boringen er afsluttet i kote -56 m, og ovegangszonen begynder i top Skrivekridt, hvor formationsledningsevnen ifølge induktionsloggen er 25 mS/m, som stiger nedefter til ca. 45 mS/m ved bunden, dvs. 20 mS/m på 30 m, hvilket svarer til en gradient på 0,7 mS/m pr. m.



Figur 5-3 Geologisk model for Profil 2.

Tolkning af TEM-profilet

TEM-profilet ses øverst på figur 5-3. Profilet knækker ved Fruedal (DGU nr. 212.1031) og ved Hårlev (DGU nr. 218.576).

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

Koten for den nedre gode leder stiger jævnt fra nordvest mod sydøst i profilet. I den nordvestlige del træffes den gode leder mellem kote -140 og -100 m, og ved Klippinge i sydøst træffes den nedre gode leder omkring kote -65 m. Resistiviteten af den nedre gode leder er generelt under 5 ohmm. I flere af TEM-sonderingerne i den nordvestlige del af profilet er der ikke kortlagt en god leder. Dette skyldes udelukkende, at TEM-metodens indtrængningsdybde ikke har været stor nok til at nå overgangszonen.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

I den sydøstlige halvdel af profilet er der en øvre god leder med en tykkelse på 20-30 m og en resistivitet på mellem 15 og 30 ohmm. Der ses at være et sammenfald mellem dybden til den øvre gode leder og Danien-Skrivekridt grænsen, således som denne er fastlagt ved de to dybe boringer ved henholdsvis Hårlev og Klippinge. På denne delstrækning med to gode ledere skulle formationsledningsevnen i overgangszonen derfor have en gradient på mellem 0,5 og 5,0 mS/m pr. m. Dette er delvis verificeret ved de to nævnte dybe boringer med logs, idet den ene har en formationsgradient i kridtet på 0,7 mS/m pr. m, medens den anden kun har en gradient i kridtet på 0,2 mS/m pr. m og knap nok når ned i overgangszonen.

I den nordvestlige del af profilet findes der ingen øvre god leder, hvorfor gradienten i overgangszonen her skulle være større end 5 mS/m pr. m. Dette har ikke kunnet verificeres, idet ingen af boringerne på denne delstrækning er tilstrækkeligt dybe til at nå ned til overgangszonen.

Sammenfatning:

Mægtigheden af de kvartære dæklag er ifølge TEM-sonderingerne omkring 40 m i den nordvestlige del af profilet ved Borup, hvilket er noget mindre end hvad boringer har vist. I den centrale del og sydøstlige del af profillinien er kvartæret derimod kun mellem 10 og 20 meter, hvilket er i overensstemmelse med de kendte geologiske forhold fra boringer i området.

Lellinge Grønsand Formationen udgør den prækvartære overflade fra station 0 til 11.000, men giver sig kun til kende som en god leder ved en af TEM-sonderingerne på denne strækning. Den kan således ikke identificeres på tolkningsmodellerne som et selvstændigt lag, men indgår i den tolkede Danienkalk med fersk vand, som i øvrigt udgør prækvartæroverfladen fra st. 11.000 og videre mod sydøst. Ved Fruedal er mægtigheden af Danienkal-ken mere end 87 m, medens den mod øst ved Hårlev er omkring 65 m. Længere mod sydøst øst tynder formationen ud, så den ved Klippinge kun er omkring 33 m.

I den østlige del af profilet er kontakten mellem Skrivekridt og Danienkalk veldokumenteret. Den øvre gode leder synes her at falde sammen med denne grænse, og den nedre gode leder optræder 30-40 m nede i Skrivekridtet. Den øvre gode leder med en resistivitet mindre end 40 ohmm indikerer således, at den øvre del af Skrivekridtet er lettere saltvandspåvirket, hvilket er delvis bekræftet ved de to boringer, som er ført 25-30 m ned i Skrivekridtet. I den ene boring (Hårlev) er resistiviteten ved logging observeret at være omkring de 40 ohmm og med kun en svag tendens til fald med dybden, dvs. formationsledningsevnen har en gradient på kun 0.2 mS/m pr. m. I den anden boring (Klippinge) er formationsledningsevnen på 25 mS/m ved top Skrivekridt i kote -26 m, stiger nedefter med en gradient på kun 0,7 mS/m pr. m. Overgangszonen synes derfor at ligge ved top Skrivekridt på den østlige halvdel, men med meget små gadienter. Videre øst for profilet ud mod kysten synes overgangszonen at ligge dybere i Skrivekridtet. Således er saltvandsgrænsen ved Sigerslev kridtbrud nær kysten og omkring 10 km øst for Profil 2 påvist omkring kote -60 m /GEUS rapport 1998-93/. Dette stemmer godt overens med resultaterne fra en HEM-kortlægning (helikopter elektromagnetisk profilering) udført af COWI i 2002 i den østlige del af Stevns, hvor saltvandsgrænsen er påvist at variere mellem kote -50 m og -80m /20/.

I den nordvestlige del af profilet findes der ingen boringsoplysninger om top Skrivekridt eller om overgangszone til saltvandet. Der optræder her kun en nedre god leder, som ligger dybt, kote –120 m til –140 m. De teoretiske beregninger (kapitel 4) og erfaringer fra andre profiler i projektområdet har vist, at den nedre gode leder ofte optræder omkring 30-40 m under top Skrivekridt. Et tykt overdække samt en stor dybde til overgangszonen og en relativ stor gradient i overgangszonen kan resultere i at den øvre gode leder mangler. Ud fra disse betragtninger er der indtegnet forslag til en mulig afgrænsning mellem Skrivekridt og Danienkalk, figur 5-2. Denne følger en lidt mindre hældning fra øst mod vest end observeret imellem Klippinge og Hårlev. Tages det endvidere i betragtning, at Lellinge Grønsand formationen på denne delstrækning er repræsenteret med en tykkelse på op til 30 m, resulterer den foreslåede beliggenhed af Danien-Skrivekridt grænsen i, at mægtigheden af Danienkalken er på mellem 80 og 100 m ligesom i boringen ved Fruedal.

Da der er rapporteret om forhøjede kloridtal i flere af de i øvrigt ikke særlig dybe boringer på kildepladserne ved Kimmerslev, Bjæverskov og Slimminge, er det overraskende, at TEM-sonderingerne i den nordvestlige del af profillinie 2 dels kun viser en nedre god leder, og dels at denne først træffes så dybt som i kote ca. -120 til -140 m. Dette indikerer, at Danienkalken ikke er saltvandsførende, og at den primære saltvandsgrænse må formodes at træffes i grænsen til Skrivekridt. En mulig forklaring på de forhøjede kloridtal på de nævnte kildepladser kunne da være, at de stærkt lerholdige sekvenser af Selandien, eksempelvis Kertemindemergel, indeholder kloridholdigt residualvand.

5.2.3 Profil 3

Profil 3 er lokaliseret fra Villingerød kirke nord for Esrum Sø og mod syd gående øst om Esrum sø og Sjælsø til Gl. Holte, Bilag 24. Profilets samlede længde er omkring 30 km, og det er inddelt i tre delprofiler. Resultaterne af TEM-sonderingerne er præsenteret i bilagene 25, 26 og 27. Profilet består af 57 sonderinger, hvoraf de 12 ikke giver brugbare data (koblede). Derudover er der i profilets nordlige del målt 25 HMTEM-sonderinger, hvoraf de syv er koblede. Resultaterne er sammenstillet i figur 5-4.

Profilets nordlige del krydser den geologiske struktur Alnarp dalen (Zone 1), hvor top Skrivekridt træffes omkring kote -150 m eller dybere (Bilag 12), og hvor Danienkalken træffes omkring kote -60 m eller dybere (Bilag 13). Syd for denne struktur formodes top Skrivekridt at ligge omkring kote -100 m til -80 m, men der er ingen oplysninger om top Skrivekridt i denne del af området (Bilag 12). Danienkalken ligger mellem kote -25 m og kote 0 (Bilag 13). Profilet stopper omtrent ved den nordlige side af Søndersødalen (Zone 3), som i lighed med Alnarp dalen er en dal i den prækvartære overflade.

Oplysninger fra boringer ved profillinien

Følgende oplysninger foreligger om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra logging undersøgelser af boringer i området beskrevet fra nord mod syd:

NORDVAND boringerne (182.319, 182.320, 187.1013 og 187.1014 - kun sidstnævnte er medtaget på profilet på figur 5-4, idet de andre først er blevet undersøgt sent i projektforløbet)

Boring 182.320 og 182.319 er henholdsvis 167 og 147 m dybe og beliggende ved Rusland og Villingerød ved profilets nordlige ende. Kvartæret har her en tykkelse på 86 og 76 m, og Danienkalken er truffet i kote -65 m og -68 m. Den er stadig ikke gennemboret i kote hen-

holdsvis – 147 m og -139 m, men Skrivekridt formationen ligger antagelig tæt under bunden på disse boringer, idet overgangszonen ifølge induktions- og resistivitetslog i boring 182.320 optræder fra kote -138 m, og i 182.319 fra kote -122 m.

Boringerne 187.1013 og 187.1014 er 130 m og 138 m dybe, og beliggende henholdsvis lige nord for Esrum sø og på vestsiden af denne. I disse boringer er den kvartære lagserie 89 m tyk, men underlejres i begge af Selandien Lellinge Grønsand (med tykkelse 9 m og 23 m). Danienkalken træffes derfor endnu dybere her end ved de to førstnævnte, dvs. i henholdsvis kote -75 m og -92 m. Danienkalken er ikke gennemboret ved boringernes bund i kote – 107 m og -118 m. Hvis den har mindst samme tykkelse som observeret i den dybeste af de to førstnævnte boringer, 182.320, hvor den var mindst 82 m tyk, træffes Skrive-kridtet ved disse to boringer med Selandien over Danien først i henholdsvis kote –157 m og kote –174 m. Det er derfor overraskende, at overgangszonen til saltvand er mødt nederst i disse boringer i kote ca. -100 og -115 m, dvs. i en lidt højere kote end ved de to første boringer og på trods af, at Skrivekridtet jævnfør ovenstående må forventes at ligge lidt dybere.

I modsætning til de to førstnævnte og dybere boringer er der i de to boringer med Selandien påvist koncentrationer af klorid i blandingsvandprøver, således 320 mg/l i boring 187.1014 og 810 mg/l i boring 187.1013. Der må derfor forekomme stærkt vandførende horisonter i den nedre del af disse to boringer for, at kloridholdigt vand fra overgangszonen i den grad kan præge det oppumpede blandingsvand.

Langstrup Kildeplads (Boring 187.1138 - ikke vist på profilet, figur 5-4)

Denne boring er beliggende ca. midt på profillinie 3, og på sydflanken af Alnarp dalen, zone 1, hvor Danienkalkens overflade stadig ligger dybt, således her i kote -64 m. Mægtigheden af de kvartære dæklag er ca. 73 m. Danienkalken er endnu ikke gennemboret ved boringens bund i kote -111 m. Der er tegn på forhøjede koncentrationer af klorid (ca. 200 mg/l) fra bunden af denne boring.

Sjælsø Kildeplads (boring 193.1305)

Denne boring er beliggende ved den sydlige del af profilet, og udenfor Alnarp dalen, hvilket bl.a. ses ved at Danienkalken træffes allerede i kote -17 m. Mægtigheden af de kvartære dæklag er 37 meter. Danienkalken er endnu ikke gennemboret ved bunden af boringen i kote -77 m, og overgangszonen til saltvand er ikke observeret.

Danienkalken er således ikke gennemboret i nogen boring langs profilet, hvorfor dybden til top Skrivekridt, således som den er indlagt på figur 5-4, er meget usikker.

Tolkning af TEM-profilet.

TEM-profilet ses øverst på figur 5-4. Profilet knækker lidt nord for Gl. Holte mellem TEM sondering 3007 0g 3008, samt ved Langerød station mellem TEM sondering 3040 og 3042.

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

l alle sonderinger i Profil 3 er der påvist en nedre god leder. I den nordlige del fra station 0 til 15.000 optræder denne gode leder omkring kote -150 m til – 175 m. Fra station 15.000 og mod syd aftager dybden til den gode leder jævnt, så den i den sydligste del af profilet

optræder i kote -125 m. Syd for Sjælsø Kildeplads er der i to TEM-sonderinger tolket en god leder, som træffes helt op omkring kote 0 m.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

Der optræder ingen øvre god leder i profilet. Et tykt overdække samt en stor dybde til overgangszonen og eventuelt en relativ stor gradient i overgangszonen kan resultere i, at den øvre gode leder mangler.



Figur 5-4 Geologisk model for Profil 3.

Sammenfatning:

Den nordligste trediedel af profilet er lokaliseret i den prækvartære Alnarp dal, hvor Danienkalken i den centrale del ligger så dybt, kote -92 m, at den er overlejret af op til 23 m Selandien Lellinge Grønsand formation. Mægtigheden af de kvartære dæklag synes flere steder underestimeret ved TEM-sonderingerne, hvorved prækvartæroverfladen bestemt ved TEM-sonderingerne på denne del af profilet synes at ligge 10-30 m for højt. Årsagen hertil skyldes manglende kontrast i resistivitet imellem de optrædende kvartære sandlag (Alnarp sandet) og Danienkalken.

Boringen ved Langstrup midt på profillinien (ikke vist på figur 5-4) er beliggende på Alnarp dalens sydflanke, idet Danienkalken også her ligger forholdsvis dybt, kote –64 m. Også syd

for denne dalstruktur optræder der flere steder betragtelige kvartære sandlag ovenpå kalken, som TEM-sonderingerne ikke kan skelne fra kalken, hvorved denne bliver bestemt til at ligge for højt. Koten for top Danienkalk stiger fra omkring -40 m syd for Langstrup til omkring kote 0 m ved Søndersødalen i syd, Bilag 13.

Der foreligger kun meget få oplysninger om dybden til top Skrivekridt i den østlige del af projektområdet nord for København og dermed også langs profillinie 3. Ud fra oplysninger om koten til top Danienkalk (Bilag 13), og antagelse af en mægtighed af Danienkalken på ca. 80 m ligesom på store dele af profillinie 1, er den forventede kote til top Skrivekridt langs profillinie 3 indlagt som vist på nederste billede på figur 5-4. Den indlagte bjergartsgrænse er naturligvis behæftet med stor usikkerhed, men den synes at ligge omkring kote -150 m i den nordlige del, og fra midt i profilet stiger den mod syd til omkring kote -60 ved profilets sydende.

Denne tolkede kote til top Skrivekridt ses at optræde mellem 10 og 50 m over den nedre gode leder i Profil 3. Sidstnævnte udviser samme variation som der forventes i top Skrivekridt overfladen, nemlig at den ligger dybest under Alnarp dalen i profilets nordlige halvdel, og at den stiger fra Alnarp dalen og mod syd. Overgangszonens karakter i form af ledningsevne gradient er ikke påvist i nogen boringer langs profilet, men i enkelte af de dybe NORDVAND boringer er der observeret saltvandspåvirkning nederst. Baseret på erfaringer fra de boringer langs andre profilinier, som har gennemboret Danien, skulle saltvandspåvirkningen nederst i de fire NORDVAND boringer indikere, at Skrivekridtet optræder tæt under bunden af disse boringer. Dette er sandsynligt for de to dybeste (147m og 167 m dybe), men for de to andre (130 m og 138 m dybe) er der antagelig yderligere ca. 50 m Danienkalk før Skrivekridtet ville være nået.

Der optræder ingen sektioner langs profilet, hvor TEM-sonderingerne har påvist en "øvre god leder". Dette skulle indikere en gradient i formationsledningsevnen på over 5 mS/m pr. m langs hele profillinien, hvilket ikke har kunnet verificeres på grund af manglende bestemmelser af gradienter i boringer. Således har borehulslogs i de fire NORDVAND boringer, som er saltvandspåvirkede nederst, ikke kunnet dannet basis for en sikker bestemmelse af gradienten i formationsledningsevnen, idet de foreliggende log-sektioner under saltvandsgrænsen har været for korte.

Der ses omkring st. 27.000 syd for Sjælsø at optræde en anomali med den gode leder tæt på terræn. Anomalien er imidlertid kun påvist i to sonderinger, så der kan være tale om, at målingerne er påvirkede af ikke geologisk betingede faktorer. Såfremt dette ikke er tilfældet, kan årsagen være lokalt optrængende saltvand i en forkastning eventuelt mobiliseret som følge af indvinding, - eller eventuelt en opforkastet blok i undergrunden, hvorved Skrivekridtet og dermed saltvandet er bragt tættere på terræn.

5.2.4 Profil 4

Profil 4 er beliggende på langs i den prækvartære dal, Søndersø dalen, zone 3, og går fra Stenløse i vest til området syd for Furesø i øst, Bilag 28. Profilets samlede længde er omkring 18 km og det er inddelt i to delprofiler, som samlet indeholder 40 sonderinger, hvoraf de 5 er koblede. Det skal bemærkes, at den østligste ende af delprofil 4_1 (0-12000 m) er lokaliseret omkring 3 km nord for den vestligste ende af delprofil 4_2 (12000-18500 m). Delprofilerne er præsenteret i bilagene 29 og 30. Resultaterne er sammenstillet nedenfor på figur 5-5. Profillinien krydses ved Bjellekær ved st. 6.500 af profillinie 1.

Delprofil 4_1 er lokaliseret langs den nordlige afgrænsning af Søndersø, hvor top Skrivekridt træffes imellem kote -60 m´og –80 m (Bilag 12). Prækvartæroverfladen, som udgøres af Danienkalken, træffes omkring kote -25 m (bilag 13). Delprofil 4_2 er lokaliseret langs den sydlige afgrænsning af Søndersødalen, hvor Top Skrivekridt ligger mellem kote -60 og -40 m (Bilag 12), og kalkoverfladen træffes omkring kote -25 m (Bilag 13).

Oplysninger fra boringer langs profillinien

Følgende oplysninger foreligger om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra loggingundersøgelser af boringer i området beskrevet fra vest mod øst:

Værebro Kildeplads (boring 199.942, 199.973, 200.3385 og 200.3426))

Mægtigheden af de kvartære dæklag i de fire boringer varierer fra 38 m til 45 m, og Danienkalken træffes i koter varierende fra -35 m til -41 m. Boringerne er afsluttet i dybder varierende fra kote -56 m til kote -75 m, og uden at Danienkalken i nogen af dem er gennemboret. Skrivekridtet ligger således dybere end kote – 75 m. Der er ved logging undersøgelserne påvist opstrømning af kloridholdigt grundvand fra bunden af alle fire boringer, hvorfor det må antages at boringerne er nået lige netop ned til overgangszonen til saltvand, og at Skrivekridtet må formodes at være tæt ved boringernes bund.

Bjellekær Kildeplads (boring 200.4220,200.4236 og 200.3256)

Profil 4 skærer Profil 1 ved Bjellekær Kildeplads. Her er mægtigheden af de kvartære dæklag 30 m til 40 m og Danienkalken er truffet i kote varierende fra –21 m til -29 m. Top Skrivekridt er truffet i kote -73 m i den 114 m dybe boring 200.4220, hvor mægtigheden af Danienkalken således er 52 m /2/. Ifølge borehulslogs i denne boring optræder overgangszonen til saltvand ved top Skrivekridt og gradienten i formationsledningsevnen er her 8 mS/m pr. m /2/. De to andre boringer er ikke så dybe (65 m) og er derfor ikke nået ned til overgangszonen.

Bogøgaard Kildeplads (boring 200.4254, 200.4265 og 200.4222)

Ved Bogøgaard Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag 40 – 45 m, og Danienkalken er truffet i dybder varierende fra kote -32 m til kote -37 m. Boringerne er ikke så dybe, 55 m til 65 m, og når derfor kun ned til kote varierende fra -47 m til -57 m, og uden at nå ned til Skrivekridtet. Den dybeste boring, 200.4222, er lige netop nået ned til overgangszonen, idet der er forhøjet ledningsevne i bunden af boringen. Skrivekridtet må derfor formodes at være tæt ved denne borings bund, dvs. omkring kote -60 m.

I den kun 55 m dybe boring, 200.4264, er der konstateret forhøjet klorid i blandingsvandet, men logging undersøgelse af boringen har vist, at boringen ikke er nået ned i overgangszonen. Kloridpåvirkningen stammer fra en indstrømning fra en vandførende sprække 4 m over boringens bund, dvs. i kote -43 m. Denne sprække må derfor have hydraulisk forbindelse til den dybereliggende overgangszone, hvorfra vandet strømmer op til boringen som følge af indvinding fra boringen og det deraf lavere trykniveau.

Søndersø Kildeplads (boring 200.3810, 200.3811 og 200.3749)

Ved Søndersø Kildeplads er mægtigheden af de kvartære dæklag 41-49 m, og Danienkalken er truffet i koterne -28 m, -32 m og -36 m. Top Skrivekridt er truffet i kote -60 m i de to første boringer, og i kote -67 m i den lidt nordligere beliggende boring 200.3749. I alle tre boringer ses overgangszonen fra toppen af Skrivekridtet, men kun i den meget dybe boring 200.3749 (120 m) har det været muligt at fastsætte gradienten på formationsledningsevnen (8 mS/m pr. m).

Tibberup Kildeplads (boring 200.4423)

Boringen ved Tibberup Kildeplads synes at ligge på grænsen mellem Søndersødalen (zone 3), og zone 4 syd herfor, hvor såvel Danien prækvartæroverfladen som top Skrivekridt ligger højere end i zone 3. Således ses Danienkalken at ligge i kote -14 m, og top Skrivekridt i kote -48 m, hvilket for begge grænser er højere end observeret ved de ovenover omtalte boringer. Overgangszonen er også ved Tibberup observeret fra toppen af Skrivekridtet, dvs. allerede i kote –48 m, og gradienten i formationsledningsevnen er ifølge induktionsloggen 5 mS/m pr. m.



Figur 5-5 Geologisk model for Profil 4.

Tolkning af TEM-profilet.

TEM-profilet ses øverst figur 5-5, og består af to delprofiler, som er forskudt ca. 3 km i forhold til hinanden ved Søndersø (12.000 m).

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

I den vestlige del af profilet findes den nedre gode leder i kote –120m. I retning mod øst stiger koten for den nedre gode leder således, at den ved 12.000 m langs profilet er beliggende i kote –80 m. Øst for 12.000 m øges dybden til den gode leder igen, således at den længst mod øst træffes i kote -100 m. Resistiviteten af den nedre gode leder er generelt meget lav, < 5 ohmm.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

Der ses tre delsektioner uden øvre god leder, nemlig i begge ender af profilet, samt omkring st. 5.000. Tykkelsen af den øvre gode leder er 20-40 m, og dens resistivitet er generelt relativ lav, dvs. 15-20 ohmm. Enkelte af TEM-sonderingerne indenfor sektioner med en øvre god leder viser kun den nedre gode leder med en resistivitet, der er under 15 ohmm. Afgrænsningen af sektioner med den øvre gode leder er således til dels trukket ud fra kravet om kontinuitet i tolkningen. Den lave resistivitet af den øvre gode leder indikerer, at gradienten for overgangszonen er tæt ved grænseværdien 5 mS/m pr. m for, om der optræder en eller to gode ledere.

Sammenfatning:

Mægtigheden af de kvartære dæklag bestemt fra TEM-sonderingerne varierer typisk mellem 25 og 40 m, resulterende i, at kalkoverfladen ud fra TEM-sonderingerne på størstedelen af profilet ligger i kote 0 til – 20 m. Dette er ca. 20 m for højt, idet Danienkalk træffes i følgende koter ved kildepladserne: Værebro (-36 m), Bjellekær (-21 m), Bogøgård (-37 m), Søndersø (-30m) og Tibberup (-14 m). Årsagen til den "for højtliggende" kalkoverflade må tilskrives den manglende resistivitetskontrast imellem de kvartære sandlag og kalken.

Top Skrivekridt træffes ved Bjellekær i kote -73 m, i kote -67 m og -60 m ved Søndersø og i kote -48 m ved Tibberup. Det vides endvidere, at Skrivekridt i den vestlige del under Værebro kildeplads ligger dybere end kote – 75 m, men på basis af den observerede saltvandspåvirkning formodentlig ikke meget dybere. Ligeledes på basis af observeret saltvandspåvirkning nederst i den dybeste boring ved Bogøgaard må Skrivekridtet her formodes at ligge i kote ca. -60m. Disse oplysninger og observationer har dannet baggrund for den "Top Skrivekridt" grænse, som er indlagt på nederste billede på figur 5.-5.

Ud fra det forhold, at der på store dele af profilet optræder såvel den øvre som den nedre gode leder, skulle gradienten i formationsledningsevnen ifølge det teoretiske modelstudie være mindre end 5 mS/m pr. m. Dette er imidlertid ikke i overensstemmelse med de faktisk observerede gradienter. Ved Bjellekær Kildeplads er der således påvist en overgangszone i top Skrivekridt med en gradient på 8 mS/m pr. m, ligesom der ved kildepladserne Søndersø og Tibberup med borehulsundersøgelser er påvist en overgangszone fra kontakten mellem Skrivekridt og Danienkalk med gradienter på henholdsvis 8 og 5 mS/m pr. m. Divergensen kan måske forklares ved, at den øvre gode leder generelt har en meget lav resistivitet og er nær ved at skulle klassificeres som en nedre god leder. Ved Bjellekærboringen med gradient 8 mS/m pr. m er der ligesom på profil 1 tale om, at TEMsonderingerne på den ene side af boringen (øst) har to ledere, medens TEMsonderingerne på den anden side af boringen (vest) kun har en nedre leder, således at gradienten på 8 stemmer med den ene side, men ikke med den anden. Tykkelsen af den øvre gode leder er generelt 20-40 m.

Den øvre gode leder ses at ligge omtrent i niveau med den observerede eller formodede Danien-Skrivekridt grænse, som også synes at være grænsen til overgangszonen. Der forekommer dog på Værebro og Bogøgaard kildepladser observationer om saltvandspåvirkninger også i Danienkalken, men disse synes snarere at være hydraulisk betinget opstrømmende vand fra en dybere beliggende overgangszone end at være en overgangszone i selve Danienkalken.

Den nedre gode leder er påvist omkring kote -120 m i den vestlige del af profilet, og den stiger jævnt til kote -80 m omkring kote 12.000, hvorefter den falder igen mod øst til kote - 100 m. Den tolkede nedre gode leder optræder 20-40 m nede i overgangszonen og dermed også 20-40 m under top Skrivekridt. I de fleste af sonderingerne er denne leders resistivitet mindre end 5 ohmm.

5.2.5 Profil 5

Profillinie 5 er beliggende i zone 4 vest for København og går fra Roskilde Fjord i vest til Skovlunde i øst, Bilag 31. Profilet er lokaliseret ca. 10 km syd for Profil 4 og parallelt med dette. Profil 5 har en samlet længde på 21 km, og det er inddelt i tre delprofiler, som samlet indeholder 40 sonderinger, hvoraf de 9 er koblede. Resultaterne af delprofilerne er præsenteret i bilagene 32, 33 og 34. Resultaterne er sammenstillet nedenfor i figur 5-6.

Profilet er lokaliseret i den nordvestligste del af Zone 4, hvor top Skrivekridt ligger mellem kote -70 og -60 m på den centrale del af profilet, og i kote -30 til -20 m i den østlige del (Bilag 12). Der er ingen oplysninger om top Skrivekridts dybde i den vestlige del. Prækvartæroverfladen udgøres af Danienkalken og i profilets vestlige del træffes denne omkring kote -25 m og i den østlige del mellem kote 0 og + 25 m (bilag 13). Profillinien krydses ved Katrinebjerg af profillinie 1.

Oplysninger fra boringer ved profillinien

Følgende oplysninger foreligger om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra logging undersøgelser i boringer i området beskrevet i rækkefølge fra vest mod øst:

Brokilde Kildeplads (boring 199.1119)

Mægtigheden af de kvartære dæklag er her 19 m, og Danienkalken er truffet i kote -12 m. Boringen er afsluttet i Danienkalken i kote -53 m. Der er ikke tegn på saltvandspåvirkning i den gennemborede lagserie.

Katrinebjerg Kildeplads (boring 200.3316)

Ved denne boring er mægtigheden af de kvartære dæklag omkring 50 m, hvilket er meget i sammenligning med boring 200.4571 ved Hove Kildeplads ca. 2 km mod nord, hvor der

kun var 7 m kvartær. De nederste ca. 12 m af det kvartære dæklag ved Katrinebjerg består af smeltevandssand, sten og grus, der må forventes at have en høj resistivitet, hvorfor de ikke kan skelnes fra Danienkalken ved hjælp af TEM-sonderinger. Danienkalken er her truffet i kote - 40 m. Boringen er afsluttet i Danienkalken i kote -54 m, hvilket betyder at der kun foreligger logging-data fra omkring 14 m Danienkalk. Induktionsloggen viser en formationsledningsevne i Danienkalken på kun 8-10 mS/m svarende til en resistivitet på ca. 100 ohmm, hvorfor der således ikke er tegn på saltvandspåvirkning.

Egelundsparken (boring 200.4699)

Denne boring er 83 m dyb, og mægtigheden af de kvartære dæklag er her 7 m. Danienkalken er truffet i kote +8 m medens "Top Skrivekridt" er truffet i kote -31 m. Danienkalkens mægtighed er således her kun 39 m. Overgangszonen optræder først 17 m nede i kridtet i kote -56 m, hvilket er 8 m under Kjølbygaard merglen, som er truffet i kote -48 m. Gradienten i overgangszonen er 4 mS/m pr. m.

Vestskoven (boring 200.4572, 200.4889 og 200.4890)

Mægtigheden af de kvartære dæklag i de tre boringer er 14-18 m, og Danienkalken er truffet i kote henholdsvis +7 m, +8 m og +9 m. Danienkalken er kun gennemboret i den sydligste af de tre boringer, 200.4572, som er 102 m dyb. Her ligger "Top Skrivekridt" i kote -40 m, dvs. 9 m dybere end i den sydligere beliggende boring ved Egelundsparken omtalt ovenfor. Overgangszonen optræder i boring 200.4572 fra Kjølbygaard merglen, som her ligger i kote -57 m, hvilket også er 9 m dybere end ved Egelundsparken. Gradienten i overgangszonen er kun 0,6 mS/m pr. m.

Harrestrup kildeplads (boring 200.4715 og 200.4716)

De to boringer er kun 50 m dybe, men viser Danienkalk fra kote -1 m og -2 m. Danienkalken er ikke gennemboret ved boringernes bund i kote -37. Overgangszonen til saltvand er ikke nået. Kvartærets mægtighed er 14-15 m.

Skovlunde Kildeplads (boring 200.4442)

Ved denne 80 m dybe boring er mægtigheden af de kvartære dæklag 14 m, og Danienkalken er truffet i kote -2 m. Top Skrivekridt er truffet i kote -29 m, og mægtigheden af Danienkalken er således 27 m. Overgangszonen er lige akkurat nået under et mergellag nær bunden af boringen i kote -66 m, hvorfor en gradient ikke har kunnet bestemmes. Kjølbygård merglen er truffet i kote -46 m, dvs. 17 m under top Kridt. Boringen er afsluttet i kote -68 m.

Tolkning af TEM-profilet.

TEM-profilet ses øverst figur 5-6, og består af tre delprofiler med knæk ved Katrinebjerg ved st. 8.000 m og ved Egelundsparken ved st. 15.000 m.

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

I den vestlige og den østlige del af profilet ligger den nedre gode leder omkring kote -120 m, medens den under den centrale del ligger mellem kote -100 og -80m.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

Med undtagelse af én enkelt sondering i begyndelsen af profilet er der påvist en øvre god leder i alle TEM-sonderingerne. Denne leders overflade stiger jævnt fra kote ca. –100 m i

den vestlige del af profilet til kote ca. –50 m i den østlige del. Sammenholdes dette med grænsen til den nedre gode leder, ses tykkelsen af den øvre gode leder derfor at være omkring 30 m på den vestlige del af profilet, men at øges fra st. 15.000 og mod øst til 60-70 m.



Figur 5-6 Geologisk model for Profil 5.

Sammenfatning:

Mægtigheden af de kvartære dæklag er ifølge TEM-sonderingerne mellem 10 og 20 m langs hele Profil 5, hvilket er i overensstemmelse med boreoplysningerne med undtagelse af området ved Katrinebjerg Kildeplads, hvor mægtighederne ifølge boringen er ca. 50 m.

Danienkalken ligger således ifølge TEM-sonderingerne mellem kote -12 m og +8 m i overensstemmelse med boringerne, igen med undtagelse af Katrinebjerg Kildeplads, hvor Danienkalken er truffet i kote - 40 m. Ved Katrinebjerg forekommer således en lokal fordybning i Danienkalken, som muligvis kan følges som en erosionsdal, som efterfølgende er blevet opfyldt med kvartære sedimenter.

Langs den østlige del af profillinien, dvs. ved Egelundsparken og i Vestskoven samt ved Skovlunde er Danienkalken gennemboret og "Top Skrivekridt" grænsen er beliggende i kote henholdsvis -31m, -40 m og -29 m. Mægtigheden af Danienkalken varierer derfor her fra 39 m over 48 m til 31 m. Vest for Egelundsparken er der ingen eksakte informationer langs profillinien om dybden til "Top Skrivekridt" grænsen. Da den ved Katrinebjerg endnu ikke er truffet i kote -53 m og da den ligger i kote -75 m 2 km nord herfor, må den formodes at dykke mod vest således at den formentlig ligger i kote -75 m til -100 ude ved Roskilde fjord. Den observerede og forventede dybde til "Top Skrivekridt" er indtegnet på profil 5 i nederste billede på figur 5-6.

Ved Egelundsparken, Vestskoven og Skovlunde er overgangszonen observeret beliggende et stykke nede i Skrivekridt i kote henholdsvis -56 m, -57 m og -66 m. Den tolkede øvre gode leder ses således på denne delstrækning at være sammenfaldende med overgangszonen, som her optræder 20-25 m nede i Skrivekridt. Tolkningen af forholdene i den vestlige del af profilet er mere usikker, da der ikke herfra foreligger oplysninger hverken om overgangszonen eller om top Skrivekridt. Men sammenholdt med den formodede beliggenhed af "Top Skrivekridt" grænsen optræder den øvre gode leder også her et stykke nede i Skrivekridtet, og formodes også på denne delstrækning at være sammenfaldende med overgangszonen til saltvand.

Den nedre gode leder følger fra Egelundsparken og imod vest konkordant den formodede Danien-Skrivekridt grænse 30-50 m under denne, hvorimod den gode leder mod øst dykker i modsætning til Danien-Skrivekridt grænsen. Sidstnævnte forhold kan der ikke umiddelbart gives nogen forklaring på.

Ud fra det forhold, at der på hele profilet optræder såvel den øvre som den nedre gode leder, skulle gradienten i formationsledningsevnen ifølge det teoretiske modelstudie være mindre end 5 mS/m pr. m. Dette er også i overensstemmelse med de to observerede gradienter. Ved Egelundsparken er den således 4 mS/m pr. m og ved Vestskoven er den 0,6 mS/m pr. m.

5.2.6 Profil 6

Profil 6 går fra Store Valby-Ågerup øst for Roskilde mod syd til Himmelev og videre over Hedehusene og til Hundige i sydøst, Bilag 35. Profilets samlede længde er 19 km, og det er inddelt i to delprofiler. Resultaterne af de enkelte delprofiler er vist i bilagene 36 og 37. I forbindelse med projektet er der udført 26 TEM-sonderinger, hvoraf de fem er koblede. På delprofil 6_2 ses et spring mellem sonderingerne 6012 og 6018 på ca. fem kilometer, idet der i dette område ved Solhøj allerede forelå TEM-sonderinger fra en tidligere udført undersøgelse /19/. Disse sonderinger er derfor medtaget i denne rapport og har identifikationen SO foran stationsnummeret. Resultaterne er sammenstillet i figur 5-7.

Profilet begynder i zone 4, men er lokaliseret i den nordlige del af Zone 6. Ifølge Bilag 12 er der ingen informationer om Top Skrivekridt i den nordvestlige del af profilet, men bjergartsgrænsen ses at ligge omkring kote -20 m i den østlige del, og imellem kote -40 m til -60 m langs den midterste del af profilet. Prækvartæroverfladen består langs størstedelen af profilet af Danienkalken, men i den østlige del udgøres den af Skrivekridt. Prækvartæroverfladen ligger omkring kote 0 i såvel den vestlige som den østlige del (Bilag 13), men kommer op over kote +25 m midt på profilet.

Oplysninger fra boringer ved profillinien

Følgende oplysninger foreligger om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra logging undersøgelser fra boringer beskrevet i rækkefølge fra vest mod øst.

Brokilde Kildeplads (boring 199.1119)

Ved denne 60 m dybe boring beliggende i zone 4 er mægtigheden af de kvartære dæklag er her 19 m, og Danienkalken er truffet i kote -12 m. Danienkalken er endnu ikke gennemboret i bunden af boringen i kote -53 m. Der er ikke tegn på saltvandspåvirkning i den gennemborede lagserie.

Marbjerg Kildeplads (boring 199.921)

Ved denne kun 50 m dybe boring beliggende i zone 4 er mægtigheden af de kvartære dæklag 18 m. Danienkalken optræder fra kote -3 m og er endnu ikke gennemboret ved boringens bund i kote -35 m, ligesom overgangszonen endnu ikke er truffet.

Tune (boring 207.3841)

I forbindelse med kalkprojektet er der boret en 110 m dyb boring ved Tune, beliggende i zone 6. Boringen er lokaliseret omkring 5 km sydvest for den vestligste del af profilet, men er medtaget her, fordi dens informationer om Top Skrivekridt grænsen samt om dybden til overgangszonen menes at kunne udstrækkes til den vestlige del af profil 6. Danienkalken er i denne boring truffet i kote +20 m, og gennemboret i kote -44 m, /3/ hvor top Skrivekridt er truffet. Danienkalken har dermed en mægtighed på 64 m. Grænsen til saltvandspåvirkningen (overgangszonen) er sammenfaldene med top Skrivekridt i kote -44 m, og gradienten i formationsledningsevnen herfra og til boringens bund i kote -69 m er 1 mS/m pr. m.

Solhøj Kildeplads (207.2694 og 207.2705)

Ved Solhøj Kildeplads er boringerne relativt korte, så der er kun oplysninger til ca. 40 meter under terræn. Mægtigheden af de kvartære dæklag er omkring 10 meter, og Danienkalken træffes i kote + 11 m og + 13 m. Boringerne når kun ned til kote -6 m og -14 m, og der er ikke observeret saltvandspåvirkning.

Thorslunde Kildeplads (boring 207.3633)

Ved denne 123 m dybe boring er mægtigheden af de kvartære dæklag 19 meter. Danienkalken er truffet i kote -1 m, og dens mægtighed er omkring 35 meter, idet Skrivekridtet optræder fra kote -36 m. Boringen er dyb og når ned til kote -105 m. Overgangszonen optræder fra et mergellag i kote -70 m, og gradienten i formationsledningsevnen er herfra og til boringens bund ca. 2 mS/m pr. m.

Ishøj Mose (207.3606, 207.3627 og 207.3586)

Mægtigheden af de kvartære dæklag er stærkt varierende, fra 9 m til 44 m. Danienkalken er i to af boringerne truffet i henholdsvis kote +3 m og -16 m, medens den er borteroderet i den tredje, 207.3627, hvor Skrivekridt i kote -34 m udgør prækvartæroverfladen. I de to andre, 207.3606 og 207.3586, med Danienkalk træffes Skrivekridt fra henholdsvis kote -18 m og -30 m. Der er således indikation på ikke alene kraftig erosion ned i prækvartæroverfladen, men også på en forkastning af top Skrivekridt imellem de to boringer, 207.3606 og 207.3586. Sidstnævnte ses også ved at forskellen i kote til Kjølbygård merglen er 20 m (kote -52 m i 207.3586 og kote -32 m i 207.3606), hvorimod denne mergel i boring

207.3627 ligger i omtrent samme kote, -50 m, som i 207.3586. Den prækvartære lagserie i boringerne 207.3627 og 207.3586 er således nedforkastet i forhold til den vestlige beliggende boring 207.3606.

Alle tre boringer viser saltvandspåvirkning, men overgangszonen optræder meget forskelligt i de tre boringer. I den vestlige 207.3606 begynder overgangszonen i kote -27 m, dvs. 9 m under top Skrivekridt, og gradienten til bund af boringen i kote -48 m er 1 mS/m pr. m. I de to nedforkastede boringer begynder overgangszonen i 207.3627 først under Kjølbygård merglen i kote -50 m, men med en stor gradient på 6 mS/m pr. m til boringens bund i kote -60 m. I boring 207.3586 begynder den derimod ved top Skrivekridt i kote -30 m, og med en gradient på 2 mS/m pr. m til bund af boring i kote -88 m.

Beliggenheden af overgangszonen til saltvandet synes således meget kompleks på denne kildeplads både i forhold til lagfølge, men også i henseende til gradient i formationsledningsevnen og dermed i henseende til stigningen i koncentration af klorid med dybden. Årsagen til denne kompleksitet er antagelig at saltvandets optræden ikke alene er styret af udvaskning, fortynding og diffusion, men også er betinget af opstrømning ved den forkastningszone, som er omtalt ovenfor.

Danien-Skrivekridt grænsen foreligger således dokumenteret i kote –44 m i boring 207.3841 ved Tune, i kote -36 m i 207.3633 ved Thorslunde, i kote -18 m i 207.3606 ved Ishøj, og endelig i kote – 30 m i 207.3627 ved Ishøj. Ud fra disse oplysninger er Danien-Skrivekridt grænsen indlagt på nederste profilbillede på efterfølgende figur 5-7.

Tolkning af TEM-profilet.

TEM-profilet ses øverst figur 5-7. Profilet er sammensat af to delprofiler, således at det fra at være nord-sydgående på delprofil 6_1 fortsætter ved st. 4.500 mod sydvest på delprofil 6_2.

Den nedre gode leder (<15 ohmm)

I den nordvestlige del af profilet (0 til 7.000 m langs profilet) har hovedparten af TEMsonderingerne udelukkende en nedre god leder. Koten for den nedre gode leder er her ca. -125 m til –80 m. I den centrale del af profilet omkring station 10.000 m har hovedparten af TEM-sonderingerne ingen nedre god leder. Den ene TEM-sondering, der indeholder information om den nedre gode leder, viser, at den er beliggende omkring kote -150 m. Tilsvarende dybder er set i den sydligste del af Profil 1. Profil 1 krydser Profil 6 ved st. 12.000 m.

I den østlige del af profilet (11.000 til 19.000 m) har hovedparten af TEM-sonderingerne en øvre og en nedre god leder. I dette område stiger den nedre gode leder fra ca. kote -125 m ved station 11.000 m op til ca. kote -75 m ved østenden af profilet. Ved boring 207.3586 på Ishøj kildeplads er koten for den nedre gode leder -90 m, hvilket er den samme som denne borings bundkote. Formationens elektriske ledningsevne er her omkring 140 mS/m svarende til en resistivitet på 7 ohmm, hvilket bekræfter den nedre gode leders tilstedeværelse.



Figur 5-7 Geologisk model for Profil 6.

Den øvre gode leder (mellem 15 og 40 ohmm)

Den øvre gode leder har i den østlige del af profilet (11.000 til 19.000 m) en tykkelse på 30-40 m og træffes omkring kote -50 m. Den dykker kraftigt mod vest ned til under kote -100 m i den centrale del af profilet. I den nordvestlige del af profilet er der som tidligere nævnt ingen god leder i hovedparten af TEM-sonderingerne. På basis af den første TEMsondering på profilet er det alligevel valgt at afgrænse en øvre god leder på denne første del af profilet.

Sammenfatning:

Mægtigheden af de kvartære dæklag er ifølge TEM-sonderingerne kun omkring 5-15 m, hvilket generelt set er i overensstemmelse med boreoplysningerne. De komplekse erosionsbetingede lokale huller eller dale i prækvartæroverfladen ved Ishøj er dog ikke reflekteret ved TEM-sonderingerne. Prækvartæret består langs størstedelen af profilet af Danienkalken, se Bilag 12, og kun imod øst synes den at udgøres af Skrivekridt. TEM-sonderingerne afspejler forskellen i prækvartæroverfladens bjergart, idet Danienkalken har højere resistivitet end Skrivekridt.

Mægtigheden af Danienkalken aftager ifølge såvel TEM-sonderingerne som boringerne fra vest mod øst i profillinjen. Ved Tune er Danienkalkens mægtighed 65 m, ved Torslunde er den 35 m, ved Ishøj Mose 21 m og 14 m, og Danienkalken er helt borteroderet øst for station 17.500 m.

Top Skrivekridt er truffet i kote -44 m ved Tune, i kote -36 m ved Torslunde Kildeplads, ved Ishøj Mose i kote -18 m og i kote -30 m. Grænsefladen "top Skrivekridt" hælder således svagt mod vest, men en forkastning synes at skære profilet imellem boring 207.3606 og 207.3586 med mindst 12 m nedforkastning af Skrivekridtet mod øst. Top Skrivekridt er indtegnet på profilet i figur 5-7, uden dog at medtage den nævnte forkastning. Grænsen er usikker i den centrale og vestlige del af profilet, selv om Tune boringen er medtaget, idet denne boring som nævnt ligger 5 km sydvest for profilet. TEM-sonderingerne på det krydsende Profil 1 ved st. 12.000 samt Solhøj sonderingerne, indikerer at Top Skrivekridt muligvis er beliggende dybere end det, der er angivet i den centrale del af profilet på figur 5-7.

Der optræder kun entydigt en øvre god leder på profilets østlige halvdel, idet de fleste sonderinger på den vestlige del kun viser en nedre god leder.

I den sydøstlige del af profilet er den øvre gode leder truffet omkring kote -50 m. Den øvre gode leder svarer således til et niveau ca. 25-50 m nede i Skrivekridtet, hvor overgangszonen optræder i overensstemmelse med observationerne på Ishøj kildeplads. Den nedre gode leder er i dette område fundet i ca. kote -90 m. Fra lige øst for Thorslunde kildeplads og mod vest mod Solhøj kildeplads dykker såvel den øvre som den nedre gode leder kraftigt mod vest til henholdsvis kote -100 for den øvre og kote -150 for den nedre. Dette stemmer godt overens med observationen i boring 207.3633 om overgangszonens beliggenhed i kote -70 m.

Den nedre gode leders dybe beliggenhed under Solhøj er dog usikker, idet den kun er baseret på en enkelt TEM-sondering. Det er derfor mere interessant at bemærke, at den øvre gode leder fra Solhøj ved st. 9.000 m og mod den nordvestlige ende af profilet ligger i en omtrentlig dybde omkring kote ca. -100 m, hvilket er ca. 25-30 m dybere end den forventede Danien-Skrivekridt grænse på profilet nordvest for Solhøj, men over 50 m dybere end samme grænse under Solhøj. Dette stemmer ikke særlig overens med observationen i Tune boringen om at overgangszonen her optrådte fra "Top Skrivekridt".

Alt i alt synes den øvre gode leder på profilets østlige del frem til Solhøj (figur 5-7) at afspejle dybden til overgangszonen. Således er det dokumenteret at sidstnævnte ligger højt (kote -30 til -50 m) under Ishøj-Thorsbro kildeplads og at den dykker mod vest til kote -70 m under Thorslunde kildeplads. Det er imidlertid overraskende, hvis overgangszonen således som TEM-sonderingerne indikerer, skulle ligge helt nede i kote –100 m under Solhøj, og fortsætte i samme dybde videre mod nordvest – også selvom den vestlige del af profil 5 indikerede en lignende stor dybde til overgangszonen (se figur 5-6). Ud fra det forhold, at der i hvert fald i den østlige del af profilet med sikkerhed optræder såvel den øvre som den nedre gode leder, skulle gradienten i formationsledningsevnen ifølge det teoretiske modelstudie være mindre end 5 mS/m pr. m. Dette er kun delvis i overensstemmelse med de fire observerede gradienter. Ved Thorslunde er den således 2 mS/m pr. m (207.3633), medens den i de tre boringer på Ishøj kildeplads er henholdsvis 1 mS/m pr. m (207.3606), 6 mS/m pr. m (207.3627) og 2 mS/m pr. m (207.3586).

5.3 Sammenfattende kort

Med det formål at kunne anvende de tolkede TEM-sonderinger ved fremtidige lokale undersøgelser, er der fremstillet en række detailkort (Bilag 38-53). Kortene angiver kote og dybde til henholdsvis den øvre og nedre gode leder. Laggrænsen til den første gode leder antages at repræsentere overgangszonen til saltvandet, således som det er defineret i afsnit 4.6. Der er også produceret kort over resistiviteten af den øvre gode leder og den nedre gode leder. Tabel 5-1 nedenfor er en liste over de producerede kort.

Beskrivelse af kortet	Bilag nr.
Kote for øvre gode leder vist på Basis Danienkalk	38
Kote for nedre gode leder vist på Basis Danienkalk	39
Kote for øvre gode leder og inddeling i detailkort $1 - 4$	40
Detailkort 1 – Kote øvre gode leder	41
Detailkort 2 – Kote øvre gode leder	42
Detailkort 3 – Kote øvre gode leder	43
Detailkort 4 – Kote øvre gode leder	44
Kote for nedre gode lederog inddeling i detailkort 5 – 8	45
Detailkort 5 – Kote nedre gode leder	46
Detailkort 6 – Kote nedre gode leder	47
Detailkort 7 – Kote nedre gode leder	48
Detailkort 8 – Kote nedre gode leder	49
Resistiviteten af øvre gode leder vist på Basis Danien	50
Resistiviteten af nedre gode leder vist på Basis Danien	51
Dybden til øvre gode leder vist på Basis Danien	52
Dybden til nedre gode leder vist på Basis Danien	53

 Tabel 5-1
 Oversigt over kort udarbejdet på basis tolkningsresultaterne fra TEM-sonderingerne.

Resultaterne af kortene er diskuteret under gennemgangen af de seks profiler, og vil derfor ikke blive omtalt yderligere her.

6. Sammenfattende resultat af TEM-kortlægningen

Grænsen mellem fersk- og saltholdigt grundvand forekommer ikke som en markant resistivitetskontrast, men som en op til 250 m tyk overgangszone med gradvis faldende resistivitet med dybden. Konklusionerne fra det teoretiske modelstudie over TEM-sonderingers mulighed for at kortlægge en sådan grænse er givet i afsnit 4.6 i kapitel 4.

Som et resultat af det teoretiske modelstudie er der i samme afsnit angivet retningslinier for tolkning af TEM-sonderinger ved kortlægning af denne overgangszone, og disse retningslinier er blevet fulgt ved den gennemførte regionale TEM-kortlægning af overgangszonen i projektområdet.

Retningslinierne går i al korthed ud på, at der ud fra den tolkede resistivitetsmodel for den enkelte TEM-sondering defineres henholdsvis en øvre og en nedre god leder ud fra følgende kriterier:

Den øvre gode leder defineres som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller mindre end 40 ohmm, og hvor alle underliggende lag ligeledes har en resistivitet mindre end 40 ohmm. Dette svarer til, at denne leder har en formationsledningsevne på 25 mS/m eller højere. Med en formationsfaktor på 4 svarer dette til elektrisk ledningsevne i porevandet på mindst 100 mS/m, hvilket betyder at den ækvivalente kloridkoncentration under grænsen til den øvre gode leder er mindst 400 mg/l. Ca. 25 % af denne ionkoncentration vil i praksis udgøres af sulfat og bikarbonat, således at kloridkoncentrationen ved grænsen til den øvre gode leder kan påregnes at være mindst 300 mg/l.

Den nedre gode leder defineres som det lag i modellen, der har en resistivitet på eller mindre end 15 ohmm, og hvor alle underliggende lag ligeledes har en resistivitet mindre end 15 ohmm. Dette svarer til, at denne leder har en formationsledningsevne på mindst 67 mS/m, som med en formationsfaktor på 4,5 svarer til en ledningsevne i porevandet på mindst ca. 300 mS/m. Dette betyder, at den ækvivalente koncentration af klorid under grænsen til den nedre gode leder er mindst 1.350 mg/l. En del af denne ionkoncentration vil udgøres af sulfat og bikarbonat, men ikke tilnærmelsesvis i samme grad som for lavere ionkoncentrationer.

I de tilfælde, hvor der på basis af den tolkede resistivitetsmodel for en TEM-sondering kan defineres såvel en øvre som en nedre god leder, vil den øvre gode leder have en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm, og den nedre gode leder vil have en resistivitet på 15 ohmm eller mindre.

Modelstudiet har endvidere påvist, at tolkningsresultatet af TEM-sonderinger afspejler størrelsen på gradienten af formationsledningsevnen i overgangszonen mellem det ferske og det saltholdige grundvand:

- Hvor der kun kan defineres en nedre god leder med en resistivitet på eller mindre end 15 ohmm, vil gradienten i formationsledningsevnen være større end 5 mS/m pr. m. Grænsen til den gode leder vil typisk ligge mindre end 10 m dybere end grænsen til overgangszonen.
- Hvor der kan defineres såvel en øvre som en nedre god leder, vil gradienten i formationsledningsevnen være mindre end 5 mS/m pr. m. Grænsen til den øvre gode leder vil typisk ligge 10 til 35 m dybere end overgangszonen. Grænsen til den nedre gode leder vil typisk forekomme mindre end 50 m under grænsen til den øvre gode leder.
- Hvor der ikke kan defineres hverken en øvre eller en nedre god leder, er der ikke opnået målerespons fra overgangszonen på grund af for stor dybde til denne, og der kan naturligvis ikke angives en gradient.

Den regionale kortlægning er gennemført ved tolkning af 344 nyindsamlede og enkelte tidligere udførte TEM-sonderinger placeret langs to nord-sydgående og fire vest-østgående profiler gennem projektområdet. Tolkningen af den resulterende resistivitetsmodel for den enkelte TEM-sondering med henblik på kortlægning af overgangszonen er gennemført efter ovennævnte principper og sammenstillet dels på seks profillinier, og dels på de i tabel 5-1 angivne kort.

Resultaterne af den regionale kortlægning af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland har vist, at:

Zone 1 – området ved Alnarp dalen: I dette område (Zone 1 på figur 1-1) ses kun den nedre gode leder, jævnfør profil 3 og nordligste del af profil 1. Denne optræder omkring kote -160 m i den centrale del af strukturen, og i kote –100 m på sydvest-flanken, hvor denne skæres af profil 1. Derimod er det overraskende, at sydflanken ikke giver sig til kende på profil 3, hvor den gode leder fortsat ligger omkring kote – 150 m til langt syd for Langstrup kildeplads, som ellers var forventet at ligge på sydflanken. Dette kunde tyde på, at Skrivekridtet og dermed saltvandsgrænsen langs profil 3 i den østlige del af projektområdet ligger dybere end antaget. Dybden til Skrivekridtet kendes kun fra to dybe olieefterforskningsboringer nord for Langstrup, hvor top Skrivekridt blev truffet i kote –170 m og –179 m. Hertil kommer fem dybe NORDVAND boringer omkring den nordlige del af Esrum sø, som ganske vist ikke har gennemboret Danien, men hvor det er sandsynliggjort, at Skrivekridtet her ligger i tilsvarende dybde, dvs. kote –150 til –180 m. Den gode leder synes således at afspejle en dybtliggende Skrivekridtoverflade, som samtidig udgør grænsen til overgangszonen, idet der ikke ses nogen øvre god leder.

Selv om der kun optræder den nedre gode leder kan det forventes at grundvandet flere steder er saltvandspåvirket også i den nedre del af Danienkalken. To dybe NORDVAND boringer (147 m og 167 m) nord for Esrom og tæt ved profil 3 viser således tegn på lettere saltvandspåvirkning omkring kote –138 m og –122 m, hvorimod overgangszonen endnu ikke er nået i kote –110 m i en 126 m dyb NORDVAND boring vest for Esrum sø. I to andre dybe NORDVAND boringer (130

m og 138 m) på Nordvestsiden af Esrom sø, hvor der optræder Selandien aflejringer ovenpå Danienkalken, ligger overgangszonen lidt højere, d.v.s. i kote –115 m og -100 m. I ingen af de fem NORDVAND boringer er Danienkalken som nævnt blevet gennemboret.

 Zone 2 – området mellem Alnarpdalen og Søndersødalen: Her optræder saltvandsgrænsen i områdets østlige del på profil 3 i form af den nedre gode leder og beliggende under ca. kote -150 m, som allerede nævnt ovenfor. Et par dybe boringer i denne zone og nær profillinie 3 har vist, at overgangszonen til saltvandet ligger dybere end kote –111 m (Langstrup) og kote –77 m (Sjælsø).

I områdets vestlige del på Profil 1 er saltvandsgrænsen stedvis afspejlet ved den øvre gode leder og da beliggende imellem kote –50 og –80 m, og ellers afspejlet ved kun den nedre gode leder og da beliggende i kote –100 m til –120 m. Fra boringer nær profillinie 1 vides, at overgangszonen til saltvandet her forekommer fra top Skrivekridt, og at denne bjergartsgrænse i nord ligger i kote ca. -90 m stigende mod syd til kote ca. -70 m. Hvor kun den nedre gode leder optræder synes denne at overvurdere dybden til overgangszonen i størrelsesorden 10-30 m. Hvor også den øvre gode leder optræder synes denne visse steder at undervurdere dybden til overgangszonen i størrelsesorden at undervurdere dybden til overgangszonen i størrelsesorden op til 25 m.

- Zone 3 Søndersødalen: Her optræder der jævnfør TEM-sonderingerne på profillinie 4 både en øvre og en nedre god leder. Saltvandsgrænsen repræsenteret ved den øvre gode leder, ligger omkring kote ca. -70 m i den østlige del af Værebro kildeplads, og den stiger jævnt videre mod øst til omkring kote -50 m ved Tibberup kildeplads. Boringer ved Søndersø og Tibberup har vist, at saltvandsgrænsen ligger ved toppen af Skrivekridtet, som netop lå i kote -60 ved Søndersø og kote -50 ved Tibberup. Ved den dybeste af boringerne på Værebro Øst kildeplads (DGU nr. 200.3385) er Skrivekridtet endnu ikke nået i kote ca. -75 m, men der er her observeret stærkt forhøjet kloridindhold fra indstrømningen i den dybeste del af Danienkalken. Dette kunne tyde på, at Skrivekridtoverfladen og dermed den regionale saltvandsgrænse her træffes tæt under bunden af denne boring. I profillinie 4 's vestlige del (fra Værebro Vest kildeplads) såvel som i den østlige del (syd for Furesø) indikerer TEM-sonderingerne, at den øvre gode leder mangler, og at saltvandsgrænsen ligger signifikant dybere. Således helt nede i kote ca. -120 m imod vest og i kote ca. -100 m imod øst.
- Zone 4 Storkøbenhavn og vest for København: De geologiske forhold i denne zone adskiller sig væsentligt fra de tre første zoner, ved at Skrivekridtoverfladen generelt ligger højere og Danienkalken og de kvartære dæklag samtidig er tyndere. Data grundlaget for kortlægningen af saltvandsgrænsen i denne zone er den sydlige del af profil 1 samt profil 5.

På størstedelen af profil 5 samt på dele af den sydlige del af profil 1 optræder der både en øvre og en nedre god leder. Den øvre gode leder ligger højt, ca. i kote -50 m, i den vestlige del af Storkøbenhavn, og den falder imod vest til omkring kote -100 m ved Roskilde Fjord. Da Skrivekridtoverfladen umiddelbart vest for Køben-
havn ligger betydeligt højere end kote -50m, betyder dette at saltvandsgrænsen her træffes et stykke nede i Skrivekridtet. Dette er blevet verificeret ved logging undersøgelser dels i en lang række boringer på KE's kildepladser i Vestkøbenhavn, og dels i kommunale indvindingsboringer i Glostrup og Ballerup. I alle disse tilfælde har logging undersøgelserne vist, at saltvandsgrænsen optræder i relation til et af de regionalt udbredte mergellag i Skrivekridtet.

- Zone 5 Amager: Der er ikke foretaget TEM-sonderinger på Amager under dette projekt dels fordi TEM-sonderinger i bymæssig bebyggelse vil være belastet med elektrisk og elektromagnetisk støj, men også fordi grundvandsressourcen på Amager vides allerede at være fuldt udnyttet /18/. Fra logging undersøgelser af en række boringer på Amager først i 90érne i forbindelse med risiko vurdering af truslen mod grundvandsressourcen fra anlægget af Øresundsforbindelsen foreligger der en del viden om saltvandsgrænsen på Amager /2/. Denne viden er gengivet i resumeet i kapitel 2 i nærværende rapport.
- Zone 6 Køge Bugt og Stevns: De geologiske forhold i dette område kan groft karakteriseres ved at prækvartæroverfladen imod vest udgøres af Selandien Grønsandsaflejringer (Kerteminde mergel over Grønsandskalk), i den centrale del af Danienkalk (Bryozokalk) og stedvis langs Øresundskysten af Skrivekridt. Endvidere er det kvartære dæklag i store dele af området forholdsvist tyndt. Data grundlaget for kortlægningen af saltvandsgrænsen i denne zone er profillinie 2 i den sydlige del og profillinie 6 i den nordlige del.

På den nordvestlige halvdel af profillinie 2 optræder kun den nedre gode leder, medens den resterende østlige del også har en øvre god leder. Den nordvestlige del af profil 2 er i øvrigt speciel ved at den øverste del af prækvartæret jævnfør indvindingsboringerne på kildepladserne ved Kimmerslev, Slimminge og Bjæverskov, her udgøres af Selandien aflejringer, der overlejrer Danienkalken. Da der yderligere er rapporteret om forhøjede kloridtal i flere af de i øvrigt ikke særlig dybe boringer på de nævnte kildepladser, er det overraskende, at TEM-sonderingerne i den nordvestlige del af profillinie 2 dels kun viser en nedre god leder, og dels at denne først træffes så dybt som i kote ca. -120 til -140 m. Dette indikerer, at Danienkalken ikke er saltvandsførende, og at den primære saltvandsgrænse må formodes at træffes ved grænsen til Skrivekridt. En mulig forklaring på de forhøjede kloridtal på de nævnte kildepladser kunne da være, at de stærkt lerholdige sekvenser af Selandien, eksempelvis Kertemindemergel, indeholder kloridholdigt residualvand.

På den sydøstlige halvdel af profillinie 2, som når et godt stykke ud på Stevns, ses der både en øvre og en nedre god leder. Endvidere ses dybden til den øvre gode leder svarende til saltvandsgrænsen, at blive mindre mod øst, således fra at ligge i kote ca. -100 m syd for Herfølge til at optræde i kote ca. -40 m ved Klippinge øst for Hårlev. Sammenholdes dette med, at Skrivekridtoverfladen generelt hælder fra øst mod vest, synes saltvandsgrænsen således at optræde i toppen af Skrivekridt. Logging i boringer ved Hårlev og Klippinge viser imidlertid, at saltvandspåvirkningen i de øverste 25-30 m af Skrivekridtet kun er svag, og at gradienten i formationsledningsevnen er lille (0,2 mS/m pr. m og 0,7 mS/m pr. m). Nye geofysikundersøgelser i forbindelse med kortlægning af indsatsområde Køge Syd har påvist (Ref./COWI),

at saltvandsgrænsen helt lokalt kan optræde betydeligt nærmere terræn end Skrivekridtoverfladen, dvs. i Danienkalken. Dette er således tilfældet ved en af Herfølge vandværks boringer (DGU nr. 212.781), hvor overgangszonen til saltvandet er påvist allerede i kote –20 m (Ref./GEUS 2004/22), ligesom det fra tidligere undersøgelser (Kryger 1982) har været kendt, at der ved lokaliteter langs Tryggevælde Å kendes til stærkt forhøjede kloridtal i boringer ført kun et stykke ned i Danienkalken. Sådanne lokale saltvandsfænomener formodes sædvanligvis at være forkastningsbetingede, når der som her ikke kan være tale om salt residualvand fra eksempelvis Litorinahavet eller om indtrængende havvand fra kysten.

Endelig skal det nævnes, at fra profillinie 2 og videre mod øst til kysten ved Sigerslev synes saltvandsgrænsen atter at falde til større dybde, idet saltvandet helt ude nær kysten i boringer i kalkbruddet overraskende først er truffet et godt stykke nede i Skrivekridtet i kote ca. -60 m.

Profillinie 6 har samme udgangspunkt som profil 5 i zone 4, nemlig fra Brokilde i vest, men går mod sydøst over Solhøj og Thorsbro for at ende lidt øst for Ishøj kildeplads. Der ses såvel en øvre som en nedre god leder på den østlige del af profilet, hvorimod der næsten udelukkende ses en nedre god leder i den nordøstlige del. Saltvandsgrænsen er således afspejlet ved den nedre gode leder i den nordøstlige del og optræder her i kote ca. -100 m. Den synes at ligge i samme dybde ind under Solhøj kildeplads, men er her afspejlet ved den øvre gode leder. Sidstnævnte hæver sig imod øst til kote ca. - 70 m ved Thorsbro og videre imod øst til kote - 50 m ved Thorslunde og Ishøj kildepladser. Logging undersøgelser i boringer ved Ishøj viser, at saltvandsgrænsen endog kan træffes så højt som i kote ca. -30 m.

Generelt for den østlige del af profil 6 nær Køge bugt (hvor Skrivekridtet træffes direkte under de glaciale dæklag) gælder det, at saltvandsgrænsen i form af den øvre gode leder optræder et stykke nede i Skrivekridtet. Bortset fra lokalt i Ishøj området er dette verificeret ved logging undersøgelser i flere dybe KE-indvindingsboringer i området, således ved Karlslunde, Lyksager og Thorslunde. Det samme observeredes ved den 269 m dybe projektboring ved Karlslunde mose, hvor saltvandsgrænsen optrådte i relation til et mergellag i kote –67 m.

Den nye projektboring lige øst for Tune by har derimod verificeret, at når Skrivekridtoverfladen dykker mod vest og overlejres af større mægtighed af Danienkalk vil saltvandsgrænsen ikke længere ligge et stykke nede i Skrivekridtet, men træffes ved top Skrivekridt, som ved Tune lå i kote -44 m. Herved ses det overraskende, at saltvandsgrænsen lå kotemæssigt højere inde ved Tune end ude ved den mere kystnære projektboring ved Karlslunde mose, hvor den blev truffet i kote –67 m. Observationen ved Tune boringen sammenholdt med observationen i Karlslunde boringen stemmer således dårligt med ovenfor anførte, om at saltvandsgrænsen skulle ligge dybt i den vestlige halvdel af profil 6 og så stige imod øst.

Ledernes beliggenhed i forhold til Skrivekridt og overgangszone, samt teoretisk og observeret gradient i overgangszonen

Ved diskussionen af resultaterne fra TEM-kortlægningen langs de enkelte profillinier er der også foretaget en "teoretisk" vurdering af gradienten i formationsledningsevnen i overgangszonen, dvs. langs hvilke sektioner af profilerne den kunne forventes at være enten mindre eller større end 5 mS/m pr. m. Denne vurdering sker som nævnt ud fra, om der forekommer en eller to gode ledere langs sektionen. Ligeledes er der under de enkelte profillinier foretaget en sammenligning mellem denne størrelsesklassifikation af gradienten og de faktisk observerede gradienter i boringer ved de pågældende sektioner.

Nedenstående tabel 6-1 er en oversigt, der viser såvel de observerede som de teoretiske gradienter på hver enkelt profillinie og opdelt på sektioner henholdsvis med og uden øvre god leder. Endvidere er beliggenheden af den nedre gode leder i forhold til top Skrivekridt grænsen opsummeret, og endelig er overgangszonens beliggenhed i forhold til top Skrivekridt grænsen angivet. I visse tilfælde er sidstnævnte kun baseret på en formodning, idet der ikke forligger faktuelle observationer.

Profil	Projekt	Overgangszone	Nedre god leder	Øvre god leder	Gradient	Gradient
	Zone	= Oz i forh. Til	Beliggenhed i forhold til top	% af profilet – beliggen-	teoretisk	observeret
		top Kridt = sk	Skrivekridt	hed i forhold til sk og oz	mS/m pr.	mS/m pr.
		fm. = formodes			m	m
1	2, 3, 4	Oz = sk	0-40 m under sk, men gene-	1) 50 % af profilet og	1) < 5	2, 4, 4, 3, 5
			relt konkordant med sk	generelt ovenover sk=oz		
				2) 50 % ingen øvre leder	2) > 5	8
2	6	Vest: Oz fm.= sk	30-40 m under sk, men gene-	1) 50 % af profilet og	1) < 5	0.2 og 0.7
		Øst: Oz = sk	relt konkordant med sk	sammenfald med sk=oz		
				2) 50 % ingen øvre leder	2) > 5	ingen obs.
3	1 og 2	Oz fm. = sk	40-50 m under sk, som er	2) 100 % ingen øvre leder	2) > 5	Ingen obs.
			usikker, men generelt kon-			
			kordant med sk			
4	3	Oz = sk	30-40 m under sk, og kun	1) 70 % af profilet og	1) < 5	5 og 8
			konkordant med sk på vestdel	sammenfald med sk=oz		
			(70 %)	2) 30 % ingen øvre leder	2) > 5	8
5	4	Vest: Oz = sk	40-85 m under sk, og kun	1) 95 % af profilet, og	1) < 5	0.6 og 4
		Øst: Oz < sk	konkordant med sk på vestdel	under sk>oz		
			(65 %)	2) 5 % ingen øvre leder	2) >5	ingen obs.
6	4 og 6	Vest: Oz fm. = sk	20-100 m under sk, og meget	1) 90 % af profilet og	1) < 5	2, 1, 6 og 2
		Øst: Oz < sk	uregelmæssig overflade	generelt under sk		
				2) 10 % ingen øvre leder	2) > 5	ingen obs.

Tabel 6-1 Størrelse af teoretisk og observeret gradient i formationsledningsevne i overgangszonen.

Af tabel 6-1 fremgår det, at der langs de seks TEM-profillinier foreligger observation af gradienten i 17 boringer. Ud af disse 17 observerede gradienter har kun to en størrelse, som afviger fra den teoretiske størrelsesorden. I begge tilfælde er der tale om, at den observerede er større end 5 mS/m pr. m, og at den forventede skulle være mindre end 5 mS/m pr. m (øvre og nedre god leder på profil 4 og på delsektion af profil 6). Med hensyn til den øvre gode leder, så træffes denne på mellem 50 % og 95 % af profilsektionerne på fem af profilerne, men optræder overhovedet ikke på profil 3. Sidstnævnte er netop også det af profilerne, som har størst dybde til såvel Skrivekridt som til den tolkede overgangszone (saltvandsgrænse).

På de sektioner, hvor den øvre leder optræder, ses denne enten at være sammenfaldende med top Skrivekridt eller ligge under denne med undtagelse af profil 1. På profil 1 ligger den øvre leder generelt ovenover top Skrivekridt på de sektioner (50 %), hvor den optræder. Dette indikerer, at den nedre del af Danienkalken på dette profil har højere ledningsevne end observeret ved logging i boringer langs profilet.

Overfladen af den nedre gode leder ses på alle seks profiler generelt at ligge konkordant med den forventede eller dokumenterede Skrivekridtoverflade, men på de fleste sektioner at ligge mere end 40 m under denne. Hvor Skrivekridt ligger højt ses den nedre gode leder at ligge helt op til 100 m under denne, hvilket viser, at jo højere Skrivekridtoverfladen er beliggende, jo dybere i Skrivekridtet er der sket udvaskning og fortynding af det saltholdige grundvand.

7. Litteratur

- /1/ Larsen, F., Jensen, T. F., og Hinsby, K., 2002: Forslag til projekt om fersksaltvandsgrænsen i kalkmagasinerne på Sjælland, Fase A: Skrivekridt og Danienkalk. GEUS & DTU.
- /2/ Klitten, K., og Wittrup, C. S., 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 2. - Undersøgelse af saltvandsgrænsen ved hjælp af geofysisk borehulslogging. GEUS rapport 2006/17.
- /3/ Larsen, F., Sonnenborg, T. O., Madsen, P.,og Hansen, K. A., 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6. - Detailundersøgelser i Karlslunde værkstedsområde. GEUS rapport 2006/21.
- /4/ Keller and Frischknecht, 1966: Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press 1966.
- /5/ Håkansson, E., Bromley, R., og Perch-Nielsen, K., 1974: *Maastrichtian chalk of north-west Europe a pelagic shelf sediment.* Spec. Publ. int. Ass. Sed. (1974) 1, 211-233.
- /6/ Krauskopf, K. B., 1979: Introduction to Geochemistry. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 617 s.
- /7/ Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans Am. Inst. Min. Metal and Petr. Eng., 149 s., 54-62.
- /8/ Stenestad, E., 1976: Københavnsområdets geologi især baseret på citybaneundersøgelserne. DGU. 3 række, nr. 45, 149 s.
- /9/ Bath and Edmunds, 1981: *Identification of connate water in interstitial solution of chalk sediment.* Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 45, side 1449-1461.
- /10/ Geofysiksamarbejdet, 2001: *Processering og tolkning af TEM data.* Geofysisk Afdeling, Geologisk Institut, Aarhus Universitet. 21 s.
- /11/ Kharara, Y., K., and Berry, F. A. F., 1973: Simultaneous flow of water and solution through geological membranes – I. Experimental investigation. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 37, side 2577-2003.
- /12/ Geofysiksamarbejdet, 2002: Vejledning i udførsel af TEM målinger. Geofysisk Afdeling, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.17 s.
- /13/ Bidstrup, T., og Klitten, K., 2006: Saltvandgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 1. - Kortlægning af Danienkalk-Skrivekridt grænsen samt forkastninger i denne. GEUS rapport 2006/16.

- /14/ Larsen, F., og Berger, K., 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 5. - Grundvandstyper i kalkmagasinerne. GEUS rapport 2006/20.
- /15/ Thomsen, E., 1995: *Kalk og kridt i den danske undergrund.* Danmarks Geologi fra øvre kridt til nu. Århus Universitetsforlag.
- /16/ Geofysiksamarbejdet, 2002: Vejledning i kalibrering af TEM måleudstyr. Geofysisk Afdeling, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.11 s.
- /17/ Geologisk nyt nr.5, 2001: Høj-moment-TEM udvikling af en ny metode. s. 11–13.
- /18/ Klitten, K., Nyegaard, P., Hansen, H. O., Jørgensen, T. A., og Rokkjær, A., 1995: Indvindingsplan for Tårnby Kommunale Vandforsyning. DGU og Kemp & Lauritsen. DGU rapport nr. 11, 1995.
- /19/ Rambøll, 2002: Detailkortlægning af Solhøj Kildepladss Opland MEP- og TEMkortlægning, Datarapport. Københavns- og Roskilde Amt, maj 2002.
- /20/ COWI, 2002: Indsatsområde Stevns Geofysisk kortlægning med helikopter EM. Storstrøms Amt, Marts 2002.

Links: www.geofysiksamarbejdet.dk

Appendiks A - TEM

Resume af teori og komponenter i udstyr

PROTEM 47 D systemet er et transient elektromagnetisk (TEM) system, der består af en elektronisk strømgenerator, som sender strøm gennem en strømsløjfe, også kaldet sendersløjfen. Sendersløjfen er udlagt i et kvadrat, se figur A1. Figur A2 viser den teoretiske strøm, der udsendes i sendersløjfen. Denne varierende strøm danner et magnetfelt, som betegnes *primærfeltet*, se figur A1. Ændringerne i senderstrømmen inducerer en elektromotorisk kraft i omgivelserne, hvilket giver anledning til, at der går en strøm i de elektrisk ledende dele af omgivelserne: Jorden, menneskeskabte gode ledere, etc. Maksimummet for strømtætheden i jorden bevæger sig udad og nedad som tiden går, idet størrelsen af strømtætheden aftager. Ændringer af magnetfeltet fra den henfaldende strøm inducerer en elektromotorisk kraft i modtagerspolen, der befinder sig i centrum af sendersløjfen, se figur A1. Det elektromagnetiske felt, som genereres af strømmene i jorden, betegnes *sekundærfeltet*, og det er dette henfaldende felt, som indeholder information om jordens resistivitetsforhold.



Figur A1 Principskitse for det transiente elektromagnetiske system PROTEM 47 D.

Systemets modtager består af en induktionsspole, der måler den vertikale komposant af *totalfeltet* i "off-time", dvs. tiden fra senderstrømmen er slukket, til den tændes igen, se figur A2. I denne tidsperiode er totalfeltet stort set identisk med sekundærfeltet. Totalfeltet indeholder også responsfelter fra menneskeskabte gode ledere, elektromagnetisk støj samt eventuelle rester af primærfeltet. Det målte felt omtales ofte som henfaldskurven.



Figur A2A) viser strømstyrken i sendersløjfen. B) viser totalfeltet målt i modtager-spolen. C) viser
princippet for de tidsvinduer, som totalfeltet måles i. Det fremgår heraf, at centertiderne og
integrationstiden er logaritmiske. Akserne for alle tre grafer er lineære.

Systemet anvendt ved denne undersøgelse arbejder ved tre frekvenser svarende til, at strømpulsen udsendes med tre forskellige frekvenser, og henfaldskurven måles i tre sekvenser el. segmenter. De tre frekvenser betegnes henholdsvis "*Ultra-high*" (UH), "*Very-high*" (VH) og "*High*" (H). Ultra-high-frekvensen er den højeste og High den laveste, se tabel A1.

Frekvens navn	Repetitions fre-	Længde af sender-	Måleperiode						
	kvens [Hz]	puls [ms]	[ms]						
UH	237.5	4.2	0.8						
VH	62.5	16	3.2						
Н	25	40	8						

Tabel A1 Systemfrekvenser.

Senderen

Sendersløjfen består af en ledning udlagt i et kvadrat med en kantlængde på 40 m. I hjørnerne af sendersløjfen er der anbragt plastikpløkker, der sikrer, at arealet af sendersløjfen varierer mindst muligt. Senderledningen er koblet til en senderboks, der udgør den elektroniske strømgenerator.

Senderpulsens længde ("on-time") og måleperiodens længde (off-time) afhænger af, hvilke frekvenser der anvendes. Systemet har en "50% duty cycle", hvilket vil sige, at on-time er ca. lige så lang som off-time. Strømmen, der udsendes, har en tænd-rampe og en slukrampe, se figur A2. Sluk-rampens forløb afhænger af strømstyrken og til dels af de geologiske forhold, hvor sendersløjfen er udlagt. Forløbet af tænd- og sluk-ramperne måles ikke under udførelsen af en måling. Det er derfor umuligt at oplyse den eksakte kurveform for en sondering. Den nominelle tænd-rampe er vist i tabel A2, hvorimod sluk-rampen er vist i tabel A3.

	Tabel A2	Turn-on nor	ninel rampe.
--	----------	-------------	--------------

Frekvens	Eksponentiel hen-	Rampe 1	Rampe 2	Tid
navn	faldskonstant	[%]	[%]	[µs]
UH	5.6353 [.] 10 ³	50	0	32
VH	5.6353 [.] 10 ³	50	0	32
Н	5.6353 [.] 10 ³	50	0	32

	Tabel A3	Turn-off nominel rampe.
--	----------	-------------------------

Frekvens	Turn-off	Eksponentiel	Rampe 2	Rampe 3	Tid
navn	[A/s]	henfaldskonstant	[%]	[%]	[µs]
UH	8.0 [.] 10 ⁵	1	0	0	2.5
VH	1.2 [.] 10 ⁶	1	0	0	2.5
Н	1.2 [.] 10 ⁶	1	0	0	2.5

Modtageren

Modtagerspolen er koblet til en modtagerboks, der indeholder signalforstærkere, filtre, integratorer og omsættere fra et analogt signal til et digitalt. Endvidere indeholder modtagerboksen også en datalogger til opsamling af data samt kommunikation til modtagerboksens enheder og senderboksen. Totalfeltet i off-time måles ved hjælp af integratorerne i 20 tidsvinduer ("gates") for hver frekvens, se figur A2. I tabel A4 er tidsvinduerne opsummeret.

Tabel A4 7	Tabel A4 Tidsvinduer nominelt.						
Tidsvindue	UH [µs]	VH [µs]	H [µs]				
1	6.813	35.25	88.13				
2	8.688	42.75	106.9				
3	11.13	52.50	131.3				
4	14.19	64.75	161.9				
5	18.07	80.25	200.6				
6	23.06	100.3	250.6				
7	28.44	125.3	314.4				
8	37.56	158.3	395.6				
9	47.94	299.8	499.4				
10	61.13	252.5	631.3				

11	77.94	319.8	799.4
12	99.38	405.5	1014
13	126.7	514.8	1287
14	166.4	654.3	1636
15	206.0	832.3	2081
16	262.8	1059	2648
17	335.2	1359	3373
18	427.8	1719	4297
19	545.6	2190	5475
20	695.9	2790	6978

Elektromagnetisk støj

Elektromagnetisk støj kan inddeles i to typer: En del, der kommer fra naturlige kilder, og en del, der kommer fra menneskeskabte kilder. Den naturlige støj hidrører fra naturfænomener som lynudladninger. De menneskeskabte støjkilder kan inddeles i aktive og passive støjkilder. De aktive støjkilder er elektriske (50Hz) installationer og radiosendere, medens de passive er jord- og luftkabler samt hegn. De passive installationer aktiveres/anslås af den senderpuls, som TEM-systemet udsender. Elektriske installationer og radiosendere er i geofysisk henseende tilfældige og kan derfor undertrykkes, se afsnit om støjreduktion, hvorimod jord- og luftkabler samt hegn kan give et ekstra uønsket bidrag til de målte totalfelter. Når dette ekstrabidrag forefindes i en måling, tales der om, at TEM-målingen kobler til den elektriske leder. Der findes to former for koblinger til elektriske ledere, se figur A3 og figur A4. Kapacitive koblinger, som kobler kapacitivt til elektriske ledere, og galvaniske koblingstøj giver anledning til et svingende forløb af henfaldskurven, mens galvanisk koblingsstøj giver en glat henfaldskurve med særlige karakteristika, der kan genkendes af en erfaren geofysiker.



Figur A3 Princippet for en kapacitiv kobling. Kredsløbet dannes af kablet (selvinduktionen L), den kapacitive vej gennem isoleringen (C) og returvejen gennem jorden (R).



Figur A4 Figuren illustrerer princippet i en galvanisk kobling. Kredsløbet dannes af lederen i toppen af masterne (selvinduktionen L), selve masterne og returvejen gennem jorden (R).

Et eksempel på en koblet TEM-sondering ses i figur A5. Dette ses på de meget uregelmæssige målinger for tiderne mellem 8e-05 til 3e-04 sekunder. Det er desværre ikke muligt at anvende målingerne der ligger før og efter dette interval, da hele målingen bliver påvirket hvis en kobling er til stede. Følgelig må TEM-sonderingen kasseres, og en tolkning er ikke mulig.



Figur A5 Koblet TEM-sondering fra projektet.

Støjreduktion

For at undertrykke elektromagnetisk støj fra omgivelserne foretages der synkrondetektering, filtrering og stakning af det målte signal. Endvidere er integrationstiden for tidsvinduerne logaritmisk voksende med afstanden fra udsendelsen af senderpulsen, se afsnit om senderen.

Synkrondetekteringsteknikken består i, at polariteten af senderpulsen skifter for hver halve periode, se figur A2. Denne teknik er særdeles effektiv til at undertrykke 50-Hz støjen, da instrumentfrekvenserne er valgt således, at 50-Hz støjen undertrykkes. Ydermere ændres polariteten af referencekablet mellem sender og modtagerboksen for at udligne et eventuelt offset i instrumenteringen.

Modtageren måler i segmenter, hvor hvert segment er båndbegrænset ved hjælp af filtre. Modtagerspolen har en båndbegrænsning på 450 kHz af første orden. Modtagerinstrumentets båndbegrænsning er en kombination af flere mulige filtre og forstærkere, men kan tilnærmes med et 270-kHz filter af første orden uafhængig af systemfrekvensen. Båndbegrænsningen er afhængig af den forstærkning (Gain), der anvendes. Filtrene er designet således, at de frafiltrerer AM- og VLF-sendere. Ydermere frafiltreres information fra overfladenære ledende strukturer.

En stakning foregår ved, at målingerne gentages og et gennemsnit beregnes. Stakningen foregår dels i modtagerinstrumentet og dels under processeringen. Ved denne proces er det muligt at måle geologiske responser, der er af samme størrelsesorden eller mindre end den omgivende støj.

Ved hver sondering foretages en række støjmålinger for at undersøge støjniveauet, således at det kan afgøres, hvad der er støj, og hvad der er data. Denne vurdering foretages ved processeringen af data, se afsnit om tolkning af data.

Målestrategi

Den anvendte målestrategi forbedrer signal-/støjforholdet på high-frekvensen, hvor der effektivt set måles dobbelt så mange gange som ved en standard TEM-sondering. Herved forbedres signal-/støjforholdet med en kvadratrod to. Alle støjproblemer kan dog ikke fjernes ved stakning. Oftest vil det dog være muligt at opnå flere datapunkter til sene tider. Tabel A5 viser målestrategien med antallet af repetitioner for hvert enkelt segment, samt den anvendte strømstyrke og gain.

	Integrationstid	Antal	Strøm	Forstærkning
	[s]	repetitioner	[A]	(gain)
Støj på H	8	8	-	4 – 6 (7)
UH	8	2 [.] 1	1	1 – 2
VH	8	2 [.] 2	1	4 - 6
Н	8	2 [.] 15	3	4 – 6 (7)

Tabel A5	Målestrategi.	Totallet i repetition	er angiver at	polariteten	af referencel	kablet ændres

Måleprocedure

Umiddelbart inden iværksættelse af målearbejdet udføres en kalibrering af TEM-udstyret ved måling på testlokaliteten ved Lyngby, vest for Århus. Efter denne måling er der oprettet lokale testlokaliteter i eller i umiddelbar nærhed af undersøgelsesområdet.

Ved hver sondering er der blevet foretaget en række støjmålinger for at undersøge støjniveauet, således at det kan afgøres, hvad der er støj, og hvad der er data. Denne vurdering foretages ved processeringen af data.

Målinger

Der er samlet blevet foretaget 319 TEM-sonderinger af Rambøll samt et antal testmålinger. Alle data samt filer indeholdende informationer til hver enkelt sondering er sendt til DTU. I figur 1 i bilagsrapporten er de seks profillinjer vist, og i tabel A6 er informationer om de seks profiler angivet.

Som det ses af tabel A6 er procentdelen af koblede sonderinger omkring 20, hvilket er en anelse højere end de opstillede krav til Rambøll. Årsagen til de mange koblede sonderinger skyldes at sonderingerne er foretaget i områder i umiddelbar nærhed af Storkøbenhavn med et meget omfattende ledningsnet til følge.

Tabel A6	Informationer om antal målte,	antal koblede,	% koblede for	hver enkelt profil
	NB: Antallet af koblede måling	ger kan stige ei	n anelse.	

Profil	1	2	3	4	5	6
Sonderinger	104	52	57	40	40	26
Koblede	19	12	12	5	9	5
% koblede	18.3	23	21	12.5	22.5	19.2

Positionering og kalibrering

Måling af sonderingspunkt x, y og z-koordinat er foregået vha. håndholdt GPS i UTM zone 32.

Kalibrering af Rambølls udstyr er foretaget efter standarden udarbejdet af Geofysiksamarbejdet.

Tolkning af data

Ved en geofysisk tolkning findes frem til den modstandsmodel, der tilpasser måledata bedst. Tolkningen kan deles op i to faser, der dels består af en processering af data og dels består af selve tolkningen. Der findes i princippet to former for tolkning, der her vil blive omtalelt som fysisk og geologisk tolkning. Ved den fysiske tolkning anvendes færrest mulige antal lag i modellen, der giver en god overensstemmelse mellem de målte og de modellerede data. Ved en geologisk tolkning kan information fra boringer eller andre geofysiske metoder indgå i tolkningen.

Processering af data

Ved processering af data foretages en visuel inspektion af data samt medianfiltrering og en statistisk beregning af variansen (usikkerheden på data). Medianfiltrering er vist i tabel A7.

label A7 Mediantiltrering.					
Frekvens	Data fjernet fra høje ende	Data fjernet fra lav ende			
UH	0	0			
VH	0	0			
Н	4	4			

Tabal A7 Madianfiltraria

Medianfiltreringen af data foregår ved, at data for hver måletid sorteres efter størrelse. Herefter fjernes de største og de mindste data, hvorefter gennemsnittet beregnes. Antallet af data, der fjernes, afhænger af den anvendte målefrekvens.

Visuel inspektion er foretaget for alle TEM-sonderinger. Her er fjernet data, der er påvirket af elektromagnetisk støj. Data er undersøgt for galvaniske og kapacitive koblinger eller andre måletekniske problemer.

Det anvendte software til processering er Sitem version 1.1.10.37 fra BubiSoft.

En-dimensional tolkning

Tolkningen af TEM-data omtales ofte som en inversion. Ved en tolkning er der den komplikation, at modstandsmodellen ikke kan findes direkte ud fra de målte data. Modstandsmodellens parametre findes derfor ved, at inversionsprogrammet gradvist opnår en bedre og bedre modstandsmodel ved hele tiden at sammenligne teoretiske henfaldskurver (responser) med målte data. På denne baggrund justeres modelparametrene, så forskellen mellem data og det teoretiske respons bliver mindre og mindre.

Modstandsmodellerne er en én-dimensional lagdelt jordmodel, der indeholder informationer om formationsmodstandene, lagtykkelser og dybder, se figur A6. Ud fra disse oplysninger er det muligt at beregne henfaldskurven for en given modstandsmodel. Tolkningsprogrammet, der her anvendes, modellerer blandt andet filtre, afskæringsfrekvenser, og tænd- og sluk-ramper for senderstrømmen. Programmet modellerer ikke længden af tidsvinduerne, lige som det ikke modellerer det faktiske slukkeforløb, da dette ikke måles.

Modstandsmodel har usikkerheder på bestemmelsen af de parametre, der indgår i modellen (formationsmodstandene, lagtykkelserne og dybder). Størrelsen af disse usikkerheder er forbundet med de variationer, der er på målingerne af det enkelte datum. Større spredning på målingerne giver større usikkerhed i den tolkede modstandsmodel.

Som udgangspunkt er der foretaget inversion af TEM-sonderingerne med 2 til 5 lags modeller, hvorefter den bedste fysiske model er valgt ud fra følgende fire kriterier:

- Modelresponset skal tilpasse de målte data bedst muligt.
- 1D-residualet skal være lille.
- Der skal være færrest mulige antal lag i modellen
- Modellen skal være plausibel indenfor metodens begrænsninger og de målte data.



Figur A6

Princippet i en én-dimensional modstandsmodel. Den én-dimensionale jordmodel består af L-lag hver med tykkelsen d og elektriske modstand ρ . De enkelte lag er uendelige i horisontal retning, homogene og isotrope.

Inversionen giver ud over 1D-model en analyse for bestemmelsen af henholdsvis modstande, tykkelser og dybder af lagene i modellen. Bestemmelsen er givet som en usikkerhed på de enkelte parametre.

Det anvendte software til tolkning er Semdi version 2.0.8.64 fra Bubisoft. Det anvendte inversionsprogram er em1dinv version 2.13.

Tolkning af geofysiske borehulslogs

De geofysiske logs er tolket manuelt efter et meget simpelt princip der muliggør en sammenligning mellem geofysiske borehuldslogs og 1D-modellerne for TEM-sonderingerne. Følgende arbejdsgang for tolkning af induktions- og resistivitetslogs er anvendt:

- Kontrolsammenligning af induktions-loggen og resistivitets-loggen.
- Bestemmelse af dybden til, hvor resistivitets-loggen begynder.
- Bestemmelse af dybden til det salte grundvand.
- Bestemmelse af en gennemsnitsmodstand for formationen over det salte grundvand.
- Bestemmelse af en gennemsnitsmodstand for formationen under det salte grundvand.

De geofysiske borehulslogs indeholder udelukkende informationer om kalk-kridt aflejringerne, idet borehullerne har forerør i kvartæret. I visse tilfælde fortsætter forerøret et stykke ned i prækvartæret, men som oftest begynder loggene tæt ved prækvartæroverfladen, hvorved der fås en maksimum tykkelse af de kvartære sedimenter.

Eksempel: TEM-sondering 1018

Det første skridt i processen er at åbne filen i programmet Sitem. I figur A7b er TEMsondering 1018 vist som den tilsyneladende modstand som funktion af tiden. Det skal nævnes, at det viste er de *stackede* data – altså udjævningen af alle målingerne. Ydermere skal bemærkes at akserne er valgt således, at udsnittet viser så mange detaljer som muligt. I figur A7a er samme måling vist som dB/dt (ændringen af det sekundære magnetfelt med tiden) som funktion af tiden, her kan også baggrundsstøjen ses. Læg her især mærke til det store spænd i y-aksens værdier – målingerne ligger over seks dekader. De tre segmenter skal gerne have en glidende overgang over i hinanden, hvilket er tilfældet her. Da de sidste målinger for Very high-segmentet ikke stemmer overens med High-segmentet udelades disse. Som det ses af figur A7a, er det ikke længere muligt at skelne imellem baggrundsstøj og signal og målinger efter tiden 3e-03 sekunder slettes også.



Figur A7a) TEM-sondering 1018 vist med dB/dt som funktion af tiden. b) TEM-sondering
1018 vist med tilsyneladende modstand som funktion af tiden.

Efter at data præparationen er overstået køres der under programmet Semdi en batch-fil der generer fire modeller – en 2-, 3-, 4- og 5-lags geologi. I figur A8 er brugerfladen til programmet Semdi vist under tolkningen af TEM-sondering 1018. Det er her selvfølgelig muligt at ændre på modellerne og køre inversionen igen. Det er valgt i denne figur at markere alle fire geologiske modeller, hvilket illustrerer, at man kan se alle fire scenarier samtidigt og/eller tjekke en sondering ved at kigge på sonderingerne udført umiddelbart lige før og efter. Ydermere kan man i de tilfælde hvor to profillinjer krydser hinanden tjekke at data ser fornuftige ud – om de er reproducerbare. Eksempelvis krydses Profil 1 både af Profil 4 og Profil 5, og man kan altså her se på en sondering fra Profil 1 og 4 samtidig.



Figur A8 Brugerflade for Semdi under tolkning af TEM-sondering 1018.

For læseren er det essentielle i denne gennemgang at det skulle være nemmere at forstå tværsnittene beskrevet i kapitel 4 og vist i bilagsrapporten. Tværsnittene i kapitel 5 er resultatet af undervinduet *Model Parameters and analysis*, visualiseret i undervinduet *Line Model*. I *Model Parameters and analysis* ser man også parameterbestemmelserne som er grundlag for klassificeringen om resistiviteten og dybden er godt/ dårligt bestemt eller ubestemt.

Appendiks B – HMTEM

Teori

I appendiks A er teorien, komponenter og systemkrav gennemgået for almindelige transiente elektromagnetiske sonderinger gennemgået. Højmoment TEM er udviklet indenfor de sidste par år, og muliggør at undersøgelsesdybden øges. Højmoment systemet skal i sin enkelhed betragtes som en udvidelse af Appendiks A. Udover en central loop opstilling udvides sonderingen ved at man tilføjer en offset-loop modtager et stykke væk fra senderen, se figur B1.



Figur B1 Principskitse af målekonfiguration [Geologisk Nyt, 2001].

Eneste måde at øge indtrængningsdybden er at øge sendermomentet og/eller sænke støjniveauet. Ved højmoment TEM øges sendermomentet, da strømstyrken til op mod 75 A. Ydermere sænkes støjniveauet ved at stakke mere og anvende en bedre modtagerspole, se figur B2. Princippet er da at kombinere en traditionel TEM-sonderings evne til at give oplysninger om de overfladenære lag med højmoment systemets informationer om de dybereliggende lag. Årsagen til højmoment systemet ringe opløsning af de overfladenære lag skyldes en forøget følsomhed overfor små overfladenære, laterale modstandsvariationer.



Figur B2 Målekurve ved 75A og 3A med støjkurver [Geologisk Nyt, 2001].

I figur B3 er det forsøgt at skildre hvorledes højmoment systemet muliggør en tolkning af dybereliggende lag. I figuren er sondering A en central loop konfiguration og sondering B er den tilhørende offset konfiguration.



Figur B3 Tolket model for almindelig TEM og HMTEM [Geologisk Nyt, 2001].

I figuren ses det hvorledes at offset-konfigurationen er i stand til at lokalisere den gode leder og i model B vises den opnåede 5-lags model med en resistivitet af det nederste lag ca. 190 meter under terræn på ca. 10hmm.

Systemkrav og måleprocedure

Tabel B1 Måleserie ved HMTEM.						
Modtager	Rx tid	Støj	UH	VH	HI	
Digital	8 sek	8	2	4	30	

Tabel B2	Medianfiltrering.
	in o and in a o in ig.

	0		
Modtager	UH	VH	HI
Digital	0	0	3

Tolkning af data

Tolkning af data er foretaget med samme software som beskrevet i appendiks A, tolkningen er i modsætning til i appendiks A todelt. Først præpareres UH- og VH-segmenterne som almindelige Protem47 sonderinger som gennemgået i appendiks A. Dernæst præpareres High-segmentet. I inversionsprogrammet Semdi samtolkes de to sonderinger (central loop konfigurationen og offset konfigurationen).

I figur B4 ses TEM-sondering 3052 beliggende nær den nordøstlige bred af Esrum Sø. Det ses af figuren, at High-segmentet indikerer tilstedeværelsen af en god leder, men mængden af data er meget lille, hvorimod HMTEM-sondering 3052A, figur B5, tydeligt viser hvorledes at den opnåede information omhandlende den gode leder er øget.



Figur B4 Tilsyneladende modstand som funktion af tiden, TEM-sondering 3052.



Figur B5 Tilsyneladende modstand som funktion af tiden, HMTEM-sondering 3052A.

For HMTEM-sonderingen er Ultra high-segmentet og Very high-segmentet indsamlet ved central loop konfigurationen, hvorimod High-segmentet er ved en offset opstilling. I og med der er en afstand på godt 70 meter mellem sender- og modtagerspole under offset konfigurationen, kan geologien og terrænforskelle give små afvigelser i målingerne, således at central loop kurverne ikke har 100% sammenfald med offset kurven. Formen og størrelsesordnerne for TEM- og HMTEM-sonderingernes måleværdier er dog identiske.

Bilag 1 - 53
























































































Detailkort 4 Kote af øvre gode leder

10 Kilometers

5

M&R DTU og GEUS
















