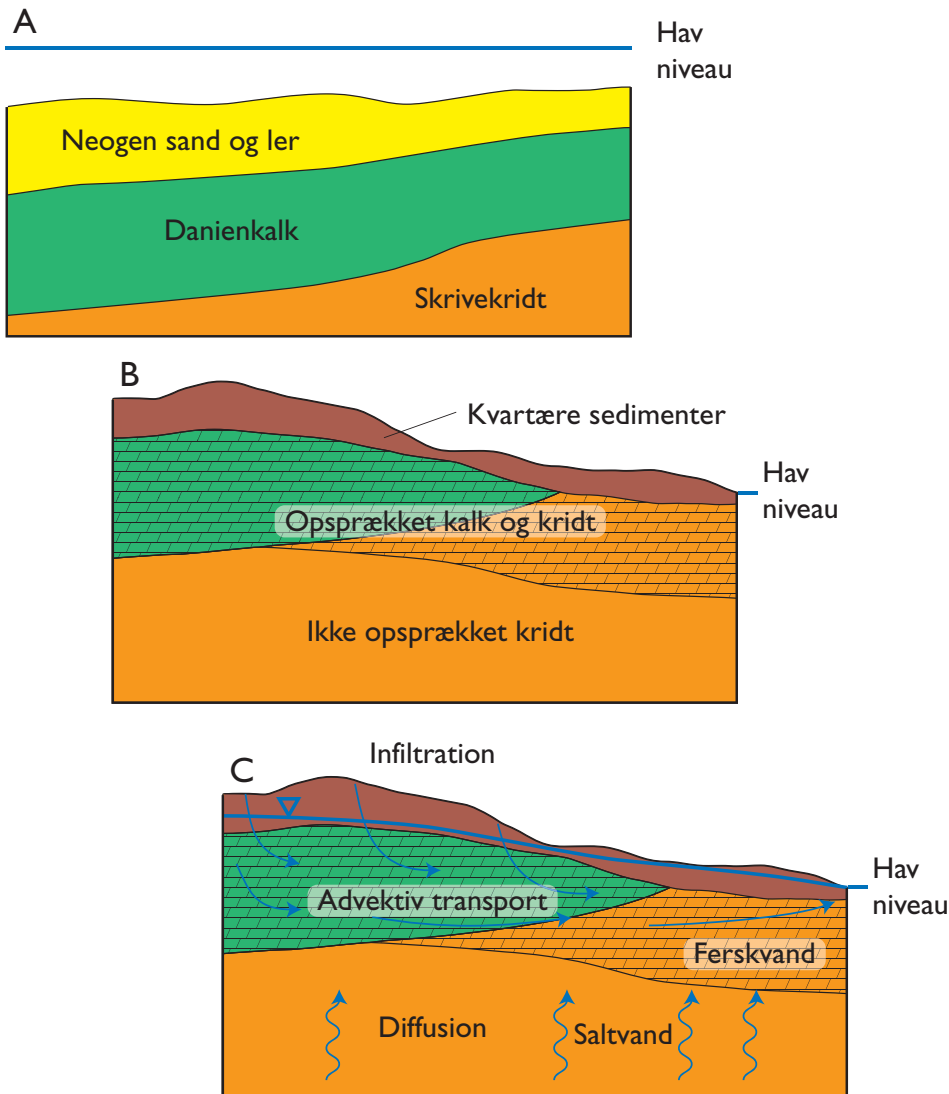


Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport

Resume af delprojekternes resultater og konklusioner samt perspektivering

Kurt Klitten, Flemming Larsen og Torben O. Sonnenborg

September 2006



Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport

Resume af delprojekternes resultater
og konklusioner samt perspektivering

*Kurt Klitten, Flemming Larsen
og Torben O. Sonnenborg*

September 2006

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Miljøministeriet

Institut for Miljø og Ressourcer
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)



Indhold

Forord	3
1. Introduktion	5
1.1 Introduktion og baggrund	5
1.2 Formål og delprojekter	8
2. Kalkmagasinernes geologiske dannelse	10
3. Saltvandsgrænsens karakter og dybde	14
3.1 Dannelse af sprækker i kalken og kridtet	14
3.2 Infiltration af ferskvand i kalken og kridtet	17
3.3 Overgangszonen mellem salt- og ferskvand	18
3.4 Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne	19
3.5 Saltvandsgrænsen bestemt med TEM-sonderinger	25
3.6 Højdekort over saltvandsgrænsen	28
4. Udvikling af saltvandsgrænsen i Skrivekridt	31
5. Sammenfatning og perspektivering	38
6. Referencer	42

Forord

Denne hovedrapport er udarbejdet som afrapportering af projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland". Projektet har været finansieret af Københavns Energi, Københavns Amt, Frederiksborg Amt og Roskilde Amt, og det er gennemført i et samarbejde mellem Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Danmarks Tekniske Universitet i perioden fra august 2002 til november 2005.

Det overordnede formål med projektet er at tilvejebringe en større 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 de dybere og uforurenede dele af disse grundvandsmagasiner /1/. Indenfor de tre amter er projektet geografisk begrænset til det område, hvor Skrivekridt og Danienkalk udgør den prækvartære overflade. Området Hornsherred er imidlertid ikke medtaget i undersøgelsen, idet der herfra foreligger for få oplysninger om de hydrogeologiske forhold i kalkmagasinerne.

Projektet har været opdelt i to faser. Den første fase havde som hovedformål at systematisere og analysere eksisterende data og viden om saltvand i projektområdet, men inkluderede også ny dataindsamling i form af udførelse af geofysiske undersøgelser af dybe borer og elektromagnetiske sonderinger (TEM-kortlægning). I projektets anden fase er der gennemført undersøgelser ved Stevns Klint og i et værkstedsområde ved Karlslunde, sydøst for Roskilde. Formålet med disse aktiviteter har været at undersøge de processer, som har kontrolleret udvaskningen af residualt saltvand fra Danienkalk og Skrivekridt. En forståelse af disse processer er en forudsætning for at kunne udvikle en metode til prognostisering af fremtidig kloridbelastning af eksisterende og nye grundvandsindvindinger fra kalk og kridt.

Foruden denne hovedrapport er der udsendt seks delrapporter med følgende titler:

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 Dansk Geo-servEx a/s
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 på DTU)

Tidligere projektleder Thorkild Feldthusen Jensen har gennemlæst alle rapporter og givet nyttige kommentarer og forslag til forbedringer.

København, 1 september 2006

1. Introduktion

1.1 Introduktion og baggrund

I en stor del af Nordøstsjælland forekommer ferskvandsressourcen udelukkende i Danienkalk og Skrivekridt. Ferskvandsressourcen er nedadtil begrænset af forekomsten af geologisk betinget saltvand, en vandtype som i den danske faglitteratur traditionelt er blevet kaldt residualt grundvand /2/. I Nordøstsjælland træffes grundvand med forhøjede koncentrationer af opløste ioner ofte i oppumpet grundvand fra Skrivekridtet, og især hvor oppumpningerne foregår i den sydlige del af regionen. Langs Køge Bugt er forekomsten af saltvand blevet forbundet med indtrængende saltvand fra havet, og andre steder er saltvand blevet forbundet med forekomsten af dybe forkastninger. Da kvaliteten af ferskvandsressourcen i stigende grad er truet af nedsivning af forurenede stoffer, er der et voksende behov for at etablere en mere velfunderet viden om mulighederne for at etablere vandindvindinger dybere i kalkmagasiner, uden at stabiliteten af grænsen mellem ferskvandet og det underliggende saltvand påvirkes.

I rapporten benyttes de traditionelle navne for de danske kalk- og kridtaflejringer. Daniens etagens kalkaflejringer beskrives de fleste steder samlet som Danienkalken, selv om denne optræder i fire forskellige typer kalk i denne formation /3/. "Dankalk" dækker således over denne bjergart som en geologisk formation, mens selve bjergarten vil blive omtalt som blot "kalk". Tilsvarende dækker "Skrivekridt" den geologiske formation, mens "kridt" henviser til selve bjergarten. Samlet betegnes grundvandsmagasinerne i Danienkalk og Skrivekridt som kalkmagasinerne.

Projektområdets geografiske udstrækning fremgår af Figur 1. Det omfatter den del af de tre amter i Nordøstsjælland, hvor den prækvartære overflade udgøres af enten Danienkalk eller af Skrivekridt, idet Hornsherred som nævnt i forordet ikke er medtaget. Med det formål at lette fremstillingen er undersøgelsesområdet inddelt i syv zoner, som i store træk følger en tidligere foreslået inddeling af Nordøstsjælland, baseret på strukturelle elementer og den prækvartære overflades højdeforhold /4/.

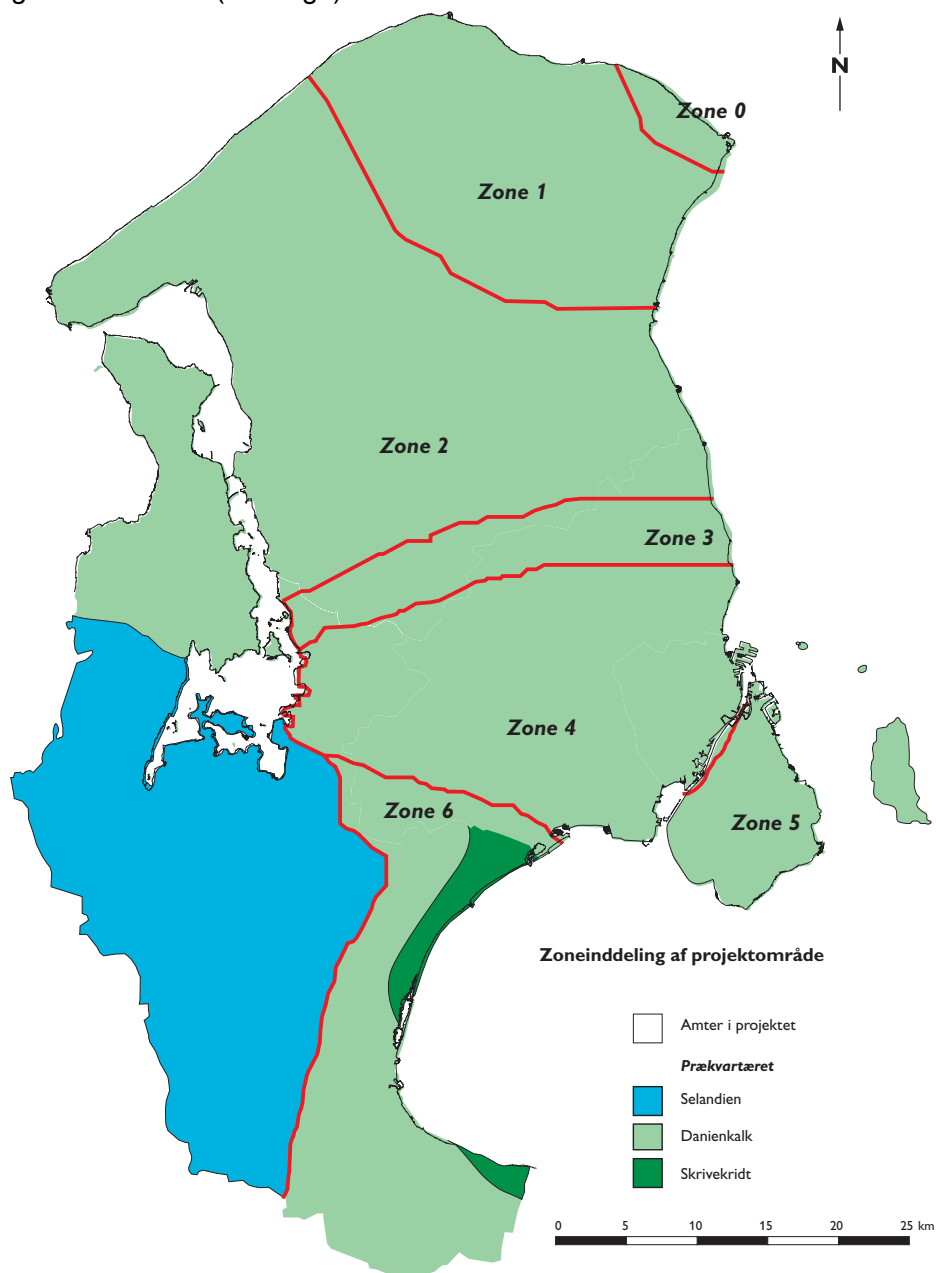
Inden nærværende projekt blev iværksat, var kendskabet til forekomsten af saltvand i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland i hovedtræk følgende:

Zone 0 er Helsingør området nord for Alnarpdalen (se beskrivelsen af zone 1), hvor Danienkalken udgør den prækvartære overflade. Prækvartæroverfladen ligger relativt højt, idet den træffes over kote -25 m.

Vandindvindingen foretages hovedsagelig fra kalken, og der forekommer enkelte boringer nær kysten med forhøjet klorid (>50 mg/l). Der er imidlertid ingen tilfælde med overskridelse af grænseværdien (250 mg/l) eller med betydelige stigninger i koncentrationen af klorid i pumpevandet.

Zone 1 indeholder Alnarpdalen, der er en 12 – 13 km bred nordvest - sydøst gående dal i den prækvartære overflade, som kan følges ud under Øresund og videre ned gennem Skåne /5,6/. I denne zone ligger den prækvartære overflade meget dybt, omkring kote –60 til -70 m, og udgøres af Danienkalken, idet der dog nogle få steder forekommer Selandien-aflejringer (Grønsandskalk og Kerteminde Mergel). Den geologiske struktur, som danner Alnarpdalen, formodes at være et resultat af forkastninger /5/.

Indvinding af grundvand i området foregår både fra kvartært sand og grus samt fra Danienkalken. Indvindingen fra kalken foregår hovedsagelig i den østlige del af Alnarpdalen. Der er enkelte borer med forhøjet klorid (>50 mg/l), men der er ingen rapporter om overskridelse af grænseværdien (250 mg/l).



Figur 1 Den geografiske udbredelse af undersøgelsesområdet og prækvartæroverfladens bjergarter, amtsgrænserne samt den benyttede zoneinddeling af projektområdet.

Zone 2 er området syd og vest for Alnarpdalen, hvor den prækvartære overflade ligger over kote -25 m, og udgøres af Danienkalk. Denne zone er mod syd afgrænset af Sønderødalen (zone 3).

Vandindvindingen foregår her hovedsagelig fra Danienkalken og kun i mindre omfang fra kvartært sand og grus. Der forekommer flere boringer med forhøjet klorid (>50 mg/l), og der er observeret overskridelse af grænseværdien (250 mg/l) i to kystnære boringer ved Hundested. Der findes data fra enkelte boringer, som viser stigende koncentrationer af klorid i pumpevandet.

Zone 3 er Sønderødalen, en øst - vest gående dal i den prækvartære overflade, som her ligger under kote -25 m. Sønderødalen formodes at være dannet ved glacial erosion, men er muligvis også betinget af mindre forkastninger langs den sydlige afgrænsning.

I Sønderødalen foregår indvindingen hovedsagelig fra kalken og kun i mindre omfang fra kvartært sand og grus. Der optræder mange boringer med forhøjet klorid (>50 mg/l), men ingen overskrider grænseværdien (250 mg/l). Der foreligger rapporter om betydelige stigninger i kloridbelastningen i enkelte boringer på Værebros og Bogøgård kildepladser.

Zone 4 dækker området Storkøbenhavn syd for Sønderødalen og ned til Køge Bugt og Vallensbæk Mose. Mod øst indeholder zonen København, og mod vest strækker den sig til Roskilde Fjord. Den prækvartære overflade udgøres af Danienkalk, som i den centrale del ligger højt, dvs. over kote 0 m. Skrivekridtet ligger over kote -20 m i denne zone. I den østlige del af zonen forsætter Carlsbergforkastningen de prækvartære formationer. Forkastningen løber fra Amager sydkyst over Sydhavnen, over Bellahøj og videre mod nord. Lagene øst for denne forkastningszone er nedforkastet i forhold til tilsvarende lag mod vest.

I zone 4 foregår indvindingen hovedsagelig fra Danienkalken og fra Skrivekridtet, og kun i mindre omfang fra kvartært sand og grus. Der optræder mange boringer med forhøjet klorid (>50 mg/l), og tillige enkelte i Hvidovre, Rødovre og Glostrup området med overskridelse af grænseværdien (250 mg/l). Der er indikationer på stigning i kloridbelastningen ved enkelte andre boringer på Frederiksberg og i Ballerup.

Zone 5 er Amager, hvor den prækvartære overflade udgøres af Danienkalk, som ligger forholdsvis højt, dvs. over kote -10 m. I den østlige del af Amager ligger Skrivekridtet dybt som følge af ovennævnte forsætning i Carlsbergforkastningen. Lokalt optræder der øst for forkastningen Grønsandskalk som prækvartæroverflade.

På Amager foregår indvindingen udelukkende fra Danienkalken. Der er observeret stigende koncentrationer af klorid i boringerne på en enkelt af kildepladserne (Bjørnbakkevej) stammende fra indstrømning af residual saltvand i kalken under Vestamager. Sidstnævnte er inddæmmet havområde under kote 0 m.

Zone 6 omfatter området langs Køge Bugt og den nordvestligste del af halvøen Stevns. Zonen afgrænses mod vest af området, hvor Selandien aflejringerne (Grønsandskalk og Kerteminde Mergel) udgør den prækvartære overflade. Prækvartæroverfladen udgøres i størstedelen af zone 6 af Danienkalk, men i et delområde langs kysten danner Skrivekridtet

den prækvartære overflade. I store dele af zone 6 ligger den prækvartære overflade højt, dvs. over kote 0 m.

I denne zone foregår vandindvindingen udelukkende fra Danienkalken og fra Skrivekridtet. Langt de fleste af indvindingsboringerne viser forhøjet klorid (>50 mg/l), ligesom flere af boringerne har vist stigende koncentrationen af klorid (Herfølge, Solrød, Greve, Karlslunde, Ishøj). Enkelte boringer i Greve-Ishøj området har overskredet grænseværdien (250 mg/l) og er blevet lukket eller delvis tilbagestøbt (nedre del opfyldt med cement og/eller bentonit). Generelt er der truffet forhøjede koncentrationer af saltvand i kridtet langs Køge Bugt /7/.

1.2 Formål og delprojekter

Det overordnede formål med projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" 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 de dybere og uforurenede dele af disse grundvandsmagasiner.

Disse formål er blevet opnået ved gennemførelse af følgende seks delprojekter /8-13/:

I **delprojekt 1** er der gennemført en retolkning af refleksionsseismisk datamateriale tilgængeligt på GEUS med henblik på at kortlægge de overordnede strukturgeologiske forhold i Danienkalk og Skrivekridtet i projektområdet /8/. I retolkningen er der især lagt vægt på grænsefladen mellem Danienkalken og Skrivekridtet samt eventuelle forkastninger i denne grænseflade. På basis af tolkningsresultaterne suppleret med oplysninger om denne geologiske grænse i boringer, og her specielt i boringer med loggingdata, er der udarbejdet et højdekort over kridtoverfladen, Figur 2. Kendskabet til denne grænseflades dybdemæssige beliggenhed har vist sig i denne sammenhæng at have stor betydning, idet stigende koncentrationer af saltvand ofte findes netop fra kontakten mellem kalken og kridtet og nedefter.

I **delprojekt 2** er der foretaget en systematisk gennemgang og retolkning af alle tilgængelige data fra geofysiske loggingundersøgelser af boringer ført ned i kalkmagasinerne /9/. Dette er gjort med henblik på at systematisere oplysningerne vedrørende beliggenheden og karakteren af grænsefladen mellem fersk- og saltvand i grundvandsmagasinerne. Ved tolkningen er der fremkommet en ny viden om beliggenheden af den geologiske grænseflade mellem Danienkalken og Skrivekridtet og dermed om de regionale geologiske forhold i projektområdet. I analysen af de geologiske forhold i Skrivekridtet er der lagt vægt på udbredelse af mergellag og på at belyse disse lags betydning for udbredelsen af saltvand i formationen. Et andet formål har været at belyse indstrømningsfordelingen, og dermed den dybdemæssige fordeling af hydraulisk aktive horisontale og subhorisontale sprækker.

I **delprojekt 3** er der udført elektromagnetiske overfladesonderinger (TEM-sonderinger) langs seks profillinier i projektområdet /10/. Formålet med denne geofysiske kortlægning

har været at indsamle oplysninger om grænsefladen mellem fersk- og saltvand i kalkmagasinerne, hvor der ikke er oplysninger fra dybe borer. Til støtte for tolkningerne er der gennemført et teoretisk studie af karakteren af TEM-responser under de observerede geologiske/geofysiske forhold i kalkmagasinerne i projektområdet.

I **delprojekt 4** er der gennemført en simulering af såvel de nuværende som de oprindelige strømnings- og potentialeforhold i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland /11/. Simuleringen er foretaget med den Nationale Vandressource Model (DK-model Sjælland) /14/. Simuleringen af det oprindelige strømnings- og potentialbillede er gennemført ved først at simulere og kalibrere de nuværende potentialforhold i kalken, og derefter simulere grundvandsstrømningen uden oppumpninger. Hensigten med simuleringen har været at fremskaffe et kendskab til den regionale naturlige grundvandsstrømning i kalkmagasinerne og dermed til fordelingen af infiltrations og udstrømningsområder, samt at bestemme størrelsen af infiltrationen.

I **delprojekt 5** er der foretaget en systematisk gennemgang af tilgængelige grundvandskemiske data fra kalkmagasinerne indsamlet efter 1992 /12/. Formålet hermed har været at etablere en oversigt over de generelle grundvandskemiske forhold i grundvandsmagasinet i kalken og kridtet i projektområdet. Der er opstillet et relativt enkelt procesorienteret klassifikationssystem for grundvands sammensætning af naturlige kemiske parametre i kalkmagasinerne. Specielt med henblik på saltvandspåvirkningen af grundvandet er der foretaget en undersøgelse af sammenhængen mellem placering, oppumpning, driftmæssige forhold, etablering af dybe borer og kloridindhold i pumpevandet på Københavns Energis kildepladser.

I **delprojekt 6** er der udført detaljerede undersøgelser af fersk-saltvandsgrænsen i et værkstedsområde ved Karlslunde, herunder borehulslogging i udvalgte borer /13/. Foruden undersøgelserne i projektområdet er der gennemført feltundersøgelser af Skrivekridtet ved Stevns Klint med henblik på identifikation af sprækkedannelsen i formationen. Et væsentligt element i undersøgelserne i værkstedsområdet er gennemførelsen af to dybe kerneboringer og borehulslogging i disse. Der er gennemført laboratorieundersøgelser af kerneprøverne herfra med henblik på at fremskaffe data vedrørende hydrauliske og kemiske forhold i Skrivekridtet, herunder kloriddiffusion samt iltisotopforhold. Der er opstillet en konceptuel og en numerisk hydrogeologisk model for Karlslunde området, hvormed der er gennemført simuleringer af udvaskning af residualt saltvand fra Skrivekridtet og Danienkalke over geologisk tid.

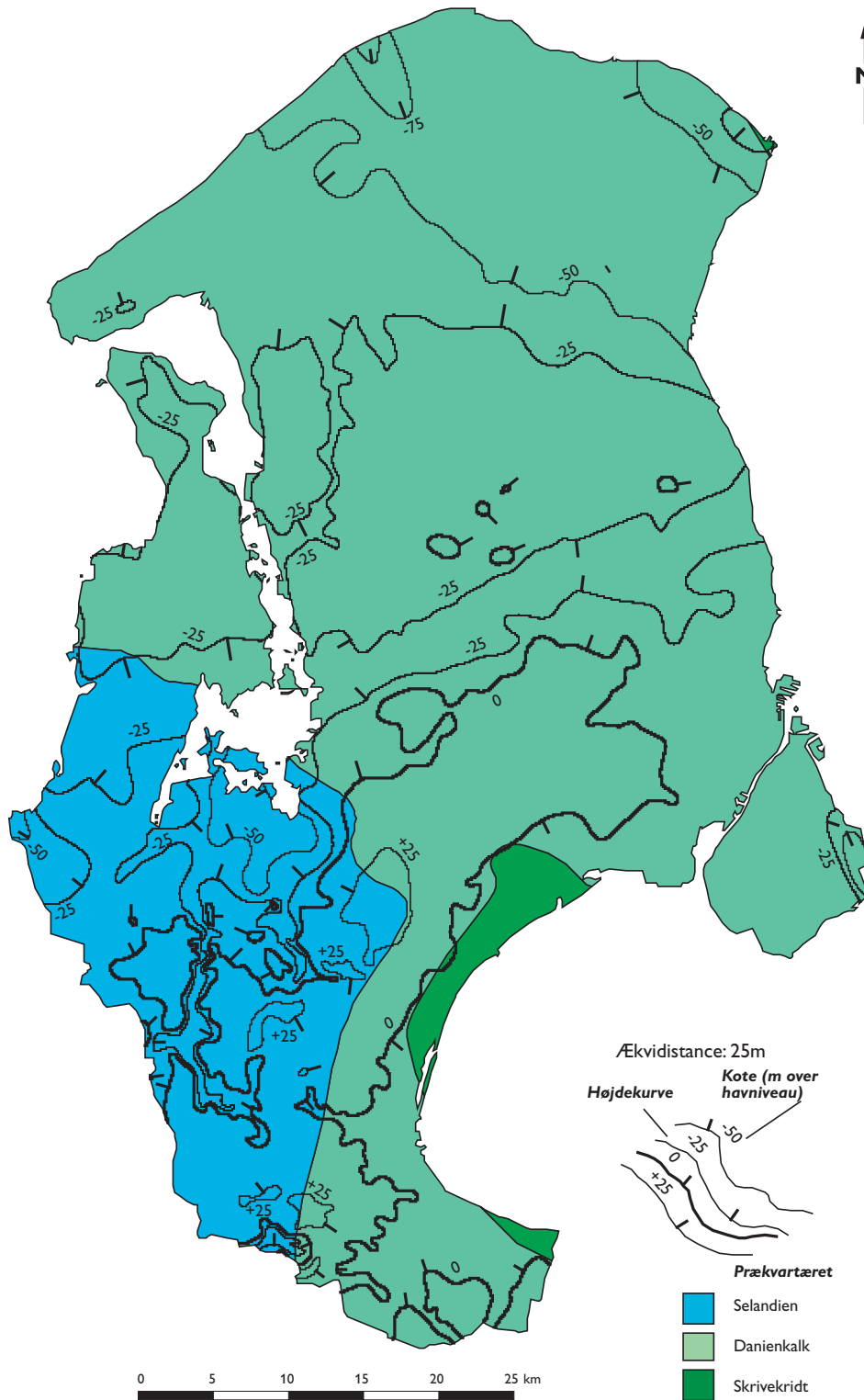
2. Kalkmagasinernes geologiske dannelse

En af hovedkonklusionerne i dette projekt er, at i en stor del af Nordøstsjælland forekommer saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne fra overgangen mellem Danienkalken og Skrivekridtet eller fra et mergellag nogle meter nede i Skrivekridtet /9,10,13/. Undtaget denne generelle konklusion er meget kystnære områder, området sydvest for Helsingør (Alnarpdalen), samt områder hvor saltvand trænger op i forkastninger og zoner omkring åer (Køge Å og Tryggevælde Å). De hydrogeologiske forhold, som medfører disse anomalier, vil blive omtalt senere i rapporten.

Saltvandsgrænsens beliggenhed i kalkmagasinerne er således forbundet med de geologiske og strukturelle forhold, som har betinget dannelsen af grundvandsmagasiner i kalk- og kridtaflejringerne. Det er derfor relevant indledningsvis at se på kalkmagasinernes dannelse. De hydrauliske og hydrogeologiske forhold i kalkmagasinerne omtales i det følgende kapitel.

I projektområdet er den maksimale mægtighed af Danienkalken omkring 100 m /3/. Under Danienkalken findes overalt i projektområdet kridt, og mægtigheden af Skrivekridtet er mellem 1.500 og 2.000 m i projektområdet /15/. For en yderligere geologisk beskrivelse af Danienkalken og Skrivekridtet kan henvises til delrapport 6 /13/. Ovenpå Skrivekridtet og Danienkalken blev der i tertiær aflejret omkring 500 m klastiske sedimenter, det vil sige hovedsagelig ler, silt og sandede forekomster /16/. Kalk- og kridtaflejringer, som nu udgør grundvandsmagasinerne i Nordøstsjælland, har således i tertiærperioden været begravet mellem 500 og 800 m nede i Det Danske Sedimentære Bassin. Mod slutningen af tertiær (Sen Neogen), dvs. for 2 – 3 millioner år siden, forekom der i den sydlige del af Skandinavien en hævnings, som har medført et opløft på mellem 500 og 1.000 m /16, 17/. I projektområdet har hævningsen været omkring 500 m /16/.

Det tektoniske opløft i Den Fennoskandiske Randzone har medført, at de prækvartære formationer på Sjælland nu har en svag hældning mod vest, og at Skrivekridtet ligger højt i den østlige del af projektområdet, Figur 1. Langs dele af Køge Bugt optræder Skrivekridtet således direkte under sedimenterne fra den Kvartære periode, mens den prækvartære overflade i den resterende del af projektområdet udgøres af Danienkalken. Kun som små lokale forekomster på Amager, i det centrale København, samt ved Tune og Esrum-Mårup, forekommer der aflejringer fra Selandien perioden i form af Grønsandskalk og Kerteminde Mergel. Den prækvartære overflades udformning og højdeforhold, Figur 2, er et resultat af erosion og forkastningsaktivitet siden den tektoniske hævnings i tertiærtiden og desuden af isens og smeltevandets erosion i den Kvartære periode. Koten til prækvartærovefladen er i størstedelen af projektområdet overordentlig godt bestemt fra det store antal borer, der er ført gennem de kvartære lag og ned i prækvartæret.



Figur 2 Den prækvartære overflade i amterne Frederiksborg, København og Roskilde med højdekurver.

Anderledes forholder det sig med koten for grænsefladen mellem Danienkalken og Skrivekridtet (top Skrivekridt). Kun i området vest og sydøst for København, hvor Skrivekridtet ligger højt og hvor mægtigheden af Danienkalken samtidig er beskeden, kendes koten for Skrivekridtet fra en række vandforsyningsboringer. I den øvrige del af projektområdet er antallet af boringer, som er ført ned i Skrivekridtet, ret begrænset. Ved kortlægningen af

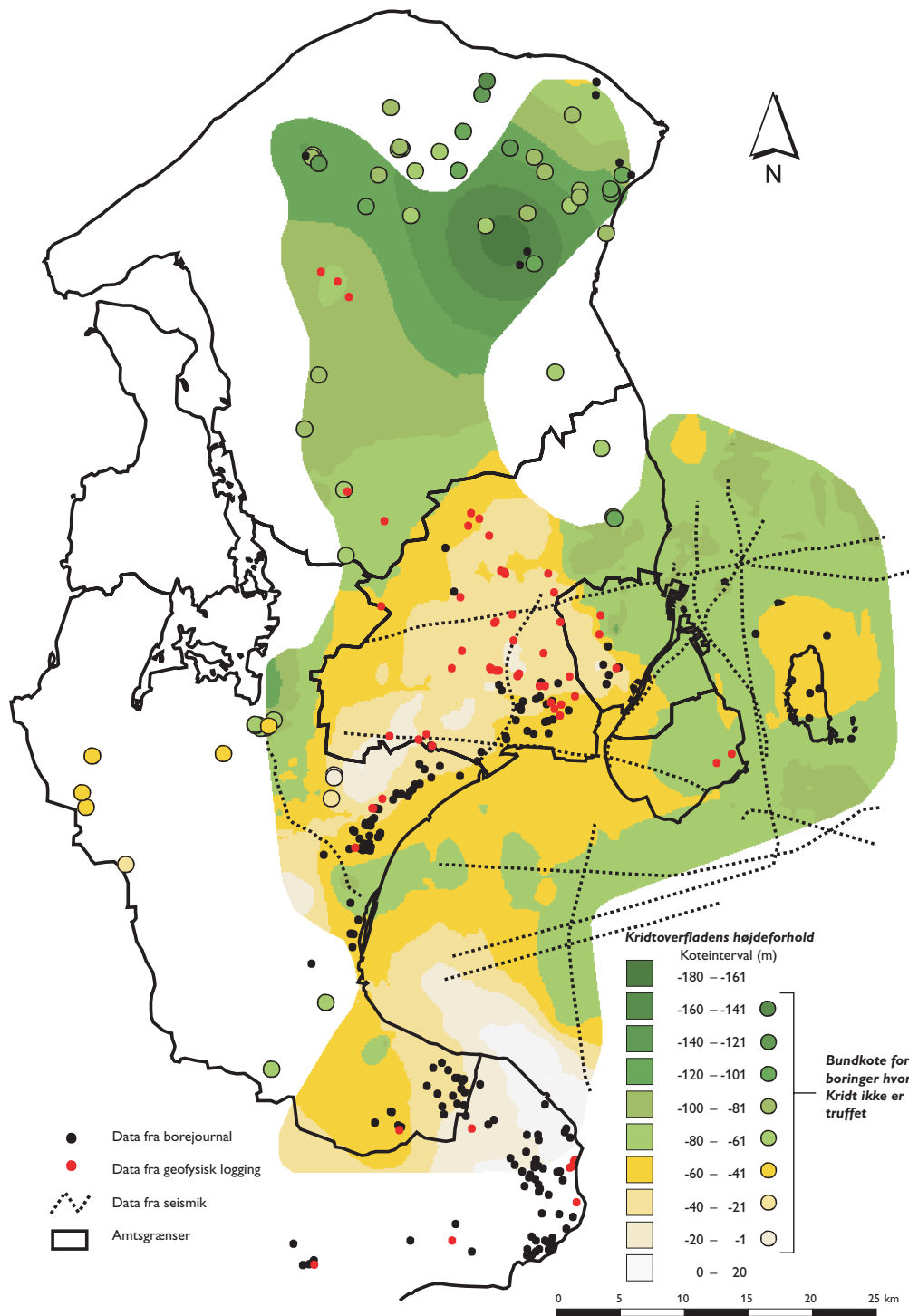
denne vigtige grænseflade er der derfor inddraget data fra seismiske profiler /8/. Tolkingsresultaterne herfra er sammenstillet dels med information fra 66 boringer, hvor Danienkalk - Skrivekridt grænsen er veldokumenteret fra geofysiske borehulslogging undersøgelser /9/, og dels med information fra andre boringer, der indeholder en angivelse af Danienkalk – Skrivekridt grænsen. Boringer med usikre eller mindre sandsynlige beliggenhed af denne grænse er ikke inddraget i kortlægningen.

I den centrale del af projektområdet har det været muligt at kortlægge en markant seismisk reflektor i kalkmagasinerne, som ud fra en hastighedsberegning kan tolkes som værende den geologiske grænseflade mellem Danienkalk og Skrivekridt ("top Skrivekridt"). Sammenligninger med oplysninger fra boringer har sandsynliggjort, at denne seismiske reflektor udgør denne geologiske grænseflade. Resultatet af kortlægningen af "top Skrivekridts" højdeforhold fremgår af Figur 3.

I store områder nord for København, langs Roskilde Fjord samt ved kysten i Nordøstsjælland er der ingen boringer, der har gennemboret Danienkalken, og der findes derfor ikke oplysninger om koten for Skrivekridts overflade. I disse områder er der følgelig ikke indlagt kurvebilleder for "top Skrivekridt" i Figur 3. I stedet er der ved dybe boringer med samme farvesignatur (som anvendt for kurvebilledet) vist koten for boreddybden, hvor Skrivekridtet endnu ikke blev truffet. Derved gives der den information, at "top Skrivekridt" ligger dybere end de angivne koter ved boringerne.

Det fremgår af Figur 3, at Skrivekridtet træffes over kote 0 m på den nordlige del af halvøen Stevns, og i et område som strækker sig fra området mellem Roskilde og Køge Bugt ind mod København langs kysten. Vest for København og Køge Bugt falder Skrivekridts overflade jævnt til under kote -80 m i den vestlige del af projektområdet. Denne udformning af Skrivekridt overfladen er et resultat af det geologiske opløft i Den Fennoskandiske Randzone.

Fra København og imod Nordsjælland falder overfladen af Skrivekridt ligeledes til under kote -80 m og yderligere til mellem kote -120 m og -170 m syd for Gilleleje-Hornbæk-Helsingør i Alnarpdalen. Forløbet af Carlsbergforkastningen på Amager og under København, med en nedforkastning på dens østlige blok, fremgår af højdekurverne for Skrivekridtets overflade. Vest for forkastningszonen findes kridtet således mellem kote -40 m og -20 m, mens det øst for strukturen træffes mellem kote -80 og -60 m.



Figur 3 Tolket "top Skrivekridt" overflade på basis af oplysninger fra seismiske sektioner og fra 66 borer med geofysiske borehulslogs, samt fra et vist antal andre borer med oplysninger om denne grænseflade.

I de tre dybe borer, som er lokaliseret langs Øresundskysten nord for København, er Skrivekridtet ikke truffet, hvilket viser, at kridtets overflade i dette område ligger relativt dybt. Dette kunne indikere en nordlig fortsættelse af Carlsbergforkastningen, og endvidere, at denne nordlige fortsættelse måske er den sydlige forkastningsbetingede afgrænsning af Alnarpdalen /18/.

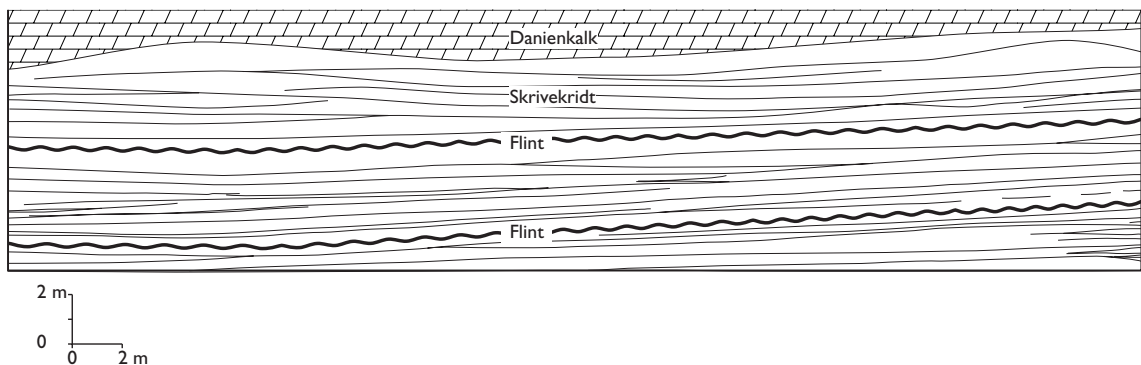
3. Saltvandsgrænsens karakter og dybde

Da transport af grundvand og opløste salte i Skrivekridtet og Danienkalken overordnet er kontrolleret af tilstedeværelsen af sprækker og forkastninger, er der i projektet lagt vægt på at karakterisere udbredelsen af disse i formationerne. Dette er dels gjort ved at undersøge blotninger, hvor bjergarterne kan betragtes og der kan foretages opmålinger, dels ved anvendelse af geofysisk borehulslogging i eksisterende og nye projektboringer.

3.1 Dannelse af sprækker i kalken og kridtet

Kalken og kridtet har oprindeligt haft en så lav permeabilitet, at disse bjergarter kun kan udgøre et grundvandsmagasin, hvor der er udviklet sprækker i bjergarterne. I forbindelse med de ovenfor beskrevne tektoniske aktiviteter er der sket en intensiv sprækkedannelse af kalken og kridtet, hvorved ferskvand har kunnet strømme ned i formationerne og udvaske det oprindelige, marine porevand. I projektet er sprækkedannelsen i Danienkalken blevet undersøgt i Karlstrup Kalkgrav, og Skrivekridtet er undersøgt ved Stevns Klint /13/. Da de regionale undersøgelser har vist, at saltvandsgrænsen stort set overalt forekommer i Skrivekridtet, vil præsentationen her blive begrænset til forholdene i denne bjergart.

Som følge af det tektoniske opløft i Neogen, og den glaciale aktivitet og afsmeltning i Kvartær perioden, er der udviklet subhorizontale aflastningsprækker (hældning under 20°) i Skrivekridtet. Der er desuden udviklet subvertikale sprækker (hældning $> 60^\circ$) som følge af den tektonisk kompression af sedimenterne i Den Fennoskandiske Randzone /13, 19/.



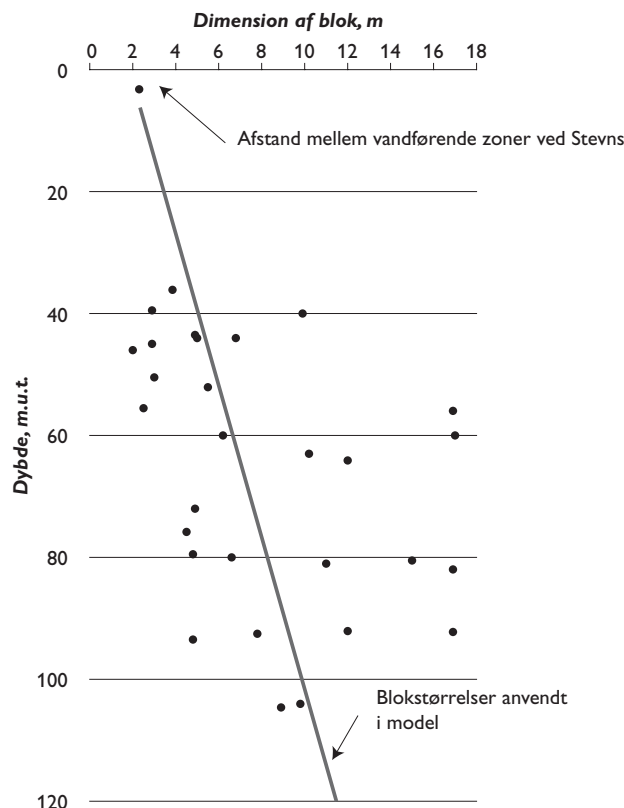
Figur 4 Skitse med fordelingen af lagparallelle sprækker i Skrivekridt fra blotning ved Stevns Klint. Udover sprækker er der markeret to kontinuerte flintlag /13/.

Ved undersøgelser af blotninger af Skrivekridtet på Stevns Klint er det påvist, at afstandene mellem formationens subhorizontale sprækker er mellem 0,07 til 1,50 m, og at den gennemsnitlige afstand er omkring 0,40 m, Figur 4. Der er observeret kanalisering af vand langs disse subhorizontale sprækker, og afstanden mellem vandførende zoner er i gennemsnit 2,4 m /13/.

Forekomsten af subvertikale eller intermediære sprækker (hældninger mellem 20° og 60°) i kridtet er undersøgt langs en horisontal linie i klinten. I alt 48 sprækker skærer denne linie,

og afstanden mellem disse skæringer er mellem 0 og 5,0 m, med en gennemsnitlig afstand mellem de skærende sprækker på 0,96 m. De skærende sprækker optræder med de fire dominerende strygningsretninger 120°, 140°, 160° og 170°, hvor 140° og 160° er dominerende. Hældningen af sprækkerne er i de fleste tilfælde over 70°, men alle er over 60°, så de må alle klassificeres som subvertikale sprækker. Længden af de subvertikale sprækker i den undersøgte linie er i gennemsnit 1,40 m, og der er observeret længder på mellem 0,45 og 4,87 m. Hovedparten af de subvertikale sprækker skærer således flere af de subhorisontale, de fleste skærer to eller tre subhorisontale sprækker. Tilsvarende resultater af opmålinger af sprækkedannelse i Skrivekridtet er påvist i undersøgelser af kridtet i Sigerslev kalkbrud på Stevns /19/.

Resultaterne af feltopmålingerne på Skrivekridtet på Stevns viser, at formationen er opdelt i et tilnærmelsesvist orthogonalt netværk af matrixblokke, hvor den vertikale dimension i gennemsnit er omkring 0,40 m og den horisontale dimension i gennemsnit er 0,96 m. Laboriemålinger har vist, at porøsiteten i kridtet er mellem 40 og 50 %, og bjergartens hydrauliske ledningsevne er mellem 2,5 og $5 \cdot 10^{-8}$ m/s /13, 20/. Den visuelle undersøgelse af Skrivekridtet i blotninger er suppleret med undersøgelser af den vertikale fordeling af sprækker i borerer ud fra geofysiske borehulsundersøgelser. Der er opstillet en foreløbig model for blokkenes dimension med stigende dybde, Figur 5. De tolkede størrelser af en blok i Skrivekridtet er bestemt som afstanden mellem to identificerede indstrømningszoner i borererne. Blokkens dybde er angivet som dybden af blokkens midtpunkt under terræn.



Figur 5 Dimensioner af blokke i et subortogonalt system af sprækker i Skrivekridt. Blokkenes dimension er vurderet ud fra en sammenstilling af flow-, temperatur- og ledningsevne-log fra syv borerer.

Det fremgår af Figur 5, at der som forventet kan påvises en tendens til, at matrixblokkene i Skrivekridtet bliver større med stigende dybde under terræn. Dette afspejler en gradvis lukning af de subhorizontale sprækker som følge af et forøget litostatisk tryk med stigende dybde. Subvertikale sprækker, som har en orientering mere parallelt med trykket, er mere åbne på større dybder, hvilket er dokumenteret med optisk televideo-optagelser /13/.

I den øvre del af formationen er dimensionen af blokkene i det subortogonale system omkring 2,5 m x 2,5 m. Denne dimension er baseret på observerede afstande mellem vandførende kanaler langs de subhorizontale sprækker ved Stevns Klint. Blokstørrelsen forøges med stigende dybde til omkring 12 m ved en begravelsesdybde på 120 m. Da subvertikale sprækker vil være underrepræsenteret ved identifikation af indstrømningszoner i boringer, kan denne model for blokkens dimension underestimere dimensionerne i det horizontale plan. Hvis blokkens dimensioner i dette plan er mindre end i den vertikale retning, vil afstanden for diffusion af klorid fra kridtmatrix til en aktiv sprække være kortere i disse retninger, og hermed vil tiden for udvaskning af saltvandet være kortere.

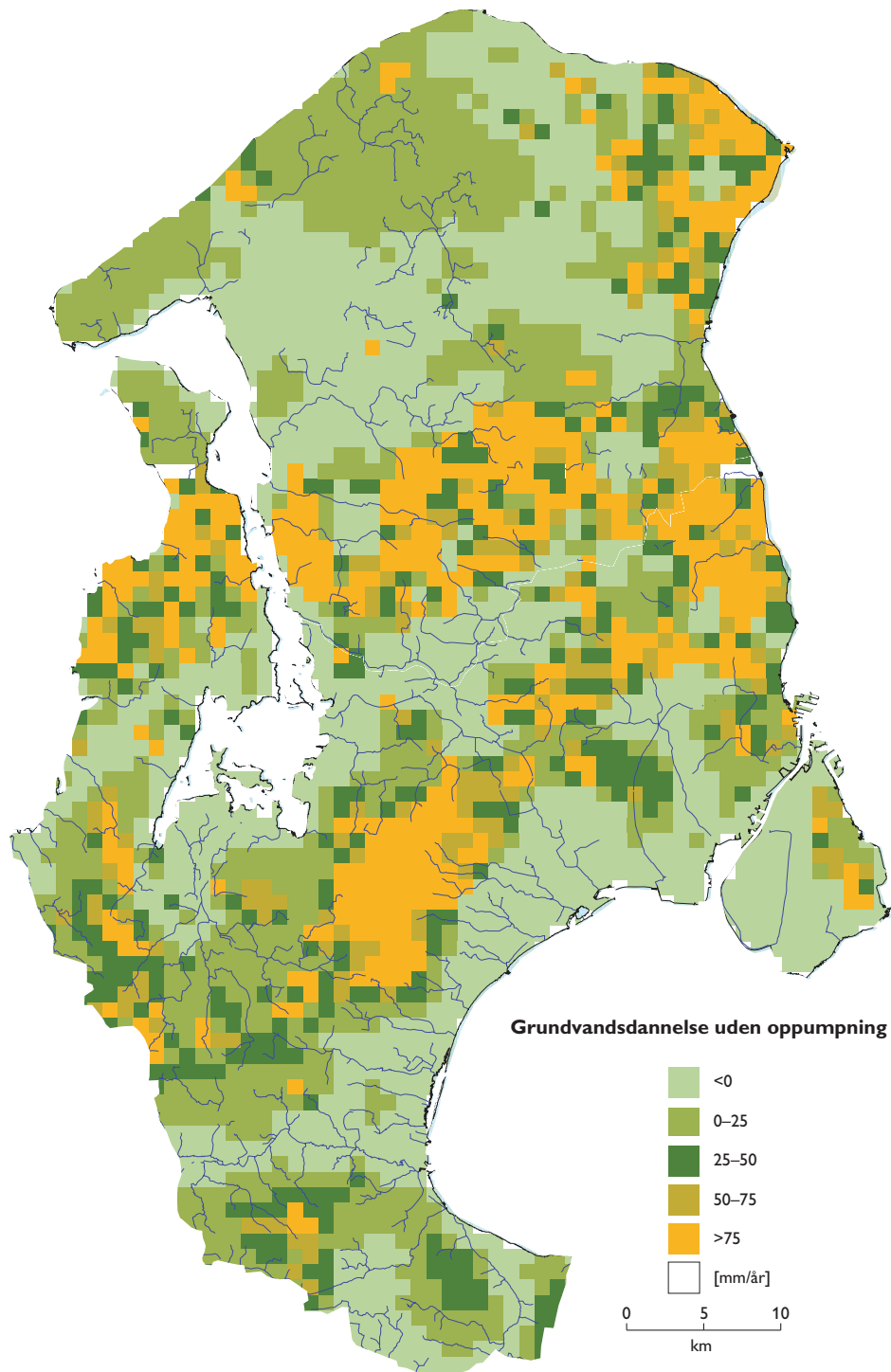
I en overgangszone ned til omkring 100 - 120 m. er der sprækker i Skrivekridtet og udvaskningen af saltvand er derfor foregået primært som en advektiv transport i et subortogonalt sprækkesystem. Derimod er transporten af saltvand ud af matrixblokkene til de omkringliggende sprækker foregået ved diffusion. Der er muligvis også foregået en vis advektiv transport gennem selve matrixblokkene. Denne foreløbige konceptuelle model for fordelingen af hydraulisk aktive sprækker i Skrivekridtet er overensstemmende med observationerne fra geofysisk borehulslogging i hele projektområdet /9/, se følgende afsnit.

I forbindelse med analysen af de geofysiske borehulsundersøgelser er der foretaget en retolkning af 124 flow-logs fra op til 120 m dybe boringer fra både Danienskalken og Skrivekridtet /9/. I vurderingen af indstrømningsfordelingen er der ikke taget hensyn til indbyrdes forskelle i boringernes specifikke kapacitet. Analysen tager derfor kun højde for relative forhold dels med hensyn til den vertikale fordeling af indstrømningszoner og dels disse zoners procentiske indstrømning. I det følgende sammenfattes analysen af indstrømningsfordelingen i 124 boringer:

- Den største indstrømning til boringerne træffes i de øverste 5 meter af kalkmagasinet i 40 tilfælde ud af de 124 undersøgte boringer. Antallet bliver væsentlig større, hvis dybden blev øget til de øverste 10 m i kalkmagasinet.
- Der synes helt tydeligt at være mulighed for at øge en borings specifikke ydelse ved at gennembore hele Danienskalken, idet stort set alle boringer har truffet indstrømninger helt til bund af boring. Først når der bores videre ned i Skrivekridt, bliver hyppigheden af indstrømningszoner og størrelsen af disse mindre, især hvis Skrivekridtet først træffes mere end 70 m under top af Danienskalken. Der træffes dog stadig indstrømningszoner helt ned til ca. 100 m under prækvartæroverfladen, men indstrømningsbidrag i dybdeintervallet fra 70 til 100 m under prækvartæroverfladen er som regel små (< 5 %). Undtagelser herfra er dog observeret.
- I boringer med indstrømning i både Danienskalken og Skrivekridt ses de enkelte indstrømninger generelt at være større i Danienskalken.

3.2 Infiltration af ferskvand i kalken og kridtet

Som følge af sprækkedannelsen i kalken og kridtet har meteorisk vand de sidste 2 - 3 millioner år kunnet strømme ned i kalkmagasinerne, og herved er formationernes oprindelige, marine porevand langsomt blevet udvasket. Fordelingen af de naturligt forekommende infiltrations- og udstrømningsområder i kalkmagasinerne er bestemt med Den Nationale Vandressource Model, Figur 6.



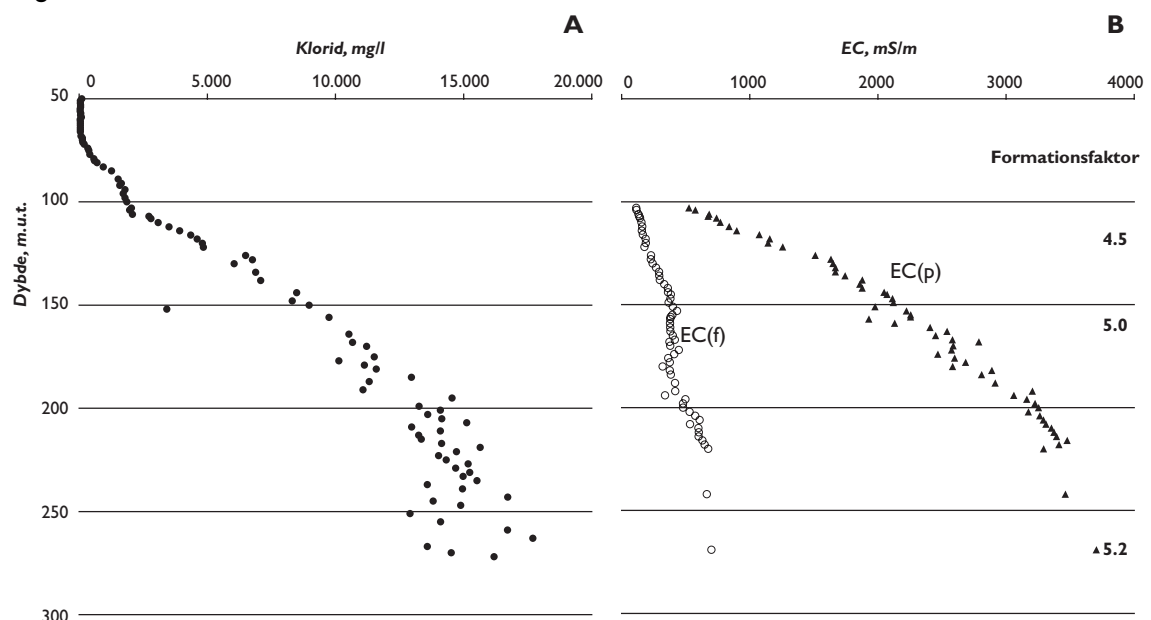
Figur 6 Beregnet naturlig infiltration til kalkmagasinerne uden oppumpninger fra disse.

Ved sammenligning med zoneinddelingen på Figur 1 ses, at naturlig infiltration til kalken er foregået i området omkring Helsingør (zone 0) og i et bælte nord for Sønderødalen fra Øresund til Roskilde fjord, dvs. i den sydlige del af zone 2. Endvidere i den topografiske højderyg beliggende fra nord for Købehavn mod sydvest til midt imellem Roskilde fjord og Køge bugt, dvs. midt ned gennem zonerne 4 og 6. I store dele af zone 1, zone 2 og 3 er der foregået en opadrettet vandbevægelse fra kalken til de glaciale og postglaciale dæklag, mens der er sket en udstrømning i området langs Køge Bugt og i den vestlige del af Sønderødalen (zone 3). Ifølge modelberegningerne har den naturlige infiltration de fleste steder været mellem 25 og 75 mm/år.

I relation til problematikken med udvaskning og transport af saltholdigt grundvand fra Skrivekridtet er det især værd at bemærke områderne, hvor der naturligt er forekommet udstrømning fra kalken til de glaciale og postglaciale sedimenter (opadrettet lækage). Dette er især sket i vådområderne omkring Arresø og Esrum Sø, ved Langstrup Mose, Værebros Ådal samt kystområdet i Køge Bugt. I disse områder kan der derfor forventes et højere kloridindhold i grundvandet i Danienkalken og i den nedre del af det kvartære magasin end i de oprindelige infiltrationsområder.

3.3 Overgangszonen mellem salt- og ferskvand

Fra hydrogeologiske undersøgelser i det østlige England har det været kendt siden begyndelsen af 1980'erne, at der forekommer en gradvis overgang mellem fersk- og saltvand i Skrivekridtet /21/. Resultaterne fra undersøgelserne af Karlslunde boringen i værkstedsområdet i dette projekt har vist, at lignende forhold forekommer i Skrivekridtet i Nordøstsjælland, Figur 7A.



Figur 7 A) Koncentrationen af klorid i porevand centrifugeret ud af Skrivekridt kerneprøver fra Karlslunde boringen. Skrivekridt blev truffet fra 25 mut. og til boringens bund i dybden 269 mut. B) Elektrisk ledningsevne i porevand fra kerneprøver og formationsledningsevne fra induktions-log i boringen (begge ved 10° C øverst stigende til 15° C ved bunden).

I Karlslunde boringen optræder Skrivekridtet direkte under glaciale og postglaciale sedimenter, som på borestedet har en mægtighed på 25 m. I Skrivekridtets porevand er koncentrationen af klorid mindre end 100 mg/l ned til omkring 70 mut, og fra denne dybde er koncentrationen af klorid stigende mod større dybde. Stigningen er i gennemsnit ca. 90 mg/l per meter, hvorved koncentrationen af klorid i porevandet i bunden af boringen i dybden 269 mut. er omkring 17.700 mg/l. Dette svarer til 94 % af koncentrationen af klorid i oceanisk havvand. Denne fordeling af klorid i kridtet må overordnet tolkes som et resultat af en opadrettet diffusion af klorid fra Skrivekridtet og op i ferskvandszonen /13,21/.

Målte elektriske ledningsevner i porevand og i formationen (induktions-log) ved aktuel temperatur (10° C stigende til 15° C) fremgår af Figur 7B. I bunden af boringen er formationens elektriske ledningsevne, EC(f), omkring 700 mS/m, mens den i porevandet, EC(p), i samme dybde er omkring 3.800 mS/m. Da den elektriske ledningsevne er bestemt i såvel porevand som formation, kan formationsfaktoren udregnes, idet denne er lig forholdet mellem porevandets ledningsevne og formationens ledningsevne (ved samme temperatur).

$$F = \frac{EC_p}{EC_f}$$

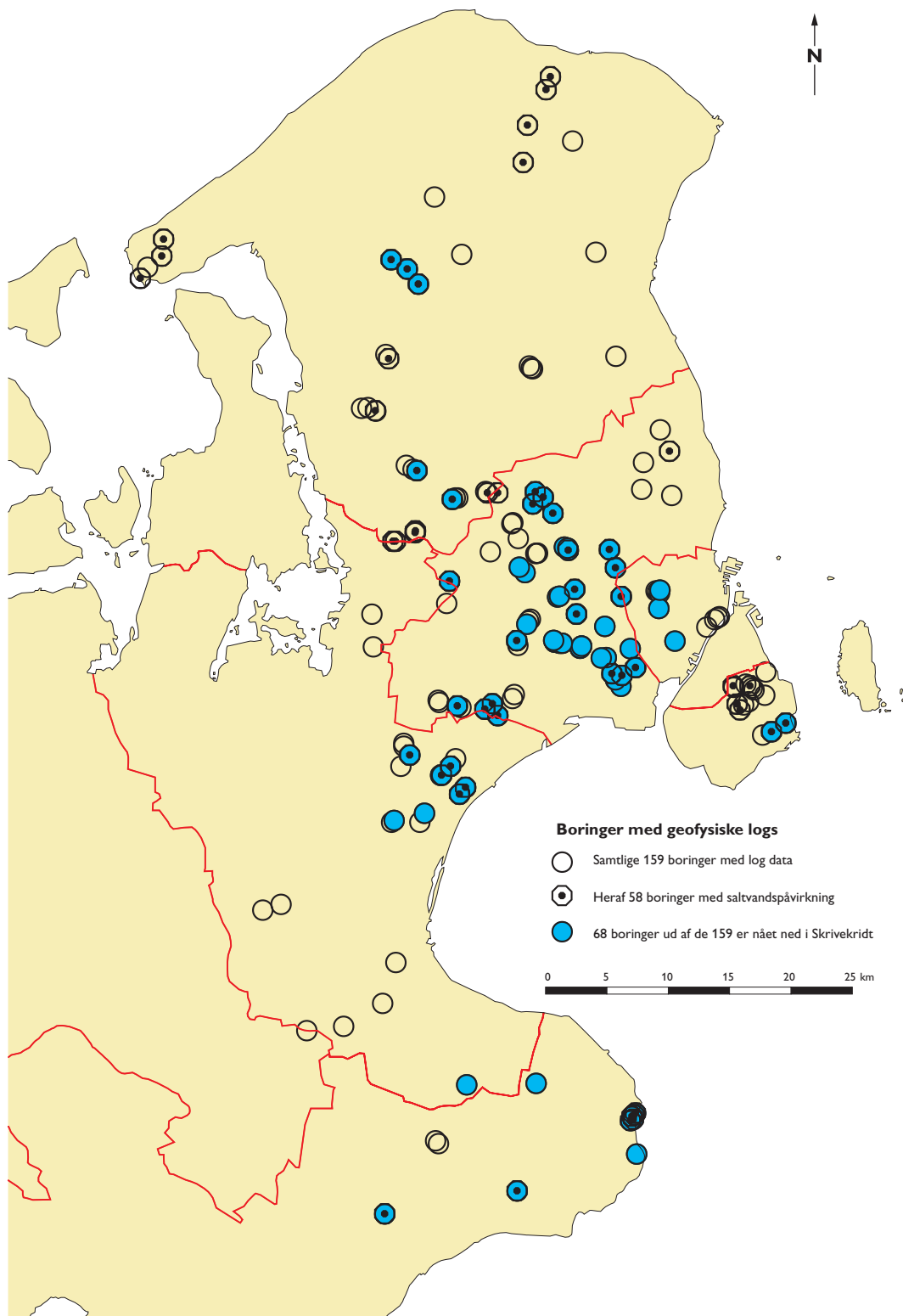
I den øvre del af Skrivekridtet kan formationsfaktoren beregnes til at være omkring 4,0, mens den stiger til 4,5 – 5,0 i de dybere dele af det gennemborede kridt i Karlslunde boringen, Figur 7B. I lerholdige horisonter kan formationsfaktoren være så høj som 8 /13/. De geofysiske loggingundersøgelser af en lang række boringer i Danienkalken har vist at formationsfaktoren i denne bjergart er omkring 5 til 6 /9/.

Denne nye viden om størrelsen af formationsfaktoren i Danienkalken og Skrivekridtet giver mulighed for at foretage vurdering af porevandets elektriske ledningsevne, og dermed dets indhold af opløste ioner, direkte fra geofysiske målinger af formationens elektriske ledningsevne i boringerne /9/.

3.4 Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne

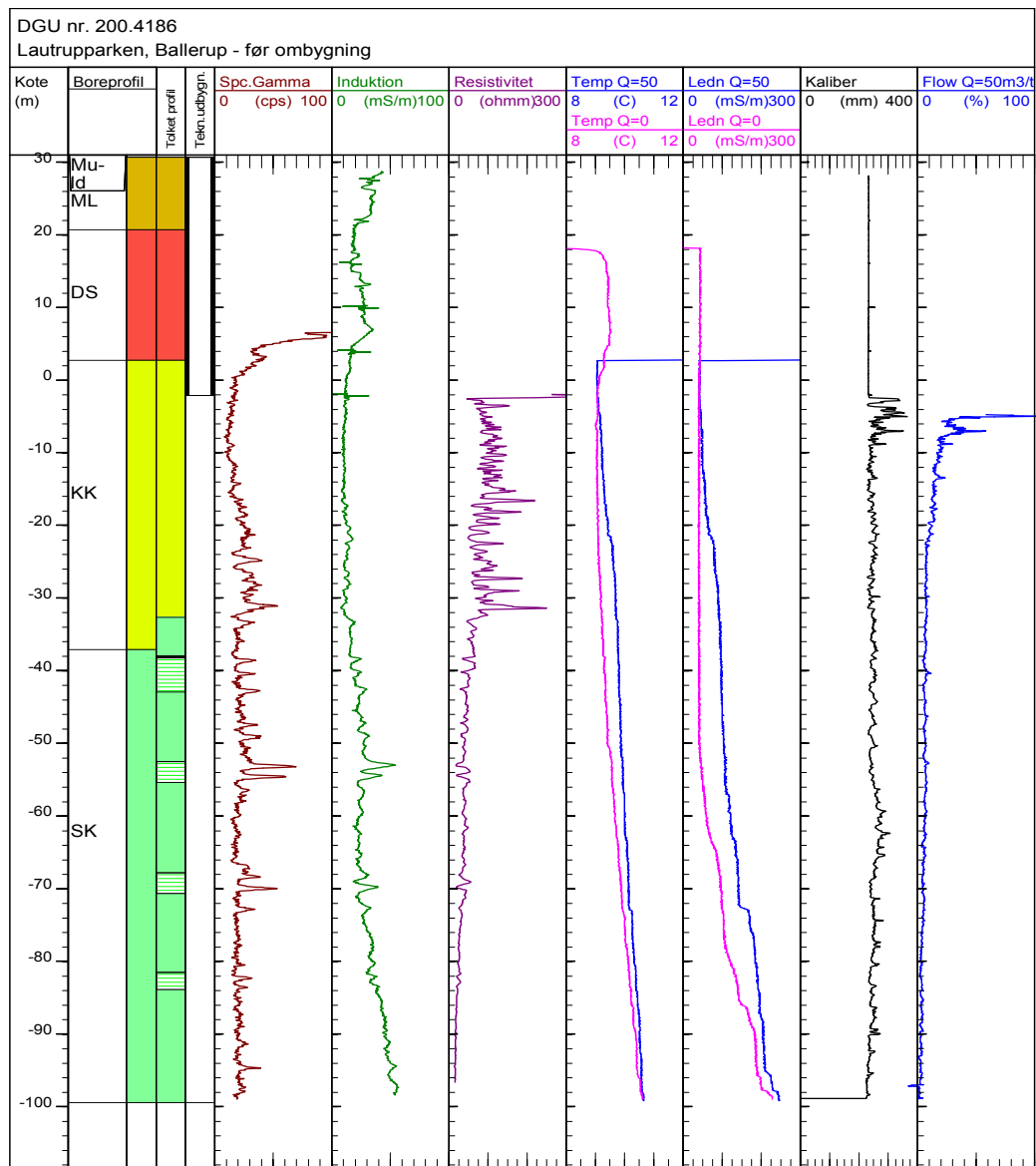
Beliggenheden af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland er bestemt fra tolkninger af resultaterne fra geofysiske borehulsundersøgelser i 159 boringer samt ved udførelse af 344 transiente elektromagnetiske sonderinger (TEM sonderinger).

I de 159 boringer, se Figur 8, med geofysiske logdata er grænsefladen mellem ferskvand og saltvand påvist i Skrivekridtet i 37 boringer. I Skrivekridtet kan grænsen sættes ved en formationsledningsevne på 25 mS/m, hvilket svarer til en ledningsevne i porevandet på 100 mS/m (formationsfaktor F=4). Dette svarer til en koncentration af klorid på omkring 300 mg/l. I Danienkalken, som er mere cementeret, er formationsfaktoren 5 til 6. Ved anvendelse af en formationsfaktor på 5 i kalken svarer ovennævnte saltvandsgrænse på 100 mS/m i porevandet til en formationsledningsevne på 20 mS/m. Dette betyder, at koncentrationen af klorid i porevandet i Danienkalken vil være mindre end 300 mg/l, når formationsledningsevnen er mindre end 20 mS/m.



Figur 8 Boringer (159) med geofysiske logs, som er inkluderet i projektet. Bemærk: 37 af 68 boringer med Skrivekridt viser saltvand, dvs. en formationsledningsevne over 25 mS/m (klorid>300 mg/l) – I 21 af de resterende 91 boringer er der saltvandspåvirkning i Danienkalken, dog i de fleste uden at der er påvist formationsledningsevne over 20 mS/m, men derimod kun forhøjet ledningsevne i vandet i boringen. Alle 21 boringer med saltvandspåvirkning i Danienkalken er således atypiske ved at være påvirket enten af indstrømmende (kystnære) eller opstrømmende (forkastninger) eller ungt residualt saltvand (Litorinahavet).

Et eksempel på saltvandsgrænsens udvikling i Skrivekridtet kan illustreres med resultaterne fra en 130 m dyb undersøgelsesboring ved Ballerup, vest for København, Figur 9. Boringen har gennemboret ca. 40 m Danienkalk og er ført ca. 60 m ned i Skrivekridtet. Saltvandsgrænsen blev ved hjælp af såvel induktions- som resistivitets-log observeret ved et mergellag i ca. 100 m dybde (kote -70 m), idet formationsledningsevnen herunder var højere end 25 mS/m og endvidere var jævnt stigende mod større dybde netop afspejlende overgangszonen mellem det ferske og det saltholdige grundvand. Gradienten i formationsledningsevnen i overgangszonen i boringen ved Ballerup er ca. 1 mS/m per meter svarende til en gradient i koncentrationen af klorid i porevandet på ca. 12 mg/l per meter.



Figur 9 Eksempel på resultater fra en geofysisk borehulslogging undersøgelse (boring DGU Nr. 200.4186 ved Ballerup). På baggrund af målte elektriske ledningsevner og resistivitet i formationerne kan grænsen mellem Danienkalken og Skrivekridtet sættes til kote -32 m. I Danienkalken er formationsledningsevnen mindre end 20 mS/m og i Skrivekridtet er den mindre end 25 mS/m ned til kote -70 m. Den naturlige gammastråling viser, at der i kridtet optræder flere mergellag, og netop også ved kote -70 m. Fra denne dybde ses saltvandspåvirkningen som en jævnt stigende formationsledningsevne med en gradient på ca. 1 mS/m/m, hvilket svarer til en gradient i koncentrationen af klorid i porevandet på ca. 12 mg/l per meter.

Som nævnt ovenfor fremgår det af undersøgelsen i boringen ved Ballerup, at overgangszonen mellem det ferske og det salte grundvand optræder som en med dybden gradvist stigende koncentration af klorid i porevandet afspejlet ved en gradient i formationens elektriske ledningsevne. Da modelberegninger af TEM resultaterne har vist, at størrelsen af en sådan gradient i overgangszonen er af afgørende betydning for bestemmelsen af saltvandsgrænsen ved hjælp af TEM-sonderinger /10/, er der i delprojekt 2 lagt vægt på at dokumentere størrelsen af observerede gradienter i overgangszonen i så mange af de undersøgte boringer som muligt /9/.

Der er således bestemt en gradient i formationsledningsevnen i 27 af de 58 boringer, hvor saltvandspåvirkningen har kunnet påvises ved de geofysiske borehulsundersøgelser. I alle disse 27 boringer optræder gradienten i Skrivekridtet, Tabel 3-1, og størrelsen af gradienten varierer mellem 0,5 og 9,0 mS/m/m. I de resterende 10 boringer med observeret saltvandsgrænse i Skrivekridtet har der ikke været tilstrækkelig med antal meter log-sektion under grænsen til, at en gradient i formationens ledningsevne har kunnet fastlægges.

Tabel 3-1 Gradient i formationsledningsevnen under saltvandsgrænsen i Skrivekridtet i 27 boringer.

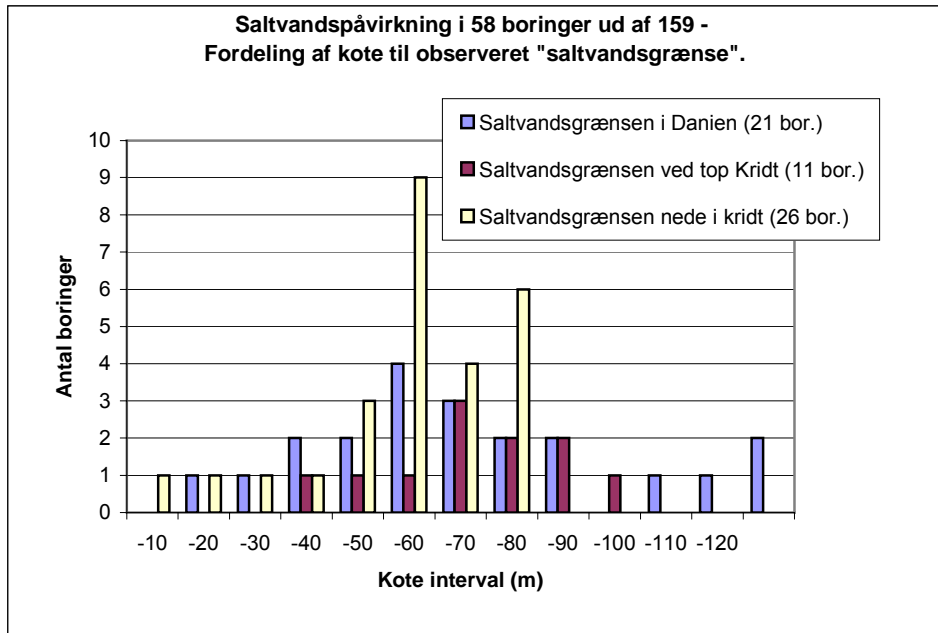
Gradient (mS/m/m): Zone:	0>-<1	1-<2	2-<3	3-<4	4-<5	5-<6	6-<7	7-<8	8-<9	Grad. i alt
0										
1										
2			1	1	2					4
3									2	2
4	2	1	1		1	2				7
5							1		1	2
6		5	3	1			2	1		12
Antal boringer	2	6	5	2	3	2	3	1	3	27

I 11 boringer ud af de i alt 37 boringer med dokumenteret saltvandsgrænse i Skrivekridt er saltvandsgrænsen sammenfaldende med overgangen mellem Danienkalk og Skrivekridt. I de resterende 26 boringer er saltvandsgrænsen påvist et stykke nede i Skrivekridtet, og da altid ved et mergellag i kridtet.

Saltvandspåvirkning i Danienkalken er blevet påvist i 21 boringer, men i alle disse tilfælde synes saltvandspåvirkningen at være atypisk, dvs. enten indstrømmende (kystnære) eller opstrømmende (forkastninger) eller ungt residualt saltvand (Litorinahavet). Således kan saltvandspåvirkningen i Danienkalken i 16 boringer henføres til opstrømmende saltholdigt vand fra bunden af boringerne, hvilket ses ved at vandets ledningsevne nederst i boringen er højere end 100 mS/m, uden at formationsledningsevnen er tilsvarende forhøjet, og uden at der ses en gradient. I to andre boringer ses saltvandspåvirkningen som en indstrømning fra en enkelt sprækkezone, uden at boringen i øvrigt synes påvirket af saltvand. Kun i tre boringer, der alle ligger kystnært på Amager, er der tale om en veldefineret grænseflade mellem en øvre fersk og en nedre saltholdig zone.

Fordelingen i koter for saltvandsgrænsen mellem de tre nævnte kategorier fremgår af Figur 10. Det ses, at saltvandsgrænsen i 38 af de 58 boringer er observeret imellem kote -50 m og -90 m. Af de 37 observationer af saltvandsgrænser i top Skrivekridt eller i selve Skrive-

kridt er der ni observationer, hvor koten til grænsen for påvirkning er over kote -50 m. I de fleste tilfælde skyldes det en kystnær placering.



Figur 10 Fordeling af kote til saltvandspåvirkning i 58 boringer.

I det følgende er givet en mere detaljeret gennemgang af saltvandsgrænsen i projektområdets syv zoner på baggrund af tolkningerne af logging data fra de 159 boringer (zoneinddeling, se Figur 1).

Zone 0: Der foreligger ingen log data fra boringer i denne zone.

Zone 1: I alt syv boringer er undersøgt i denne zone. Således fem dybe boringer (126-167 mut) etableret i 70'erne under NORDVAND projektet omkring Esum sø /5/, samt én dyb boring ved Langstrup mose (121 mut). Ingen af disse boringer har imidlertid gennemboret Danienkalken.

I fire af NORDVAND boringerne optræder der saltvand i bunden af boringerne, men de gennemborede dele af Danienkalken indeholder i alle boringerne ferskvand. Det vurderes, at top Skrivekridt forekommer mellem 25 og 50 m under disse bornings bund, så den nedre del af Danienkalken må være saltvandspåvirket.

Det er bemærkelsesværdigt, at den femte NORDVAND boring ved Højbjerg-Kagerup, på sydflanken af Alnarpdalen (126 mut), og boringen ved Langstrup ikke er påvirket af saltvand, selvom de er ført ned til henholdsvis kote -113 m og kote -111 m. Langstrup boringen har dog i bunden indikation på, at klorid er forhøjet til omkring 200 mg/l.

Zone 2: I denne zone er der geofysiske borehulslogs fra 20 boringer. Kun fire af disse boringer er ført ned i Skrivekridtet, nemlig tre boringer ved Æbelholt kildeplads og én boring på Egholm kildeplads. I disse fire boringer træffes Skrivekridtet henholdsvis i kote -79 m og

-90 m. I alle fire boringer forekommer saltvandsgrænsen fra top Skrivekridt. Formationsledningsevnen stiger herfra med en gradient på mellem 2 og 5 mS/m/m, hvilket medfører en formationsresistivitet på under 20 ohmm (10, 4, 10 og 12 ohmm) ved bunden af boringerne.

Af de øvrige boringer i denne zone er der observeret saltvandspåvirkning nederst i Danienskalken lige over Skrivekridtet ved Hundested (to boringer), på Hørup kildeplads (én boring) samt på Strø kildeplads (én boring). I alle andre boringer i zone 2 er saltvandet helt udvasket fra Danienskalken med undtagelse af en enkelt ved Hundested, som viser påvirkning fra indtrængende havvand.

Zone 3: I denne zone foreligger der geofysiske borehulslogs fra 18 boringer beliggende på kildepladserne Værebrosø, Måløv, Bjellekær, Bogøgaard, Søndersø, Brede, Nærum og Hjortekær-Dybendal. I fire af disse boringer er der i koter mellem -60 m og -73 m boret ned i Skrivekridtet, og i disse er der påvist saltvandspåvirkning fra top Skrivekridt. Syv andre boringer er saltvandspåvirkede, nemlig fire boringer i Værebrosø, én boring ved Dybendal vandværk ved Hjortekær, samt to af de tre boringer ved Bogøgaard kildeplads, men alle syv er påvirkede som følge af opstrømmende saltholdigt vand fra boringerne bund.

I to boringer har det været muligt at bestemme gradienten i overgangszonen. Gradienten er her mellem 8 og 9 mS/m/m.

Zone 4: Fra denne del af projektområdet findes geofysiske borehulslogs fra 57 boringer, hvoraf de 36 er ført gennem Danienskalken og ned i Skrivekridtet. Skrivekridtet er i 30 af disse boringer truffet mellem kote -20 m og -40 m. Saltvandsgrænsen er observeret i 12 af de 57 boringer, og i to boringer findes grænsen ved top Skrivekridt, og i 10 boringer et stykke nede i Skrivekridtet.

Det er værd at hæfte sig ved tre boringer i dette område, hvor Skrivekridtet er fundet at ligge dybt. Således ved Ermelunden, hvor Danienskalken ikke er gennemboret ved boringerne bund i kote -93 m, ved Bellahøj, hvor Skrivekridtet er truffet i kote -86 m, og ved Hove vest for København, hvor kridtet findes i kote -75 m. De to førstnævnte boringer ligger øst for Carlsbergforkastningen, og i ingen af disse ses der saltvandspåvirkning. Ved Hove i den vestlige del af zone 4 optræder saltvandspåvirkningen fra top Skrivekridt.

Det har været muligt at bestemme gradienten i overgangszonen i syv boringer i denne zone. Gradienten er forskellig, idet den er fra under 1 til 6 mS/m/m.

Zone 5: Fra Amager foreligger der geofysiske borehulslogs fra 15 boringer, som alle er beliggende øst for Carlsbergforkastningen, og hvor den øverste del af Danienskalken er København Kalk overlejrende Bryozokalk. Kun to af boringerne er boret gennem Danienskalken og ned i Skrivekridtet, hvorved Skrivekridt er truffet i henholdsvis kote -66 m og -64 m.

På trods af store oppumpninger på Amager (Tårnby og Dragør vandforsyninger), med sænkning af vandspejlet til under kote 0 m er der ikke observeret en øget saltvandspåvirkning nederst i to dybe monitoringsboringer. Derimod ses der begyndende påvirkning i de vestligste indvindingsboringer af indtrængende saltholdigt grundvand fra det inddæmmede Vestamager.

I fem af de undersøgte 15 boringer er der observeret saltvandspåvirkning. To af disse boringer er beliggende ved tidligere kystlinier i henholdsvis den østlige og vestlige del af Amager. I disse boringer er saltvandet observeret i kontakten mellem København Kalk og Bryozokalk. I én boring er der påvist saltvand i Bryozokalken nogle meter over Skrivekridtet, i en anden ligger den i Skrivekridtet, og endelig i den sidste er der tale om indstrømmende saltholdigt havvand fra en sprække i kote -30 m ovenover ferskt grundvand. Det har været muligt at bestemme gradienten i overgangszonen i to boringer på Amager. I den ene boring var gradienten mellem 6 og 7 mS/m/m, og i den anden mellem 8 og 9 mS/m/m.

Zone 6: I analysen af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i zone 6 er der medtaget log data fra 40 boringer, hvoraf 19 boringer ikke har gennemboret Danienkalken, medens denne er gennemboret i 13 boringer. I de resterende otte boringer er Skrivekridtet truffet lige under glaciale og postglaciale sedimenter eller ved terræn og uden at møde Danienkalk.

Ud af disse 40 boringer er der påvist saltvandspåvirkning i 17 af boringerne, men heraf er de fem fra Sigerslev Kridtbrud beliggende syd for projektområdet. Disse er dog medtaget som eksempler på, at selv med en meget kystnær beliggenhed og efter flere års grundvandssænkning, træffes saltvandspåvirkningen i fire af disse boringer først i ret stor dybde, dvs. under kote -45 m. I den femte boring optræder saltvandspåvirkningen allerede i kote -7 m, sandsynligvis pga. hydraulisk forbindelse via en sprække til havet. Hertil kommer en dyb boring i selve Faxe Kalkbrud, som ligger langt fra kysten. Her er der påvist saltvand i Skrivekridtet allerede i kote -30 m, hvilket antagelig er en følge af den store grundvandssænkning, som har foregået igennem mange år.

Blandt de 11 resterende saltvandspåvirkede boringer i denne zone påkalder to dybe boringer ved Karlslunde (109 m) og Lyksager (100 m) sig særlig opmærksomhed. Begge er saltvandspåvirkede, men kun svagt og først i stor dybde, kote -56 m og -74 m. Da Skrivekridtet her træffes allerede i kote -16 m, er der således tale om udvaskning til stor dybde i Skrivekridtet. Det samme er observeret i dybe boringer ved Ishøj-Thorslunde og ved Lyderslev, samt i den nye 269 m dybe projektboring ved Karlslunde, hvor udvaskningen i alle ligeledes er nået til kote -70 m. Derimod er udvaskningen i den nye 110 m dybe projektboring ved Tune kun fuldstændig ned til kote -44 m, hvor top Skrivekridt blev truffet.

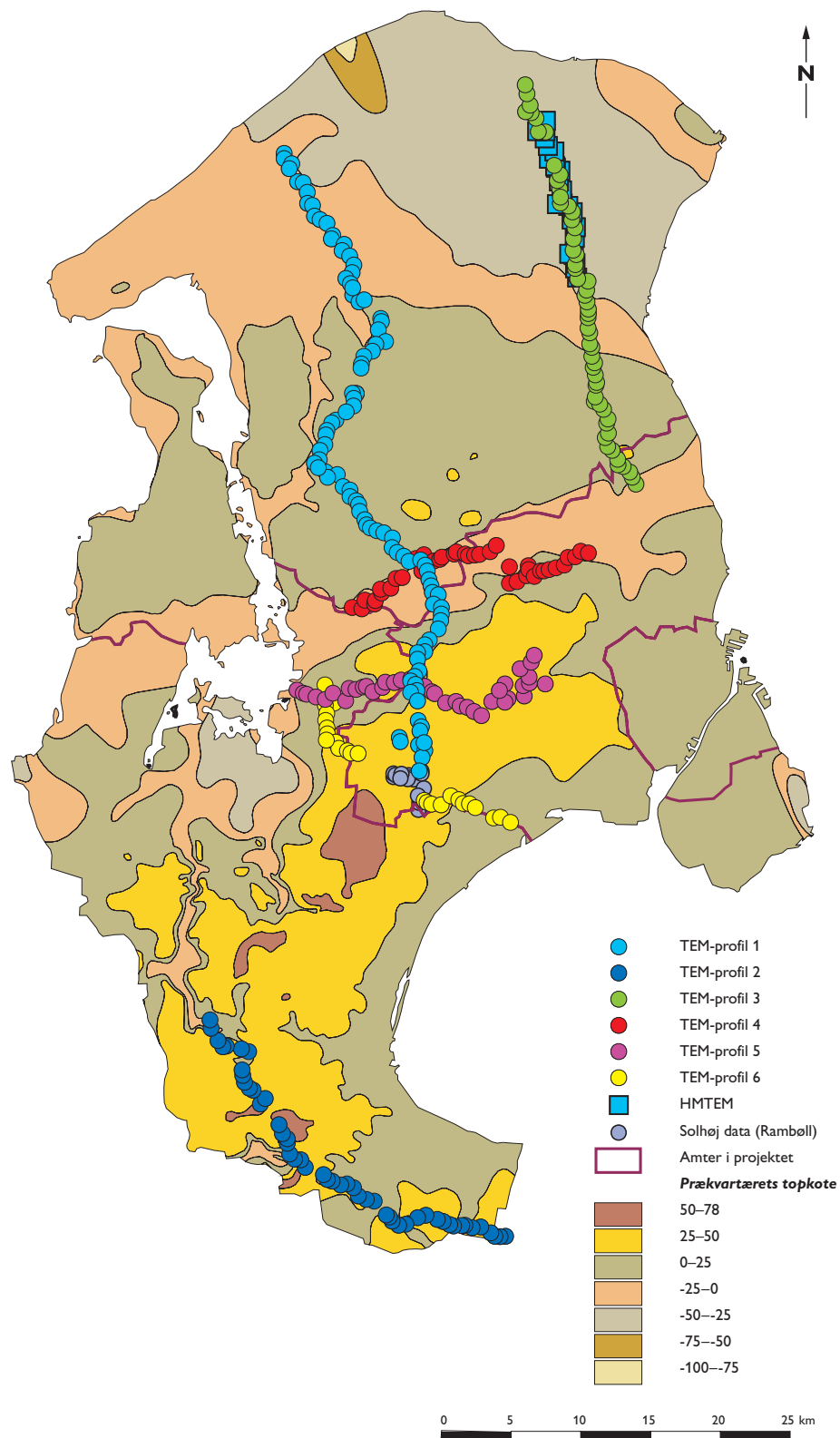
I to boringer ved Ishøj optræder der en saltvandspåvirkning allerede i kote -27 m og -30 m, medens saltvandspåvirkningen først optræder i kote -50 m i en tredje boring samme sted. Gennem dette område løber en af de fem forkastninger, der er blevet identificeret ved seismiske undersøgelser. Forekomsten af forkastninger i dette område kan være årsagen til de nævnte forskelle i dybden til saltvandspåvirkningen.

Det var muligt at bestemme gradienten i overgangszonen i 12 boringer fra zone 6. Gradienten varierer her fra mindre end 1 til 8 mS/m/m.

3.5 Saltvandsgrænsen bestemt med TEM-sonderinger

Placeringen af de 344 udførte TEM sonderinger i undersøgelsesområdet fremgår af Figur 11. I de fleste af disse sonderinger optræder der en god leder med en resistivitet mindre

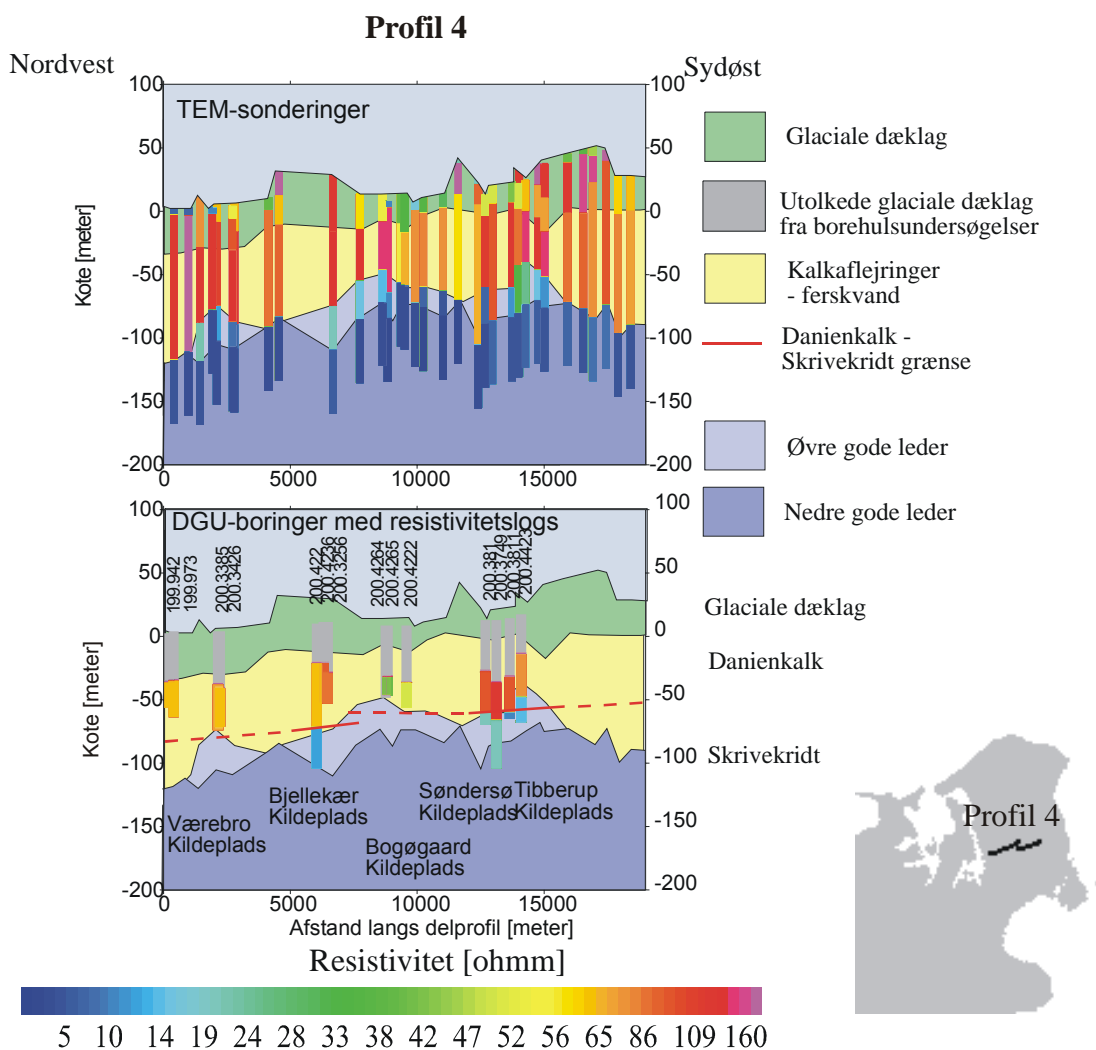
end 15 ohmm, og i mange delområder optræder der tillige en overliggende god leder med en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm. Disse "lavmodstandslag" kaldes henholdsvis den nedre og den øvre gode leder /10/.



Figur 11 Placeringen af projektets TEM-sonderinger langs seks profilinier.

I de tilfælde, hvor der i tolkningerne kun optræder en nedre god leder, afspejler denne beliggenheden af saltvandsgrænsen. I de tilfælde, hvor der også er en øvre god leder, er det sidstnævnte, som afspejler saltvandsgrænsen. Det er påvist i projektet /10/, at gradienten i formationens elektriske ledningsevne (dvs. stigningsgradienten i kloridkoncentrationen) 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/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/m, vil der ovenover den nedre gode leder tillige optræde en leder med en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm.

Som et eksempel på resultater fra TEM sonderingerne er resultater fra Profil 4 vist på Figur 12. Profil 4 er lokaliseret på langs i Søndersødalene (zone 3).



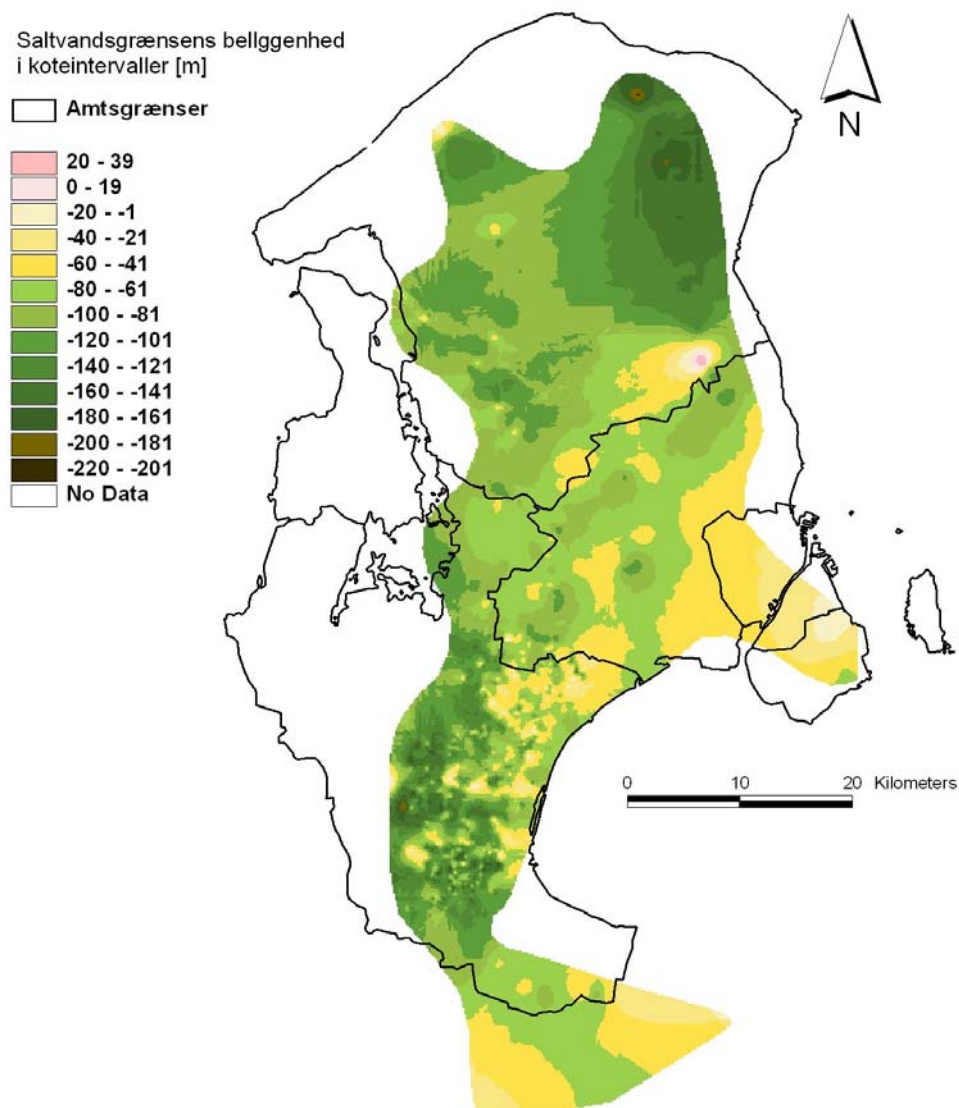
Figur 12 Resultater af TEM sonderinger fra profil 4 gennem Søndersødalene.

De centralt placerede sonderinger på profil 4 viser både en øvre og en nedre god leder, og den øvre gode leder ses her stort set at afspejle grænsen mellem Danienkalken og Skrivekridtet. De dybeste boringer har bekræftet, at saltvandsgrænsen netop her optræder ved

top Skrivekridt. Ifølge sonderingerne i begge ender af profilet optræder der her kun den nedre gode leder, og denne ses at ligge væsentligt dybere end den forventede beliggenhed af grænsen mellem Danienkalken og Skrivekridtet. TEM-sonderingerne indikerer således her et spring i beliggenheden af saltvandsgrænsen til større dybde. Dette har ikke kunnet verificeres, da der ikke er dybe borer i dette område.

3.6 Højdekort over saltvandsgrænsen

Baseret på tolkninger af resultaterne fra de 58 borer og af TEM sonderingerne er der fremstillet et kort (Figur 13), som angiver koten for saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland. Saltvandsgrænsen er defineret ved en formationsresistivitet i Skrivekridtet på 40 ohmm eller mindre. Denne definition af saltvandsgrænsen svarer til en koncentration af klorid på omkring 300 mg/l.



Figur 13 Højdekort over saltvandsgrænsen, fremstillet på basis af log-tolkningsdata fra delrapport 2 og tolkningsdata fra TEM-sonderinger fra delrapport 3.

Kortet skal kun opfattes som et overordnet billede af denne grænses beliggenhed, idet det er sammensat af to typer informationer med væsentlig forskel i usikkerhed. Således er informationerne om grænsen fra boringer med geofysiske logs ret nøjagtige på netop dette sted, hvor den enkelte boring er placeret. Grænsens beliggenhed bestemt ved en TEM-sondering er derimod midlet over et større volumen i bjergarten. Hertil kommer, at usikkerheden på bestemmelsen af dybden til saltvandsgrænsen fra TEM-sonderinger, jævnfør det teoretiske modelstudie, er henholdsvis op til 10 m, hvor der kun optræder en nedre god leder (formationsgradient >5 mS/m) og 10-35 m, hvor der både forekommer en øvre og en nedre god leder (formationsgradienten <5 mS/m) /10/.

Ved fremstillingen af saltvandskortet (Figur 13) er det foretrukket kun at angive koten til saltvand i kalkmagasinerne i de områder, hvor der foreligger data. Der forekommer således store områder langs kysten, hvor der ikke er foretaget bestemmelse af grænsefladens beliggenhed ved interpolation.

I Frederiksborg Amt (zone 1 og 2) følger saltvandsgrænsen stort set Skrivekridtets overflade, det vil sige, at saltvandet ligger mellem kote -60 m og -140 m i størstedelen af amtet. Bortset herfra er delområdet i den sydøstlige del af dette amt, hvor der ifølge kortet forekommer saltvand over kote -60 m. I kontureringen er dette område fremkommet ved inddragelse af data fra kun to TEM-sonderinger, som er tolket med et godt ledende lag beliggende så højt som omkring kote 0 m. Det er næppe saltvand, der optræder i denne dybde, og der kan være flere årsager til denne anomali, som dog ikke er undersøgt nærmere.

Der forekommer et andet område i den sydlige del af Frederiksborg Amt, ved amtsgrænsen mod sydvest, hvor der i TEM-sonderinger er truffet et godt ledende lag med saltvand over kote -60 m. Disse resultater stemmer også overens med observationer fra en boring ved Bogøgaard kildeplads.

I den vestlige del af Københavns Amt (zonerne 3, 4 og 5) ligger Skrivekridt overfladen mellem kote -60 m og -20 m (Figur 3), mens saltvandsgrænsen de fleste steder i området ligger under kote -60 m. Det vil sige, at saltvandsgrænsen her ligger et stykke ned i Skrivekridtet.

I den østlige del af Københavns Amt, i selve København, ligger Skrivekridt overfladen under kote -60 m, mens dybden til saltvand her er mellem -60 og -40 m. Dette kunne antyde forekomst af saltvand i den nedre del af Danienkalken. Usikkerheden er dog stor på bestemmelsen af dybden til saltvandet i dette byområde, hvor der ikke kunne udføres TEM-sonderinger, og hvor der kun foreligger få boringer med logs.

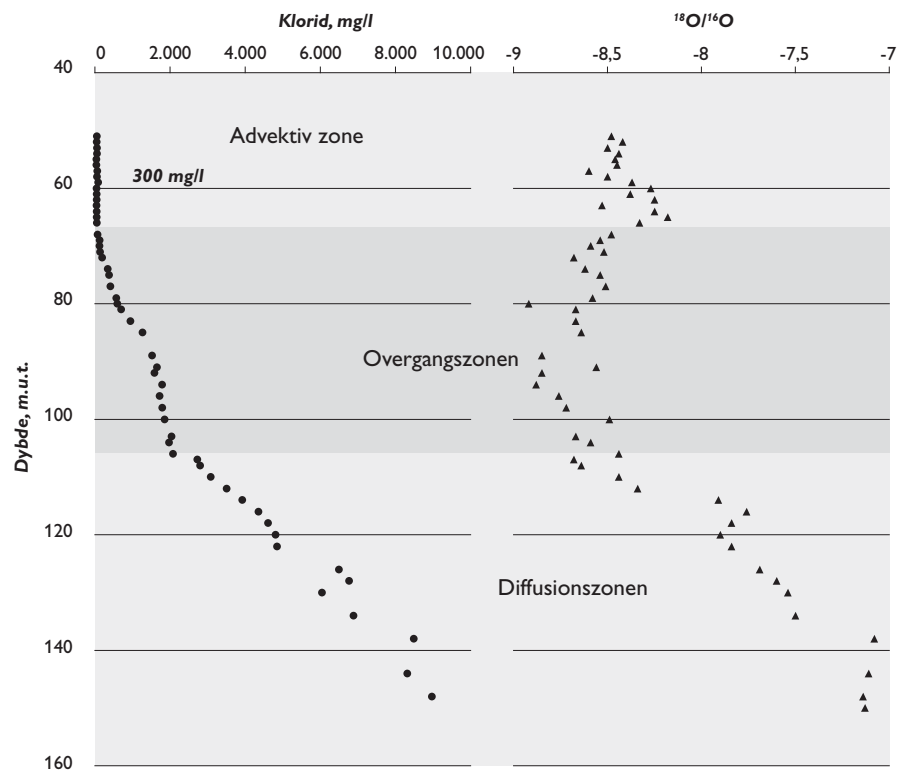
I den centrale del af Roskilde Amt, som er med i undersøgelsesområdet (zone 3 vest, zone 4 vest og zone 6), ligger saltvandsgrænsen dybt, det vil sige under kote -80 m. Saltvandsgrænsen følger her sandsynligvis overgangen mellem kalken og kridtet. I projektboringen ved Tune forekommer saltvandet og Skrivekridtet således i kote -44 m, mens saltvandsgrænsen nærmere kysten ligger et stykke nede i Skrivekridtet, i kote -70 m i projektboringen ved Karlslunde, der ligger ca. 2 km fra kysten.

I den centrale og vestlige del af amtet er borerne ikke nået ned i Skrivekridtet, idet dette og Danienkalken dykker mod vest og overlejres af Grønsandskalk og Kerteminde Mergel. Saltvandskortets angivelser er her derfor baseret alene på resultater fra TEM-sonderinger langs et profil fra kysten og imod Roskilde /10/.

4. Udvikling af saltvandsgrænsen i Skrivekridt

Resultaterne af de geofysiske logging undersøgelser af boringer og de elektromagnetiske sonderinger (TEM), giver som nævnt i foranstående kapitel et overordnet billede af beliggenheden af grænsefladen mellem ferskvand og saltvand i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland. Resultaterne giver imidlertid ikke svar på, hvorfor saltvandsgrænsen forekommer hvor den gør, eller om den er stabil - og hvis ikke, hvordan den så vil udvikle sig over kortere eller længere tid? For at give svar på nogle af disse spørgsmål, blev der i projektet gennemført detaljerede undersøgelser i et værkstedsområde ved Karlslunde, sydøst for Roskilde, omfattende blandt andet etablering af en 269 m dyb kerneboring /13/.

Under udførelsen af denne dybe projektboring ved Karlslunde mose, blev der på dette bopædssted observeret vandførende sprækker i Skrivekridtet ned til omkring 104 m. Der blev imidlertid påvist forhøjede koncentrationer af saltvand i matrix fra omkring 70 m, Figur 14. Med det formål at undersøge sammenhængen mellem cirkulationen af ferskvand i kridtet og udvaskning af saltvand fra matrix, blev porevandet fra prøver af kridt i boringen undersøgt med hensyn til sammensætning af stabile iltisotoper, Figur 14.



Figur 14 Porevandets indhold af klorid og stabile iltisotoper i Skrivekridtet fra Karlslunde boringen. På basis heraf er der foretaget den viste zoneinddeling (for nærmere forklaring se efterfølgende tekst).

Da meteorisk vands sammensætning af stabile iltisotoper (¹⁸O og ¹⁶O) er påvirket af fordamningsprocessen i atmosfæren, kan oplysninger om grundvandets sammensætning af stabile iltisotoper give oplysninger om forekomsten af meteorisk vand i Skrivekridtet. Re-

cent regnvand i Vesteuropa har en δ^{18} værdi på omkring -8,5 ‰ /22/, og det fremgår af Figur 14, at δ^{18} værdier i prøver af porevandet er mellem -9 og -8 ‰ ned til omkring 104 mut. Disse resultater viser altså, i overensstemmelse med brøndborerens observationer, at der på borestedet kan forekomme cirkulation af meteorisk vand ned til omkring 104 mut.

På baggrund af porevandets indhold af klorid, og andre ioner som ikke er vist i rapporten, samt indholdet af stabile iltisotoper, kan Skrivekridtet i Karlslunde boringen overordnet inddeles i tre hydrogeologiske zoner.

- Den øvre zone (den advektive) forekommer fra toppen af Skrivekridtet 25 mut og ned til omkring 70 mut. I denne zone er saltvandet fuldstændigt udvasket fra bjergartens matrix.
- En overgangszone fra 70 til 104 mut., hvor der forekommer forhøjede koncentrationer af klorid i kridtets matrix. Koncentrationen af klorid stiger fra omkring 50 mg/l til 2.000 mg/l med stigende dybde i zonen. Porevandets indhold af iltisotoper er mellem -9 og -8 ‰ (δ^{18} værdier).
- En nedre zone (diffusionszonen) hvor der forekommer en stigende koncentration af klorid (fra 2.000 mg/l) og stigende δ^{18} værdier fra -9 til -6 i bunden af boringen i dybden 269 mut /13/.

Med hensyn til en tolkning af de hydrogeologiske processer, som har betinget udviklingen af de tre zoner i Skrivekridtet, må der dels tages hensyn til grundvandets strømning i sprækker og matrix og dels til det forhold, at der forekommer densitetsforskelle mellem fersk- og saltvand. Barker /23/ foreslår, at der i opsprækkede bjergarter skelnes mellem dobbeltporøse og dobbeltpermeable bjergarter. En dobbeltporøs bjergart er karakteriseret ved en advektiv strømning i sprækker og en stofudveksling ved diffusion mellem sprækkerne og de mellemliggende lavpermeable matrixblokke. I en dobbelt-permeabel bjergart foregår der tillige en advektiv strømning i matrix, som er betydelig sammenlignet med den advektive strømning i sprækkerne.

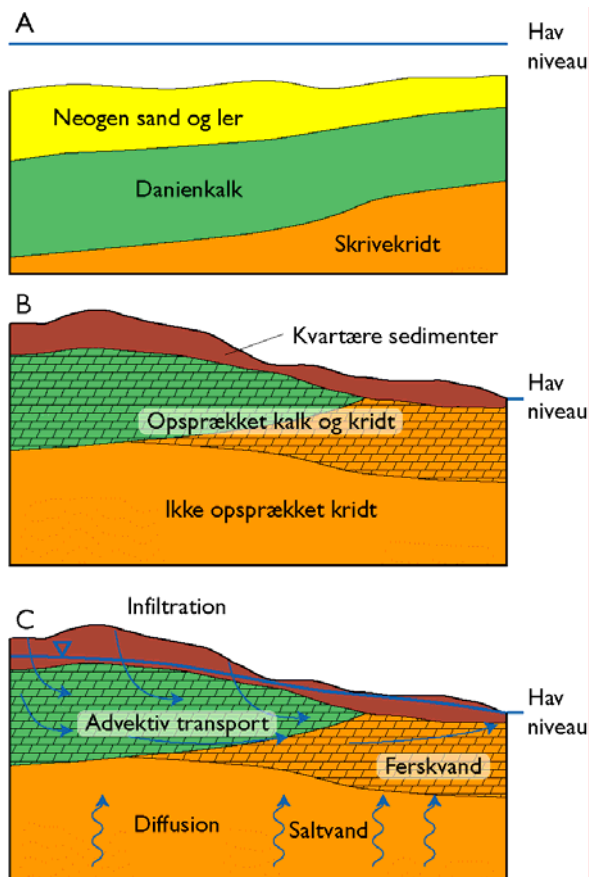
Som følge af en advektiv strømning i den øvre zone af Skrivekridtet er der her sket en fuldstændig udvaskning af det marine porevand fra matrixblokkene. Dette kan være foregået som følge af en dobbeltporøs stoftransport, men det kan ikke udelukkes, at der også er foregået en dobbelt-permeabel transport af de opløste salte.

I den nedre zone forekommer der ikke en advektiv strømning, og den dominerende proces er her en opadrettet diffusion af klorid og andre ioner fra det oprindelige, marine porevand. Det observerede profil i de stabile iltisotoper må forklares med en nedadrettet diffusion af ^{16}O og en opadrettet diffusion af ^{18}O (^{16}O er beriget i det meteoriske vand som følge af fordamningsprocessen).

Tolkningen i overgangszonen er mere usikker. Det forhold, at det oprindelige marine porevand endnu ikke er fuldstændigt udvasket, samtidig med forekomsten af porevand med en sammensætning af iltisotoper som i recent, meteorisk vand, kunne forklares ved en hurtigere diffusion af klorid i forhold til vandmolekylerne. Det kan imidlertid ikke udelukkes, at den-

sitetsforskellen mellem fersk- og saltvand også har påvirket fordelingen af saltvandet i zonen.

Resultaterne af de geofysiske borehulsundersøgelser i hele projektområdet, og resultaterne fra værkstedsområdet ved Karlslunde kan sammenstilles i nedenstående konceptuelle, hydrogeologiske model, Figur 15.



Figur 15 Konceptuel hydrogeologisk model for udvaskning af saltvand fra Skrivekridt og Danienkalk i Karlslunde værkstedsområdet. Venstre side af det ca. 10 km lange tværsnit ligger i den nordvestlige ende af området, mens højre side ligger ved Køge Bugt mod sydøst.

A) I Paleogen og Neogen tid blev der i den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin aflejret omkring 500 m sedimente ovenpå Danienkalken, Figur 15A. Sedimenterne blev begravet med porevandsammensætning som i oceanisk havvand (kloridkoncentration på omkring 18.800 mg/l). Porøsiteten i kridtet blev under denne indsykning reduceret fra omkring 65 % til ca. 40 % [24], hvilket har medført en svagt opadrettet vandbevægelse i sedimenterne.

B) Som følge af et tektonisk opløft i Sen Neogen, blev de overlejrende bjergarter borteroderet, og Skrivekridtet og Danienkalken blev opløftet og eroderet til det nuværende niveau. Denne hævnings foregik indtil for omkring 2 - 3 millioner år siden. Efterfølgende blev kvartære sedimente aflejret på kalk- og kridtoverfladen, Figur 15B.

C) Den tektoniske kompression under hævningsprocessen skabte hovedsagelig subvertikale sprækker i både kridtet og kalken, medens aflastningen som følge af erosionen skabte

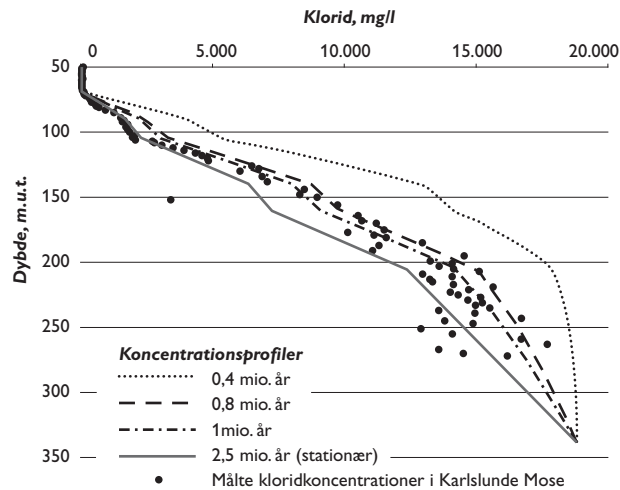
både subhorizontale og subvertikale sprækker i formationerne. De subhorizontale sprækker er siden istiden yderligere forøget og aktiveret som følge af aflastning af istykket. Efter opløftet er meteorisk vand infiltreret et stykke ned i formationerne, og dette har udvasket formationernes oprindelige marine porevand. Dette er hovedsagelig styret af advektiv transport i sprækker og en opadrettet diffusiv transport i den underliggende ikke opsprækkede del, Figur 15C.

Numeriske simuleringer af udvaskningen af saltvand fra Danienkalken og Skrivekridt i værkstedsområdet ved Karlslunde viser, at set i et geologisk tidsperspektiv, er udvaskningen af saltvandet fra Danienkalken foregået relativt hurtigt. Det marine porevand kan beregnes at være fuldstændigt udvasket i løbet af maksimalt nogle få tusinde år /13/. Disse resultater er i overensstemmelse med observationer vedrørende ferskvandsdannelsen i Danienkalken under inddæmmede arealer på Amager, hvor det er observeret, at ferskvand indenfor få årtier har udvasket saltvandet fra kalken på trods af kun få meter vandtryk /25/.

Udvaskning af saltvand i Skrivekridt vil også forløbe relativt hurtigt (omkring 100.000 år), hvis der regnes med en advektiv strømning, uden densitetseffekt i denne formation /13/. Da der stadig forekommer høje koncentrationer af saltvand i kridtet, er det en rimelig antagelse, at densitetsforskelle hindrer en advektiv strømning, og dermed opblanding, i dybder, hvor der ikke forekomme strømning i sprækker (Figur 14, diffusionszonen). Udvaskning af det marine porevand vil da alene ske ved en opadrettet diffusion af saltvand til det overliggende ferskvandssystem i Danienkalken eller til en øvre, opsprækket del af Skrivekridtet.

Numeriske beregninger af diffusion af klorid fra Skrivekridtet, baseret på observationer fra boringen ved Karlslunde i værkstedsområdet, er foretaget ud fra følgende initialbetingelser: 1) Diffusionen antages at foregå som en opadrettet, endimensional proces uden advektiv grundvandsstrømning i den ikke-opsprækkede del af Skrivekridtet. 2) Ved den nedre rand fastholdes en koncentration på 18.800 mg/l, og ved den øvre rand en koncentration, som konstant er 20 mg/l. 3) Den nedre rand er ud fra en ekstrapolation af det observerede koncentrationsprofil for klorid placeret i dybden 338 mut, og den øvre valgt til 50 mut. 4) Porøsiteten i kridt er i modellen sat til 35 %, 5) og der er benyttet en effektiv diffusionskoefficient i kridt på $0,45 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Sidstnævnte er bestemt ved laboratorieforsøg på i alt otte udtagne kerneprøver fra Karlslunde boringen /13/. Den effektive diffusionskoefficient i ler er benyttet som kalibreringsparameter i beregningerne, og hertil er der benyttet værdier mellem 0,15 og $0,33 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, dvs. minimalt $\frac{1}{3}$ af værdien for kridts effektive diffusionskoefficient.

Beregnete profiler af klorid til forskellige tider er sammen med målte koncentrationer af klorid i Karlslunde boringen vist i Figur 16. Det fremgår af resultaterne, at der opnås en stationær løsning efter 2,5 millioner år, men at de simulerede koncentrationer af klorid ved den stationære løsning generelt er lavere end de observerede koncentrationer. De simulerede koncentrationer af klorid i kridtet efter omkring 1 millioner år stemmer bedre overens med de observerede koncentrationer. Dette er især gældende fra omkring 104 mut. og til bunden ved 269 mut. Den dårligere overensstemmelse mellem observerede og simulerede koncentrationer ovenover 104 mut. må forklares med det forhold, at udvaskningen foregår hurtigere i denne zone, hvor der også forekommer en advektiv grundvandsstrømning. De simulerede koncentrationer efter 400.000 år er for høje i forhold til observerede koncentrationer.

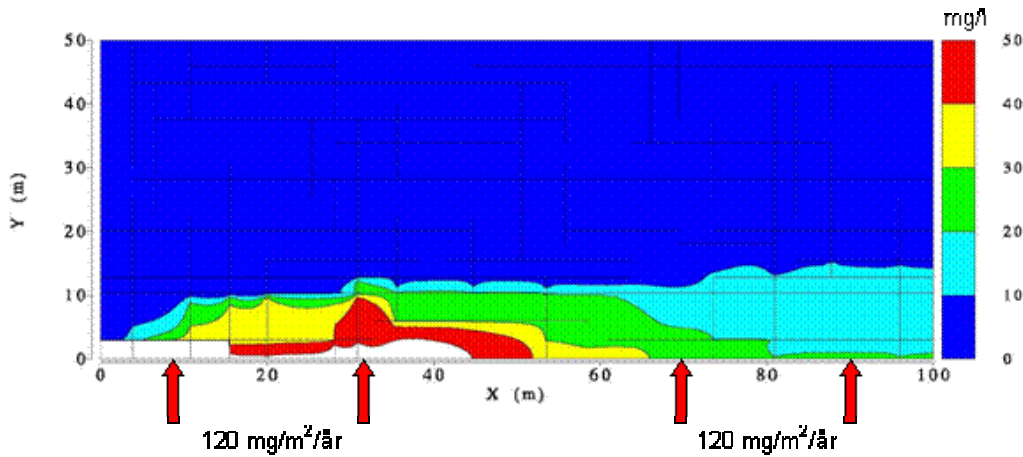


Figur 16 Beregnede forløb af udvaskning af saltvand (klorid) fra Skrivekridtet ved en opadrettet diffusion og uden advektiv strømning. Se tekst for yderligere forklaring

Konklusionen vedrørende beregninger af den tid, det har taget at etablere de observerede profiler af klorid i Skrivekridtet, synes således at være, at dette har taget mellem 1 og 2 millioner år. Gradienterne er endnu ikke stationære, men de kan betragtes som værende i en semi-stationær tilstand. Det tidsperspektiv, som disse beregninger peger på vedrørende igangsætning af diffusionsprocesserne, svarer godt overens med de seneste publicerede teorier vedrørende hævnings langs Den Fennoskandiske Randzone, som skulle være afsluttet for 2 – 3 millioner år siden /16/. Ved denne hævning er de øvre dele af kalkmagasinerne blevet opsprækket, og en relativt hurtig udvaskning af saltvandet har etableret store kemiske gradienter, og diffusionsprocessen er derved blevet igangsat.

Da der til stadighed forekommer en diffusiv transport nedefra af klorid op til ferskvandssystemet tilføres grundvandet konstant saltvand. Betydningen af denne transport kan beregnes med nogle simple antagelser om den advektive strømning i grundvandet og om transporten af saltvand ved diffusion nedefra. Et eksempel på sådanne numeriske simuleringer fremgår af efterfølgende Figur 17.

I beregningerne er anvendt en modelopsætning med en transmissivitet i den øvre, opsprækkede zone på $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, en hydraulisk gradient på 4 ‰ og en mægtighed af den opsprækkede zone på 50 m. Dette svarer til de hydrogeologiske forhold i Karlslunde området /13/. Som den nedre randbetingelse er fastsat en diffusiv flux på $120 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{år}$ gennem bunden af modellen, svarende til en kloridgradient på $12 \text{ mg}/\text{l}/\text{m}$ i overgangszonen nedeunder modellen (gradient på $1 \text{ mS}/\text{m}/\text{m}$ i formationsledningsevnen). En gradient af denne størrelse er observeret i den centrale del af oplandet ved Karlslunde. Som initialbetingelse i det infiltrerende vand fra oven er valgt en koncentration på $0 \text{ mg}/\text{l}$. Af modeltekniske grunde gennemføres simuleringerne kun for et længdesnit på 100 meter, men en opskalering af resultaterne kan foretages med nogle simple antagelser.



Figur 17 Beregnede stationære koncentrationer af klorid (mg/l) ved anvendelse af fluxrandbetingelse på $120 \text{ mg/m}^2/\text{år}$ i bunden af modelområdet. Linierne angiver en tilfældig fordeling af sprækker.

Resultaterne af simuleringerne viser, at i nederste venstre hjørne af modellængdesnittet (Figur 17) simuleres koncentrationer større end 50 mg/l , hvilket er udenfor det anvendte kontureringsinterval. Dette område fremstår derfor uden farve i figuren. På grund af afstanden til randbetingelsen i modellens venstre side, skal der lægges størst vægt på resultaterne i den nedstrøms ende af domænet, det vil sige for $x > 50 \text{ m}$. Det ses, at de beregnede koncentrationer af klorid i vandet er mellem 20 og 50 mg/l i de nederste 15 meter af magasinet. Den vertikale opblanding i det opsprækkede område er relativt ufølsom overfor anvendte dispersiviteter i modellen, hvorimod fordelingen af sprækkerne og deres indbyrdes forbindelse er den vigtigste faktor for opblandingen af klorid i magasinet. Koncentrationerne af klorid ses at variere på langs i strømningsretningen (retningen for den hydrauliske gradient) som følge af forskelle i vandgennemstrømning i området umiddelbart over bunden af domænet. Dette fænomen skyldes den benyttede sprækkefordeling i den opstillede model.

Simuleringerne af strømningen over 100 m viser, at selv ved den benyttede forholdsvis lille diffusive flux af klorid akkumuleres der i de nederste 15 meter af den opsprækkede zone i kalken koncentrationer af størrelsen $10 - 30 \text{ mg/l}$. I mange områder vil klorid gradienten være væsentlig større end de her anvendte 12 mg/l/m , idet gradienten i formationsledningsevnen ofte er større end 1 mS/m/m , se Tabel 3-1.

Den gennemsnitlige koncentration af klorid i grundvandet ved kysten ved Karlslunde efter at være strømmet fra Karlslunde oplandets vandskel og ud til Øresund (ca. 10.000 m) kan beregnes ud fra en massebalance for klorid. Benyttes en samlet vandtransport i den opsprækkede zone som i Karlslunde oplandet (dvs. samme transmissivitet og hydraulisk gradient, se ovenfor), og en diffusiv transport af salt nedfra til den advektive zone på $120 \text{ mg/m}^2/\text{år}$, så viser overslagsberegninger, at den gennemsnitlige koncentration i grundvandet ved kysten vil være 40 mg/l . Koncentrationerne af klorid vil under disse betingelser i gennemsnit være mindre i oplandet mod vandskellet. Modsat vil det være gældende, at den benyttede diffusive transport af saltvand nedfra kan være større, jævnfør at gradienter i formationsledningsevnen på op til 8 mS/m/m er observeret. Koncentrationer af klorid mellem 40 og 320 mg/l i den opsprækkede nedre del af kalkmagasinerne kan således forklares alene som følge af diffusion nedfra kombineret med transport til recipient (kystzone eller

hovedvandløb) eller kildeplads. Diffusion af klorid nedefra vil derfor medvirke til kloridbelastningen i det vand, der oppumpes fra kalkmagasinerne.

5. Sammenfatning og perspektivering

På baggrund af de gennemførte aktiviteter i de seks delprojekter er der fremkommet en række specifikke konklusioner, som kan læses i projektets delrapporter. I det følgende er hovedkonklusionerne fremhævet og efterfølgende perspektiveret specielt med hensyn til en vurdering af muligheden for at udnytte dybere og ikke forurenede dele af grundvandsmagasiner i Nordøstsjælland til grundvandsindvinding.

Projektets hovedkonklusioner er følgende:

- I størstedelen af den nordlige del af projektområdet, hvor Skrivekridtet træffes dybere end kote -60 m, findes grænsen mellem fersk- og saltvand i kalkmagasinerne ved overgangen mellem Danienkalken og Skrivekridtet. Undtaget herfra er Alnarpdalen i Nordøstsjælland, og lokale områder med anomale forhold, såsom hævnning af saltvandet som følge af pumpning, forkastningsbetinget optrængning eller kystnær beliggenhed. I områder vest for København, i områder langs Køge Bugt og på Stevns findes saltvandsgrænsen ved mergelhorisonter et stykke nede i Skrivekridtet.
- Grænsefladen mellem ferskvand og saltvand er de fleste steder udviklet som en jævn overgang over flere hundrede meters dybde. Denne overgang er et resultat af en opadrettet diffusion af residualt porevand fra kridtet til det overliggende ferskvandssystem. Denne erkendelse er ikke ny, idet lignede forhold er observeret i Skivekridt i den østlige del af England /21/, men det er ikke tidligere dokumenteret i Danmark.
- Erkendelsen af diffusion af klorid nedefra og op til ferskvandssystemet er et nyt og vigtigt forhold, der skal medtages ved vurdering af den tidsmæssige udvikling i kloridbelastning af boringer/kildepladser.
- I projektet er der tilvejebragt nye oplysninger om størrelsen af formationsfaktoren i Danienkalken (5 til 6) og Skrivekridtet (4 til 5 i de øverste ca. 100 m). Det er derved muligt at bestemme porevands elektriske ledningsevne, og hermed dets saltholdighed, direkte fra geofysiske borehulsundersøgelser.
- Saltvandsgrænsen i kalk eller kridt kan defineres som grænsen til porevand med en ledningsevne på mere end ca. 100 mS/m (ved $9-11^{\circ}\text{C}$) svarende til en koncentration af klorid på mindst ca. 300 mg/l. Med de påviste formationsfaktorer i formationerne svarer dette til en formationsresistivitet på ca. 40 ohmm i Skrivekridt og ca. 50 ohmm i Danienkalk.
- Teoretiske modelberegninger viser, at usikkerheden på bestemmelsen af dybden til saltvandsgrænsen ved anvendelse af elektromagnetiske sonderinger (TEM - sonderinger) afhænger af gradienten i formationsmodstanden i overgangszonen

mellem fersk- og saltvand, dvs. at usikkerheden øges ved mindre gradienter. Sidstnævnte er observeret til hyppigst at være i størrelsen 1-8 mS/m per meter.

- En analyse af flow -logs viser, at både i Danienkalk og i Skrivekridt kan der træffes betydelige indstrømninger ned til ca. 70 m under prækvartæroverfladen. Uanset om der er tale om Danienkalk eller Skrivekridt, kan der observeres indstrømninger helt ned til 100 m under prækvartæroverfladen, men sådanne dybe indstrømninger udgør sjældent mere en 5 % af indstrømningen i en boring.
- I boringer med indstrømning i både Danienkalk og Skrivekridt ses størrelsen af de enkelte indstrømninger generelt at være større i Danienkalken.
- Den dominerende vandtype i kalkmagasinerne er en Ca-HCO₃ vandtype, dannet ved opløsning af kalkminerale i bjergarterne. Andre vandtyper i magasinerne kan opfattes som en overprägning af denne vandtype, hvor de styrende forhold er litologiske forhold i dæklagene samt hydrogeologiske forhold i selve kalkmagasinerne. Hvor der forekommer infiltration gennem dæklag med reaktivt organisk materiale, hvilket typisk er tilfældet i postglaciale aflejringer i den nordligste del af projektområdet og i tidligere havområder langs de nuværende kyster, dannes stærkt reducerede vandtyper. Hvor der i kalkmagasinet er frit vandspejl, hvilket er tilfældet i den centrale og nordvestlige del af projektområdet, forekommer der som følge af en forøget iltning, forhøjede koncentrationer af calcium, magnesium, bikarbonat, sulfat samt sporelementer - især nikkel.

På baggrund af ovennævnte hovedkonklusioner kan følgende overordnede perspektiver fremhæves:

- Med hensyn til projektets overordnede mål, at forbedre vores viden om mulighederne for en bæredygtig udnyttelse af de dybere og ikke forurenede dele af grundvandsmagasinerne i Nordøstsjælland, så peger alle resultater på, at dette især synes at være muligt i projektområdets nordøstlige del; nærmere betegnet i zone 1 og østlige del af zone 2. Følgende data støtter denne perspektivering af resultaterne: 1) Som følge af en større dybde til Skrivekridtet, ligger saltvandet her dybt; 2) Danienkalken er relativ tyk, typisk mellem 80 og 100 m; 3) Analysen af flow -log undersøgelser i boringer viser, at der her forekommer en stor vandføring ned til omkring 50 - 60 m under den prækvartære overflade; 4) Som følge af artesiske forhold i kalkmagasinerne er vandkvaliteten her generelt god til drikkevand.

Det forhold at der stort set overalt i projektområdet forekommer ferskvand i Danienkalken, samt de gennemførte modelleringer af udvaskningen af saltvand, indikerer, at infiltrationen til dybere dele af formationen kan forøges, såfremt der pumpes fra disse lag. Derved er der imidlertid også en risiko for nedtrængning af eventuelle forureninger til de dybere lag i Danienkalken. Endvidere må der forventes over en vis periode at ske en gradvis stigning i kloridpåvirkningen som følge af øget tilstrømning af det "diffusionspåvirkede" nedre ferskvand. Denne kloridbelastning vil imidlertid kunne stabiliseres på et acceptabelt niveau ved en hensigtsmæssig di-

mensionering af en indvinding fra de dybere lag i Danienkalken. Det nødvendige beregningsværktøj er dog endnu ikke tilstrækkeligt udviklet.

- Ved gennemførelse af vandressourceundersøgelser i dybtliggende kalkmagasiner i Nordøstsjælland bør der etableres et passende antal boringer, som føres så langt ned i Skrivekridtet, at kloridkoncentrationen er større end 300 mg/l, svarende til at formationens ledningsevne er under 40 ohmm. I disse boringer bør der udføres geofysiske borehulsundersøgelser, der som minimum bør omfatte en gamma-log, induktions-log, kaliber-log og flow-log, samt ledningsevne- og temperatur-log såvel uden som under pumpning.
- Det nødvendige antal boringer for en tilstrækkelig kortlægning af saltvandsgrænsen i forbindelse med en vandressourceundersøgelse af de dybtliggende kalkmagasiner såvel som den nødvendige boreddybde vil være forskellige i de forskellige dele af projektområdet. Dette er en naturlig følge af forskelle i Skrivekridtoverfladens dybdemæssige beliggenhed. I tabellen nedenfor er der givet nogle vejledende retningslinier for antal boringer og boreddybde for kortlægning indenfor hver af projektområdets syv zoner (Tabel 5-1). Anbefalet boringsdybde er fastsat ud fra den observation, at saltvandsgrænsen normalt træffes under kote -60 m, samt at det er nødvendigt at bore mindst 10 m dybere for at kunne bestemme stigningsgradienten i klorid i overgangszonen. Boringstætheden er angivet som henholdsvis 10, 25, 100 eller 225 km² per boring, svarende til en afstand mellem boringerne på henholdsvis ca. 3, 5, 10 eller 25 km, og er fastsat ud fra en forventning til variationen i saltvandsgrænsens beliggenhed. Stor variation medfører behov for lille afstand mellem boringer, dvs. lavt antal km² per boring.

Tabel 5-1 Anbefalet antal boringer og boringsdybde ved kortlægning af saltvandsgrænsen i de syv zoner.

Zone	Betegnelse	Skrivekridtoverfladens beliggenhed i kote (m)	Saltvandsgrænsen	Antal km ² per boring	Boringsdybde til kote (m)
0	Nord for Alnarpdalen	-50 til -100	Top Skrivekridt	100	-70 til -110
1	Alnarpdalen	-100 til -170	Top Skrivekridt	225	-110 til -180
2	Mellem zone 1 og 3	-60 til -100	Top Skrivekridt	100	-70 til -110
3	Søndersødal	-50 til -60	Top Skrivekridt	100	-70
4	Kbh. Vest	-30 til -80	Top SK eller mergel-lag i SK	25	-70 til -90
5	Amager (exkl. Vest)	-60 til > -100	I Danien eller Top SK	10	-70 til -110
6	Køge Bugt – Stevns NØ	-30 til -80	Top SK eller mergel-lag i SK	25	-70 til -90

- Kortlægning af dybden til saltvandsgrænsen i et større område kan passende gennemføres ved hjælp af TEM-sonderinger. Ved tolkningen af sådanne undersøgelser er det imidlertid nødvendigt at tage højde for, at saltvandsgrænsen ikke er en skarp grænse, men er en overgangszone med en gradvist faldende resistivitet (jævnt stigende formationsledningsevne).
- Med hensyn til projekts akademiske perspektiver, så kan der især peges på to overordnede punkter: 1) Projektets resultater har givet en indsigt i de styrende pro-

cesser for udviklingen af ferskvandssystemer i kalkmagasiner, og især i tidspektivet forbundet hermed. Denne viden kan vise sig at blive nyttig til vurderinger af udviklingen af ferskvandressourcen i kalkmagasinerne som følge af klimaændringer; 2) Den dybe boring ved Karlslunde har givet indsigt i naturlige klimaændringer i Øvre Kridt, en problemstilling der arbejdes videre med i et videnskabeligt projekt.

6. Referencer

- /1/ Larsen, F., Jensen, T. F., og Hinsby, K., 2002: *Forslag til projekt om fersk-saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne på Sjælland Fase A: Skrivekridt og Danienkalk*. GEUS & DTU notat.
- /2/ Ødum, H og Christensen, W, 1936: *Danske Grundvandstyper og deres geologiske Optræden*. Danmarks Geologiske Undersøgelse III. Række. Nr. 26.
- /3/ Thomsen, E.; 1995: *Kalk og Kridt i den Danske Undergrund*. Fra: Aarhus Geokompendier Vol. 1, Danmarks Geologi fra Kridt til i dag. Redigeret af O. B. Nielsen. Geologisk Institut, Aarhus Universitet, side 31 – 68.
- /4/ Hvam, S., 1982: *Vandindvindingsplanlægning. Teknisk baggrundsnotat 1. Hydrogeologisk Kortlægning*. Hovedstadsrådet.
- /5/ DGU & Kemp & Lauritzen A/S; 1975: *Grundvandsundersøgelse ved Esrum sø*. NORDVAND-udvalget. Rapport juni 1975.
- /6/ Hartz, N, 1912: *Referat af N. O. Holst: Alnarps-Floden en svensk "Cromer-Flod"*. Meddelelser fra Danmarks Geologiske Forening (D.G.F), Bind. 4, hf. 1.
- /7/ Krüger a/s, 1987: *Saltvandsproblemer på kildepladser i Køge Bugt området*. Rapport.
- /8/ Bidstrup, T. og Klitten, K, 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 1. Kortlægning af Danienkalk-Skrivekridt grænsen samt forkastninger i denne*. GEUS rapport 2006/16.
- /9/ 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.
- /10/ Poulsen, L., H., Wittrup, C., S., Klitten., K. og Larsen, F, 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3. Kortlægning af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger*. GEUS rapport 2006/18.
- /11/ Troldborg, L., 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 4. Simulering af nuværende og historiske strømnings-og potentialeforhold*. GEUS rapport 2006/19.
- /12/ Larsen, F., og Berger, K., 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 5. Grundvandstyper i kalkmagasinerne*. GEUS rapport 2006/20.
- /13/ Larsen, F., Sonnenborg, T., Madsen, P., Ulbak, K., A., og Klitten, K., 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6. Saltvandsudvask-*

ning i Danienkalk og Skrivekridt - Detailundersøgelser i Karlslunde værkstedsområde. GEUS rapport 2006/21.

- /14/ Henriksen, H.J., Trolborg, L., Knudby, G.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R., og Rasmussen, P., 1998: *National Vandresource Model. Sjælland, Lolland, Falster og Møn*. GEUS Rapport 1998/109. <http://www.vandmodel.dk>.
- /15/ Stenestad, E., 1976: *Københavnsområdets geologi, især baseret på citybaneundersøgelserne*. Danmarks Geologiske Undersøgelse III. Række, Nr. 45. C.C. Reitzels Forlag.
- /16/ Japsen, P. T., Bidstrup, T. og Lidmar-Bergström, K., 2002: *Neogene uplift and erosion of Southern Scandinavia induced by the rise of the South Swedish Dome*. Fra: Doré, A. G., Cartwright, J. A., Stoker, M. S., Turner, J. P., og White, N. Exhumation of the North Atlantic Margin: Timing, Mechanisms and Implications for Petroleum Exploration. Geological Society, London, Special. Publications, 196, side 183 – 207.
- /17/ Jensen, L. N. og Michelsen, O., 1992: *Tertiary uplift and erosion in Skagerak, Nordjylland and Kattegat*. Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1990-1991, side 159-168
- /18/ Vejrbæk, O. V. og Britze, P. 1995: *Top pre-Zechstein, Geological Map of Denmark 1:750.000* Danmarks Geologiske Undersøgelse. Kort serie 45, 9 sider med 3 kort.
- /19/ Rosenbom, A. E. og Jakobsen, P. R., 2005: *Infrared thermography and fracture analysis of preferential flow in chalk*. Vadose Zone Journal, Vol. 4(2), side 271-280.
- /20/ Frykman, P., 2001: *Spatial variability in petrophysical properties in Upper Maastrichtian chalk outcrops at Stevns Klint, Denmark*. Marine and petroleum Geology Vol 18., side 1041-1062.
- /21/ Bath, A. H. og Edmunds, W. M., 1981: *Identification of connate water in interstitial solution of chalk sediment*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 45, side 1449-1461.
- /22/ Clark, I. og Fritz, P., 1997: *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, 328 sider.
- /23/ Barker, J. A., 1993: *Modelling groundwater flow and transport in the Chalk*. In: Downing, R.A., Price, M., Jones, G.P. (Eds.). The hydrogeology of the chalk of north-west Europe, side 59-66, Clarendon Press, Oxford.
- /24/ Hancock, J. M., 1993: *The formation and Diagenesis of Chalk*. Fra: Downing, R.A., Price, M., Jones, G.P. (Eds.). The hydrogeology of the chalk of north-west Europe, side 14-34, Clarendon Press, Oxford.

/25/ Klitten, K., 1995: *Den vertikale saltvandsfordeling under det opfyldte areal ved østkysten af Amager*. Appendix B i DGU kunderapport nr. 11, 1995: Indvindingsplan for Tårnby Kommunale Vandforsyning. Udarbejdet for A/S Øresundsforbindelsen og Tårnby Kommune i samarbejde med Kemp & Lauritzen.

Foruden denne hovedrapport er der udarbejdet følgende seks delrapporter:

GEUS rapport 2006/16:

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 1
Kortlægning af Danienkalk-Skrivekridt grænsen samt forkastninger i denne.

GEUS rapport 2006/17:

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

GEUS rapport 2006/18:

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3
Kortlægning af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger.

GEUS rapport 2006/19:

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 4
Simulering af nuværende og historiske strømnings- og potentialeforhold.

GEUS rapport 2006/20:

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

GEUS rapport 2006/21:

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

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