

Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6

Saltvandsudvaskning i Danienkalk og Skrivekridt
- Detailundersøgelser i Karlslunde
værkstedsområde

Flemming Larsen, Torben Sonnenborg, Peter Madsen,
Kristoffer A. Ulbak & Kurt Klitten



Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6

Saltvandsudvaskning i Danienkalk og Skrivekridt
- Detailundersøgelser i Karlslunde
værkstedsområde

Flemming Larsen, Torben Sonnenborg, Peter Madsen,
Kristoffer A. Ulbak & Kurt Klitten

Indhold

Forord	5
Liste med anvendte symboler:	7
1. Introduktion	8
1.1 Projektområdet	8
1.2 Formål med delprojekt	9
2. Sammenfatning	10
3. Undersøglesstrategi og områdebeskrivelse	11
3.1 Undersøglesstrategi.....	11
3.2 Karlslunde værkstedsområde	12
3.2.1 Sedimenterne i området.....	12
3.2.1.1 Skrivekridt og Danienkalk	14
3.2.1.2 Tektoniske forhold.....	16
3.2.2 De hydrogeologiske forhold	17
4. Materialer og metoder	20
4.1 Beskrivelse af daglokalitet	20
4.1.1 Klassifikation af sprækker og forkastninger.....	20
4.1.2 Opmålinger i Karlstrup kalkgrav	21
4.1.3 Prøvetagning fra blotninger	21
4.2 Borearbejde og håndtering af kerner	22
4.3 Sedimentologisk prøvebeskrivelse	23
4.4 Geofysisk borehulslogging.....	23
4.5 Bestemmelse af hydrauliske parametre.....	24
4.6 Bestemmelse af porøsitet og permeabilitet.....	24
4.7 Bestemmelse af effektive diffusionskoefficienter	25
4.8 Udtagning af porevand fra kernestykker	26
4.9 Kemiske analyser	26
4.10 Modellering af saltvandsudvaskning	26
4.10.1 Advektiv grundvandstrømning i bjergarter	27
4.10.2 Modelkoncepter	28
4.10.3 Stoftransport i en porøs medium model.....	29
4.10.4 Stoftransport i diskret sprækkemodel	29
4.10.5 Stoftransport i dobbelt-porøst model	29
4.10.6 Den dominerende proces for udvaskningen af saltvand.....	31
4.10.7 Densitetsstrømning i opsprækkede bjergarter	32
4.10.8 Numerisk løsning.....	32
5. Resultater	34
5.1 Opmåling af sprækker i Skrivekridt og Danienkalken	34

5.1.1	Skrivekridt.....	34
5.1.2	Danienkalk.....	36
5.2	Borehulsundersøgelser	38
5.2.1	Karlslunde boringen.....	38
5.2.2	Ishøj Mose boringen	41
5.2.3	Lyksager boringen	43
5.2.3.1	Logging undersøgelse i boringen ved oprindelig boreddybde 100 m	44
5.2.3.2	Logging undersøgelse i boringen efter opfyldning til 84 m	47
5.2.4	Tune boringen.....	50
5.3	Sprækkekarakterisering i kridt og kalk i boringer.....	53
5.3.1	Opmålinger i Skrivekridt.....	54
5.3.2	Opmålinger i Danienkalk.....	55
5.4	Matrixporøsitet og -permeabilitet	58
5.4.1	Skrivekridt.....	58
5.4.2	Danienkalk.....	60
5.5	Residualt porevand og stabile ilt-isotoper i Karlslunde boringen	63
5.5.1	Klorid og stabile ilt-isotoper.....	63
5.5.2	Koncentration af sulfat i porevandet	64
5.6	Formationsfaktoren i Skrivekridt.....	65
5.7	Effektive diffusionskoefficienter for klorid i Skrivekridt.....	67
6.	En konceptuel model for saltudvaskningen	68
6.1	Konceptuel hydrogeologisk model.....	68
6.2	Skrivekridtet	69
6.3	Danienkalken	71
6.4	Modelopsætning.....	72
6.5	Initial- og randbetingelser	74
7.	Numeriske simuleringer	76
7.1	Dobbelt-porøs modellering af opsprækket zone.....	76
7.2	Udvaskning af ikke-opsprækket zone.....	80
7.2.1	Advektiv strømning uden densitetseffekt	80
7.2.2	Udvaskning alene ved diffusion	85
7.3	Simulering af klorid transport i ferskvandssystemet	87
8.	Konklusioner	89
9.	Referencer	92
	Bilag 1: Sedimentologisk log fra Tune boringen. /51/	96
	Bilag 2: Beregning af saltvandskoncentration i Skrivekridt	97
	Bilag 3: Vandkemiske analyser fra Karlslunde Mose boringen	100

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Institut for Miljø & Ressourcer, DTU og Danmarks og Grønlands geologisk Undersøgelse, som en del af afrapportering 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 Danmarks Tekniske Universitet, 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 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, 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 saltvand i projektområdet, men inkluderede også ny dataindsamling i form af udførelse af borehulslogging og TEM-kortlægning .

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 prognostisering af fremtidig kloridbelastning af eksisterende og nye grundvandsindvindinger fra Danienkalk og Skrivekridt.

Resultaterne fra projektets anden fase præsenteres i nærværende delrapport 2. 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.
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)

Tidligere projektleder Thorkild Feldthusen Jensen fra Rambøll A/S har gennemlæst alle rapporter i udkast, og givet nyttige kommentarer og forslag til forbedringer.

København, den 1. april 2006

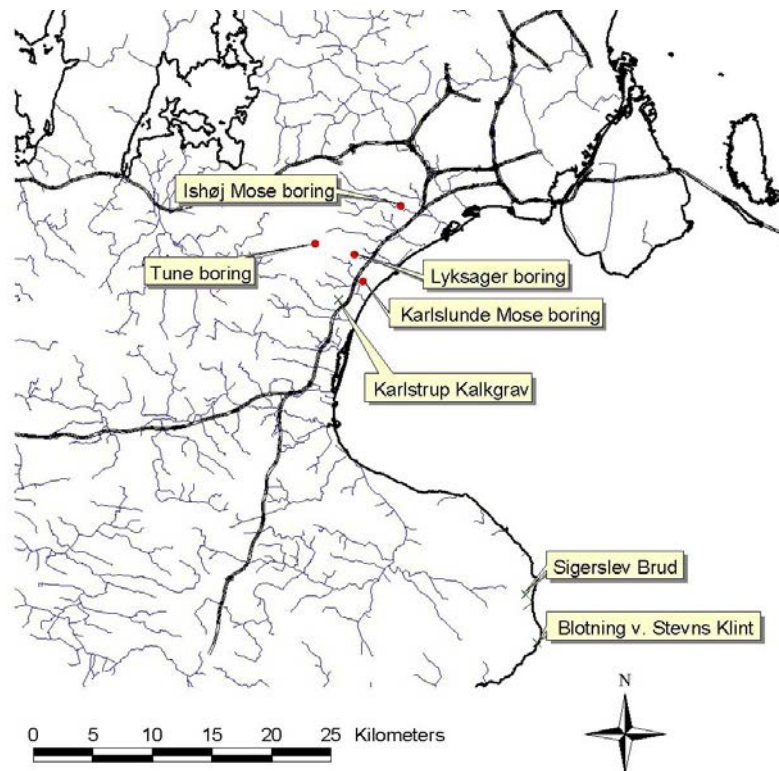
Liste med anvendte symboler:

α_L :	Langsgående dispersivitet [L], m
α_T :	Tværgående dispersivitet [L], m
β :	Masseudvekslingskoefficient [T^{-1}], s^{-1} , i et dobbelt porøst modelkoncept.
c_m :	Koncentration i vand i mobil zone (sprække) [M/L^3], kg/m^3 .
c_{im} :	Koncentrationen i den immobile zone [M/L^3], kg/m^3 .
$\delta^{18}O$:	$\frac{(^{18}O/^{16}O)_{prøve} - (^{18}O/^{16}O)_{s\ tan\ dard}}{(^{18}O/^{16}O)_{s\ tan\ dard}}$
D_{ij} :	Dispersionskoefficient [L^2/T], m^2/s
D_v :	Diffusionskoefficient i vand, [L^2/T], m^2/s .
D_{eff} :	Effektiv diffusionskoefficient [L^2/T], m^2/s .
g :	Tyngdeaccelerationen [L/T^2], m/s^2 .
h :	Hydraulisk potentiale [L], m.
J :	Hydraulisk gradient [],
K :	Hydraulisk ledningsevne [L/T], m/s
K_b :	Bulk hydraulisk ledningsevne af bjergarten [L/T], m/s
K_g :	Gas-permeabilitet, [L^2], m^2
K_k :	Klinkenberg permeabilitet, [L^2], m^2 .
K_m :	Hydraulisk ledningsevne i matrix [L/T], m/s
K_f :	Hydrauliske ledningsevne i sprække [L/T], m/s.
μ :	Vands dynamiske viskositet [$M/L \cdot T$], $kg/m \cdot s$
L_d :	Diffusionsafstanden [L], m
T :	Transmissiviteten [L^2/T], m^2/s .
T_f :	Transmissivitet i en sprække [L^2/T], m^2/s .
τ :	Tortuositet []
$2b$:	Apartur, afstanden mellem to planer, som definerer en sprække [L], m
$2B$:	Afstanden mellem sprækker, [L], m
θ :	Porøsitet []
θ_f :	Porøsitet i mobil zone porøsitet [],
θ_{im} :	Porøsitet i immobil zone (matrix)[]
P :	Laplace parameteren []
ρ :	Vands densitet [M/L^3], kg/m^3 .
ρ_s :	Formations elektriske modstand [ohm L], (ohm m)
ρ_p :	Porevandets elektriske modstand [ohm L], (ohm m)
q :	Darcyhastighed [L/T], m/s
Q_n :	Vandindstrømning i niveauet n i en boring [L^3/T], m^3/s
L_n :	Den elektriske ledningsevne af vand som strømmer ind i en boring i niveauet n, [S/L], mS/m
r_0 :	Radius af kugle i en DP model, [L], m.
v_i :	Vands porevandshastighed, [L/T], m/s
x_i :	Position i et koordinatsystem [L], m

1. Introduktion

1.1 Projektområdet

Som en del af projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er der gennemført undersøgelser af grænsefladen mellem fersk- og saltvandet i et værkstedsområde ved Karlslunde ved Køge Bugt. Den geografiske lokalisering af undersøgte borer og blotninger i projektet fremgår af figur 1-1.



Figur 1-1 Værkstedsområdet ved Karlslunde. Undersøgte borer i projektet er vist samt lokalisering af Karlstrup Kalkgrav og Stevns Klint, hvor der er foretaget opmålinger af blotninger.

Formålet med disse undersøgelser er at opnå en forståelse af de processer, som over geologisk tid har kontrolleret udvaskningen af marint porevand fra Skrivekridt og Danienkalk. Med andre ord er formålet at opnå en forståelse af de processer, som har betinget udviklingen af ferskvandssystemet i kalkmagasinerne efter den sidste istid. Traditionel er termen "udvaskning" af saltvand brugt om den proces, hvorved ferskvand fortrænger oprindeligt marint porevand i kalkmagasinerne. Som det vil blive dokumenteret i rapporten, så er ferskvanddannelse i kalkmagasinerne foregået dels som følge af en advektiv strømning i bjergartens sprækker og matrix og dels ved diffusion af saltvand ud af bjergarternes lavpermeable matrix. Ordet "udvaskning" er således ikke dækkende for processen, idet den

antyder, at processen alene skyldes en advektiv transport. Udtrykket vil alligevel blive brugt i rapporten, da der er tradition for dette i den danske litteratur, det skal blot erindres, at for lavpermeable formationer, er den ikke dækkende, da fjernelse af saltvand her i høj grad er et resultat af en diffusion.

Med en øget viden om de hydrauliske processer, som har medført udvaskningen af saltvandet fra kalkmagasinerne, vil man have en bedre mulighed for at forudsige, hvor saltvandet findes i dag, og hermed bedre kunne forudsige, hvor der kan være uudnyttede grundvandsressourcer på større dybder i Skrivekridtet og Danienkalken. Endelig vil man, med en bedre forståelse af saltvandsgrænsens naturlige udvikling, på en mere kvalificeret måde kunne beregne, om en forøget oppumpning vil forårsage en oprængning af saltvand.

I kapitel 2 gives en sammenfatning af undersøgelsens resultater. I kapitel 3 præsenteres den strategi, som i projektet har været benyttet i forbindelse med indsamling af data. I dette kapitel præsenteres også området ved Karlslunde, og den eksisterende viden om fersk-saltvandsgrænsen i kridt og kalk. I kapitel 4 beskrives de metoder, som har været benyttet i undersøgelsen. Resultater af felt- og laboratorieundersøgelserne præsenteres i kapitel 5. I kapitel 6 opstilles en konceptuel model for udvaskning af marint porevand fra kalkmagasinerne, og i kapitel 7 præsenteres resultaterne af numeriske simuleringer af saltvandsudvaskningen. Konklusioner præsenteres i kapitel 8. I projektets hovedrapport er resultaterne fra arbejdet i værkstedsområdet perspektiveret med henblik på betydning for vurderingen af beliggenheden af salt-ferskvandsgrænsen i andre dele af projektområdet.

1.2 Formål med delprojekt

Det overordnede formål med projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er at:

- Etablere en større viden om de hydrogeologiske og grundvandskemiske forhold i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland med henblik på at vurdere mulighederne for en bæredygtig udnyttelse af de dybere og uforurenede dele af grundvandsmagasinerne.

I denne delundersøgelse har de specifikke mål været, at:

- Opstille en konceptuel og en numerisk model i Karlslunde området til beregning af udvaskningen af saltvand fra Skrivekridtet og Danienkalken over geologisk tid.
- Fremskaffe værdier for parametre som grundlag for simuleringer af fersk-saltvandsgrænsens stabilitet, samt til brug for fremtidige beregninger af salt-ferskvandsgrænsens stabilitet ved en oppumpning.

2. Sammenfatning

Med det overordnede formål at etablere en viden om de hydrauliske parametre, som under oppumpninger kontrollerer stabiliteten af fersk-saltvandsgrænsen i Skrivekridtet og Danienkalken på Sjælland, er der foretaget en række hydrogeologiske undersøgelser i et værkstedsområde ved Karlslunde. De specifikke formål med undersøgelsen har været at opstille en konceptuel og numerisk model for udvaskningen af saltvand over geologisk tid, og at bestemme de parametre, som vil indgå i fremtidige numeriske simuleringer af saltvandsgrænsens stabilitet i relation til grundvandsindvinding.

Værkstedsområdet ved Karlslunde har et areal på omkring 50 km². De glaciale sedimenter har her typisk en mægtighed på omkring 20 m, undtaget herfra er en nord-syd gående randmoræne ved Tune by, hvor de glaciale sedimenter har en mægtighed på op mod 30 m. Denne randmoræne udgør et topografisk højdepunkt i oplandet, og herfra drænes oplandet mod Køge Bugt i øst. Hovedparten af vandføringen foregår i Danienkalken. Under Danienkalken forekommer Skrivekridtet, som i oplandets mest østlige del træffes direkte under de glaciale sedimenter.

I forbindelse med undersøgelsen er der indledningsvist foretaget en systematisering af den eksisterende viden om området. Ud fra tidligere og nye undersøgelser er der foretaget en karakterisering af sprækkesystemer i Skrivekridtet ved Stevns Klint og i Danienkalken i Karlstrup Kalkgrav. Der er blevet etableret to nye undersøgelsesboringer; én ved Karlslunde Mose og én ved Tune by. Boringen ved Karlslunde Mose er ført ned til 269 m. u. t., og der er udtaget et samlet borekerne i Skrivekridtet med en længde på 244 meter. Boringen ved Tune er ført ned til 110 mut., og er boret gennem Danienkalken og 25 meter ned i Skrivekridtet. Der er udtaget kerneprøver i intervallet 34 – 95 mut. Der er gennemført en geologisk beskrivelse af prøverne fra Tune boringen, mens Karlslunde boringen er beskrevet ud fra geofysiske logs. Der er gennemført geofysiske borehulsundersøgelser (logging) i de to nye projektboringer samt i to af Kbh's Energi's nye boringer i området. Borehulsundersøgelserne har inkluderet optagelser med en optisk televiwer med henblik på karakterisering af sprækker i borehullerne. Der er udført prøvepumpninger til bestemmelse af hydrauliske parametre.

På prøver af Skrivekridt og Danienkalk fra blotninger og boringer er der i laboratoriet bestemt porøsiteter samt gaspermeabiliteter. Ved centrifugering er porevand presset ud af fra kerner af kridtet fra Karlslunde Mose boringen, og på disse prøver er bestemt: Elektrisk ledningsevne, klorid, sulfat samt indholdet af de stabile iltisotoper ¹⁸O og ¹⁶O. I laboratorieforsøg er klorids effektive diffusionskoefficient bestemt i prøver af kridt fra Karlslunde Mose boringen.

Med de bestemte parametre i undersøgelsen er der foretaget numeriske beregninger af udvaskningen af residualt porevand over geologisk tid. Disse beregninger er foretaget med den numeriske kode FRACTRAN.

De konklusioner som der kan trækkes på baggrund af undersøgelsen er beskrevet i kapitel 8.

3. Undersøgelingsstrategi og områdebeskrivelse

3.1 Undersøgelingsstrategi

I den internationale faglitteratur er der siden slutningen af 1960'erne præsenteret en række resultater af hydrogeologiske undersøgelser af grænsefladen mellem fersk- og saltvand i geologiske formationer /2-9/. På baggrund af disse analyser og beregninger kan det fastslås, at over geologisk tid vil følgende parametre have en betydning for udvaskningen af residuelt, marint porevand fra Skrivekridt og Danienkalk:

- Forekomsten af sprækker i Skrivekridtet og Danienkalken (intensitet, orientering etc.).
- Udviklingen af sprækkerne (afstand, apertur etc.).
- Dybden af den opsprækkede zone.
- Forekomsten af lavpermeable mergel og lerlag
- Matrix porøsitet og permeabilitet
- Bjergartens effektive diffusionskoefficienter for ionerne i det marine porevand
- Infiltrationens størrelse
- Tiden hvori udvaskning af saltvand har kunnet foregå

Denne undersøgelse er derfor søgt tilrettelagt med henblik på at etablere viden om disse parametre.

Forekomsten og karakteren af sprækker i Skrivekridt og Danienkalk kan vurderes ved opmålinger af blotninger samt ved undersøgelse af borehuller. I det valgte projektområde kan Danienkalken undersøges i Karlstrup Kalkgrav, og Skrivekridtet kan undersøges ved Stevns Klint og i Sigerslev Kridtbrud, figur 1-1. Jakobsen /10/ har tidligere foretaget en visuel inspektion af Danienkalken i Karlstrup Kalkgrav, og Jakobsen og Klitten /11/ præsenterer opmålinger af sprækkers rumlige orientering fra bruddet. Rosenbom og Jakobsen /12/ har foretaget opmålinger i Sigerslev Bruddet, og Bonnesen /13/ har foretaget undersøgelser af Stevns Klint. Bloomfield /14/ og andre har foretaget opmålinger af Skrivekridtet i England, som også kan give nyttige informationer om de hydrogeologiske forhold i formationen. Geofysiske borehulsundersøgelser kan give informationer om udbredelsen med dybden af hydraulisk aktive sprækker i Skrivekridtet og Danienkalken /15/. Da andre resultater i projektet har vist, at saltvandgrænsen i kalkmagasinerne næsten udelukkende findes i Skrivekridtet, vil der blive lagt særligt vægt på forholdene i denne formation.

På prøver, udtaget fra ovennævnte blotninger og borer, kan der i laboratoriet foretages bestemmelse af bjergarternes matrixpermeabilitet og -porøsitet. Hydrauliske parametre i opsprækkede, højpermeable zoner kan bestemmes ved prøvepumpninger. Endelig kan sedimenternes effektive diffusionskoefficient bestemmes ved målinger på bjergartsprøver i laboratoriet. Infiltrationen til kalkmagasinerne kan vurderes ud fra foreliggende, veldokumenterede numeriske simuleringer. I kapitel 4 beskrives de omtalte metoder mere udførligt.

Såfremt der kan foretages en tilfredsstillende bestemmelse af værdien af de nævnte parametre, kan der foretages numeriske simuleringer af saltvandsudvaskningen over geologisk

tid. Validering af udførte beregninger kan i begrænset omfang foretages mod resultater af fersk-saltvandsgrænsens aktuelle beliggenhed i Skrivekridtet. Da der nu ikke forekommer saltvand i Danienkalken, kan modelsimuleringer om udvaskningen fra denne formation ikke valideres med feltdata.

De detaljerede undersøgelser af saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne er gennemført i et opland ved Karlslunde i Roskilde Amt. Dette opland blev valgt som undersøgelsesområdet af tre grunde:

- Som følge af et tektonisk opløft af den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin forekommer Skrivekridt her tæt på terræn;
- I området er Danienkalken blottet i Karlstrup Kalkgrav og Skrivekridtet kan undersøges i blotninger tæt på værkstedsområdet (Stevns Klint og Sigerslev Bruddet).
- I området er der i en række undersøgelser påvist forhøjede koncentrationer af saltvand i Skrivekridtet.

3.2 Karlslunde værkstedsområde

Værkstedsområdet Karlslunde er lokaliseret sydøst for Roskilde, mellem Tune by og Køge Bugt, hvor Skrivekridt, Danienkalk og Lellinge Grønsand Formationen udgør den prækvartære overflade, figur 3-1. Mægtigheden af de glaciale og postglaciale sedimenter i området er fra få meter til omkring 30 m /16/.

3.2.1 Sedimenterne i området

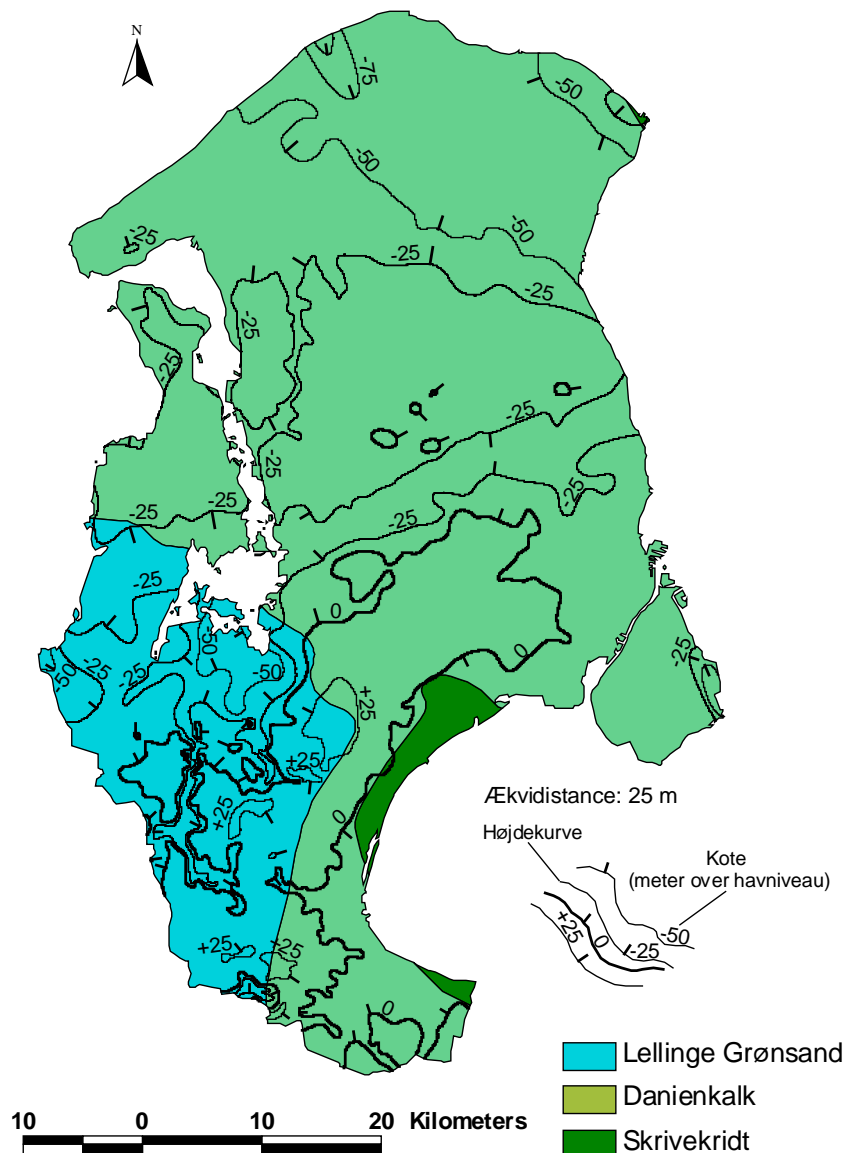
Glaciale sedimenter:

De glaciale sedimenter i området er afsat i forbindelse med de seneste isfremstød fra øst og sydøst i Weichsel perioden. I store dele af værkstedsområdet er mægtigheden af de glaciale og postglaciale sedimenter mellem 10 og 20 meter, og de består overvejende af moræneler, afsat som bundmorænesekvenser, og sand og grus afsat som smeltevandsaflejringer. I lavtliggende områder langs kysten og i dalsystemer, forekommer postglaciale aflejringer. I området omkring Tune by er aflejret en randmoræne, som fremtræder som en markant, nord-syd orienteret morfologisk enhed i landskabet. Områdets dræning er overordnet kontrolleret af denne enheds geografiske udbredelse. Da udvaskningen af det marine porevand fra de prækvartære formationer ikke i væsentlig grad har været påvirket af de glaciale sedimenter, vil disse ikke blive omtalt yderligere.

Lokalt, i dalsystemer i den vestlige del af Roskilde Amt og langs Køge Bugt, kan de postglaciale, marine sedimenter påvirke koncentrationen af saltvand i de øverste meter af de prækvartære formationer. Forhøjede koncentrationer i disse situationer skyldes således andre hydrogeologiske forhold, som ikke behandles i denne undersøgelse.

Prækvartære formationer:

Fordelingen af de prækvartære formationer i området, Skrivekridt, Danienkalk og Lellinge Grønsand Formationen (figur 3-1), er betinget af et tektonisk opløft af Det Danske Bassin i sen tertiær (Neogen) /17, 18/. Dette opløft har bevirket, at formationerne generelt har en svag hældning mod vest. Den prækvartære overflades udformning er et resultat af glacial erosion i de prækvartære aflejringer, fortrinsvis som et resultat af isfremstød fra øst og sydøst.



Figur 3-1 Fordelingen af Skrivekridt, Danienkalk og Lellinge Grønsand Formation i undersøgelsesområdet ved Karlslunde og den prækvartære overflades topografi.

I den vestlige del af værkstedsområdet, ved Tune by, træffes Danienkalken og Lellinge Grønsand Formationen omkring kote +20 til +30 m. I den østlige del, hvor der forekommer Skrivekridt, træffes de prækvartære lag mellem kote -20 og -25 m. Isen har eroderet dybere

i den forholdsvis ukonsoliderede, bløde kridt, og derved er der dannet en lavning langs Køge Bugt.

3.2.1.1 Skrivekridt og Danienkalk

Skrivekridt:

I Karlslunde området er mægtigheden at Skrivekridtet omkring 1.000 m /19/. Skrivekridtet, hvorfra der foregår grundvandsindvinding i den østlige del af Sjælland, henføres til den yngste etage i Øvre Kridt, Maastrichtian, som tidsmæssigt forekom for 73 til 65 millioner år siden.

I den danske faglitteratur omtales kridt traditionelt som "slamkalk". En slamkalk (eng. mudstone) er en bjergart med en dominerende kornstørrelse under 4 µm, og de enkelte korn udgøres af pelagiske nannofossiler /20/. Slamkalk omtales ofte i daglig tale som skrivekridt eller blot kridt. I denne rapport dækker "Skrivekridt" over slamkalken som en formation, mens "kridt" benyttes om bjergarten.

I undersøgelsesområdet udgør Skrivekridtet den prækvartære overflade i et 2-4 km bredt bælte langs Køge Bugt, figur 3-1. I dette område træffes Skrivekridtet de fleste steder mellem kote – 20 og -25 m. Som følge af formationens hældning mod vest træffes kridtet i kote –45 m ved Tune by.

Skrivekridt består overvejende af fragmenter af de bjergartsdannende organismer kokkolitter, der levede som pelagiske organismer i et oceanisk hav med en vanddybde mellem 200 og 300 m /21/. Disse organismer er opbygget af en lav-magnesium calcit (indhold af magnesium under 1 vægtprocent). Foruden en primær produktion af lav-magnesium calcit, er der blevet transporteret en vis mængde klastisk materiale (hovedsagelig lermineraller) ud i dette hav fra omkringliggende landområder eller via kystparallelle strømme /21/. Lerminerallerne er sammen med fragmenter af kokkolitter blevet afsat på havbunden. Når produktionen af karbonat var stor, blev der produceret en bjergart, som er domineret af calcit og med et indhold af ler, som typisk er omkring 1 procent. Når produktionen af karbonat var relativt lille, blev der produceret en kalkbjergart, som kan have et indhold af ler op mod 15-25 % /21/. De mest lerholdige zoner i kridtet optræder som omkring 10 cm tykke lag af mergel, og disse kan identificeres ved en højere naturlig gammastråling /15/. Forholdet mellem calcit og lermineraller i formationen er således betinget af produktionen af karbonat i vandmasserne, og mængden af ler som blev transporteret ud i havet. Disse forhold synes at være betinget af variationer i det naturlige klima under sedimentationen.

I Skrivekridt forekommer der sjældent massive gennemgående flintlag, men derimod hyppige lag af uregelmæssige og usammenhængende flintknolde i størrelse op til et 10-20 cm. Kilden til silicium i flinten har været siliciumskallede organismer, som har levet i havet sammen med kokkolitterne. Disse skaller er blevet opløst tidligt efter sedimentationen, og de er gendækket som flint omkring en halv meter under den oprindelige havbund. Derudover indeholder Skrivekridt en del sulfidmineraller /22/.

Skrivekridtet har gennemgået en relativt beskedent diagenetisk omdannelse /20, 21/ og bjergarten har derfor bevaret en høj primær porøsitet, typisk mellem 40 og 50 % /23/.

Fragmenterne af kokkolitterner i Skrivekridtet er typisk få μm , og forbindelserne mellem porerum i bjergarten er af samme størrelse. Dette betyder, at bjergartens hydrauliske ledningsevne i matrix er relativt lille typisk mellem 10^{-9} og 10^{-7} m/s /24/.

Som følge af den lave primære hydrauliske ledningsevne i Skrivekridt kan bjergarten kun udgøre et grundvandsmagasin, hvor den er opsprækket. Detaljerede opmålinger af sprækker og forkastninger i Skrivekridt herhjemme og i England har vist, at der i den øvre del af kridtet forekommer sprækker med en afstand på få decimeter, og disse ses som lagparallelle sprækker /12,13,14/. Da formationen ligger tilnærmelsesvist horisontalt i området omtales de lagparallelle sprækker som subhorizontale sprækker. Disse sprækker tolkes som et resultat af en aflastning af formationen i forbindelse med en betydelig borterosion af overliggende bjergarter, forårsaget af et betydeligt tektonisk opløft i Neogen /17,18/.

Udover de subhorizontale sprækker forekommer der i kridt typisk et eller flere sæt subvertikale sprækker eller forkastninger. Disse sprækker tolkes sædvanligvis som et resultat af en tektonisk aktivitet i området med en dominerende vertikal trykpåvirkning af Skrivekridtet /12,13/. Resultatet af geofysiske borehulsundersøgelser har påvist tilstedeværelsen af vandførende sprækker i Skrivekridtet visse steder helt ned til 100-120 mut. /15/.

Danienkalk:

Danienkalken blev aflejret i Danien perioden for mellem 65 og 60 millioner år siden. I den danske faglitteratur er Danienkalken traditionelt blevet omtalt som "slamkalk", "kalksandskalk", "bryozokalk" og "koralkalk" /20/. I denne rapport vil udtrykket "Danienkalk" blive benyttet, når der tales om kalken som en formation, mens "kalk" vil blive benyttet om bjergarten. I Karlslunde værkstedsområdet forekommer de sedimentære facies slamkalk, kalksandskalk og bryozokalk. Slamkalken er defineret i forrige afsnit. Kalksandskalken (eng. wackestone eller packstone) består af de samme biogene komponenter som slamkalken, men i en størrelse over 4 μm /20/. Bryozokalken har et stort indhold af skeletfragmenter fra de bentoniske mosdyr bryozoa, mens hulrummene er delvist udfyldt med slamkalk. I værkstedsområdet er bryozokalken aflejret i banker (biohermer), relativt tæt på en daværende kystzone mod øst /20/.

De bjergartsdannende, bentoniske dyr, der udgør Danienkalken, har generelt et højt indhold af magnesium. Kalcit med en højere indhold af magnesium er kemisk mere ustabil end lav-magnesium kalcit, og kalken er derfor generelt mere diagenetisk omdannet end kridtet. Denne diagenetiske ændring har resulteret i en større variation i kalkens porøsitet og permeabilitet i matrix i forhold til kridtet.

Kalken udgør den prækvartære overflade i den centrale del af undersøgelsesområdet, figur 3-1. I området aftager mægtigheden af Danienkalken mod øst. Ved Tune er formationens mægtighed således mellem 50 og 60 m, ved Lyksager er den omkring 20 m og som følge af erosionen findes formationen ikke i den østlige del af området. I Karlslunde området forekommer bryozokalk i den nedre del af Danienkalken, og i den øvre del træffes nogle steder kalksandskalk. I Danienkalken findes gennemgående flintlag, som typisk har en tykkelse på mellem 0,5 og 1,0 m. Hærdningsgraden af Danienkalken er meget varierende, idet bjergarten har gennemgået en betydelig diagenetisk omdannelse.

Der er gennemført en række hydrogeologiske undersøgelser af Danienkalken i området, og disse er omtalt i Lund et al. /16/.

Resultater af de bedst dokumenterede pumpeforsøg i Danienkalken giver transmissiviteter mellem 0,005 og 0,07 m²/s og magasintal mellem 0,007 og 0,015 /10/.

Lellinge Grønsand Formationen

Lellinge Grønsand Formationen overlejrer Danienkalken i den vestligste del af undersøgelsesområdet, figur 3-1. Tilstedeværelsen af denne formation har en betydning for Danienkalkens hydrauliske egenskaber, idet der, hvor denne formation er til stede, ikke forekommer en glacialt betinget knusning af de øverste meter af kalken. Derudover kan forekomsten af lavpermeable enheder over Danienkalken reducere infiltrationen til formationen. Lellinge Grønsand Formationen vil ikke blive omtalt yderligere, da den ikke indgår i undersøgelsen.

3.2.1.2 Tektoniske forhold

Værkstedsområdet ved Karlslunde ligger i den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin, der mod øst er afgrænset af Den Fennoskandiske Randzone /25/. I forbindelse med aflejringen af Skrivekridt og Danienkalken er der foregået en betydelig indsykning i det sedimentære bassin langs randzonen, og mægtigheden af Skrivekridtet er i depocenteret nord for Sjælland op mod 2.000 m /19/. Indsykningen i denne del af Det Danske Bassin er fortsat i tertiær (Paleogen og Neogen), hvor der blev afsat omkring 500 m klastiske sedimenter. Som følge af det tektoniske opløft i sen tertiær (sen Neogen) blev sedimenterne fra Paleogen og Neogen eroderet og transporteret ud til Nordsøområdet, hvor de blev aflejret /18/. I den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin er der i Neogen tid foregået en tektonisk aktivitet i form af en kompression i sydvest-nordøstlig retning samt dannelse af forsætninger langs randzonen /25, 26/.

Den fysiske aflastning af kridtet og kalken har medført dannelse af aflastningssprækker i sedimenterne. Disse forekommer hovedsagelig i kontakten mellem lag med forskellige litologier, som reagerer forskelligt på en mekanisk påvirkning. I Skrivekridtet ses dette typisk i kontakter mellem lag med forskelligt indhold af lerminerale, eller i kontakten mellem lag af kridt og flint /11, 12/. I Danienkalken forekommer aflastningssprækker hovedsagelig i kontakten mellem lag af kalk og flint, og i mindre grad internt i kalkbænkene /11, 27/. Da Skrivekridtet og Danienkalken i området kun hælder få grader mod vest, ses aflastningssprækkerne som subhorizontale, lagparallelle sprækker eller forkastninger, og disse kan typisk følges over flere hundrede meter /11,12,13/. En undtagelse herfra er aflastningssprækker i bryozokalkens banker, hvor hældningerne er bestemt af flankernes hældninger, som kan være op mod 25°.

Det er påvist, at den dominerende kompression i sydvest-nordøstlig retning har medført en dannelse af subvertikale sprækker og forkastninger i Skrivekridtet og Danienkalken. Jakobsen og Klitten /11/ påviste dette ved en undersøgelse af Københavnskalken. Tilsvarende forhold er påvist i Skrivekridtet på Stevns ved undersøgelser af Sigerslev Bruddet /12/ og af

Stevns Klint /13/. I Skrivekridtet kan der påvises tre eller fire sæt af sprækker, som har en overordnet sydøst-nordvest orientering. Kompressionen, som har frembragt disse subvertikale sprækker, må således have haft en sydvest-nordøstlig retning.

3.2.2 De hydrogeologiske forhold

Paleohydrologiske forhold

Indtil det tektoniske opløftet af området i tertiær (sen Neogen), har Skrivekridtet og Danienskalken været dybt begravet i det sedimentære bassin. Under begravelsen har formationernes porevand haft en sammensætning, som det oprindelige marine porevand. Erosionen af de overliggende Paleogene og Neogene sedimenter er foregået indtil for omkring 2-3 millioner år siden, med en gradvis hævnning af området som følge /18/. Det er således en rimelig hypotese, at der er sket nedsivning, grundvandsdannelse og grundvandsstrømning i kalken de seneste 2-3 millioner år.

Som følge af infiltration af ferskvand efter sidste istid, er der i Karlslunde området ikke residualt saltvand i Danienskalken /15, 28/. Om der tidligere, i perioden fra aflejringen af Danienskalken for 60 millioner år siden og til afslutningen af det Neogene opløft for 2-3 millioner år siden, er sket nedtrængning af ferskvand er vanskeligt at afgøre, men de tektoniske forhold taler ikke for dette.

Hvor Danienskalkens nedre enheder ikke er opsprækkede, kan der på store dybder forekomme let forhøjede koncentrationer af saltvand /15/. Lokalt er der forhøjede koncentrationer af saltvand i kalken, hvor der er en opadrettet hydraulisk gradient, hvilket der eksempelvis synes at være ved Køge Å og Tryggevælde Å, og ved enkelte forkastninger i området.

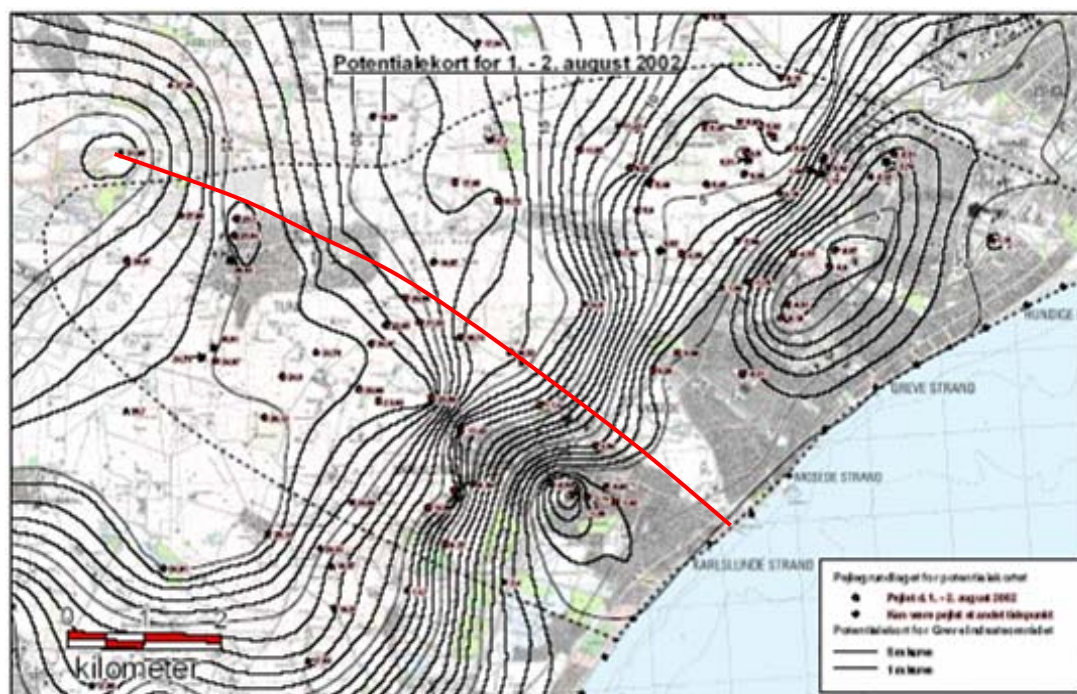
Hvor der er åbne sprækker og forkastninger i den øvre del af Skrivekridtet, er der også her sket en delvis eller fuldstændig udvaskning af det marine porevand. I den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin, er der ikke observeret åbne subhorizontale sprækker dybere end 100-120 mut. /15/, men der kan lokalt forekomme åbne sprækker på større dybder. Hvis disse imidlertid ikke er forbundet hydraulisk til andre sprækker, vil porevandet stå stille i sprækkerne.

Hvor der ikke er åbne sprækker, er bjergartens samlede hydrauliske ledningsevne betinget af den primære hydrauliske ledningsevne i matrix. Da det også må formodes, at den hydrauliske ledningsevne på større dybder er relativt lille, må porevandet stå stille, eller bevæge sig med en meget lav hastighed. En yderligere hindring for udvaskning af det marine porevand skyldes forskelle i densitet mellem ferskvandet og saltvandet, hvilket medfører, at ferskvandet strømmer over saltvandet, og de to vandtyper derfor ikke opblandes. Under sådanne hydrauliske forhold sker transporten af opløste ioner i porevandet hovedsagelig ved diffusion. I en boring i Skrivekridt fra England har Bath og Edmunds /30/ således undersøgt porevandets sammensætning. Den undersøgte boring gennemborede en sekvens af kridt fra 100 til 500 mut. I denne boring ses en gradvist stigning i indholdet af salte i porevandet, således at der i dybde 450 mut. er en sammensætning af porevandet, som med hensyn til klorid svarer til en oceanisk sammensætning på omkring 18.800 mg/l.

Det observerede forhold vedrørende saltvand i Skrivekridtet i England svarer til forhold som er påvist i den østlige del af Det Danske Sedimentære Bassin /15/. Ved geofysisk borehulslogging i Skrivekridtet ses ofte en gradvis stigning i formationsledningsevnen (induktions-log) og et gradvist fald i formationsmodstanden (elektrisk-log), med stigende dybde /15/. Det er endvidere påvist /15, 28/ at fersk-saltvandsgrænsens dybde ikke er styret af det ferske grundvands trykforhold, og at der således ikke er tale om en massefyldbetinget balance grænse.

De nuværende hydrogeologiske forhold:

De nuværende hydrauliske trykforhold i Danienkalken i Karlslunde området fremgår af figur 3-2. Mod vest, ved grundvandsskellet, står grundvandsspejlet omkring kote + 30 m., og den hydrauliske gradient er rettet mod øst. Størrelsen af den hydrauliske gradient er omkring 3 ‰.



Figur 3-2 Placering af profil i Karlslunde oplandet. Baggrundsbillede med potentialerlinier er fra Lund et al. /16/.

I Danienkalken er der frit vandspejl, mens der er artesiske forhold i den største del af området med Skrivekridt. I områder med Danienkalk er den hydrauliske gradient relativt lille, hvilket skyldes en relativt stor transmissivitet. Modsat er de hydrauliske gradienter relativt store i det relativt lavpermeable Skrivekridt. Som tidligere nævnt er det sandsynligt, at de hydrogeologiske forhold i Kvartær perioden, herunder placeringen af vandskellet, infiltrations størrelse og det hydrauliske trykniveau, er ændret siden formationerne blev hævet til

det nuværende niveau i Neogen, men på grund af en manglende viden om disse forhold indgår disse ikke i modelleringen.

De sidste 50-100 år er der foregået en intensiv indvinding af grundvand i området, hvilket har medført en generel sænkning af grundvandsspejlet i området. Som det vil fremgå af dette arbejdes konklusioner, har disse forhold ikke haft en væsentlig betydning for udvaskningen af det marine porevand i Skrivekridtet, men kan naturligvis lokalt have medført, at kloridholdigt grundvand fra Skrivekridtets hydraulisk aktive øvre zone har bevæget sig opad og påvirket det ferske grundvand.

I figur 3-2 er vist et trace i grundvandsmagasinet fra vandskel til kysten, som vil blive benyttet som et typesnit gennem oplandet, hvor de geologiske forhold samt beliggenheden af saltvandsgrænsen er veldokumenteret. De numeriske simuleringer i kapitel 7 vil blive gennemført i dette snit.

4. Materialer og metoder

Med det formål at opstille en konceptuel hydrogeologisk model for grundvandsstrømning og stoftransport i Danienkalken i Karlslunde oplandet er der foretaget opmålinger af kalken i Karlstrup Kalkgrav /27/. Der er foretaget indledende opmålinger af Skrivekridtet på en blotning ved Stevns Klint /13/ og resultater fra opmålinger i Sigerslev bruddet på Stevns er også medtaget /12/. Med hensyn til en beskrivelse af benyttede metoder og tolkninger henvises til ovennævnte referencer.

I forbindelse med projektet blev der etableret to nye undersøgelsesboringer. Én ved Karlslunde Mose og én ved Tune by. For at opnå en bedre geografisk dækning i undersøgelsesområdet blev der yderligere inddraget to nyere boringer. Disse er boringer ved Lyksager og Ishøj Mose, som Københavns Energi har etableret netop med det formål at få oplysninger om fersk-saltvandsgrænsens beliggenhed og karakter.

På indsamlede prøver fra blotningerne og boringerne er der gennemført en række laboratorieundersøgelser. De anvendte metoder, vil blive beskrevet i de følgende afsnit. Der gennemgås også modelkoncepter og numeriske metoder, som er benyttet i undersøgelsen.

4.1 Beskrivelse af daglokalitet

4.1.1 Klassifikation af sprækker og forkastninger

Bosscher og Cornell /31/ har foreslået en metode til opmåling og analyse af sprækker (og forkastninger) i finkornede bjergarter. Denne model er med mindre ændringer og tilføjelser benyttet i denne undersøgelse. Følgende definitioner benyttes i undersøgelsen:

Der skelnes mellem sprækker og forkastninger ud fra størrelsen af forsætningen langs åbningen i bjergarten. Hvis en forsætning mellem to planer er større end 10 cm defineres strukturen som en forkastning. Hvis forsætningerne er under 10 cm beskrevet det som sprækker.

I disse undersøgelser, og i andre publicerede undersøgelser, er der generelt påvist meget få forkastninger i Skrivekridtet og Danienkalken. Der er således helt overvejende tale om mere eller mindre åbne sprækker i bjergarterne.

Subhorizontale sprækker og forkastninger defineres som strukturer med en hældning under 20° med det horisontale plan.

Subvertikale sprækker og forkastninger defineres som strukturer med en hældning over 60° med det horisontale plan.

Intermediære sprækker og forkastninger defineres som strukturer med en hældning mellem 20° og 60° med det horisontale plan.

Da hældningerne af lagene i formationerne er små, fremstår de lagparallelle sprækker som subhorisontale sprækker. Disse sprækker må formodes helt overvejende at være dannet som aflastningssprækker.

De subvertikale og intermediære sprækker og forkastninger er dannet som følge af en overvejende horisontal kompression af bjergarten.

En beskrivelse af en sprække eller en forkastning kan enten være knyttet til den enkelte struktur (orientering, kontinuitet, apertur) eller til relationerne mellem sprækkerne og forkastningerne (afstand).

Orienteringen (eng. orientation) af et sprække- eller et forkastningsplan beskrives rumligt ved strygning og hældning i rummet.

Kontinuiteten (eng. persistence) af en sprække eller en forkastning er den længde, som strukturen kan følges i en blotning af en bjergart.

Aperturen (eng. aperture) af en sprække eller en forkastning defineres som den vinkelrette afstand mellem to planer, som definerer sprækken eller forkastningen. En visuel apertur henviser i denne rapport til en apertur, som er bestemt visuelt på en blotning eller i en optisk televueer-log, mens en hydraulisk apertur er en beregnet åbning af en sprække ud fra en bestemt transmissivitet.

Afstanden (eng. spacing) mellem to parallelle sprækker eller forkastninger opgives som den vinkelrette afstand mellem to flader som definerer to sprækker eller forkastninger.

4.1.2 Opmålinger i Karlstrup kalkgrav

I Karlstrup Kalkgrav er der foretaget opmålinger af bryozokalken i ét vertikalt og ét horisontalt profil /27/. I det vertikale profil er opmåling og prøvetagning foretaget med henblik på at undersøge litologiske og petrofysiske variationer i kalkbænkene og i kontakten mellem kalk og flint. I det horisontale profil er opmåling og prøvetagning gennemført med det formål at undersøge variationer langs en veldefineret kalkbænk, som må formodes at være dannet under de samme aflejringsforhold. Der er foretaget opmålinger af bankestrukturerne i vægge i graven. Mægtigheden af kalkbænke og flintlag er opmålt, og lagenes hældning er ligeledes opmålt. Afstanden mellem sprækker og sprækkernes apertur er beskrevet. Lagenes strygning og hældning er afbilledet i en stereografisk projektion /32/.

4.1.3 Prøvetagning fra blotninger

Prøver af kalken til bestemmelse af porøsitet og permeabilitet blev udtaget med et diamantbor, som blev monteret på en håndboremaskine. Kernerne er udboret som horisontale

prøver med en diameter på 2,5 cm, og en længde på omkring 5 cm. Det vertikale profil i Karlstrup Kalkgrav blev udtaget i delprofiler, så de tilsammen repræsenterer en hel bankestruktur. Der er ikke udtaget prøver fra bankens fulde højde, men variationen mellem lagene vurderes alligevel til at være beskrevet af det præsenterede profil. I det vertikale profil blev der i alt udtaget 33 kerner.

Det horisontale profil er placeret i en 130 cm tyk kalkbænk, og der er her udtaget 17 kerner fordelt over profilets længde på ca. 8,5 m. For også at kunne undersøge variationer i kalkens petrofysiske egenskaber i en mindre skala, er halvdelen af prøverne udtaget indenfor én meter i kalkbænken.

4.2 Borearbejde og håndtering af kerner

Der er etableret to nye undersøgelsesboringer, én ved Tune by og én ved Karlslunde Mose.

Boringen i Tune by er lokaliseret på Tinggårdsvej (UTM koordinater: 700.480; 6.165.373; terrænkote: ca. + 40,9 m). Boringen har DGU Nr. 207.3841. Borearbejdet blev foretaget af firmaet Geo i oktober 2003. Fra terræn og til dybden 34,2 mut. blev der udtaget prøver i poser. Fra intervallet 34,2-95,2 mut. (Danienkalk og toppen af Skrivekridt) blev der udtaget kerner med en diameter på 85 mm. Boringen blev herefter overboret som rotationsboring (diameter 225 mm) til 110 mut. Boringen er udbygget med et stålforerør fra terræn til 34 mut., og herunder står boringen som et åbent hul. Kerneprøverne blev bragt til GEUS, hvor der er foretaget en geologisk beskrivelse og udtaget delprøver til petrografiske undersøgelser. Kernerne opbevares fortsat på GEUS.

Boringen ved Karlslunde Mose er lokaliseret på Karlslunde Mosevej (UTM koordinater: 704.509; 6.162.193; terrænkote: ca. + 2.0 m) Boringen har DGU Nr. 207.3850. Borearbejdet er foretaget af Faxe Kalk A/S i perioden fra oktober til november 2003. Boringen er udført som en 52 mm kerneboring fra terræn til 269 mut. Fra terræn og til omkring 25 mut. blev der boret i postglaciale og glaciale lag, og fra 25 til 104 mut. blev der boret i kridt med vandførende sprækker. Under 104 mut. var der ikke tegn på vandføring af betydning i borehullet. Der blev sat et midlertidigt jernrør fra terræn til 104 mut. Herunder blev der boret i åbent hul. Prøverne blev udtaget med en 3 meter lang kernetager. Prøverne blev på borestedet pakket ind i husholdningsfilm, en aluminiumsfolie og endelig en vandtæt polymer laminat (Danisco Flexible Inc. Lyngby). Denne håndtering af kernematerialet havde som formål at hindre fordampning af porevand fra prøverne. Prøverne blev herefter bragt til DTU, hvor porevandet blev centrifugeret fra kernerne, se afsnit 4.8. Herefter blev kerneprøverne bragt til GEUS, hvor der foretoges en inspektion af kernen, og der blev udtaget prøver til bestemmelse af porøsitet og gaspermeabilitet. Udvalgte dele af kernen blev scannet for indhold af kalium, thorium og uran (spektral-gamma log). Prøver er opbevaret på GEUS.

I forbindelse med optrækning af det midlertidige jernrør, som var blevet sat ned til 104 mut., styrtede der sand ind i boringen. Der blev foretaget geofysisk borehulslogging i hullet inden denne sammenstyrning (afsnit 4.4).

4.3 Sedimentologisk prøvebeskrivelse

Der er foretaget en sedimentologisk beskrivelse af kerneprøverne fra Tune boringen. Beskrivelsen har omfattet en vurdering af litologi, struktur, flintindhold og hærtningsgrad, samt en bestemmelse af porøsitet (bilag 1). Kernen fra Karlslunde boringen er beskrevet ud fra geofysiske borehulslogs samt en visuel inspektion af kernerne.

4.4 Geofysisk borehulslogging

I forbindelse med undersøgelserne har GEUS gennemført geofysisk borehulslogging i de to nye undersøgelsesboringer, Tune (DGU Nr. 207.3841) og Karlslunde (DGU Nr. 207.3850), samt supplerende borehulslogging i de to tidligere undersøgte boringer, Lyksager (DGU Nr. 207.3579) og Ishøj Mose (DGU Nr. 207.3568). Hensigten var fra hver af boringerne at få gennemført: Spektral gamma-log (U, Th og K), total gamma-log; formationsresistivitets-log; formationsledningsevne-log (induktions-log); kaliber-log; temperatur-log (væske i borehul) og ledningsevne-log (væske i borehul) med og uden oppumpning; flow-log med og uden oppumpning. Derudover er der, med henblik på karakterisering af sprækker og forkastninger, foretaget optagelser af formationerne med en optisk televiewer sonde (televiewer-log). Loggingarbejdet er gennemført i perioden fra august til december 2003, og følgende logging program er gennemført i de enkelte boringer:

Tune boringen:

Gamma-log og spektral gamma-log, formationsledningsevne-log, formationsresistivitets-log, temperatur-log og ledningsevne-log uden pumpning, kaliber-log, flow-log ved oppumpning på 8,8 m³/timen samt optisk televiewer-log.

Lyksager boringen:

I Lyksager boringen er der tidligere gennemført geofysisk borehulslogging /33/ og der blev derfor kun udført supplerende borehulslogging. Følgende borehuls-log er opmålt i denne boring. Gamma-log, formationsledningsevne-log, temperatur-log og ledningsevne-log under en oppumpning på 36 m³/timen, kaliber-log, flow-log ved oppumpning på 36 m³/timen samt optisk televiewer-log.

Karlslunde boringen:

Gamma- og spektral gamma-log, formationsledningsevne-log og optisk televiewer-log.

Ishøj Mose boringen:

I Ishøj Mose boringen er der tidligere gennemført geofysisk borehulslogging /34/. I forbindelse med denne undersøgelse blev der derfor kun udført en optisk televiewer-log i boringen. Følgende borehuls-log benyttes fra denne boring. Gamma-log, formationsledningsevne-log, formationsresistivitets-log, temperatur-log og ledningsevne-log uden oppumpning og med en oppumpning på 10 m³/timen, kaliber-log, flow-log ved oppumpning på 10 m³/timen samt optisk televiewer-log.

4.5 Bestemmelse af hydrauliske parametre

Der er som led i projektundersøgelserne gennemført prøvepumpninger i borerne Lyksager og Tune. I Lyksager boringen blev der oppumpet med en kapacitet på $11,1 \text{ m}^3/\text{time}$, og der blev målt vandspejlsændringer i pumpeboring og en observationsboring, som står i en afstand af 93 m fra pumpeboring (DGU Nr. 207.1017). Under oppumpningen fra Tune boringen blev der pumpet med en kapacitet på $8,8 \text{ m}^3/\text{time}$. Vandspejlsændringer blev kun registreret i pumpeboringen, da der ikke findes egnede observationsboringer i passende afstand. Vandspejlsændringer blev registreret kontinuert både under oppumpning og re-tablering ved hjælp af dataloggere (af typen DIVER) suppleret med håndpejlinger som kontrol. Resultaterne er tolket med Jacobs metode /35/ primært med henblik på bestemmelse af bjergarternes transmissivitet.

4.6 Bestemmelse af porøsitet og permeabilitet

Der er bestemt porøsitet og gaspermeabilitet på kernemateriale Karlstrup Kalkgrav og borerne Lyksager, Tune og Karlslunde. Prøverne fra Karlstrup Kalkgrav og Lyksager boringen er målt på DTU, mens prøver fra Karlslunde og fra Tune borerne er målt på GEUS. Der er benyttet samme metode i de to laboratorier.

Delprøver fra borekerne blev udboret med samme metode som i feltet (afsnit 4.1.3). Fra kernerne blev udboret mindre cylindriske stykker med diameter på ca. 2,5 cm og længder mellem 2 og 5 cm (plugs). Prøvernes dimensioner blev målt med en digital skydelære ved hhv. toppen, midten og bunden af kernen. Herefter blev prøverne tørret ved 50° C i to døgn og efterfølgende vejet. Det samlede volumen af kornene i prøven kan beregnes, idet densiteten af mineralerne er kendt.

Prøvernes porøsiteter blev målt med et "EPS Helium Gas Expansion Porosimeter". Prøverne placeres i en beholder med kendt volumen og et kendt gastryk (He). Herefter udvides beholderens volumen til et nyt kendt volumen og gassen ekspanderer, hvorved der opstår et nyt tryk, som måles. Prøvens porøsitet kan herefter bestemmes ved anvendelse af Boyles lov, idet volumenet af sedimentet er kendt. Med henblik på en vurdering af usikkerheder er kerneprøvernes porøsitet blev bestemt ud fra tre uafhængige målinger ved forskellige tryk.

Prøvernes gaspermeabiliteter blev målt på et "EPS Coresystems DGP 200 Digital Gas Permeameter". Metoden anvender Darcys lov for strømning af hhv. gasser og væsker i porøse medier. Ved målingerne måles differencen i tryk over prøven ved forskellige strømningshastigheder af en gas (N_2). Prøvens gaspermeabilitet beregnes ved forskellige gennemsnitstryk. Gaspermeabiliteten afbildes herefter som funktion af det inverse gennemsnitstryk i en Klinkenberg afbildning /36/. En lineær sammenhæng mellem gaspermeabiliteten og det inverse gennemsnitstryk viser, at gassens strømning gennem prøven har foregået som en laminar strømning. Gas-permeabiliteter kan omregnes til Klinkenberg-permeabiliteter, og fra GEUS Kernelaboratorium haves følgende relation mellem gaspermeabiliteter og Klinkenberg permeabiliteter for Maastrichtkalk fra Nordsøen /37/:

$$(4.1) \quad k_k = 0,535 \cdot (k_g)^{1.13}$$

En Klinkenberg-permeabilitet er lidt større end en væskepermeabilitet, men de to typer af permeabiliteter er af samme størrelsesorden /37/.

4.7 Bestemmelse af effektive diffusionskoefficienter

Til brug i de numeriske simuleringer er den effektive diffusionskoefficient for klorid i kridt blevet bestemt på prøverne fra kernematerialet fra Karlslunde Mose boringen. Tritium er benyttet som en tracer i forsøgene. Der blev anvendt prøver fra otte zoner, hvor gammastrålingen viser, at der var forskelligt indhold af ler i kridtet. På en delprøve blev prøvernes porøsitet og permeabilitet bestemt som beskrevet i foregående afsnit. Herefter blev en ca. 1 cm skive af prøven skåret fra og denne blev indstøbt i epoxy i en glasplade med en højde på 1,0 cm, og et hul med en diameter lidt større end prøvens diameter. Glaspladen med prøve blev anbragt mellem to beholdere, som hver har et volumen på omkring 500 ml. Kontakten mellem beholderne og pladen blev gjort vandtæt ved at påføre et lag silikonefedt yderst på glaspladen.

I den nedre beholder blev der anbragt en opløsning med en koncentration af natrium på 12.180 mg/L (529,6 mmol/L) og en koncentration af klorid på 18.800 mg/L (529,6 mmol/L). Dette svarer til koncentrationen af klorid i oceanisk havvand, som må antages at have udgjort det oprindelige porevand i kridtet. Vandet blev tritieret ved tilsætning af tritium efter fire timers afgangning (Amersham phamacia, Buckinghamshire, England). Der blev benyttet en koncentration af tritium på 114 mg/L, hvilket giver en aktivitet på 185 Mbq/g (millioner Beckel per gram vand). Den øvre beholder indeholdt destilleret vand ved forsøgets start.

De to beholdere blev herefter monteret omkring prøven, så natrium, klorid og tritium, som følge af koncentrationsgradienterne, frit kunne bevæge sig fra beholderne og gennem prøvens porevand. Under forsøgene blev vandprøver udtaget med en kanyle fra de to beholdere. Da klorid og natrium er de eneste ladede ioner i opløsningen, kan koncentrationen af disse bestemmes ved måling af vandets elektriske ledningsevne. Der blev derfor bestemt en standardkurve for sammenhængen mellem koncentrationen af natriumklorid (NaCl) og vandets elektriske ledningsevne (Bilag 2). Vandets elektriske ledningsevne er opgivet ved 25° C. Prøvevandet til bestemmelse af vandets elektriske ledningsevne blev efter målingerne atter tilsat forsøget, for herved at reducere væggtabet under forsøget. Til bestemmelse af koncentrationen af tritium blev der udtaget ca. 2 ml prøve. Prøvernes præcise volumen blev bestemt ved vejning. Prøven blev opbevaret ved 7° C i et 5 mL polyethylen bæger (BN plastic chemical instruments, København, Danmark). Inden måling blev prøverne tilsat 3 mL scintillationsvæske af mærket Ultima Gold (Packard Instrument Co. Boston, USA). Målingerne af radioaktiviteterne blev udført ved måling af beta stråling i en scintillationstæller (Winspectral 1414 Liquid Scintillation Counter, Wallac, USA). Til konstruktion af en standardkurve blev der målt med forskellige mængder af stamopløsning fra forsøgene (0,02; 0,05; 0,10; 0,20; 0,50; 1,00, 1,50 og 2,00 mL) tilsat 3 mL scintillationsvæske. Prøverne blev herefter tilsat destilleret vand til en samlet volumen på 5 mL. Alle prøverne med stamopløsninger blev målt tre gange, og gennemsnit blev beregnet.

4.8 Udtagning af porevand fra kernestykker

Stykker af kernerne fra Karlslunde boringen blev centrifugeret, hvorved en del af porevandet blev presset ud af kridtet. Metoden er beskrevet af Edmunds og Bath /38/. Kernematerialet fra intervallet 35-49 mut. er meget opknust, og vand fra borearbejdet har derfor med stor sandsynlighed påvirket vandkemien i disse prøver. Der blev derfor ikke udtaget prøver fra dette interval. Fra 49 til 69 mut. blev der udtaget prøver for hver meter, og fra 69 til 269 mut., blev der udtaget prøver for hver anden meter.

Kernestykker med en længde på omkring 10 cm blev knust i en morter. De knuste prøver blev herefter centrifugeret i 25 minutter ved 4500 omdrejninger/min, hvilket svarer til en kraftpåvirkning som 2.700 gange jordens tyngdeacceleration. Volumen af de udtagne vandprøver var typisk ca. 40 cm³. For at kontrollere om den benyttede metode gav reproducerbare resultater, blev prøvetagningen gentaget fire gange i fire forskellige dybder, og der blev bestemt elektrisk ledningsevne på det centrifugerede vand. Denne kontrol viste, at man med den benyttede metode kan reproducere resultaterne tilfredsstillende. For en yderligere beskrivelse af de benyttede metoder kan henvises til /39/.

4.9 Kemiske analyser

Porevandets elektriske ledningsevne blev bestemt umiddelbart efter centrifugeringen med et Microprocessor Conductivity Meter LF 539. (Ft. Myers, Florida, USA). De målte værdier er opgivet ved 25° C. Porevandets koncentration af klorid og sulfat er bestemt på en HPLC ionkromatograf.

Porevandets ¹⁸O/¹⁶O forhold er målt massespektrometrisk (typen SIRA 10 IRMS fra VG Isotech) på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Målingerne er foretaget ved at etablere en isotopligevægt mellem vand og kuldioxid /40/. δ^{18} værdier er opgivet i forholdet til standarden VSMOW. Målenøjagtigheden er 0,1 ‰ for enkelt og 0,07 ‰ på dobbeltbestemmelser.

4.10 Modelling af saltvandsudvaskning

I porevandet i en geologisk formation foregår transporten af opløste ioner i vandet ved en kombination af advektion og diffusion. Ved en advektiv transport er de styrende parametre bjergartens hydrauliske ledningsevne, porøsitet samt den hydrauliske gradient, som driver strømmingen. Ved en diffusiv transport er de styrende parametre bjergartens effektive diffusionskoefficient for den pågældende ion samt koncentrationsgradienten i porevandet.

I tilfælde af saltvandsudvaskning er der yderligere det komplicerende forhold, at da saltvand er tungere end ferskvand, vil der være store forskelle i densitet, og de to vandtyper opblandes derfor ikke umiddelbart. Der er derfor mulighed for at få udviklet et strømnings-system, hvor ferskvandet strømmer over det tungere saltvand.

4.10.1 Advektiv grundvandstrømning i bjergarter

Grundvandsstrømningen i et porøst, mættet medium kan beskrives vha. Darcys lov:

$$(4.2) \quad q_i = -K_{ij} \frac{dh}{dx_j} \quad i, j = 1, 2$$

Strømningen antages at være stationær, dvs. der sker ingen ændringer i det hydrauliske potentiale, og dermed Darcy-hastigheden, over tiden.

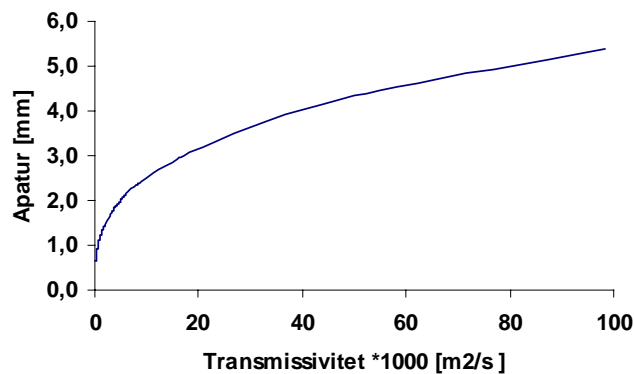
Grundvandsstrømning i opsprækkede bjergarter kan ideelt beskrives som strømning mellem to parallelle plader. Den hydrauliske ledningsevne af en sprække kan bestemmes til:

$$(4.3) \quad K_f = \frac{\rho g (2b)^2}{12\mu}$$

Da en bjergarts transmissivitet er givet ved dens hydrauliske ledningsevne multipliceret med tykkelsen af den vandførende zone, som i en sprække kan sættes lig aperturen, er transmissiviteten af en sprække givet ved:

$$(4.4) \quad T_f = \frac{\rho g (2b)^3}{12\mu}$$

Det kan beregnes med (4.4) at transmissiviteten af en sprække med en apertur på 5.4 mm er $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, figur 4-1. Dette svarer til de største transmissiviteter, der observeres i kalkmagasinerne på Sjælland, hvor transmissiviteten typisk er mellem 10^{-3} og $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ /41/. Vandføringen i et kalkmagasin kan altså komme fra få sprækker med en apertur på få mm. Det forventes imidlertid, at de fleste sprækker vil have en apertur, der er mindre end 1 mm.



Figur 4-1 Beregnet transmissivitet i en sprække vha. ligning 4.4

4.10.2 Modelkoncepter

Barker /29/ foreslår, at der i forbindelse med modellering af stoftransport i opsprækkede bjergarter skelnes mellem *dobbeltporøse* og *dobbeltpermeable* bjergarter. For en dobbeltporøs bjergart er den advektive strømning i matrix så langsom, at der kan ses bort fra denne i beregningerne. Den advektive transport af grundvandet foregår i sprækkerne, og stofudveksling mellem sprækker og matrix foregår ved diffusion. I et dobbeltpermeabelt system kan der ikke ses bort fra den advektive transport i matrix, og der beregnes en transport i både sprækker og matrix. Der vil også i dette system foregå en diffusiv stofudveksling mellem matrix.

Følgende modelkoncepter er foreslået anvendt ved stoftransport i opsprækkede bjergarter:

- Ækvivalent porøst medium model
- Diskret sprækkemodel
- Dobbelt porøse model

Ækvivalent porøst medium model:

En ækvivalent porøs model er en homogen, porøs model med valg af hydrauliske parametre som tilfredsstillende kan beskrive strømningforholdene i en opsprækket bjergart. Denne type modeller benyttes ofte i forbindelse med vandbalcestudier af større oplande med opsprækkede bjergarter.

Diskret sprækkemodel:

I den diskrete sprækkemodel beskrives de enkelte sprækker explicit, hvilket betyder, at sprækkernes placering og hydrauliske egenskaber skal specificeres. Strømningen og transporten i både sprækkerne og den omkringliggende matrix beregnes, og udvekslingen af vand og stof mellem de to domæner beskrives. Denne måde at håndtere et opsprækket medium på stiller store krav til både beregningsparametrene samt beregningstid.

Dobbelt porøs model:

I det dobbelt porøse modelkoncept beskrives det opsprækkede medium så både sprækker og matrix er til stede i hele modelområdet. Det antages, at den advektive strømning kun foregår i sprækkedomænet, og at der kan foregå en diffusiv udveksling af opløst stof mellem sprækkesystemet og matrixen. Dobbeltporøs modellen stiller ingen krav til viden om sprækkernes placering.

I denne undersøgelse er de numeriske simuleringer af saltvandsudvaskningen udført med koden FRACTRAN /42, 43/. Med denne kode kan foretages beregninger med alle tre ovennævnte typer af modelkoncepter. Modsat andre konventionelle numeriske koder, så løser stoftransportligningen i FRACTRAN ikke i tidsdomænet, hvilket gør det muligt indenfor en relativt kort simuleringstid at modellere udbredelsen af stoftransport over meget lange tidshorisonter. Dette er nødvendigt, når grænsen mellem fersk- og saltvand ønskes bestemt, da udvaskningen af marine aflejringer er en proces, der foregår over lange tidsrum (geologisk tid). Simuleringer med FRACTRAN kan kun foretages som en- eller to-dimensionale beregninger.

4.10.3 Stoftransport i en porøs medium model

Konservativ stoftransport i en porøs model beskrives vha. advektions-dispersions-ligningen

$$(4.5) \quad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{q_i}{\theta} \frac{\partial c}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2$$

Den mekaniske dispersion og diffusion kan beskrives ved ligningen:

$$(4.6) \quad \begin{aligned} D_{11} &= (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_1^2}{|v|} + \alpha_T |v| + D_{eff} \\ D_{22} &= (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_2^2}{|v|} + \alpha_T |v| + D_{eff} \\ D_{12} &= D_{21} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_1 v_2}{|v|} \\ |v| &= \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \end{aligned}$$

Porevandshastigheden er givet ved

$$(4.7) \quad v_i = \frac{q_i}{\theta}$$

Den effektive diffusionskoefficient, der kan beskrives som

$$(4.8) \quad D_{eff} = D_f \theta$$

En beregning af den tid det tager at transportere en ion afstanden x meter kan som en tilnærmelse beregnes med ligningen:

$$(4.9) \quad t = \frac{x^2}{2 * D_{eff}}$$

4.10.4 Stoftransport i diskret sprækkemodel

Stoftransport i en diskret sprækkemodel foretages vha. de samme ligninger som beskrevet for det enkeltporøse medium. Der skal imidlertid specificeres transportparametre for både matrix og sprækker (dispersiviteter, porøsiteter, effektive diffusionskoefficienter).

4.10.5 Stoftransport i dobbelt-porøst model

Den styrende ligning for stoftransporten i en dobbelt porøs model er givet ved:

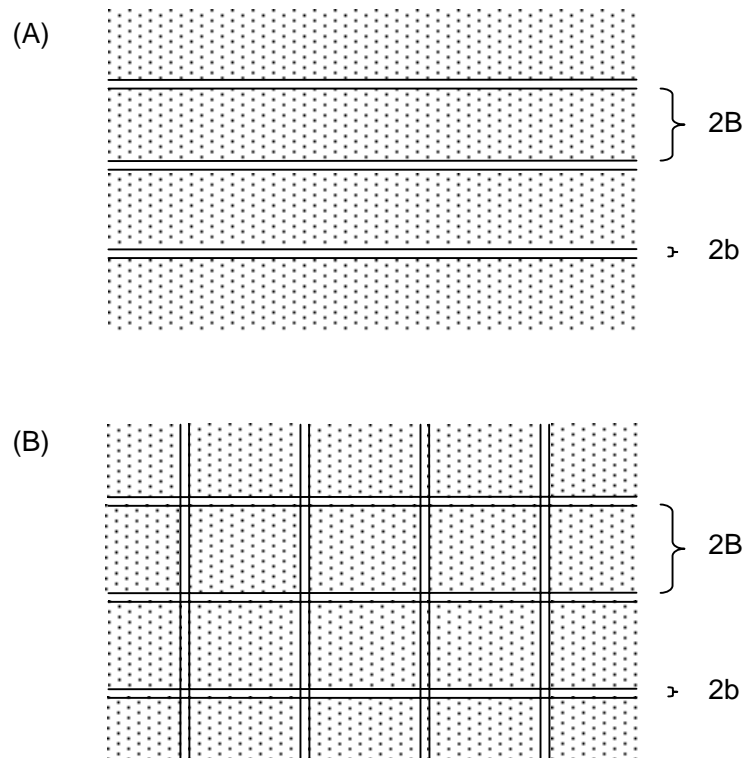
$$(4.10) \quad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\beta}{\theta_f} (c_m - c_{im}) = 0 \quad ; \quad i, j = 1, 2$$

Masseudvekslingskoefficienten (β) betinger udvekslingen mellem den mobile og den immobile zone. Den styrende ligning for koncentrationen i den immobile zone er for et konservativt stof givet ved:

$$(4.11) \quad \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \frac{\beta}{\theta_{im}} (c_m - c_{im})$$

Det ses heraf, at tilvæksten i koncentrationen i den immobile zone er ligefrem proportional med forskellen i koncentrationen mellem de to zoner. Dette skyldes, at FRACTRAN's dobbelt-porøse modelkode er baseret på en førsteordens tilnærmelse med hensyn til stofudvekslingen, således at der ikke tages hensyn til, at det tager tid for stoffet at diffundere ind til midten af den immobile zone /43/.

Ved konceptualisering i en opsprækket model benyttes ofte enten et system bestående af parallelle sprækker eller et bestående af ortogonale sprækker, figur 4-2.



Figur 4-2 Illustration af (A) system med parallelle sprækker og (B) system med ortogonale sprækker. 2b angiver aperturen af sprækkerne, mens 2B er afstanden mellem sprækker.

Porøsiteten i den mobile del af modellen svarer til den del af det samlede volumen, hvor vandet kan strømme frit, således at porøsitet i et opsprækket medium svarer til volumen af sprækkerne i forhold til det totale volumen. I et system med parallelle sprækker med aper- turen $2b$ adskilt af matrix med tykkelsen $2B$ kan sprækkeporøsiteten findes til

$$(4.12) \quad \theta_f = \frac{b}{b+B}$$

mens der for et system bestående af to ortogonale sæt sprækker kan beregnes en spræk- keporøsitet ved:

$$(4.13) \quad \theta_f = 2 \frac{b}{B}$$

Da den immobile zone svarer til bjergartsmatrix, skal den immobile porøsitet (θ_{im}) være lig bjergartens matrixporøsitet.

Alternative antagelser omkring sprækkesystemet kan også udtrykkes gennem masseud- vekslingsparameteren, β . Hvis den immobile zone antages at bestå af enten kugler eller plader kan der udledes analytiske udtryk for masseudvekslingskoefficienten. For et medium bestående af for eksempel parallelle sprækker, kan masseudvekslingsparameteren udtryk- kes ved:

$$(4.14) \quad \beta = \frac{3\theta_{im} D_{eff}}{B^2}$$

mens der for et medium bestående af kugler, omkring hvilke den preferentielle strømning foregår, tilsvarende kan findes følgende udtryk

$$(4.15) \quad \beta = \frac{15\theta_{im} D_{eff}}{r_0^2}$$

Som en tilnærmelse kan dette udtryk benyttes på et system med to ortogonale sæt af sprækker, hvor $r_0 = B$.

4.10.6 Den dominerende proces for udvaskningen af saltvand

Om stoftransport i en bjergart hovedsagelig foregår som følge af en advektiv transport eller som følge af diffusion er betinget af forholdet mellem den tid det tager at transportere oplø- ste ioner med de to processer. Bear /44/ indførte Pecklet-tallet til vurdering af dette, og dette tal er givet ved ligningen:

$$(4.16) \quad P_c = \frac{L_d K \frac{dh}{dx}}{\theta_{im} D_{eff}}$$

Hvis $P_c < 1$ er transporten domineret af diffusion, mens transporten for $P_c > 1$ i stigende grad vil være domineret af advektion.

4.10.7 Densitetsstrømning i opsprækkede bjergarter

Eventuelle densitetsrelaterede påvirkninger af grundvandsstrømning og stoftransport er ikke evalueret i nærværende sammenhæng. Dette skyldes en formodning om, at udvaskningen af klorid primært er styret af sprækkernes placering samt forskelle i effektiv hydraulisk ledningsevne mellem opsprækkede og ikke opsprækkede bjergarter. Desuden er det ikke muligt at inkludere densitetseffekter i den numeriske model FRACTRAN. Densitetseffekter resulterer dels i, at strømningens løsningsmetode ikke kan antages at være stationær, da udviklingen i koncentration påvirker strømningen, og det er derfor nødvendigt at løse grundvandsstrømningen som en ikke stationær proces. Desuden resulterer densitetspåvirkninger i ikke-lineære effekter, som gør det umuligt at anvende den løsningsmetode, som FRACTRAN er baseret på, se nedenfor. For at kvantificere effekten af densitetsforskelle skal der derfor benyttes en numerisk model med en konventionel håndtering af tidsdomænet, hvor tiden opdeles i endelige intervaller. Hermed vil det være problematisk at simulere en udvaskningsproces, som udstrækker sig over 1 – 2 mio. år, da det vil kræve meget lang simuleringstid.

4.10.8 Numerisk løsning

Ved beregninger med FRACTRAN koden løses først ligningerne for en stationær grundvandsstrømning, og dette gennemføres med Galerkins metode /43/. I denne metode anvendes Darcy's lov uden forudgående Laplace-transformering, da tiden ikke indgår i strømningens ligningerne.

Ligningerne for stoftransport Laplace-transformeres før de løses ved hjælp af Galerkins metode. Laplace-transformation benyttes til en tidsafhængig funktion, og foregår ved at integrere funktionen fra tiden 0 til uendelig. Da integralet er "bestemt", forsvinder tiden i den Laplace-transformerede funktion, der til gengæld bliver afhængig af Laplaceparameteren (p).

Nedenstående formel viser hvordan funktionen $f(t)$ bliver Laplace-transformeret til funktionen $F(p)$

$$(4.17) \quad F(p) = L(f(t)) = \int_0^{\infty} e^{-p \cdot t} \cdot f(t) dt$$

Efter Laplace-transformeringen fremkommer lineære differentialligninger med konstante koefficienter (advektions-dispersions-ligningen er et eksempel herpå) som almindelige algebraiske ligninger, hvilket gør løsningen af ligningskomplekser med differentialligninger mindre beregningskrævende. Tidsdomænet indføres atter i beregningerne ved hjælp af en invers Laplace-transformation.

Ved beregninger med koden FRACTRAN fremkommer således en løsning i Laplace-domænet, som er uafhængig af tiden. Derfor er det kun nødvendigt at lave én simulering, selv om koncentrationerne til flere tidspunkter ønskes fundet, da løsningen som nævnt ovenfor kan transformeres til tidsdomænet og for flere forskellige tidspunkter. Ved FRACTRAN's fremgangsmåde opnås som det vigtigste en stor besparelse i beregningsarbejdet ved simulering over lange tidsperioder. De store gradienter, der kan forekomme i løbet af simuleringsperioden, som følge af hurtig udvaskning i sprækker i forhold til i matrix eller som følge af grov diskretisering, har desuden ringe risiko for at resultere i ustabiliteter, hvilket gør modellen mere robust og muliggør en langt grovere diskretisering end ved simulering i tidsdomænet /42, 43/.

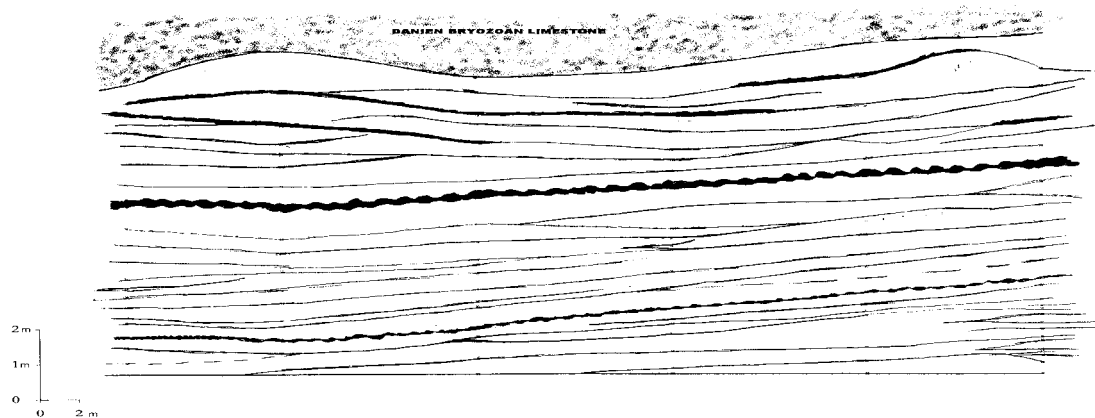
5. Resultater

5.1 Opmåling af sprækker i Skrivekridt og Danienkalken

5.1.1 Skrivekridt

Følgende karakteriseringen af sprækker i Skrivekridtet er baseret på opmålinger foretaget på Stevns Klint af Bonnesen /13/. Den undersøgte blotning er omkring 50 m lang og 8 m høj. Opmålingerne er foretaget i de øverste 8 meter af kridtet, umiddelbart under Fiskeleret, som er overgangen til Danienkalken. Blotning er orienteret omtrent nord-syd (strygning: 25-205°).

I kridtlagene ved Stevns Klint, ses lagparallelle sprækker, som optræder med afstande mellem 0,07 og 1,50 m, figur 5-1. Baseret på opmåling af 134 sprækker er der beregnet en middelfast mellem sprækkerne på 0,40 m. Da der i den øverste del af kridtet (gråkridtet) forekommer bankelignende strukturer har de lagparallelle sprækker her større hældninger. Sprækkernes hældning er under 20°, og de må karakteriseres som subhorizontale sprækker.

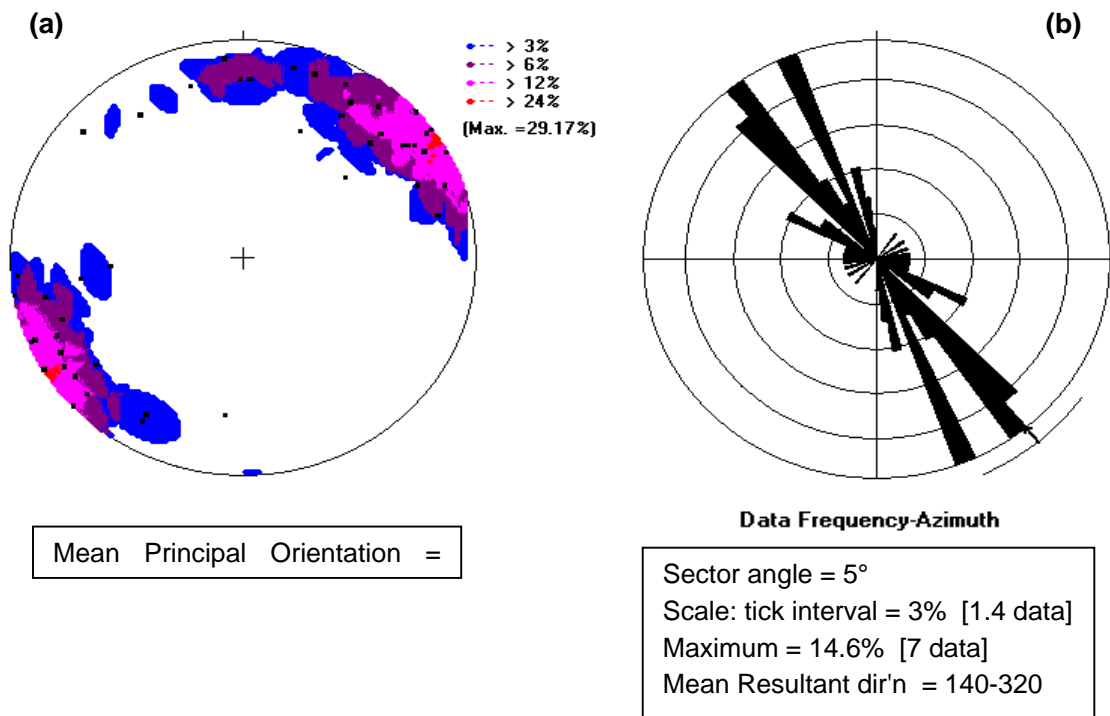


Figur 5-1 Skitse med fordelingen af lagparallelle sprækker i Skrivekridt fra blotning ved Stevns Klint. Kontinuerte flintlag er markeret i tegningen. Fra Bonnesen /13/.

I kun omkring halvdelen (48 %) af de subhorizontale sprækker er der indikation på grundvandsstrømning. Vandføringerne forekommer oftest i mere eller mindre veldefinerede kanaler, og den gennemsnitlige afstand mellem disse er 2,4 m. I felten kan kanalerne erkendes ved udfældning af jernoxider.

Forekomsten af subvertikale eller intermediære sprækker i kridtet er undersøgt langs et horisontalt transsekt i blotningen. I alt 48 sprækker skærer dette transsekt, 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° (figur 5-2), hvor 140° og 160° er de 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 er i den undersøgte blotning 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 subhorizontale, de fleste skærer to eller tre subhorizontale sprækker.



Figur 5-2 a) Kontureret stereografisk projektion af afbildninger af de subvertikale sprækkers orientering langs det undersøgte transekt. (b) Rose diagram med subvertikale sprækkers strygninger. Plot produceret og præsenteret med GEOrient /33/.

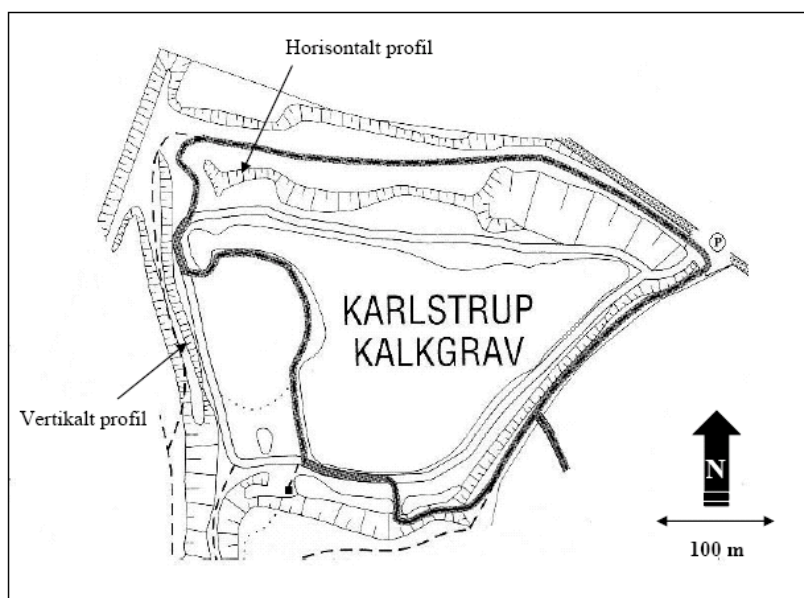
Der er stor overensstemmelse mellem resultaterne af Rosenbom og Jakobsens /12/ opmålinger af sprækker i kridt i Sigerslev Kalkbrud og ovenstående fra Stevns Klint. I deres undersøgelse blev det påvist, at i den øvre del af profilet er middelfstanden mellem de subhorizontale sprækker 0,2 m, og i den nedre del er den 0,4 m. Der blev påvist fire sæt subvertikale sprækker i kridt, og længde af og afstande mellem disse er af samme størrelse som rapporteret af Bonnesen /13/.

Sammenfattende kan det siges, at undersøgelserne af sprækkerne i Skrivekridt på Stevns viser, at der i de øverste meter af formationen forekommer et tilnærmelsesvist ortogonalt netværk, som er defineret af forekomsten af subhorizontale og subvertikale sprækker. Disse sprækker opdeler Skrivekridtet i matrixblokke, med en horisontal dimension på op mod 5,00 m (gennemsnitlængde på 0,96 m), og en vertikal dimension på mellem 0,07 og 1,50 m (Gennemsnit på 0,4 m). Omkring halvdelen af de subhorizontale sprækker er vandførende,

og der synes at forekomme en kanalisering af vandet. Afstande mellem kanalerne er omkring 2,4 m.

5.1.2 Danienkalk

I Karlstrup Kalkgrav har overgangen mellem Skrivekridt og Danienkalken tidligere været synlig i gravens nordøstlige hjørne /45/. Som ved Stevns Klint er grænselaget her udviklet som et omkring 10 cm tykt lag af mergel eller ler. I graven repræsenterer de blottede lag af bryozokalken således de nederste enheder af Danienkalken.



Figur 5-3 Karlslunde kalkgrav med angivelse af lokaliseringen af det opmålte vertikale og horisontale profil.

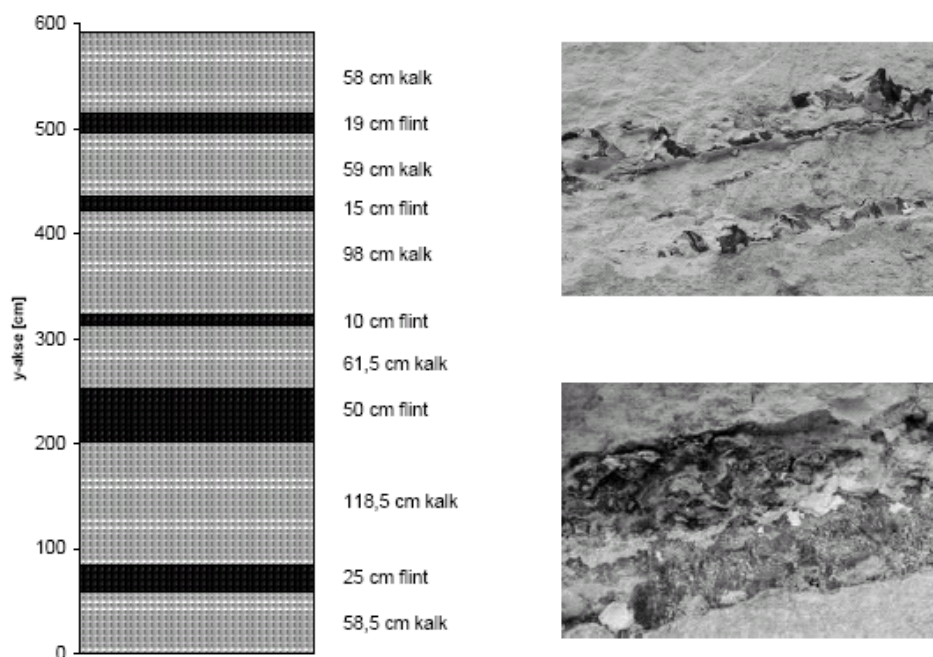
I Karlstrup Kalkgrav er der i september og oktober 2003 opmålt ét horisontalt og ét vertikalt profil i bryozokalken /27/. Lokaliseringen af profiler i graven fremgår af figur 5-3. Det vertikale profil er opmålt i en bryozobanke, der er omkring 10 m høj og 60 m lang, og flankernes hældning er omkring 14°, figur 5-4. Da strukturen har form som en aflang dome, forekommer hældninger af kalklagene i alle retninger.



Figur 5-4 Bryozobanke i nord-syd orienteret væg i den vestlige del Karlslunde Kalkgrav. Det vertikale profil er opmålt i denne bankestruktur. Figur 5-5 viser de nederste 6 meter af banken.

Bryozokalkens tekstur og hårdhed varierer meget i de undersøgte profiler. Dette gælder variationer indenfor den enkelte kalkbænk, men også fra lag til lag. De mest velcementerede dele af bjergarten optræder som hårde kalksten, men hvor kalken er mindre cementeret smuldrer bjergarten i hånden. I bryozobankerne forekommer parallelle lag af flintudfældninger.

I det undersøgte vertikale profil er mægtigheden af kalkbænkene mellem 0,58 og 1,19 m, med en middelværdi på 0,79 m, figur 5-5. Flintlagenes mægtighed varierer mellem 0,10 m og 0,50 m med en middelværdi på 0,24 m. Flintlagene optræder i forskellige former, idet nogle af lagene forekommer som massive bænke af sort eller grå flint, mens andre er usammenhængende og knoldede lag af uregelmæssig udbredelse (figur 5.5). I alt udgør kalkbænkene omkring 80 % af sekvensen, mens flintlagene udgør de resterende 20 %.



Figur 5-5 Til venstre i figuren ses de nederste 6 meter af den opmålte bryozobanke, med fordeling af kalk- og flintlag. Til højre ses fotografier af forskellige former af flintlag i sekvensen. Det øverste foto viser et 0,5 m tykt, usammenhængende flintlag, og det nederste viser et mere sammenhængende flintlag.

I Danienkalken forekommer både subhorizontale og subvertikale sprækker. De subhorizontale sprækker optræder især i kontakten mellem kalk og flintlag, eller mere sjældent internt i de kalkbænke, hvor kalkens indhold af ler varierer. De subhorizontale laghældninger er kontrolleret af flankernes hældning i bankerne. Afstanden mellem de subvertikale sprækker er typisk 3-4 meter, men disse kan sjældent følges fra en kalkbænk til den over- eller underliggende. Jakobsen og Klitten /11/ opgiver en orientering af disse subvertikale sprækker på 170°. Flintlagene er også mange steder kraftigt opsprækkede både i horisontal og vertikal retning, og de optræder derfor næppe som lavpermeable barrierer for grundvandets strømning i bjergarten.

Som følge af erosion af væggen i kalkgraven er sprækkernes aperturer vanskelige at bedømme, men er formentlig få millimeter.

Sammenfattende med hensyn til sprækkemønsteret af bryozobankerne i Danienkalken kalker viser den visuelle undersøgelse af sedimenterne i Karlstrup Kalkgrav, at: 1) Der forekommer subhorisontale og vertikale sprækker i kalken som danner et subortogonalt netværk af blokke, 2) Mægtigheden af kalkbænkene, og dermed afstanden mellem overgange til flintlag, er mellem 0,58 og 1,19 m, og hvor bjergarten er mest opsprækket forekommer subhorisontale sprækker for hver halve eller hele meter. De observerede subvertikale sprækker for hver 3-4 meter kan fungere som forbindelse mellem de subhorisontale sprækker. 3) Bjergartens cementering i matrix er varierende fra meget velcementerede til svagt cementerede lag. 4) Flintlagene er som kalken opsprækket, og synes således ikke at udgøre impermeable enheder i kalken.

5.2 Borehulsundersøgelser

Beskrivelsen af kerner fra Tune boringen fremgår af Bilag 1. Sedimentprøver fra Ishøj Mose boringen er beskrevet i Morthorst og Clausen /34/ og prøverne fra Lyksager boringen er beskrevet i Morthorst et al. /33/. I det følgende beskrives resultaterne af de geofysiske logs fra de fire boringer samt de overordnede resultater af de sedimentogiske beskrivelser. I Lyksager boringen er gennemført geofysisk borehulslogging i flere omgange, og boringen er tillige blevet ombygget. Disse forhold er ikke tidligere beskrevet samlet, og de vil derfor blive omtalt detaljeret. Resultaterne af sprækkarakterisering af boringerne med optisk televiver-log vil blive omtalt i et senere afsnit (5.3).

5.2.1 Karlslunde boringen

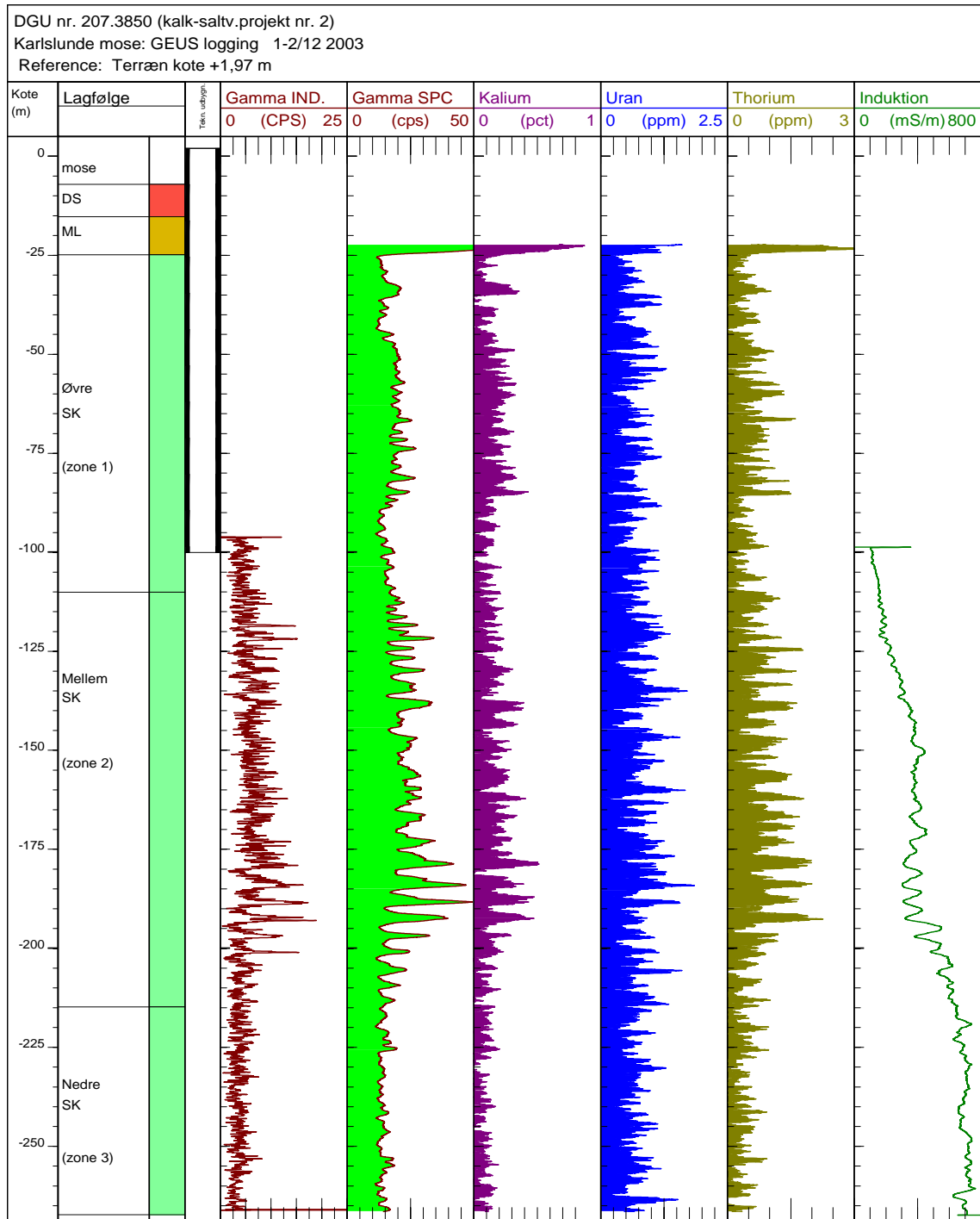
Karlslunde boringen (DGUnr. 207.3850) blev kerneboret til 269 meters dybde. På tidspunktet for borehulslogging var boringen forsynet med et 110 mm stålforerør fra terræn (kote ca. +2,00 m) og til omkring 104 mut.. I boringen er mægtigheden af de glacielle lag omkring 25 m, og Skrivekridtet træffes under disse lag i kote -23 m. På baggrund af indholdet af ler i kridtet, kan den gennemborede lagserie opdeles i tre sekvenser, figur 5-6. Boringens rovandsspejl er omkring 0,5 m u.t

Spektral gamma-log:

Den øvre sekvens (Zone 1) fra 25 til 110 mut., er karakteriseret ved en generel gammastråling i matrix af ren kalcit på 15-20 CPS (counts per seconds). Omkring 35 mut. og i intervallet fra 65 til 85 mut. forekommer enkelte horisonter med en gammastråling op mod 25 CPS. Resultatet af spektral-gamma loggen viser, at den forhøjede gammastråling de fleste tilfælde skyldes forhøjede koncentrationer af kalium og thorium, og i færre tilfælde tillige et forhøjet indhold af uran.

En geologisk inspektion af kerneprøverne viser, at disse horisonter med forhøjet gammastråling er mergellag med et højere indhold af lerminerale i kridtet. Lagene har typisk en mægtighed på 5-10 cm.

Den mellemste sekvens (Zone 2) fra 110 til ca. 215 mut. er, som den øvre Zone 1, karakteriseret ved en gammastråling i de rene lag af kridt på omkring 15-20 CPS. I denne sekvens forekommer der tillige mange mergellag med en forhøjet gammastråling på op mod 30 CPS, og enkelte i dybdeintervallet 175-200 mut. med gammastråling på op til 50 CPS.



Figur 5-6 Geofysiske logs i Karlslunde boringen. Gamma IND er en gamma-log målt med en induktions-sonde; Gamma SPEC er en sum af de enkelte spektral-log målinger; Kalium, Uran og Thorium angiver beregnede koncentrationer af disse elementer; og Induktion-log viser den målte formationsledningsevne.

Det ses af gamma-loggen, at mergellagene optræder rytmisk, figur 5-6. I den øvre del af sekvensen er afstanden mellem mergellagene omkring 2 m, mens afstanden i den nedre del af sekvensen er omkring 5 m. Gennemsnitlig er der en højere gammastråling i Zone 2 sammenlignet med zone 1, figur 5-6.

Den nedre sekvens (Zone 3) fra 215 til 269 mut. er karakteriseret ved en relativt lav gammastråling, idet den kun er 10-15 CPS. I denne zone ses koncentrationen af kalium og thorium generelt at være mindre end i de to foregående, medens indhold og variation i uran svarer til den øvre sekvens.

Formationsledningsevne-log (Induktions-log):

Formationsledningsevnen i Skrivekridtet stiger generelt med dybden fra omkring 100 mS/m ved 104 mut. til omkring 700 mS/m ved boringens bund. Gradienten i formationsmodstanden er størst på de første 50 m, hvor den er 6 mS/m/m. I intervallet herfra og til 190 mut. er formationsledningsevnen tilnærmelsesvist konstant omkring 400 mS/m. Fra 190 til bunden i dybden 269 mut. forøges formationsledningsevnen fra 400 til omkring 700 mS/m, det vil sige med en gennemsnitlig gradient på 3,6 mS/m/m.

Den påviste stigning i formationsledningsevne med stigende dybde skyldes en stigning i indholdet af porevandets opløste ioner (afsnit 5.5, figur 5-21). Formationens elektriske ledningsevne er imidlertid også påvirket af bjergartens porøsitet samt indholdet af ler, hvilket ses af den tilnærmelsesvise konstante ledningsevne i den nedre del af Zone 2. Dette vil blive omtalt yderligere i afsnit 5.5.

Tolkning:

På grund af et varierende indhold af ler (tolket ud fra gamma-loggen) kan de gennemborede ca. 245 m af kridt i Karlslunde boringen inddeles i tre sekvenser (figur 5-6). Den rytmiske udvikling i sedimentationen i den mellemste sekvens kan skyldes variationer i de klimatiske forhold i denne del af Maastrichtian perioden. Forskelle i kalkbjergartens indhold af ler vil medføre vertikal variation i de hydrauliske egenskaber, herunder porøsitet, permeabilitet og effektiv diffusionskoefficient, se afsnittene 5.6 til 5.7. Her ses tillige det overraskende, at induktions-loggen afspejler de markante mergellag ved minima, dvs. mindre elektrisk ledningsevne. Dette må skyldes, at kridt med en høj porøsitet med stærkt ledende porevand er delvist substitueret af ler med en mindre formationsledningsevne end saltvand. I kridt med ferskvand vil mergellag altid resultere i en højere formationsledningsevne.

Hvis saltvandsgrænsen i kridtet defineres ved en formationsledningsevne højere end 25 mS/m (omkring 300 mg/l), findes saltvandsgrænsen ikke i det interval, hvor der er opmålt induktions-log, det vil sige, at grænsen findes over dybden 104 mut. På porevandsprøver fra kernematerialet er det påvist, at saltvandsgrænsen ligger omkring kote -67 m, se afsnit 5.5.

5.2.2 Ishøj Mose boringen

Ishøj Mose boringen er 99 meter dyb, og den har et 350 mm stålførerør fra terræn (kote + 10,5 m) og til omkring 30 mut. Boringen står åben under førerøret. Rovandsspejlet i boringen står omkring 2,0 mut. Den geologiske beskrivelse af sedimentprøver fra boringen viser, at mægtigheden af de kvartære lag her er omkring 26 m, og disse består af smeltevandsler, moræneler og sand /34/. Danienkalken er truffet i 26 mut. (kote -16 m), og er beskrevet som en kalksandkalk. Danienkalken er ifølge boreprofilet gennemboret allerede ca. 31 mut., således at Skrivekridtet skulle være truffet i kote ca. -21 m. Boringens bund i dybden 99 mut., svarer til kote ca. -89 m.

Formationsresistivitets-log:

Det fremgår af formationsresistivitets-loggen, at grænsen mellem Danienkalk og Skrivekridt er truffet omkring 40 mut. (Kote -30 m). Resistiviteten i kalken er, som følge af en større cementering, høj, omkring 50 ohmm, mens den i Skrivekridt ses at være mindre end 20 ohmm, og faldende med dybden til 5 ohmm. Mægtigheden af Danienkalken på borestedet er således omkring 14 m.

Gamma-log:

Den målte naturlige gammastråling i boringen bekræfter, at grænsen mellem moræneler og sand findes omkring 16 mut. Herunder findes øjensynligt sand med varierende indhold af ler. Den naturlige gammastråling i Danienkalken og Skrivekridtet er ret ensartet og lav med værdier omkring 5-10 CPS. Der ses kun få indikationer på lag af ler eller mergel i denne gennemborede sekvens af Skrivekridtet, fx i kote -52 m til -54 m, samt i boringens nederste ca. 8 m. Mergellaget omkring 12 m under Skrivekridtets øvre grænse er et lag, som kan følges regionalt i dette område (Kølbygård Merglen) /15/.

Formationsledningsevne-log (induktions-log):

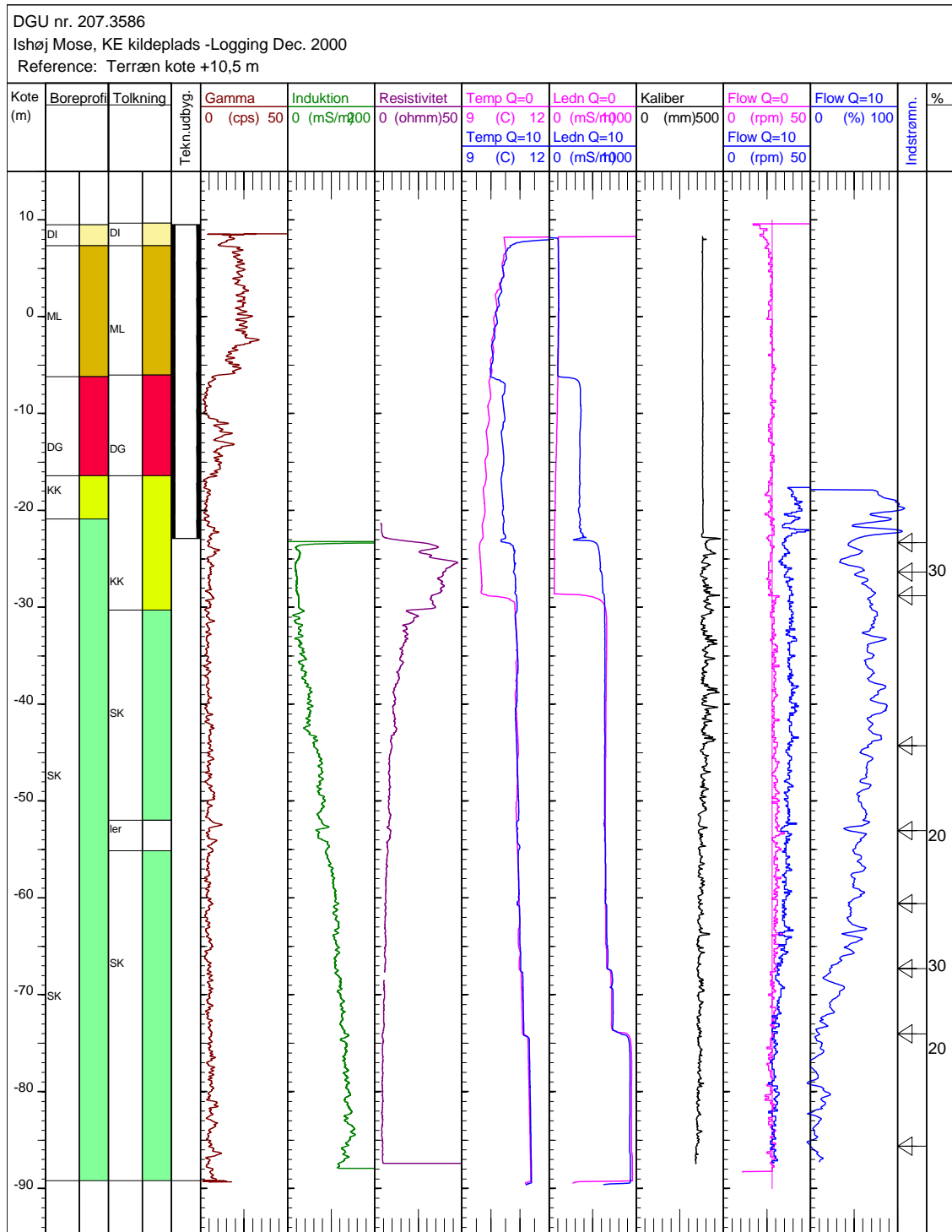
Induktions-loggen har et modsat udsving af formationsresistivitets-loggen, og viser følgelig i Skrivekridtet en jævnt stigende formationsledningsevne med stigende dybde. Ved overgangen mellem Danienkalken og Skrivekridt er formationsledningsevnen således omkring 20 mS/m, og stigende til omkring 150 mS/m i ca. 95 m dybde (kote -85 m). Dette giver en gradient i formationsledningsevnen på 2,4 mS/m/m. Hvis der benyttes en formationsfaktor på 4,0 øverst i Skrivekridtet (afsnit 5.6), svarer en formationsledningsevne på omkring 20 mS/m til en elektrisk ledningsevne i porevandet på 80 mS/m. Dette svarer til en koncentration af klorid på omkring 280 mg/l (Bilag 2).

Nederst i boringen viser ledningsevne-log, med og uden oppumpning, at porevandet i borehullet har en ledningsevne på ca. 950 mS/m. Sammenholdt med formationsledningsevnen på 150 mS/m er formationsfaktoren her således ca. 6,3. Denne lidt højere formationsfaktor bekræfter gamma-loggens indikation af et større lerindhold nederst i boringen. Koncentration af klorid nederst i Skrivekridtet kan beregnes til at være ca. 3.800 mg/l.

Indstrømningszoner i Ishøj Mose boringen:

Både temperatur-log som ledningsevne-log med og uden oppumpning i Skrivekridtet viser stort set samme værdier og log-mønstre, dvs. trinvist faldende værdier opad. Dette indikerer, at der i begge situationer sker indstrømninger i de samme zoner, og at der uden pump-

ning er en opadrettet strømning, som udstrømmer til en zone i kote -29 m, dvs. nederst i Danienkalken.



Figur 5-7 Geofysisk log fra Ishøj Mose boringen. DI angiver smeltevandsler, ML moræneler, DG smeltevandssand, KK kalksandskalk og SK angiver Skrivekridt.

Flow-loggen uden pumpning bekræfter denne interne strømning opad i Skrivekridtet med udstrømning i kote ca. -29 m, idet tællertallene fra kote -67 m og op til -29 m ligger en anelse højere end basistællertallet oppe i forerøret, hvor der ingen strømning sker.

Flow-log målingerne under oppumpning med 10 m³/timen viser, at omkring 30 % af den samlede indstrømning til boringen foregår i Danienkalken, og temperatur-loggen og ledningsevne-loggen under pumpning indikerer, at indstrømningen sker fra tre zoner. Kun den øverste af disse lige under forerøret ses på flow-loggen, idet denne log på den øvrige sektion i Danienkalken er forstyrret af store variationer i borehulsdiameteren som medfører faldende og stærkt svingende tællertal.

Ved en kombineret tolkning af flow-log målingerne og temperatur- samt ledningsevne-log under oppumpning kan det fastslås, at der findes aktive strømningszoner i Skrivekridtet i følgende dybdeintervaller og zoner: I de øverste ca. 14 m af Skrivekridtet forekommer der ingen indstrømning. Fra kote -45 m til kote -67 m ses tre indstrømningszoner, der bidrager med i alt ca. 20 % af indstrømningen. I kote -67 m, d.v.s. omkring 37 meter nede i formationen ses en større indstrømning på ca. 30 %. Omkring 43 meter nede i formationen (Kote -73 m) samt yderligere 8 m dybere (kote -85 m) forekommer også indstrømninger som ses på alle tre logs. Indstrømningen fra disse to zoner udgør de resterende ca. 20 % af indstrømningen til boringen.

Konklusion

Der er påvist indstrømning fra flere zoner i såvel Danienkalken som i hele den gennemborede del af Skrivekridtet ned til 100 mut. (kote -85 m). Det kan imidlertid ikke udelukkes, at der findes hydraulisk aktive sprækker på endnu større dybder.

På trods af tilstedeværelsen af hydraulisk aktive sprækker i Skrivekridtet til omkring 100 mut., viser størrelsen og den nedad stigende formationsledningsevne i Skrivekridtet, at der er saltvand i matrix i den nedre, opsprækkede del af Skrivekridtet. Hvis grænsen mellem fersk- og saltvand fastsættes ved en kloridkoncentrationen på 300 mg/l (formationsmodstand 25 mS/m) er denne sammenfaldende med Danienkalk - Skrivekridt grænsen. I bunden af boringen er koncentrationen af klorid 3.800 mg/l, og gradienten i kloridkoncentrationen er omkring 60 mg/l/m. Afstanden mellem påviste sprækker i Skrivekridt med saltvand, og dermed størrelsen af matrixblokke, er mellem 7 og 12 m.

5.2.3 Lyksager boringen

Lyksager boringen (DGUnr. 207.3579) blev i første omgang udført som en 76 mm kerneboring til 58 m. I denne boring blev der ikke udført geofysisk borehulslogging, men kernematerialet er sedimentologisk og biostratigrafisk beskrevet af GEUS /33/. Beskrivelsen viser, at Danienkalken optræder fra 17 mut. og består overvejende af Bryozokalk hele vejen ned til Skrivekridtet, som optræder fra 38 mut. I ca. 11 m's dybde under Danien-Skrivekridt grænsen ses et ca. 1 m tykt mergellag.

5.2.3.1 Logging undersøgelse i boringen ved oprindelig boreddybde 100 m

Efterfølgende blev der på samme lokalitet boret en ny rotationskylleboring med en diameter på 350 mm ned til 100 mut. (kote - 77,3 m). Umiddelbart efter afslutning af borearbejdet, og en kortvarig renpumpning, udførtes borehulslogging, hvis resultat ses på figur 5-8. Boringen var på dette tidspunkt udbygget med et 350 mm stålforerør fra terræn og til 22 m, og herunder stod boringen med åbent hul. Rovandsspejl i boringen var omkring 8 mut. Ifølge den geologiske beskrivelse af sedimentprøver fra boringen, består de kvartære lag af moræneler til 14,2 m, som overlæjrer et sand-gruslag /33/. Danienkalken træffes som i den nærliggende boring omkring 17 mut.

Formationsresistivitets-log:

Den høje og meget varierende formationsresistivitet (80 – 180 ohmm) bekræfter, at Danienkalken er gennemboret i ca. 38 m dybde (kote -15,3 m), og formationens mægtighed på borestedet er 21 m. Den stærkt varierende formationsresistivitet i kalken skyldes dels forekomsten af flintlag, dels varierende hærkning af kalken. Formationsresistiviteten i Skrivekridtet er i de øverste 5 m omkring 60 ohmm, de næste ca. 25 m er den ca. 50 ohmm, og fra ca. kote – 45 m aftager den yderligere lidt til 40 ohmm i kote -55 m. Først herfra aftager formationsresistiviteten jævnt med stigende dybde, således at den i dybden 100 mut. (kote – 78 m) er ca. 20 ohmm.

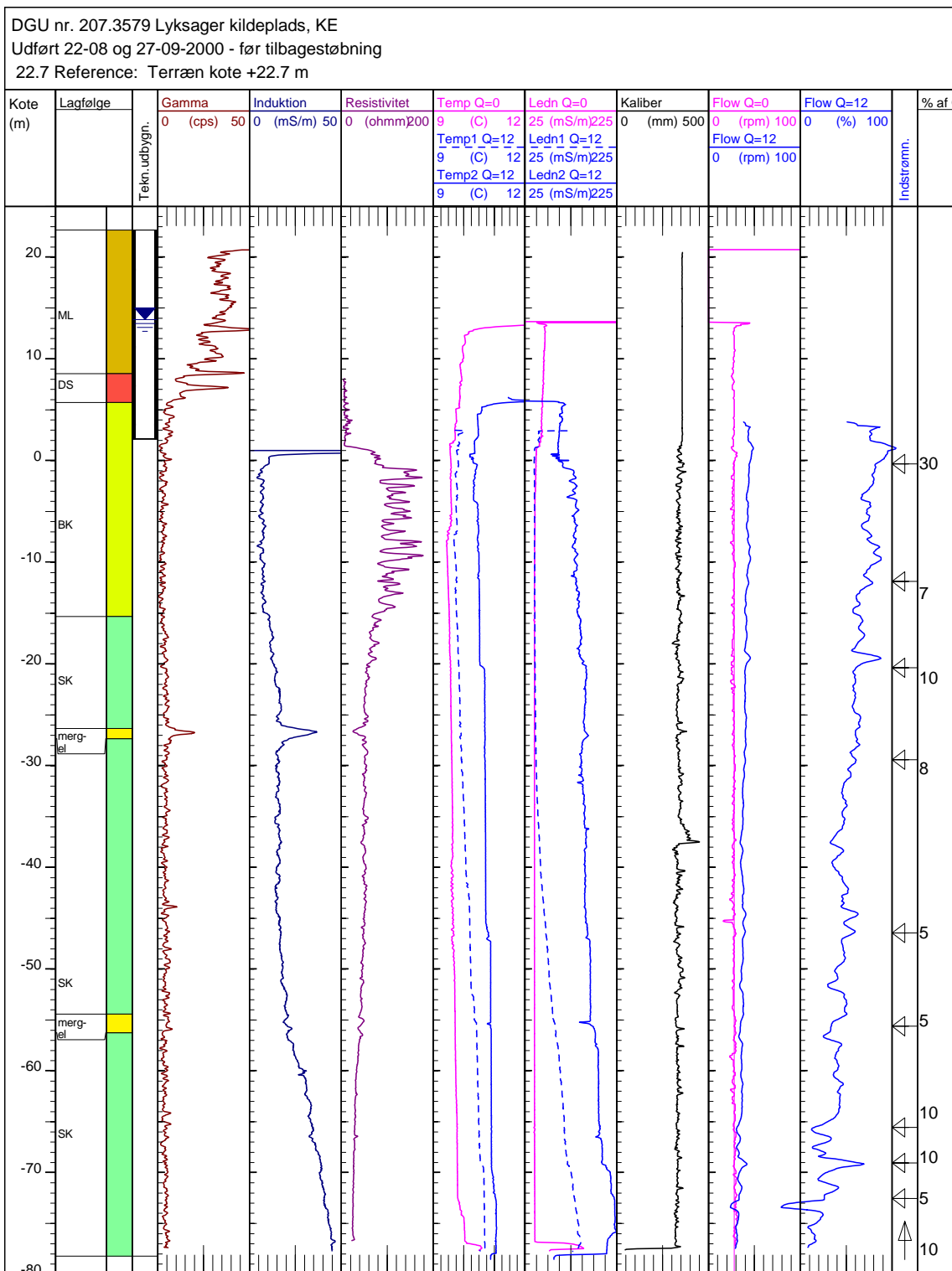
Gamma-log:

Gammastrålingen i Danienkalken er meget lav, dvs. 3-5 CPS, og kun en anelse højere i Skrivekridtet, 5-8 CPS. Omkring 50 mut., dvs. netop 11 m nede i kridtet, ses et mergellag (Kjølby Gård Mergelen) tydeligt som et lag med en gammastråling på op mod 15 CPS, figur 5-8. Dette lag kan følges over større afstande på denne del af Sjælland /15/.

Formationsledningsevne-log (Induktions-log):

Denne log viser som forventet en variation i formationsledningsevnen, som er modsat formationsresistiviteten. Overgangen i 38 m dybde (kote ca. -15 m) fra Danienkalk til Skrivekridt ses ved en stigning i formationsledningsevnen fra 5-8 mS/m i Danienkalken til 10-15 mS/m i Skrivekridtet, som øges til 15-20 mS/m lige ovenover mergellaget i ca. 50 m's dybde (kote ca. -26 m). Ligesom formationsresistiviteten holder formationsledningsevnen sig konstant herfra og ned til 68 m u.t (kote -45 m), hvorunder den stiger en anelse til 22 mS/m i 78 m dybde (kote -55 m). Først herunder stiger formationsledningsevnen jævnt med stigende dybde således at formationsledningsevnen er 45 mS/m ved bunden 100 mut. (kote - 78 m). Gradienten i formationens elektriske ledningsevne fra 78 mut. til 100 mut. er således på 1 mS/m/m.

Hvis der benyttes en formationsfaktor på 4,0 i denne øvre del af Skrivekridtet (se afsnit 5.6), svarer ovennævnte variation i formationsledningsevnen til at porevandets elektriske ledningsevne i kridtet er mindre end omkring 100 mS/m ned til 78 m dybde (kote -55 m). Fra denne dybde stiger porevandets ledningsevne jævnt omregning af induktions-loggen fra 100 mS/m til 225 mS/m ved bunden af boringen. Dette kan omregnes til ækvivalente koncentrationer af klorid, således at der er mindre end 300 mg/l i den øvre del af kridtet ned til 78 m dybde. Herunder stiger koncentrationen af klorid fra omkring 300 mg/l og til 850 mg/l i bunden af boringen (Bilag 2).



Figur 5-8 Geofysiske logs i Lyksager boringen ved oprindelig boreddybde. ML angivet moræneler, DS er smeltevandsand, BK er bryozokalk og SK angiver Skrivekridt.

Indstrømningszoner i boringen:

Temperatur-log og ledningsevne-log udført under pumping den 22. august 2000, lige efter boringens afslutning, viser dels højere værdier end de tilsvarende logs uden pumping

bortset fra øverst i boringen, og dels trinvis faldende værdier fra bund af boring og opad i boringen. Dette viser i lighed med flow-loggen, at der sker en række indstrømninger fra flere zoner helt fra bund af boring og op til lige under forerøret. Men ved sammenligning med dels ovennævnte tolkning af porevandets ledningsevne ud fra induktions-log, og dels med en vandkemisk analyse af en blandingsvandprøve udtaget 24. august 2000 (efter at boringen har været yderligere renpumpet med 12 m³/t) kan det konkluderes, at ledningsevne-loggene fra 22. august 2000 viser for lave værdier. En ny ledningsevne-log under pumpning med 12 m³/t, målt 27. september 2000 efter at boringen har været renpumpet en uge, viser da også væsentlig højere ledningsevne. Specielt ses det, at ledningsevnen nederst i boringen er på et niveau på 225 mS/m svarende til ovennævnte beregnede ledningsevne af porevandet ud fra induktions-loggen.

Flow-loggen er udført under pumpning med kun 12 m³/t, idet boringens specifikke ydelse kun var moderat (ca. 3 m³/t/m) og vandspejlet ikke måtte afsænkes til under forerøret af hensyn til at kunne gennemføre en flow-log i hele den åbne kalksektion. Den forholdsvis lave ydelse og den store borehulsdiameter (350 mm) giver forholdsvis lille strømningshastighed og derfor kun moderate tælleletal på 28-48 omdrejninger per minut (rpm). Dette, sammen med en varierende borehulsdiameter og formodentlig en lidt skæv boring, har øjensynligt medført en ujævn nedsækning af flow-sonden, som er årsagen til den uregelmæssige flow-log.

Med påvisning af dybder med mindre ændringer på temperatur-log og ledningsevne-loggen fra 27. september 2000 er det alligevel lykkedes at identificere i alt ni hovedindstrømningszoner og give et skøn over indstrømningernes størrelse i %, se figur 5-8. Zonerne nederst i boringen nedenunder den nedre mergelzone i kote – 55 m, giver tilsammen ca. 35 % af indstrømningen. Indstrømningen i den nedre mergelhorisont, samt de to zoner imellem den nedre og øvre mergelhorisont giver tilsammen 18 %, og endelig er der en zone i den øverste del af Skrivekridtet, som bidrager med ca. 10 %. De resterende ca. 37 % indstrømmer fra to zoner i Bryozokalken, hvoraf størstedelen - 30 % - sker lige under forerøret.

Flow-loggen uden pumpning (Flow Q=0) viser tælleletal, der varierer med en middelværdi omkring 28 omdrejninger per minut, som er basis tælleallet ved nedsækningshastighed på 5 m/min. Der er således ingen intern strømning i boringen fra en zone til en anden.

Afslutningsvis skal det bemærkes, at ledningsevne-log nr. 2 under pumpning den 27. september 2000 bekræfter den foranstående tolkning af induktions-loggen med hensyn til en forventet ledningsevne i formationsvandet nederst i boringen på ca. 225 mS/m.

Ud fra kendskabet fra flow-log om zonernes procentvise indstrømningsbidrag kan ledningsevnen L_n af de enkelte indstrømninger beregnes ved hjælp af følgende balanceligning:

$$(5.1) \quad Q_{n-1} \times L_{n-1} + Q_n \times L_n = Q_{n+1} \times L_{n+1}$$

hvor Q er vandmængde i %, L er ledningsevnen i mS/m, og n er den aktuelle indstrømningszone.

Af denne beregning (tabel 5-1) ses, at ledningsevnen i indstrømningszonerne nedenunder den formodede mergelhorisont i kote – 55 m er væsentlig højere end 100 mS/m, og at allerede indstrømningen fra en sprække i selve mergelhorisonten samt ovenover denne ses at være mindre end 100 mS/m. Dette bekræfter således induktionsloggens indikation af, at kloridudvaskningen er nået helt ned til den omtalte mergelhorisont. Dog ses der i tabellen det ejendommelige, at en mindre indstrømning fra en sprække i kote – 29 m lige nedenunder den øvre mergelhorisont medfører en lille stigning i det opadstrømmende vands ledningsevne, hvilket i beregningskemaet medfører en høj ledningsevne på dette indstrømmende vand.

Tabel 5-1 En massebalance for ledningsevnen i vandet Lyksager boringen under pumpning. I-zone angiver en indstrømningszone, flow over og under i-zone angiver strømmingen i hullet henholdsvis over og under de tolkede indstrømningszoner. Ledningsevne over og under i-zone angiver vandets elektriske ledningsevne henholdsvis over og under indstrømningszoner. Yderst til højre i tabellen ses den relative indstrømning til hullet samt vandet elektriske ledningsevne fra indstrømningszonerne.

Kote, M	Flow Over i-zone	Ledn.evne over i-zone	Flow under i zone	Ledn.evne under i-zone	Flow	Ledn.evne i i-zone
i-zone	%Q	mS/m	%Q	mS/m	%Q	mS/m
0	100	97	70	135	30	8
-12	70	135	63	145	7	45
-20	63	145	53	156	10	87
-29	53	156	45	152	8	179
-47	45	152	40	167	5	32
-55	40	167	35	185	5	41
-66	35	185	25	193	10	165
-69	25	193	15	211	10	166
-72	15	211	10	221	5	191

5.2.3.2 Logging undersøgelse i boringen efter opfyldning til 84 m

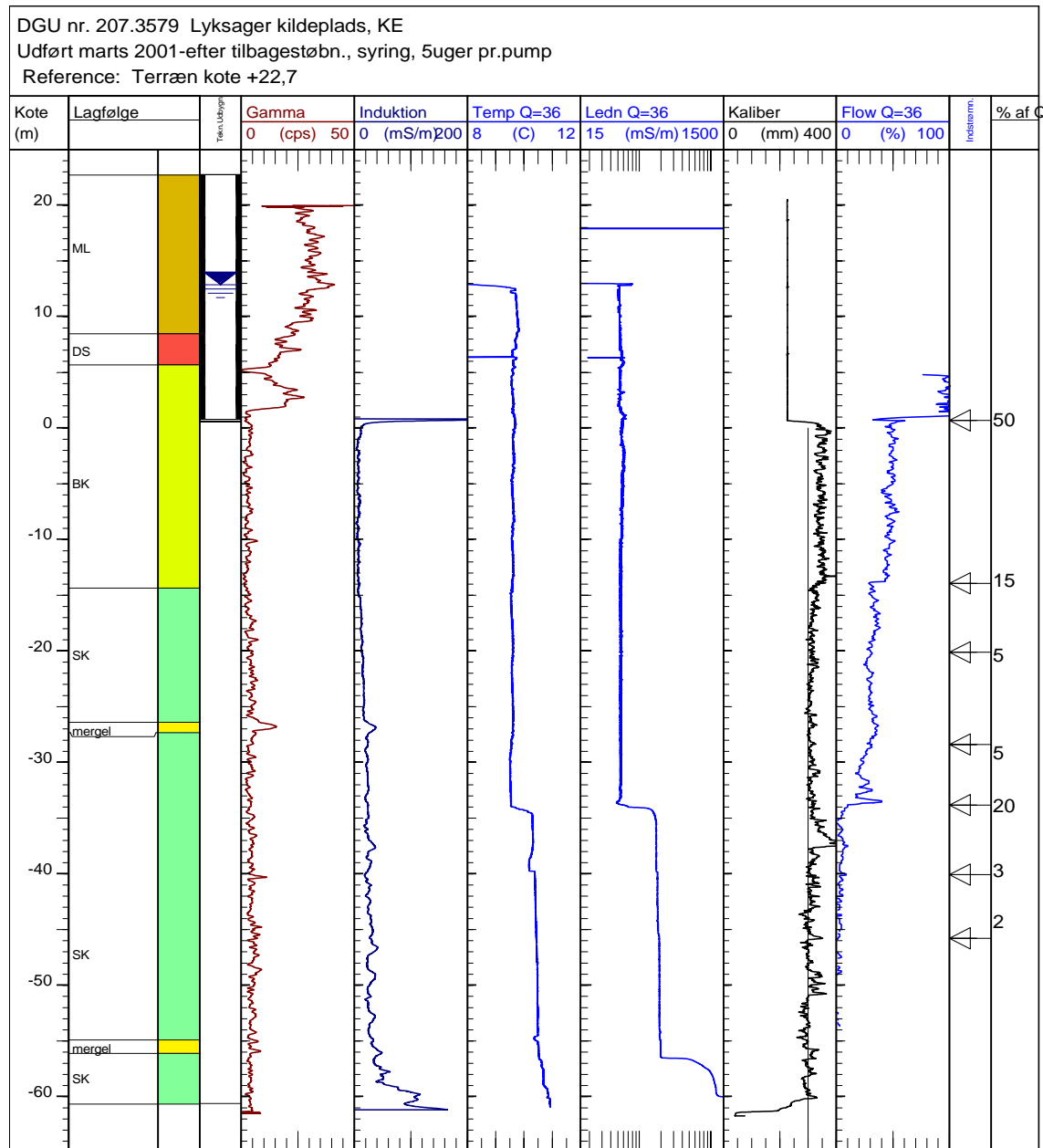
På basis af ovennævnte konklusion ved ny temperatur- og ledningsevne-log efter en uges prøvepumpning af boringen, blev det besluttet at tryksyre og tilbagestøbe boringen med bentonit/cement til ca. 80 mut., dvs. til lige under de formodede mergelhorisonter i ca. 78 m dybde (kote – 56 m) for derved at undgå indstrømning af vand med kloridindhold over 100 mS/m svarende til en ækvivalent kloridkoncentration på 300 mg/l. Endvidere er der sat et 225 mm PVC-foringsrør indeni stålrøret, og tætnet imellem de to rør, nederst med cement og ovenover med bentonit.

Boringen har ved udsyringen fået forbedret sin specifikke kapacitet væsentligt, således at den på trods af at være tilbagefyldt til 84 m dybde (kote – 62 m) nu kan pumpes med 36 m³/t i 5 uger, uden at der afsænkes mere end 2,25 m (16 m³/t/m). Transmissiviteten er ved prøvepumpning af den færdigudbyggede boring beregnet til at være 5·10⁻³ m²/s og magasintallet er beregnet til 0,0002.

Indstrømningszoner i boringen:

Flow-loggen viser ved den højere ydelse en mere entydig indstrømningsfordeling. De to indstrømningszoner i Bryozokalken der ses ved den første logging ses endnu tydeligere, og

de bidrager nu med tilsammen ca. 65 % af den samlede indstrømning, hvoraf hele 50 % sker umiddelbart under forerøret. Der ses stadig en mindre indstrømning (5 %) i den øvre del af Skrivekridtet. De resterende 30 % indstrømmer i Skrivekridtet imellem de to mergelhorisonter, hvoraf de 20 % indstrømmer i en zone i ca. 57 m dybde (kote -34 m). Sidstnævnte zone kunne ikke identificeres på den første flow-log i den oprindelige boring.



Figur 5-9 Geofysiske logs i Lyksager boringen efter at denne er tilbagestøbt, udsyret og prøvepumpet i 5 uger. ML angivet moræneler, DS er smeltevandssand, BK bryozokalk og SK angiver Skrivekridt

Ledningsevne-log og temperatur-log:

Ledningsevnen under pumpning ses at være overordentlig høj nederst i boringen, 1200 mS/m, hvilket skyldes en forøget opløsning af kalцит, som følge af tilførsel af ioner ved ud-

syring af boringen. Temperaturen i syreresten er 10,7 til 11⁰C. Fem meter over bunden af boringen, dvs. lige under de formodede mergelhorisonter i kote – 56 m, må der indstrømme en mindre vandmængde med en ledningsevne på ca. 200 mS/m og en temperatur på 10,5 ⁰C, som strømmer opad, idet denne temperatur såvel som ledningsevnen på 200 mS/m er helt konstant indtil den store indstrømning i 57 m dybde (kote – 34 m) nedsætter ledningsevnen til ca. 50 mS/m og temperaturen til 9,5 ⁰C. Efter denne indstrømning giver de ovenliggende indstrømninger ikke anledning til yderligere ændringer i ledningsevnen i det opadstrømmende vand, medens temperaturen stiger en anelse et par gange undervejs opad.

Ledningsevnen på ca. 200 mS/m i vandet fra de meget små indstrømninger under kote – 34 m er højere end forudsagt ovenfor på basis af induktions-loggen i den oprindelige boring, og også højere end målt ved den tidligere ledningsevne-log under pumpning i den oprindelige boring, se figur 5-8. Det er formentlig den kraftige udsyring, som har øget ledningsevnen i porevandet i denne meget lidt vandførende del af Skrivekridtet.

Gamma- og induktions-log:

Ved sammenligning med gamma-loggen før tilbagestøbning, figur 5-8, er der kun den forskel, at strålingsniveauet er væsentlig højere i de nederste 5 m af forerøret, hvilket skyldes udstøbningen med cement imellem PVC- og stålforerøret.

Ved sammenligning med den tidligere induktions-log, figur 5-8, ses der nu en væsentlig højere formationsledningsevne nederst, som også her må tilskrives tilførslen af syre. Men der ses også generelt at være en lidt højere formationsledningsevne i Skrivekridtet, idet den før tilbagestøbning og udsyring lå på 10-15 mS/m ned til den nedre mergelhorisont, medens den nu ligger på 10-25 mS/m. Da der ikke ses tilsvarende stigning i formationsledningsevnen i Bryozokalken, hvor den stadig er 5-10 mS/m, skyldes stigningen i Skrivekridtet antagelig den kraftige udsyring, som har presset syre ind i porerne, og derved opløst kalcit.

Konklusion

Med hensyn til tolkning af forekomsten af saltvand i Skrivekridtet ud fra den gennemførte logging i Lyksager borerne, kan de væsentligste konklusioner drages ud fra logging af boringen inden den blev syret og ombygget (figur 5-8). Der er påvist indstrømning fra de glaciale lag over kalken, fra selve Danienkalken og fra hele den gennemborede del af Skrivekridtet ned til 100 mut. (kote -77,3 m). Omkring 10 % af indstrømningen kommer fra bunden af boringen.

Der er sket en fuldstændig udvaskning af saltvand fra kalkmatrix i Bryozokalken og zonen ned til mergellaget i kote -55 m er også udvasket. Fersk-saltvandsgrænsen, defineret ved en kloridkoncentration over 300 mg/l (formationsledningsevne på 25 mS/m), findes under den nederste mergelhorisont i kote ca. –57 m (80 mut.). I bunden af boringen kan der beregnes en koncentration af klorid i matrix på 560 mg/l. Gradienten i kloridkoncentrationen i saltvandszonen er derfor omkring 13 mg/l/m. Der er påvist fire indstrømningszoner i kridtet med forhøjede koncentrationer af klorid, og afstanden mellem disse er omkring 3 m.

5.2.4 Tune boringen

Loggingundersøgelsen blev udført efter at kerneboringen til 95 m var blevet overboret som et 210 mm hul og fortsat til 110 mut. (kote -70 m). Boringen er færdigudbygget med et 220 mm stålforerør fra terræn til 35 mut. Herunder står boringen som et åbent hul. Ro-vandspejl i boringen står omkring 18 mut. Mægtigheden af de kvartære lag er ifølge beskrivelsen af prøverne, som er indleveret til GEUS, omkring 17,6 m, og de er domineret af moræneler. Herunder forekommer Danienkalk ned til 85 mut. (kote -45 m), fra hvilken dybde Skrivekridtet blev truffet. De øverste ca. 16 m af Danienkalken er meget løs og sprækket, og indeholder lokalt sand-/gruspartikler af kalk og flint. Af denne grund måtte forerøret føres ned til ca. 35 m dybde.

Formationsresistivitet-log:

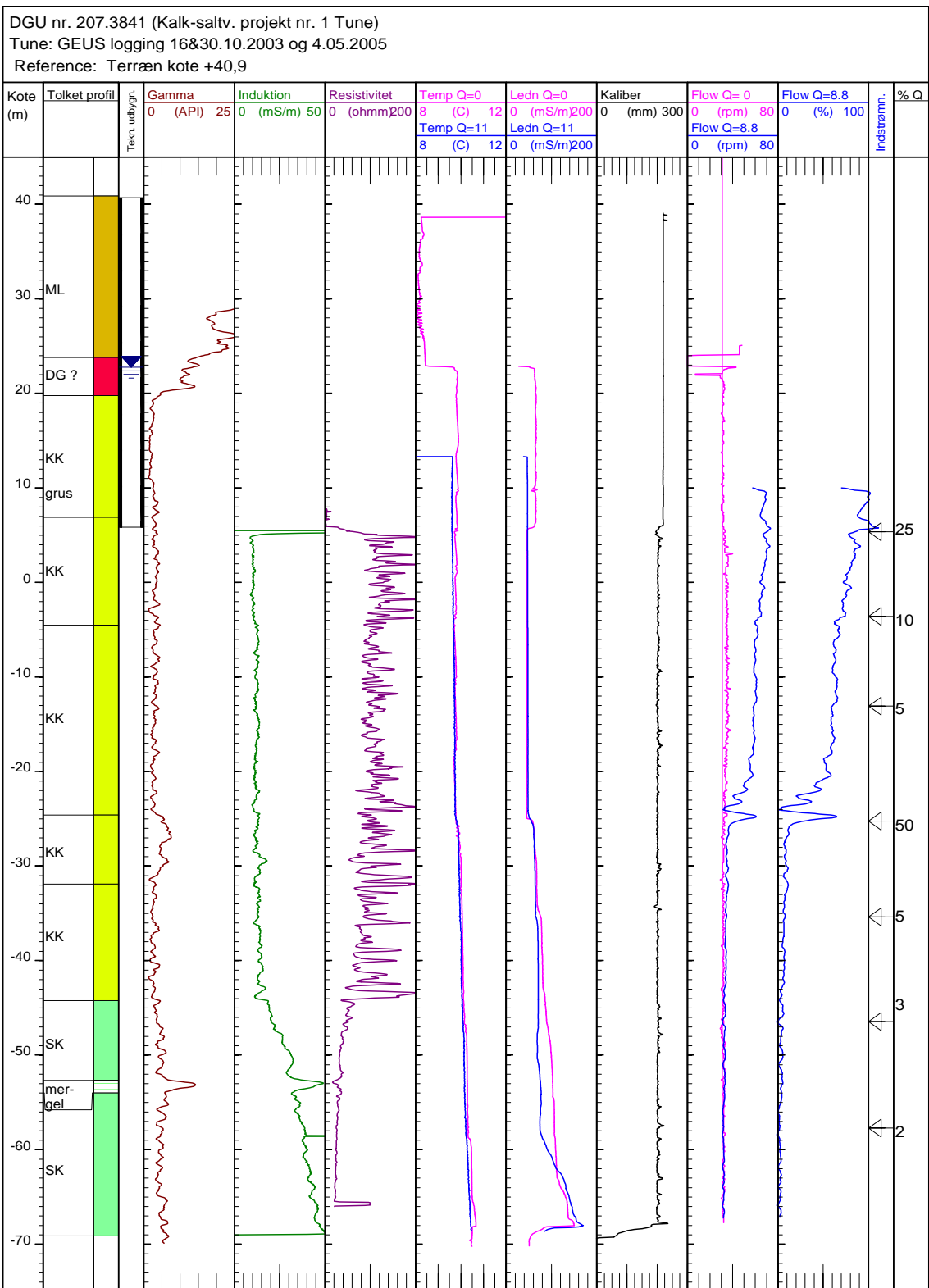
Formationsresistiviteten i Danienkalken i Tune boringen er i lighed med de andre borerer meget varierende med værdier mellem 100 og 200 ohmm. Den falder brat til 60 ohmm ved overgangen til Skrivekridt, og aftager derefter jævnt nedad i formationen. Ved kote – 53 m, dvs. ca. 9 m nede i Skrivekridtet, ses der et lag med en markant lavere resistivitet, som må formodes at være analogt til den tidligere omtalte Kjølby Gård Mergel.

Gamma-log:

Den målte naturlige gammastråling i Danienkalken er relativt konstant omkring 5-10 CPS, med undtagelse af et ca. 6 m dybdeinterval omkring kote – 30 m, hvor der forekommer lidt højere værdier, op mod 15 CPS. På basis af gamma-loggen og formationsresistivitets-loggen kan Danienkalken i den åbne boringssektion inddeles i fire sekvenser ud fra karakteristiske forskelle i log-mønstre: En øvre del fra forerøret og ned til kote ca. –5 m, som har mange tætte kalklag med høj formationsresistivitet – herunder og ned til kote ca. –25 m en mellem del med færre tætte lag og derfor i gennemsnit en lavere resistivitet svarende til en gennemsnitlig højere porøsitet – derefter en 6 m tyk sekvens med høj gammastråling og enkelte lag med meget lav resistivitet ind imellem lag med meget høj resistivitet – endelig nederst en sekvens med lav gammastråling og skiftende lag med meget høje resistiviteter og med meget lave resistiviteter, sidstnævnte synes i denne sekvens at være tykkere end i de to øverste sekvenser, hvilket resulterer i en gennemsnitlig lavere resistivitet.

I Skrivekridtet er den naturlige gammastråling generelt en anelse højere, typisk 8-13 CPS. Derudover optræder et lag med en højere gammastråling (25 CPS) omkring 9 meter nede i Skrivekridtet. Laget kan korreleres fra de tidligere omtalte borerer, og udgør det omtalte Kjølby Gård Mergellag.

Som nævnt er der også udført en gamma-spektral log i denne boring. Denne har vist, at det lidt højere gammastrålingniveau i Skrivekridtet skyldes et generelt højere indhold af uran /15/. Endvidere ses, at de signifikante gammastrålingmaksima i henholdsvis intervallet fra kote 25 m til – 31 m i Danienkalken og omkring kote – 53 m i Skrivekridtet hovedsageligt skyldes et øget indhold af kalium og thorium. Dette indikerer, at de nævnte zoner har et højere indhold af lermineraller.



Figur 5-10 Geofysiske logs i Tuneboringen. ML angiver moræneler, KK kalksandkalk og SK angiver Skrivekridt.

Formationsledningsevne-log (Induktion-log):

Denne log viser en formationsledningsevne i Danienkalken på 10-15 mS/m. Overgangen til Skrivekridtet omkring 85 mut. markeres af en brat stigning i formationsledningsevnen til ca. 20 mS/m, som yderligere stiger jævnt med dybden til 50 mS/m ved bunden. Denne stigning i formationsledningsevnen fra 20 mS/m forekommer over 25 m, så gradienten er 1,2 mS/m/m. Med en formationsfaktor på 4,0 svarer dette til en stigning i porevandets elektriske ledningsevne fra 80 mS/m til 200 mS/m, hvilket svarer til en stigning i den ækvivalente kloridkoncentration fra ca. 300 mg/l til ca. 750 mg/l.

Indstrømningszoner i boringen:

Flow-log er udført under oppumpning med en relativt lille ydelse (8,8 m³/t) på grund af en relativt stor afsænkning i boringen. Flow-loggen viser, at 95 % af indstrømningen kommer i Danienkalken, hvoraf de 75 % sker fra to zoner. Den ene med 25 % indstrømning lige under forerøret og antageligt stammende fra den øvre løse og sprækkede kalk. Den anden med 50 % indstrømning i ca. kote – 25 m ved overgangen til den mergelholdige zone med højere gammastråling nævnt ovenfor. Fra den nederste del af Danienkalken sker en indstrømning som samlet udgør omkring 5 % af den totale indstrømning, og fra Skrivekridtet kommer der samlet en indstrømning på kun 5 % med indstrømning såvel over som under mergelhorisonten.

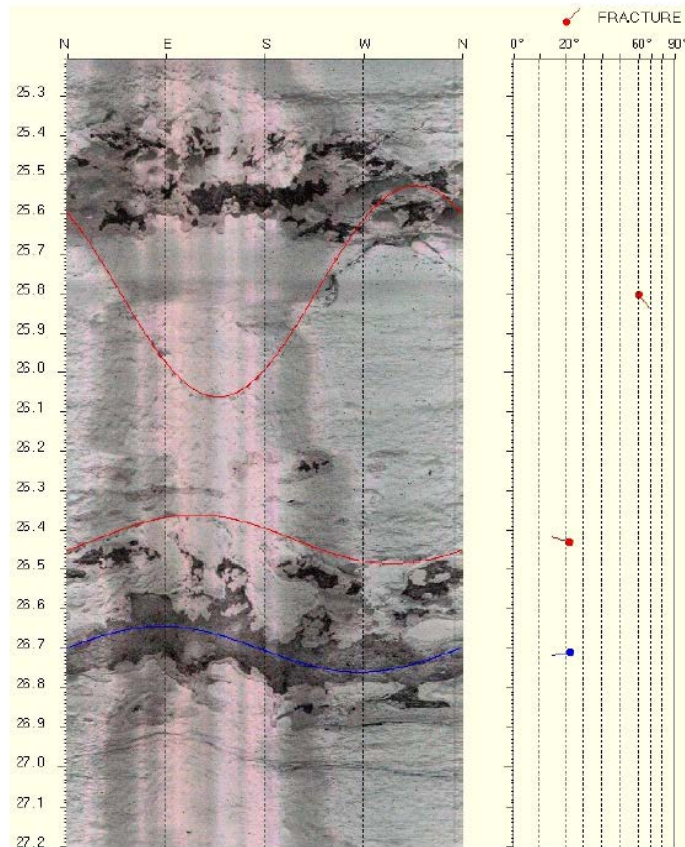
Flow-loggen uden pumpning viser, at der sker intern strømning i boringen fra zonen i ca. kote – 25 m og op til udstrømning lige under forerøret. Dette ses også på såvel temperatur-logs som ledningsevne-logs, idet disse, uanset om der pumpes, viser samme konstante værdier i netop dette dybdeinterval. Under kote – 25 m stiger såvel temperatur som ledningsevne under pumpning trinvis, hvor hvert trin repræsenterer en indstrømningszone. Nedenunder den dybeste indstrømning, i kote ca. – 58 m, stiger temperatur og ledningsevne på loggen under pumpning gradvist med dybden, idet der her ikke sker nogen vertikal opadrettet strømning i boringen.

Konklusion:

Der er påvist indstrømningszoner i hele den gennemborede del af Danienkalken og kun i meget begrænset omfang i de ca. 25 m gennemborede kridtaflejringer. Den lave (<15 mS/m) og konstante formationsledningsevne i Danienkalken viser, at udvaskningen af saltvand her er fuldstændig, hvorimod den stigende formationsledningsevne med stigende dybde i Skrivekridtet må tolkes som en ufuldstændig udvaskning af saltvand. Fersksaltvandsgrænsen, defineret ved en kloridkoncentration over 300 mg/l (formationsledningsevne på 25 mS/m), forekommer i overgangen mellem Danienkalken og Skrivekridtet omkring kote - 45 m (dybde 85 mut.). I bunden af boringen kan der beregnes en koncentration af klorid i matrix på omkring 650 mg/l. Gradienten i kloridkoncentrationen i saltvandszonen er derfor, som i Lyksager boringen, omkring 13 mg/l/m. Der er påvist to indstrømningszoner i kridtet med forhøjede koncentrationer af klorid, og afstanden mellem disse er omkring 10 m.

5.3 Sprækkekarakterisering i kridt og kalk i boreriger

Der er foretaget opmålinger af sprækker med en optisk televiwer sonde i de fire undersørgelsesboringer med henblik på en karakterisering af forekomsten af hydraulisk aktive sprækker i Skrivekridtet og Danienkalken. I alt er der opmålt 320 m optisk televiwer optagelser af kridt og kalk /27, 39/.



Figur 5-11 Optisk televiwer-log optagelse fra Lyksager boringen fra 25.3 til 27.2 mut. Optagelsen viser tre lag med bryozokalk og to flint lag. De røde kurver angiver tolkede sprækker og den blå linie angiver et mere sammenhængende flintlag. I figurens højre side ses strygning og hældningsretning af tolkede sprækker og det sammenhængende flintlag.

I denne rapport er det valgt at præsentere en tolkning af de opmålte optiske televiwer data. Resultaterne af en optisk televiwer optagelse viser imidlertid kun, hvor der er sprækker i formationen. En hydraulisk tolkning af disse resultater skal derfor kombineres med oplysninger fra: I) Flow-log opmålinger; II) Målinger af temperatur og elektrisk ledningsevne i åbne borehuller med og uden pumpning.

I figur 5-11 er vist et eksempel på en optisk televiwer optagelse samt en tolkning af data. Sprækker i kridt og kalk kan være vanskelige at identificere i en optisk televiwer optagelse, og der er således tale om observationer, hvor der er en vis usikkerhed med hensyn til fortolkning. Dette gælder især sprækkernes aperturer, der som følge af de optiske forhold,

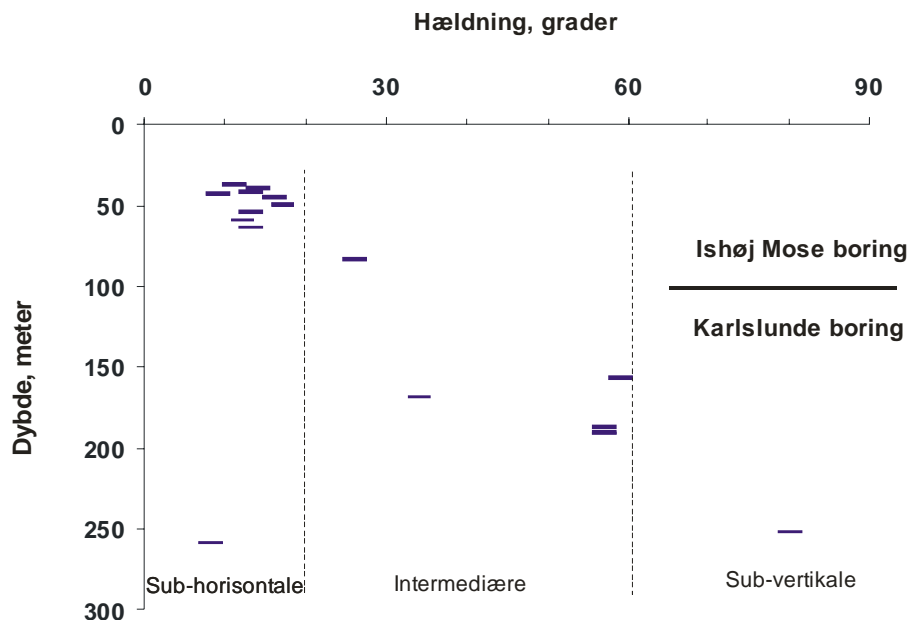
ofte ikke er mulige præcist at bestemme. Ofte er de erkendte sprækkeaperturer i borehuller forstørrede som følge af fysiske og kemiske processer eller påvirkning under borearbejdet.

Figur 5-11 viser en 360° optisk televiwer optagelse fra intervallet 25,3 til 27,2 mut. i Lyksager boringen. Til venstre og helt til højre i optagelsen vises nord (N) i boringen, og syd (S) er midt i optagelsen. De røde linier angiver tolkede sprækker, og den blå linie viser et sammenhængende flintlag. Til højre i figuren ses opmålte strygninger/hældninger af lag og tolkede sprækker. Intervallerne fra 25,4-25,6 mut. og 26,5-26,8 mut. er zoner med flint i bryozokalk. Den nedre flintzone kan tolkes som et egentligt lag. Dette lag hælder omkring 20° mod vest. Den tolkede nedre sprække, som forekommer i kontakten mellem kalk og flint, har omtrent samme strygning/hældning som flintlaget. Dette er en subhorisontal sprække. Den øvre sprække hælder omkring 60 grader mod sydøst, og det er således en subvertikal sprække.

5.3.1 Opmålinger i Skrivekridt

Resultater af optisk televiwer målinger i Skrivekridt i Karlslunde boringen og Ishøj Mose boringen fremgår figur 5-12. Målinger ned til omkring 100 mut. er foretaget i Ishøj Mose boringen, og fra omkring 100 til 269 mut. er optagelserne fra Karlslunde boringen.

Fra 37 til 45 mut. er der i Ishøj Mose boringen observeret otte sprækker, hvilket giver en gennemsnitafstand mellem sprækkerne på én meter. Fra 49 til 64 mut. er der observeret fire sprækker, hvilket giver en gennemsnitlig afstand på 3,75 meter. Hældningerne af de mest terrænnære sprækker er, med undtagelse af en enkelt, mellem 9 og 16 grader, og der er derfor tale om subhorisontale sprækker, hvoraf de fleste er lag-parallelle.



Figur 5-12 Fordelingen af tolkede sprækker i gennemboret kridt i boringerne Ishøj Mose og Karlslunde samt sprækkernes hældning. Intervallet ned til 100 mut. er fra Ishøj Mose boringen og under denne dybde er data fra Karlslunde boringen.

I Karlslunde boringen er der kun observeret seks sprækker og en enkelt forkastning. I forbindelse med beskrivelsen af kerner fra boringen blev der observeret en mindre forsætning på få cm langs sprækken i dybden omkring 160 mut. Det fremgår af figur 5-12, at de fleste af de observerede sprækker og forkastninger i kridtet under 100 mut. har hældninger over 20 grader, så de må beskrives som intermedieære-sprækker. I dybden omkring 250 mut. er der observeret én subhorisontal og én subvertikal sprække.

De påviste terrænnære subhorisontale sprækker i kridtet, må tolkes som værende aflastnings-sprækker, dannet som en følge af trykaflastning skabt ved glacial erosion og det tektoniske opløft af formationen og aflastningen der fandt sted som følge af afsmeltning af ismasser efter istiden og erosion i Neogen. I de øverste 45 m af formationen er afstanden mellem sprækkerne omkring 1,0 m, og i intervallet fra 49 til 64 mut. er afstanden 3,75 m. I blotninger af formationen er afstanden mellem disse sprækker omkring 0,4 m (afsnit 5.1), så resultaterne af de optiske televiwer log viser, at der sker en gradvis lukning, eller reduktion af aperturen, med stigende dybde.

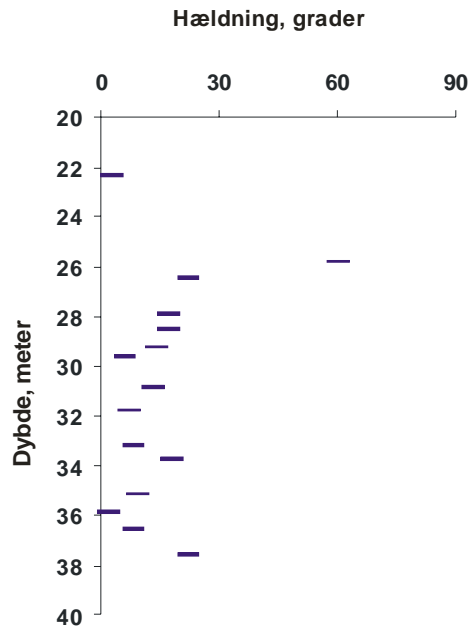
De tolkede sprækker under 100 mut. har generelt en større hældning, og de må derfor tolkes som dannet ved en tektonisk aktivitet. De intermedieære og subvertikale sprækker har tilsyneladende en større apertur på større begravellesdybder, hvilket gør dem nemmere at erkende i optisk televiwer-log optagelser. Dette kan, som omtalt i kapitel 3, skyldes det forhold, at retningen af det litostatiske tryk danner en lille vinkel med sprækkernes planer. Selvom disse sprækker har en relativt stor apertur, er de imidlertid ikke hydraulisk aktive, idet de ikke er forbundet med et aktivt, hydraulisk netværk. Dette synes i Skrivekridtet hovedsagelig at være betinget af tilstedeværelsen af de lag-parallele, subhorisontale sprækker.

5.3.2 Opmålinger i Danienkalk

Lyksager boringen

I Lyksager boringen er der optaget optisk televiwer-log af den gennemborede sekvens af Danienkalken fra 22 til 39,0 mut., figur 5-13. Danienkalken er i den gennemborede sekvens aflejret som en bryozokalk med flintlag (21,2 %). I dette interval er der observeret 14 subhorisontale og én intermedieær-sprække. Dette giver en gennemsnitlig sprækkeafstand på omkring én meter. Strygning/hældning af de lag-parallele sprækker er som følge af bankestrukturen i kalken meget varierende med hældninger fra øst til vest /27/. Baseret på et visuelt skøn er aperturen af de 15 sprækker i kalken vurderet til at være omkring 5 mm /27/.

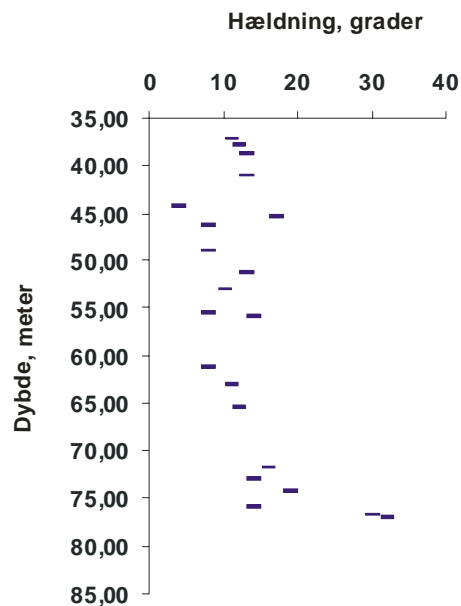
Af de 14 erkendte sprækkezoner kan man ved en detaljeret tolkning af temperatur loggen med sikkerhed erkende fem hydraulisk aktive sprækkezoner. Den samlede transmissivitet af Danienkalken er i Lyksager boringen bestemt til at være $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (5 % af $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Ved anvendelse af ligning 4.3 kan en middel hydraulisk apertur i kalken beregnes. Såfremt der er 14 hydraulisk aktive sprækker kan en middel apertur af sprækkerne beregnes til at være 0,31 mm, mens den gennemsnitlige hydrauliske apertur ved en tolkning med fem sprækker er 0,43 mm. I begge tilfælde er den beregnede hydrauliske apertur betydelig mindre end den visuelt bedømte.



Figur 5-13 Tolkede forekomster af sprækker samt deres hældninger i Danienskalken i Lyksager boringen bestemt ud fra optisk televiewer-log.

Tune boringen

I Tune boringen er Danienskalken gennemboret fra 35,1 til 82,2 mut., og i hele dette interval er der optaget en optisk televiewer-log. I det gennemborede interval er der identificeret 19 subhorisontale og to subvertikale sprækker /27/. Fordelingen af tolkede sprækker er givet i figur 5-14. Sprækkernes hælder i retninger fra nord til vest og syd, mens ingen af sprækkerne hælder mod øst /27/. De fleste af de observerede sprækker optræder i kontakten mellem kalk og flint.



Figur 5-14 Fordelingen af sprækker i Danienskalken i Tune boringen, samt sprækkernes hældninger.

Med henblik på en detaljeret beskrivelse kan den gennemborede sekvens af Danienkalken i Tune boringen, se figur 5-10 på side 51, inddeles i fire hydrauliske zoner A, B, C, D. Disse zoner har følgende karakteristika; Zone A nederst i Danienkalken, fra 82,2 til 77 mut., har ingen hydraulisk aktive zoner. Zone B, fra 77 til 65 mut., har mellem tre og seks subhorizontale sprækker, og omkring 5 % af indstrømningen til boringen forekommer fra denne zone, se afsnit 5.2. Zone C, er én enkelt sprække i dybden 65 mut., som er meget vandførende, der giver 50 % af indstrømningen til boringen, se afsnit 5.2. I Zone D fra 65 til 35,1 mut. er der observeret 14 subhorizontale sprækker. Fra denne zone sker omkring 40 % af indstrømningen til boringen. De enkelte hydrauliske zoner vil blive beskrevet mere udførligt i det følgende.

I den optiske televiewer-log optagelser ses Zone A i bryozokalken som massive kalkbænke uden tegn på opsprækning. Den sedimentologiske log (bilag 1 viser, at denne zone er domineret af relativt tykke bænke af kalk (packstone) uden flint. To svage knæk på ledningsevne-loggen, samt en lille stigning i antal af omdrejninger per minut (rpm) i flow-loggen, kunne tyde på en lille strømning fra denne zone. Der er tegn på en lille stigning i formationsledningsevnen med dybden i denne zone, hvilket kan tolkes som en diffusionsgradient i matrix af kalken. En sådan gradient kan kun forekomme, såfremt der er lille eller ubetydelig advektiv transport af grundvand i bjergarten.

I zone B er der i den optiske televiewer påvist fire subhorizontale og to subvertikale sprækker, og de visuelle aperturer af disse er vurderet til at være 5 mm /27/. Den sedimentologiske log viser, at denne zone indeholder vekslende lag af kalksten (packstone og wackestone) med flintlag. Da mægtigheden af denne zone er 12 meter, giver dette en gennemsnitlig afstand mellem de subhorizontale sprækker på 3 meter. Temperatur og ledningsevne loggene fra denne zone viser også tegn på indstrømning fra fire zoner i kalken. Den gennemsnitlige hydrauliske apertur (ligning 4.3) kan ved tolkning med fire subhorizontale sprækker beregnes til at være 0,11 mm. I beregningerne er benyttet en transmissivitet på $7,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ for zone B svarende til 5% af boringens samlede transmissivitet på $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, bestemt ved prøvepumpning, se afsnit 4.5. De beregnede hydrauliske aperturer er således også i denne zone væsentlig mindre end de visuelle aperturer i boringen.

I Zone C kan der i den optiske televiewer optagelser registreres én subhorizontal sprække, med en tolket visuel apertur på 15 mm. Den sedimentologiske log viser, at sprækken forekommer ved en enhed med skiftevis kalkbænke (mudstone) og flintlag. Flow-loggen tyder på indstrømning over et par meter, men ledningsevne-loggen tyder kun på indstrømning i én zone. Transmissiviteten i zonen er $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ svarende til 50% af den samlede transmissivitet. Ved tolkning med én sprække kan den hydraulisk apertur af denne beregnes til være 1,0 mm.

I zone D er der visuelt påvist 14 subhorizontale sprækker. Denne zone er sedimentologisk karakteriseret ved relativt tynde lag af kalksten (wackestone og mudstone) med flintlag. (bilag 1). Mægtigheden af zonen er omkring 30 m og den gennemsnitlige afstand mellem tolkede sprækker er 1,4 m, figur 5-14. Sprækkernes visuelle apertur er vurderet til at være mellem 5 og 10 mm. Flow-loggen angiver en jævn indstrømning i denne zone, temperatur loggen viser sikre indstrømningszoner i fem dybder: 59, 51 44, 39 og 34 mut., figur 5-14. Transmissiviteten for Zone D er sat til $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ svarende til 40% af den samlede

transmissivitet. Ved indstrømning i 14 zoner bliver den gennemsnitlige hydrauliske apertur derfor på 0,41 mm, mens den med kun fem indstrømningszoner vil være 0,58 mm. I de forskellige hydrauliske tolkninger vil størrelsen af matrixblokke i kalken i gennemsnit være henholdsvis 1,4 m (N=14) og 6,2 m (N=5).

Samlet tolkning sprækkekarakterisering i Danienkalken

Med henblik på opstilling af en numerisk model til beregning af grundvandsstrømning, og udvaskning af saltvand over geologisk tid, viser resultaterne fra Lyksager boringen, at der i kalken er matrixblokke, som for hver én til to meter er adskilt af hydraulisk aktive sprækker. På baggrund af opmålinger i Karlstrup Kalkgrav, må det antages, at der også forekommer subvertikale sprækker, som fordeler vandet mellem de subhorisontale sprækker (Disse er imidlertid vanskeligt at erkende i en vertikal boring. I de den gennemborede sekvens i Lyksager boringen er der kun observeret én enkelt subvertikal sprække). Der kan beregnes hydrauliske aperturer i sprækkerne på 0,3 til 0,4 mm.

Resultaterne af sprækkekarakteriseringen i Tune boringen afviger på en række punkter fra resultaterne fra Lyksager boringen. Der forekommer således ikke en væsentlig indstrømning i den nedre del af Danienkalken i Tune boringen, mens dette er tilfældet i Lyksager boringen. Denne forskel må forklares med det forhold, at der ikke er flint i denne del af Danienkalken i Tune boringen. Derudover er Danienkalken begravet dybere ved Tune boringen i forhold til ved Lyksager boringen. Ved Tune er mægtigheden af Danienkalken således omkring 50 m, mens formationen kun er 18 meter ved Lyksager. Samtidig er mægtigheden af de glacielle dæklag kun 16 meter ved Lyksager, mens den er omkring 35 m ved Tune by.

Dette betyder, at kontakten mellem Danienkalken og Skrivekridtet ved Lyksager findes omkring 30 m., mens den ved Tune findes omkring 85 m. I Tune boringen ses således en tendens til lukning af de subhorisontale sprækker med stigende dybde. I toppen af formationen kan de hydrauliske aperturer således beregnes til at være omkring 0,6 mm, mens de kun er omkring 0,1 mm i bunden eller helt lukket. En undtagelse fra dette overordnede billede er én stor indstrømning fra en sprække midt i Danienkalken. Resultaterne af den visuelle bestemmelse af sprækker viser, at der er omkring 1,4 m mellem sprækkerne i toppen og 1,7 m i bunden af formationen. Resultatet af temperatur log tolkninger tyder på, at afstanden mellem de hydraulisk aktive sprækker er 5-7 m igennem hele formationen med undtagelse af de nederste meter (Zone A), hvori der ikke er hydraulisk aktive sprækker af betydning.

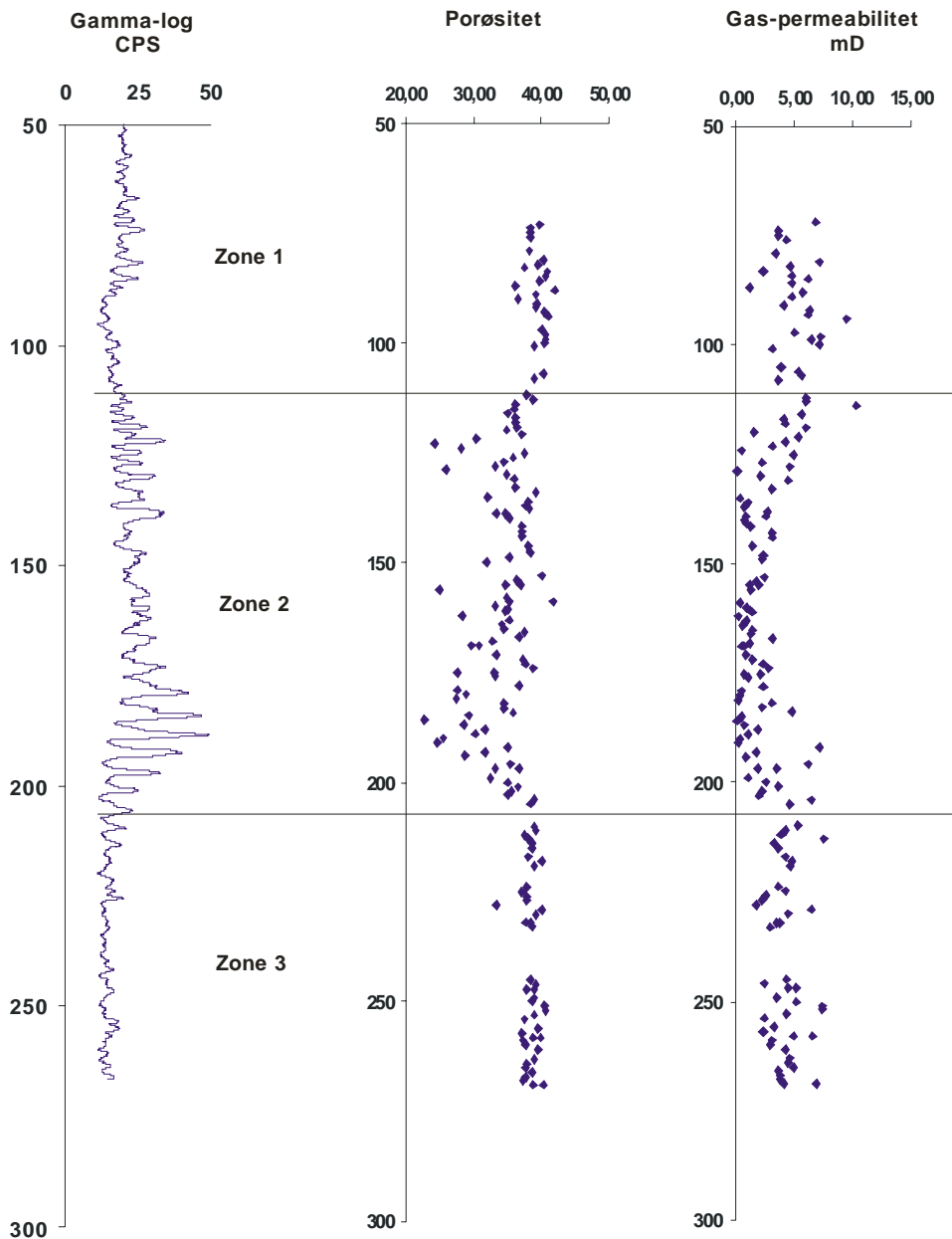
5.4 Matrixporøsitet og -permeabilitet

5.4.1 Skrivekridt

Målte porøsiteter i prøver fra den gennemborede del af Skrivekridtet i Karlslunde boringen fremgår af figur 5-15. I forbindelse med den geofysiske borehulslogging blev der defineret tre zoner i den gennemborede sekvens (Zone 1: Fra 25 til 115 m.; Zone 2: Fra 115 til 210

mut.; Zone 3: Fra 210 til 269 mut.). Disse zoner kan også erkendes i de målte porøsitetens-data.

I Zone 1 er der målt porøsiteter i kridtet mellem 36 og 43 %, med et gennemsnit på 40 %. I Zone 2 er porøsiteterne mere varierende, og der er målt værdier fra 23 til 42 %. De mindste porøsiteter findes i de lerede og merglede enheder, mens der i zoner med et lille indhold af ler forekommer porøsiteter af samme størrelse som kridt fra den resterende del af sekvensen. I Zone 3 er porøsiteten mere ensartet med værdier mellem 37 og 41 %, og en middel porøsitet på 39 %.



Figur 5-15 Gammastråling, porøsitet og gaspermeabilit i kridt fra Karlslunde boringen.

De observerede variationer i porøsiteten i kridtet fra Karlslunde boringen må hovedsagelig forklares med en variation i kridtets indhold af ler. Kridt med et stort indhold af ler kompakteres mere effektivt end lag med et lille indhold af ler, og porøsiteten af disse lag er derfor mindre. I lagene med et lille indhold af ler er porøsiteten tilnærmelsesvist konstant omkring 40 %. Frykman /23/ rapporterer om porøsiteter i prøver af kridt fra Sigerslev Bruddet på mellem 45 og 50 %.

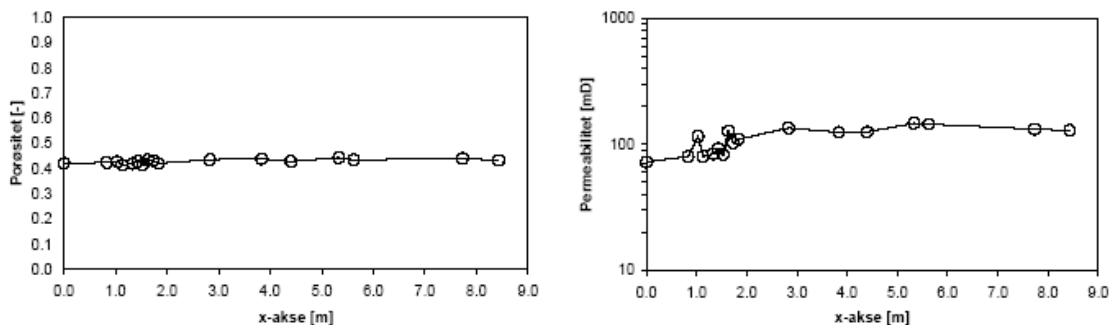
Hancock /46/ har foreslået en model for fysisk kompaktion af kridt som forudsiger, at porøsiteten i kridt er blevet reduceret fra 65 % til 40 % i den øverste meter under havbunden. Mallon & Swarbrick /47/ sammenstiller publicerede modeller for kompaktion og porøsitetsudvikling i kridt som funktion af sedimentets begravelsesdybde. Hvis det antages, at Skrivekridtet i værkstedsområdet er blevet opløftet omkring 500 m /18/ så har de gennemborede kridtaflejringer i Karlslunde boringen tidligere været begravet mellem 500 m og 750 m. De fleste modeller for udviklingen af porøsiteten viser, at ved begravelsesdybder af denne størrelse, vil porøsiteten i kridtet være reduceret til 40 – 50 %. Porøsiteter af denne størrelse er også observeret i de rene kalcitlag i denne undersøgelse, men hvor der er et større indhold af ler kan benyttes en porøsitet mellem 25 og 30 %. Disse variationer i indholdet af ler kontrollerer den effektive diffusionskoefficient i kridtet, se afsnit 5.7.

Målte gaspermeabiliteter i prøver af kridtet fra Karlslunde boringen fremgår også af nedenstående figur 5-15. Det ses, at gaspermeabiliteterne er mellem 5 og 10 mD ($1 \text{ mD (gas)} \approx 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$), i Zone1 og Zone 3, hvor der også er målt de højeste porøsiteter. I den lerholdige zone 2 er gaspermeabiliteten typisk under 2 mD, og der er påvist værdier helt ned til 0,1 mD. Beregnede hydrauliske ledningsevner i de rene lag af kalcit er mellem $2,5$ og $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, mens der i lerholdige zoner forekommer værdier mellem $5 \cdot 10^{-10}$ til 10^{-8} m/s . Price /24/ rapporterer værdier af samme størrelsesorden fra kridtet i England.

5.4.2 Danienkalk

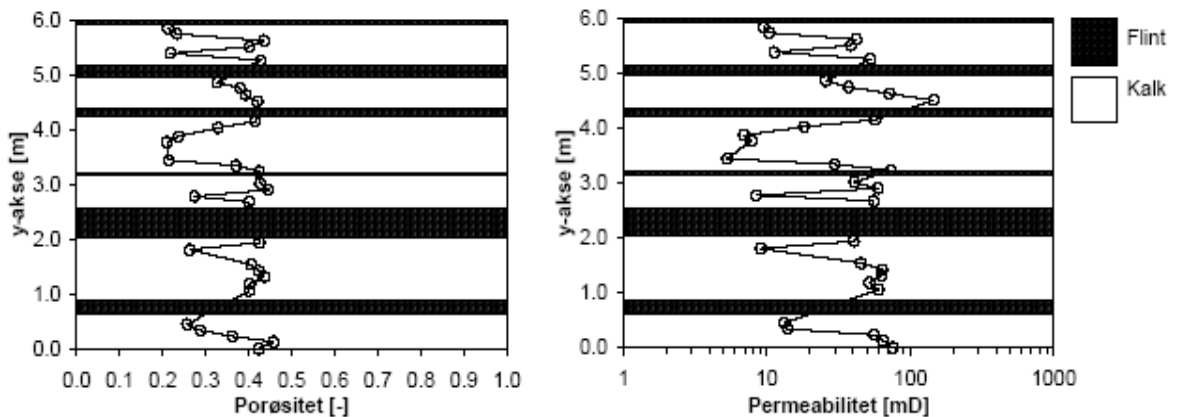
Karlstrup Kalkgrav

I prøver udtaget horisontalt fra én kalkbænk i bryozokalken i Karlstrup Kalkgrav, er der påvist en relativt lille variation i både porøsitet og permeabilitet (figur 5-16). De målte porøsiteter er mellem 41,5 og 44,4 %, med et gennemsnit på 43 %. De målte gaspermeabiliteter er mellem 72,4 og 147 mD, og den gennemsnitlige permeabilitet er 111 mD. Dette svarer til en hydraulisk ledningsevne på omkring $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.



Figur 5-16 Porøsitet og permeabilitet i Danienkalk fra Karlslunde Kalkgrav. Prøverne er udtaget som et horisontalt profil i en kalkbænk i en bryozobanke. Lokaliseringen fremgår af figur 5-3.

Målte porøsiteter og gaspermeabiliteter i det undersøgte vertikale profil i Karlstrup Kalkgrav fremgår af figur 5-17. I dette profil er observeret en større variation i porøsiteten, idet der er målt værdier mellem 21,0 og 45,8 %, med en gennemsnitlig porøsitet på 35,6 %. Målte gaspermeabiliteter i bryozokalken er mellem 5,27 og 146 mD med en gennemsnitsværdi på 41,3 mD. Beregnede hydrauliske ledningsevner er således mellem $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s og $0,7 \cdot 10^{-6}$ m/s, med en gennemsnitværdi på $0,2 \cdot 10^{-6}$ m/s. I profilet er der en positiv korrelation mellem porøsitet og permeabilitet i profilet, således at der, hvor der er høje porøsiteter, er der også en høj permeabilitet.



Figur 5-17 Porøsitet og permeabilitet i Danienkalk fra Karlstrup Kalkgrav. Prøverne er udtaget som et horisontalt profil i en kalkbænk i en bryozobanke. Lokaliseringen fremgår af figur 5-3.

På baggrund af disse relativt få opmålinger fra Karlstrup Kalkgrav kan der drages følgende foreløbige konklusioner med hensyn til variationer i porøsitet og permeabilitet i bryozokalken: I de horisontale, lag-parallele prøver er der påvist en relativt homogen fordeling af kalkens hydrauliske egenskaber med en relativt høj gennemsnitlig porøsitet på 43 % og en hydraulisk ledningsevne på $0,2 \cdot 10^{-6}$ m/s.

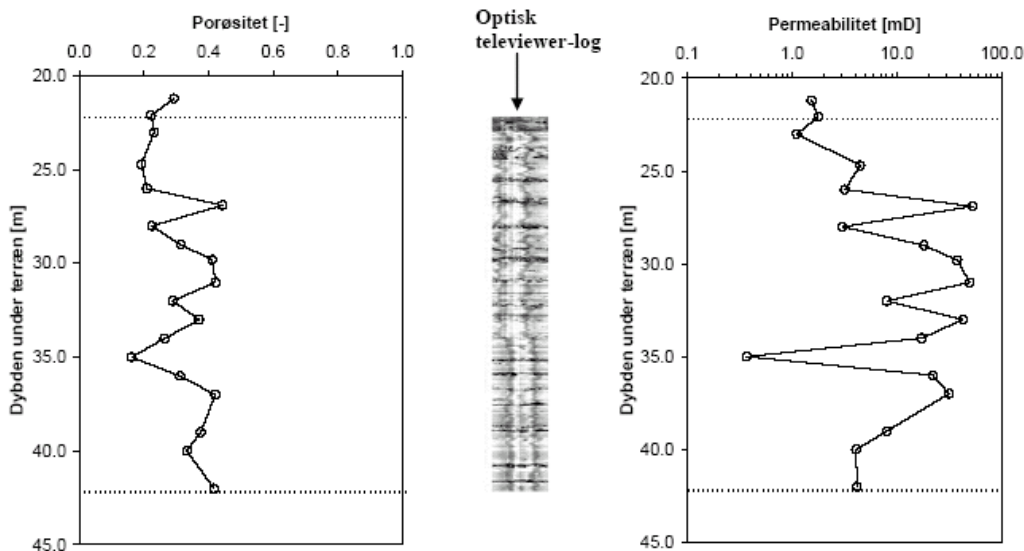
I det undersøgte vertikale profil er der påvist større variationer i målte porøsiteter og gaspermeabiliteter, og disse må tolkes som værende et resultat af sekundære processer i kalken. De påviste variationer i det vertikale profil synes især at være knyttet til kontakterne mellem kalk- og flintenhederne. Eksempelvis ses i profilet ved højden 3,6 m, at der forekommer de højeste værdier af både porøsitet og permeabilitet i kontakten mellem flint og kalk, mens de laveste værdier forekommer midt i kalklaget. Porøsiteten og permeabiliteten er størst ved over- og underkanten af kalklaget. Mellem andre flintlag ses imidlertid den omvendte eller slet ingen tendens til variation i sedimenternes porøsitet og permeabilitet. Denne større variation i Danienkalkens porøsitet og permeabilitet i kontakten til flintlagene kan tolkes som et resultat af opløsning og udfældning af kalcit i vandførende sprækker, som netop ofte forekommer i kontakten mellem kalk og flint. Hvor der forekommer en vandtransport i en sprække, kan der som følge af variationer i kulsyretrykket ske opløsning eller genudfældning af kalcit. Som følge af opløsning af kalcit i kontakten mellem vandførende sprækker (CO_2 holdigt vand) og matrix i kalken, vil der forekomme en gradvist fallende porøsitet, og permeabilitet, fra en vandfyldt sprække og ind i kalklaget.

Ovenstående foreløbige konklusioner er baseret på relativt få opmålinger i Karlslunde Kalkgrav, som bør suppleres med flere opmålinger. Med hensyn til en modellering af saltvandsudvaskning fra bryozokalk kan det konkluderes, at der i kalkenhederne er porøsiteter mellem 25 og 30 %, med en gennemsnitværdi på 27,5 %. Tilsvarende kan der regnes med en hydraulisk ledningsevne på omkring $0,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. I kontakten mellem kalken og flintlag, hvor der ofte er observeret sprækker, forekommer opløsnings- og udfældningsbetingede anomalier i kalken, som både kan forøge og reducere porøsitet og permeabilitet.

Lyksager boringen

På grund af en stor opknusning af det opborede materiale fra Danienkalken i denne boring, var det ikke muligt at foretage en indsamling af data med samme tæthed, som i det vertikale profil i Karlstrup Kalkgrav. Variationer i målte porøsiteter og permeabiliteter i prøver fra Danienkalken fremgår af figur 5-18. De målte porøsiteter er mellem 15 og 45 % og gennemsnittet er 31 %. De målte gaspermeabiliteter i sedimentet varierer mellem 0,4 og 53 mD, med et gennemsnit på 16 mD ($0,8 \cdot 10^{-6}$ m/s). Det fremgår af den optiske televiverlog i boringen, at mægtigheden af kalkbænkene typisk er mellem 1 m og 1,5 m som i væggene i Karlstrup Kalkgrav, se afsnit 5.1.

I sedimenterne fra den gennemborede sekvens af Danienkalken i Lyksagerboringen er der porøsiteter og gaspermeabiliteter af samme størrelse, som de påviste i kalken i Karlstrup Kalkgrav. De generelt høje værdier i sedimenterne fra kalkgraven kan skyldes statistiske variationer eller en generelt lidt større opløsning af kalk i væggene i graven. De påviste variationer i porøsitet og permeabilitet i Danienkalken i Lyksager boringen skyldes sandsynligvis helt overvejende sekundære processer, såsom opløsning og udfældning ved sprækker i bjergarten, - sprækker som i de fleste steder optræder mellem lagene af kalk og flint.



Figur 5-18 Målt porøsitet og permeabilitet i Danienkalken i Lyksager boringen, samt optisk televiver log.

Tune boringen

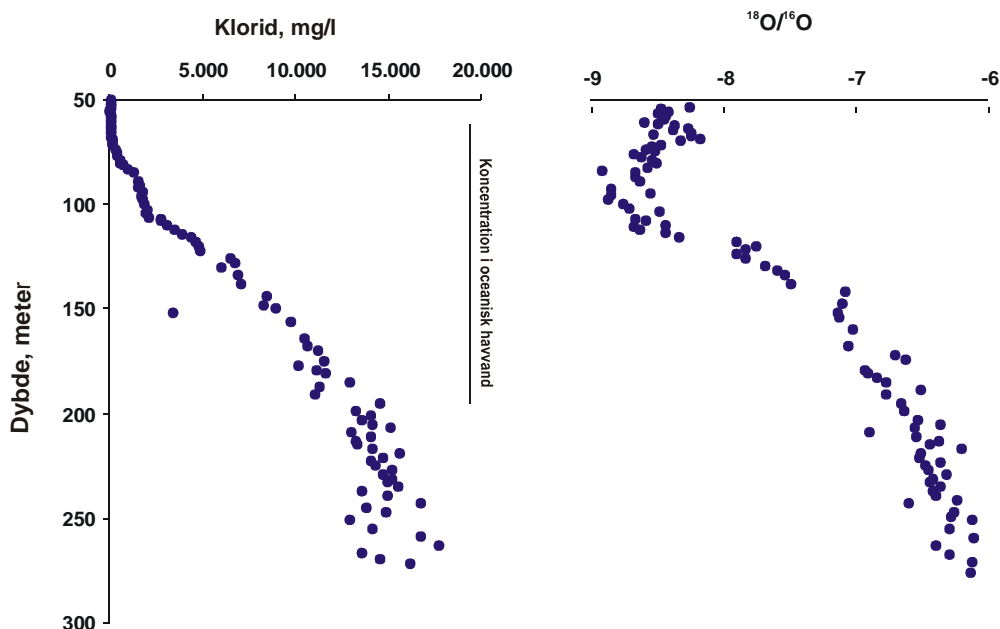
Målte porøsiteter i Danienkalken i Tune boringen fremgår af bilag 1. I finkornet kalk (mudstone) er porøsiteten 20-25 %, mens den i mere grovkornet kalk (packstone og wackestone) er 35-40 %.

5.5 Residualt porevand og stabile ilt-isotoper i Karlslunde boringen

5.5.1 Klorid og stabile ilt-isotoper

Koncentrationen af klorid i centrifugeret porevand fra kerner udtaget i Karlslunde boringen fremgår af figur 5-19, og bilag 3. Ned til ca. 70 mut. varierer koncentrationen af klorid mellem 40 og 101 mg/l, men fra denne dybde stiger porevandets indhold af klorid markant. I dybden 74 mut. er koncentrationen således 340 mg/l, i dybden 104 mut. er den 1.972 mg/l og 150 mut. er den 9.752 mg/l. I de nederste meter af boringen omkring 269 mut. er de højeste koncentrationer op mod 17.700 mg/l, hvilket svarer til 94 % af indholdet i oceanisk havvand (18.800 mg/l).

I forbindelse med borearbejdet blev der påvist vandførende zoner helt ned til 104 mut. Det indikerer, at der i formationen foregår advektiv strømning ned til denne dybde. Da forholdet mellem de stabile isotoper ^{18}O og ^{16}O er en god indikator på tilstedeværelsen af recent, meteorisk vand i formationen [48] blev der udtaget vandprøver til bestemmelse af forholdet mellem disse isotoper i porevandet. Forholdet mellem målte koncentrationer af ^{18}O og ^{16}O i porevandet fremgår også af figur 5-19. Det ses, at forholdet mellem ^{18}O og ^{16}O , udtrykt som $\delta^{18}\text{O}$ værdier, er mellem -8 og -9 til omkring 110 mut., og herfra stiger $\delta^{18}\text{O}$ værdierne jævnt nedad i formationen til en værdi omkring -6 i bunden af boringen. Nedbør i Nordvesteuropa har $\delta^{18}\text{O}$ værdier omkring -8,5 [48], så ^{18}O og ^{16}O forholdet i porevandet i Karlslunde borerer antyder som forventet, at der er recent, meteorisk vand i formationen ned til omkring 104 mut.

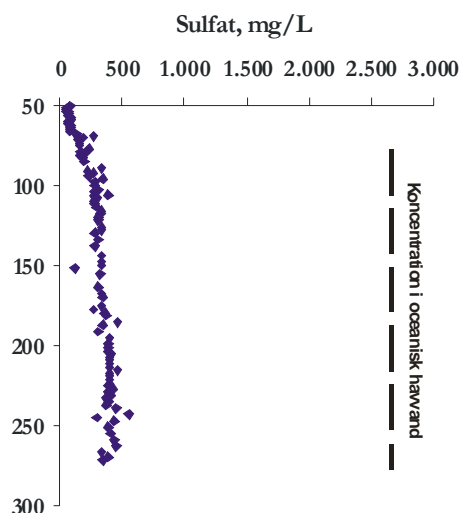


Figur 5-19. Koncentrationen af klorid og $\delta^{18}\text{O}$ værdier i centrifugeret porevand fra kerner af Skrivekridt i Karlslunde boringen

Fordelingen af koncentrationen af klorid i Skrivekridtet kan tolkes som et resultat af en opadrettet diffusion af marint porevand til et udviklet ferskvandssystem i den øvre del af kridtet og de glaciale lag. Fordelingen af kloridkoncentration indikerer, at der ned til ca. 70 mut. optræder et strømningsystem, som er domineret af advektiv strømning i sprækkerne. Fra 70 til 104 mut. stiger kloridkoncentrationen til omkring 2.000 mg/l. Dette interval må betegnes som overgangszonen mellem ferskt og salt vand, og kloridprofilet kan her være styret af enten advektiv strømning i et sprækkesystem med relativt lav hydraulisk ledningsevne (stor sprækkeafstand og/eller lille apertur) eller diffusion gennem den primære porøsitet i skrivekridtet. Under 104 mut. ændrer hældningen på kloridprofilet sig markant, hvilket indikerer, at enten strømningsystemet eller diffusionsegenskaberne her skifter karakter.

5.5.2 Koncentration af sulfat i porevandet

Koncentrationen af sulfat i porevandet er ned til ca. 70 mut. mellem 47 og 87 mg/l, og fra 100 m. u. t stiger koncentrationen til omkring 400 mg/l, og den stiger herefter jævnt nedad i profilet til omkring 435 mg/l i bunden i dybden 269 m u.t. Til sammenligning kan nævnes, at oceanisk havvand har en koncentration af sulfat på omkring 2.700 mg/l. Koncentrationen af sulfat er således kun 16 % af koncentrationen i oceanisk havvand. Grunden til den relativt lave koncentration af sulfat i forhold til klorid må forklares med sulfatreduktion i porevandet. Det er velbeskrevet, at der er sulfidmineraller i kridtet /22/, og nogle af disse er sene diagenetiske dannelser.

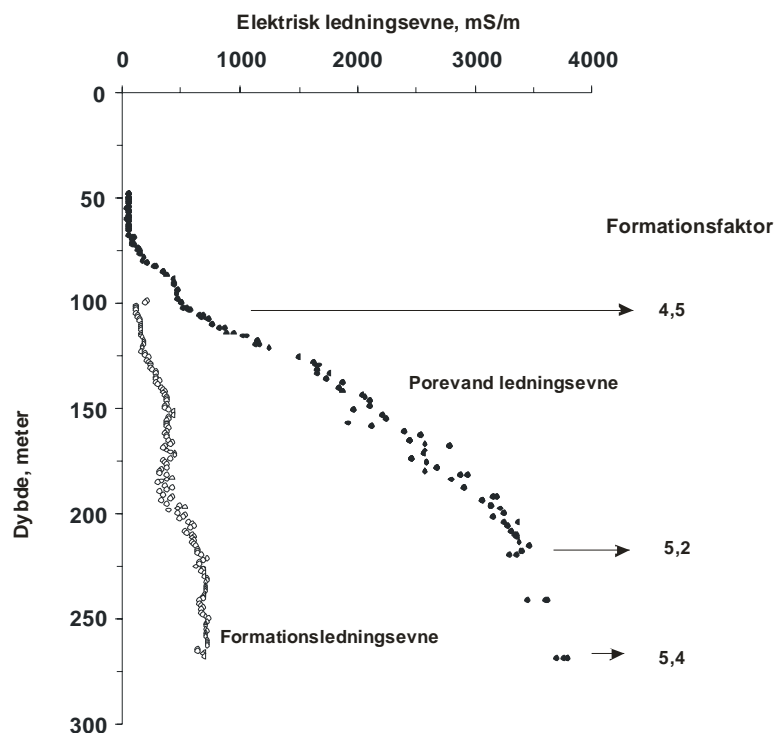


Figur 5-20 Koncentrationen af sulfat i centrifugeret porevand fra kridt i Karlslunde boringen. Den vertikale linie angiver koncentrationen af sulfat i havvand, som er 2.700 mg/l.

5.6 Formationsfaktoren i Skrivekridt

De målte elektriske ledningsevner i porevand fra centrifugerede prøver af Skrivekridtet fra Karlslunde boringen fremgår af bilag 3 (ved 25° C). De er omregnet til 10° C og vist på figur 5-21. Det ses, at porevandets elektriske ledningsevne stiger jævnt fra 70 mut. og nedad. I 75 mut. er den målte elektriske ledningsevne således omkring 200 mS/m, og den stiger stykvist lineært ned til 269 mut., hvor der blev målt en elektrisk ledningsevne på 3.750 mS/m (v. 10° C).

Formationens ledningsevnen, målt af induktions-loggen (figur 5-6) fremgår også af figur 5-21. Den målte formationsledningsevne i denne boring er "tilsyneladende elektriske ledningsevner", men under de givne måleforhold med en induktions-sonde i et åbent borehul, er de målte tilsyneladende ledningsevner stort set lig den reelle elektriske ledningsevne i formationen. Formationsledningsevnen er i dybden 104 mut. omkring 100 mS/m og den stiger jævnt nedad til 700 mS/m i bunden af boringen.



Figur 5-21 Den elektriske ledningsevne i Skrivekridt og i porevand v. 10° C fra SK. i Karlslunde boringen.

Den reciprokke værdi af en elektrisk ledningsevne (EC) er en elektrisk modstand (ρ), og sammenhængen mellem modstanden i sedimentet og porevandet er den såkaldte formationsfaktor, det vil sige, at formationsfaktoren (F) beregnes ved udtrykket:

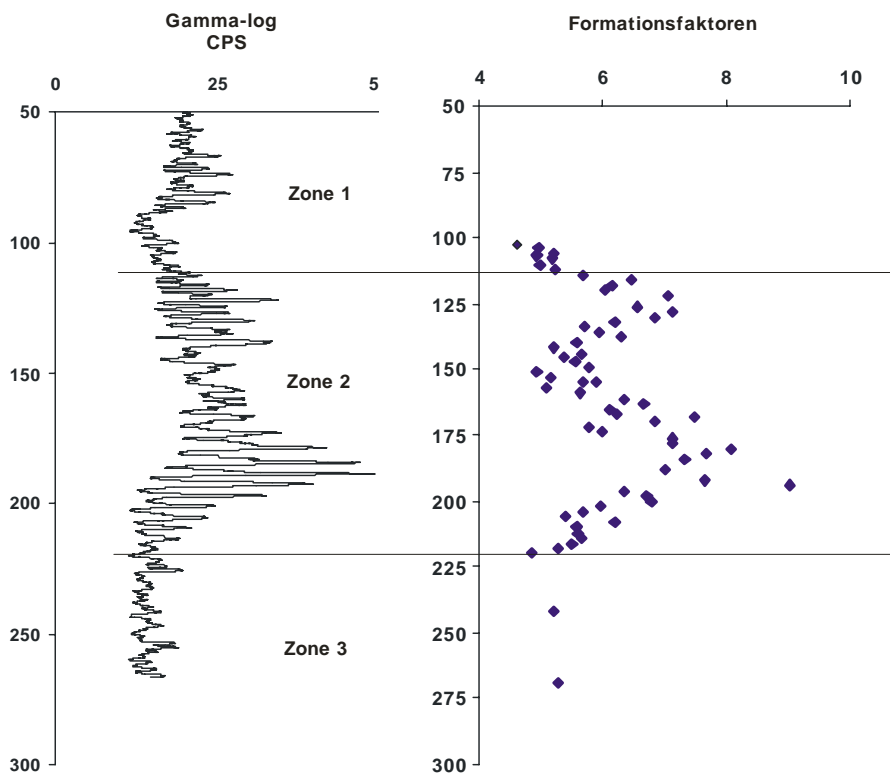
$$(5.2) \quad F = \rho_{\text{sediment}} / \rho_{\text{porevand}}$$

Udtrykt ved elektriske ledningsevner er formationsfaktoren givet ved udtrykket:

$$(5.3) \quad F = EC_{\text{porevand}} / EC_{\text{sediment}}$$

Det fremgår af figur 5-22, at i den øvre del af det loggede interval i Skrivekridtet (omkring 100 mut.), kan der for lag med et lille indhold af ler beregnes en formotionsfaktor omkring 4,5. På grund af en relativt lille ændring i den gennemsnitlige porøsitet ændres formotionsfaktoren for de rene kridt enheder kun lidt gennem det gennemborede interval. I zoner med et større indhold af ler er formotionsfaktoren typisk 5 - 6. Hvor porøsiteten i kridtet er mellem 45 og 50 %, vi formotionsfaktoren være omkring 4.

Relativt høje elektriske modstande i lerholdige zoner i kridtet er ikke umiddelbart hvad man vil forvente, idet leret vil reducere formationens modstand. Disse zoner er imidlertid også karakteriseret ved lave porøsiteter (figur 5-15), og deres lavere elektriske ledningsevne i forholdet til de mere rene lag af calcit, må derfor forklares med det lavere vandindhold. Ved de høje koncentrationer af opløste ioner i porevandet, er formotionsledningsevnen således i højere grad betinget af formotions mængde af elektrisk ledende porevand (porøsitet), end af indholdet af ledende lermineraller.



Figur 5-22 Naturlig gammastråling og beregnet formotionsfaktor (F) i Skrivekridtet fra Karlslunde boringen. Zone 2 har højere gammastråling pga. et større indhold af ler, og derfor også større formotionsfaktor, mellem 5 og 9. I zone 1 og 3 er formotionsfaktoren omkring 5.

Med hensyn til beregning af formotionsfaktoren for Skrivekridt kan det konkluderes, at for de øverste 50 meter af formationen, som hyppigst indgår i logging undersøgelser af boringer i Skrivekridt, er formotionsfaktoren omkring 4. Det er således muligt at omregne en målt formotionsledningsevne til en elektrisk ledningsevne for porevandet. Elektrisk ledningsevne for porevand kan videre omregnes til ækvivalent koncentration af klorid (bilag 2).

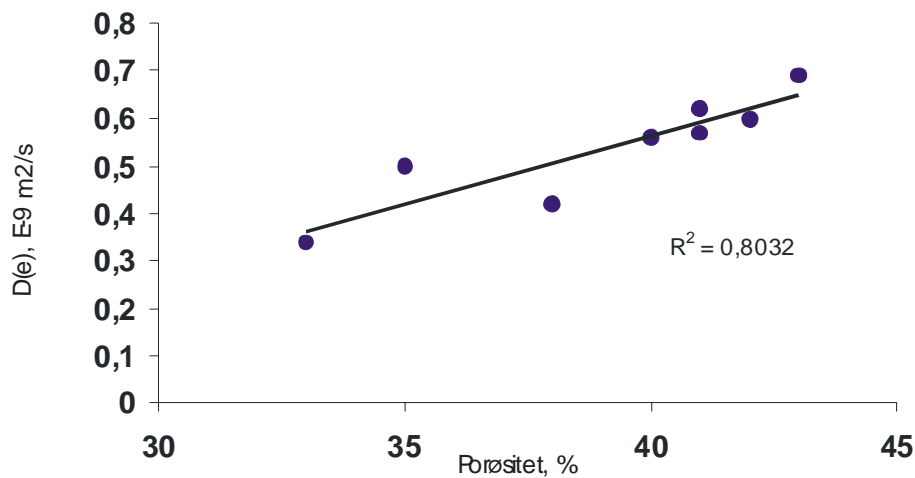
5.7 Effektive diffusionskoefficienter for klorid i Skrivekridt

Til anvendelse i den numeriske simulering af saltvandsudvaskningen ved diffusion i Skrivekridtet er klorids effektive diffusionskoefficient blevet bestemt på prøver udtaget fra Karlslunde boringen. Til disse forsøg blev der udtaget prøver fra otte dybder i kridtet, som repræsenterer zoner med et varierende porøsitet i Skrivekridtet.

Tabel 5-2 Porøsiteter og effektive diffusionskoefficienter for klorid og tritium i kridt bestemt ved 25° C.

Dybde m. u t.	Porøsitet %	Diffusionskoefficient, m ² /s
50	43	0,69
75	41	0,57
100	41	0,62
121	38	0,42
150	42	0,60
180	33	0,34
200	35	0,50
250	40	0,56

I prøverne fra kridtet blev der bestemt effektive diffusionskoefficienter for klorid på mellem 0,34 og 0,69·10⁻⁹ m²/s. Diffusionskoefficienterne er opgivet ved en temperatur på 25° C. Til sammenligning kan nævnes, at klorids frie diffusionskoefficient i vand er 0,93·10⁻⁹ m²/s ved 25° C. De bestemte diffusionskoefficienter ses i figur 5-23 som funktion af sedimentets porøsitet.



Figur 5-23 Bestemte effektive diffusionskoefficienter for klorid i Skrivekridt ved 25° C.

Som beskrevet i det teoretiske afsnit, kan et sediments effektive diffusionskoefficient angives som en funktion af sedimentets porøsitet ved ligningen:

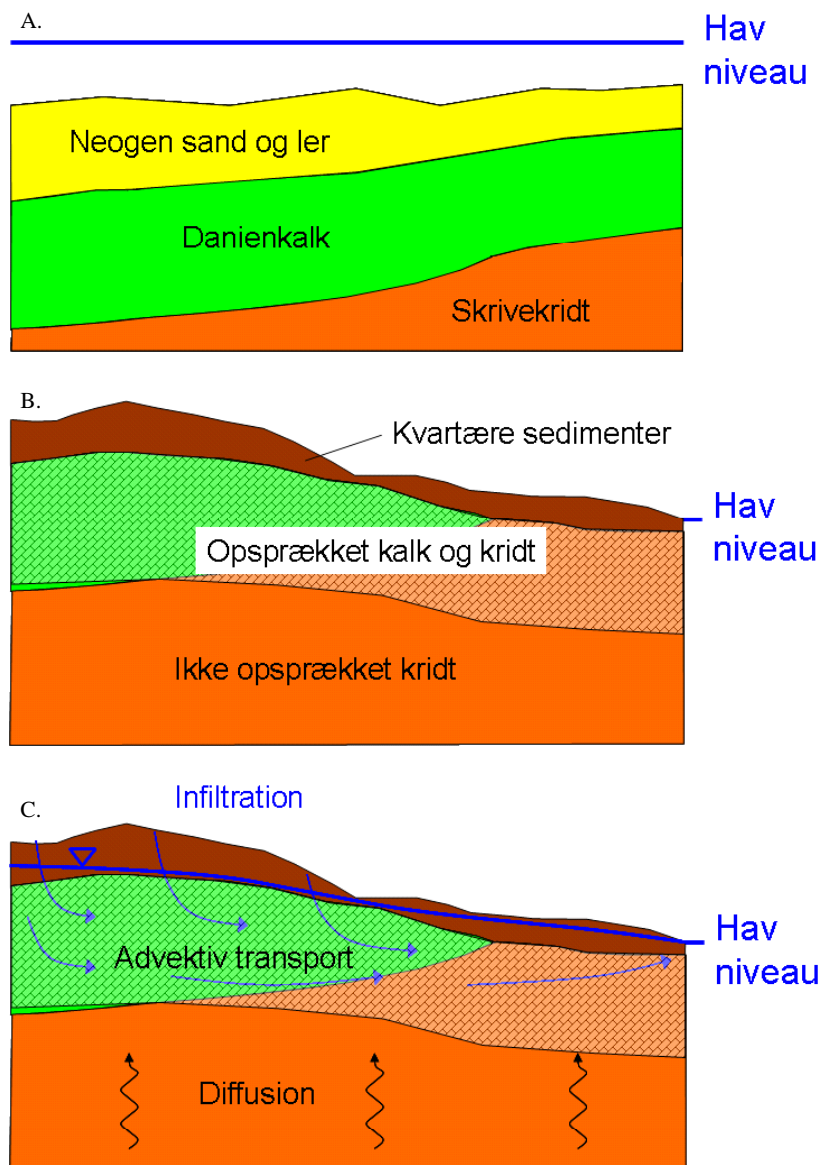
$$(4.8) \quad D_{eff} = D_f \theta$$

Hvor D_{ef} angiver en ions effektive diffusionskoefficient i et sediment, D_f er ionens frie diffusionskoefficient i vand og Φ er sedimentets porøsitet. Det fremgår af figur 5-23, at i det højpermeable kridt er der som forventet er en lineær sammenhæng mellem klorids effektive diffusionskoefficient og porøsiteten af bjergarten.

6. En konceptuel model for saltudvaskningen

6.1 Konceptuel hydrogeologisk model

På baggrund af den generelle viden om de geologiske og hydrogeologiske forhold i Karlstrup området (kapitel 3), samt resultaterne fra denne undersøgelse (kapitel 5), kan der opstilles følgende konceptuelle hydrogeologiske model for udvaskningen af marint porevand fra Skrivekridtet og Danienkalken. Den konceptuelle model fremgår af figur 6-1.



Figur 6-1 Konceptuel hydrogeologisk model for udvaskning af saltvand fra Skrivekridt og Danienkalk i Karlslunde værktedsområde. 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.

I Paleogen og Neogen tid blev der i den østlige del af Det danske Bassin aflejret omkring 500 m sedimenter over Skrivekridtet og Danienkalken (figur 6-1; A). Sedimenterne blev begravet med en porevandssammensætning som i oceanisk havvand. Porøsiteten i kridtet blev under denne indsykning reduceret fra omkring 65 % til 40 %. Kompaktionen har medført en svagt opadrettet vandbevægelse i bassinet. Som følge af et tektonisk opløft i Sen Neogen, blev de overlejlrende bjergarter borteroderet, og Skrivekridtet og Danienkalken blev opløftet (figur 6-1; B). Denne hævnning foregik indtil for 2-3 millioner år siden. Opløftet skabte hovedsageligt subvertikale sprækker i både kridtet og kalken, medens aflastningen som følge af erosionen skabte subhorizontale sprækker i formationerne. De sidstnævnte er siden istiden yderligere forøget og aktiveret ved aflastningen af istrykket.

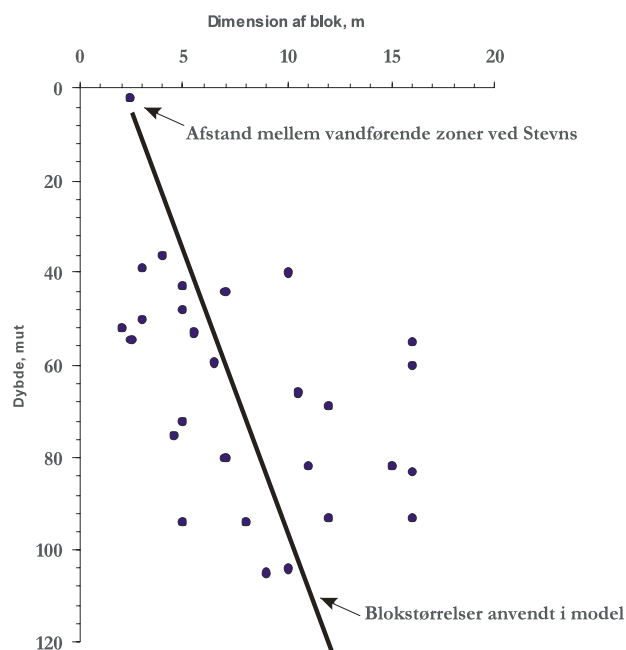
Efter opløftet til det nuværende niveau er meteorisk vand infiltreret ned i formationerne, hvilket har resulteret i en udvaskning af klorid, som primært er styret af advektiv transport i den opsprækkede del og diffusiv transport i den underliggende ikke opsprækkede del, se figur 6-1; C.

6.2 Skrivekridtet

I opmålinger i kridtet på Stevns er der observeret afstande mellem de subhorizontale sprækker på mellem 0,07 og 1,50 m, og den gennemsnitlige afstand er 0,40 m. I den øvre del af formationen er der påvist en hydraulisk apertur på op mod 0,5-0,6 mm, og de beregnede hydrauliske aperturer er mindre, jo dybere sprækkerne forekommer i formationen. Undersøgelserne af blotninger af kridt, samt sammenligninger mellem optisk television log og flow-log i borer, viser, at ikke alle subhorizontale sprækker er vandførende. Der sker kanalisering af vand langs de subhorizontale sprækker, og afstanden mellem disse vandførende zoner er i Stevns Klint i gennemsnit 2,4 m /13/.

Den tektoniske kompression af sedimenter, med en hovedretning sydvest-nordøst samt selve den post Neogene hævnning har skabt flere sæt subvertikale sprækker i kridtet og kalken. Længden af disse sprækker er i blotninger ved Stevns Klint målt til at være mellem 0,45 og 4,87 m, med en gennemsnitlængde på 1,4 m. De subvertikale sprækker fordeler vandet mellem de subhorizontale sprækker, og nedtrængning af ferskvand foregår i disse sprækker. I blokkene er porøsiteten omkring 40 % og den hydrauliske ledningsevne er mellem 2,5 og $5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

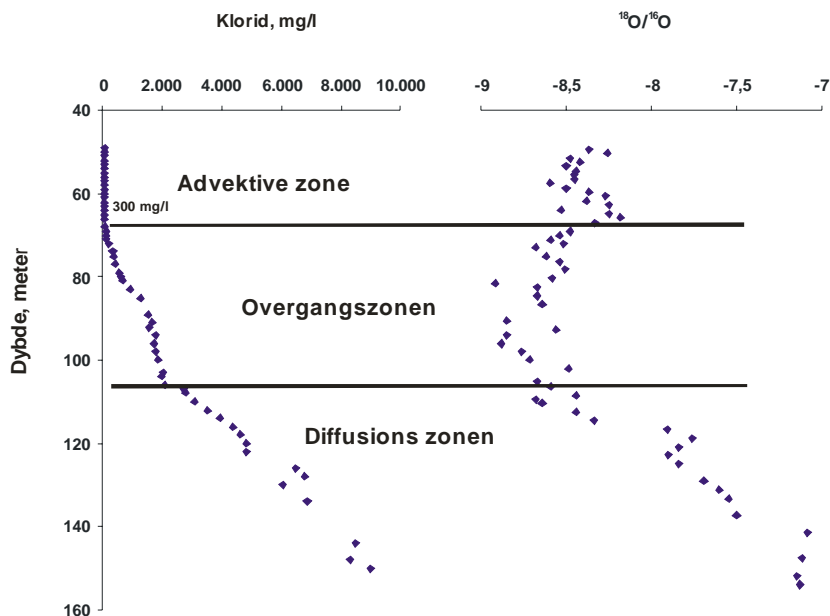
Små variationer i målinger af temperatur og elektrisk ledningsevne i borer skyldes ofte mindre indstrømninger fra sprækker i bjergarterne /15/. Dimensionerne af blokkene i kridtet i det subortogonale netværk af sprækker kan således vurderes ud fra en kombineret tolkning af temperatur-log, elektrisk ledningsevne-log og flow-log. På baggrund af en analyse af undersøgelsesboringerne: Lyksager kildeplads (207.3579); Tune (207.3841); Ishøj Mose (207.3586); samt supplerende borer uden for værkstedsområdet: Øbelholt (187.1354), Glostrup (200.41E), Lautrupparken (200.4186), Hvidovre (207.162), er der opstillet en foreløbig model for blokkenes dimension med stigende dybde, figur 6-2. De tolkede størrelser af blokken i Skrivekridtet er bestemt som afstanden mellem to identificerede indstrømningszoner i borerne. Blokkens dybde er angivet som dybden af blokkens midtpunkt under terræn.



Figur 6-2 Tolkede dimensioner af blokke i et subortogonalt system af sprækker i Skrivekridt. Blokkenes dimension er vurderet ud fra en sammenstilling af geofysiske logdata fra syv borehuller. Se tekst for yderligere forklaring.

Det fremgår af figur 6-2, at der som forventet kan påvises en tendens til, at matrixblokkene bliver større med stigende dybde, hvilket afspejler en lukning af de subhorizontale sprækker med stigende begravningsdybde. I den øvre del af formationen er dimensionen af blokkene i det subortogonale system således omkring 2,5 m x 2,5 m. Denne dimension er baseret på ovennævnte observerede afstande mellem vandførende kanaler langs de subhorizontale sprækker ved Stevns Klint. Blokstørrelsen forøges lineært med stigende dybde til omkring 12 m ved en begravningsdybde på 120 mut. Da subvertikale sprækker vil være underrepræsenteret ved identifikation af indstrømningszoner i borer, kan denne model for blokkenes dimension underestimere dimensionerne i det horisontale plan. Hvis blokkens dimensioner i dette plan er mindre end i den vertikale retning, vil diffusionsafstandene til en aktiv sprække være kortere i disse retninger, og hermed tiden for udvaskning af saltvandet kortere.

I de dybere lag ned til 100-120 mut. har udvaskningen af saltvand fra Skrivekridtet således kunnet foregå ved en advektiv transport i det subortogonale sprækkesystem. Den observerede stigning i saltindholdet i matrix i Skrivekridtet fra 70 til 100 mut. i Karlslunde Mose boringen må forklares med en ufuldstændig udvaskning af saltvandet i større blokke, jvf. ovenstående model. Denne observation er understøttet af det forhold, at sammensætningen af stabile ilt-isotoper viser, at der er transporteret recent regnvand ned til omkring 104 mut. i formationen, figur 6-3.



Figur 6-3 Konceptuel model med hydrauliske zoner i i Skrivekridtet, baseret på porevands indhold af klorid og stabile ilt-isotoper.

Med hensyn til transport af saltvand og andre ioner kan Skrivekridtet overordnet inddeles i tre zoner (figur 6.3). En den øvre zone forekommer der en advektiv transport i sprækker, mens ioner diffunderer ind og ud af matrixblokke mellem sprækkerne. I området hvor boringen er etableret findes fra 25 til 70 mut. Saltvandet er fuldstændigt udvasket fra matrixblokke.

Herunder træffes en overgangszone, hvor der forekommer advektiv strømning, men afstanden mellem sprækkerne er større i denne zone, sammenlignet med den øvre zone. Saltvandet er kun delvist udvasket i denne zone, men koncentrationen af iltisotoper viser, at der er sket en udveksling med recent, meteorisk vand.

Nedrest findes en diffusionszone, som er domineret af en opadrettet diffusion af porevandet. Den kemiske gradient bliver opretholdt på grund af den horisontale transport af opløste salte i den øvre del af formationen. Profilerne af opløste ioner i Skrivekridtet er kontrolleret af de effektive diffusionskoefficienter i kridtet, som er betinget af dels porøsiteten og dels indholdet af ler i sedimentet, samt den tid diffusionen har været virksom i. I kridt med små koncentrationer af ler er den effektive diffusionskoefficient bestemt til at være omkring $0,35 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, mens den i zoner med højt indhold af ler er bestemt til $0,05 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

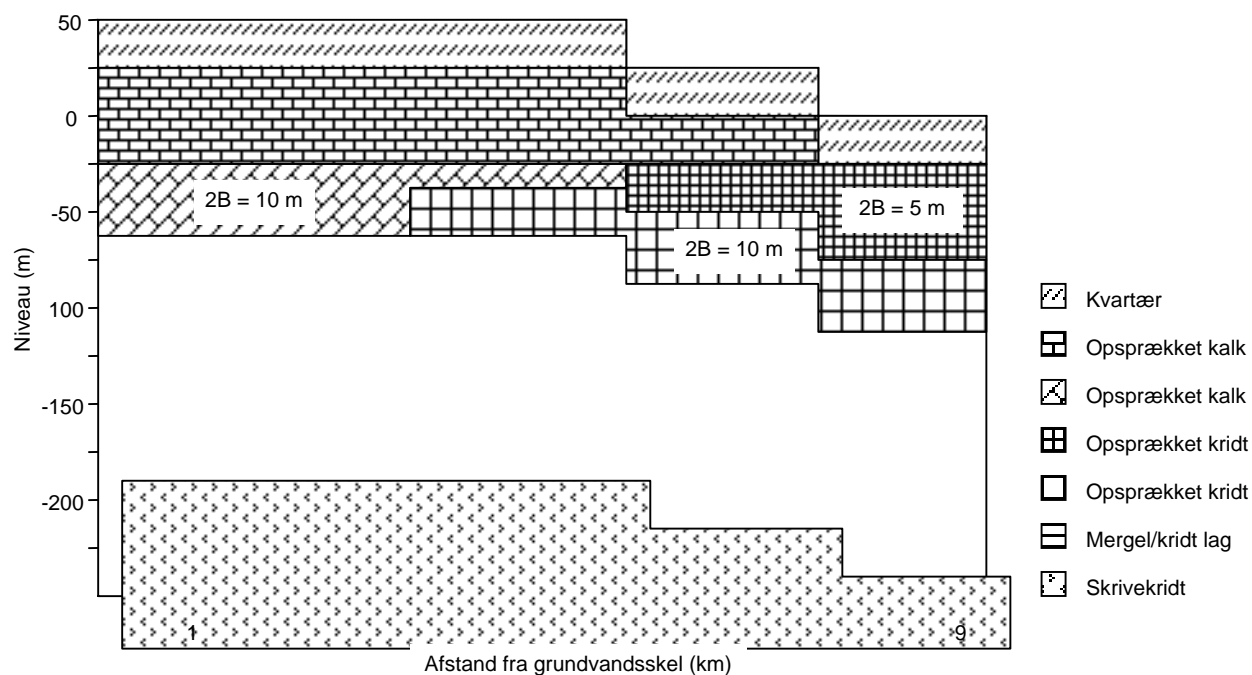
6.3 Danienkalken

På baggrund af observationer i Karlstrup Kalkgrav, samt Lyksager og Tune borerne, kan der opstilles følgende konceptuelle hydrogeologiske model for formationen i værkstedsområdet. I Danienkalken er der udviklet subhorizontale sprækker, som især optræder i kontakten mellem kalk- og flintlagene. Derudover er der udviklet subvertikale sprækker, som på baggrund af få opmålinger i Karlstrup Kalkgrav skønnes at have en gennemsnitlig af-

stand på 3-4 m. I Danienkalken er der således, i lighed med Skrivekridtet, dannet et sæt subhorizontale sprækker, og afstanden mellem blokkene forøges nedad i formationen. På baggrund af de få udførte opmålinger fra Tune og Lyksager borerne kan det konkluderes, at den øvre del af formationen indeholder blokke med en dimension på 2-3 meter, mens der i den nedre del af formationen findes blokke med en dimension på omkring 6 m. I blokkene varierer porøsiteten mellem 20 og 40 %. De laveste porøsiteter forekommer i de finkornede dele af formationen (mudstone), mens de højeste forekommer i de mere grovkornede kalksten (wackestone og packstone). Kalkens permeabilitet i blokkene varierer mellem 10^{-8} og 10^{-6} m/s.

6.4 Modelopsætning

Udvaskningen af klorid i Danienkalk og Skrivekridt i værkstedsområdet modelleres ved opsætning af en to-dimensionalt model i programmet FRACTRAN. Til modellering af udvaskningen er der anvendt den hydrogeologiske model vist i figur 6-4. De øverste 25 m af tværsnittet antages at bestå af kvartære aflejringer. Herunder findes der i den vestlige del Danienkalk og i den østlige del Skrivekridt. Danienkalken er opdelt i to enheder med forskellig sprækkedensitet, mens Skrivekridtet er opdelt i fire enheder, to opsprækkede og to ikke-opsprækkede.



Figur 6-4 Hydrogeologisk model for tværsnittet ved Karlslunde. $2B$ repræsenterer sprækkeafstanden (spacing) for de opsprækkede formationer. Skrivekridtet nederst antages at fortsætte til en dybde på mindst kote -500 m.

Baseret på geofysiske flow-logs (figur 5-7 til figur 5-10) antages både Danienkalken og Skrivekridtet at have en relativt høj sprækkedensitet i de øverste 50 m (25-75 mut.), og afstanden mellem hydraulisk aktive sprækker (spacingen) er estimeret til ca. 5 m. Da dette skøn er baseret på geofysiske logs i borerne, hvor det hovedsageligt er horisontale spræk-

ker der kortlægges, er spacingen for de hydrauliske aktive vertikale sprækker usikker og antages her at være lig spacingen for de horisontale sprækker. Det er sandsynligt, at de øverste få meter af de to bjergarter er stærkt opsprækket som følge af glacial aktivitet og derfor har en højere sprækkedensitet end beskrevet ovenfor /11,12/. Det negligeres imidlertid her, dels pga. manglende data, dels for at holde den hydrogeologiske model så simpel som muligt.

På baggrund af laboratoriemålinger af porøsitet og permeabilitet på prøver fra kerner fra Tune, Lyksager og Karlslunde borerne er der påvist middelværdier som opført i tabel 6-2. Fra tilgængelige flow-log data er det estimeret, at ca. 95 % af den totale transmissivitet målt ved prøvepumpningstest (se tabel 6-1) knytter sig til de øverste 50 m af formationerne. Bulk hydraulisk ledningsevne er derfor blevet fastlagt som $K_b = 0.95 \cdot T/D$, se tabel 6-3, hvor D er tykkelsen af den hydrogeologiske enhed, som i dette tilfælde er $D = 50$ m. Ved anvendelse af ligningen:

$$(6.1) \quad K_b = \frac{\rho g (2b)^3}{12\mu(2B)} + K_m$$

og værdierne for bulk hydraulisk ledningsevne for kalken og kridtet, kan aperturen (2b), beregnes, hvis formationen antages at være homogen med parallelle sprækker, se tabel 6-3. Sprækkeporøsiteten, θ_f , er estimeret vha. ligning (4-11) og et initialt estimat på masseudvekslingsparameteren β er beregnet vha. ligning (4-13).

I intervallet fra 75 til 115 mut. er sprækkeafstanden (2B) estimeret til 10 m. Dette estimat er primært baseret på data fra Skrivekridtet, og troværdigheden af dette estimat mht. Danienkalken er relativt lav. Da kun 5 % af den målte transmissivitet antages at stamme fra denne zone, er den beregnede bulk hydrauliske ledningsevne og derfor også sprække-aperturen tilsvarende lav, se tabel 6-3.

Tabel 6-1 Resultat af geostatistisk analyse af pumpetests i Danienkalk and Skrivekridt i værkstedsområdet. Korrelationslængden fundet for Danienkalken er baseret på en exponential semivariogram model.

Formation	Geometrisk middel T (m ² /s)	Varians på lnT ln(m ² /s) ²	Korrelations- Længde (m)
Danienkalk	4.0·10 ⁻³	1.0	413
Skrivekridt	6.7·10 ⁻⁴	0.4	-

Tabel 6-2 Hydrauliske egenskaber målt på prøver fra Danienkalk fra borerne Lyksager og Tune, samt fra Skrivekridt fra Karlslunde boringen. K_A , K_H and K_G repræsenterer hhv. den aritmetiske, harmoniske and geometriske middelværdi af hydraulisk ledningsevne. θ er matrix-porøsiteten.

Boring		Antal prøver	K_A (m/s)	K_H (m/s)	K_G (m/s)	Anisotropi- faktor (K_A/K_H)	θ
Lyksager		19	1.2·10 ⁻⁷	2.2·10 ⁻⁸	7.7·10 ⁻⁸	5.5	0.31
Tune		31	1.0·10 ⁻⁷	2.2·10 ⁻⁹	1.2·10 ⁻⁸	45	0.26
Karlslunde	75-115 mut.	34	3.9·10 ⁻⁸	3.4·10 ⁻⁸	3.7·10 ⁻⁸	1.1	0.39
	115-210 mut.	79	1.7·10 ⁻⁸	6.6·10 ⁻⁹	1.1·10 ⁻⁸	2.6	0.34
	210-269 mut.	44	3.2·10 ⁻⁸	2.9·10 ⁻⁸	3.0·10 ⁻⁸	1.1	0.39

Fra 115 til 210 mut. antages det, at der ikke eksisterer hydraulisk aktive sprækker. Kun data fra Skrivekridtet er listet i tabel 6-3, da Danienkalken ikke findes i så stor dybde i oplandet. Zonen fra 115 til 210 m. u. t. er karakteriseret ved en heterogen fordeling af porøsitet og hydraulisk ledningsevne, som følge af et varierende indhold af ler i kridtet. Da kun en boring er boret til denne dybde, er det ikke muligt at fastlægge den horisontale udbredelse af mergellagene direkte. Det antages imidlertid, at mergellagene har regional horisontal udstrækning pga. aflejningsmiljøet, se tidligere. Den 95 m tykke sekvens behandles som ét ækvivalent porøst medium med effektiv horisontal og vertikal hydraulisk ledningsevne svarende til hhv. den aritmetiske og harmoniske middelværdi, se tabel 6-2. I tabel 6-3 er også den effektive diffusionskoefficient baseret på laboratoriemålinger specificeret.

Under 210 mut. optræder der ikke-opsprækket skrivekridt med lavt lerindhold. Der findes ingen målinger af den effektive diffusionskoefficient fra denne enhed og D_{eff} er derfor estimeret. Pga. ligheden i porøsitet og matrix hydraulisk ledningsevne med zonen fra 25-115 mut., antages det, at den effektive diffusionskoefficient for de to enheder er ens. De aritmetiske og harmoniske hydrauliske ledningsevner opskrevet i tabel 6-2 antages at repræsentere de effektive horisontale og vertikale ledningsevner for denne zone.

Tabel 6-3 Parameterværdier for den hydrogeologiske model for Danienkalken og Skrivekridtet. K_m , θ_m , $2B$ og D_{eff} er fundet på baggrund af målinger, mens K_b , $2b$, θ_f og β er beregnet.

	Dybde (mut.)	K_m (m/s)	θ_m (1)	$2B$ (m)	D_{eff} (m ² /s)	K_b (m/s)	$2b$ (μm)	θ_f (1)	B (s ⁻¹)
Danienskalk	0-25	Kvartære aflejringer							
	25-75	$4.5 \cdot 10^{-8}$	0.28	5	$3 \cdot 10^{-10}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$	847	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-11}$
	75-115	$4.5 \cdot 10^{-8}$	0.28	10	$3 \cdot 10^{-10}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$	430	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-11}$
Skrivekridt	0-25	Kvartære aflejringer							
	25-75	$3.7 \cdot 10^{-8}$	0.39	5	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	466	$9.3 \cdot 10^{-5}$	$4.9 \cdot 10^{-11}$
	75-115	$3.7 \cdot 10^{-8}$	0.39	10	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$8.4 \cdot 10^{-7}$	236	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$
	115-210	$1.1 \cdot 10^{-8}$	0.34	∞	$0.5 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
	210-270	$3.0 \cdot 10^{-8}$	0.39	∞	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$	-	-	-

6.5 Initial- og randbetingelser

Initialt har porevandet bestået af havvand svarende til en kloridkoncentration i hele modelområdet på 18.800 mg/l. Da meteorisk vand begyndte at infiltrere ned i formationerne blev udvaskningsprocessen påbegyndt med faldende kloridkoncentrationer til følge. Det vides ikke med hvilken rate meteorisk vand har perkoleret til karbonatbjergarterne, eller hvordan grundvandsdannelsen har fluktueret over tid. Det antages her, at grundvandsdannelsen kan approksimeres med raten estimeret af Henriksen og Sonnenborg /49/ på 40 mm/år, som repræsenterer grundvandsdannelsen før grundvandsindvinding under antagelse af nuværende klimatiske forhold. Størrelsen af grundvandsdannelsen vil primært have indfly-

delse på den tidsskala, hvormed klorid er udvasket fra de opsprækkede formationer, hvor den dominerende transportmekanisme er advektiv transport.

Det antages, at strømningsfeltet, som kan tolkes ud fra den nuværende fordeling af hydraulisk trykniveau i Danienkalken og Skrivekridtet, repræsenterer den generelle situation gennem perioden, hvor udvaskningsprocessen har stået på. Placeringen af grundvandsskellet og strømlinien, tæt på Tune boringen og Karlslunde boringen, antages altså at have været stationære gennem de sidste par millioner år. Da det generelle hydrauliske trykniveau er reduceret pga. intensiv oppumpning, antages gradienten i præ-pumpesituationen at være større end den nuværende, og grundvandspotentialet ved grundvandsskellet antages at være af størrelsesorden 10 m højere end det nuværende niveau, hvilket resulterer i en middelgradient i området på $4 \cdot 10^{-3}$. Grundvandsskellet benyttes som no flow randbetingelse i de efterfølgende modelsimuleringer, og kystlinien antages at udgøre en fastholdt trykrandbetingelse med værdien 0 m. Mht. transport antages det infiltrerende meteoriske vand at have en kloridkoncentration på nul og ved kystlinien anvendes en nul-gradient randbetingelse.

Bath and Edmunds /30/ fandt, at vand med en sammensætning svarende til havvand var lokaliseret ca. 400 m under terræn, svarende til 350 m under bunden af de kvartære aflejringer. Da kloridprofilen målt i nærværende arbejde er sammenligneligt med den øvre del af Bath og Edmunds' profil, antages det her, at rent havvand pt. er lokaliseret mindst 400 m. ved Karlslunde boringen. Modelområdet er her specificeret til at udstrække sig til kote -475 m, hvilket antages at være tilstrækkeligt til at nå ned i rent havvand. Randbetingelsen for både strømning og transport er her angivet til nul fluks.

7. Numeriske simuleringer

Simuleringerne af udvaskningen af marint porevand fra Danienkalken og Skrivekridtet er blevet gennemført som separate simuleringer af den del af de geologiske lag, hvor der foregår advektiv strømning (den opsprækkede zone og overgangszonen) og den ikke-opsprækkede zone (diffusionszonen). Simulering af udvaskning i diffusionszonen er foretaget to på forskellige måder. Først er der foretaget en simulering med advektiv strømning og diffusion, men uden at medtage densitetsstrømning. Herefter er der foretaget en simulering af udvaskningen alene som følge af én-dimensional, opadrettet diffusion, altså uden en advektiv strømning. Den sidstnævnte simulering repræsenterer situationen, hvor densitetseffekten medfører, at ferskvand strømmer ud over saltvandet, og der derfor ikke forekommer ren fysisk opblanding af fersk og saltvand i Skrivekridtet uden sprækker. Denne modelstrategi er valgt, da det ikke indenfor en rimeligt simuleringstid er muligt med FRAC-TRAN at inddrage densitetsbetinget strømning i geologisk formation over flere millioner år.

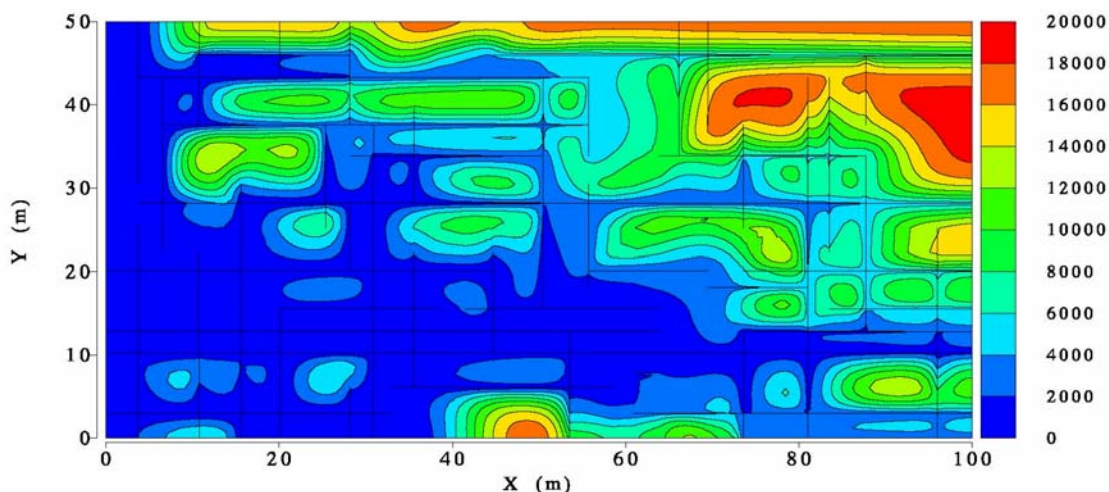
7.1 Dobbelt-porøs modellering af opsprækket zone

Vha. Peclet-tallet givet ved ligning (4.15) kan det evalueres, om en dobbelt-porøs model kan anvendes til simulering af de opsprækkede formationer. Ved indsættelse af parameter-værdierne fra tabel 6-3 samt en hydraulisk gradient på $4 \cdot 10^{-3}$ i (4.15) findes værdierne opskrevet i tabel 7.1. Diffusionsafstanden sættes lig halvdelen af sprækkeafstanden, $L_d = B$, hvilket betyder, at stoffet skal diffundere fra midten af et matriceelement til sprækken. Det ses, at kriteriet $P_c < 1$ ikke er opfyldt for nogen af zonerne. Den advektive transport gennem matrix kan derfor ikke negligeres, når udvaskningen af klorid fra den opsprækkede zone skal bestemmes. Dette problem kan principielt løses ved at benytte en dobbelt-permeabel model, hvor der er mulighed for strømning i både sprækkedomænet og matrixdomænet. Alternativt kan en dobbelt-porøs model anvendes. I dette tilfælde skal masseudvekslingsparameteren β forøges, da der forventes en højere udveksling mellem sprækker og matrix, end den der er forårsaget af ren diffusion, og det er derfor ikke muligt at estimere β vha. de analytiske udtryk. Denne approksimation vil give anledning til fejl, da den dobbelt-porøse model beskriver udvekslingen mellem sprække- og matrix-domænet som værende styret af koncentrationsforskellen mellem de to domæner, hvilket ikke er tilfældet for den advektive udveksling. I det følgende vil β i den dobbelt-porøse model derfor blive kalibreret mod resultater fra en diskret sprækkemodel, se nedenfor.

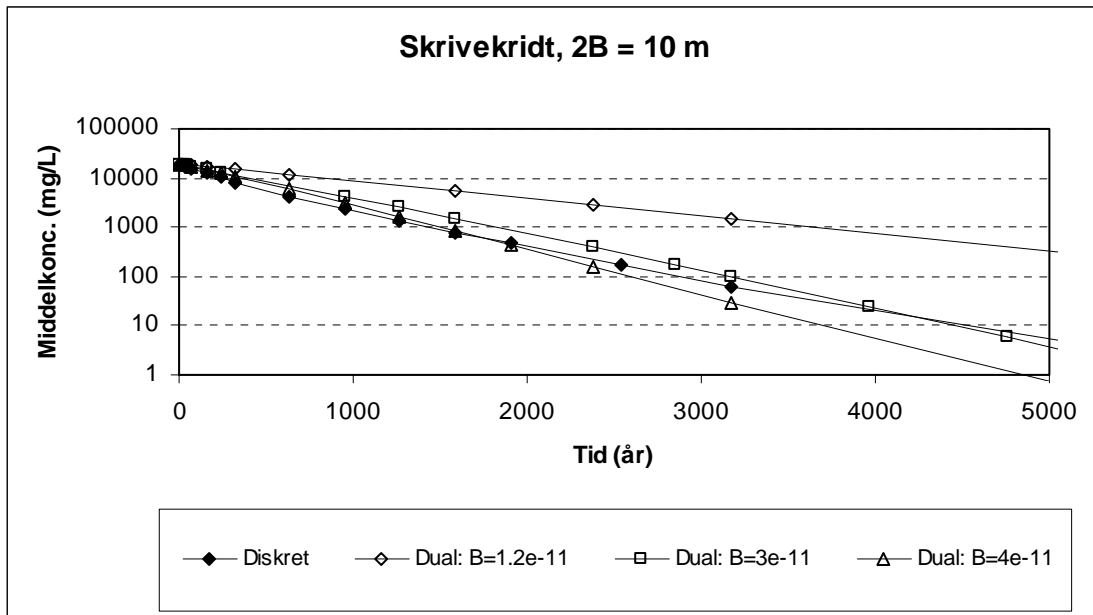
Modellering af den opsprækkede zone som et dobbelt-porøst medium kræver information om de dobbelt-porøse parametre der indgår i ligning (4.9) og (4.10), dvs. udvekslingsparameteren β , den mobile porøsitet θ_f , og dispersiviteterne α_L og α_T . θ_f og β kan for et system af parallelle sprækker principielt set estimeres vha. ligning (4.11) og (4.13), se tabel 6-3. Pga. problemerne med advektiv transport i matrix, se ovenfor, estimeres β imidlertid ved kalibrering mod en diskret opsprækket model. Samtidig vurderes det, at der opnås en mere realistisk beskrivelse af sprækkesystemet, hvis det antages, at sprækkerne er tilfældigt fordelt frem for parallelle. Tilfældigt fordelte sprækker vil resultere i zoner med høj sprækkedensitet og zoner med lav sprækkedensitet, hvor sidstnævnte eventuelt kan være isoleret fra det øvrige sprækkenetværk. I figur 7-1 ses et eksempel på en simulering af saltvandsudvaskningen med tilfældigt fordelte sprækker. Det ses, at specielt isolerede sprækkesystemer har stor effekt på udvaskningen af klorid. Parametrene β , α_L og α_T er derfor blevet bestemt ved kalibrering af en dobbelt-porøs model mod en model med diskrete sprækker. Modelområdet er specificeret til at være 50 m højt og 100 m langt, og der simuleres en udvaskning af marint vand. Herved estimeres $\alpha_L = 20$ m og $\alpha_T = 2$ m. Mht. β opnås tilfredsstillende resultater for alle fire sprækkedomæner ved anvendelse af en værdi på $3,5 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$. Overensstemmelsen mellem den diskrete sprække model og dobbelt-porøsitetsmodellen ses af figur 7-2 at være tilfredsstillende. Det antages derfor, at den kalibrerede dobbelt-porøse model er i stand til realistisk at simulere stoftransporten i hele det 10 km lange opsprækkede tværsnit.

Tabel 7.1 Peclet-tallet for de fire opsprækkede zoner.

	Danien-kalk	Skrivekridt
Dybde	P_c	P_c
(mut.)	(-)	(-)
25-75	5,4	3,6
75-115	10,7	2,2

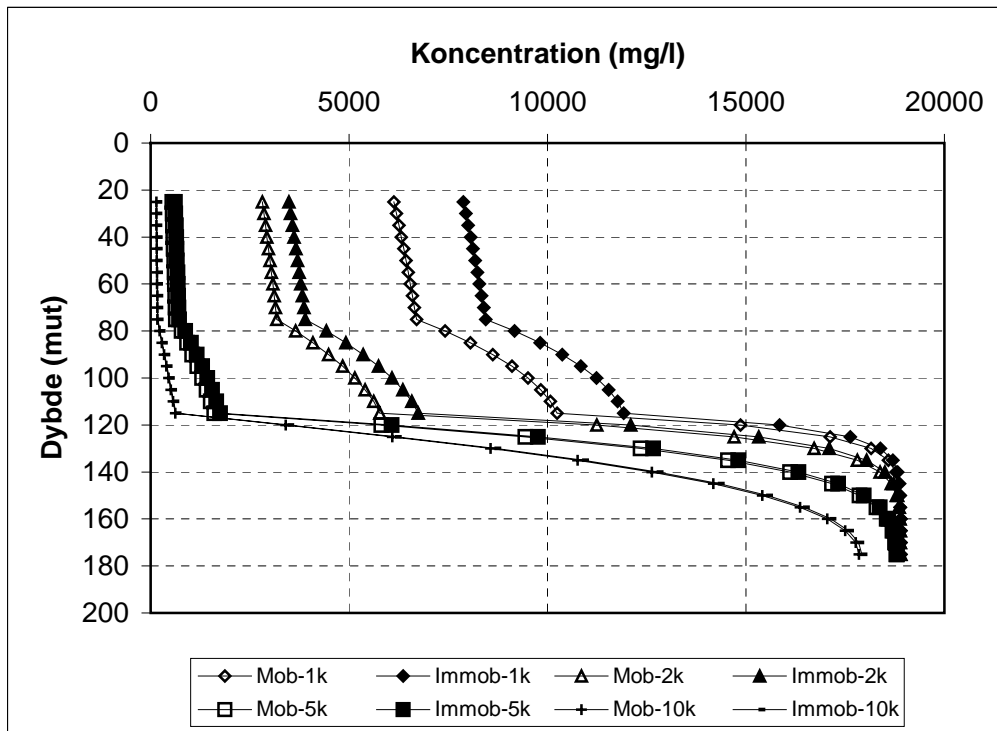


Figur 7-1 Diskret-sprække simulering af kloridudvaskning (i enheden mg/l) fra et 100m x 50 m tværsnit med tilfældigt fordelte sprækker. Initial kloridkoncentrationen af klorid er sat til 18.800 mg/l, og grund vandstrømningen er fra venstre mod højre. Resultat efter 500 år for Skrivekridt med $2B = 10$ m.



Figur 7-2 Middelkloridkoncentration i 50 m x 100 m profil, hvor sprækkesystemet repræsenteres ved hhv. diskret-sprække metoden og en dobbelt-porøs model. B angiver masseudvekslingsparameteren β (s^{-1}).

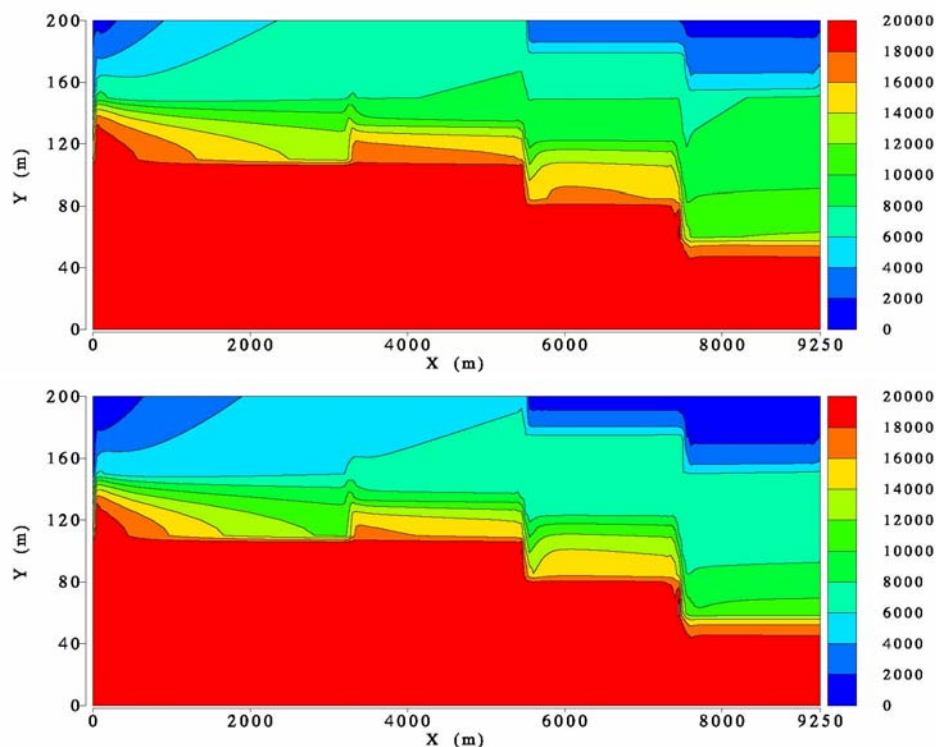
Til modellering af udvaskningen af den opsprækkede zone er der anvendt den hydrogeologiske model vist i figur 6-4, hvor der kun simuleres vand- og stoftransport i de øverste 200 m af tværsnittet. Diskretiseringen er i horisontal og vertikal retning sat til hhv. $\Delta x = 50$ m og $\Delta z = 5$ m.



Figur 7-3 Simulerede koncentrationsprofiler for hhv. mobilt (Mob) og immobil (Immob) domæne efter 1.000 år (1k), 2.000 år (2k), 5.000 år (5k) og 10.000 år (10k).

Resultatet af simuleringen er illustreret i figur 7-3, hvor koncentrationsfordelingen for $x = 8$ km (svarende til placeringen af Karlslunde boringen) er vist efter hhv. 1.000, 2.000, 5.000 og 10.000 års udvaskning. Til hvert tidspunkt findes to resultater: Et for det mobile (opspærkede) domæne og et for det immobile (matrix) domæne. Efter 1.000 år er der relativt stor forskel mellem koncentrationerne i de to domæner, men med øget transporttid tilnærmer de to løsninger hinanden. For $t = 10.000$ år er koncentrationsfordelingen i de to domæner tilnærmelsesvis identiske.

Der foreligger i sagens natur ikke målinger af udvaskningsforløbet i zonen fra 25 – 75 mut., da det sandsynligvis er foregået i begyndelsen af Kvartær-perioden. Det er derfor heller ikke muligt at udtale sig om troværdigheden af de simulerede udvaskningsforløb. Sensitivitets-analyser viser imidlertid, at udvaskning sker indenfor 10. – 20.000 år, selvom dispersivitet og anisotropifaktor varieres indenfor realistiske grænser. I intervallet 75-115 mut. viser modelresultaterne, at alt klorid er udvasket, inden der er gået 20.000 år, hvilket ikke er i overensstemmelse med de målte kloridkoncentrationer i Karlslunde boringen, hvor der sker en markant stigning i koncentrationen i dette interval. Resultaterne viser, at den advective udvaskning i intervallet 75-115 mut. er for stor, hvilket kan skyldes: 1) Udeladelse af densitetseffekten i beregningerne; 2) Overestimering af kridtets hydrauliske ledningsevne; 3) Den benyttede sprækkedensitet i kridt; eller 4) Den benyttede kontakt mellem sprækker.



Figur 7-4 Simuleret koncentrationsfordeling (mg/l) i mobilt (øverst) og immobilt (nederst) domæne efter 1.000 år.

I figur 7-4 ses koncentrationsfordelingen i hhv. det mobile og immobile domæne efter 1.000 år. Grænsen mellem de opspærkede zoner og det underliggende mergel-/kridtlag fremgår tydeligt, se figur 6-4 til sammenligning.

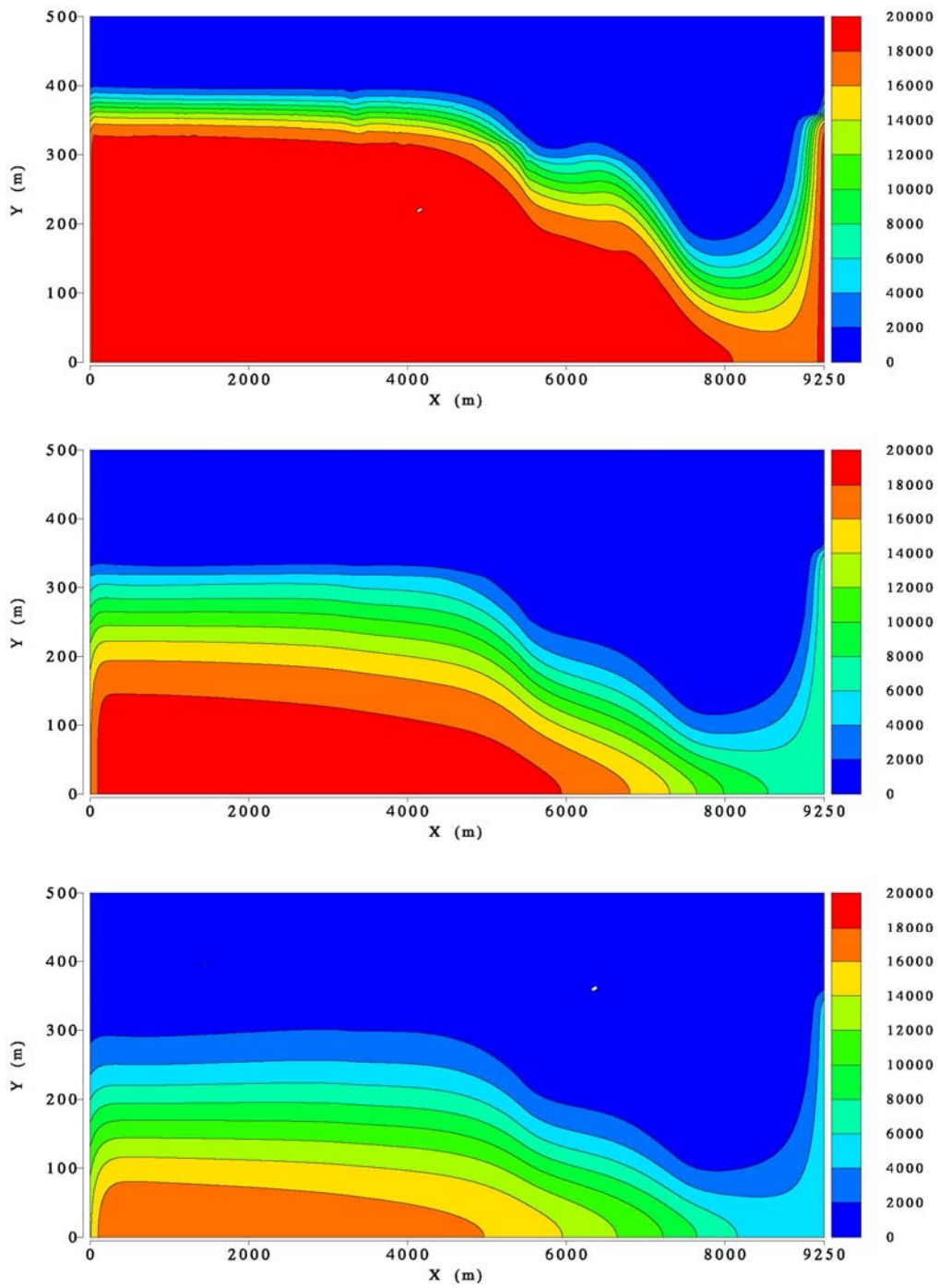
7.2 Udvasning af ikke-opsprækket zone

7.2.1 Advektiv strømning uden densitetseffekt

Udvasningen af den ikke-opsprækkede del af karbonatbjergarterne blev indledningsvist forsøgt simuleret ved at addere en lav-permeabel, enkeltporøs zone under den dobbelt-porøse opsprækkede zone. FRACTRAN kan principielt set håndtere denne situation, hvor der benyttes to forskellige modelleringskoncepter i samme modelopsætning. Pga. problemer med stabilitet af transportløsningen (oscillationer og manglende konvergens) blev det imidlertid valgt at behandle den opsprækkede del af området som ét ækvivalent porøst medium (EPM), dvs. som et enkeltporøst medium med effektive ledningsevner og diffusionskoefficienter svarende til, hvad et tilsvarende normalt porøst medium ville have. Denne konceptualisering introducerer fejl i beregningen af udvasningen af den opsprækkede zone, da EPM metoden ved afestning har vist sig at give relativt dårlige resultater for den opsprækkede zone. Da der i det efterfølgende fokuseres på den ikke-opsprækkede zone, har det imidlertid ingen betydning, om udvasningen af den opsprækkede zone fejlestimeres med fx. en faktor to. Modellen simulerer en relativt hurtig udvasning af klorid fra den opsprækkede zone (indenfor 20.000 år), uanset hvilket modelkoncept der benyttes. I sammenligning med udvasningen af den ikke-opsprækkede zone, som tager af størrelsesordenen mio. år, har en usikkerhed på nogle få tusind år på udvasningen af den opsprækkede zone ingen praktisk betydning.

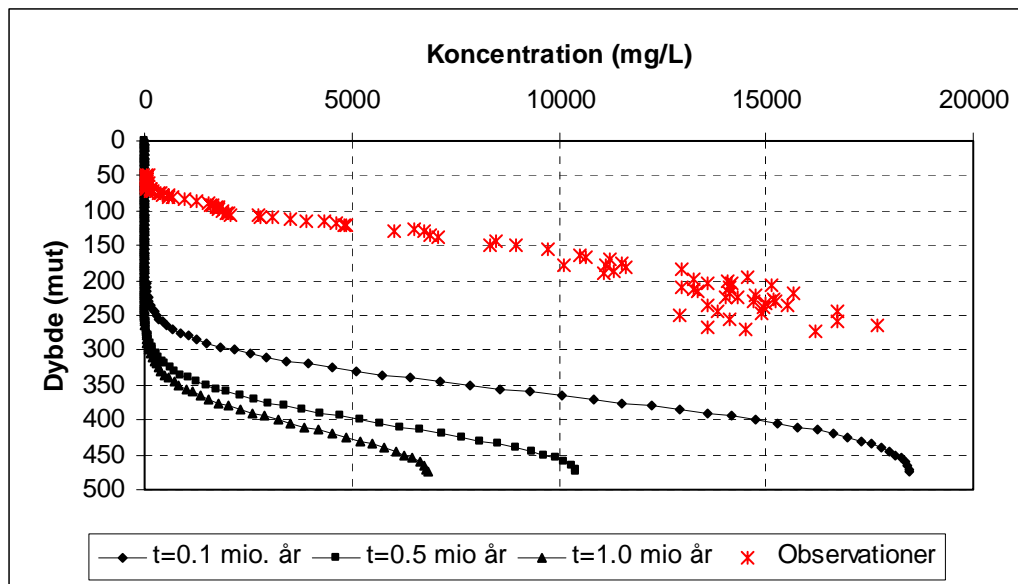
De efterfølgende simuleringer er foretaget i en geologisk blok, som har en mægtighed på 500 m og en længde på 9.250 m lang, som udstrækker sig fra kote 25 m til kote - 475 m. Den øverste del af tværsnittet, som er opsprækket, beskrives som ét ækvivalent porøst medium, med effektive horisontale hydrauliske ledningsevner svarende til K_b anført i tabel 6-3. For den ikke-opsprækkede kridt (mergel/kridt og Skrivekridt på figur 6-4) benyttes parametrene anført i tabel 6-2 (hhv. 115-210 mut. og 210-269 mut.), hvor den aritmetiske middelværdi anvendes som den horisontale hydrauliske ledningsevne og den harmoniske middelværdi benyttes til den vertikale hydrauliske ledningsevne. Strømningsrandbetingelserne udgøres af nul fluks på venstre rand (grundvandsskel), mens der på højre rand (ved havet) er anvendt fastholdt tryk på nul meter ned til kote -75 m, mens der for kote -75 m til -475 m benyttes en modelrand uden strømning. Som initialbetingelse for stoftransport er anvendt en kloridkoncentration på 18.800 mg/l i hele domænet. Randbetingelserne for stoftransportløsningen består af no-flow på venstre rand og i bunden, mens det infiltrerende vand antages at have en koncentration på 0 mg/l.

På figur 7-5 ses simulerede kloridkoncentrationer efter hhv. 0,1, 0,5 og 1,0 mio. år. Denne simulering benævnes i det følgende som en reference-kørsel. Det ses, at der sker en betydelig udvasning af klorid i hele tværsnittet, og at der efter 1 mio. år ikke optræder kloridkoncentrationer svarende til havvand nogen steder i tværsnittet.



Figur 7-5 Koncentrationsfordeling (mg/L) efter 0,1, 0,5, og 1,0 mio. år for reference-kørsel.

På figur 7-6 ses en sammenligning af målt og simuleret kloridkoncentration i Karlslunde boringen, dvs. for $x = 8$ km. I forhold til det observerede koncentrationsprofil, simuleres der for lave koncentrationer i hele profilet, svarende til at udvaskningen går for hurtigt. Allerede efter 0,1 mio. år er det kloridholdige vand udvasket ned til en dybde på 250 mut., mens målingerne viser høj kloridkoncentration allerede omkring 100 mut.

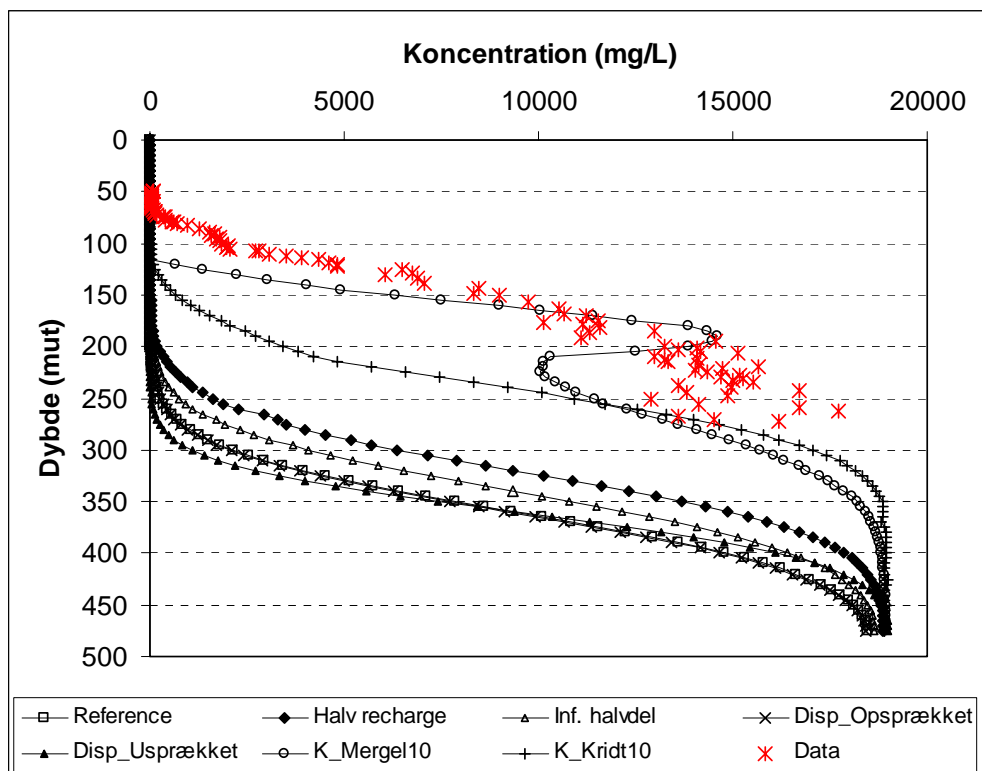


Figur 7-6 Simuleret koncentrationsprofil for reference-kørsel.

For at undersøge hvilke parametre der styrer udvaskningen af klorid fra profilet er der gennemført en sensitivitetsanalyse, hvor der successivt er ændret på seks parametre. I det følgende kommenteres effekten af parameterændringerne med reference til figur 7-7, hvor simuleringsresultater efter 0,1 mio. år er illustreret. (1) Grundvandsdannelsen er reduceret til halvdelen, af den der er specificeret i referencekørslen (Halv recharge). Denne ændring har en vis effekt på udvaskningen, og som forventet resulterer det i højere kloridkoncentrationer. Forskellen mellem simuleret og observeret koncentration er imidlertid stadig markant. (2) Grundvandsdannelsen påføres kun den vestlige halvdel af modelområdet, hvor perkolationsraten øges til det dobbelte, således at den samlede fluks af vand ind i modellen er den samme som i referencekørslen (Inf. Halvdel). Denne modifikation har kun mindre betydning for den simulerede koncentration, om end det medfører lidt længere udvaskningstider.

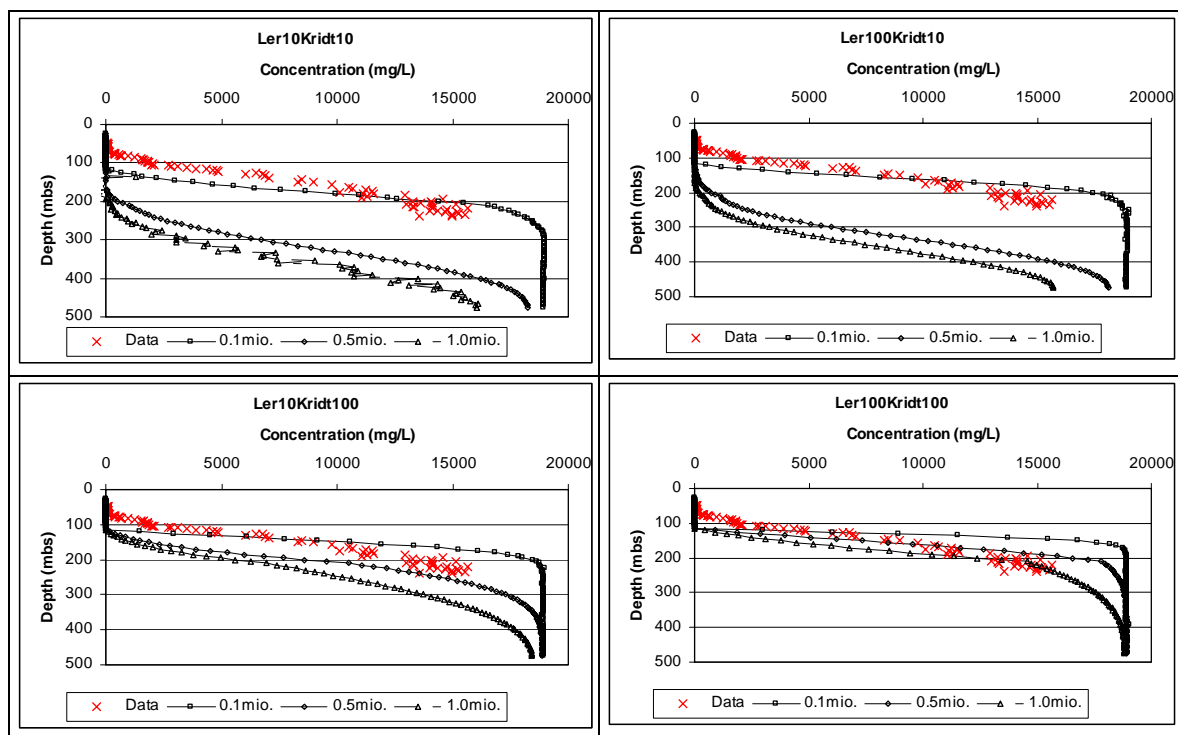
(3) Dispersiviteten for de opsprækkede zoner er reduceret med en faktor to (Disp_Opsprækket). Denne ændring har stort set ingen betydning for udvaskningen af de dybereliggende zoner. (4) Dispersiviteten for den ikke-opsprækkede zone er reduceret med en faktor to (Disp_Usprækket). Denne ændring resulterer i en lille ændring, så formen på koncentrationsprofilet bliver skarpere. Dette er i overensstemmelse med forventningerne, da der opnås en mindre dispersionspåvirket transport. (5) Den hydrauliske ledningsevne for mergel-/kridtlaget reduceres med en faktor 10 både horisontalt og vertikalt (K_{Mergel10}).

Dette resulterer i en kraftig ændring i det simulerede koncentrationsprofil, hvor der nu opnås højere kloridkoncentrationer i mergellagene end i det umiddelbart underliggende skrivekridt. Resultatet skyldes, at vand strømmer vertikalt gennem mergellaget i den opstrøms del af profilet, hvorefter det strømmer horisontalt gennem det dybe skrivekridt for endelig at strømme op mod havet i den nedstrøms ende. Mergellaget midt på tværsnittet, inklusiv lokaliteten hvor Karlslunde boringen er placeret, bliver derfor "bypassed" af den regionale strømning, som udvikles i domænet. (6) Den horisontale og vertikale ledningsevne for det dybe skrivekridt reduceres med en faktor 10 (K_Kridt10). Denne ændring har ligeledes en kraftig effekt på det simulerede resultat, med et markant langsommere udvaskningsforløb til følge.



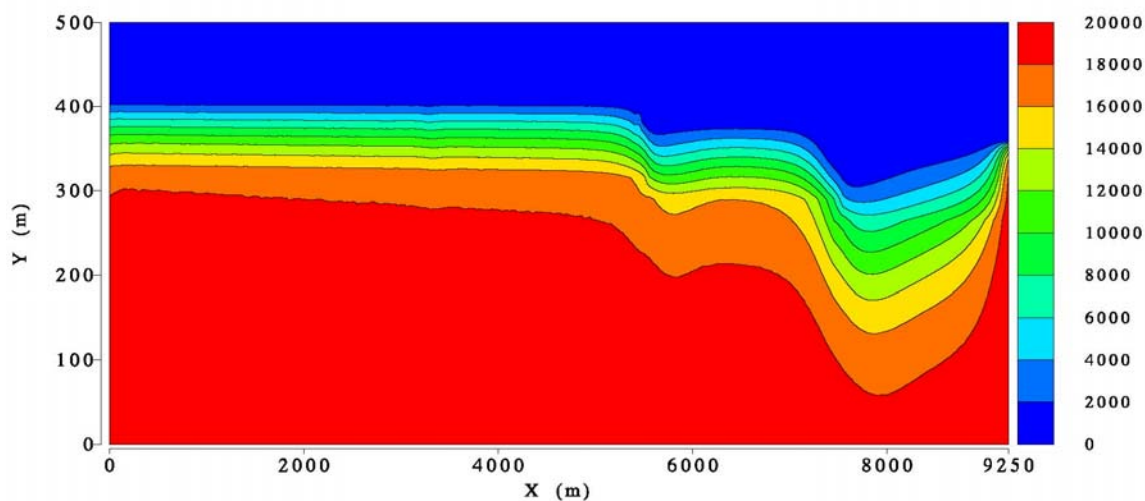
Figur 7-7 Resultat af sensitivitetsskørsel. Resultater efter 100.000 år.

Baseret på den ovenstående sensitivitetsskørsel konkluderes det, at de vigtigste parametre for simuleringen af koncentrationsprofilet er den hydrauliske ledningsevne for hhv. mergel-/kridtlaget og det dybe Skrivekridt. Der er derfor foretaget yderligere fire simuleringer, hvor effekten af at reducere ledningsevnerne for mergel/kridt og Skrivekridt med hhv. en faktor 10 og 100 er kvantificeret. Resultaterne fremgår af efterfølgende figur 7-8, hvor der for de forskellige kombinationer af ledningsevnereduktioner er vist modelresultater efter hhv. 0,1, 0,5 og 1,0 mio. år. Hvis der fokuseres på resultaterne efter 1 mio. år ses, at den største effekt opnås, når Skrivekridtets ledningsevne reduceres med en faktor 100. Hvis ledningsevnen for det overliggende mergellag også reduceres med en faktor 100 fremkommer der et koncentrationsprofil efter 1 mio. år, som tilnærmer det målte profil rimeligt.



Figur 7-8 Effekt af reduktion af hydraulisk ledningsevne for mergellag (Ler) og dybt skrivekridt (Kridt) med hhv. faktor 10 og 100.

På figur 7-9 ses koncentrationsfordelingen i hele tværsnittet efter 1 mio. år, når den hydrauliske ledningsevne for både mergellaget og det dybe skrivekridt er reduceret med en faktor 100.



Figur 7-9 Koncentrationsfordeling af klorid (mg/l) simuleret med "Ler100Kridt100"-opsætning. Resultat efter 1.0 mio. års strømning.

Modelresultaterne viser, at der med den initiale modelopsætning (referencekørslen) sker en for stor advektiv udvaskning af de dybe formationer (mergel/kridt og Skrivekridt). Én måde at opnå simuleringsresultater, der stemmer bedre overens med de målte koncentrationer af klorid, er at reducere den hydrauliske ledningsevne i de dybe formationer. Denne reduktion i den hydrauliske ledningsevne har imidlertid den samme effekt som forskellen i densitet mellem ferskvand og saltvand vil have, hvorfor det er vanskeligt på baggrund af disse simuleringer at kvantificere betydningen af de to effekter. Endelig kan det ikke udelukkes, at eventuelle fejl i den opstillede konceptuelle geologiske model kan påvirke resultaterne. Dette kunne eksempelvis være dét, at der ses bort fra fiskeleret, som er et tyndt lavpermeabelt lerlag, der flere steder er fundet på grænsen mellem Danienkalk og Skrivekridt. Det er pt. uklart hvilken hydrogeologisk betydning fiskeleret har. En anden fejl i den konceptuelle model kunne være en fejlbedømmelse i bestemmelsen af grundvandsdannelsen over længere tid, og hermed infiltrationen af ferskvand til udvaskning af saltvandet i kalken og kridtet.

7.2.2 Udvasning alene ved diffusion

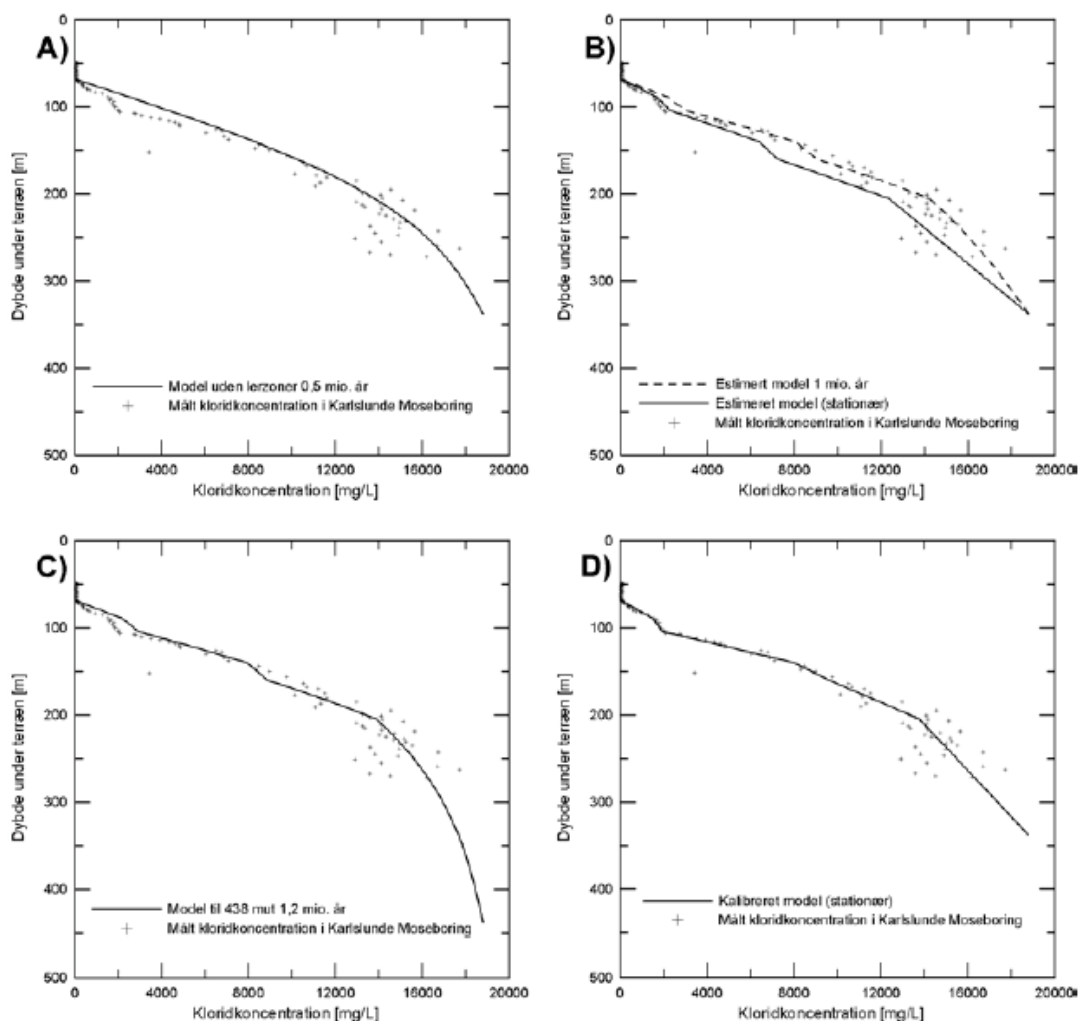
Simulering af den opadrettede diffusion af klorid fra Skrivekridtet er baseret på observationer fra Karlslunde boringen. Diffusionen regnes som én dimensional opadrettet diffusion, uden advektiv strømning. Ved den nedre rand fastholdes en koncentration på 18.800 mg/l, og ved den øvre rand er koncentrationen konstant 20 mg/l. I de første to simuleringer er den nedre rand placeret i dybden 338 mut., og den øvre forekommer 50 mut. Porøsiteten i Skrivekridt er sat til 35 %, og der er benyttet en effektiv diffusionskoefficient i kridt på $0,35 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Der er foretaget en række simuleringer med forskellige randbetingelser og modelparametre /39/, og de vigtigste vil blive vist her. Resultaterne af simuleringerne er vist i efterfølgende figur 7-10.

Simulering uden lerlag (A):

Udvaskningen er først simuleret under antagelse af homogene og isotrope forhold i Skrivekridtet (figur 7-10A), det vil sige uden at medtage ler- og mergellag, som især er påvist i zone 2 fra 110 til 215 mut. Disse resultater viser, at ved simulering af en diffusion over 500.000 år opnås en rimelig overensstemmelse mellem data fra bunden af boringen i kote - 269 mut. og til 125 mut. Koncentrationerne er ikke stationære efter 500.000 år. I intervallet over 125 mut. er der simuleret for lave koncentrationer i forhold til de observerede, og dette kunne forklares med en sprækkedannelse i denne del af formationen. En advektiv strømning i denne zone vil forøge udvaskningen af salt fra matrix.

Simulering med lerlag (B):

I den næste simulering er medtaget lerlagene i zone 2 fra 110 til 215 mut., figur 7-10B. Der opnås en stationær løsning efter udvaskning gennem 1 million år. Simuleringen af udvaskningen efter 1 million år passer, som modellen uden lerlag, til de observerede koncentrationer af klorid fra bunden og op til ca. 125 mut. Forskellen på de to modelleringer er således den tid, som det tager for udvaskningen af saltvandet. I modsætning til den ikke stationære løsning uden lerlagene, så er der en rimelig overensstemmelse mellem observerede og simulerede koncentrationer også over dybden 125 mut. Den simulerede gradient i Zone 2 passer dog dårligt med den observerede.



Figur 7-10 Resultater af simulering af udvaskning af Skrivekridt ved en opadrettet diffusion, uden advektiv strømning. Se tekst for yderligere forklaring.

Vurdering af den nedre rands dybde (C):

Da dybden af den nedre rand ikke er påvist i boringen, er der foretaget en simulering af dybdens indvirkning på simuleringens resultaterne. Resultaterne af en modellering hvor den nedre rand er fastsat til 438 mut., altså 100 meter under de forrige, fremgår af figur 7-10C. I disse simuleringer er der et rimeligt sammenfald mellem observerede og simulerede koncentrationer i hele dybden. Denne overensstemmelse opnås efter 1.2 millioner år.

Betydningen af den effektive diffusionskoefficient (D):

For at opnå en model, der estimerer de observerede koncentrationer af klorid fuldstændigt, blev der foretaget simuleringer, hvor den effektive diffusionskoefficient og porøsitet blev varieret indenfor de påviste variationer i laboratorieforsøgene. De simulerede koncentrationer med denne model er sammenfaldende med de observerede i hele dybdeintervallet. Der blev ændret på den effektive diffusionskoefficient i to lærholdige zoner, og den blev heri nedsat til $0,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Den udførte følsomhedsanalyse viste, at resultaterne kun påvirkes

lidt som følge af ændringer i porøsiteten, hvorimod resultaterne påvirkes relativt meget som følge af ændringer i den effektive diffusionskoefficient.

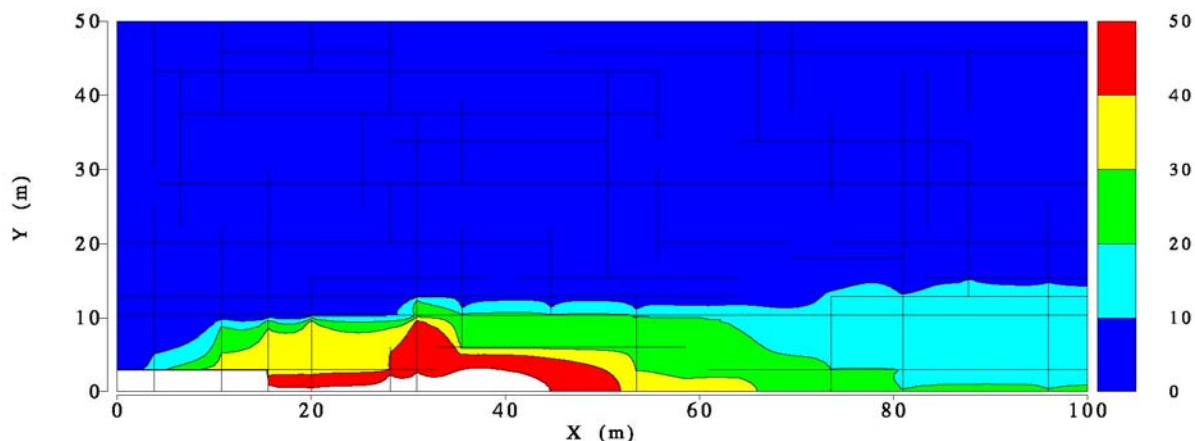
Betydningen af det tektoniske opløft:

Japsen et al. /18/ vurderer, at der i det undersøgte område gennem de seneste 16 millioner år er bortroderet omkring 500 m sediment. Det svarer til en erosion på i gennemsnit omkring 3 cm per 1.000 år. Udvaskningen i de simulerede modeller er maksimalt sket over 2 millioner år. Den diffusive transport er således langt hurtigere end erosionen. Det er derfor tænkeligt, at der i løbet af de 16 millioner år er forekommet en semistationær kloridgradient i den øvre del af kridtet. Udviklingen af koncentrationsgradienten er overordnet styret af den hastighed hvormed erosionen er foregået.

7.3 Simulering af klorid transport i ferskvandssystemet

Da der konstant sker en diffusionsbetinget transport af klorid op i den advektive zone, tilføres ferskvandssystemet saltvand nedefra overalt i oplandet. Betydningen af denne transport kan simuleres med nogle simple antagelser om strømningsforholdene og fluxen af klorid fra Skrivekridtet.

I de følgende simuleringer er anvendt samme modelopsætning som vist i tidligere figur 7-1, det vil sige en transmissivitet på $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, en hydraulisk gradient på 4 ‰ og en mægtighed af den opspækkede zone på 50 m (se tabel 6.3). Som den nedre randbetingelse er fastsat en flux på $120 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{år}$, svarende til en kloridgradient på $13 \text{ mg}/\text{l}/\text{m}$, som observeret i den centrale del af oplandet ved Karlslunde. De øvrige randbetingelser og parametre er fastholdt fra tidligere (figur 7-1). Som initialbetingelse er specificeret en koncentration på $0 \text{ mg}/\text{l}$. Af modeltekniske grunde gennemføres simuleringerne kun for et tværsnit på 100 meter, og opskalering foretages med nogle simple antagelser.



Figur 7-11. Stationær koncentrationsfordeling (mg/L) ved anvendelse af fluks randbetingelse på $120 \text{ mg/m}^2/\text{år}$ i bunden af modelområdet.

Resultaterne af simuleringerne viser (figur 7-11), at nederst i venstre hjørne af modeltværsnittet simuleres koncentrationer større end 50 mg/l , hvilket er udenfor det anvendte kontureringsinterval. Dette område fremstår derfor uden farve i figuren. Pga. afstanden til opstrøms randbetingelse skal der lægges størst vægt på resultaterne i den nedstrøms ende af domænet, dvs. for $x > 50 \text{ m}$. Det ses, at fluxen af klorid nedefra resulterer i forhøjede kloridkoncentrationer i de nederste ca. 20 m af det opsprækkede materiale. Den vertikale opblanding i det opsprækkede område er relativt ufølsom overfor de anvendte dispersiviteter for hhv. matrix og sprækker, mens fordelingen og sprækkernes indbyrdes forbindelse (konnektiviteten) er den vigtigste faktor for opblandingen. Kloridkoncentrationen ses at variere med horisontal afstand, hvilket skyldes forskelle i vandgennemstrømning i området umiddelbart over bunden af domænet, hvilket igen er en funktion af sprækkefordelingen. Simuleringerne viser, at som følge af den diffusive flux af klorid, vil der i de nederste 20 meter af den opsprækkede zone kunne forekomme kloridkoncentrationer af størrelsen $10 - 30 \text{ mg/l}$.

Den gennemsnitlige koncentration af klorid efter en grundvandsstrømning fra vandskellet til havet i Karlslunde oplandet (10.000 m), kan beregnes ud fra en vurdering af vandfluxen i den mættede zone, og den samlede flux til magasinet fra neden. Det kan således beregnes, at den gennemsnitlige koncentration i grundvandet i modellens højre side vil være 40 mg/l . Koncentrationer mellem 20 og 40 mg/l må således betragtes som naturlige koncentrationer af klorid i den opsprækkede del af kalkmagasinerne.

8. Konklusioner

På baggrund af den gennemførte undersøgelse af udvaskningen af saltvand fra Skrivekridt og Danienskalken i Karlslunde Værkstedsområdet kan der drages følgende konklusioner:

- Såfremt fersk-saltvandsgrænsen sættes ved en formationsledningsevne på 25 mS/m (koncentration af klorid i grundvandet på 300 mg/l) er det påvist, at denne overalt i Karlslunde værkstedsområdet findes i Skrivekridtet.
- I den vestlige del af området, Tune boringen, findes saltvandsgrænsen i kote - 45 m i kontakten mellem Danienskalken og Skrivekridtet. Midt i oplandet, ved Lyksager boringen, findes saltvandsgrænsen i kote -55 m, ved et mergellag 40 m nede i Skrivekridtet. Ved Ishøj Mose boringen findes saltvandsgrænsen også i kote -55 m, ved et mergellag omkring 25 m nede i Skrivekridtet. Ved Karlslunde boringen findes saltvandsgrænsen i kote -70 m, 45 m nede i Skrivekridtet. Modsat hvad man kunne forvente, er saltvandet således udvasket til større dybder tæt på kysten, og saltvandet står højere i den centrale del og vestlige del af værkstedsområdet.
- Grænsefladen mellem ferskvand og saltvand er ikke skarp, men den optræder som en zone med stigende koncentrationer af salte med stigende dybde. Ved Karlslunde boringen er der omkring kote -270 m påvist en koncentration af klorid på 17.700 mg/l, hvilket svarer til omkring 94 % af koncentrationen af klorid i havvand med en oceanisk sammensætning. På denne baggrund kan det beregnes, at porevand med en koncentration af klorid, som det oprindelige porevand, findes omkring kote -300 til -350 m.
- I Karlslunde boringen er der i Skrivekridtet foretaget en bestemmelse af såvel porevands som formationens elektrisk ledningsevne og hermed også deres specifikke elektriske modstande (resistiviteten). Formationsfaktoren kan bestemmes som forholdet mellem resistiviteten i formation og porevand. For kridt med et lille indhold af lerminerale kan formationsfaktoren beregnes at være 4,5 i dybden 100 m. (kote -98 m). På grund af relativt små variationer i porøsiteten i den gennemborede sekvens af kridt, er der også mindre variationer i formationsfaktoren i zoner med et lille indhold af lerminerale. Det kan estimeres, at i de øverste enheder af kridtet, hvor der forekommer porøsiteter op mod 50 %, er formationsfaktoren 4. I Skrivekridtet findes mellem kote -120 m og -225 m en zone med et højere indhold af lerminerale, og i denne zone er formationsfaktoren mellem 5 og 8. De målte resistiviteter i denne zone må forklares med det forhold, at som følge af en større kompaktion er indholdet af det stærkt ledende porevand mindre. Variationer i porøsiteten er således under disse hydrogeologiske forhold af større betydning end indholdet af lerminerale, som, alt andet lige, ellers ville have forøget formationens ledningsevne.
- Med ovenstående veldokumenterede viden om formationsfaktoren i Skrivekridtet kan der ud fra resultater af geofysisk borehulslogging (elektrisk-log eller induktions-log) beregnes en koncentration af klorid i kridtet. Koncentrationen af klorid kan bestem-

mes som en ækvivalent koncentration af klorid, eller som en koncentration af klorid, hvor der er gjort visse antagelser om bidraget i elektrisk ledningsevne fra andre ioner i porevandet. I rapporten er der foreslået en simpel metode til at foretage disse beregninger.

- På baggrund af fordelingen af klorid og stabile ilt-isotoper i porevandet i Karlslunde boringen, en analyse af indstrømningsfordelingen i syv boringer i hele projektområdet samt den generelle viden om indstrømningsfordelingen i boringer i projektområdet, er der opstillet en konceptuel hydrogeologisk model for saltvandsforekomsten i Skrivekridtet. Denne model indeholder en øvre zone, som er domineret af en advektiv strømning i sprækker og en diffusiv udveksling af klorid mellem sprækker og matrixblokke med en relativt lille dimension (den advektive zone). I denne zone er saltvand fuldstændigt udvasket fra matrix mellem sprækkerne. Under den advektive zone forekommer en overgangszon, med større matrixblokke, og hvor der er sket en ufuldstændig udvaskning af saltvand. Under overgangszonen findes zonen, hvor udvaskningen af saltvand foregår alene ved en opadrettet diffusion af klorid, og andre ioner, til det overliggende ferskvand. Saltvandet transporteres horisontalt ud af oplandet i de overliggende zoner. Ved Karlslunde boringen findes den advektive zone fra top kridt 25 mut. til 70 mut. Overgangszonen findes fra 70 til omkring 105 mut., og herunder findes diffusionszonen ned til omkring 300 mut.
- En foreløbig analyse af Skrivekridtet viser, at matrixblokkenes størrelse i den advektive zone forøges fra 2-3 m ved terræn til omkring 12 m i dybden 120 mut. I Danienskalken, hvor den subhorizontale sprækkedannelse er kontrolleret af forekomsten af flintlag, er afstanden mellem sprækkerne mindre, typisk 1-2 m.
- Med et analytisk udtryk kan det beregnes, at diffusion af et kloridion ud af matrix af en kubisk blok på 2 m (diffusionsafstand 1 m), vil tage omkring 50 år. Hvis blokken har en dimension på 12 m (diffusionsafstand 6 m) vil der forløbe omkring 1.600 år for et kloridion at diffundere fra centrum i blokken og ud til en sprække.
- De observerede subhorizontale sprækker i Skrivekridtet og Danienskalken skyldes formentlig en aflastning af formationerne, dels som følge af et tektonisk opløft i Neogen, og dels på grund af afsmeltningen af iskapper under de Kvartære nedisninger af det danske område. De subvertikale sprækker i formationerne skyldes dominerende horisontale tektoniske påvirkninger og forsætninger langs Den Fennoskandiske Randzone.
- På baggrund af de senest publicerede modeller for hævnningen og erosion langs Den Fennoskandiske Randzone kan der opstilles en konceptuel, paleo-hydrogeologisk model som forudsiger, at infiltration af ferskvand til Danienskalken og Skrivekridtet er blevet initieret for 2-3 millioner år siden.
- Simuleringer med den numeriske kode FRACTRAN viser, at udvaskningen af saltvand fra den advektive zone (Danienskalken, og den opsprækkede del af Skrivekridtet), kan være foregået i løbet af maksimalt 10.000-20.000 år. Inden for dette tidsrum er der skabt et ferskvandssystem i den øvre del af magasinet, og der er etableret en

opadrettet, kemisk gradient, som har igangsat en diffusion af saltvand ud af Skrivekridtet.

- Simuleringer uden at medtage effekten af densitetsforskelle mellem ferskvand og saltvand viser, at under de forudsatte hydrauliske betingelser, vil den observerede fordeling af saltvand i Skrivekridtet ved Karlslunde boringen kunne simuleres at kunne ske overvejende ved advektiv strømning og på relativt kort tid (20.000 år). For at opnå resultater som svarer til de observerede, skal den hydrauliske ledningsevne af de lav-permeable enheder i kridtet reduceres med en faktor 100 i forhold til bestemte hydrauliske ledningsevner ud fra målte gaspermeabiliteter. De hydrauliske forhold af de lav-permeable enheder bør derfor undersøges i kommende undersøgelser.
- En modellering af saltvandsudvaskningen udelukkende som en én-dimensional diffusionsproces viser, at de observerede koncentrationer af saltvand i diffusionszonen kan etableres i løbet af 1-2 millioner år.
- De velkendte saltvandsproblemer i Køge Bugt området må i de fleste tilfælde kunne forklares med en diffusion af residualt saltvand ud fra blokke i overgangszonen, som ved Karlslunde forekommer mellem 70 og 100 mut. Det kan dog ikke udelukkes, at der til pumpeboringer helt tæt på kysten sker indtrængning af saltvand fra Køge Bugt.
- Det kan beregnes, at som følge af en opadrettet diffusion af klorid i hele oplandet, vil der forekomme naturlige koncentrationer på op til omkring 40 mg/l i den opspækkede zone (den advektive zone). I beregningerne er det forudsat, at koncentrationen af klorid i det infiltrerende vand er 0 mg/l.
- Saltvandet i den diffusive zone vil ikke blive yderligere mobiliseret som følge af en forøget oppumpning, da der ikke forekommer hydraulisk aktive sprækker i denne zone.

9. 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 og DTU)
- /2/ Schmorak, S. og Mercado, A., 1969; *Upconing of Fresh Water-Sea Water Interface Below Pumping Wells, Field Study.* Water Resources Research, Vol. 5, Nr. 6, side 1290-1311
- 3/ Reilly, T. E. og Goodman, A. S., 1985; *Quantitative Analysis of Saltwater-Freshwater Relationships in Groundwater Systems – A Historical Perspective.* Journal of Hydrology, Vol. 80, side 125-160.
- /4/ McElwee, C. og Kemblowski, M., 1990; *Theory and Application of an Approximate Model of Saltwater Upconing in Aquifers.* Journ. of Hydrology, Vol. 115, side 139-163.
- /5/ Motz, L. H., 1992; *Salt-Water Upconing in an Aquifer Overlain by a Leaky Confining Bed.* Ground Water, Vol. 30, Nr. 2, side 192-198.
- /6/ Ma, T.S., Sophocleous, M., Yu, Y. og Buddemeier, R.W., 1997; *Modeling Saltwater Upconing in a Freshwater Aquifer in South-central Kansas.* Journal of Hydrology, Vol. 201, side 120-137.
- /7/ Holzbecher, E.O. (1998): *Modeling Density-Driven Flow in Porous Media – Principles, Numerics, Software.* Springer-Verlag, Berlin, 286 sider.
- /8/ Bower, J. W., Motz, L. H. og Durden, D.W., 1999; *Analytical Solution for Determining the Critical Condition of Saltwater Upconing in a Leaky Artesian Aquifer.* Journal of Hydrology. Vol. 221, side 43-54.
- /9/ Saeed, M. M., Bruen, M. og Asghar, M. N., 2002; *A Review of Modelling Approaches to Simulate Saline-Upconing Under Skimming Wells.* Nordic Hydrology, Vol. 33. Nr. 2/3, side 165-188.
- /10/ Jakobsen, R., 1991; *Hydraulik og stoftransport i en opsprækket kalkbjergart.* Rapport H9, Lossepladsprojektet.
- /11/ Jakobsen, P. R. og Klitten, K., 1998; *Fracture Systems and Groundwater Flow in the København Limestone Formation.* Nordic Hydrology, Vol. 30 Nr. 4/5, side 301 – 316.
- /12/ 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.
- /13/ Bonnesen, E., 2005; *Density Flow in Geological Formations.* Forstudie til eksamensprojekt. Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 85 sider.

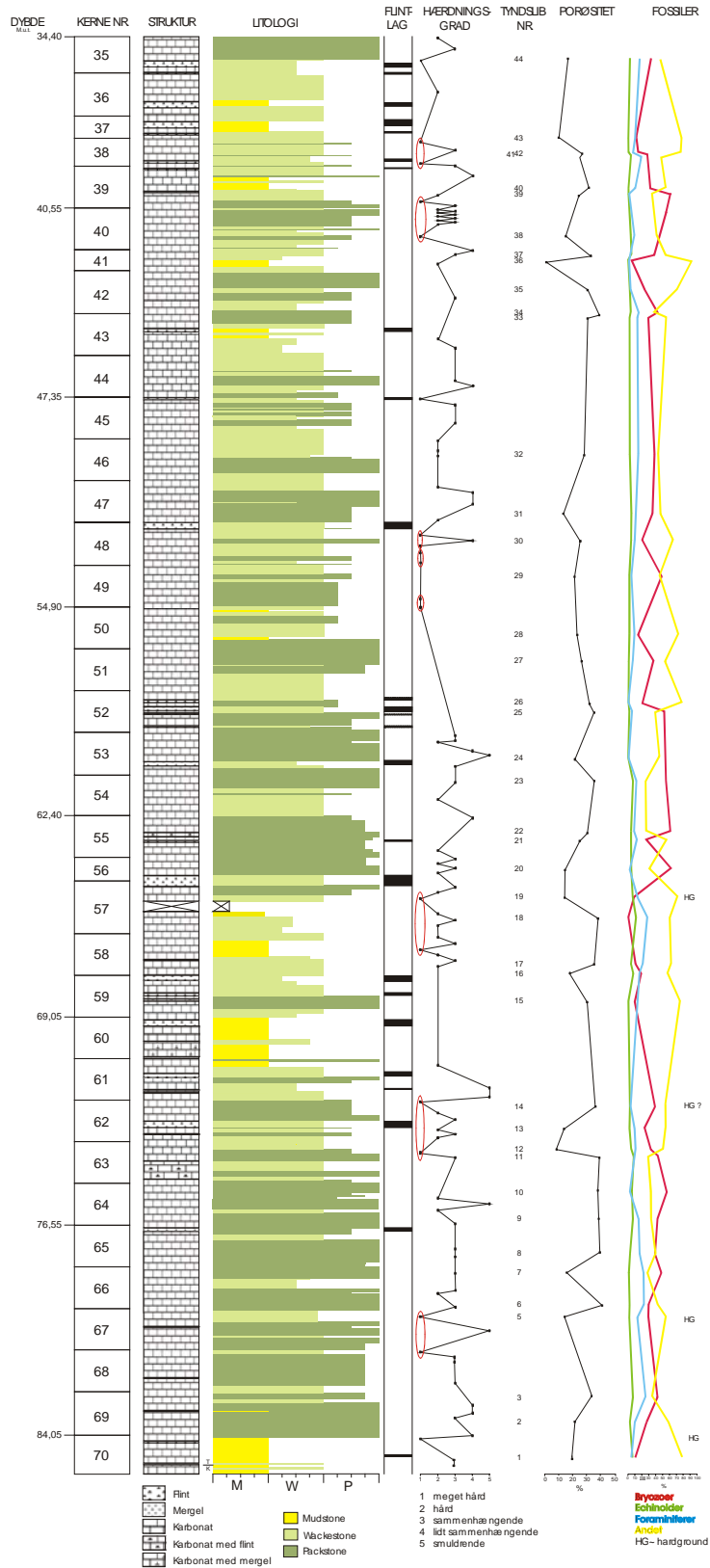
- /14/ Bloomfield, J., 1996 *Characterisation of hydrogeologically significant fracture distribution in the Chalk: An example from the Upper Chalk of southern England*. Journal of Hydrogeology, Vol. 184, side 355-379.
- /15/ Klitten, K., 2006: *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 2. - Undersøgelse af saltvandsgrænsen ved hjælp af geofysisk borehulslogging..* (GEUS og DTU)
- /16/ Lund, E., Mahert, K. J., Olsen, M., Ambo, K. og Aktor, H., 2003; *Grundvandsmagasiner, arealanvendelse og punktkilder i Greve området*. Bilagsrapport til indsatsplan. Juni 2003.
- /17/ Jensen, L. N. og Michelsen, O., 1992. *Tertiary uplift and erosion in Skagerak, Nordjylland and Kattegat*. Dansk Geol. Forening, Årsskrift for 1990-1991, side 159-168.
- /18/ 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.
- /19/ Stenestad, E., 1972. *Træk af det Danske Bassins udvikling i Øvre Kridt*. Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1971, side 63-69.
- /20/ 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.
- /21/ 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. Vol. 1, side 211-233.
- /22/ Knudsen, C., 1997; *Nikkel og fluor i grundvand*. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Rapport 1997/115.
- /23/ 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.
- /24/ Price, M; 1987: *Fluid flow in the Chalk of England*. Fra: *Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers*. ed. Goff, J.C og Willams, B. P., Geological Soc. Special Publ. Nr. 34, side 141-156.
- /25/ Liboriussen, J., Asthon, P. og Tygesen, T., 1987; *The tectonic evolution of the Fenoscandian Border Zone in Denmark*. Technophysics, Vol. 137, side 21-29.

- /26/ Norling, E. og Bergstrøm, J., 1987; *Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of Scania, Southern Sweden*. Technophysics, Vol. 137, side 7-19.
- /27/ Madsen, P., 2003; *Simulering af fersk/salt-vandsgrænsens stabilitet i opsprækkede kalkaflejringer*. Eksamensprojekt fra Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet.
- /28/ 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 og DTU)
- /29/ 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.
- /30/ 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.
- /31/ Bosscher, P. J. og Connell, D. E., 1988; *Measurement and Analysis of Jointing Properties in Fine-grained Soils*. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 114, No. 7, side 826-843.
- /32/ Holcombe, R. J., 2004; *GEOrient, version 9.2 of February 26th 2004*. Software kan hentes på hjemmesiden: www.earth.uq.edu.au/~rodh/software/
- /33/ Morthorst, J., Rasmussen, J. A., Clausen E. og Jørgensen, L. F., 2001; *Københavns Vand, Lyksager. Udførelse af geofysiske borehulslogs, samt sedimentologisk og stratigrafisk beskrivelse af borekerne i forbindelse med ny undersøgelsesboring DGU nr. 207.3579*. GEUS rapport 2001/43.
- /34/ Morthorst, J., og Clausen, E., 2000; *Københavns Vand, Ishøj Mose. Udførelse af geofysiske borehulslogs i ny boring, DGU nr. 207.3586*. GEUS rapport 2000/96.
- /35/ Kruseman, G. P. og de Ridder. N. A., 1983; *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, Third Edition*. International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI, Wageningen, The Netherlands, 200 sider.
- /36/ Klinkenberg, L. J., 1941; *The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases*. *Drilling and Production Practice*, pp. 200 – 213.
- /37/ Springer, N, 2005. *Personlig meddelelse og notat*. (GEUS)
- /38/ Edmunds, W. M. og Bath, A. H., 1976; *Centrifuge extraction and chemical analysis of interstitial waters*. *Environmental Science and Technology*. Vol. 10, side 467-472..

- /39/ Ulbak, K. A., 2004; *Fersk-saltvandsgrænsen i Skrivekridt i Karlslunde oplandet*. Ek-samensprojekt fra Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet.
- /40/ Epstein, S. og Mayeda, T. K., 1953; *Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 4, side 213 .
- /41/ Sørensen, T., 1983; *Permeabilitetsforhold i Danske Kalkbjergarter i Relation til Geo-hydrologisk Undersøgelsesmetodik og Vandindvindningsteknik*. Licentiatarbejde nr.: 3, Institutet for Teknisk Geologi, Danmarks Tekniske Højskole.
- /42/ Sudicky, E. A. og McLaren, R. G., 1992; *The Laplace Transform Galerkin Technique for Large-Scale Simulation of Mass Transport in Discretely Fractured Porous Forma-tions*. *Water Resources Research*, Vol. 28, Nr. 2., side 499 – 514.
- /43/ Sudicky, E. A. og McLaren, R. G., 1998; *FRACTRAN User's Guide*. Groundwater Simulations Group, Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Water-loo, Waterloo, Ontario, Canada.
- /44/ Bear, J. *Dynamic of fluids in porous media*. Elsevier, Amsterdam, 1972.
- /45/ Gravesen, P., 1983; *Maastrichtien/Danien – grænsen i Karlslunde Kalkgrav (Øst-sjælland)*. Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1982, side 47 – 58.
- /46/ 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.
- /47/ Mallon, A. J. og Swarbrick, R. E., 2002; *A Compaction for Non- Reservoir North Sea Chalk*. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 19, side 527-539.
- /48/ Clark, I. og Fritz, P., 1997; *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publish-ers, 328 sider.
- /49/ *Handbook of Chemical Physics*.
- /50/ Henriksen, H.J., Trolborg, L., Knudby, G.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R., og Rasmussen, P., 1998; *National Vandressource Model. Sjælland, Lolland, Falster og Møn*, GEUS Rapport 1998/1009. <http://www.vandmodel.dk>.
- /51/ Kok, U. Thieman, 2006; *Petrologi og facies i Danien i den østlige del af Det Danske Bassin – baseret på Tune-1. Speciale februar 2006 ved Geologisk Institut, Køben-havns Universitet*.
- /52/ Larsen, F., og Berger, K., 2006; *Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøst-sjælland, delrapport 5 - Grundvandstyper i kalkmagasinerne*. (GEUS og DTU)

Bilag 1: Sedimentologisk log fra Tune boringen. /51/

BILAG 1



Bilag 2: Beregning af saltvandskoncentration i Skrivekridt

Ækvivalent koncentration af klorid

Da det er dokumenteret, at formationsfaktoren i den øvre del af kridtet er omkring 4, kan der fra formationsledningsevne (mS/m) beregnes en ledningsevne i porevandet (mS/m) ud fra formlen:

$$(1) \quad EC_v = EC_f * F$$

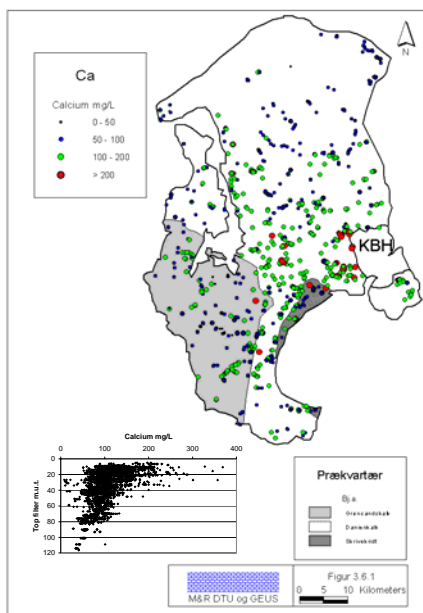
Hvor EC_v er porevandets elektriske ledningsevne, EC_f er formationsledningsevnen og F er formationsfaktoren.

Porevandet elektriske ledningsevne er bestemt af koncentrationerne, eller rettere aktiviteterne, af ioner i porevandet, som i et kalkmagasin er: Calcium, magnesium, kalium, natrium, bikarbonat, sulfat, klorid og nitrat.

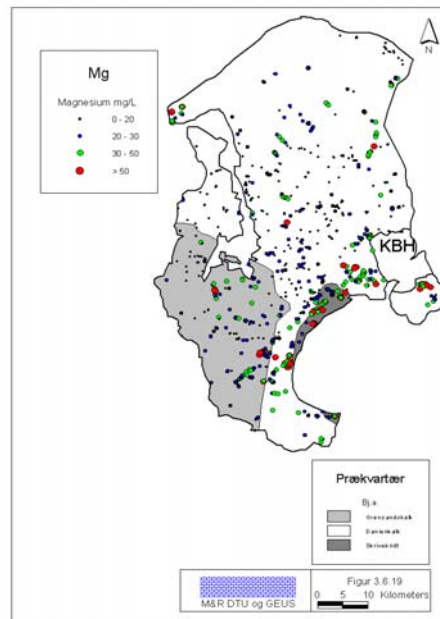
I et kalkmagasin, som ikke er påvirket af forhøjede koncentrationer af saltvand (natrium og klorid), er de dominerende ioner calcium, magnesium og bikarbonat. Denne vandtype har en elektrisk ledningsevne på omkring 10 mS/m per milliækvivalenter ved 25° C (Appelo & Postma, 2005). Ved omregning med ligning (2) svarer det til omkring 7 mS/m per milliækvivalenter ved en formationstemperatur på 10° C.

$$(2) \quad EC_{t^{\circ}C} = (0,047 + 0,0213 * t) * EC_{25^{\circ}C}$$

Det er således muligt at udregne en "baggrunds elektrisk ledningsevne" for porevandet, det vil sige en elektrisk ledningsevne i formationen, når dette ikke er påvirket af saltvand. Da der i porevandet er elektrisk balance mellem positive og negative ioner, kan bidraget beregnes ud fra summen af enten kationer og anioner, og det vil i det følgende blive foretaget på baggrund af koncentrationer af kationer.



Figur 1. Koncentration af calcium i kalkmagasinerne /52/



Figur 2. Koncentration af magnesium i kalk- i kalkmagasinerne /52/

Hvis man ser bort fra saltvandspåvirket porevand er calcium, magnesium og kalium de dominerende kationer i kalkmagasinerne. Da den naturlige koncentration af kalium sjældent er over 5 mg/l, er bidraget fra denne ion ikke over 0,25 meq/l, og der kan derfor i de fleste tilfælde ses bort fra dette bidrag (molvægten af kalium er 19 mg per mmol).

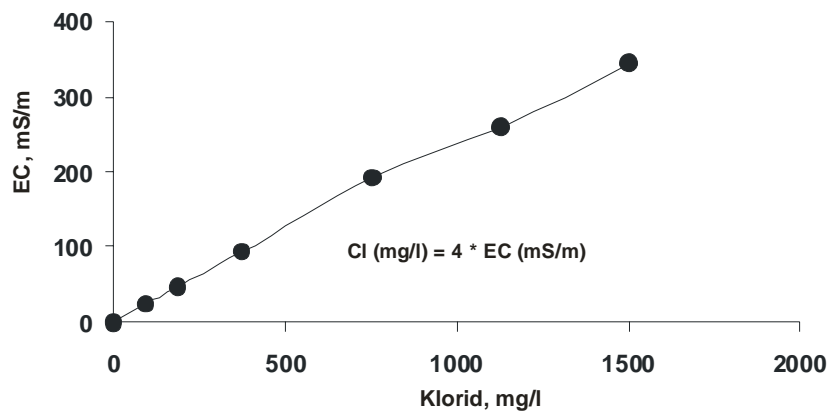
I Delrapport 5 er det påvist, at koncentrationerne af calcium og magnesium typisk er henholdsvis 40 mg/l og 20 mg/ i de dybere dele af magasinerne, se figur 1 og 2. Da begge disse ioner er divalente, og deres molære vægt er henholdsvis 40 mg/mmol og 24,3 mg/mmol, er den samlede koncentration på større dybder i kalkmagasinerne typisk 4 meq/l. Variationen i koncentrationen er typisk mellem 2 og 6 meq/l. Dette svarer til en elektrisk ledningsevne i porevandet ved 10° C på mellem 13,5 og 40,4 mS/m, med et gennemsnit på 27 mS/m.

Da der er en sammenhæng mellem porevandets elektriske ledningsevne og formationens ledningsevne (ligning 1), svarer de beregnede "baggrunds ledningsevner" til formationsledningsevner på mellem 3,4 og 10,1 mS/m med et gennemsnit på 6,75 mS/m.

Den øvre grænse for en "baggrunds formationsledningsevne" for kridtet kan således sættes til omkring 10 mS/m. Dette betyder, at når en formationsledningsevne bestemt ved fx. Induktions-log er mindre end 10 mS/m, er det en indikation på, at koncentrationen af klorid er meget lav i porevandet (typisk under 20 mg/l). Større formationsledningsevner end 10 mS/m må forklares med et forøget indhold af saltvand, det vil sige klorid og natrium. Koncentrationen af natrium er imidlertid også påvirket af ionbytningsprocesser, og derfor er det mest hensigtsmæssigt at definere saltpåvirkningen alene ud fra koncentrationen af klorid.

Ved formationsledningsevne større end 25 mS/m kan det vises at kloridkoncentrationen i porevandet er større end 300 mg/l.

Sammenhængen mellem porevands elektriske ledningsevne (mS/m) ved 10° C og koncentrationen af klorid (mg/l) fremgår af figur 3. I koncentrationsintervallet fra 0 til 1.500 mg/l er omregningsfaktoren mellem disse parametre omkring 4, og en elektrisk ledningsevne for porevandet kan således omregnes til en koncentration af klorid. Dette vil blive defineres som en "ækvivalent klorid koncentration". Ved relativt lave elektriske formationsledningsevner (<25 mS/m) kan kalkmagasinets "baggrunds ledningsevne" på 10 mS/m fratrækkes og den overskydende ledningsevne vil da udelukkende skyldes kloridindholdet. Denne skal dog multipliceres med formationsfaktoren for at kunne bestemme kloridkoncentrationen i porevandet ud fra nedenstående figur.



Figur 3. Resultater af laboratorieforsøg som viser sammenhængen mellem koncentration af klorid og vands elektriske ledningsevne ved 10° C.

Reference:

Appelo, C.A. J og Postma, D, 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd. Ed.. 469 sider. Balkama.

Bilag 3: Vandkemiske analyser fra Karlslunde Mose boringen

Klorid og sulfat

Karlslunde Mose boringen					
Dybde mut.	Klorid mg/L	Sulfat Mg/L	Dybde mut.	Klorid mg/L	Sulfat Mg/L
49	70	66	128	6763	328
50	101	72	130	6045	284
51	49	46	134	6884	304
52	47	47	144	8486	327
53	54	55	148	8314	326
54	57	68	150	8970	329
55	40	62	152	3422	119
56	40	63	156	9752	313
57	61	76	164	10522	308
58	56	76	168	10670	326
59	85	87	170	11216	345
60	42	67	175	11513	327
61	47	69	177	10135	272
62	48	77	179	11131	357
63	45	75	181	11594	374
64	47	79	191	11077	300
65	46	81	195	14551	397
66	50	82	199	13266	380
68	71	124	201	14096	382
69	127	266	203	13600	382
70	123	182	205	14150	412
71	138	146	207	15118	397
72	193	150	209	12976	390
74	340	151	211	14098	393
75	375	148	213	13250	392
77	412	232	215	13347	455
79	569	167	217	14138	392
80	595	202	219	15650	394
81	697	158	221	14725	396
83	944	174	223	14027	398
85	1266	188	225	14322	384
89	1523	337	227	15173	427
91	1650	211	229	14691	387
92	1583	271	231	15243	415
94	1788	224	233	14980	375
96	1720	339	235	15524	390
98	1790	277	237	13586	376
100	1857	287	239	14954	446
103	2038	306	245	13813	296
104	1972	267	272	16191	347
106	2078	379	138	7083	281
107	2725	273	185	12964	465
108	2802	291	187	11317	351
110	3081	270	243	16725	543
112	3505	284	255	14106	405
114	3921	293	247	14889	437
116	4353	329	251	12909	378
118	4606	317	267	13582	328
120	4810	310	263	17704	450
122	4846	303	270	14520	380
126	6494	334	259	16717	435

Elektrisk ledningsevne (v. 25° C)

Karlslunde Mose boringen

Dybde mut.	EC mS/m	Dybde Mut	EC mS/m	Dybde Mut	EC mS/m	Dybde Mut.	EC mS/m	Dybde mut.	EC mS/m
49	81	74	193	118	1612	168	3300	199	4160
49	81	75	197	118	1612	170	3470	199	4160
49	81	75	201	120	1592	170	3470	199	4130
49	81	77	235	120	1622	171	3744	199	4130
50	86	77	212	122	1748	171	3744	201	4240
50	86	79	263	122	1748	171	3744	201	4240
50	86	79	273	126	2094	171	3744	203	4270
50	86	80	256	126	2094	173	3471	203	4270
51	82	80	256	128	2260	173	3471	205	4160
51	79	81	313	128	2260	173	3471	205	4160
52	81	81	316	130	2280	173	3471	207	4270
52	81	83	411	130	2323	175	3450	207	4420
53	83	83	402	132	2303	175	3450	209	4300
53	83	85	509	132	2303	175	3450	209	4300
54	78	85	509	134	2300	175	3450	211	4320
54	76	85	500	134	2436	177	3300	211	4320
55	73	85	508	136	2400	177	3300	213	4370
55	72	87	552	136	2400	177	3300	213	4350
56	76	87	552	138	2580	177	3300	215	4390
56	78	89	623	138	2580	179	3470	215	4360
57	95	89	624	140	2550	179	3470	217	4410
57	80	91	629	140	2550	179	3470	217	4410
58	84	91	642	142	2572	179	3470	219	4510
58	84	92	649	142	2572	181	3580	219	4510
59	89	92	628	144	2800	181	3580	221	4420
59	90	94	682	144	2800	181	3580	221	4410
60	73	94	687	148	2830	181	3580	223	4260
60	75	96	664	148	2830	183	3440	223	4340
61	76	96	668	150	2884	183	3440	229	4410
61	75	98	678	150	2884	183	3440	231	4330
62	80	98	685	152	2890	183	3440	233	4320
62	79	100	722	152	2890	185	3840	235	4480
63	82	100	728	154	2690	185	3840	237	4510
63	80	103	740	154	2690	185	3920	239	4260
64	77	103	781	156	3020	185	3920	243	4630
64	80	104	811	156	3020	187	3730	245	4410
65	78	104	829	158	3060	187	3730	245	4620
65	78	106	960	158	3060	187	3730	245	4590
66	80	106	927	160	2614	187	3730	247	4560
66	81	107	949	160	2614	191	3860	251	4360
68	90	107	979	162	2882	191	3860	255	4660
68	95	108	1041	162	2882	191	3860	259	4745
69	134	108	1047	164	3250	191	3860	263	4680
69	147	110	1081	164	3250	195	4230	267	4660
70	124	110	1092	166	3424	195	4230	270	4790
70	122	112	1175	166	3424	195	4190	272	4630
71	123	112	1225	166	3424	195	4190	272	4750
71	124	114	1256	166	3424	197	4034	272	4710
72	134	114	1336	168	3300	197	4034	272	4750
72	140	116	1500	168	3300	197	4034		
74	187	116	1454	168	3300	197	4034		

Stabile iltisotoper
Karlslunde Mose boringen

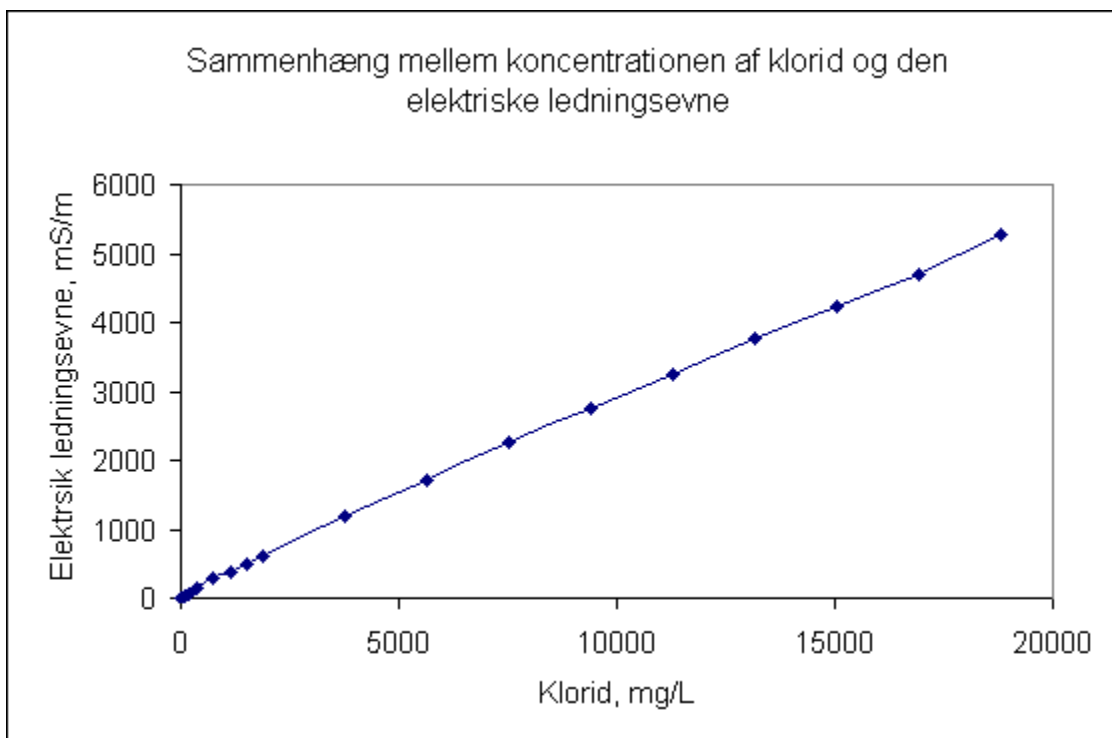
id	180/160	Dybde, mut.	Id	180/160	Dybde, mut.	id	180/160	Dybde, mut.
1	-8,37	49	35	-8,88	94	71	-6,66	191
2	-8,26	50	36	-8,76	96	72	-6,64	195
3	-8,48	51	37	-8,72	98	73	-6,54	199
4	-8,42	52	38	-8,49	100	74	-6,36	201
5	-8,5	53	39	-8,67	103	75	-6,56	203
6	-8,44	54	40	-8,59	104	76	-6,9	205
7	-8,46	55	41	-8,44	106	77	-6,55	207
8	-8,45	56	42	-8,68	107	78	-6,38	209
9	-8,6	57	43	-8,64	108	79	-6,44	211
10	-8,5	58	44	-8,44	110	80	-6,21	213
11	-8,37	59	45	-8,34	112	81	-6,51	215
12	-8,27	60	46	-7,91	114	82	-6,53	217
13	-8,38	61	47	-7,76	116	83	-6,36	219
14	-8,25	62	48	-7,84	118	84	-6,48	221
15	-8,53	63	49	-7,9	120	85	-6,46	223
16	-8,25	64	50	-7,84	122	86	-6,32	225
17	-8,18	65	51	-7,69	126	87	-6,42	227
18	-8,33	66	52	-7,6	128	88	-6,44	229
19	-8,48	68	53	-7,54	130	89	-6,36	231
20	-8,54	69	54	-7,5	134	90	-6,42	233
21	-8,59	70	55	-7,08	138	91	-6,4	235
22	-8,52	71	56	-7,11	144	92	-6,24	237
23	-8,68	72	57	-7,14	148	93	-6,61	239
24	-8,62	74	58	-7,13	150	94	-6,26	243
25	-8,54	75	59	-7,03	156	62	-6,28	245
26	-8,51	77	60	-7,06	164	96	-6,13	247
27	-8,58	79	63	-6,71	168	97	-6,3	251
28	-8,92	80	61	-6,63	170	95	-6,11	255
29	-8,67	81	64	-6,93	175	100	-6,4	259
30	-8,67	83	65	-6,91	177	99	-6,3	263
31	-8,64	85	66	-6,84	179	98	-6,13	267
32	-8,85	89	67	-6,77	181	101	-5,93	270
34	-8,56	91	68	-6,51	185	69	-6,14	272
33	-8,85	92	70	-6,78	187			

Ledningsevne i "kunstigt" hav vand

Koncentrationen af klorid i oceanisk havvand er 18.880 mg/L

100 % oceanisk havvand er fremstillet ved tilsætning af 31.145 g NaCl i 1 liter mill Q vand

Procent havvand	Klorid mg/L	Elektrisk ledningsevne (25° C) mS/m	Elektrisk modstand Ohmm (25° C)
0	0	0,077	12987
0,5	94	35,5	28,17
1	188	69,5	14,39
2	376	136,4	7,33
4	752	281,5	3,55
6	1128	380	2,63
8	1504	503	1,99
10	1880	616	1,62
20	3760	1178	0,85
30	5640	1712	0,58
40	7520	2257	0,443
50	9400	2766	0,362
60	11280	3260	0,307
70	13160	3760	0,266
80	15040	4240	0,236
90	16920	4710	0,212
100	18800	5270	0,190



*) Ledningsevne (mS/m) ved 25° C