

Kortlægning af kalkmagasiner

Thomas Vangkilde-Pedersen, Susie Mielby, Peter Roll Jakobsen,
Birgitte Hansen, Claus Holst Iversen og Anne Mette Nielsen

G E O - V E J L E D N I N G 8



Kortlægning af kalkmagasiner

Thomas Vangkilde-Pedersen, Susie Mielby, Peter Roll Jakobsen,
Birgitte Hansen, Claus Holst Iversen og Anne Mette Nielsen

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
MINISTERIET FOR KLIMA OG ENERGI



Kortlægning af kalkmagasiner

Særudgivelse

Forsidebillede taget af Peter Warna-Moors

Omslag: Henrik Klinge

Repro: GEUS

Oplag: 100

Maj 2011

ISBN tryk: 978-87-7871-306-3

ISBN web: 978-87-7871-307-0

Vejledningen kan hentes på nettet: www.geus.dk

Pris (indbundet): 200 kr.

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Øster Voldgade 10
DK-1350 København K
Telefon: 38 14 20 00
E-post: www@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med Naturstyrelsen, Miljøministeriet.

Forord

Ifølge Miljømålsloven skal Miljøministeriet, Naturstyrelsen kortlægge grundvandsressourcen og foretage udpegninger af blandt andet nitratfølsomme områder og indsatsområder med hensyn til nitrat med udgangspunkt i de resultater der fremkommer af kortlægningen. Kortlægningen har foregået siden 1998 hvor amterne i henhold til Vandforsyningsloven påbegyndte grundvandskortlægningen. I forbindelse med amternes nedlæggelse ved udgangen af 2006 er opgaven overdraget til først de statslige miljøcentre og i 2010 Naturstyrelsen i Miljøministeriet.

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) har til opgave at bistå med udviklingsprojekter, faglig koordinering og udarbejdelse af vejledninger, således at grundvandskortlægningen så vidt muligt kan udføres ensartet i alle egne af landet, hvor der er tale om sammenlignelige problemstillinger. Vejledningerne udgives i en serie kaldet Geo-vejledninger og udarbejdes i samarbejde med Naturstyrelsen. Geo-vejledningerne skal blandt andet tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver som Naturstyrelsen foretager.

Grundvandskortlægningen er beskrevet i Zoneringsvejledningen (Miljøstyrelsen 2000) og senere uddybes dele af opgaven i Administrationsgrundlaget for Miljøministeriets afgiftsfinancerede grundvandskortlægning (Miljøministeriet 2009). I Zoneringsvejledningen fremgår det at der hersker særlige forhold, hvor grundvandsmagasinerne udgøres af kalkaflejringer, og i juni 2009 blev der afholdt en temadag om grundvandskortlægning i kalkmagasiner med fokus på at beskrive kalkmagasinernes forskellighed fra andre grundvandsmagasiner i Danmark. Temadagen viste et behov for at samle hidtidige erfaringer med kortlægning af kalkmagasiner og Styregruppen for Grundvandskortlægning besluttede at nedsætte en projektgruppe med det formål at udarbejde en geo-vejledning i kortlægning af kalkmagasiner.

Projektet med udarbejdelse af Geo-vejledningen er udført af:

Thomas Vangkilde-Pedersen	GEUS, projektleder
Susie Mielby	GEUS
Birgitte Hansen	GEUS
Peter Roll Jakobsen	GEUS
Claus Holst Iversen	GEUS (nu Favrskov Kommune)
Anne Mette Nielsen	GEUS

I forbindelse med projektet er der nedsat en faglig følgegruppe bestående af:

Henrik Pind G. Jørgensen/Claus Arnfeldt Andersen (formand)	Naturstyrelsen Ribe
Lærke Therese Andersen	Naturstyrelsen Århus
Philip Grinder Pedersen	Naturstyrelsen Storstrøm
Tony Christensen	Naturstyrelsen Roskilde
Kirstine Skov Nielsen	Naturstyrelsen Aalborg
Peter Erfurt	Naturstyrelsen Ribe

Erik Thomsen	Aarhus Universitet, Geologisk Institut
Flemming Larsen	GEUS
Kurt Klitten	GEUS
Erik Thomsen	GEUS
Peter Sandersen	Grontmij
Henrik Olsen	COWI (nu Mærsk olie & Gas)
Niels Richardt	Rambøll

Følgegruppen har bistået med faglig kommentering af vejledningen og har deltaget i et følgegruppemøde d. 01-03-2011 hvor indholdet blev diskuteret.

Projektgruppen anbefaler at geo-vejledningen revideres, efterhånden som nye erfaringer indhentes.

18-05-2011

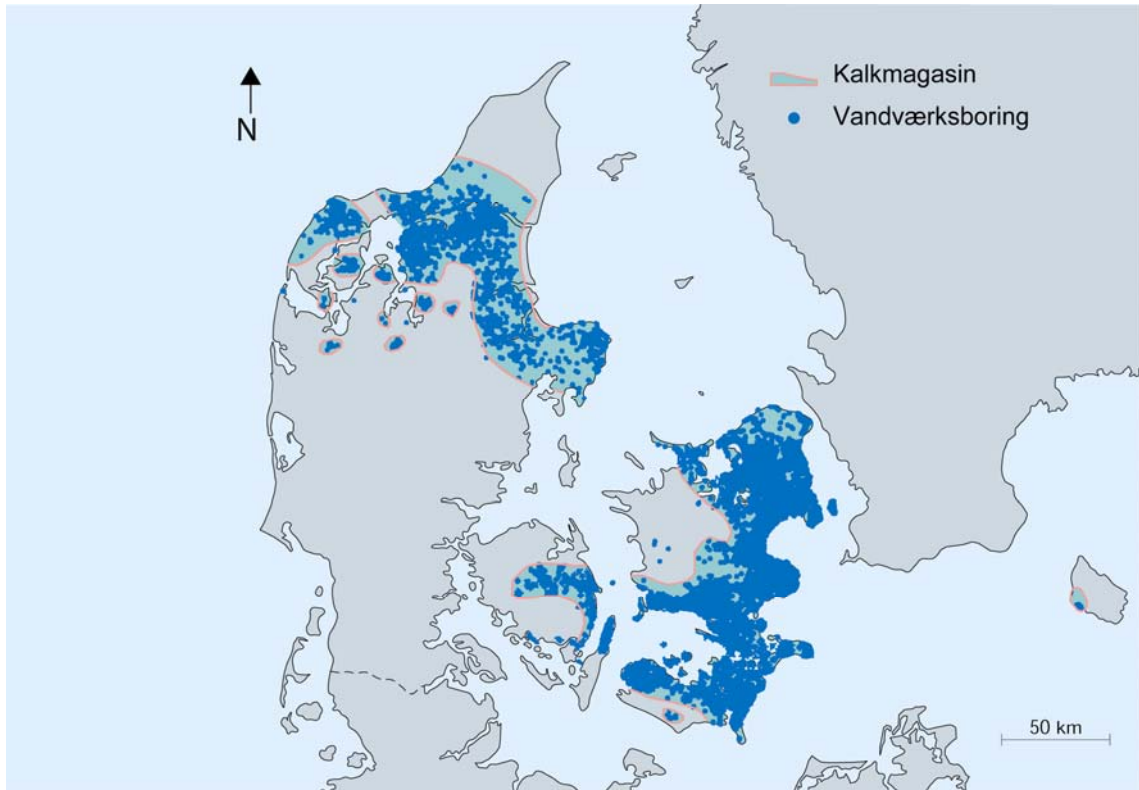
Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	9
2.	Kortlægningsstrategi for kalkmagasiner	12
2.1	Generelle rammer for grundvandskortlægningen	12
2.2	Særlige forhold ved kalkmagasiner	13
2.2.1	Kalkens særlige geologi	14
2.2.2	Strømningsforholdene i kalken	14
2.2.3	Saltvandsproblemer i kalken	15
2.2.4	Naturligt forekommende problemstoffer i kalken	15
2.3	Kortlægningsstrategi og metoder.....	16
2.3.1	Særlige overvejelser for kalkmagasiner.....	17
3.	Grundlæggende hydrogeologiske forhold	19
3.1	Kalkbjergarterne i Danmark	19
3.1.1	Skrivekridt.....	25
3.1.2	Bryozokalk	26
3.1.3	Koralkalk.....	27
3.1.4	Slamkalk.....	28
3.1.5	Kalksandskalk.....	28
3.1.6	Lellinge Grønsand Formationen	29
3.1.7	Porøsitet og permeabilitet i kalkbjergarterne	30
3.2	Strukturer og sprækkesystemer.....	32
3.2.1	Forkastninger.....	32
3.2.2	Folder	33
3.2.3	Sprækker	34
3.2.4	Karst.....	38
3.2.5	Saltstrukturer	38
3.3	Kalkens hydrauliske egenskaber	40
3.3.1	Geologiens betydning for de hydrauliske egenskaber i kalken	40
3.3.2	Beregning på strømningsforhold.....	41
3.3.3	Anisotropi	44
3.4	Grundvandsdannelse til kalken.....	45
3.5	Grænsen mellem fersk og salt grundvand	45
3.5.1	Terminologi og definitioner	46
3.5.2	Hydrostatisk ligevægt	47
3.5.3	Karakterisering af saltvandsgrænsen	47
3.5.4	Geologisk udviklingsmodel for saltvandsgrænsen.....	51
3.5.5	Betydningen af de hydrogeologiske forhold.....	52
3.5.6	Indvindingens påvirkning af dybden til saltvandsgrænsen.....	56
3.6	Grundvandskemiske forhold i kalkmagasiner	56
3.6.1	Spredning af kemiske stoffer i kalkmagasiner	57
3.6.2	Kloridholdigt grundvand.....	58
3.6.3	Naturlige kemiske processer	59
3.6.4	Kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter	63

4.	Anbefalinger til kortlægning af kalkmagasiner	68
4.1	Kortlægning af kalkformationerne	68
4.1.1	Kortlægning af kalkoverfladen.....	68
4.1.2	Adskillelse af kalkformationer.....	72
4.1.3	Kortlægning af strukturer i kalken.....	75
4.1.4	Særlige problemstillinger i forbindelse med begravede dale.....	78
4.1.5	Særlige problemstillinger i forbindelse med saltstrukturer.....	79
4.2	Kortlægning af strømningsforholdene i kalken	81
4.2.1	Kortlægning af sprækkemønstre	81
4.2.2	Kortlægning af lavpermeable horisonter	83
4.2.3	Kortlægning af grundvandspotentialet.....	84
4.2.4	Oplandsberegninger i kalk	87
4.3	Kortlægning af saltvandsgrænsen.....	90
4.4	Kortlægning af kemiske stoffer i kalken.....	92
4.4.1	Kortlægning af klorid i grundvandet.....	92
4.4.2	Kortlægning af andre naturlige kemiske stoffer	93
4.4.3	Kortlægning af kemiske stoffer påvirket af menneskelig aktivitet	95
4.4.4	Særlige forhold ved overvågning af kalkmagasiner.....	96
5.	Ideer til fremtidig forskning og udvikling	98
6.	Referencer	100
Appendix A	Prøvepumpning	1
Appendix B	Boringers ydelse og kapacitet	1
Appendix C	Borehulslogging og logstratigrafi	1
Appendix D	Grundvandsmodellering i kalk	1
Appendix E	Vandtyper	1

1. Indledning

Det har længe været kendt, at kalkbjergarter er særdeles velegnede som grundvandsmagasiner. H. Ødum skriver således i 1935 (Ødum, 1935): "Det bedste vandførende jordlag, man kan få her i landet, er fast kalksten eller kalkklippe, der er fuld af store revner og sprækker, hvori vandet kan bevæge sig frit og uhindret". Kalkmagasiner er stadig vigtige grundvandsressourcer og i dag kommer ca. en tredjedel af Danmarks indvinding af drikkevand fra kalkmagasiner (Figur 1).



Figur 1. Kort over udbredelsen af kalkmagasiner i prækvartærcoverfladen og placering af vandværksboringer der er boret til kalk (fra Nygård, 1993).

Indvindingsforholdene i kalken afviger imidlertid på en række områder fra indvindingsforholdene i sandmagasiner. Det gør at kortlægningsstrategien bør tilrettelægges anderledes med hensyn til kalkmagasiner. For eksempel foregår strømmingen i kalkmagasiner primært i sprækker og kun sekundært i matrix og kan derfor være vanskelig at forudsige. Et andet eksempel er at kalken oprindeligt er aflejret i et marint miljø, og den ferske ressource derfor som oftest er begrænset nedadtil af marint residuelt saltvand med risiko for optrængning af det salte vand i forbindelse med indvinding. Endvidere har hittidige danske undersøgelser i kalkmagasiner vist at det ved kortlægning af kalkmagasiner er vigtigt at have fokus på de naturligt forekommende problemstoffer: klorid, nikkel, fluorid, strontium og arsen udover de menneskeskabte forureningsstoffer som nitrat, pesticider og andre miljøfremmede stoffer.

Der er gennem årene udført en lang række hydrogeologiske undersøgelser af kalken i Danmark i forbindelse med vandforsyning og grundvandskortlægning. Endvidere eksisterer der et omfattende erfaringsgrundlag om kalkens hydrogeologiske egenskaber i Københavnsområdet fra store anlægsprojekter som Øresundsforbindelsen og Københavns Metro. Generelt fremgår det af referencelisten i det omfang sådanne undersøgelser er benyttet i vejledningen, men herudover skal der specielt henvises til følgende nyttige baggrundslitteratur:

- Denmark (Nygaard, 1993). I: The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe.
- Kalk og kridt I den danske undergrund (Thomsen, 1995). I: Danmarks geologi fra Kridt til i dag.
- Saltvandsgænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport (Klitten m.fl., 2006).
- Lavpermeable horisonter i skrivekridtet – Fase A (Nielsen m.fl., 2008).

Formålet med denne geo-vejledning er at samle erfaringer fra de mange undersøgelser af kalken og give et overblik over væsentlige elementer ved kortlægning af kalkmagasiner, og gennem anbefalinger sikre en ensartet tilgang til kalkkortlægning i hele landet. Vejledningen skal ses som et supplement, med særligt fokus på kalk, til de øvrige geo-vejledninger udarbejdet i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning og som hver især behandler mere specifikke emner:

- Jordprøver fra grundvandsboringer. Vejledning i udtagning, beskrivelse og geologisk tolkning i felten. Geo-Vejledning 1 (Ditlefsen m.fl., 2008).
- Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Del 1). Vejledning i oplandsberegninger i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning. Geo-Vejledning 2 (Iversen m.fl., 2008).
- Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. Geo-Vejledning 3 (Jørgensen m.fl., 2008a).
- Potentialekortlægning. Vejledning i udarbejdelse af potentialekort. Geo-Vejledning 4 (Mielby m.fl., 2009).
- Vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed. Geo-Vejledning 5 (Hansen m.fl., 2009a).
- Kemisk grundvandskortlægning. Geo-vejledning 6 (Hansen m.fl., 2009b).
- God praksis i hydrologisk modellering. Geo-vejledning 7 (Refsgaard m.fl., 2010).

Det er i geo-vejledningen valgt at fokusere på de naturligt forekommende stoffer og processer i grundvandet samt kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter. Det er dermed valgt at fokusere på forekomsten af uorganiske stoffer i kalkmagasiner, og det er valgt at undlade at behandle kortlægning af punktforurening med miljøfremmede stoffer som er regionernes ansvarsområde.

I kapitel 2 beskrives rammerne for grundvandskortlægningen kort sammen med de væsentlige elementer som bør inddrages ved planlægning af kortlægningen af kalkmagasiner.

Kapitel 3 giver en indføring i grundlæggende hydrogeologiske forhold som er relevante i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner. Det drejer sig om geologi, strømning i kalk, dannelse af ferskvandsressourcen, forekomst af saltvand og andre naturligt forekommende stoffer samt menneskeskabte forureninger af grundvandet.

Kapitel 4 er udformet som et opslagsværk over konkrete problemstillinger som kan være relevante ved kortlægningen og med anbefalinger til deres løsninger.

Endelig er der i Appendix A-E uddybende beskrivelser af prøvepumpning, boringers ydelse og kapacitet, borehulslogging og logstratigrafi, grundvandsmodellering i kalk samt vandtyper i kalken.

2. Kortlægningsstrategi for kalkmagasiner

Dette kapitel beskriver kort rammerne for grundvandskortlægningen, de elementer som kortlægningen generelt bør behandle, og de problemstillinger der er særlige eller bør være særlig fokus på i forbindelse med planlægning af kortlægningen af kalkmagasinerne.

For mere detaljerede beskrivelser af karakteristiske hydrogeologiske forhold for kalkmagasiner henvises til kapitel 3, og for anbefalinger til løsninger af specifikke problemstillinger i forbindelse med kortlægningen henvises til kapitel 4.

2.1 Generelle rammer for grundvandskortlægningen

Kortlægningen af grundvandsmagasiner sker i henhold til Zoneringsvejledningen (Miljøstyrelsen, 2000) og Administrationsgrundlaget for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning (Miljøministeriet, 2009).

Det overordnede formål med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning er at vurdere nitratsårbarheden, udpege nitratfølsomme indvindingsområder og indsatsområder med hensyn til nitrat. Grundvandskortlægningen skal hermed danne baggrund for en målrettet beskyttelse af drikkevandsressourcen og skal ske på et fagligt veldokumenteret grundlag efter ensartede kriterier i hele landet (Miljøministeriet, 2009).

Kortlægningen foregår ved at afgrænse og bestemme:

- Grundvandsmagasiner
- Omfang af beskyttende dæklag over grundvandsmagasinerne
- Grund- og drikkevandskemiske forhold (vandets kvalitet)
- De hydrologiske forhold (grundvandsdannelse, strømningsforhold)
- Arealanvendelse og forureningskilder
- Nitratfølsomme indvindingsområder og revision af andre områdeafgrænsninger

Kortlægningen forløber altid i 5 trin som vist i Figur 2, men omfanget af hvert trin kan variere mellem de enkelte kortlægningsområder. Fordelingen af arbejde og omfang mellem Trin 1 og Trin 2 afhænger f.eks. af hvor mange informationer i form af data og tidligere udførte kortlægninger der findes for området.

Formulering af de områdespecifikke problemstillinger er vigtig, og opstilling af en geologisk forståelsesmodel og en kemisk model på eksisterende data i Trin 1 samt en rumlig geologisk model, en hydrogeokemisk, en hydrostratigrafisk model samt en grundvandsmodel i Trin 2 er vigtige redskaber til afdækningen af disse problemstillinger.

Rammerne for kortlægning af kalkmagasiner adskiller sig principielt ikke fra kortlægning af andre magasiner. Ved kortlægning af kalkmagasiner kan det dog forekomme, at vægtningen mellem forskellige inputdata er anderledes end for f.eks. sandmagasiner. Endvidere

skal opmærksomheden henledes på en række særlige forhold, som bør være i fokus ved kortlægning af kalkmagasiner. Disse særlige forhold for kalkmagasiner beskrives i afsnit 2.2.

Miljøministeriets grundvandskortlægning - kortlægningsforløb	
Trin 1	Analyse af eksisterende data Opsamling af eksisterende viden om vandindvinding, arealanvendelse, forureningskilder, geofysik, geologi, hydrologi og grundvandskemi
Trin 2	Detailkortlægning af geologi, hydrologi og kemi Boringsregistreringer, geofysiske målinger, boringer og sedimentologi, hydrologiske målinger, vand- og sedimentkemi, geologiske og hydrologiske modeller
Trin 3	Detailkortlægning af arealanvendelse og forureningskilder
Trin 4	Afgrænsning af sårbare områder og revision af andre områdeafgrænsninger Udarbejdelse og opdatering af kort
Trin 5	Anbefalinger og afrapportering Udarbejdelse af anbefalinger til beskyttelsesbehov og overvågning. Udarbejdelse af endelig redegørelsesrapport og kort, afrapportering af data

Figur 2. Beskrivelse af de 5 trin i grundvandskortlægningen (Miljøministeriet, 2009).

2.2 Særlige forhold ved kalkmagasiner

Kalkmagasinerne i Danmark har en oprindelse og dannelseshistorie som en mange millioner år gammel marin bjergart der er cementeret i varierende grad, og som har været udsat for tektoniske påvirkninger af forskellig art. Dermed adskiller kalken sig væsentligt fra f.eks. kvartære sandmagasiner, og i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner skal man være opmærksom på følgende særlige forhold for kalken:

- De hydrogeologiske egenskaber i kalken adskiller sig typisk væsentligt fra de overliggende lag, og der kan være markant forskellige hydrogeologiske egenskaber i de forskellige kalktyper
- Strømningsforholdene i kalken er ofte sprækkedominerede og påvirkede af lagdeling og strukturer
- I forbindelse med kalkmagasiner optræder der ofte saltvandsproblemer relateret til det marine aflejringsmiljø
- Der optræder en række naturligt forekommende problemstoffer i kalken som følge af dens oprindelse og sammensætning af mineraler

Der er tale om selvstændige forhold, men de hænger ofte sammen indbyrdes og sammen med den overordnede hydrogeologiske og hydrogeokemiske tolkningsmodel for området.

De særlige forhold for kalken beskrives kort i de følgende afsnit og uddybes i Kapitel 3 og 4.

2.2.1 Kalkens særlige geologi

De geologiske og hydrogeologiske egenskaber i kalken er som beskrevet i de følgende 3 afsnit typisk meget forskellige fra egenskaberne i overliggende ler- eller sandlag, og kan ligeledes være meget forskellige i de forskellige kalktyper. Derfor er det både vigtigt med en kortlægning og forståelse af kalkoverfladens forløb, og at kunne adskille, karakterisere og kortlægge udbredelsen af de forskellige kalktyper.

2.2.2 Strømningsforholdene i kalken

Viden om grundvandets potentiale og strømningsretning er nødvendig for at kunne forklare hydrauliske og kemiske sammenhænge mellem boringer, forureningsspredning, mulig indtrængning af saltvand samt ikke mindst i afgrænsningen af indvindingsoplande til vandforsyningerne.

Strømningen i kalkmagasiner adskiller sig i væsentlig grad fra strømningen i sandmagasiner. Mens strømning i sandmagasiner foregår i matrix, foregår strømning i kalkmagasiner langt overvejende i sprækker og langs den interne lagdeling og/eller bankestrukturer, og kun i mindre grad i selve kalkmatrixen. For at kunne modellere strømningen i kalken er det således vigtigt at få kortlagt de betydende strømningsveje, herunder sprækkemønstre og – intensitet, og potentielle hydrauliske barrierer i kalkmagasinet, se også Appendix D og Geovejledning nr. 7 "God praksis i hydrologisk modellering" (Refsgaard m.fl., 2010).

De horisontale sprækker i kalken hænger sammen med trykaflastning og lagdeling i kalken, og de vertikale sprækker hænger sammen med tektoniske påvirkninger. Derfor er der mange geologiske og hydrauliske parametre som skal inddrages i forbindelse med vurdering af strømningsmønstre.

Særligt for kalkmagasiner er også at der kan optræde lavpermeable horisonter i form af mergellag med stor udstrækning på lokal til regional skala. Sådanne hydrauliske barrierer kan bevirke at et kalkmagasin reelt består af flere opdelte magasiner med ringe eller ingen hydraulisk kontakt, og hvor der kan være forskellige trykniveauer på hver side af de lavpermeable horisonter.

En central del af grundvandskortlægningen er vurdering af grundvandsmagasiners nitrat-sårbarhed. Dæklagenes betydning for magasinets sårbarhed er for så vidt den samme for kalken som for sandmagasiner, men på grund af de særlige strømningsforhold i kalken kan hastigheden af stoftransport i opsprækkede dele af kalkmagasiner være størrelsesordener større end i f.eks. sandmagasiner. Det kan gøre kalkmagasinerne mere sårbare over for

spredning af en forurening når den først er nået ned i magasinet. Hvis de øvre dele af et kalkmagasin er sårbart, kan det være vigtigt og relevant at kortlægge eventuelle lavpermeable mergellag som vil kunne yde beskyttelse for dybereliggende ferskt grundvand.

2.2.3 Saltvandsproblemer i kalken

På grund af kalkens oprindelse kan kalkmagasinerne indeholde marint residuelt vand, og der optræder ofte saltvandsproblemer i forbindelse med kalken som drikkevandsressource. I hvor høj grad og til hvilken dybde det salte grundvand er udvasket afhænger dels af strømningsforholdene i kalken og dels af beskaffenheden af de overliggende lag, og dermed også af grundvandsdannelsen til kalken.

I forbindelse med kalkmagasiner er det således vigtigt at kortlægge beliggenhed og beskaffenhed af grænsen mellem fersk og salt grundvand for at kunne vurdere udbredelsen af den ferske ressource og risikoen for indvinding af saltvand. Overgangszonen kan variere meget i tykkelse, og kortlægningen af saltvandsgrænsen bør involvere geologien, lagdeling, strukturer og sprækkesystemer som har betydning for strømningsforholdene, og dermed også interaktionen og fordelingen mellem det ferske og salte grundvand.

Kortlægning/modellering af grundvandsdannelsen og strømningsdynamikken er en nødvendig forudsætning for at vurdere den udnyttelige ferske grundvandsressources geografiske beliggenhed. Hvor grundvandsdannelsen er begrænset, kan der være en øget risiko for at magasinet er saltvandspåvirket på grund af begrænset udvaskning af det salte grundvand og/eller opstrømning af saltvand, og det bør indgå i overvejelserne omkring udpeging af beskyttelseszoner og indsatsområder. F.eks. er der ingen grund til at udpege nitratfølsomme områder og indsatsområder med hensyn til nitrat hvis hele magasinet er saltvandspåvirket og derfor uegnet til indvinding.

2.2.4 Naturligt forekommende problemstoffer i kalken

I forbindelse med kalkmagasiner skal man være særligt opmærksom på indholdet af de naturligt forekommende problemstoffer hvor, udover klorid, for eksempel fluorid, strontium, arsen og nikkel i hidtidige danske undersøgelser har vist sig at kunne udgøre et problem for drikkevandskvaliteten. Klorid i kalkmagasiner knytter sig dels til det marine residuale saltvand og dels til både naturlige og menneskeskabte kilder tilført på jordoverfladen. Forekomsterne af de øvrige stoffer hænger sammen med kemiske processer relateret til kalken som f.eks. opløsning af mineraler og rekrySTALLISERING.

Kortlægning af vandkvaliteten kan således have betydning for vurderingen af strømningsforhold, grundvandets alder og dannelse og dermed den udnyttelige grundvandsressources størrelse og beliggenhed. Endelig er det vigtigt at overvågningen tilrettelægges med henblik på vurdering af de naturligt forekommende problemstoffer i kalkmagasinerne.

2.3 Kortlægningsstrategi og metoder

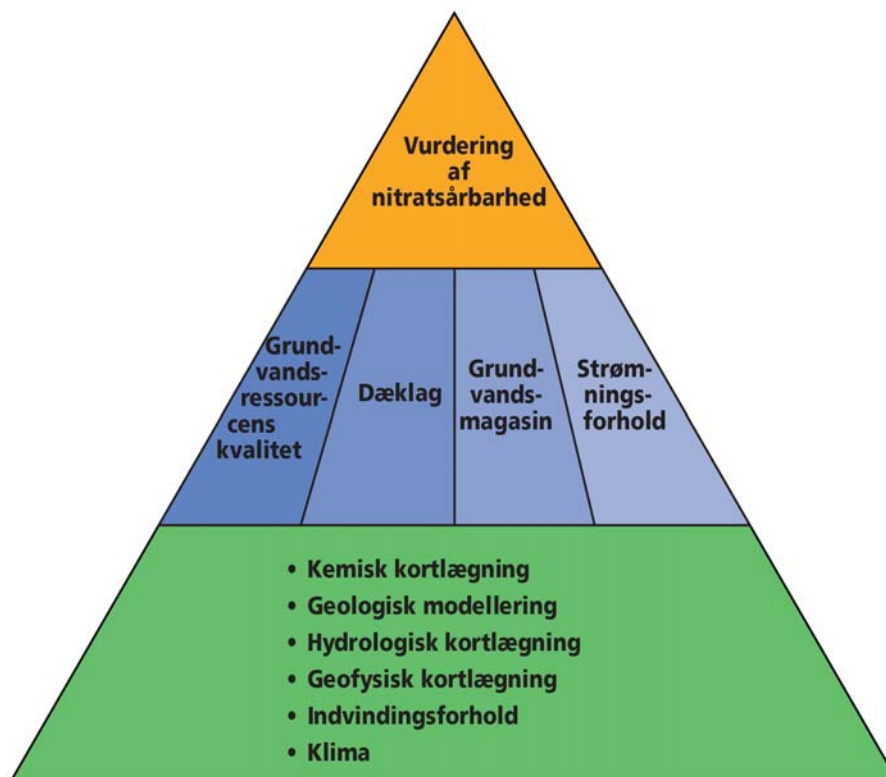
I forbindelse med fastlæggelse af kortlægningsstrategi er det, som nævnt i afsnit 2.1, vigtigt at identificere de områdespecifikke problemstillinger i Trin 1, og dernæst hvilke produkter der forventes at være nødvendige for at kunne løse disse. Herefter kan man som illustreret i Figur 3 opstille en prioriteret kortlægningsstrategi og vælge metoder for Trin 2.



Figur 3. Illustration af processen omkring identifikation af problemstillinger og valg af kortlægningsstrategi.

Grundvandskortlægningens hovedformål er som nævnt indledningsvis en vurdering af nitratsårbarheden, og kortlægningen heraf er beskrevet i Geo-vejledning nr. 5 "Vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed" (Hansen m.fl., 2009a).

Fundamentet for vurderingen af nitratsårbarheden udgøres af de geofysiske, geologiske, hydrologiske og kemiske kortlægningsresultater samt informationer om indvindingsforhold og klima, og det er vigtigt at delresultaterne fra kortlægningen ikke står alene, men tolkes i sammenhæng med alle resultaterne fra de enkelte fagområder som illustreret i Figur 4.



Figur 4. Illustration af sammentolkningen af kortlægningsdata i forbindelse med vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed (Hansen m.fl., 2009a).

Valget af kortlægningsmetoder skal ske ud fra en samlet vurdering af områdets problemstillinger og den eksisterende forhåndsviden om de hydrogeologiske forhold. Da det er sjældent at alle problemstillinger kan løses med den samme undersøgelsesmetode, kan en prioritering af problemstillingerne være en hjælp til at vælge fremgangsmåde for kortlægningsindsatsen. Det er dog vigtigt med et bredt metodevalg så kortlægningen giver en tilstrækkelig forståelse af årsag og sammenhæng i forhold til problemstillingerne, og de særlige forhold for kalk, beskrevet i afsnit 2.2 belyses (se også afsnit 2.3.1).

Beslutningen om hvilke undersøgelser der i sidste ende skal gennemføres, og med hvilke metoder er ikke trivial, idet ingen kortlægningsområder er ens, hverken med hensyn til geologi, hydrologi eller problemstillinger. Dertil kommer at tilgængelige ressourcer og tidshorisonter kan få betydning for de valg der træffes, og dermed også for den detaljeringsgrad og/eller kvalitet det er muligt at få ud af kortlægningen. Det må dog tilstræbes at arbejde frem mod tilstrækkeligt nøjagtige resultater, da resultaterne danner grundlag for de indsatsplaner som kommunerne udarbejder til grundvandets beskyttelse, og de dermed kan få konsekvenser for arealanvendelsen og investeringer i forbindelse med kommunens øvrige planlægning.

2.3.1 Særlige overvejelser for kalkmagasiner

Med henvisning til de særlige geologiske og hydrogeologiske forhold der hersker i kalken sammenlignet med f.eks. sandmagasiner (se afsnit 2.2 og kapitel 3 og 4), beskrives i det følgende kort nogle særlige overvejelser i forhold til strategi og metoder ved kortlægning af kalkmagasiner.

Skalaproblematik

Ved kortlægning af kalkmagasiner er det vigtigt at være opmærksom på kortlægningsskala. Selv om man i grundvandskortlægningen arbejder ned til markskala, så er dette ofte ikke muligt ved kortlægning af kalkmagasiner. Det skyldes blandt andet at det er vanskeligt at kortlægge f.eks. saltvandets beliggenhed og forekomsten og orienteringen af sprækker i stor detaljeringsgrad. Skalaen ved kortlægning af saltvand/kalk kan ofte være meget detaljeret i undersøgelser i borer og blotninger eller på kildepladser, men samtidig kan det på grund af kalkens egenskaber være meget usikkert at ekstrapolere dette meget detaljerede lokalkendskab til kalken i større områder og modeller, hvor man derfor ofte må anlægge nogle mere generelle betragtninger.

På grund af behovet for at udrede sammenhængen mellem geologi og forekomsten af fersk og salt grundvand samt kortlægge sprækkeformationer og mergellag, kan der ved kortlægning af kalkmagasiner være behov for at sætte flere og/eller dybere borer og udføre flere logs end ved andre kortlægningsområder.

Saltvand

Det er helt centralt tidligt i kortlægningen at foretage en kvalificeret vurdering af saltvandets beliggenhed i kalken, idet denne er afgørende for den videre indsats. Hvis saltvandet f.eks. ligger meget højt, så der reelt ikke er et ferskvandsmagasin, eller ligger meget dybt i forhold til indvindingen, så behøver man måske ikke beskæftige sig med kortlægning af saltvandet.

I alle andre tilfælde vil det som regel være yderst vigtigt at få afdækket saltvandsproblemet i forhold til det ferske grundvandsmagasin.

Modellering af saltvand foretages normalt med vandtransportligninger og -modeller og ikke som stoftransport da klorid opfører sig som konservativt stof. Desuden skal der være ekstra opmærksomhed på at få fastlagt evt. foretrukne strømningsretninger.

Geofysiske metoder

Hvor der kan være forekomst af saltvand, skal opmærksomheden henledes på at elektriske og elektromagnetiske metoder påvirkes af saltvandet i formationen. Det kan gøre det vanskeligt at skelne lavpermeable lerlag (for eksempel fed prækvartær ler) fra saltholdige permeable formationer på grund af sammenlignelige elektriske ledningsevner i lagene. Herved stilles større udfordringer til afgrænsning af grundvandsmagasinet, fastlæggelse af saltvands beliggenhed og strømningen i kalken.

Ved anvendelse af geofysiske metoder til kortlægning af kalkmagasiner, skal man i øvrigt generelt være opmærksom på at der både kan være andre anvendelsesmuligheder end for kortlægning af sandmagasiner (meget detaljeret information fra borehulslogging og mulighed for logstratigrafi), men også en række specielle forhold at tage hensyn til for nogle metoder. Det kan f.eks. være manglende modstandskontraster mellem kalk med ferskvand og sand, og som beskrevet ovenfor mellem fed ler og kalk med saltvand, eller forhold omkring anvendelsen af forskellige seismiske metoder. Disse forhold vil blive nærmere beskrevet i Kapitel 3 og 4 samt Appendix C.

Problemstoffer

Ligger værdierne for naturligt forekommende stoffer over grænseværdien for drikkevand, kan det betyde at der reelt ikke er et ferskvandsmagasin i området, og analyser heraf er således også vigtige at foretage tidligt i kortlægningsforløbet.

Størrelsesordenen på stofparametre, vandtype og ionbytning og deres indbyrdes beliggenhed i magasinet siger indirekte noget om grundvandets alder og strømningsforhold, og giver – sammen med potentialet – et værdifuldt bidrag til kortlægningen af grundvandets strømning og til opstillingen af den geologiske og hydrokemiske forståelsesmodel.

3. Grundlæggende hydrogeologiske forhold

Dette kapitel beskriver grundlæggende hydrogeologiske forhold som er relevante i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner. Kapitlet er inddelt i følgende afsnit:

- Kalkbjergarterne i Danmark
- Strukturer og sprækkesystemer
- Kalkens hydrauliske egenskaber
- Grundvandsdannelse i kalken
- Det ferske og salte grundvand
- Grundvandskemiske forhold i kalkmagasiner

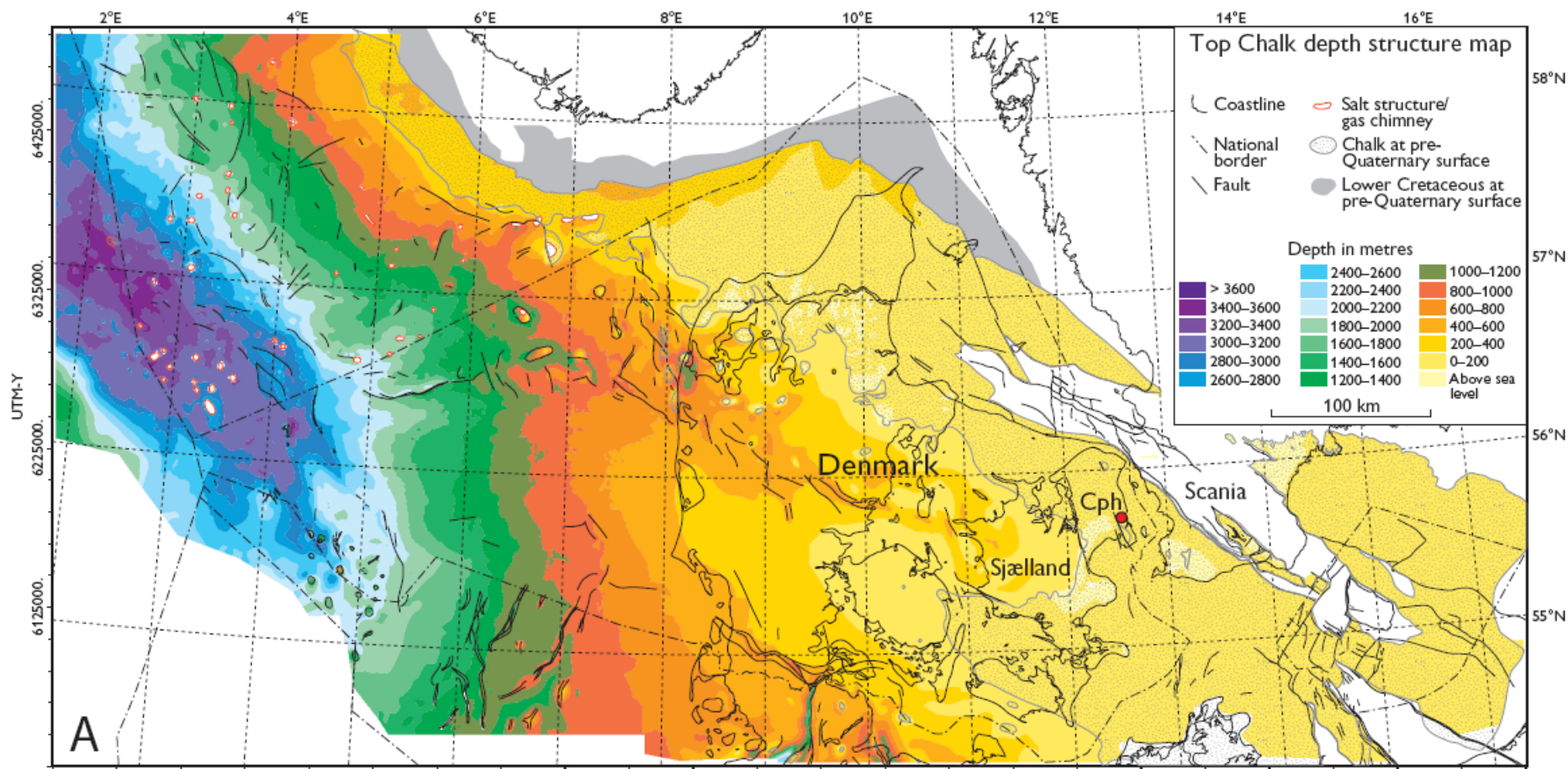
3.1 Kalkbjergarterne i Danmark

Overfladenære kalkbjergarter findes i store dele af det nordlige og østlige Danmark og udgør her en vigtig grundvandsressource (Figur 5). I størsteparten af området med overfladenære kalkbjergarter udgør de også prækvartæroverfladen. Undtaget herfra er den nordvestlige del af Sjælland og det meste af Fyn hvor kalken overlejres af merglede og lerede øvre paleocæne og eocæne aflejringer (Figur 6, se også geologisk tidsskala i Figur 7).

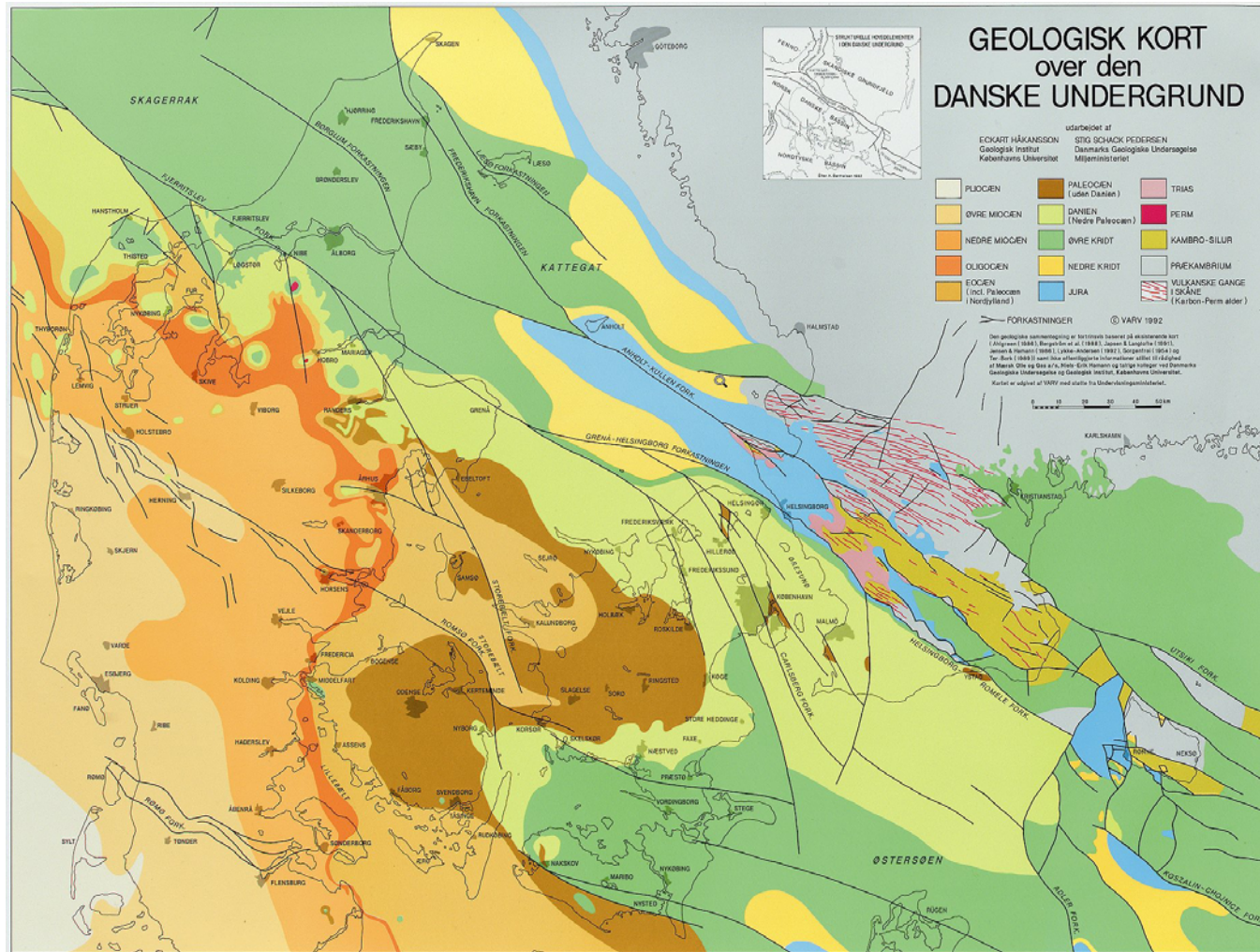
De overfladenære kalklag i Danmark består af aflejringer fra Øvre Kridt (skrivekridt), Danien (bryozokalk, koralkalk, slamkalk og kalksandskalk) og Selandien (Lellinge Grønsand Formationen). De optræder overvejende i et NV-SØ-gående strøg, fra Thy over Djursland til Nordsjælland og videre ned over Syd-sjælland samt i et NV-SØ-gående strøg fra Fyn over Lolland-Falster og Møn. Uden for disse strøg findes kalkbjergarterne også overfladenært i mindre omfang i forbindelse med saltstrukturer i det nordlige Jylland og på Lolland.

Kalkbjergarterne er aflejret i det Norsk-Danske Bassin der er afgrænset af Den Fennoskandiske Randzone mod nordøst, og Ringkøbing-Fyn højderyggen mod syd (Figur 8). Syd for Ringkøbing-Fyn højderyggen er der også aflejret kalkbjergarter i det Nordtyske Bassin.

Den Fennoskandiske Randzone er en markant tektonisk zone der udgør overgangen mellem det Fennoskandiske grundfjeldsskjold og det Norsk-Danske Bassin, hvor store sedimentære mægtigheder er aflejret. Den Fennoskandiske Randzone afgrænses af store forkastninger, og området har en lang og kompleks tektonisk historie (Liboriussen m.fl. 1987, Norling & Bergstrøm 1987, Vejbæk & Britze 1994, Erlström m.fl. 1997). Det overordnede tektoniske forkastningsmønster er allerede anlagt i Paleozoikum. Op gennem Paleozoikum og i Mesozoikum sker der en bassinudvikling i det danske bassin og adskillige tektoniske hændelser kan spores i Den Fennoskandiske Randzone. I løbet af Sen Kridt aflejres store mægtigheder af marint skrivekridt i det Norsk-Danske Bassin (Figur 8). I tidlig Sen Kridt er der kompression med en tilhørende sideværts forskydning mod højre i Den Fennoskandiske Randzone, og der finder en inversion sted i zonen. Denne tektoniske hændelse er en fase under den Alpine orogenese som er en følge af kollisionen mellem den Afrikanske og den



Figur 5. Kort over dybden til kalk fra Øvre Kridt og Danien (Vejbæk m.fl., 2007).



Figur 6. Geologisk kort over prækvartærøverfladen (Håkansson & Pedersen, 1992).

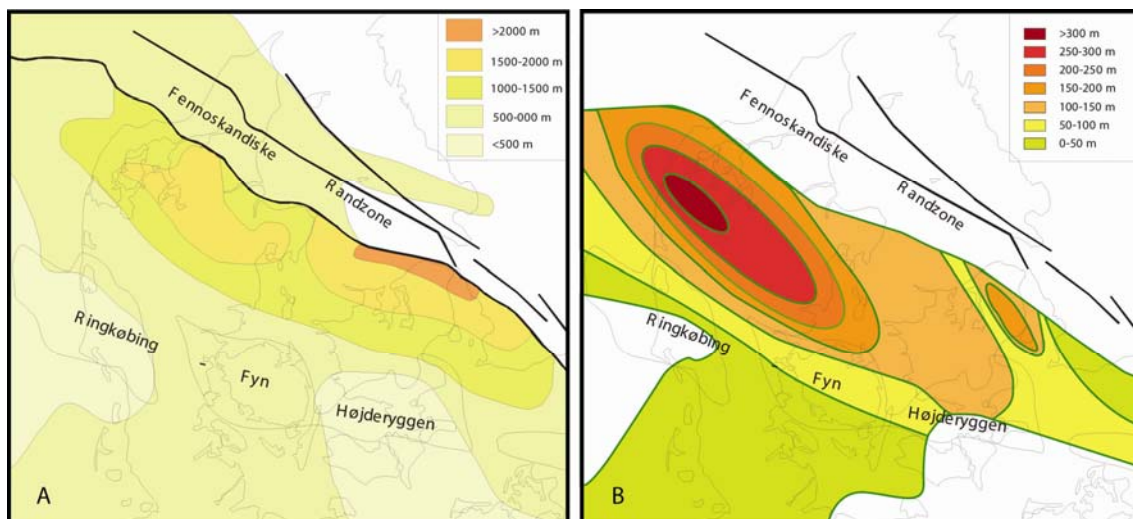
Epoch	System	Series	Stage	Age Ma	GSSP		
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary*	Holocene	0.0118			
			Pleistocene	Upper	0.126		
				Middle	0.781		
		Paleogene	Neogene	Pliocene	Lower	1.806	
					Gelasian	2.588	👉
					Zanclean	3.600	👉
	Miocene			Messinian	5.332	👉	
				Tortonian	7.246	👉	
				Serravallian	11.608	👉	
	Oligocene		Langhian	Burdigalian	13.82	👉	
				Aquitanian	15.97	👉	
					20.43	👉	
			Chattian		23.03	👉	
				Rupelian	28.4 ± 0.1	👉	
					33.9 ± 0.1	👉	
	Paleocene	Eocene	Priabonian	37.2 ± 0.1	👉		
			Bartonian	40.4 ± 0.2	👉		
			Lutetian	48.6 ± 0.2	👉		
Ypresian			55.8 ± 0.2	👉			
		Thanetian	58.7 ± 0.2	👉			
		Selandian	61.7 ± 0.2	👉			
Mesozoic	Cretaceous	Upper	Danian	65.5 ± 0.3	👉		
			Maastrichtian	70.6 ± 0.6	👉		
			Campanian	83.5 ± 0.7	👉		
			Santonian	85.8 ± 0.7	👉		
			Coniacian	89.3 ± 1.0	👉		
			Turonian	93.5 ± 0.8	👉		
		Lower	Cenomanian	99.6 ± 0.9	👉		
			Albian	112.0 ± 1.0	👉		
			Aptian	125.0 ± 1.0	👉		
			Barremian	130.0 ± 1.5	👉		
			Hauterivian	136.4 ± 2.0	👉		
			Valanginian	140.2 ± 3.0	👉		
Berriasian	145.5 ± 4.0	👉					

Figur 7. Geologisk tidsskala.

Europæiske kontinentplade. Herefter aflejres yderligere skrivekridt i Maastrichtien. De transpresionelle bevægelser fortsætter op i tidlig Palæogen.

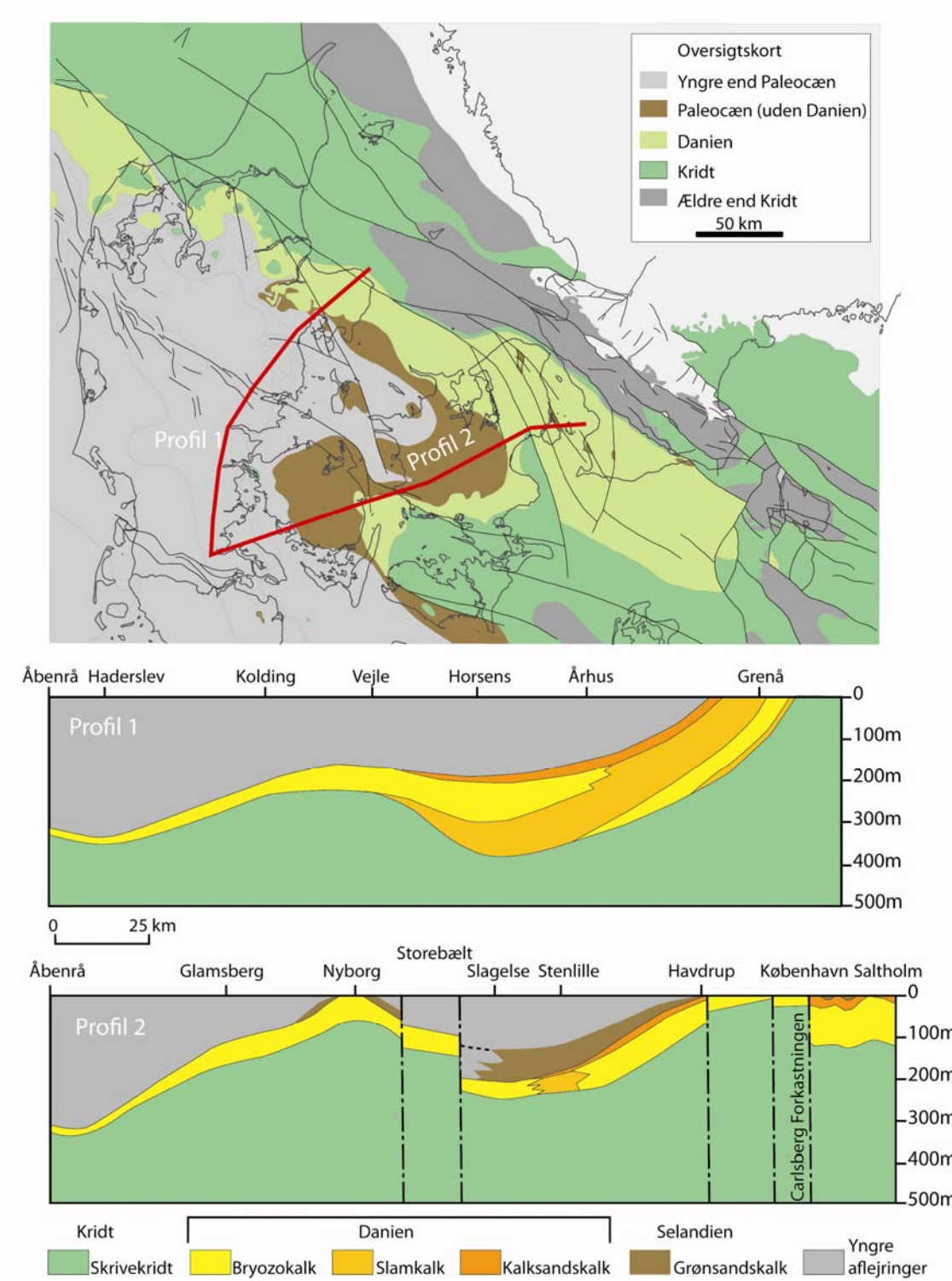
I Neogen foregår der en regional hævnning med en resulterende erosion hvor der eroderes ca. 500 til 750 m af paleocæne, eocæne og oligocæne aflejringer, der har ligget over kalken (Jensen & Michelsen 1992, Japsen 1992, 1993 og Japsen & Bidstrup, 1999). Kalken belastes og aflastes ligeledes adskillige gange af op til flere km tykke ismasser under nedisningerne i Kvartær.

Der er aflejret kalkbjergarter i det Norsk-Danske Bassin i løbet af Sen Kridt, Danien og Selandien. De største kalkmægtigheder i bassinet udgøres af skrivekridt fra Øvre Kridt, med depocenteret op mod Den Fennoskandiske Randzone, og de største mægtigheder i Nordøstsjælland (Figur 8 A). I Danien er de største mægtigheder aflejret i det centrale Jylland (Figur 8 B).



Figur 8. A Isopakkort over Øvre Kridt aflejringer. De største mægtigheder er aflejret i Nordøstsjælland, op mod den Fennoskandiske randzone. B Isopakkort over Danien aflejringer. De største mægtigheder er aflejret i det centrale Jylland (efter Thomsen, 1995).

De forskellige kalktyper (skrivekridt, bryozokalk, kalksandkalk, slamkalk og Lellinge Grøn-sand Formationen) optræder i forskellige områder i det Norsk-Danske Bassin afhængig af aflejringsforhold som vanddybde, terrestrisk influx m.m., og fordelingen har ændret sig i forskellige tidsafsnit i Danien. Ved hjælp af kokkolitstratigrafi kan man rekonstruere bassinets opbygning og udvikling gennem tid. Fordelingen af kalktyperne aflejret i Danien er vist i Figur 9 ved to profiler fra henholdsvis Djursland og Saltholm til Åbenrå.



Figur 9. To profiler der viser et snit gennem de danske kalkbjergarter (profil 1 efter Thomsen, 1995. Profil 2 efter Fallesen, 1995, Foged et al. 1995, Gravesen 1994, Kelstrup 1995, Klitten 2003, Mielby & Sandersen 2005, Nielsen & Japsen, 1991, Pedersen 2001, Stenestad 1976).

Herunder er forekomsten af kalktyper i forskellige dele af landet beskrevet meget generaliseret baseret på tværsnit i Thomsen (1995):

Nordjylland

I størsteparten af Nordjylland optræder skrivekridt umiddelbart under prækvartæroverfladen. I et område sydvest for Fjerritslev og Nibe optræder imidlertid først kalksandkalk og dernæst bryozokalk og slamkalk over skrivekridtet.

Djursland

På Djursland optræder generelt kalksandkalk efterfulgt af slamkalk og bryozokalk over skrivekridtet.

Østfyn

På det østlige Fyn udgøres en generaliseret lagfølge af bryozokalk over skrivekridt. Bryozokalken er igen overlejret af Kerteminde Mergel Formation som dog ikke henregnes som en kalktype.

Nordøstsjælland

I det Nordøstsjællandske område optræder generelt kalksandkalk over bryozokalk, efterfulgt af skrivekridt.

Vestsjælland

I Vestsjælland træffes generelt Kerteminde Mergel Formationen (henregnes ikke som en kalktype) over Lellinge Grønsand Formationen og herunder bryozokalk efterfulgt af skrivekridt.

Lolland-Falster-Møn

På Lolland-Falster-Møn optræder skrivekridt generelt umiddelbart under prækvartæroverfladen.

I de efterfølgende afsnit beskrives de enkelte kalkbjergarters udseende, sammensætning og hærtningsgrad/hårdhed. Hårdheden af kalken er beskrevet ved en 5-delt skala efter Larsen m.fl. (1988).

- H1: Uhærdnet. Materialet kan uden besvær bearbejdes med fingrene.
- H2: Svagt hærdnet. Materialet kan nemt bearbejdes med en kniv, og det kan ridses med en negl.
- H3: Hærdnet. Materialet kan bearbejdes med en kniv, men ikke ridses med en negl.
- H4: Stærkt hærdnet. Materialet kan ridses med en kniv, men de enkelte korn lader sig ikke løsne med en kniv.
- H5: Meget stærkt hærdnet. Materialet lader sig ikke ridse med en kniv.

3.1.1 Skrivekridt

Drikkevandsindvinding fra skrivekridt foregår i de områder hvor skrivekridtet udgør prækvartæroverfladen eller i øvrigt ligger højt. (Figur 6). Undtaget herfra er det nordlige Vendsyssel hvor skrivekridt udgør prækvartæroverfladen, men ligger så dybt at der ikke indvindes fra kalken. Skrivekridtet optræder i prækvartæroverfladen i større sammenhængende områder i Thy, Vendsyssel, Himmerland, langs Køge Bugt, Sydsjælland, Møn, Falster og det nordlige Lolland. Desuden er der mindre forekomster i prækvartæroverfladen i det nordlige Jylland og på Lolland hvor salthorste har presset skrivekridtet op.

Udseende og opbygning

Skrivekridtet fremstår som en meget homogen bjergart (Figur 10). Det er en finkornet bjergart (slamkalk) der hovedsageligt består af kokkolitter. Kokkolitter er skaldele fra planktoniske alger der består af calciumkarbonat. Kokkolitterne er ca. 10 µm, og de udgør ca. 90 % af calciumkarbonaten i skrivekridt. Herudover indeholder skrivekridt ca. 50 til 200 µm store foraminiferer samt skalrester af bryozøer, søpindsvin, brachiopoder, muslinger, ammonitter m.m. Den øvre del af skrivekridtet på Sjælland er rig på bryozøer som danner banker ved f.eks. Stevns Klint.



Figur 10. Skrivekridt i Rørdal kalkbrud ved Aalborg. De grå lag i kalken er mergellag (foto: Erik Thomsen).

Hærdning

Det overfladenære skrivekridt er kun svagt hærdnet (H2). Hærdningen skyldes komprimering på grund af vægten af de sedimenter der tidligere lå ovenpå. Skrivekridtet bliver hårdere med dybden, og på Stevns har det hårdhed H3 i ca. 300 m's dybde.

Flint

Flint udgør ca. 5 til 10 % af skrivekridtet. Flinten findes dels som lagparallelle diskontinuerte lag af flintnoder, og dels som udfældninger i fossiler og gravegange. Flintlagene markerer ofte lave banker i skrivekridtet.

Mergel

I skrivekridtet findes grå mergellag i dele af kridtlagsøjlen. Mergellagene varierer fra 1 mm til ca. 60 cm i tykkelse, og de virker ofte som hydrauliske barrierer hvor der kan være forskel i grundvandspotentialer henover laget (Nielsen og Jørgensen, 2008; Andersen m.fl., 2005).

3.1.2 Bryozokalk

I Syd- og Sydøstsjælland udgør bryozokalk fra Danien prækvartæroverfladen. I Nordsjælland og i Jylland overlejres bryozokalken af Danien kalksandskalk og/eller Danien slamkalk.

Udseende og opbygning

Bryozokalken er karakteriseret ved at indeholde skeletfragmenter af bryozoaer der ligger i en finkornet slam (Figur 11). Bryozofragmenterne udgør typisk 20 til 45 % af kalken, men der er en glidende overgang til slamkalk og kalksandskalk. I bryozokalken findes der både bænke hvor bryozogrene flyder i en matrix af kalkslam, og bænke hvor grenene danner et selv bærende skelet. I sidste tilfælde kan slammet i porerummet i større eller mindre grad være udvasket (Thomsen, 1976). Bryozokalken danner oftest bankestrukturer (Figur 12). På Stevns er bankerne 50-100 m lange og typisk 5-8 m høje (Surlyk m.fl., 2006). Bankerne er som regel asymmetriske hvor de stejle flanker er lidt tykkere, og de har antagelig vendt mod de gængse havstrømme. Her er kornstørrelsen af bryozoaerne også større end på læsiden.



Figur 11. Nærbillede af bryozokalk. Bryozoaerne ligger i en sandet matrix. (foto: Peter Roll Jakobsen).



Figur 12. Bryozobanker ved Stevns klint (foto: Morten Bjerager).

Hærdning

Bryozokalken er generelt mere hærdnet end skrivekridtet som følge af diagenese og hærdningsgraden varierer fra uhærdnet (H1) til stærkt hærdnet (H4). Hærdningsgraden følger lagdelingen i bankerne.

Flint

Flint udgør generelt 20 til 30 % af bryozokalken. Flinten optræder oftest som lag af flint noduler eller flintbænke der er parallelle med lagdelingen i kalken, og ofte forekommer subhorizontale sprækker i kontakten mellem kalk og flint.

3.1.3 Koralkalk

Udbredelsen af koralkalk i Danmark er begrænset og bjergarten kendes kun fra kalkbrud ved Aggersborg i Nordjylland og Fakse samt boringer ved Næstved og udgravninger i Øresund (Jakobsen, 1997).

Udseende og opbygning

Koralkalk er dannet af grene fra koralkolonier som er afbrækkede fragmenter aflejret på havbunden med en mellemliggende finkornet masse af kalkslam. Bjergarten forekommer ofte som "pibet" kalk hvor de oprindelige koraller er opløst og nu ses som hule rør i kalken. Koralkalken forekommer som banker eller linser i bryozokalken som i Fakse er op til 200 m lange og 30 m høje.

Hærdning

Koralkalken er ofte stærkt hærdnet.

Flint

Koralkalk er en meget ren kalk der er næsten fri for flint.

3.1.4 Slamkalk

Slamkalk er især udbredt i Midtjylland i det mellemste Danien (Figur 13). Det findes ikke udbredt i prækvartæroverfladen, men påtræffes i borerer.



Figur 13. Danien slamkalk i kalkbrud ved Dalbyover (foto: Peter Roll Jakobsen).

Udseende og opbygning

Slamkalk er en hvid eller lys grå finkornet kalkbjergart. Ca. 50 % af slamkalken er mindre end 5 μm og består af kokkolitter og andre nannofossiler. Resten af slamkalken ligger hovedsagelig i silt og finsandsfraktionerne. Slamkalken kan minde meget om skrivekridt, men har en større andel af korn i siltfraktionen.

Hærdning

Slamkalk er som regel uhærdnet, og ikke påvirket af diagenetiske processer.

Flint

Slamkalken indeholder som de fleste Danien kalkbjergarter en del flint, og flintindholdet kan overstige 30 %.

3.1.5 Kalksandskalk

Kalksandskalk aflejres især i Sen Danien, og påtræffes i prækvartæroverfladen i Øresundsområdet, Nordsjælland, Djursland og det nordlige Jylland (Figur 6). I Øresundsområdet udgør kalksandskalken København Kalk Formationen (Stenestad, 1976), der pålejrer bryozokalk, og overlejres af Lellinge Grønsand Formationen (se Figur 14). I København-

Amager-Saltholm området er der opstillet en detaljeret logstratigrafi for København Kalken (Klitten m.fl., 1994; Olsen og Nielsen, 2002), med inddeling af denne i tre lithologiske subsekvenser: Nedre, Mellem og Øvre København Kalk. I resten af Nordøstsjælland har det kun været muligt at opstille en lokal logstratigrafi for kalksandskalken (Klitten og Wittrup, 2006), se også Appendix C.

Udseende og opbygning

Kalksandskalken er en lys grå til gullig kalksten hvor størstedelen af kornene falder i finsandsfraktionen (Larsen, 1961), og dermed er synlige med det blotte øje. Der findes dog mere finkornede overgangstyper til slamkalk. Hovedbestanddelene er kokkolitter, foraminiferer og skeletfragmenter.

Hærdning

Kalksandskalken er i varierende grad hærdnet ved udfældning af kalk eller flint og hårdheden varierer mellem H2, H3 og H4 i kalken. Flinten har hårdhed H5. Kalkudfældningen, eller cementeringen, er sket i en bestemt dybde under havbunden. I perioder med ringe sedimentation er der således dannet hårde bænke og linser i kalken. Denne subhorizontale bænking kan følges over relativt store afstande.

Flint

Flintindholdet er typisk mellem 10 og 30 % af bjergarten. Flinten findes dissemineret i kalken, som udfældninger i gravegange, som knolde i lagparallelle bånd og som massive flintlag der typisk er 5 til 20 cm, men som kan være op til 1 m tykke.



Figur 14. Grænse mellem København Kalk Formationen og Lellinge Grønsand Formationen (grønsandskalk) i udgravning ved Amagers østkyst (foto: Peter Roll Jakobsen).

3.1.6 Lellinge Grønsand Formationen

Lellinge Grønsand Formationen er aflejret i Sen Selandien i et kystnært miljø op mod Den Fennoskandiske Randzone i Midt og Østsjælland. Samtidig er de ældste dele af Kertemin-

de Merglen aflejret på Fyn og i Jylland, antagelig på lidt dybere vand. På Sjælland overlejrer Kerteminde Merglen Lellinge Grønsand Formationen som er mægtigst i Midt- og Østsjælland (Figur 9). Ved Køge er Lellinge Grønsand Formationen ca. 10 m tyk og på Holbæk-egnen ca. 30 m tyk. I Figur 15 ses den nederste del af Lellinge Grønsand Formationen på Amager.

Udseende og opbygning

Lellinge Grønsand Formationen er vekslende sandet og merglet, meget glaukonitrig og dermed grønlig. Sandfraktionen består, ud over glaukonit, af omløjrede kalkkorn og bryozofragmenter fra Danienafløjringerne. De sandede lag er delvis hærdnede idet de er kalkcementerede, og det er disse lag der udgør grønsandskalken. Grønsandskalken er ofte stærkt vandførende på grund af opsprækning i modsætning til de merglede dele af formationen der ofte kan virke som hydrauliske barrierer (Jensen, 2003). I mange boringsbeskrivelser af Selandien afløjninger er lithologien angivet uden, eller med forkert tolkning af, om der er tale om Kerteminde Mergel eller Lellinge Grønsand Formation.



Figur 15. Lellinge Grønsand Formation overlejrer København Kalk Formation, ved Gemmas Alle, Amager (foto: Peter Roll Jakobsen).

3.1.7 Porøsitet og permeabilitet i kalkbjergarterne

De forskellige kornstørrelser og sammensætningen af kalkbjergarterne i Danmark, og ikke mindst deres forskellige hærdningsgrader, gør at porøsitet og permeabilitet varierer meget kalkbjergarterne imellem. I det følgende behandles udelukkende matrix porøsitet og matrix permeabilitet uden hensyntagen til sekundær porøsitet og permeabilitet i forbindelse med sprækker.

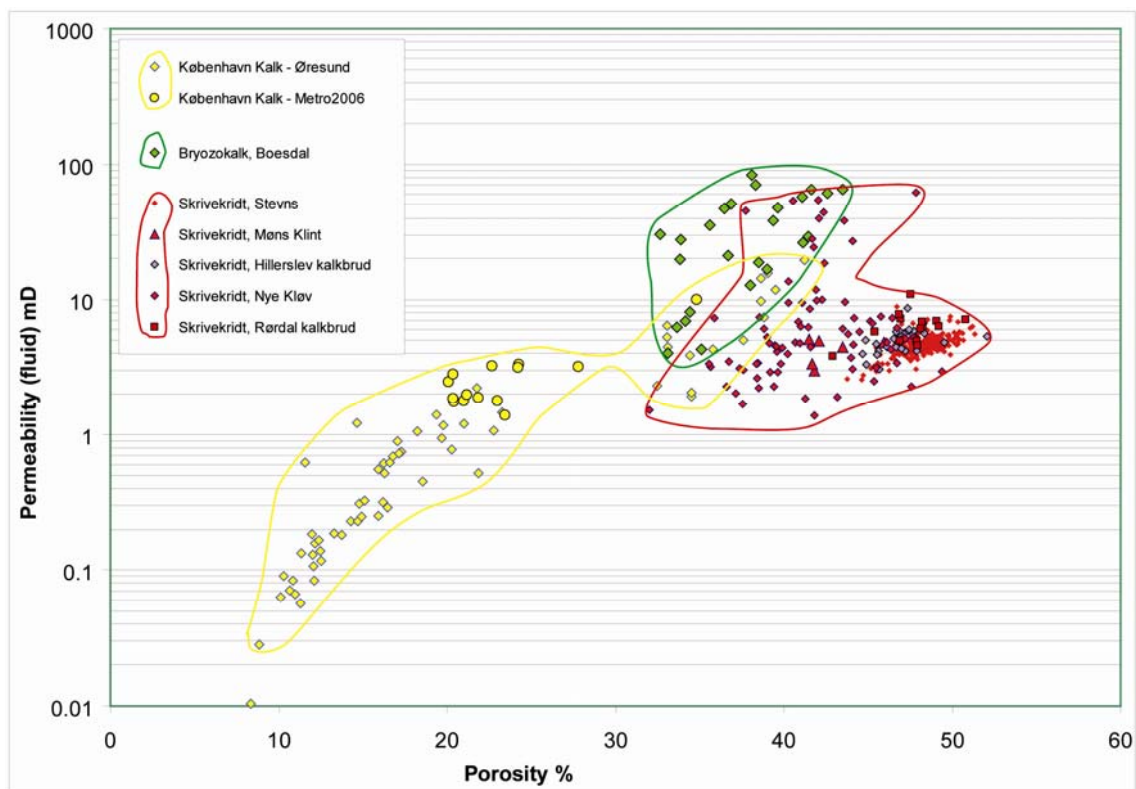
Permeabiliteten er et udtryk for et porøst mediums evne til at transportere et fluid og angives normalt i mD (millidarcy, $1 \text{ darcy} \approx 10^{-12} \text{ m}^2$). Der er en tæt sammenhæng mellem permeabilitet og hydraulisk ledningsevne som udtrykker en væskes strømningsevne i et porøst medium og angives i m/s (se også afsnit 3.3.2). Hvor permeabiliteten udelukkende afhænger af bjergartens egenskaber, afhænger den hydrauliske ledningsevne både af bjergartens og væskens egenskaber.

I Figur 16 er porøsiteten plottet mod permeabiliteten for skrivekridt, bryozokalk og København Kalk Formationen. Skrivekridt har generelt en høj porøsitet på ca. 40 til 50 %, men en lav permeabilitet på ca. 2 til 14 mD, med enkelte højere værdier.

Bryozokalken har en lidt lavere porøsitet end skrivekridt, ca. 30 til 45 %, men den har generelt en lidt højere permeabilitet op til 100 mD.

Porøsiteten varierer meget afhængig af hærdningsgraden i kalksandskalken fra 9 til 43 %, hvor de hårde bænke har den laveste porøsitet. Permeabiliteten varierer voldsomt fra 0,009 mD til 20 mD og igen finder man de laveste værdier i de hårde bænke.

I danske kalkaflejringer observeres generelt en god overensstemmelse mellem porøsitet og permeabilitet, hvilket indikerer at det er hærdningsgraden der primært forårsager variationerne.



Figur 16. Porøsitets-permeabilitetsplot af forskellige danske kalkbjergarter (fra Frykman, 2001; Frykman, 2006; Knudsen et al., 1993).

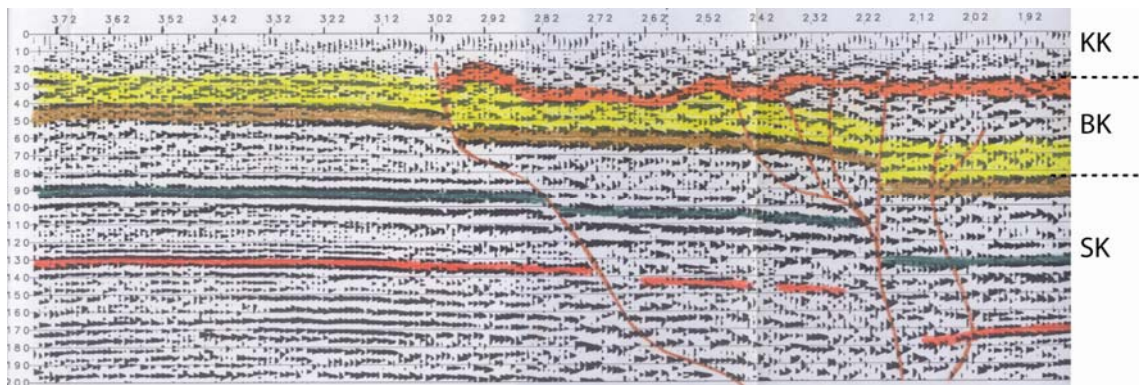
3.2 Strukturer og sprækkesystemer

I forbindelse med de tektoniske hændelser, indsynkninger i bassinet, erosion af sedimenter og gentagne nedisninger er kalken blevet deformeret, og der er dannet deformationsstrukturer af forskellig slags og i forskellige størrelsesordener.

3.2.1 Forkastninger

Der er specielt i forbindelse med den Fennoskandiske Randzone dannet en del større forcastninger der har medført forsætninger i kalkbjergarterne (Figur 6). Fra den Fennoskandiske Randzone udgår ligeledes en række forcastninger ind i det Norsk-Danske bassin. Forsætningen på tværs af forcastningerne kan være med til at afgrænse og styre udbredelsen af kalkenheder. Et eksempel herpå er Carlsbergforcastningen (Figur 17) der i københavnsområdet afgrænser København Kalk Formationen og bryozokalk. Carlsbergforcastningen består ikke blot af ét forcastningsplan, men af en zone med en serie indbyrdes relaterede forcastninger. I selve forcastningszonen sker der en stærk opsprækning af kalken (Figur 18), og Carlsbergforcastningen har stor lokal betydning i form af øget hydraulisk ledningsevne i kalken (Blem, 2002; Markussen, 2002).

I et område syd for Aalborg er det beskrevet hvorledes adskilte forcastningsblokke med forskellige hældninger har betydning for dybden til markante mergellag, der kan optræde som hydrauliske barrierer (Nielsen & Jørgensen, 2008). I samme område er det endvidere beskrevet hvordan den terrænnære geologi er stærkt påvirket af forcastninger i kalken, og hvordan der formentlig er en sammenhæng mellem f.eks. beliggenheden af vandløb og søer og underliggende forcastningssystemer (Andersen m.fl., 2005).



Figur 17. Seismisk profil på tværs af Carlsbergforcastningen på Amager (frakørsel 19 på E20). Skalaen i venstre side er to-vejs-løbetid i millisekunder (ms) som i de øvre dele af kalken svarer omtrentligt til dybde i meter (fra Fallesen, 1995).



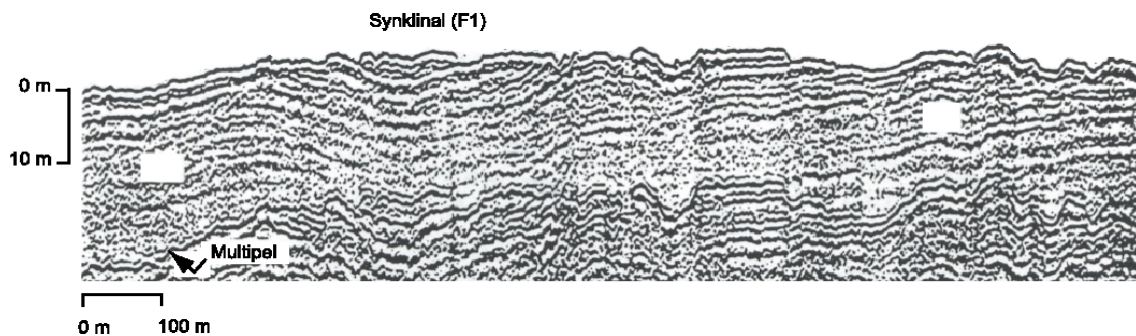
Figur 18. Tætsiddende vertikale sprækker i bryozokalk i udgravning i Sydhavnsgade, København, tæt på Carlsbergforkastningen (foto: Peter Roll Jakobsen).

Ofte kan dybere forkastninger på gamle konventionelle olieseismiklinjer, primært udført fra starten af 60'erne til midten af 80'erne, ikke følges højere op i lagserien end til basis Øvre Kridt, og det kan sjældent afgøres om, eller hvor meget af kalkserien som eventuelt er forsat/påvirket af forkastningsaktiviteten. På nyere konventionelle seismiske linjer, udført f.eks. i forbindelse med undersøgelser for geotermi, er der eksempler på at forkastninger kan følges op til top Skrivekridt (Bidstrup og Klitten, 2006), mens det på ny højopløselig seismik, udført i forbindelse med grundvandskortlægningen fra ca. 2000 og frem, som regel er muligt at erkende eventuelle forkastninger i kalken og følge dem til toppen eller nær toppen af denne.

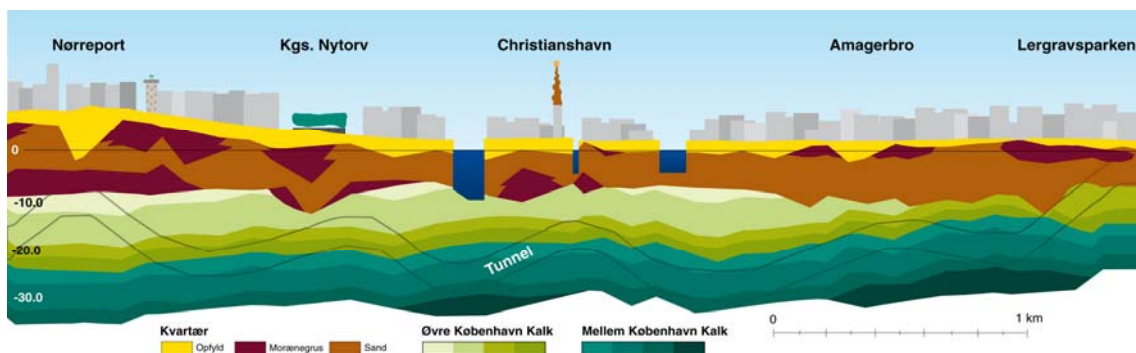
I Bidstrup og Klitten (2006) er det beskrevet hvordan en tolkning af alle eksisterende seismiske data i den nordøstlige del af Sjælland har vist, at enkelte dybere forkastninger har kunnet følges til top Skrivekridt. Der er i samme undersøgelse også kortlagt mindre forsætninger i de øverste 2-300 m af kalken som ikke kan kædes sammen med dybere forkastningssystemer, og som tolkes at være dannet af istryk og isbevægelser.

3.2.2 Folder

Kalkbjergarterne er også blevet foldet under de tektoniske hændelser. Foldningen kan være relativ svag, men alligevel have stor betydning for kortlægningen af en kalkenhed. København Kalk Formationen er i flere omgange blevet detaljeret kortlagt med tætliggende boringsoplysninger, borehulslogging og seismik, og man har således kunnet kortlægge foldestrukturene i København – Øresunds området (Figur 19 og Figur 20).



Figur 19. Boomer profil fra Øresund som viser folder i København Kalk Formationen. Profilet er orienteret vinkelret på foldeakserne (Rasmussen & Andersen, 1994).



Figur 20. Længdeprofil som viser folder i København Kalk Formationen i København optegnet ud fra boringsoplysninger og logstratigrafi. Profilet er orienteret mere eller mindre langs med foldeakserne (Knudsen & Klitten, 1995).

3.2.3 Sprækker

Kalk er i varierende grad gennemsat af sprækker. Generelt kan sprækkerne opdeles i 3 forskellige typer:

- Vertikale sprækker, typisk tektonisk betingede
- Horisontale sprækker, typisk dannet ved aflastning (isafsmeltning, neogen erosion)
- Knust kalk, typisk forårsaget af gletcherpåvirkning

Vertikale sprækker

De vertikale og sub-vertikale sprækker kan opdeles i sprækkesæt efter deres orientering. Et sprækkesæt udgøres af en række nogenlunde parallelle sprækker (Figur 21).

Længden af sprækker er også en vigtig parameter. Jo længere en sprække er, både vertikalt og lateralt, desto større mulighed er der for at den skærer en anden sprække. Derved får et sprækkesæt en højere konnektivitet (kontakt med andre sprækker) og kan være med til at opbygge et sammenhængende sprækkemagasin.

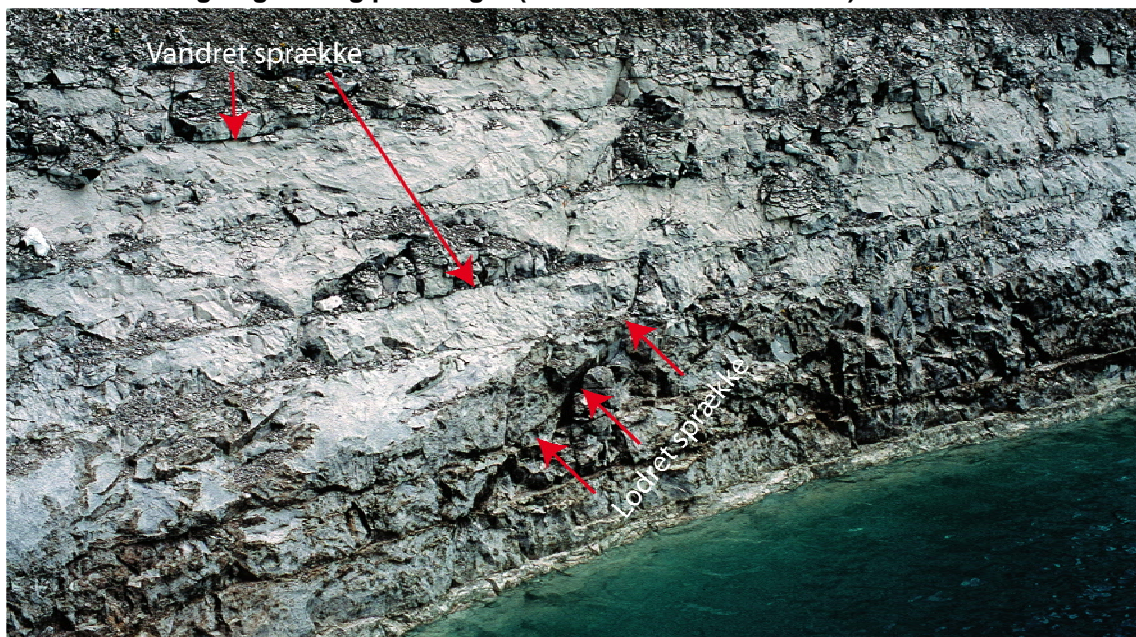
Horisontale sprækker

I de fleste kalkbjergarter optræder horisontale og sub-horisontale sprækker (Figur 22). I skrivekridt kan man se at de horisontale sprækker skærer flade bankestrukturer der marke-

res ved flintlag, hvilket viser at de ikke følger nogen lagdeling i kridtet. I København Kalk Formationen er lagdelingen og bænkningsen næsten horisontal, og her følger de store horisontale sprækker bænkningsen, og optræder mellem bænke med forskellig hårdhed eller mellem kalk og flint (Figur 23). I bryozokalk derimod er bænkningsen med skiftende hårde og mindre hårde lag styret af bankestrukturer og sprækker der er dannet mellem bænke med forskellig hårdhed følger bankernes form (Figur 23). Det har vist sig at bankernes struktur har stor indflydelse på vandbevægelsen i bryozokalk (Jakobsen, 1991).



Figur 21. System af parallelt orienterede vertikale sprækker i København Kalk Formationen i midlertidig udgravning på Amager (foto: Peter Roll Jakobsen).



Figur 22. Sub-horisontale og sub-vertikale sprækker i skrivekridt (foto: Peter Roll Jakobsen).

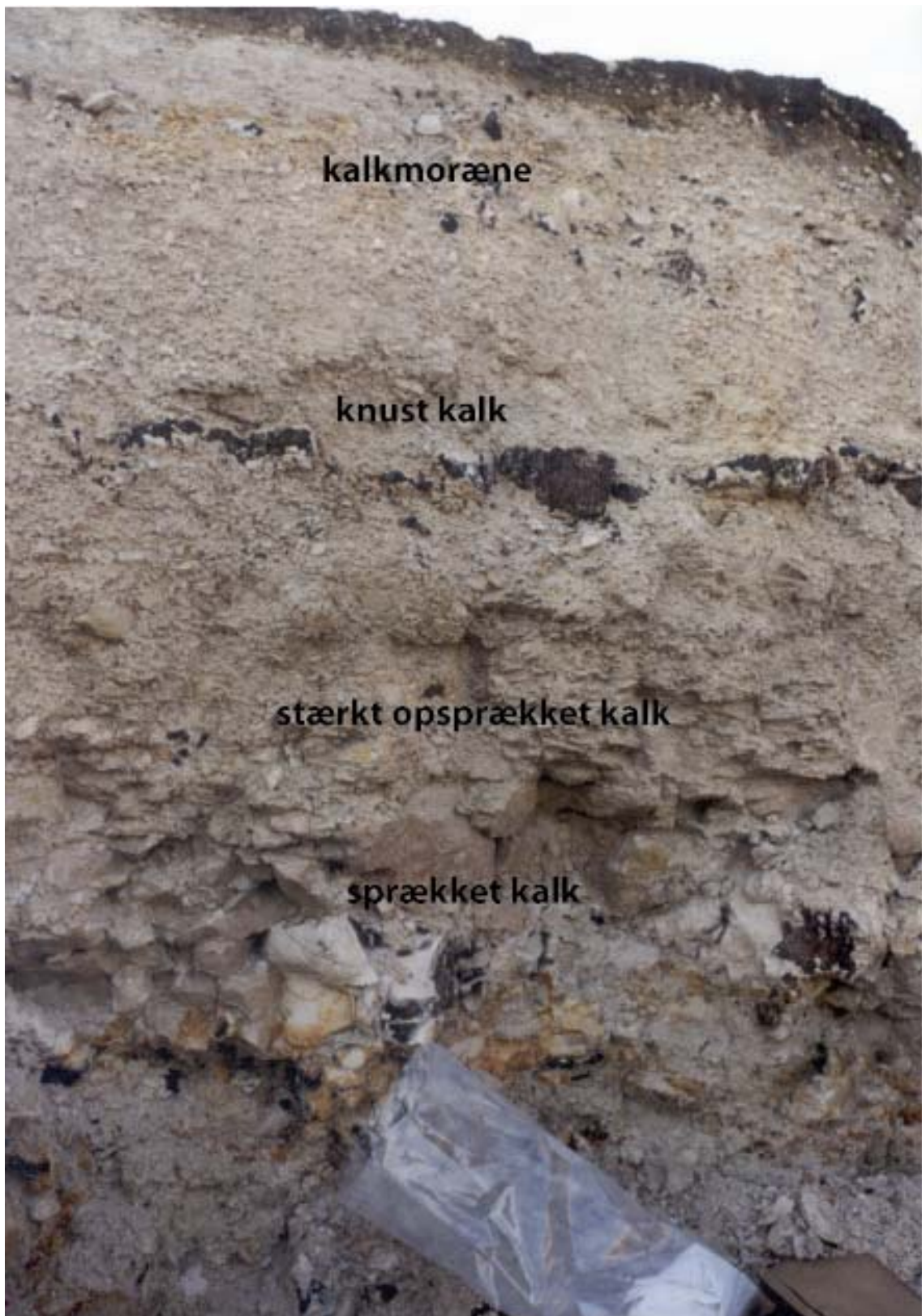


Figur 23. Nederst ses bryozobanker i Limhamn kalkbrud. Grundvandet der siver ud, er frosset på overfladen. Bemærk i hvor høj grad bankestrukturerne styrer grundvandsstrømningen. Øverst til højre ses den horisontale lagdeling i København Kalk Formationen. Her er udstrømningsbilledet mere jævnt, og det sker fra horisontale sprækker, der ligger mellem bænke med forskellig hårdhed (foto: Peter Roll Jakobsen).

I borerer ses oftest at indstrømning til boringen sker fra en horisontal sprække. Det betyder ikke at de vertikale sprækker ikke er vandførende eller måske endda mere vandførende, men at man hyppigst gennemborerer de horisontale sprækker når boringen er vertikal. I profiler ser man også oftest at vandet løber ud fra horisontale sprækker. Det skyldes at profilvæggen er en umættet zone, og det er derfor tyngdekraften, der får vandet til at strømme ud langs en horisontal sprække. Udsivningen sker ofte i punkter hvor vertikale sprækker skærer horisontale.

Glaciale tektoniske sprækker og knust kalk

De gentagne nedslagninger i Danmark i Kvartærtiden har eroderet kalkbjergarterne og knust og opsprækket de øvre dele af kalken. I såvel skrivekridt på Stevns som Danienkalk i Limhamn ved Malmø er der en stigende intensitet af sprækker i de øverste 10 m. De øverste ca. 3 m af kalken kan være knust (Figur 24), hvor de enkelte kalk-klaster kan være ned til ca. 1 cm i diameter. Sprækkerne i den knuste kalk kan være fyldt med siltet materiale. Hvor det øverste lag i kalken er et meget hårdt lag, er kalken normalt ikke knust, men blot stærkt opsprækket.



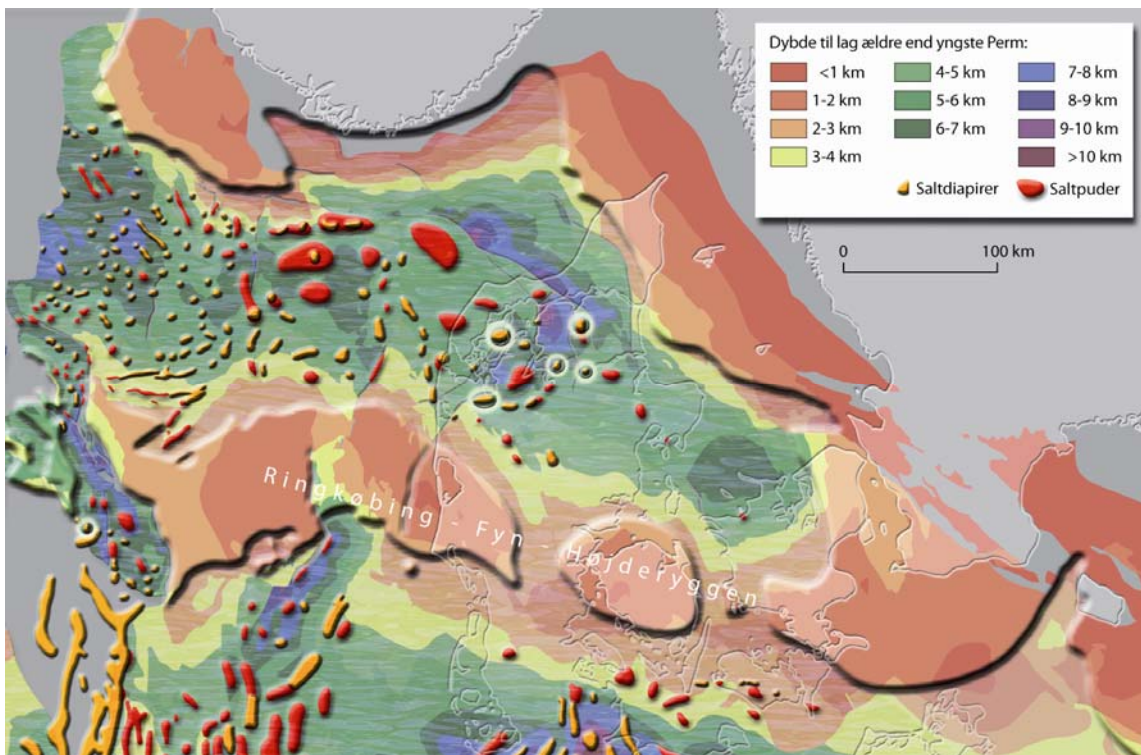
Figur 24. Glacialt knust kalk ved Lernacken, syd for Malmø. Øverst ses en stenet moræne, der gradvist går over i en kalkmoræne, der igen gradvist går over i knust kalk. Det øverste sammenhængende flintlag viser at i denne dybde er kalken in situ, men stærkt opsprækket. Nedefter går den knuste kalk over i stærkt opsprækket kalk.

3.2.4 Karst

Karstdannelse er et opløsningsfænomen i kalkbjergarter hvor surt overfladevand eller nedbør siver ned i kalken og opløser den. Opløsningen starter langs sprækker i kalken som gennemstrømmes af surt vand hvorved de eksisterende sprækker udvides. Hvis processen fortsætter, kan opløsningen resultere i underminering og opløsning af kalk i en sådan grad, at der dannes jordfaldshuller, såkaldte "skorstene", og begravede dale (Jessen, 1905; Berthelsen, 1987; Stenestad, 1982, 2006). Karst fænomenet er kendt og velbeskrevet i Aalborg-området hvor kalken er gennemsat af mange forkastninger og sprækker. Her er der beskrevet forekomster af jordfaldshuller, skorstene og hele systemer af begravede dale der er skabt ved en kombination af opløsning af kalk og vanderosion.

3.2.5 Saltstrukturer

I det Norsk-Danske og det Nordtyske Bassin forekommer der en række saltstrukturer. Beliggenheden af saltstrukturerne er vist på Figur 25, hvor der skelnes mellem saltpuder og saltdiapirer. En saltpude er en "bule" af salt som ikke er brudt igennem de overliggende lag, mens en saltdiapir opstår hvis puden fortsætter med at vokse og bryder igennem de overliggende lag. Saltstrukturerne har mange steder skubbet kalklagene op i domestrukturer. På kortet over bjergarter i prækvartæroverfladen (Figur 6) fremstår disse domer som isolerede forekomster af kalk hvor der i prækvartæroverfladen ellers ikke forekommer kalk, som f.eks. ved Mønsted og Rødby.

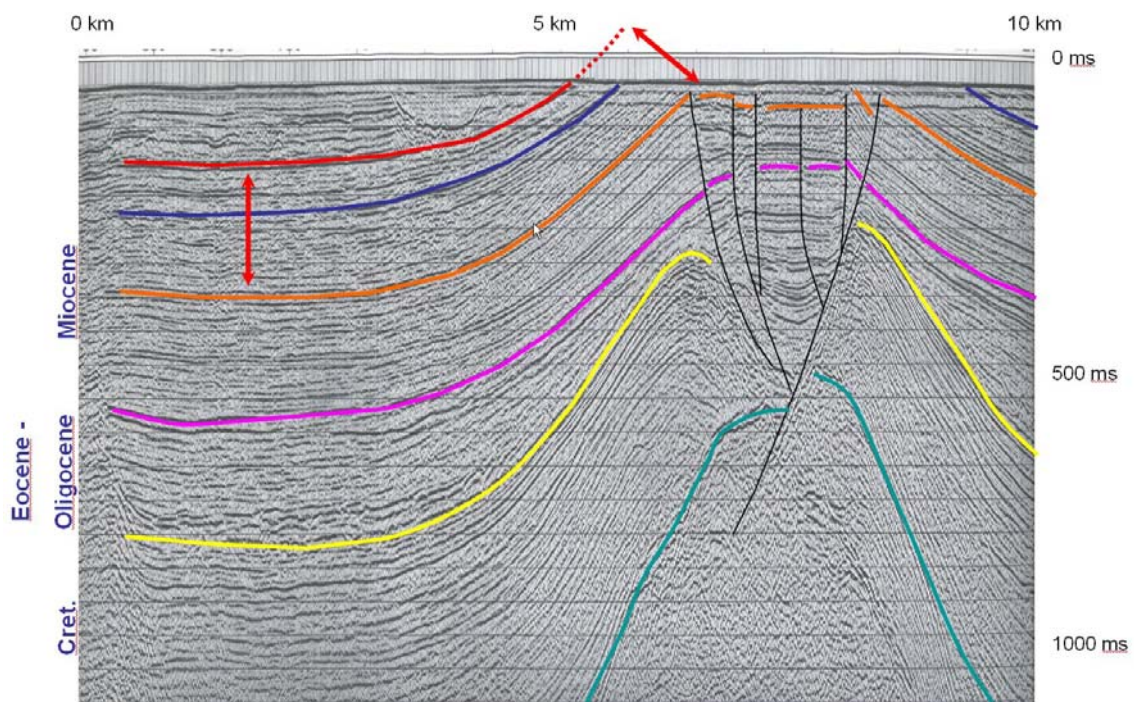


Figur 25. Kort over dybden til lag ældre end yngste Perm som illustrerer beliggenheden af saltdiapirer og saltpuder i det Norsk-Danske og det Nordtyske Bassin (Nielsen, 2010)

Som følge af at kalken er skubbet op af saltstrukturer, forekommer der forkastninger i kalken, som det er tilfældet i eksemplet i Figur 26. De har et mere eller mindre radierende mønster, relateret til det stræk der opstår i kalken, når den skubbes op i en dome. Strækket i kalken gør at den er mere opsprækket end ellers, og sprækkerne er typisk orienterede i et radiært mønster ud fra centrum af strukturen, og sprækkeintensiteten aftager ofte væk fra centrum af strukturen (Parker and McDowell, 1951).

Lagfølgen umiddelbart over strukturerne er præget af erosion i større eller mindre grad, og ofte er både dele af kalken og palæogene, neogene og kvartære aflejringer over kalken helt eller delvist borteroderede. De kvartære aflejringer over kalken kan således ofte være af ringe mægtighed på og omkring saltstrukturen, og der er eksempler på at der kun er få meter fra kalkoverfladen til terræn. Over nogle strukturer forekommer skrivekridt omkranset af Danienkalk som følge af at Danienkalken er borteroderet umiddelbart over den centrale del af strukturen. Det er f.eks. tilfældet med Gassumsaltpuden nord for Randers.

På flere af saltdiapirerne ses endvidere lokal indsykning over den centrale del af strukturen (caldera-dannelse) som følge af opløsning af de øverste dele af salten eller ekstension/udvidelse af lagene hen over saltstrukturen. Både i nedsynkningsområder og på flankerne af saltstrukturene kan der således forekomme rester af palæogen ler eller kvartære aflejringer som ikke er borteroderet over kalken.



Figur 26. Seismisk profil fra Nordsøen der viser et snit gennem en saltstruktur. Kalken er her sammen med andre lag skubbet op i en dome hvor der er forkastninger på toppen af strukturen som følge af det stræk, lagene bliver udsat for (fra Andersen, 1998).

3.3 Kalkens hydrauliske egenskaber

Ved karakterisering af grundvandsmagasiners hydrauliske egenskaber benyttes blandt andet følgende parametre som kort skal forklares nærmere:

- Hydraulisk ledningsevne (K)
- Transmissivitet (T)
- Specifik ydelse (Sy)
- Magasinkoefficient (S)
- Specifik kapacitet (c)

Ved den hydrauliske ledningsevne (K) forstås som tidligere beskrevet en væskes strømningsevne i et porøst medium, og den afhænger både af magasinets og af væskens egenskaber. Den hydrauliske ledningsevne er således defineret som den vandmængde der i en given tid kan transporteres gennem et givet tværsnitsareal med en hydraulisk gradient på én. Hydraulisk ledningsevne angives med enheden m/s.

Ved transmissivitet (T) forstås evnen til at transportere vand pr. tidsenhed gennem hele magasinets tykkelse (vandføringsevne), og er kun relevant ved betragtning af horisontal strømning. Transmissiviteten er således defineret som produktet af den hydrauliske ledningsevne og mægtigheden af den vandmættede zone i magasinet og angives i m^2/s .

Den specifikke ydelse (Sy, dimensionsløs) svarer til den del af porøsiteten i et magasin med frit vandspejl hvor vandet kan bevæge sig, og ikke tilbageholdes af kapillære kræfter. Den specifikke ydelse er således defineret som den vandmængde formationen ved fri dræning afgiver per kvadratmeter, når det hydrauliske potentiale sænkes én meter.

Magasinkoefficienten eller magasintallet (S, dimensionsløs) er et udtryk for den mængde grundvand et magasin kan opbevare eller afgive. Magasinkoefficienten er således defineret som den vandmængde formationen afgiver eller optager per kvadratmeter, når det hydrauliske potentiale ændres én meter. For magasiner med frit vandspejl svarer magasinkoefficienten til den specifikke ydelse, og for artesiske magasiner er magasinkoefficienten en størrelse der er afhængig af kompressibiliteten af matrix og vandet.

Den specifikke kapacitet (c) er en egenskab ved en boring og er defineret som den oppumpede vandmængde divideret med den tilsvarende sænkning af grundvandsspejlet.

Transmissiviteten og magasinkoefficienten bestemmes ved længerevarende prøvepumpninger. Magasintallet kan dog kun beregnes fra pejleboringer. Den specifikke kapacitet for en boring kan findes ved renpumpning eller prøvepumpning.

3.3.1 Geologiens betydning for de hydrauliske egenskaber i kalken

Grundvandsstrømningen i kalkmagasiner afhænger primært af sprækkesystemer og lagdeling og i mindre grad af porøsitet og permeabilitet i kalkmatrix. I afsnit 3.2.3 er de forskellige typer af sprækker beskrevet, og det er beskrevet hvordan f.eks. horisontale sprækker op-

træder i de forskellige kalktyper og er styrende for strømningen. I afsnit 3.1 er de forskellige kalktyper beskrevet med hensyn til udseende og opbygning, hærdningsgrad, flintindhold, porøsitet og permeabilitet, og det er forhold som har betydning for graden af opsprækning og dermed grundvandsstrømningen.

Når en bjergart udsættes for tektoniske påvirkninger, har hårdheden en betydning for graden af opsprækning, og hårde bjergarter sprækker mere og lettere end bløde bjergarter. Generelt er skivekridtet blødere end de andre kalktyper, har et lavere flintindhold og er typisk i mindre grad påvirket af opsprækning. Da skivekridt samtidig har en meget lav permeabilitet, er den hydrauliske ledningsevne ofte ringe og typisk associeret med knusning af kalken i forbindelse med f.eks. glacialtektonisk påvirkning og forkastningsaktivitet.

Kalken fra Danien og Selandien er i langt højere grad præget af vekslende bløde og hårde lag, et større indhold af flint, og er i højere grad præget af opsprækning. Horisontale sprækker følger lagdelingen i kalken og optræder mellem bænke af forskellig hårdhed og mellem kalk og flint. Permeabiliteten er generelt højere end i skivekridtet, men den bedre hydrauliske ledningsevne er i høj grad domineret af sprækkesystemerne. I Jakobsen og Klitten (1999) er det således beskrevet hvordan transmissiviteten varierer stratigrafisk inden for København Kalk Formationen (i Øresundsområdet udgør kalksandskalken fra Danien København Kalk Formationen) der er inddelt i tre underenheder: Øvre, Mellem og Nedre København Kalk (afsnit 3.1.5). I Øvre og Nedre København Kalk, hvor hyppigheden af stærkt hærdnede horisonter er stor, er transmissiviteten højere end i Mellem København Kalk, som er blødere, mere homogen og mindre opsprækket. I bryozokalken følger lagdelingen bankestrukturene, og lagenes egenskaber kan ændre sig fra banke til banke. Sprækkesystemerne er af mere begrænset udstrækning, og den hydrauliske ledningsevne er lavere som i Mellem København Kalken.

Lige som lagdelingen i kalken har betydning for de horisontale sprækker, har den endvidere betydning for strømningen på den måde, at de lavpermeable merglede horisonter typisk også følger den stratigrafiske lagdeling. De merglede horisonter kan have stor lokal til regional udstrækning og opdele kalken i magasiner med ringe eller ingen hydraulisk kontakt.

Det er altså af stor betydning, i forhold til at kunne modellere grundvandets strømning i kalkmagasiner, at bestemme de dominerende sprækkemønstre og i den forbindelse også kalktyper og lagdeling. Endvidere er det vigtigt at være opmærksom på at f.eks. folder, flexurer og forkastninger ofte kan være associeret med en høj grad af opsprækning af kalken og en deraf følgende øget vandføringsevne. Endelig er det vigtigt at være opmærksom på at kalken kan være mere sårbar for spredning af problemstoffer end f.eks. sandmagasiner på grund af den sekundære porøsitet og permeabilitet i sprækkerne og den sprækkedominerede strømning (se også afsnit 3.6.1).

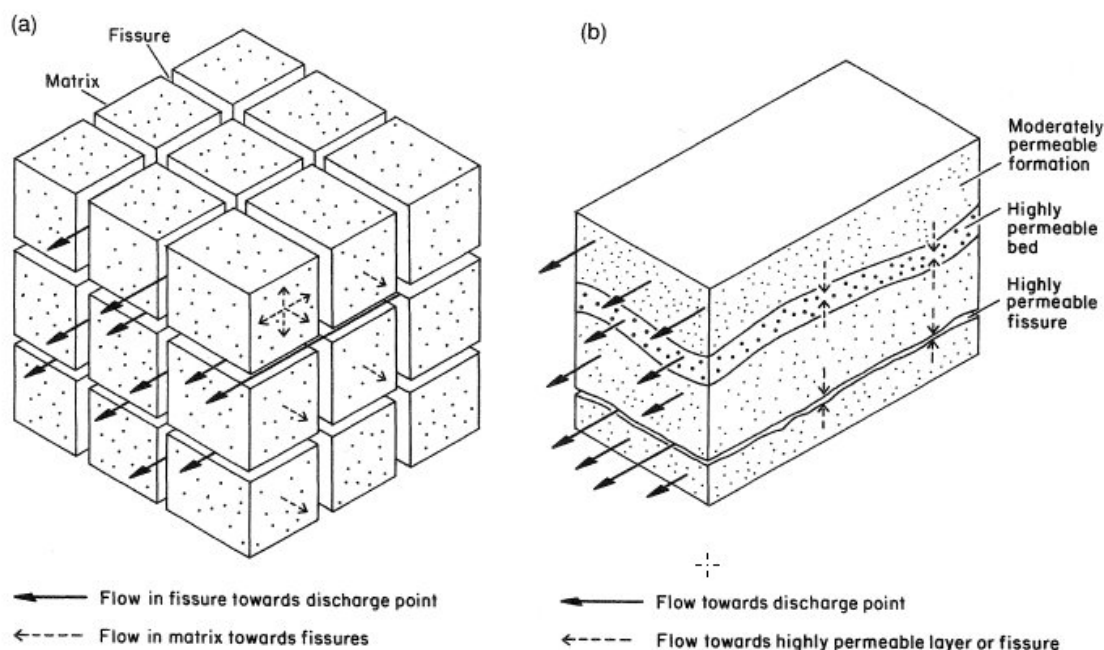
3.3.2 Beregning på strømningsforhold

Kalkmatrix består som beskrevet i afsnit 3.1 overvejende af hele eller fragmenterede kokolitter, foraminiferer og skeletfragmenter af f.eks. bryozoa. Den intergranulære eller primære porøsitet for kalkmatrix ligger generelt på 20-45 %. Porerummene og strømningska-

nerne er ganske små hvilket betyder, at den intergranulære eller primære permeabilitet er tilsvarende lille, og den hydrauliske ledningsevne dermed ringe (Chilton m.fl., 1990). De øvre dele af kalken er dog ofte gennemsat af sprækker som giver anledning til sekundær porøsitet og permeabilitet. Den sekundære permeabilitet kan være stor og give anledning til en høj hydraulisk ledningsevne, og bliver dermed styrende for strømmingen i kalkmagasinet (se også afsnit 3.2.3 og 3.1.1).

På grund af den hyppige forekomst af sprækker og sprækkernes betydning for strømmingen, er det som regel nødvendigt at betragte kalken som et dobbeltporøst og dobbeltpermeabelt medie, når man skal modellere strømming. Det store porevolumen i matrix og den høje permeabilitet i sprækkerne giver anledning til et kompliceret samspil som illustreret i Figur 27.

Kalkmagasinets transmissivitet og magasintal kan bestemmes ud fra traditionelle prøvepumpninger af kortere og længere varighed (Kruseman & de Ridder, 2000; Nielsen, 2007). I kalkmagasiner er de beregnede transmissiviteter fra sænkings- og stigningsdata ofte forskellige og afspejler magasinets sprække- henholdsvis matrixforhold. Længerevarende prøvepumpninger er ret bekostelige, og der foreligger typisk flest observationsdata fra kortere pumpeperioder. Foreligger der kun sænkings- og stigningsdata fra f.eks. korte ren-pumpninger og lignende, kan kun den specifikke kapacitet for boringen beregnes.



Figur 27. Illustration af samspillet mellem høj porøsitet og lav permeabilitet i matrix og højpermeable horisonter og sprækker (efter Price & Edmunds, 1993).

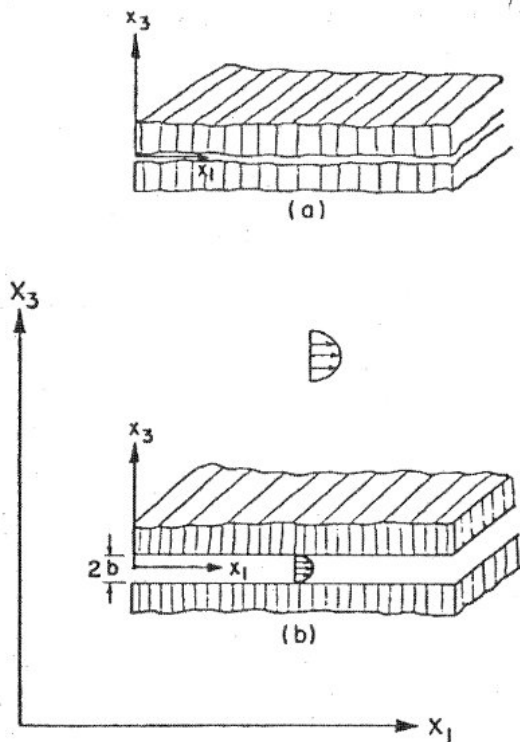
Forudsætningen for at de klassiske prøvepumpningsmetoder kan anvendes i kalkmagasiner er, at grundvandstrømmingen i kalken kan beskrives ved hjælp af Darcys' lov. Det kan ifølge Hickey (1984) testes ved at udføre en række prøvepumpninger af en times varighed med forskellige pumpeydelse, og så måle sænkningen i nærliggende pejleboringer. Hvis der observeres en lineær sammenhæng mellem pumpeydelse i pumpeboringen og sænkning i pejleboringerne, kan det antages at grundvandsstrømmingen kan beskrives med Dar-

cy's lov for det område der er påvirket af sænkningen og inden for intervallet af testede pumpeydelse.

Ved matematisk behandling af grundvandsstrømning i sprækker antages det sædvanligvis at strømmingen i en naturlig sprække kan repræsenteres af strømmingen i spalten mellem to parallelle plader (Christensen, 1980), Figur 28. Transmissiviteten af sprækken T_f er givet ved den såkaldte "cubic law" eller tredjepotens loven (Freeze and Cherry, 1979):

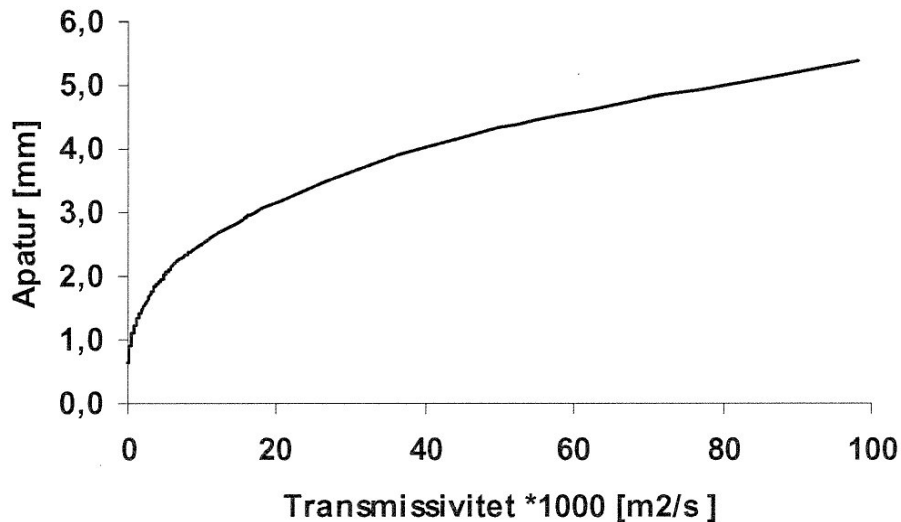
$$T_f = \frac{\rho g (2b)^3}{12\mu} \quad (\text{ligning 3.1})$$

hvor ρ er vandets densitet (kg/m^3), g er tyngdeaccelerationen (m/s^2), $2b$ er spaltebredden (aperturen) (m) og μ er den dynamiske viskositet (kg/m s).



Figur 28. Naturlig sprække og tilnærmet model med parallelle plader (efter Christensen, 1980).

Ved at anvende ligning 3.1 kan transmissiviteten T_f for en sprække med en størrelse på f.eks. 5.4 mm beregnes til $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$. Denne T -værdi svarer til nogle af de største værdier som er observeret i kalkmagasiner på Sjælland, hvor T -værdien typisk er mellem 10^{-3} og $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$. Vandføringen i et kalkmagasin kan således foregå i få sprækker med en størrelse på få millimeter. Generelt forventes det imidlertid at de fleste sprækker har en størrelse, der er mindre end 1 mm (Larsen m.fl., 2006). I Figur 29 er transmissiviteten beregnet som funktion af aperturen (sprækkestørrelsen).



Figur 29. Transmissivitet som funktion af apatur beregnet ud fra ligning 3.1 (efter Larsen m.fl., 2006).

3.3.3 Anisotropi

Hvis størrelsen af den hydrauliske ledningsevne for et magasin er retningsbestemt, siges magasinet at være anisotropt. De retninger i hvilke ledningsevnen antager sine maksimale og minimale værdier, betegnes de anisotrope hovedakser. Der skelnes imellem horisontal anisotropi (A_h) og vertikal anisotropi (A_v), hvor A_h er lig forholdet mellem den hydrauliske ledningsevne i henholdsvis x og y retningen; $K_x : K_y$, og A_v er lig forholdet mellem den hydrauliske ledningsevne i henholdsvis x og z retningen; $K_x : K_z$.

Afhængig af sprækkesystemer kan kalkmagasiner udvise stærkt anisotrope strømningsmønstre både horisontalt (A_h) og vertikalt (A_v). Det kan være overordentligt svært at fastlægge strømningsretningen, og især horisontal anisotropi kan give problemer i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner. Dominerende sprækkesystemer kan som beskrevet i afsnit 3.1.1 være styrende for grundvandets strømning i et område og f.eks. betyde at K_x er 2-3 gange større end K_y , og en forståelse af sprækkernes dannelsesmekanisme kan i høj grad bidrage til forståelsen af deres forskellige hydrauliske egenskaber.

Anisotropi kan umiddelbart være svært at registrere, men kan i nogle tilfælde observeres ud fra prøvepumpninger og sænkningstragter fra større kildepladser. Hvis der forekommer anisotropi i et område, kan det betyde at vandet ikke nødvendigvis strømmer som man ville antage ved f.eks. at betragte et potentialekort (altså vinkelret på potentialelinjerne). Det kan have stor betydning i forbindelse med beregning af indvindingsoplande (se afsnit 4.2.4) hvor detailoplysninger om strømningsforholdene er vigtige, og i det hele taget i forbindelse med administrative beslutninger; lige fra kildepladsvurderinger til forurenings-undersøgelser hvor grundvandets strømningsvej traditionelt vurderes på baggrund af potentialekort.

3.4 Grundvandsdannelse til kalken

Grundvandsdannelsen til kalk foregår typisk i de områder hvor kalken ligger tæt på terræn, og hvor kalkmagasinet er overlejret af sand og grus eller opsprækket ler. I områder domineret af lerede, ikke opsprækkede, aflejringer over kalken, kan grundvandsdannelsen være mere begrænset.

Graden af kalkmagasinets opsprækkethed og kalkens permeabilitetsforhold i de øverste lag, og dermed størrelsen af den hydrauliske ledningsevne i den øvre del af kalkmagasinet (se også afsnit 3.3.2), har stor betydning for størrelsen af nedsivningen og grundvandsdannelsen. Tilsvarende kan interne lavpermeable horisonter i form af ler- og mergellag begrænse grundvandsdannelsen til underliggende dele af kalken.

Gradientforholdene har også afgørende betydning for om der sker nedsivning i et område eller ej. Der skal således være nedadrettede gradientforhold for at der kan ske en grundvandsdannelse i det pågældende område. Derfor er det vigtigt at man har kendskab til potentialeforholdene for både kalkmagasinet og eventuelle overliggende magasiner, som kan bidrage til grundvandsdannelsen til kalkmagasinet.

Den største grundvandsdannelse vil altså ske i områder hvor kalken ligger tæt på terræn, er kraftigt opsprækket og samtidig er overlejret af grove eller opsprækkede sedimenttyper, og hvor gradientforholdene samtidigt er nedadrettede.

Observationer og tidsserier over potentialeforholdene kan give et godt billede af hvor der foregår stor eller lille grundvandsdannelse. Områder med stor grundvandsdannelse vil typisk udvise store forskelle i trykniveauerne for henholdsvis sommer- og vinterhalvåret, med de største trykniveauer i vinterhalvåret hvor nettonedbøren ofte er størst, og mindre i sommerhalvåret hvor trykniveauet falder i grundvandsmagasinerne. I områder hvor der forekommer en mindre grundvandsdannelse, vil årtidsvariationerne i trykniveauerne være mindre udtalte.

3.5 Grænsen mellem fersk og salt grundvand

I modsætning til de fleste øvrige grundvandsmagasiner i Danmark består kalkmagasinerne af marine aflejringer. Det betyder at grundvandet i kalken som udgangspunkt er salt. De øvre dele af de danske kalkaflejringer indeholder dog som oftest en fersk grundvandsresource som er dannet ved udvaskning af det salte grundvand gennem infiltration og cirkulation af fersk grundvand. Udvasningsgraden/-dybden er styret af de geologiske forhold i og over kalken og den tidsmæssige og geologiske udvikling samt af grundvandsdannelsen og dermed vandbalancen. Indvinding i kalkmagasiner begrænses således typisk af forekomsten og udbredelsen af salt grundvand. Grænsen mellem det ferske og det salte grundvand er ofte en relativt tyk overgangszone der er styret af diffusionsprocesser, snarere end en egentlig grænse med en skarp overgang. Dog kan opsprækningsgraden og tilstedeværelsen af lavpermeable horisonter i kalken også have betydning for tykkelsen af overgangszonen. Beliggenheden af saltvandsgrænsen og forståelsen af denne i samspil med den lokale

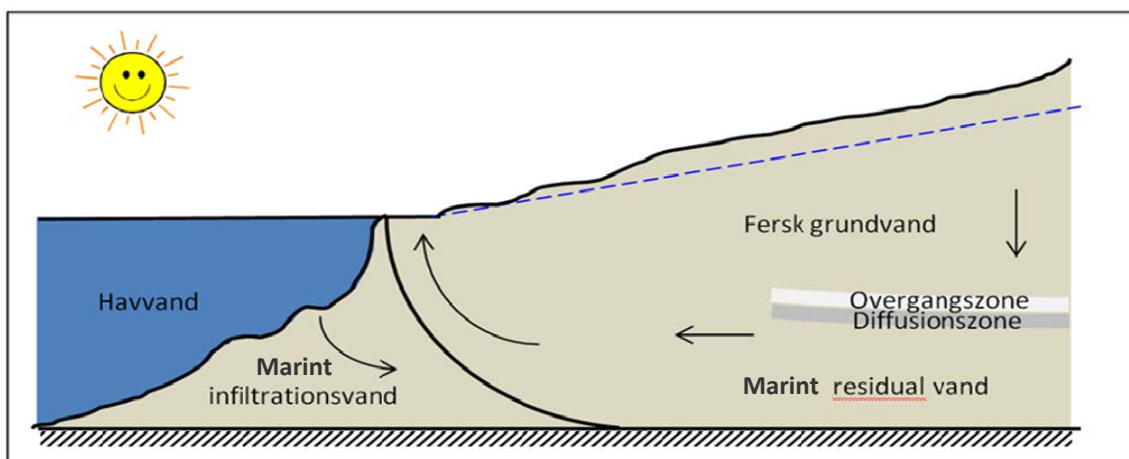
geologi er en af de centrale problemstillinger i kortlægningen af kalkmagasiner og vil blive grundigt belyst i det følgende.

3.5.1 Terminologi og definitioner

Grundvandet i Danmark er fra naturens side lagdelt og består af fersk grundvand oven på salt grundvand med en mellemliggende overgangs- og diffusionszone (se Figur 30 og Figur 31). Den typiske form for salt grundvand som optræder i kalkmagasiner er enten marint residualt vand eller marint infiltrationsvand (se Figur 30).

Fersk grundvand dannes som følge af nettonedbøren i Danmark. Baggrundskoncentrationen af klorid i fersk grundvand stammer fra nedbøren og den atmosfæriske tørdeposition da der føres store mængder salt (som aerosoler) ind fra havet i forbindelse med især storme. Nedbøren ved Vestkysten har de højeste gennemsnitlige kloridkoncentrationer, og målte regnvandskoncentrationer svinger mellem 3 og 10 mg klorid pr. liter i Danmark (Kristiansen m.fl., 2009). Baggrundskoncentrationen for klorid i grundvand er under 30 mg/l (Kristiansen m. fl., 2009). Mange steder forekommer der saltvandspåvirket ferskvand hvor kloridkoncentration er højere end baggrundskoncentrationen som følge af opblending/diffusion med salt grundvand. Grænseværdien for klorid i drikkevand er 250 mg/l.

Salt grundvand (<19.500 mg Cl/l) har sin oprindelse i havvand (≈ 19.500 mg Cl/l) og kan underopdeles i "marint infiltrationsvand" og "marint residualt vand". Marint infiltrationsvand optræder ved kysterne hvor havvand direkte kan strømme til, og findes udelukkende få hundrede meter fra recente kyster (f.eks. Olofsson, 1996). Marint residualt vand er derimod vidt udbredt i Danmark på grund af landhævning af havbundssedimenter (Kristiansen m.fl., 2009).



Figur 30. Principskitse som viser fordelingen af ferskvand og salt grundvand, som i kalkmagasiner typisk er marint infiltrationsvand eller marint residualt vand (modificeret efter Glover 1959).

3.5.2 Hydrostatisk ligevægt

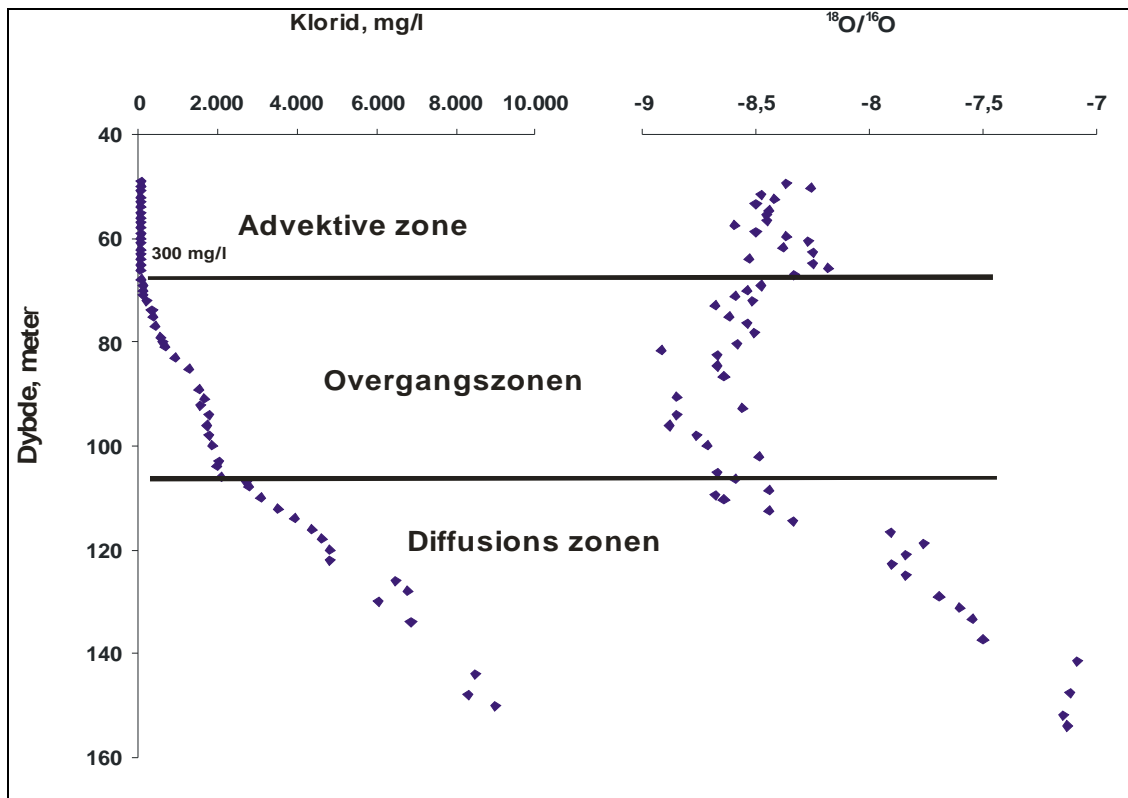
Ferskvand er lettere end saltvand og vil flyde som en pude oven på dette på grund af densitetsforskellen. Ved hydrostatisk ligevægt mellem ferskvand og saltvand bestemmer tykkelsen af det ferske vand over havniveau tykkelsen af ferskvand under havniveau og altså dybden til det salte vand, hvilket er udtrykt i den såkaldte Ghyben-Herzberg formel. Erfaringen fra undersøgelser i kalkmagasiner i Danmark viser at det ikke er de hydrostatiske forhold, som dominerer beliggenheden af saltvandsgrænsen, men hydrogeologiske og indvindingsmæssige forhold, hvilket beskrives indgående i de næste afsnit.

3.5.3 Karakterisering af saltvandsgrænsen

Som nævnt flere gange i de foregående afsnit, er overgangen fra fersk til salt grundvand i kalkmagasiner sjældent en skarp grænse. Det har været kendt fra skrivekridt i England siden begyndelsen af 1980'erne, og er beskrevet for Københavnsområdet i Hinsby m.fl. (2003). Saltvandsgrænsens natur er blevet undersøgt nærmere i Danmark i forskningsprojektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" (Klitten m.fl., 2006). Undersøgelsen viser at saltvandsgrænsen i Nordøstsjælland de fleste steder er udviklet som en jævn overgang over flere hundrede meter, hvor grundvandet gradvis bliver mere saltholdigt. En af de styrende mekanismer antages at være udvaskning gennem advektiv strømning af ferskvand knyttet til sprækker. Stigningen i saltkoncentrationen fortsætter dog typisk ned til dybder i skrivekridtet hvor sprækker ikke længere forventes at være hydraulisk aktive. Da skrivekridtet samtidig har en meget lav matrix-permeabilitet, antages kloridkoncentrationerne her at være betinget af diffusion af klorid op efter mod ferskvandszonen.

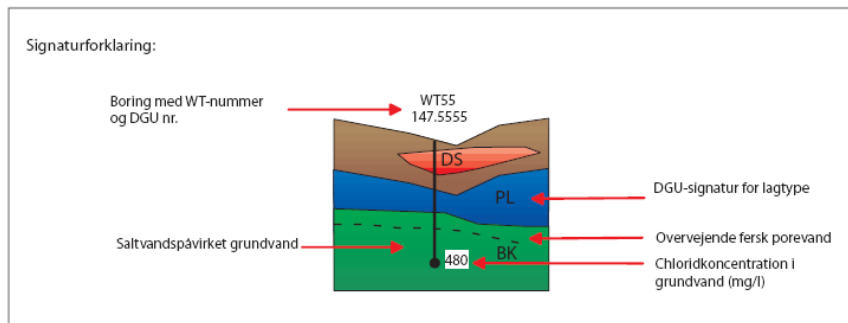
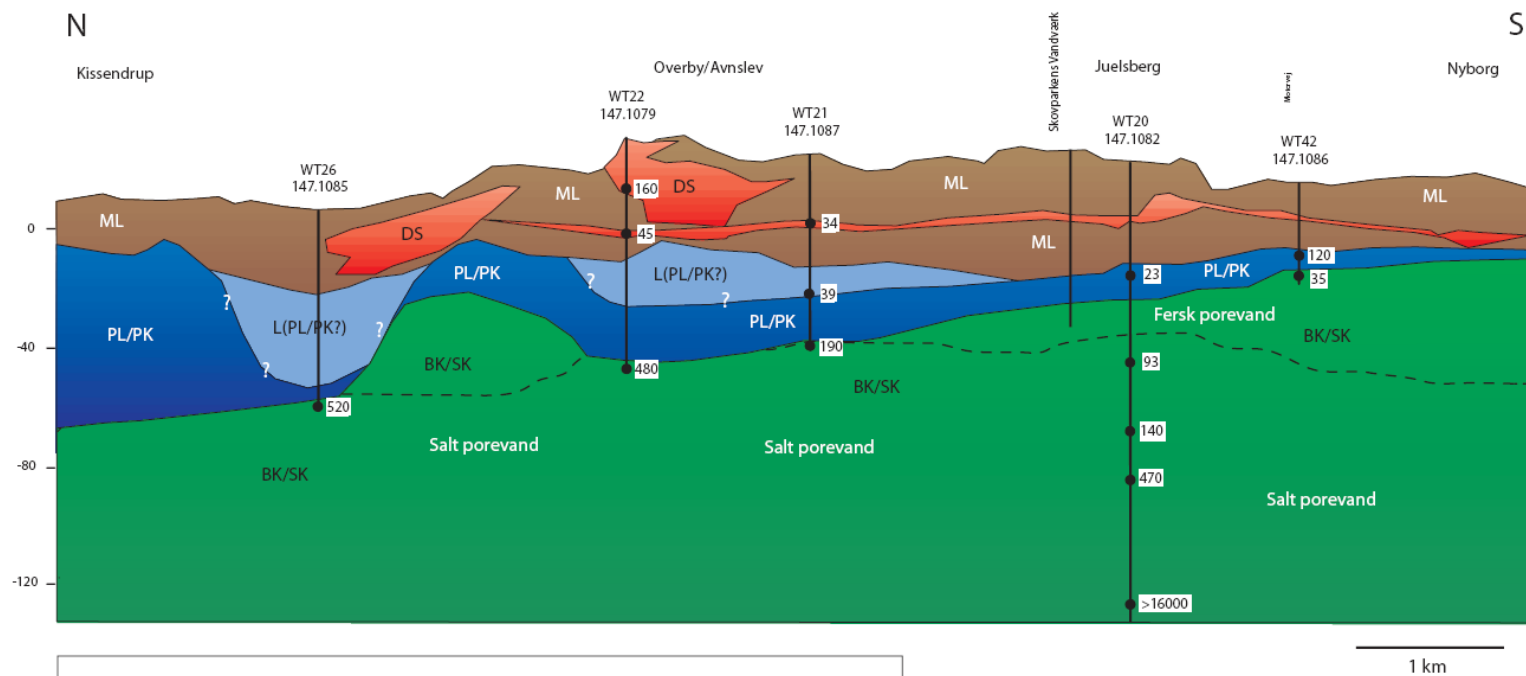
Som en del af ovennævnte projekt er saltvandsgrænsens udvikling i kalkmagasiner blevet detaljeret beskrevet i et område omkring Karlslunde (Larsen m.fl., 2006), blandt andet i en 269 m dyb undersøgelsesboring ved Karlslunde Mose. På baggrund af kloridkoncentrationer og stabile ilt-isotoper ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) i Karlslunde boringen og en analyse af indstrømningsfordelingen i syv boringer i området, er der opstillet en konceptuel hydrogeologisk model for saltvandsforekomsten i skrivekridtet (Figur 31). Modellen indeholder en øvre "Advektiv zone" hvor der forekommer advektiv transport af fersk grundvand, og hvor der er sket en fuldstændig udvaskning af det oprindelige marine porevand. Dernæst følger en "Overgangszone" hvor det oprindelige marine porevand kun er delvist udvasket, men hvor isotopsammensætningen viser der er sket udveksling med recent regnvand. I den nedre zone "Diffusionszonen" foregår udvaskningen af saltvand alene ved en opadrettet diffusion af klorid, og andre ioner, fra det oprindelige marine porevand til det overliggende ferskvand.

Ofte starter overgangszonen få meter nede i skrivekridtet på Nordøstsjælland. Starter den dybere i skrivekridtet, er det ofte i forbindelse med lavpermeable mergelhorisonter (Klitten og Wittrup, 2006). I Hinsby m.fl. (2003) og Klitten og Wittrup (2006) er det endvidere beskrevet hvorledes tilstedeværelsen af lavpermeable horisonter flere steder påvirker både udvaskning ovenfra og diffusion nedefra, og således giver anledning til en mere skarp overgang mellem fersk- og saltvand. Når saltvandsgrænsen på Sjælland optræder i Daniengkalken, skyldes det formentlig ofte indvindingsbetinget hævnning af grænsen, og den kan optræde som en mere skarp overgang end det sædvanligvis ses i skrivekridtet (Vangkilde-Pedersen og Olsen, 1997; Klitten og Wittrup, 2006).



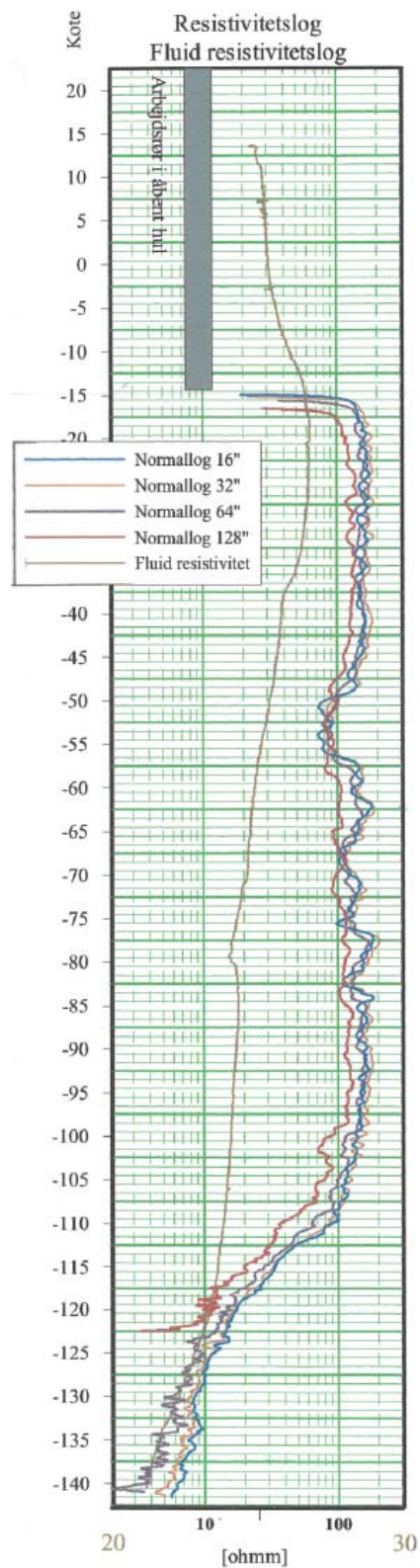
Figur 31. Konceptuel hydrogeologisk model (efter Larsen m.fl., 2006) for saltvandsforekomsten i skrivekridt baseret på undersøgelse af Karlslunde-boringen (DGU nr. 207.3850). Modellen viser opdeling af saltvandsgrænsen i zoner på baggrund af porevands indhold af klorid og stabile ilt-isotoper ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

På Østfyn er der i Nyborg-området eksempler på store variationer i dybden til saltvandsgrænsen i bryozokalk fra Danien. Det tolkes både at hænge sammen med beskaffenheden af de overliggende lag, og at være betinget af naturlig strømning mod udstrømningsområder. Grundvandsdannelsen og dermed udvaskningen af saltvand og dybden til saltvandsgrænsen tolkes at være større i områder uden Kerteminde Mergel eller hvor Kerteminde Mergelen er forkislet og opsprækket samt i områder med tyndt eller opsprækket morænelersdække, se Figur 32 (Mielby & Sandersen, 2005). En 169 meter dyb boring i området (DGU nr. 147.1082) viser at overgangszonen lokalt starter i bryozokalken, fortsætter 7 m i denne og herefter 38 m ned gennem skrivekridtet for at slutte i 145 meters dybde, hvor saltkoncentrationen svarer til havvand.



Figur 32 Eksempel på hvordan der forekommer saltvandspåvirket grundvand ved Nyborg. Ved boringernes indtag er angivet kloridkoncentrationen i mg Cl/l. L (modificeret efter Mielby & Sandersen, 2005).

I Figur 33 er vist et eksempel hvor den gradvise overgang fra fersk til salt grundvand er kortlagt ved hjælp af borehulslogging i form af resistivitetslogs.



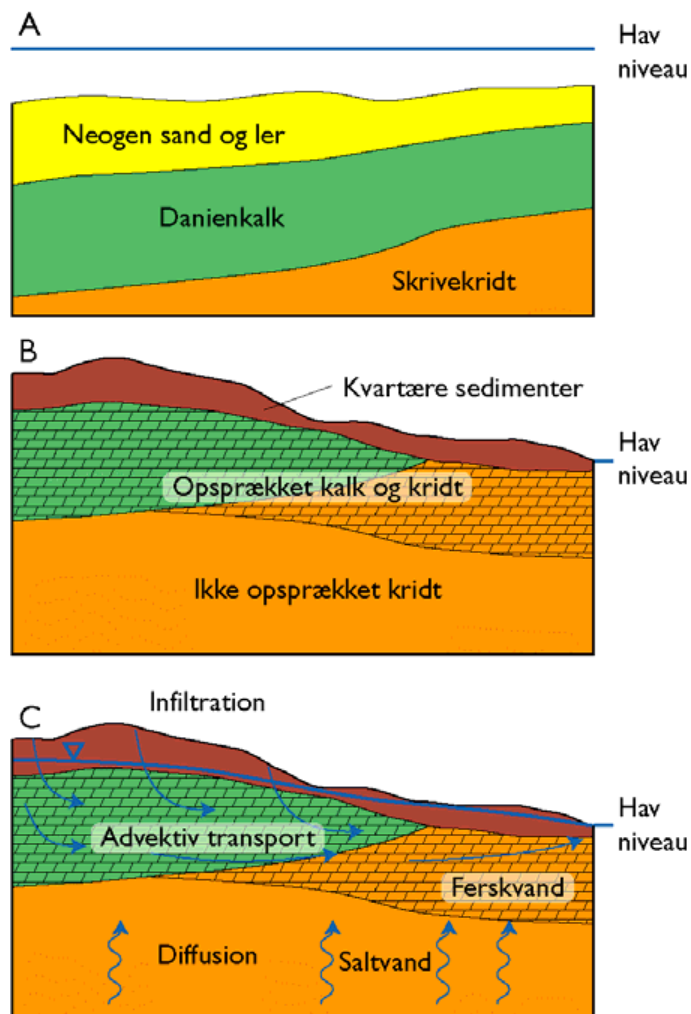
Figur 33. Resistivitets- og fluid resistivitetsslog udført i en kalkboring på Batum saltstrukturen i Salling, der viser overgangen fra fersk vand til salt grundvand mellem kote -100 m og -140 m. (Kilde: Viborg Amt, 2003).

3.5.4 Geologisk udviklingsmodel for saltvandsgrænsen

I Klitten m.fl. (2006) er der sammenstillet en konceptuel geologisk udviklingsmodel for udvaskning af saltvand fra skrivekridt og Danienkalk i Karlslunde-området. Modellen er illustreret i Figur 34 og det 10 km lange tværsnit strækker sig fra den nordvestlige del af undersøgelsesområdet til Køge Bugt.

Figur 34, A) viser situationen i Palæogen og Neogen hvor der i den østlige del af det Danske Bassin blev aflejret omkring 500 m sedimenter oven på Danienkalken. Sedimenterne blev begravet med porevandssammensætning som i oceanisk havvand (kloridkoncentration omkring 19.500 mg/l). Porøsiteten i kridtet blev under denne indsykning reduceret fra omkring 65 % til ca. 40 % hvilket medførte en svagt opadrettet vandbevægelse i sedimenterne.

Figur 34, B) viser situationen i Sen Neogen hvor tektonisk opløft resulterede i at de overlejrende bjergarter blev borteroderet, og skrivekridtet og Danienkalken blev opløftet og eroderet til det nuværende niveau. Denne hævn foregik indtil for omkring 2-3 millioner år siden. Efterfølgende blev kvartære sedimenter aflejret på kalk- og kridtoverfladen.



Figur 34. Konceptuel geologisk udviklingsmodel for udvaskning af saltvand fra skrivekridt i Karlslunde-området (efter Klitten m.fl., 2006).

Figur 34, C) viser udviklingen gennem Kvartærtiden. Den tektoniske kompression under hævningsprocessen i Sen Neogen skabte hovedsagelig subvertikale sprækker i både kridtet og kalken, medens aflastningen som resultat af den efterfølgende erosion skabte både subhorizontale og subvertikale sprækker i formationerne. De subhorizontale sprækker er siden istiden yderligere forøget og aktiveret som følge af aflastningen af istrykket. Efter opløft, erosion og opsprækning er fersk vand infiltreret et stykke ned i formationerne, og har udvasket det oprindelige marine porevand, hovedsagelig gennem advektiv transport i sprækker. Den relativt hurtige udvaskning af saltvandet har etableret store kemiske gradienter som har igangsat en opadrettet diffusiv transport i den underliggende ikke opsprækkede del af kalken.

3.5.5 Betydningen af de hydrogeologiske forhold

I det følgende gives en række eksempler på betydningen af de hydrogeologiske forhold for beliggenheden af saltvandsgrænsen.

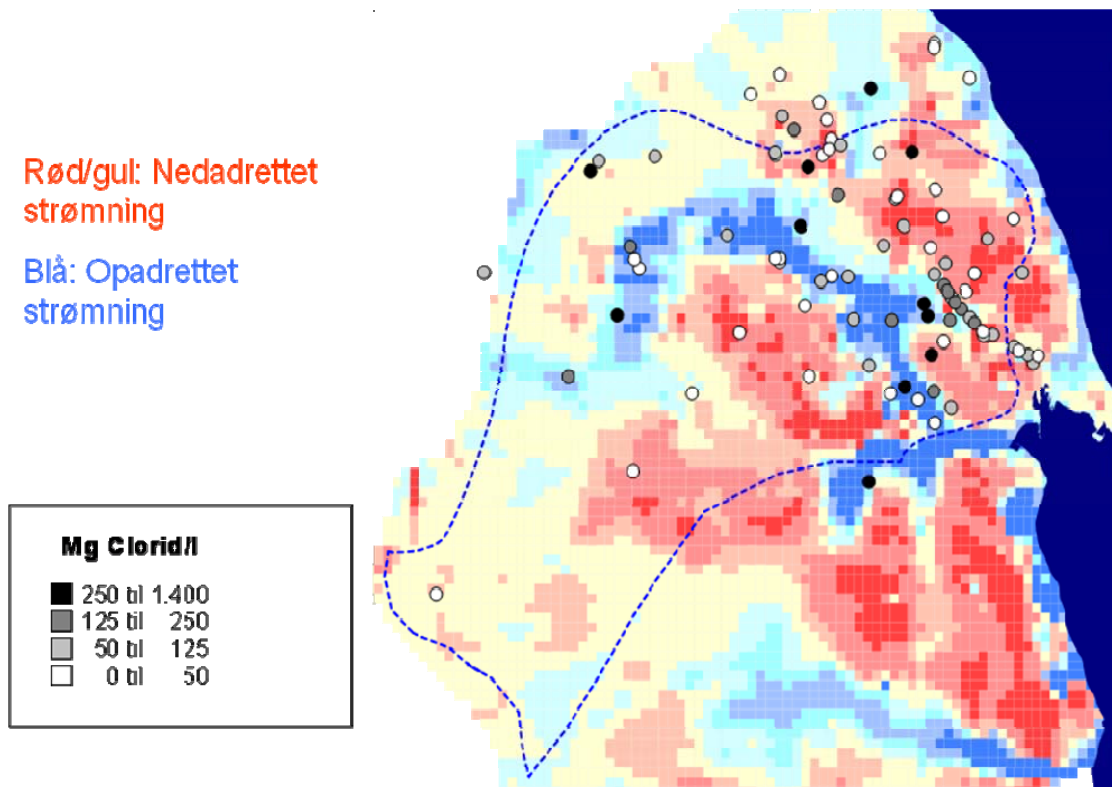
Nordøstsjælland

Undersøgelser af kalkmagasinerne i Nordøstsjælland (Klitten og Wittrup, 2006) har vist at det ikke er det eksisterende ferskvandstryk, dvs. hydrostatisk ligevægt, som styrer saltvandsgrænsens beliggenhed. Grænsen ligger f.eks. højere i den vestlige del af området end nærmere kysten. I størsteparten af undersøgelsesområdet optræder saltvandsgrænsen ved overgangen til skrivekridt eller et stykke nede i skrivekridtet i forbindelse med en mergelhorisont. Det er således de geologiske forhold som er afgørende. Træffes saltvandsgrænsen i Danienkalken er der typisk tale om indvindings- eller forkastningsbetinget oprængning af saltvand eller kystnær beliggenhed.

Østfyn

Grundvandsdannelsen og vandets kredsløb i oplandet har også betydning for forekomsten af ferskvand i kalkmagasinerne. Som beskrevet i afsnit 3.4 sker nedsivningen af ferskvand hovedsagelig i områder med sandede aflejringer eller opsprækket ler (på Østfyn også opsprækket Kerteminde Mergel, afsnit 3.5.3) over kalken og nedadrettede gradientforhold. Opadrettede gradienter og udstrømning forekommer typisk i lavereliggende områder som igen kan hænge sammen med områder, hvor vandet har en præferentiel strømningsretning på grund af f.eks. overordnede sprækkesystemer eller begravede dalsystemer.

Figur 35 viser et eksempel på modelberegnet grundvandsdannelse i kalkmagasinet ved Nyborg sammenholdt med målte kloridkoncentrationer. Sammenstillingen giver et indtryk af den geografiske udbredelse af områder med nedadrettet strømning (røde/gule felter) svarende til områder med fersk grundvandsdannelse, og udbredelsen af områder med opadrettet strømning (blå områder) og derved mulighed for opadstigende saltvand. Modelleringen af strømmingen underbygges af det målte kloridindhold som også er vist på figuren.



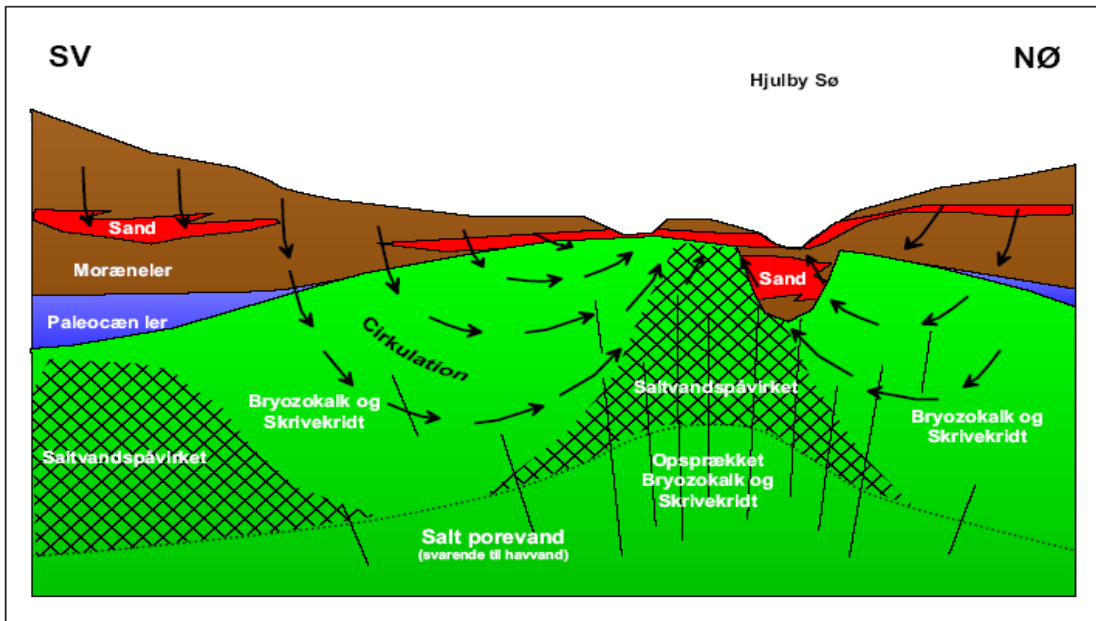
Figur 35. Sammenhæng mellem fund af kloridholdigt grundvand og beregnet grundvandsdannelse i Nyborgområdet (efter Mielby & Sandersen, 2005).

I Figur 36 ses den konceptuelle tolkningsmodel som illustrerer oprængning af saltholdigt grundvand ved Hjulby Sø i Nyborgområdet (Mielby & Sandersen, 2005). Kalkoverfladen er svagt hvælvet i en storskala foldestruktur og udgør en antyklinal i området. Kalken er således højtliggende og opsprækket under Hjulby Sø som følge af foldningen og talrige forkastninger associeret med denne, mens landskabet udgør en lavning. Den naturlige vandtransport fra højt til lavt potentiale medfører en cirkulation af ferskvand som i områder med stor grundvandsdannelse og nedadrettet gradient har udvasket det salte vand til stor dybde. Under Hjulby Sø bevirker det lave tryk, den opadrettede gradient og sprækkerne i kalken at det salte vand kan trænge med grundvandsstrømmen op til lave dybder, tæt på terrænoverfladen. Mod sydvest hvor morænelagerne over kalken er tykke, er grundvandsdannelsen lille og cirkulationen af ferskvand begrænset, og her optræder der også høje koncentrationer af klorid i de øvre dele af kalkmagasinet.

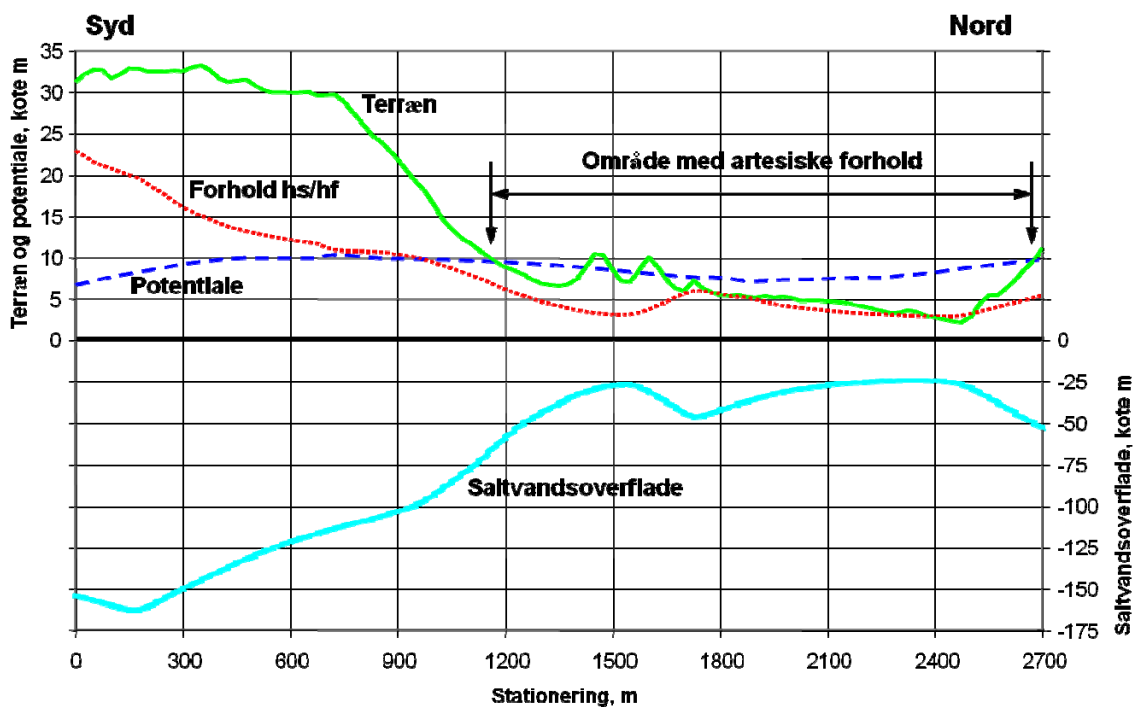
Vestsjælland

Lignende observationer, hvor dynamikken i vandkredsløbet medfører at saltvandet "tvinges" op under udstrømningsområderne og begrænser forekomsten af ferskvand, er blandt andet gjort ved Vordingborg (Olsen m.fl., 2005) og Susåen (Steen Vedby, pers. komm.).

På Figur 37 er vist beliggenheden af terrænoverflade, grundvandspotentiale og saltvands-overflade i et tværsnit fra et vådområde ved Vordingborg. Hvis det alene var hydrostatisk ligevægt som styrede dybden til saltvandet, skulle denne være mere konstant, og det ses da også af figuren at h_s/h_f forholdet (forholdet mellem tykkelsen af ferskvand under havniveau (h_s) og tykkelsen af ferskvand over havniveau (h_f)) ikke er konstant, fordi saltvands-overfladen tilnærmer sig terræn i udstrømningsområdet.



Figur 36. Konceptuel model for opstrømning af salt grundvand fra bryozokalk og skrivekridt ved Hjulby Sø fra hydrogeologisk tolkning af Nyborgområdet (Mielby & Sandersen, 2005).



Figur 37. Tværsnit, der illustrerer sammenhængen mellem den kortlagte saltvandsoverflade og det målte potentiale i et vådområde nord for Vordingborg (Olsen, m.fl., 2005).

Nordjylland

I et område syd for Aalborg har et pilotprojekt om lavpermeable horisonter i skrivekridtet (Nielsen & Jørgensen, 2008) bekræftet at der eksisterer lokalt udbredte mergelsekvenser på 5-8 meters tykkelse med fire markante mergellag. Dybden til mergellagene varierer me-

get i området, muligvis som følge af forskellig hældning af adskilte forkastningsblokke. Undersøgelsen viser at mergelsekvensen, hvor den optræder, opdeler skrivekridtet i et øvre og et nedre magasin med forskellig grundvandskemi. Nitratholdig vand træffes oftest kun i magasinet over mergellagene, og saltvand som hovedregel kun under mergellagene. Saltvandsgrænsen udgør, ligesom beskrevet for Nordøstsjælland, også her en mange meter tyk overgangszone med gradvis stigende kloridkoncentration. I modsætning til Nordøstsjælland starter overgangszonen typisk 20 m eller mere under mergellagene, hvilket indikerer at der har kunnet trænge ferskvand ned under mergellagene og medvirke til udvaskningen af saltvand. Det kan enten skyldes at mergellagene ikke er helt impermeable, eller at de mange forkastninger og/eller dybe erosionsrender, der optræder i skrivekridtet i området, har skabt hydraulisk kontakt mellem de to magasiner.

Det nordøstlige Djursland

Djursland er beliggende i den centrale del af det Danske Bassin, og er gennemsat af Grenå-Helsingborg forkastningen (se Figur 6) som har haft afgørende betydning for områdets hydrogeologiske udvikling, både med hensyn til tykkelsen af de kvartære aflejringer og opsprækning af kalken.

Det regionale geologiske billede på det nordøstlige Djursland er domineret af et forholdsvis tyndt kvartært dække bestående af relativt sandede sedimenter der overlejrer kalkstensformationer fra Danien. Danien-overfladen fremtræder plateau-agtigt over store områder med små niveauforskelle og med et svagt fald mod vest. Da kalkoverfladen oprindeligt har ligget vandret, må området senere være tippet og eroderet i forbindelse med bevægelser langs Grenå-Helsingborg forkastningen. Kalkoverfladen er gennemskåret af markante begravede dale; f.eks. ligger der under Kolindsund en begravet dal som visse steder skærer sig ca. 80-100 m ned i kalken.

Lagdelingen i kalken har en svag hældning (1 %) mod sydvest. Således går skrivekridt i dagen ved Karlby Klint nord for Grenå, og ligger under kote -80 m ved Kirialboringen umiddelbart nord for Kolindsund (Århus Amt, 2004). I samme boring er skrivekridtet overlejret af bryozokalk, kalksiltsten og kalksandkalk.

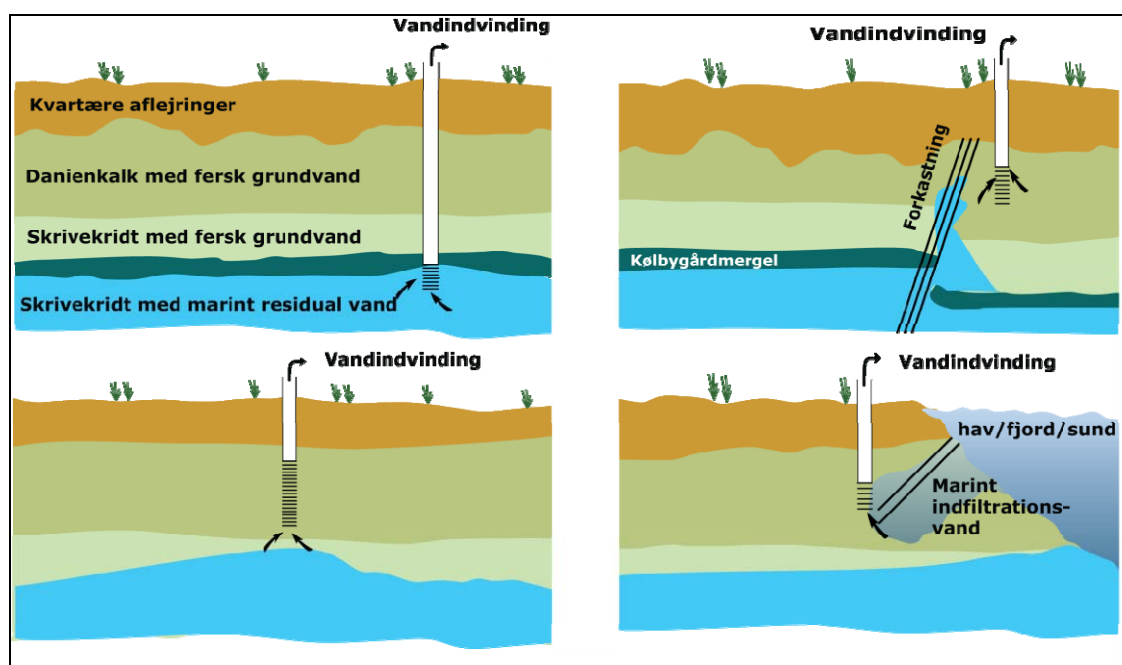
Kalkmagasinerne er ofte nitratsårbar på grund af en dårlig beskyttelse fra ovenliggende dæklag. De opsprækkede kalkformationer gør endvidere indvindingen sårbar over for både nedsivende nitrat og optrængning af saltvand i kalkmagasinet.

I Kolindsund-området forekommer der højtliggende saltvand, og der er forekomst af saltvandskilder i kanten af sundet. Danneshistorien kompliceres dog her af at der i postglacial tid har været hav, og at området i nyere tid er blevet inddæmmet og drænet med henblik på etablering af landbrugsjord.

Dybden til saltvandet i de omkringliggende områder varierer og er af residual oprindelse. Det er også her vist at dybden til saltvandsgrænsen ikke er styret af det hydrostatiske tryk (Mielby m.fl., 1983).

3.5.6 Indvindings påvirkning af dybden til saltvandsgrænsen

Dybden til saltvandsgrænsen kan påvirkes af menneskelige faktorer. F.eks. kan indvinding af drikkevand eller grundvandssænkninger i kalkmagasiner medføre at salt grundvand trænger op i ferskvandszonen. I Figur 38 er skitseret 4 forskellige geologiske situationer hvor saltvand finder vej til en indvindingsboring. I eksemplet øverst til venstre ses en situation hvor et mergellag adskiller skrivekridt med fersk og salt grundvand henholdsvis over og under laget, og hvor boringen er filtersat under mergellaget. I eksemplet øverst til højre gennemborer indvindingsboringen ikke mergellaget, men en forkastning skaber hydraulisk kontakt mellem saltvandszonen og boringen. I eksemplet nederst til venstre optræder der ikke et lavpermeabelt mergellag, og de hydrauliske forhold i kalken og skrivekridtet medfører at der strømmer saltvand fra skrivekridtet til indvindingsboringen, som er filtersat i Danienkalken. I det sidste eksempel nederst til højre trænger salt marint infiltrationsvand ind fra havet. Dette skyldes at grænsen til det marine saltvand påvirkes umiddelbart omkring indvindingsboringen på grund af den øgede strømning af ferskvand eller det lokalt lavere piezometriske tryk (Jørgensen m.fl., 2008b).



Figur 38. Illustration fra Østsjælland som viser forskellige transportveje for salt grundvands indtrængning til en indvindingsboring (efter Kristiansen m.fl., 2009).

3.6 Grundvandskemiske forhold i kalkmagasiner

I dette afsnit vil de grundvandskemiske forhold og dominerende kemiske processer i kalkmagasiner blive beskrevet. Først gennemgås forholdene omkring spredning af kemiske stoffer i kalkmagasiner og forekomsten af kloridholdigt grundvand som ofte sætter en begrænsning for indvindingen i kalkmagasiner. Dernæst gennemgås andre grundvandskemiske forhold i kalkmagasiner; først i forhold til naturlige processer, og til sidst i forhold til kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter.

De grundvandskemiske forhold i kalkmagasiner beskrives dels med baggrund i resultater fra den nationale grundvandskortlægning og dels baseret på en række undersøgelser af de grundvandskemiske forhold på Sjælland:

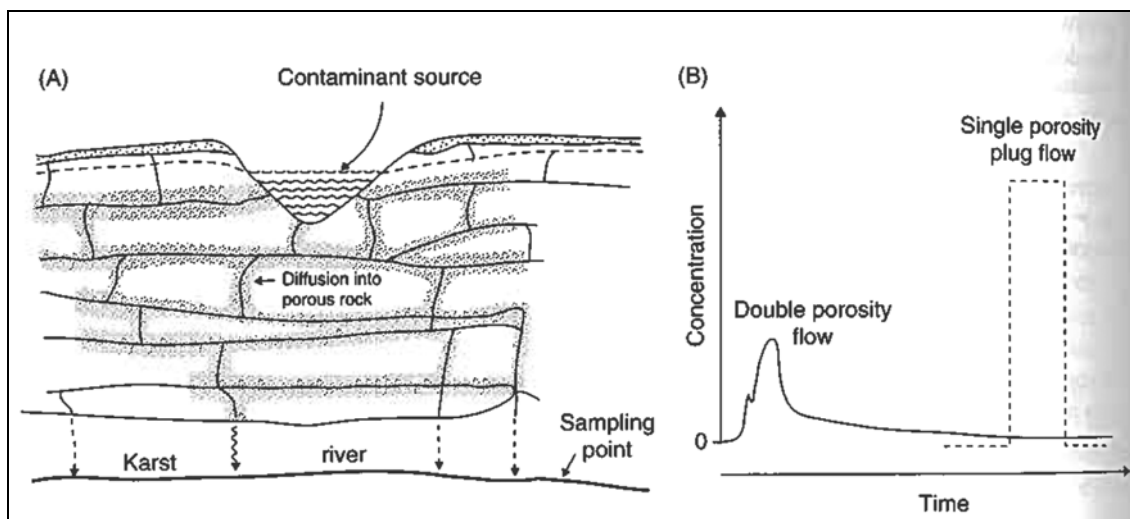
- Nikkelfrigivelse ved pyritoxidation forårsaget af barometerånding/-pumpning (Jensen m.fl., 2003).
- Binding af nikkel og frigivelse fra naturlige kalksedimenter (Kjøller m.fl., 2006).
- Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland (Klitten m.fl., 2006; Larsen & Berger, 2006; Larsen m.fl., 2006).
- Arsen i kalkmagasiner i Danmark (Kjøller m.fl., 2009).
- Strontium i grundvand og drikkevand i Roskilde Amt (Watertech, 2005).

Derudover inkluderede projektet: Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt (Kristiansen m.fl., 2009) en analyse af bidraget fra vejsaltning til kloridkoncentrationerne i grundvandet i kalkmagasiner i det nordøstlige Sjælland.

I Appendix E er angivet forslag til definition af grundvandstyper i kalkmagasiner på baggrund af dataanalyse i Nordøstsjælland fra Larsen & Berger (2006).

3.6.1 Spredning af kemiske stoffer i kalkmagasiner

Som beskrevet i afsnit 3.3 foregår grundvandsstrømningen i kalkmagasiner både i matrix og i sprækker. Strømning modelleres bedst ved at betragte kalken som et dobbeltporøst og dobbeltpermeabelt medie, og det komplicerede strømningsmønster påvirker spredningen af kemiske stoffer. Ved matrixstrømning transporteres grundvandet langsomt gennem bjergarterens tætte netværk af mikroporer. Ved sprækkestrømning foregår transporten meget hurtigere og strømningen kan endda være turbulent. En undersøgelse af et kalkmagasin i England har vist at 60 – 80 % af vandtransporten foregår gennem sprækker, på trods af at sprækkerne kun kan indeholde 1/29 af grundvandsressourcen (Atkinson, 1975). De to former for strømning i kalkmagasiner udveksler kontinuert vand som illustreret i Figur 39 (Appelo og Postma, 2005). På grund af den hurtige strømning i sprækker, transporteres kemiske stoffer hurtigere gennem kalkmagasiner end f.eks. gennem sandmagasiner, hvor der kun forekommer matrixstrømning. Figur 39 illustrerer således hvordan en puls-injektion af et forurenende stof på jordoverfladen når hurtigere frem ved transport i et dobbeltporøst medie, end ved matrix transport alene. Samtidig dæmpes maksimumkoncentrationen i et givent målepunkt i forhold til ren matrix transport som følge af udveksling med matrix (Appelo og Postma, 2005).



Figur 39. Dobbeltporøsitet i kalkmagasiner resulterer i 2 strømningmåder (A), som påvirker transporten og ankomsttider af en puls-injektion af et forurenende stof på jordoverfladen (B) (Appelo & Postma, 2005).

3.6.2 Kloridholdigt grundvand

Indvinding af drikkevand fra kalkmagasiner begrænses af forekomsten og udbredelsen af saltholdigt grundvand. Den ferske ressource i kalken påvirkes både af menneskeskabte kilder på jordoverfladen og naturlige hydrogeologiske processer i jorden (se afsnit 3.4 og 3.5). I kalkmagasiner er kloridindholdet i grundvandet således en meget væsentlig kemisk parameter. Som tidligere beskrevet er baggrundskoncentrationen af klorid i grundvandet under 30 mg/l, mens grænseværdien for kloridindholdet i drikkevand er 250 mg/l og i Larsen & Berger (2006) defineres en grundvandstype i kalk med forhøjet indhold af natriumklorid ved et kloridindhold > 250 mg/l og et natriumindhold > 175 mg/l. Klorid er et konservativt stof i grundvandet der er kemisk inaktivt og dermed ikke omdannes til andre stoffer eller indgår i kemiske reaktioner med sedimentet. Ofte er der i grundvand med et forhøjet indhold af natriumklorid også forhøjede koncentrationer af magnesium (Mg), strontium (Sr) og fluor (F) som enten skyldes forekomsten af havvand eller geokemiske reaktioner og frigivelse af stofferne.

I områderne med indvinding fra kalkmagasiner i Danmark kan et højt kloridindhold i grundvandet stamme fra både naturlige og menneskeskabte kilder. Hvis der i et område er flere forskellige kilder, vil det resultere i en akkumuleret kloridkoncentration i grundvandet. Indvinding fra kalkmagasiner foregår blandt andet i nogle af de tættest befolkede områder i landet med relativ lille grundvandsdannelse. Her er der et stort behov for drikkevand, og der foregår derfor en kraftig indvinding med risiko for optrængning af salt grundvand. Samtidig er risikoen for påvirkning af grundvandskemien fra vejsaltning også stor på grund af urbaniseringen og det tætte vejnet. Modellsimuleringer i et område i Nordøstsjælland (Vestegnens Vandsamarbejde) viste at et tab på 15 % af vejsaltet til grundvandet vil resultere i at kloridindholdet i kalkmagasinerne under bynære områder generelt vil stige med 25-40 mg/l over de næste 20-40 år, mens der ved vejbanefletninger af de større veje kan tilføres op til 125 mg klorid per liter på grund af vejsaltning (Kristiansen m.fl., 2009).

3.6.3 Naturlige kemiske processer

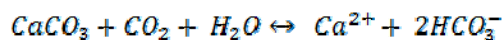
Redoxprocesser

I kalkmagasiner, ligesom i alle andre typer grundvandsmagasiner, er redoxprocesser afgørende for den kemiske tilstand af grundvandet, specielt i forhold til at vurdere kalkmagasinernes nitratsårbarhed. Redoxprocesserne medfører blandt andet at grundvandssedimentets indhold af reducerende stoffer (pyrit, jern(II) og organisk stof) langsomt ilttes ved hjælp af grundvandets indhold af iltende stoffer (ilt og nitrat), som udvaskes fra jordoverfladen. Redoxprocesserne foregår naturligt i grundvandet, men accelereres af den menneskeskabte forurening med nitrat (se beskrivelsen af pyritoxidation i næste afsnit under kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter).

Redoxtilstanden af grundvandet vurderes i forhold til de redoxfølsomme stoffer: ilt, nitrat, jern, mangan, sulfat, svovlbrinte, metan og ammonium blandt andet ved beregning af vandtypen, sedimentkemiske målinger af nitratreduktionskapaciteten og vurdering af dybden til redoxgrænsen efter anvisningerne i Geo-vejledning nr. 5 og 6 (Hansen m.fl., 2009a; Hansen m.fl., 2009b).

Kalk ligevægt

Den mest dominerende kemiske proces i grundvandet i kalkmagasinerne er reaktionen mellem karbonatminerallerne og kuldioxid i det nedsivende vand:



I områder hvor der kun er en lav grad af syreproduktion fra naturlige processer i jordbunden, vil kuldioxid kontrollere indholdet af calcium og hydrogenkarbonat (alkaliniteten) i grundvandet. Her vil koncentrationen af calcium typisk ligge under 100 mg/l og bikarbonat under 300 mg/l. Denne grundvandstype findes hovedsagelig hvor grundvandsmagasinerne er artesiske (Larsen & Berger, 2006).

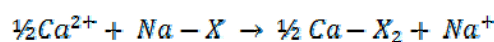
Udfældning af jernholdige karbonater

I reduceret grundvand i kalkmagasiner forekommer der ofte opløst jern og mangan. Indholdet af jern er sandsynligvis kontrolleret af udfældning af jernholdige karbonater som f.eks. siderit, FeCO_3 .

Ionbytning

Ionbytningsprocesser er almindelige i kalkmagasiner da der ofte ikke er ligevægt mellem saltindholdet i vandfasen i forhold til den faste fase.

Ionbyttet grundvand ($\text{Na}/\text{Cl} > 1,25$ målt i milliekvivalenter) ses når fersk grundvand bringes i kontakt med marine aflejringer, som har en stor koncentration af natrium adsorberet på overfladen af mineralerne. Ionbyttet grundvand dannes ved følgende proces:



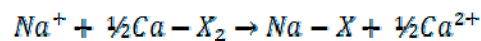
Hvor $-\text{X}_2$ er symbolet på en udbytningsplads på sedimentet i grundvandsmagasinet.

Ionbyttet grundvand kan også defineres ved et Na/Ca (målt i milliekvivalenter) der er større end 1 og et kloridindhold der er mindre end 50 mg/l (Larsen & Berger, 2006).

Ionbyttet grundvand har ofte en forhøjet pH-værdi (8-9) da ionbytningen og adsorption af calcium medfører en øget opløsning af kalk.

Omvendt ionbytning

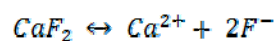
Omvendt ionbytning i grundvandet ($Na/Cl < 0,75$ målt i milliekvivalenter) finder sted ved stigende natriumkoncentrationer, dvs. når saltholdigt vand infiltrerer et mere ferskt grundvands sediment. Omvendt ionbyttet grundvand ses således ved saltvandsindtrængning eller diffusion fra det underliggende salte grundvand. Omvendt ionbyttet grundvand kan også dannes ved infiltration af natriumrigt vand fra jordoverfalden som f.eks. kan skyldes vejsaltning eller andre saltkilder ved jordoverfladen. Omvendt ionbyttet grundvand dannes ved følgende proces:



Frigivelse af fluorid

Fluoridholdigt grundvand i kalkmagasiner skyldes opløsning af fluoridholdige mineraler såsom fluorit/flussspat (CaF_2) eller fosforit ($Ca_5(PO_4,CO_3,OH)_3F$). Fosforit kan have en varierende kemisk sammensætning. Fosforit findes hovedsagelig i såkaldte "hardgrounds" (kalkbænke der er cementerede som følge af sedimentationsstop og erosion), mens fluorit findes spredt i kalken, især i skrivekridt.

Grænseværdien for fluorid i drikkevand er 1,5 mg/l. Ved koncentrationer over 1,5 mg/l er fluoridkoncentrationen sandsynligvis styret af mineral-ligevægte i kalkmagasinerne. F.eks. vil fluorit reagere efter følgende reaktion:



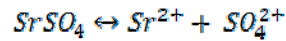
Ionbyttet grundvand kan medføre forhøjede koncentrationer af fluorid hvis grundvandet er i kemisk ligevægt med mineralet fluorit (CaF_2) på grund af reduktionen af calcium koncentrationen som følge af ionbytningen (Larsen & Berger, 2006).

Frigivelse af strontium

Der findes ingen danske grænseværdier for strontium i drikkevand. Strontium i grundvandet findes ofte i tilknytning til kalkmagasiner. Specielt er der fundet høje koncentrationer (20-50 mg/l) af strontium i grundvandet i flere filtre i skrivekridtet ved Køge Bugt. Til sammenligning kan nævnes at koncentrationen af strontium i havvand er på ca. 8 mg/l (Larsen & Berger, 2006).

Et højt strontiumindhold i grundvandet stammer sandsynligvis fra den naturlige rekrySTALLISERING af aragonit til calcit hvor urenheder som strontium og magnesium frigives til grundvandet (Watertech, 2005).

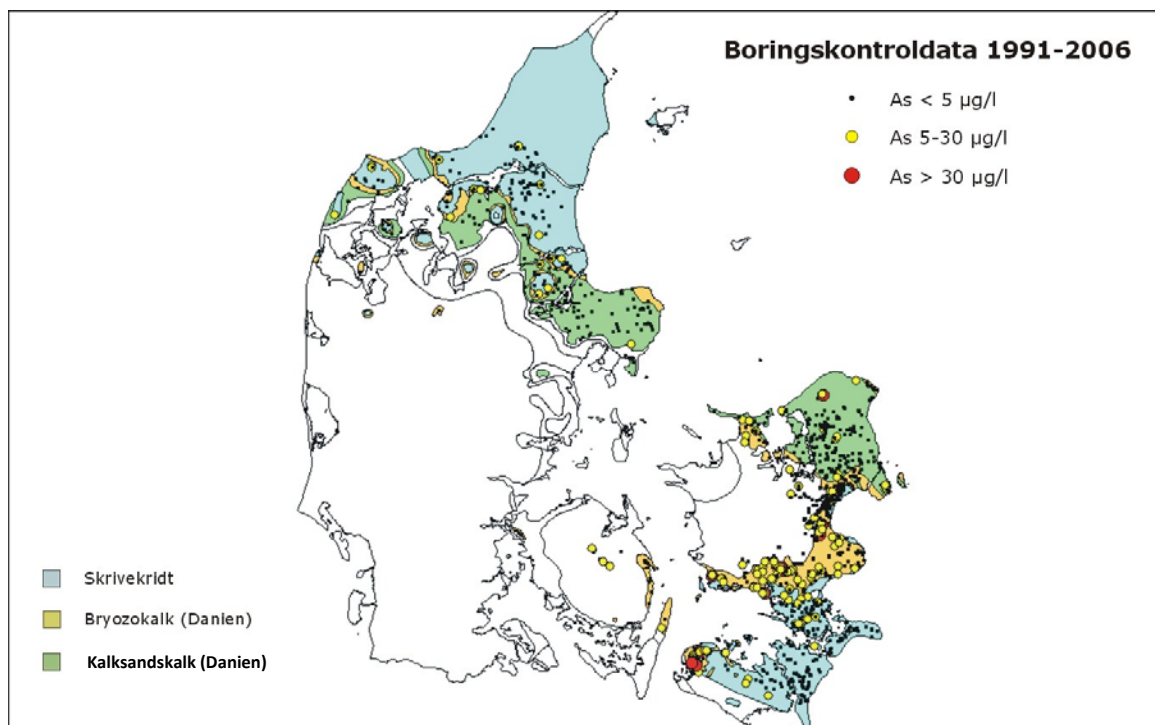
Det tyder på (Larsen & Berger, 2006) at koncentrationen af strontium i grundvandet også er kontrolleret af udfældning af strontium-sulfat mineralet coelestin (SrSO_4):



Ionbytning af grundvand i kalkmagasiner kan også resultere i frigivelse af strontium til grundvandet ved desorption af strontium fra overfladen af mineralerne. Denne proces kan forløbe indtil der er opnået mætning med hensyn til strontianit (SrCO_3).

Frigivelse af arsen

Grænseværdien for arsen i drikkevand er på 5 $\mu\text{g/l}$, og blev i 2001 nedsat fra 50 $\mu\text{g/l}$ på grund af en række veldokumenterede sundhedsskadelige virkninger. På Figur 40 ses den geografiske fordeling af arsen koncentrationer i boreriger som er filtersat i kalkmagasiner. Arsen koncentrationen i grundvandet er højere end grænseværdien på 5 $\mu\text{g/l}$ for drikkevand i 14 % af borerigerne (Kjøller m.fl., 2009). De højeste koncentrationer af arsen i kalkmagasinerne findes især på den nordvestlige del af Lolland, på Sydsjælland og Nordvestsjælland, på Stevns halvøen samt i den sydlige del af området langs Køge Bugt. På Falster og Møn samt i det meste af Nordsjælland er koncentrationerne under grænseværdien. I Jylland og på Fyn forekommer der enkelte steder koncentrationer af arsen over 5 $\mu\text{g/l}$, men generelt indeholder grundvandet fra kalken her sjældent koncentrationer af arsen over grænseværdien.

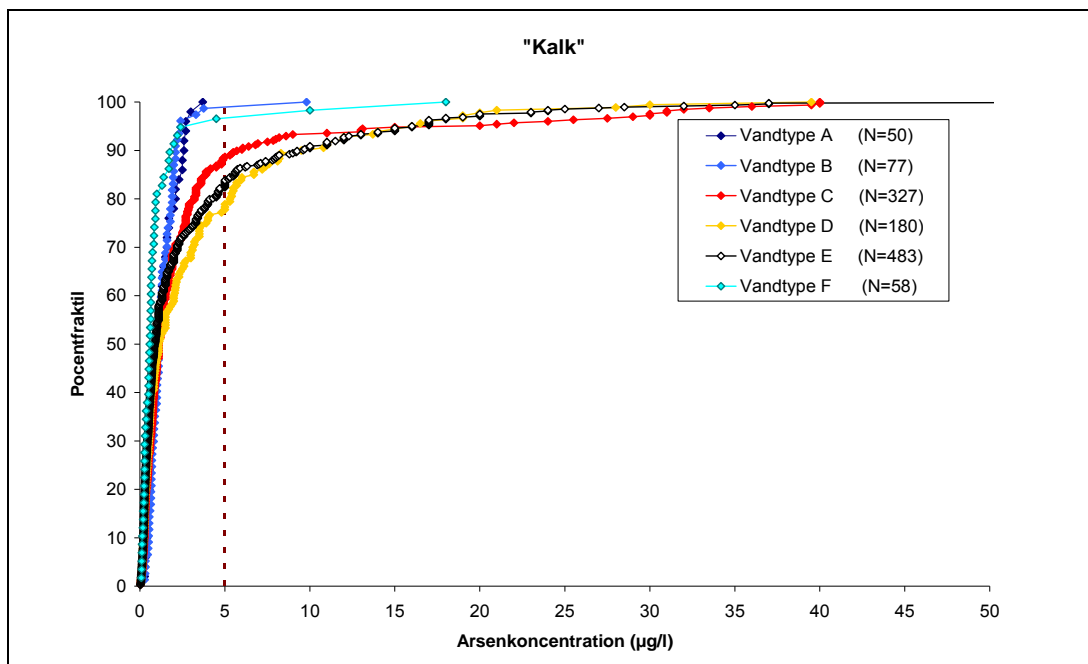


Figur 40. Geografisk fordeling af arsen koncentrationer i kalkmagasiner fordelt på kalktyper. Datagrundlaget inkluderer filtersætning i bjergarter med symbolerne k, kk, sk, dk, bk, lk, zk og z i PCJupiter (modificeret efter Kjøller m.fl., 2009).

I kalkmagasiner findes arsen opløst i det reducerede grundvand som også indeholder opløst reduceret jern (se Figur 41). Arsen forekommer hovedsagelig som As(III) i kalken, mens As(V) typisk kun udgør 10-20 %. De primære kilder til arsen i grundvandet i kalken er

sulfider og jernoxider. Arsen frigives fra sulfiderne under iltede redoxforhold, og bindes efterfølgende på især jernoxider. Efterfølgende frigivelse af arsen fra jernoxiderne foregår sandsynligvis ved en reaktiv opløsning af jernoxiderne med infiltrerende grundvand med reaktivt organisk stof der fungerer som elektrondonor.

Detaljerede feltundersøgelser af forekomst og fordeling af arsen i et kalkmagasin ved Køge har vist at arsen frigøres fra sedimenterne i den øvre del af kalkmagasinet. Den væsentligste kilde til arsen er jernoxider der er blevet reduceret i den øvre del af kalkmagasinerne. Reduktionen sker som følge af oxidation af organisk materiale der udvaskes fra de glaciale dæklag. I Køge Ådal udgøres dæklagene af glaciale sedimenter og smeltevandssedimenter samt postglaciale enheder af eksempelvis tørv.



Figur 41. Fordeling af arsen i seks definerede redox vandtyper (efter Kjøller m.fl., 2009).

I Figur 42 er vist arsen koncentrationer af As-tot og As(V) i seks boringer i det intensivt undersøgte område ved Køge Å. Koncentrationen af As(III) udgør differencen mellem As-tot og As(V). Der optræder lave arsen koncentrationer i de glaciale sedimenter, men med det højeste indhold under tørveaflejringerne. I de øverste meter af kalken ses et stigende indhold af As(V) og As(III) med dybden.

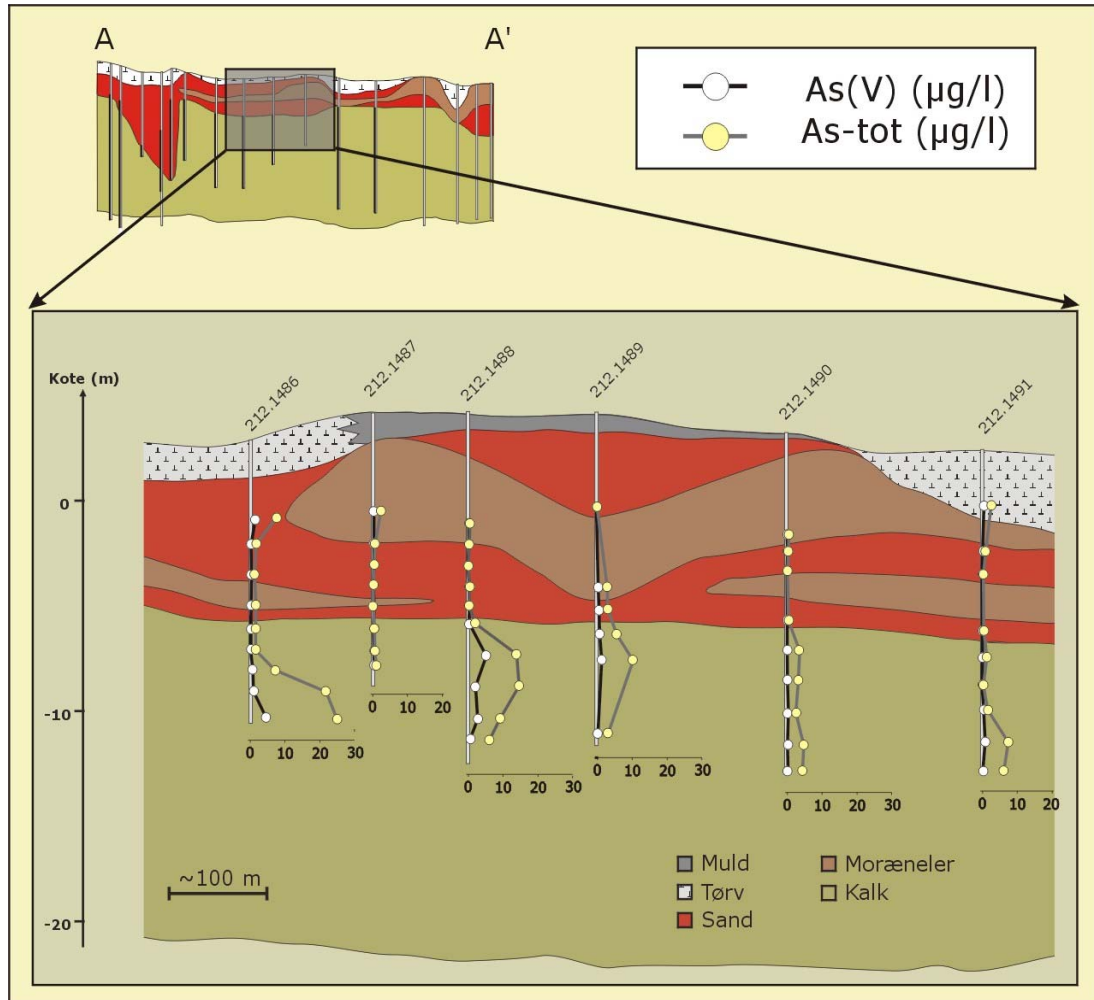
Frigivelse af radioaktive stoffer

Radioaktivitet i dansk grundvand stammer overvejende fra to kilder:

- Udvasning af radioaktive stoffer fra den faste fase i undergrunden
- Atmosfærisk deposition af radioaktive stoffer

Radioaktivitet i grundvandet stammer hovedsagelig fra naturlige kilder, idet f.eks. forurening fra forsøg med atomvåben ikke er væsentlig i forhold til grundvandskvaliteten. Forhøjet indhold af alfa-radioaktivitet i dansk grundvand skyldes hovedsagelig uran i vandet. Grænseværdien for den samlede strålingsdosis i grundvand er 0,1 millisievert per år ifølge

EU's Drikkevandsdirektiv. En undersøgelse af radioaktive isotoper i dansk drikkevand (Miljøstyrelsen, 2006) konkluderede at indholdet er langt under EU's kriterium for drikkevand. Det er bemærkelsesværdigt at de højeste værdier for radioaktivitet er fundet i kalkmagasiner på Sjælland og på Djursland (Miljøstyrelsen, 2006).



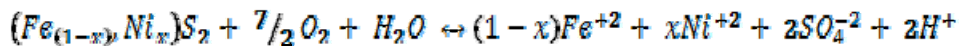
Figur 42. Koncentrationer af As-total og As(V) i seks undersøgelsesboringer syd for Køge Å. As(III) udgør differencen mellem As-total og As(V) (efter Kjøller m.fl., 2009).

3.6.4 Kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter

Pyritoxidation, barometerånding og frigivelse af nikkel

Nikkel i grundvandet kan udgøre et kvalitetsproblem for vandforsyninger i en stor del af det østlige Sjælland (især i Køge Bugt området) hvor der indvindes fra skrivekridt, Danienkalk og Lellinge Grønsand Formationen. Grænseværdien for nikkel i drikkevandet er 20 µg/l. Høje koncentrationer af nikkel i grundvandet forekommer især i områder hvor kalken er højtliggende under tynde glaciale dæklag, og hvor der er sket store sænkninger i grundvandsstanden i de glaciale dæklag som følge af indvinding (Kjøller m.fl., 2006).

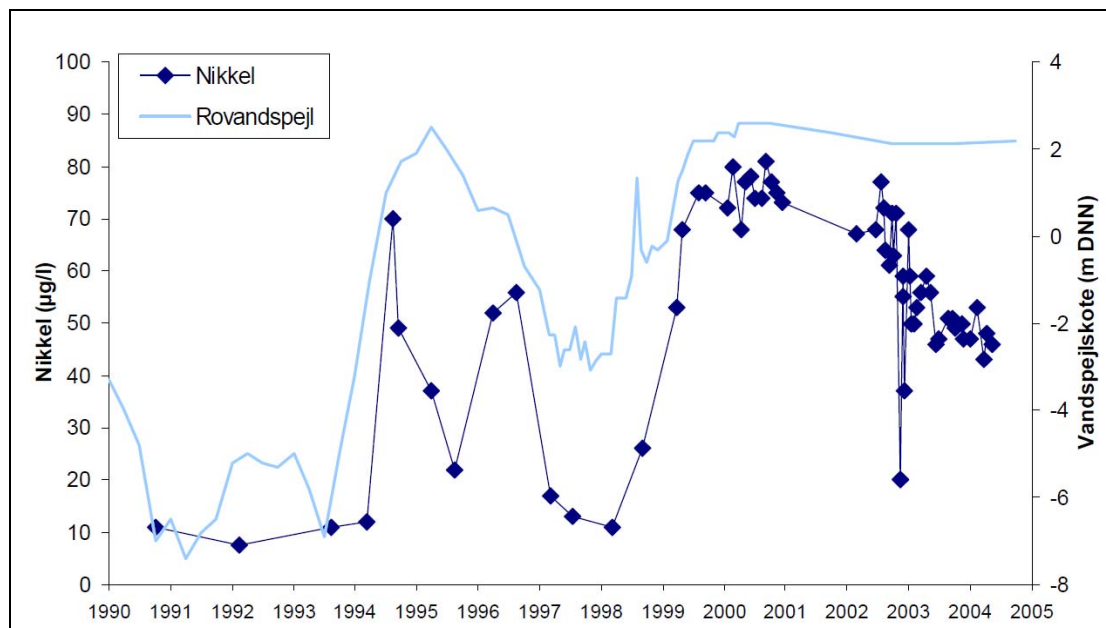
Høje koncentrationer af nikkel i grundvandet i kalkmagasiner skyldes frigivelse af nikkel fra sulfidmineraller ved pyritoxidation:



Her angiver (1-x) den støkiometriske andel som jern udgør af de divalente ioners plads i pyritgitteret, hvor den resterende del (x) udgøres af nikkel (Kjøller m.fl., 2006).

Oxidationen af de nikkelholdige sulfidminerale kan forceres af barometerånding. Barometerånding skyldes det fænomen at atmosfærens naturlige trykvariationer forårsager transport af atmosfærisk luft med ilt gennem borer eller andre huller i gastætte dæklag, således at der er fri passage fra atmosfæren til poreluften i den umættede zone under dæklagene. Iltten, som hermed pumpes ind i den umættede zone, forårsager at der sker oxidation af nikkelrige sulfider (som f.eks. pyrit) hvilket fører til forhøjede koncentrationer af nikkel og sulfat i grundvandet. Desuden vil koncentrationen af calcium stige som følge af syreproduktion ved pyritoxidation hvilket kan føre til dannelse af gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

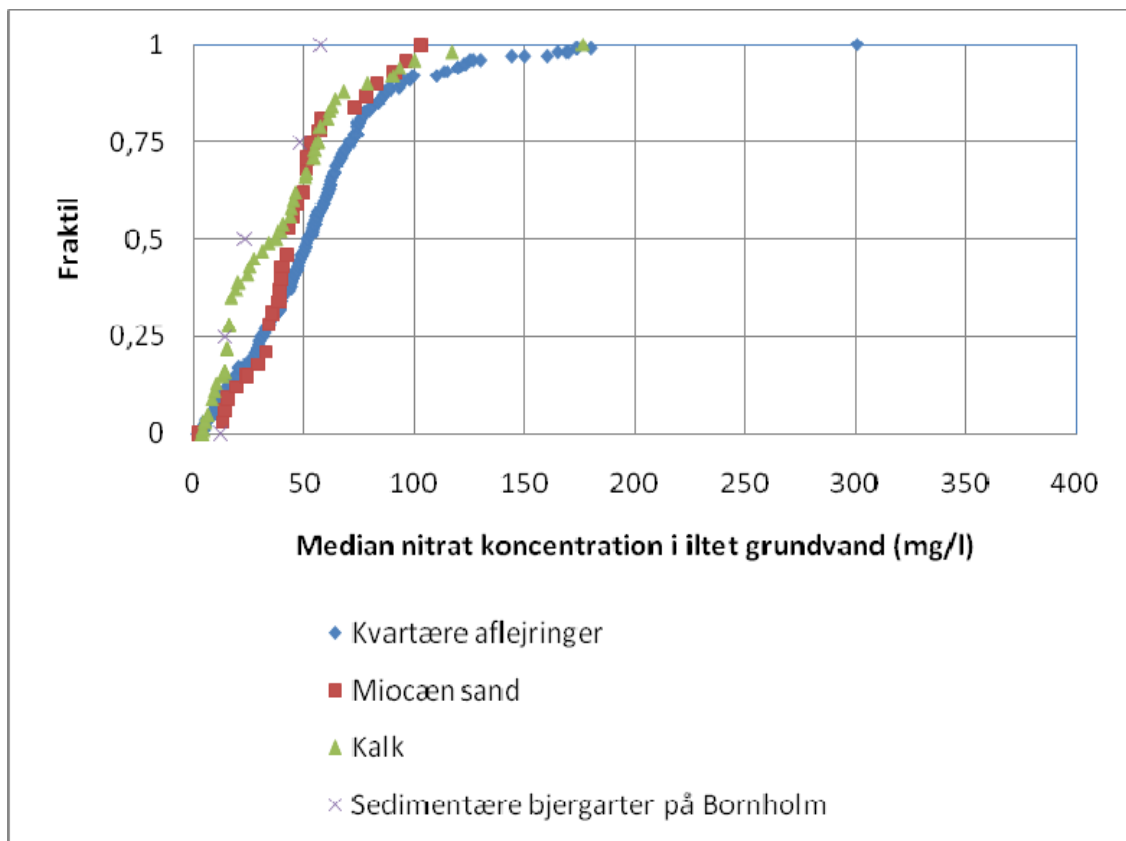
Nikkel der frigøres fra sulfidminerale ved f.eks. pyritoxidation, vil efterfølgende bindes sekundært til manganoxider, lerminerale eller karbonater. Den sekundært bundne nikkel kan frigøres til grundvandet igen ved hævnning af grundvandsspejlet i områder der har været påvirket af barometerånding (se Figur 43). Lokale hydrogeologiske forhold, som forekomster og mægtigheder af indstrømningszoner og hydrauliske barrierer som f.eks. flintlag, er af stor betydning for effekten af den sekundære frigivelse. Modellsimuleringer har vist at mobilisering af nikkel over større afstande (> 500 m) i meget særlige tilfælde (høj sprækkeapertur og –strømningshastighed samt høj kildestyrke) kan resultere i overskridelser af grænseværdien på 20 µg/l inden for en kortere årrække (< 50 år) (Kjøller m.fl., 2006).



Figur 43. Eksempel på synkron stigninger i grundvandsspejl og nikkel koncentrationer i indvindingsboring (DGU nr. 207.1335) ved Brøndby Vandforsyning på grund af tidligere barometerånding og efterfølgende sekundær frigivelse af nikkel ved vandspejlshævnninger (efter Kjøller m.fl., 2006).

Udvaskning af nitrat

Det er velkendt at landbrugsaktiviteter resulterer i udvaskning af nitrat til grundvandet i Danmark. Nitratindholdet i iltet grundvand er en direkte refleksion af nitratudvaskningen fra rodzonen til grundvandet da nitraten endnu ikke er omsat. Nitratindholdet i iltet grundvand i kalkmagasinerne overskrider grænseværdien på 50 mg/l for drikkevand i 34 % af målingerne, se Figur 44. Dette resultat er baseret på udtræk af data fra PCJupiter fra oktober 2008 fra overvågningsfiltre (GRUMO) filtersat i kalk (bjergartssymbolerne: bk, sk, k, kk, lk og zk). Generelt er nitratindholdet i iltet grundvand i kalkmagasinerne lavere end i de kvartære sandmagasiner som overvejende er smeltevandssand. Udvaskningen af nitrat til kalkmagasinerne må derfor formodes at være lavere end til de kvartære sandmagasiner hvilket blandt andet skyldes forhold omkring intensiteten af landbrugsproduktionen, jordbundstypen og nettonedbøren.



Figur 44. Fordelingen af nitratindholdet i iltet grundvand i overvågningsboringer (GRUMO) i forhold til bjergartstypen ved filteret. Dataudtræk fra PCJupiter fra oktober 2008. Kalk repræsenterer bjergartssymbolerne: bk, sk, k, kk, lk og zk.

Reduktion af nitrat

Dobbeltporøsitet/-permeabilitet i kalkmagasiner med matrix og sprækketransport medfører at omsætningen af nitrat foregår anderledes end i sandede magasiner, hvor der kun foregår matrixstrømning. Der har i kortlægningsundersøgelser ikke været fokus på at måle nitratreduktionskapaciteten af sedimentet i kalkmagasinerne (pers. komm. Vibeke Ernstsén). Dette skyldes sandsynligvis at målinger af nitratreduktionskapacitet ikke kan tillægges stor betydning, hvis grundvandsstrømningen hovedsagelig foregår i sprækker med relativ stor

strømningshastighed i forhold til reaktionshastighed af de nitratreducerende stoffer, hvilket medfører kemisk uligevægt mellem den faste fase og grundvandet.

Ved kortlægning af et kalkmagasin ved Thy med frit vandspejl (Jørgensen, 2002) blev der opstillet en tolkningsmodel for forekomsten af nitrat i grundvandet, blandt andet baseret på statistisk behandling af 448 nitratanalyser fra private borer og brønde. Her blev kalkmagasinet overordnet set tolket opdelt i 3 zoner:

1. Tynd iltzone på < 5m hvor sprækker og matrix er rensset for nitratreduktionskapacitet, og hvor grundvandet er ilt- og nitratholdigt.
2. Meget tyk anoxisk zone på op til 30 m hvor nitraten er under omsætning og ilten er opbrugt. I denne zone foregår omsætningen af nitrat i matrix hvor nitratreduktionskapaciteten langsomt opbruges.
3. Reduceret zone med nitratfrit grundvand.

Vurdering af nitratsårbarhed

En central del af grundvandskortlægningen er vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed og udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder samt indsatsområder med hensyn til nitrat.

Nitratsårbarheden af grundvandsmagasiner er en funktion af fire betydende faktorer som beskrevet i Geo-vejledning nr. 5 "Vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed" (Hansen m.fl., 2009a):

- Nitratindholdet i grundvandet
- Egenskaber ved dæklag
- Egenskaber ved grundvandsmagasin
- Grundvandets strømningsforhold

På grund af de særlige forhold der hersker i kalkmagasiner, omtales kortlægning af disse specifikt i zoneringsvejledningen (Miljøstyrelsen 2000), og der lægges blandt andet op til at indsatsområder med hensyn til nitrat kan udpeges alene på grundlag af eksisterende data, hvis følgende tre kriterier er opfyldt:

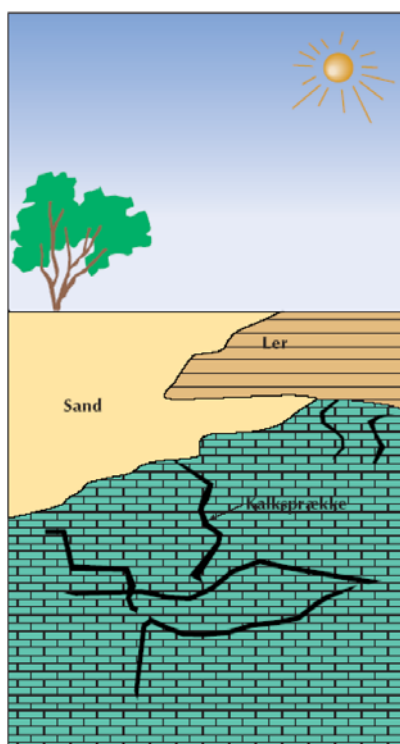
- Grundvandsmagasinet findes i kalk
- Det kan fastslås at der ikke er beskyttende dæklag med reduktionspotentiale
- Grundvandsstrømmen er kendt

Er der forhøjet indhold af nitrat i grundvandet i sådan et område, kan et indsatsområde med hensyn til nitrat fastlægges som det grundvandsdannende opland til magasinet, uden supplerende kortlægning. I praksis må det dog forventes at andre overvejelser om kalkmagasinet og dets udnyttelse bør inddrages, før indsatsområderne med hensyn til nitrat udpeges.

Nitratsårbare kalkmagasiner er karakteriseret ved forekomsten af nitrat i grundvandet, tynde dæklag (< 15 m), lille nitratreduktionskapacitet af dæklag og grundvandsmagasin og en ofte relativ stor grundvandsdannelse.

Specielt på Sjælland (højre side af Figur 45) er en tykkelse af lerdæklagene på 5-15 m med god reduktionskapacitet tilstrækkelig til at sikre at de dybe kalkmagasiner ikke er nitratsårbare (Hansen m. fl., 2009a).

På Djursland, omkring Aalborg og i Nordjylland (venstre side af Figur 45) findes der opsprækkede kalkmagasiner med frit grundvandsspejl og meget tynde dæklag (type VI, VII og VIII af regionale grundvandsmagasiner fra Miljøstyrelsen, 2000). Dette medfører at f.eks. en nitratforurening hurtig kan brede sig, og at kalkmagasinerne her ofte er nitratsårbare (Århus Amt, 2004; Nordjyllands Amt, 2005; MC Aalborg, 2010).



Figur 45. Principskitse af beskyttelsen af kalkmagasiner af lerdæklag som er en af de 4 faktorer der ligger til grund for vurderingen af nitratsårbarheden. Venstre side af figuren viser et ubeskyttet kalkmagasin, mens højre side viser et velbeskyttet kalkmagasin (grafik: Lærke Thorling).

Udvaskning af miljøfremmede stoffer

Kombinationen af ringe beskyttelse fra dæklag (ved f.eks. grove aflejringer eller opsprækket moræneler over kalken) og stor befolkningstæthed over kalkmagasinerne øger risikoen for udvaskning af miljøfremmede stoffer til grundvandet. F.eks. viser resultater fra grundvandsovervågningen det største fund af pesticider og nedbrydningsprodukter i områder med opsprækket ler over kalken og stor befolkningstæthed (Thorling, 2010).

4. anbefalinger til kortlægning af kalkmagasiner

Dette kapitel er tænkt som et opslagsværk for konkrete problemstillinger ved kortlægningen af kalkmagasiner med anbefalinger til deres løsninger.

Kapitlet er inddelt i følgende fire afsnit svarende til underinddelingen af afsnit 2.2 om de særlige forhold ved kalkmagasiner:

- 4.1 Kortlægning af kalkformationerne: herunder kalkoverfladen, adskillelse af formationer og strukturer samt særlige problemstillinger i forbindelse med begravede dale og saltstrukturer.
- 4.2 Kortlægning af strømningsforholdene i kalken: herunder sprækkemønstre, lavpermeable horisonter, potentialekortlægning og oplandsberegninger.
- 4.3 Kortlægning af saltvandsgrænsen i kalkmagasiner.
- 4.4 Kortlægning af kemiske stoffer i kalken: herunder naturligt forekommende problemstoffer og kemiske stoffer påvirket af menneskelig aktivitet samt særlige forhold ved overvågning af kalkmagasiner.

4.1 Kortlægning af kalkformationerne

Kalkens hydrogeologiske egenskaber som grundvandsmagasin er meget forskellig fra sandmagasiner, og derfor er det vigtigt med en forståelse af kalkoverfladens forløb og kalkformationernes interne lagdeling. Det gælder både i forhold til vurdering af selve ressourcen og i forhold til vurdering af dens naturlige beskyttelse fra dæklag eller eventuelle interne lag. De forskellige kalktyper kan også have meget forskellige hydrogeologiske egenskaber og betydning i forhold til f.eks. indvinding og generel vandkvalitet samt beliggenheden af overgangszonen mellem fersk og salt grundvand.

Fastlæggelse af kalkoverfladen som en del af kortlægningen er derfor vigtig for at kunne opstille en fornuftig grundvandsmodel, ligesom kendskab til lithologiske grænseflader i kalken som f.eks. grænsen mellem Danienkalk og skrivekridt og større flint- og mergellag kan være vigtige informationer at få indarbejdet i en numerisk model.

4.1.1 Kortlægning af kalkoverfladen

Problemstillinger

Kalkoverfladens nuværende beliggenhed er, som beskrevet i afsnit 3.1 og 3.2, resultatet af omfattende tektonik og erosion. De processer der har formet overfladen betyder at dens elevation kan variere meget over korte afstande og det er vigtigt for valg af metoder i kortlægningen at have et overordnet indtryk af kalkoverfladens forløb.

De kort der findes over prækvartæroverfladen i Danmark, og som blandt andet inddrager boringsoplysninger, giver et bud på kalkoverfladens forløb hvor denne kun overlejres af kvartære sedimentter. Der er imidlertid også områder hvor kalken overlejres af yngre terciære

re sedimenter, og hvor prækvartærkortet således ikke viser kalkoverfladens forløb. Boringer og, i nogle tilfælde, seismiske linjer kan for alle områder anvendes til at få et groft første indtryk af kalkoverfladens forløb, men datamængden er sparsom idet antallet af boringsoplysninger falder med dybden og de seismiske linjer er ganske få.

Kalkoverfladen kan generelt kortlægges både med elektriske og elektromagnetiske metoder, seismiske metoder og logging. Ved alle metoder er der imidlertid en række særlige problemstillinger man er nødt til at forholde sig til i forbindelse med kortlægning af kalk.

Seismiske metoder

For de forskellige seismiske metoder varierer indtrængningsdybden og dermed anvendeligheden meget:

Eksisterende konventionel olieseismik:

- Generelt dårlig dækning med relativt få eksisterende linjer.
- Datakvaliteten i toppen af data er som regel for ringe til at kalkoverfladen kan erkendes.

Højopløselig refleksionsseismik:

- Der er meget få eksisterende linjer i områder med kalkmagasiner.
- Kalkoverfladen kan typisk kun identificeres som en selvstændig reflektor ved en beliggenhed dybere end 40-50 m.

Refraktionsseismik:

- Kan benyttes både ved højt- og dybtliggende kalkoverflade.
- Kræver en markant hastighedskontrast mellem kalken og de overliggende lag. Hård moræneler kan have seismiske hastigheder sammenlignelige med kalken og begrænse metodens anvendelighed.
- Hvis de aktuelle seismiske hastigheder ikke stiger med dybden, er der risiko for at dybden til laggrænser estimeres forkert med metoden.

Overfladebølgeseismik:

- Erfaringerne er hidtil meget begrænsede.
- Indtrængningsdybden er typisk begrænset til 15-20 m.
- Kræver kontrast mellem lagenes S-bølgehastighed.

S-bølge refleksionsseismik:

- Erfaringerne er hidtil meget begrænsede.
- Indtrængningsdybden og datakvaliteten kan være begrænset.

Logging

I boringer er kalkoverfladen som regel velbestemt. Er der imidlertid tvivl om beliggenheden, kan borehulslogging ofte bidrage til en præcis fastlæggelse af kalkens overflade:

- Elektriske og elektromagnetiske logtyper kan sjældent benyttes til at identificere kalkoverfladen. Ofte er der i kalkboringer ført en stål casing til toppen af kalken eller et stykke ned i denne som forstyrrer målingerne.
- Gammalogs er upåvirkede af en stål casing og kan næsten altid benyttes til identificering af kalkoverfladen med stor sikkerhed da kalk normalt har et lavere og mere ensartet gammaniveau end både sand (normalt lavt til moderat gammaniveau) og ler (normalt højt gammaniveau). Dog kan det forekomme at gammaniveauet kan være sammenligneligt i kalk og sand (hvis niveauet i sandet er meget lavt og niveauet i kalken i den høje ende) og dermed gøre det svært/umuligt at fastlægge kalkoverfladen præcist.

Elektriske og elektromagnetiske metoder

Fælles for de elektriske og elektromagnetiske metoder er at der skal være en vis modstandskontrast mellem de lag der ønskes kortlagt. I forhold til kortlægning af kalkmagasiner kan ringe modstandskontraster betyde følgende begrænsninger:

- Det kan være svært/umuligt at adskille ferskvandsmættede kalk- og sandmagasiner som begge har høje og sammenlignelige elektriske modstande.
- Det kan være svært/umuligt at adskille fede lere og saltvandsmættede kalkmagasiner som begge har lave og sammenlignelige elektriske modstande.
- Det kan være svært/umuligt at adskille kalkmagasiner med relativt lav elektrisk modstand (som f.eks. Lellinge Grønsand) fra moræneler med relativt høj modstand.

Generelt er TEM/SkyTEM god til at kortlægge oversiden af en god elektrisk leder (f.eks. saltvandsgrænsen eller fed ler med lav elektrisk modstand) og DC-sonderinger, MEP og PACES gode til at kortlægge oversiden af en dårlig elektrisk leder (f.eks. kalkoverfladen).

Herudover varierer indtrængningsdybden og dermed anvendeligheden for de enkelte metoder:

DC-sonderinger

- Stor indtrængningsdybde afhængig af længde af udlæg.

PACES

- Indtrængningsdybden er begrænset til ca. 20 m.

MEP

- Indtrængningsdybden er begrænset til typisk 40-60 m.

TEM/SkyTEM

- God indtrængning, kan være op til 300 m.

Georadar

- Indtrængningsdybden er typisk begrænset til 10-20, op til 30 m under gode forhold.
- Kan kun anvendes i områder med sandede og ferske aflejringer over kalken da ler, moræneler og salt grundvand forhindrer nedtrængning.

Da både de forskellige seismiske, elektriske og elektromagnetiske metoder også har forskellige fokusdybder, kan en af problemstillingerne i kortlægningen være hvilke oplysninger det er vigtigst at indhente om grundvandsmagasinet; f.eks. dets nedre afgrænsning, omfanget af dæklag og deres beskaffenhed eller strukturer/tektonisk påvirkning.

Anbefalinger

Som det første anbefales det at udføre borehulslogging i en dyb boring (ny eller eksisterende) for at fastlægge beliggenheden af saltvandsgrænsen, vurdere nytten af elektriske og elektromagnetiske metoder og til generel korrelation og samtolkning mellem geologi og geofysik.

Ved en forholdsvis højtliggende kalkoverflade kan elektriske (DC-sonderinger, MEP og PACES) og elektromagnetiske metoder (TEM/SkyTEM) anvendes til at skelne kalkoverfladen fra de overliggende dæklag. Det er dog, som nævnt ovenfor, betinget af at der er en modstandskontrast mellem lagene. Med hensyn til DC-sonderinger er der tale om relativt tidskrævende punktmålinger, som dog kan være nyttige f.eks. ved kildepladsundersøgelser. Ved manglende modstandskontraster mellem kalken og dæklagene kan de mest overfladenære seismiske metoder (overfladebølgeseismik, S-bølgeseismik, refraktionsseismik) eller georadar benyttes. For disse metoder gælder at de er relativt ressourcekrævende i forhold til dækningsgraden og derfor sjældent bliver anvendt til større områder, men oftere til en fokuseret del af kortlægningen. S-bølgeseismik og georadar har dog den fordel at de tillige kan bidrage med strukturel information om forholdene i og eventuelt over kalken.

Er kalkoverfladen dybereliggende kan DC-sonderinger, TEM/SkyTEM, reflektionsseismik og refraktionsseismik benyttes. Hvor TEM/SkyTEM giver god fladedækning bidrager reflektionsseismik yderligere med strukturel information om forholdene i og eventuelt over kalken.

I Tabel 1 er givet en vejledende oversigt over de forskellige geofysiske kortlægningsmetoders anvendelighed i forhold til kalkoverfladens højdeforhold.

Dybde til Kalkoverfladen	Primær anbefaling	Alternativ metode
0-20 m	TEM/SkyTEM PACES MEP Refraktionsseismik	DC-sonderinger Overfladebølgeseismik S-bølgeseismik Georadar
20-50 m	TEM/SkyTEM MEP Refraktionsseismik	DC-sonderinger S-bølgeseismik Refleksionsseismik
> 50 m	TEM/SkyTEM Refleksionsseismik Refraktionsseismik	DC-sonderinger

Tabel 1. Oversigt over anvendelige kortlægningsmetoder i forhold til kalkoverfladens dybdeforhold.

I forbindelse med kortlægning af kalkoverfladen er det altid relevant og informativt at udføre borer. Valg af boremetode afhænger af formålet med boringen og blandt andet muligheder for udtagning af gode prøver. I borehullet kan der udføres diverse geofysiske logs som kan bidrage med oplysninger til flere dele af kortlægningen (se også Appendix C.). Hvis der ikke etableres nye borer, kan der udføres logging i eksisterende borer. Er der tvivl om beliggenheden af kalkoverfladen, kan borehulslogging i mange tilfælde medvirke til præcist at fastsætte denne i boringen.

Valget af metoder til kortlægning af kalkoverfladen må bero på en samlet vurdering af problemstillingerne og den eksisterende viden om geologien omfattende både kalkformationerne og de overliggende lag. Er der forventeligt store mægtigheder af sand over kalken, vil elektriske og elektromagnetiske metoder ikke være optimale. Tilsvarende gælder hvis der f.eks. kan forventes store mægtigheder af fedt ler over kalken sammen med en risiko for salt grundvand umiddelbart under kalkoverfladen eller relativt tæt på denne. Er der derimod forventeligt store mægtigheder af ler, moræneler og morænesand over kalk med fersk grundvand, vil metoderne være velegnede til kortlægning af kalkoverfladen, og generelt anbefales fladedækkende kortlægning med SkyTEM. Dog skal man være opmærksom på at TEM/SkyTEM metoden kan have svært ved at trænge igennem store mægtigheder af ler med meget lav modstand, og desuden ikke er velegnet til at kortlægge oversiden af et lag med høj modstand under tykke lag med lav modstand. I alle tilfælde vil det være en god ide at se kritisk på modstandsforholdene i et områdes forskellige bjergarter baseret på modstandslogs.

Som alternativ eller supplement til SkyTEM ved problemer med manglende modstandskontraster mellem de forskellige aflejringstyper anbefales det generelt at udføre refleksionsseismik, forudsat kalkoverfladen er relativt dybtliggende. Er der områder hvor kalken ligger højere og overfladen ikke kan identificeres, kan det være en mulighed at gennemføre en refraktionsseismisk tolkning af refleksionsseismiske rådata.

4.1.2 Adskillelse af kalkformationer

Problemstillinger

Da både de forskellige kalktyper, og forskellige interne enheder i de enkelte typer, som beskrevet i Kapitel 2. og 3. kan have meget forskellige hydrogeologiske egenskaber, er det vigtigt at kunne skelne dem fra hinanden og kortlægge deres udbredelse. Adskillelse eller identifikation af kalktyperne eller kalkformationerne vil i nogle områder kunne gøres allerede under opsamlingen af eksisterende viden gennem f.eks. boredatabasen Jupiter. Det er dog langt fra altid at de gennemborede kalklag er detaljeret beskrevet eller henført til en formation, og ofte vil der være et behov for supplerende kortlægning i forhold til adskillelse af formationer og interne enheder.

I afsnit 3.1.1 er det f.eks. beskrevet hvordan vandføringsevnen i Københavnsområdet er forskellig i de tre stratigrafiske enheder Øvre, Nedre og Mellem København Kalk samt i bryozokalken. Ligeledes er det vigtigt at kunne kortlægge lerede/merglede horisonter internt i Lellinge Grønsand Formationen og f.eks. skrivekridt. De lerede/merglede horisonter kan optræde som hydrauliske barrierer og have betydning for både vandføringsevnen, be-

skyttelsen af underliggende magasiner og graden af ferskvandsdannelse og -cirkulation og dermed beliggenheden af saltvandsgrænsen.

Endelig skal det nævnes at mange boringsbeskrivelser af Selandien-aflejringer er baseret på lithologi uden (korrekt) bestemmelse af formationen, dvs. uden eller med forkert tolkning af om der er tale om Kerteminde Mergel eller Lellinge Grønsand Formationen. Det er imidlertid vigtigt da Kerteminde Merglen f.eks. på Midtsjælland som regel ikke er vandførende, og kendskab til dens udbredelse, tykkelse og hydrauliske egenskaber derfor har stor betydning for vurderingen af beskyttelsen af et eventuelt underliggende grundvandsmagasin bestående af Lellinge Grønsand Formation samt for bestemmelsen af grundvandsdannelsen til dette (Klitten, 2003). Dog skal det nævnes at Kerteminde Merglen også kan være forkislet og opsprækket og dermed vandførende som det f.eks. ses på Østfyn (afsnit 3.5.3 og 3.5.5).

Anbefalinger

Det stærkeste geofysiske værktøj til at skelne mellem de forskellige kalkformationer samt interne enheder i formationerne er borehulslogging. De elektriske og elektromagnetiske metoder og refleksionsseismik kan også være anvendelige, men som beskrevet herunder vil opløseligheden af metoderne ofte være for ringe.

Logging og logstratigrafi

Borehulslogs giver præcise og højopløselige (ofte helt ned til decimeter-niveau) informationer om kalkens fysiske egenskaber. Ofte er det ikke alle, eller de samme, egenskaber som ændrer sig mellem de forskellige kalktyper eller interne enheder i kalken, men ved at måle mange forskellige parametre med et bredt sammensat logprogram øges mulighederne for en detaljeret kortlægning. I Appendix C gives forslag til sammensætning af logprogram til forskellige formål i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner.

I områder hvor der ikke eksisterer et entydigt erfaringsgrundlag for skelnen mellem kalktyper og interne enheder, anbefales det således at udføre borehulslogs i borer med en forholdsvis sikker beskrivelse af lagfølgen for at etablere et sådant grundlag i form af opstilling af en logstratigrafi.

Opstilling af en logstratigrafi kan være mere eller mindre detaljeret og bestå både i en beskrivelse af skift i logmønstre mellem forskellige kalkformationer og mellem interne enheder. I de områder hvor der i dag er opstillet logstratigrafi i Danien og Selandien kalk, er der imidlertid logget et ganske betragteligt antal borer (dvs. alt mellem 5-10 borer og op til flere hundrede), og det kan ikke forventes at kunne opstille troværdige korrelationer mellem interne enheder baseret på blot nogle få borer i et område. Det vil dog altid være gavnligt at undersøge om selv nogle få borer kan korreleres.

Opstilling og beskrivelser af detaljeret logstratigrafi for kalkaflejringerne i det danske landområde begrænser sig primært til Sjælland (Københavnsområdet, Nordøstsjælland og Midtsjælland), men også i Nordjylland er der gjort forsøg på opstilling af logstratigrafi for kalken. I Appendix C er givet en mere detaljeret gennemgang af karakteristika af overgangene mellem de forskellige kalktyper i form af variationer i logmønstre. Herunder skal blot summeres de hidtidige erfaringer:

- Kerteminde Mergel kan entydigt adskilles fra Lellinge Grønsand Formationen (Klitten, 2003).
- Lellinge Grønsand Formationen kan inddeles i otte log-stratigrafiske enheder (Klitten, 2003).
- Overgangen mellem Selandien og Danien kalk vil typisk kunne identificeres (Klitten, 2003).
- I København-Amager-Saltholm området er der opstillet en detaljeret logstratigrafi for København Kalk Formationen med inddeling af denne i tre lithologiske subsekvenser: Nedre, Mellem og Øvre København Kalk (Klitten m.fl., 1994; Olsen og Nielsen, 2002).
- Inden for afgrænsede områder i form af kildepladser kan der opstilles logstratigrafiske subsekvenser i kalksandskalken i Nordøstsjælland, men logmønstrene lader sig ikke korrelere fra kildeplads til kildeplads (Klitten og Wittrup, 2006).
- Grænsen mellem København kalk og bryozokalk kan identificeres sikkert i København-Amager-Saltholm området (Klitten m.fl., 1994; Olsen og Nielsen, 2002).
- Der foreligger ingen detaljerede beskrivelser af beskaffenheden af grænsen mellem kalksandskalk og bryozokalk ud fra log data, og det må forventes at den kan være svær at fastlægge.
- Der har ikke i København-Amager-Saltholm området kunnet opstilles en regional logstratigrafisk inddeling i underenheder for bryozokalken (Klitten m.fl., 1994).
- Overgangen mellem Danien kalk (København Kalk, kalksandskalk, bryozokalk) og skrivekridt kan typisk identificeres entydig (Olsen og Nielsen, 2002; Klitten og Wittrup, 2006).
- I de øvre dele af skrivekridtet, som er relevant for vandindvinding, har det vist sig svært at korrelere logs over større afstande (Nygaard, 1993).

Danienkalken kan også korreleres til de af Thomsen (1995) opstillede kokkolitzoner på baggrund af kokkolitanalyser. Den vertikale opløselighed i den biostratigrafiske kokkolitzonering er dog ikke nær så høj som inddelingen i lithologiske enheder baseret på logstratigrafi. Da kokkolitanalyse endvidere er en relativt tidskrævende og dermed også dyr metode, er den mere relevant som et eventuelt supplement til logstratigrafi end som et egentligt alternativ.

Elektriske og elektromagnetiske metoder

Da modstandsforskellene mellem de enkelte kalkformationer typisk er små, vil det som udgangspunkt ikke være muligt at skelne dem fra hinanden med elektriske og elektromagnetiske metoder. En vurdering af modstandsforholdene baseret på modstandslogs kan bidrage til at vurdere muligheden. Ved forekomst af Lellinge Grønsand Formation (eller Kerteminde Mergel der dog ikke regnes som en kalktype) over Danien kalk eller skrivekridt, kan modstandskontrasterne mellem aflejringerne dog være tilstrækkelige til kortlægning af grænsen, afhængig af mægtigheden af de enkelte enheder samt beskaffenheden af lagene over dem. Det er svært at angive præcise retningslinjer, men som tommelfingerregel kan lag af få meters mægtighed kortlægges tæt på overfladen med både MEP og TEM/SkyTEM (10-20 meters dybde), mens et dybere lag (50-70 meters dybde) måske skal have en mægtighed på 10 m eller mere for at kunne kortlægges med f.eks. TEM/SkyTEM.

Seismiske metoder

I refleksionsseismiske data af god kvalitet er den vertikale opløselighed i bedste fald 5-10 m. I praksis må man dog som udgangspunkt forvente at de enkelte enheder skal have en tykkelse på mindst 15-30 m for at kunne adskilles i seismikken som lag med en selvstændig reflektor for henholdsvis top og bund. Desuden skal man være opmærksom på at der i kalken, som følge af f.eks. ændringer i hyppighed af flintbænke, hærdningsgrad og lerindhold, ofte optræder mange mere eller mindre kraftige interne refleksioner. Det kan således være vanskeligt med sikkerhed at afgøre præcis hvilken refleksion der svarer til en formationsgrænse, ligesom man ikke kan gå ud fra at det nødvendigvis er den kraftigste refleksion som repræsenterer grænsen. Denne problemstilling knytter sig særligt til de forskellige typer af Danien kalk og skrivekridtet som i opbygning og beskaffenhed minder meget om hinanden, mens Lellinge Grønsand Formationen (og Kerteminde Mergel der dog ikke regnes som en kalktype) typisk adskiller sig mere fra de andre kalktyper.

4.1.3 Kortlægning af strukturer i kalken

Både storskala geologiske strukturer og interne strukturer i kalken kan have stor betydning for grundvandsdannelsen og grundvandets strømning i kalken. Det er derfor vigtigt at en afdækning af eventuelle overordnede strukturer tænkes ind i kortlægningen af kalkmagasiner.

Problemstillinger

Som beskrevet i blandt andet afsnit 3.2.3. og 3.1.1 følger grundvandsstrømningen i kalkmagasiner, eller i al fald kalkens hydrauliske egenskaber, i nogen grad den interne lagdeling og/eller bankestruktur i kalken. Det er derfor af stor betydning at få kortlagt eventuelle strukturer som folder, flexurer, forkastninger, hældende lag og banker i kalken for at kunne bestemme grundvandets strømning, og i sidste ende kunne etablere en brugbar grundvandsmodel.

Både folder, flexurer og forkastninger er ofte associeret med en høj grad af opsprækning af kalken og en deraf følgende øget vandføringsevne. Det kan have både positiv indvirkning i form af den større vandføringsevne, og negativ indvirkning i form af f.eks. øget risiko for optrængning/oppumpning af dybereliggende salt grundvand eller f.eks. nedtrængning af forurening.

Forkastninger kan imidlertid også optræde som hydrauliske barrierer gennem afskæring af vandførende horisonter, eller forårsage at dele af kalken med forskellig vandkvalitet er i hydraulisk kontakt på grund af forsætning af lagene.

Storskala strukturer i kalken kan have betydning for beskaffenheden og fordelingen af de overliggende lag som igen, sammen med terrænoverfladens forløb, kan have betydning for grundvandsdannelsen, grundvandspotentiallet, grundvandets strømning, saltvandsudvaskning etc.

Anbefalinger

Anbefalingerne til kortlægning af strukturer i kalken omfatter både sammenstilling af eksisterende viden, analyse af eksisterende seismiske data og udførelse af refleksionsseismik samt logging og logstratigrafi. De elektriske og elektromagnetiske metoder er mindre velegnede, men kan, som beskrevet herunder, i nogle tilfælde bidrage med informationer. Til sidst i afsnittet omtales kort potentialekort, prøvepumpninger og vandanalyser under andre metoder.

Eksisterende viden og seismiske data

Sammenstilling af eksisterende viden i en geologisk model vil i bedste fald kunne give indikationer på eventuelle overordnede strukturer i kalken, f.eks. i kraft af kalkoverfladens beliggenhed, forløbet af interne laggrænser eller måske fordelingen af overliggende lag. Desuden kan observationer fra eventuelle blotninger (klinter, råstofgrave m.m.) i området bidrage med værdifulde informationer og bør altid inddrages.

Herudover anbefales det at fremskaffe alle eksisterende seismiske data i et område (både nye og gamle samt konventionelle olieseismikdata og højopløselige seismiske data optaget i forbindelse med grundvandskortlægningen), og foretage en tolkning og kortlægning af forkastninger som påvirker kalkserien. På konventionelle seismiske data kan forkastninger i de dybe dele af kalken sjældent følges til de øvre dele som har betydning for grundvandsindvinding (se også afsnit 3.2.1), men deres tilstedeværelse i dybet indikerer at man skal være opmærksom på, om også de øvre dele kan være påvirket. I det hele taget anbefales det også at kortlægge små forstyrrelser i kalkserien i relation til dybereliggende strukturelementer og salttektonik (flexurer, små forskydninger etc.). Selvom det måske ikke kan påvises at forstyrrelserne har forbindelse til de øvre dele af kalken, kan de, hvis de f.eks. optræder i sammenhængende områder, eventuelt indikere højere sprækkeintensitet i kalken end ellers. Det anbefales også at gennemføre en terrænanalyse for at undersøge om der er terrænelementer der kan afsløre tilstedeværelsen af eventuelle forkastninger.

Hvis der er påvist, eller indikationer på, tilstedeværelsen af forkastninger eller andre strukturer i kalken og behov for yderligere informationer, anbefales det at udføre refleksionsseismik og/eller geofysisk borehulslogging i nye og/eller gamle borer.

Refleksionsseismik

Refleksionsseismik giver direkte informationer om lagenes strukturelle opbygning i form af f.eks. forkastninger, hældende laggrænser, folder og flexurer. Forkastninger skal dog som tommelfingerregel have en forsætning på mindst 5-10 m for at kunne erkendes i de seismiske data, og opløseligheden kan være for ringe til sikkert at kunne erkende folder og bankestrukturer.

Med hensyn til banker kendes der fra bryozokalken kun enkelte eksempler på at de har kunnet kortlægges med refleksionsseismik (f.eks. COWI, 2011). Det skyldes formentlig en kombination af flere årsager. Dels kan det hænge sammen med at højden af de enkelte banker er lille i forhold til den seismiske opløselighed (~10 m, Bjerager, 2003; Surlyk m.fl., 2006), og dels er det ikke givet at hastigheds- og densitetskontrasterne mellem bankerne i sig selv giver tilstrækkelig anledning til refleksioner af den seismiske energi. Endelig kan

det hænge sammen med at bryozokalken ofte befinder sig tæt på terræn, og at mægtigheden af intervallet ofte er lille i forhold til den seismiske opløselighed (se også afsnit 4.1.1).

Derimod er der gode eksempler på at georadar kan anvendes til detaljeret kortlægning af bankestrukturer i bryozokalk og til kortlægning af fordelingen af forskellige enheder i kalken, f.eks. henholdsvis flint-rige og flint-frie bryozokalk-enheder og koralkalk (Sigurdsson og Overgaard, 1998; Nielsen m.fl., 2009).

I modsætning til bryozokalken er der i skrivekridt gode eksempler på at større bankelignende strukturer kan kortlægges med refleksionsseismik (Lykke-Andersen og Surlyk, 2004; Surlyk og Lykke-Andersen, 2007). Desuden er der eksempler på at banker sammenlignelige i størrelse med bryozobanker kan erkendes som et bølget forløb af refleksioner (Surlyk m.fl., 2006). Når de kan kortlægges bedre i skrivekridtet, hænger det formentlig sammen med en dybere beliggenhed og en meget større mægtighed af skrivekridtet som giver mulighed for at erkende flere detaljer internt i intervallet.

Logging og logstratigrafi

Ligesom refleksionsseismik kan borehulslogging og detaljeret logstratigrafi (se også afsnit 4.1.2 og Appendix C) indgå i beskrivelsen af strukturer i kalken. Ved at korrelere karakteristiske logmønstre fra boring til boring er det ofte muligt (hvis borerne ligger tæt nok) at afsløre interne strukturer som folder, flexurer og forkastninger (Klitten m.fl., 1994; DGU og RH&H Consult, 1994; ØLC, 1995; Rambøll, Hannemann & Højlund, 1995a; Rambøll, Hannemann & Højlund, 1995b; Rambøll, 1999; Olsen og Nielsen, 2002). Korrelation af logstratigrafiske tolkninger fra boring til boring kan således bidrage med essentiel viden om f.eks. størrelsen af forsætninger ved identifikation af enten formationsgrænser eller interne enheder i kalken. Logs og logstratigrafi kan endvidere bidrage til identifikation af lavpermeable zoner i kalken og belyse hvordan de i samspil med eventuelle forkastninger har betydning for grundvandet og grundvandsstrømningen i kalken (se også afsnit 4.2.2).

Elektriske og elektromagnetiske metoder

Elektriske og elektromagnetiske metoder er generelt ikke velegnede til kortlægning af interne strukturer i kalken på grund af manglende modstandscontraster mellem de enkelte kalktyper og metodernes relativt dårlige opløselighed. Ved modstandscontraster mellem f.eks. Lellinge Grønsand Formation og andre kalktyper (eller mellem Kerteminde Mergel og kalk) kan grænsens forløb eventuelt kortlægges og dermed give oplysninger om strukturer i kalken. Overgangszonen mellem fersk og salt grundvand udgør derimod en markant modstandscontrast, og en sidegevinst ved kortlægning af zonen med elektriske og elektromagnetiske metoder kan være at dens forløb i nogle tilfælde kan afsløre, eller give indikationer på, eventuelle strukturer som forkastninger og folder m.m., fordi forløbet af zonen ofte følger stratigrafiske flader eller lavpermeable zoner i kalken (se afsnit 3.5).

Andre undersøgelser

Afslutningsvis anbefales det at betydningen af eventuelle forkastninger og strukturer i kalken undersøges/vurderes nærmere med udgangspunkt i den opstillede geologiske model suppleret med andre oplysninger/undersøgelser. Potentialekort kan give indikationer på hvorledes betydningen af forkastninger skal tolkes, og prøvepumpninger kan ofte bidrage med indirekte informationer om eventuelle forkastningers betydning for vandføringsevnen i

kalken (se også appendix A). Vandanalyser og logs kan give information om forkastningers betydning i forbindelse med overgangszonen mellem fersk og salt grundvand.

4.1.4 Særlige problemstillinger i forbindelse med begravede dale

Begravede kvartære dale som skærer sig ned i kalken vil udgøre en anomali i forhold til kalkmagasinet og kan have stor lokal betydning for grundvandsforholdene.

Problemstillinger

Begravede dale som indeholder sand og grus, vil fungere som grundvandsmagasiner ligesom kalken, men typisk med væsentlig anderledes hydrauliske egenskaber og kan også udgøre forureningsveje fra terrænoverfladen til kalkmagasinet. Omvendt kan begravede dale som indeholder lerede sedimentter, virke som hydrauliske barrierer.

Oftentimes, men langt fra altid, observeres en sammenhæng mellem strukturer i undergrunden som forkastninger, brudzoner, flexurer og folder og så tilstedeværelsen af begravede kvartære dale. I Mielby og Sandersen (2005) og Nielsen og Jørgensen (2008) er det beskrevet hvorledes der tolkes en sammenhæng mellem forkastninger og deraf følgende svaghedszoner i kalken, og tilstedeværelsen af begravede dale som skærer sig ned i kalkoverfladen. En begravet dal som indeholder sand og grus, vil udgøre en særlig risiko som transportvej for nedrivende forurening i områder hvor kalken på grund af forkastningsaktivitet er opsprækket, og dermed har øget vandføringsevne.

Anbefalinger

Det anbefales at få fastlagt forløbet, dybden og udbredelsen af begravede dale i et kortlægningsområde, og at forsøge at kortlægge dalenes ofte meget komplekse (Jørgensen m.fl. 2006) sedimentfyld.

Seismik alene kan primært bidrage til kortlægning af den interne strukturelle opbygning af fyldet i begravede dale, men i kombination med boringer og eventuelt logging kan det være muligt med detaljerede tolkninger af aflejringstyper. Elektriske og elektromagnetiske undersøgelser kan også bidrage til tolkning af aflejringstyper i dalfyldet, men typisk med ringere strukturel opløselighed end det er muligt med seismik, og det bedste resultat vil kunne opnås ved en kombination af f.eks. TEM/SkyTEM, seismik, boringer og logging. Herudover er kortlægning af begravede dale beskrevet i Jørgensen og Sandersen (2009).

Elektriske og elektromagnetiske metoder

Generelt opnås den bedste kortlægning af begravede dale med fladedækkende TEM/SkyTEM kortlægning. Dog er det selvfølgelig en forudsætning at der er tilstrækkelig modstandskontrast mellem dalfyldet og kalken (se også afsnit 4.1.1). Da kalken ofte vil have relativt høje modstande, kan det ikke nødvendigvis forudsættes at sand- og grusfyldte dale kan kortlægges, mens dale udfyldt med smeltevandsler eller moræneler typisk vil fremstå som lavmodstandsstrukturer (Jørgensen og Sandersen, 2009). Dog kan kalk med modstande i den lave ende være svær at skelne fra moræneler med modstande i den høje ende.

Refleksionsseismik

For at kunne fastlægge forløbet af begravede dale med refleksionsseismik, kræves en rimelig stor tæthed af seismiske linjer, og metoden er således ikke specielt velegnet til fladedækkende kortlægning. Seismiske data kan dog give præcis og detaljeret information om dalenes form, dybde og den strukturelle opbygning af fyldet, og dermed være et vigtigt supplement til kortlægningen hvis dalenes strukturelle forhold skal undersøges nærmere (Jørgensen og Sandersen, 2009). Afgrænsningen af begravede dale i seismiske data forekommer ofte som skift i refleksionsmønster/datakvalitet og dalflanker/dalbund er således langt fra altid repræsenteret ved en egentlig refleksion. Der er også eksempler på identifikation af begravede dale ud fra hastighedsinducerede strukturer under dalene forårsaget af hastighedskontraster mellem dalfyldet og de omgivende sedimente. Endelig kan den seismiske metode som den eneste benyttes til at udelukke tilstedeværelsen af begravede dale i tilfælde af gennemgående uforstyrrede refleksioner.

Refraktionsseismik

Såfremt det ikke er muligt at opnå gode resultater med refleksionsseismik, f.eks. på grund af en højtliggende kalkoverflade, kan også refraktionsseismik eller en refraktionsseismisk tolkning af refleksionsseismiske data benyttes til kortlægning af dalstrukturer nedskåret i kalkoverfladen.

Boringer

Kortlægning af begravede dale på baggrund af boringer kan dels ske gennem identifikation af typiske fyldsedimenter og/eller kortlægning af let genkendelige laggrænser (eller deres fravær), Jørgensen og Sandersen (2009). Dog er tætheden af dybe boringer som regel for lav i forhold til forekomsten og udbredelsen af begravede dale til kortlægning alene baseret på boringer. Desuden kan forekomsten af kalk-/kridtflager udgøre et problem ligesom fejlbeskrevne boringer.

4.1.5 Særlige problemstillinger i forbindelse med saltstrukturer

I de områder hvor kalken kommer tæt på terræn på grund af underliggende salt diapirer eller -puder, udgør den som udgangspunkt et supplement til de øvrige grundvandsmagasiner. Der knytter sig imidlertid nogle særlige problemstillinger til områder hvor også salten er tæt på overfladen, såsom salt grundvand i kalklagene lige over strukturerne på grund af opløsning af de underliggende evaporitter samt øget sårbarhed på grund af sprækker og erosion af beskyttende dæklag.

Problemstillinger

Indvindingspotentialer i kalken over og nær meget overfladenære saltstrukturer kan være begrænset da der ofte befinder sig salt grundvand i de dele af magasinet som støder op til strukturen som følge af opløsning af de underliggende evaporitter. Hvis der samtidig ikke sker nogen betydelig grundvandsdannelse over strukturen til kalkmagasinet, vil salt grundvand let kunne trænge op i de øvre kalklag ved for kraftig indvinding i området.

Som beskrevet i afsnit 3.2.5 er lagfølgen umiddelbart over diapirerne præget af erosion i større eller mindre grad. Ofte er både dele af kalken og palæogene, neogene såvel som

kvartære dæklag helt eller delvist borteroderede, og der er eksempler på at der kun er få meter fra kalkoverfladen til terræn, og dermed potentielt meget ringe beskyttelse mod ned-sivende forurening. Hertil kommer at sprækkeintensiteten i kalken ofte er særlig høj over saltstrukturer på grund af saltbevægelserne (se også afsnit 3.2.5), og at spredning af en eventuel forurening (som nævnt i afsnit 2.2.2 og 3.6.1) kan ske meget hurtigt på grund af sekundær permeabilitet i sprækker og sprækkedomineret strømning. Kalkmagasiner over og omkring saltstrukturer er således potentielt særligt sårbare over for såvel forurening ovenfra fra f.eks. pesticider og nitrat fra landbruget (Jørgensen, 2002) som for optrængning af salt grundvand nedfra i forbindelse med indvinding. Derfor er det særdeles vigtigt med både viden om grundvandets strømningsretning og detailviden omkring dæklagstykkelsen og eventuel tilstedeværelse af sandvinduer over kalkmagasinet, hvis man vil udføre en fornuftig grundvandsbeskyttelse.

Anbefalinger

Med den række af problemstillinger der er knyttet til overfladenære saltstrukturer bør der, som en del af kortlægningens planlægning, indgå overvejelser om hvor udbredt det udnyttelige grundvandsmagasin over saltstrukturen er, og om der på den baggrund skal gennemføres en omfattende kortlægning. Er grundvandsmagasinet udbredelse forholdsvis lille og forventet sårbart, kan det måske være en løsning at fokusere kortlægningen på magasinets vandkemi, og på den måde afgrænse hvor en begrænset indvinding kan foregå.

Overfladenære Saltstrukturer kan kortlægges med traditionelle geofysiske metoder som TEM/SkyTEM, MEP, seismik og borehulslogging med de begrænsninger der er angivet i afsnit 4.1.1. Særligt skal man være opmærksom på at det med de elektriske og elektromagnetiske metoder kan være svært/umuligt at skelne mellem ferskvandsmættet sand og kalk (i forhold til især sårbarhed), og mellem palæogene fede lere (der jf. afsnit 3.2.5 kan forekomme som f.eks. erosionsrester over strukturerne og på flankerne) og kalk med salt grundvand på grund af ringe modstandskontraster.

Som det første anbefales det at udføre borehulslogging i en dyb boring (ny eller eksisterende) for at fastlægge beliggenheden af saltvandsgrænsen, vurdere nytten af elektriske og elektromagnetiske metoder og til generel korrelation og samtolkning mellem geologi og geofysik. Herudover anbefales som udgangspunkt en fladedækkende kortlægning med TEM/SkyTEM, men metoden bør ikke stå alene på grund af de ovennævnte potentielle problemer med manglende modstandskontraster mellem lagene. Af denne grund, og ikke mindst for at få et rumligt overblik over saltstrukturen og hvordan den påvirker kalken, anbefales det at der også udføres 1-2 seismiklinjer.

Endelig anbefales det at der udføres en detailkortlægning af de øverste dæklag over kalkmagasinet (f.eks. med PACES og MEP), da kendskab til strømningsforholdene og tilstedeværelsen af lerlag og eventuelle sandvinduer er vigtige informationer i forbindelse med kortlægningen af de sårbare kalkmagasiner. Samtidig bør der, som nævnt ovenfor, være særligt fokus på grundvandskemien som i høj grad kan være påvirket af forhold der har med saltstrukturen at gøre (f.eks. øget sårbarhed på grund af ringe dæklag og stor sprækkeintensitet og opløsning af evaporitter).

4.2 Kortlægning af strømningsforholdene i kalken

For at kunne få et indtryk af grundvandsstrømningen i kalken og kunne modellere den, er det vigtigt at få kortlagt alle de betydende strømningsveje og potentielle hydrauliske barrierer i kalkmagasinet samt potentialeforholdene i området. Anbefalingerne til kortlægningen, som beskrevet både i de foregående og følgende afsnit, tager blandt andet udgangspunkt i:

- Vurdering af storskalastrukturer ud fra undergrundskort
- Beskrivelser af dagsprofiler
- Analyse af tilgængelige seismiske linjer
- Terrænanalyser
- Prøvepumpninger
- Borehulslogging, f.eks. flowlogging
- Vurdering af hydrauliske ledningsevner og specifikke kapaciteter
- Sammenstilling af data i en geologisk model

Den viden der oparbejdes gennem kortlægningen af kalkformationerne og de betydende forhold for grundvandsstrømningen, skal danne baggrund for en overordnet beskrivelse af grundvandsstrømningen i området som kan benyttes i det videre arbejde med opstilling af en grundvandsmodel (se Appendix D).

4.2.1 Kortlægning af sprækkemønstre

På grund af de særlige hydrauliske forhold der hersker i kalken, og som er beskrevet i afsnit 3.2 og 3.3, er det vigtigt med indblik i de dominerende sprækkemønstre for at forstå og f.eks. kunne modellere grundvandsstrømningen i et givent kalkmagasin.

Problemstillinger

I daglokaliteter ved f.eks. kystklinter eller kalkbrud kan separate kalkbænke normalt erkendes, og ofte kan små såvel vertikale som horisontale sprækker identificeres (se afsnit 3.2.3). På denne ret beskedne skala er det tydeligt at kalken fra et strømningmæssigt synspunkt er heterogen, idet strømningen i væsentligt omfang er knyttet til sprækkerne der agerer som mere eller mindre adskilte strømrør, der med stærkt varierende tykkelse slynger sig mellem spaltevæggene (Rasmussen, 2002).

Når man har flere sprækkesæt vil nogle af sætterne være mere hydraulisk aktive end andre. De kan have en større apertur (åbning, spaltebredde) og de kan generelt være større og have en højere konnektivitet, og der er muligvis højere sprækketæthed end for andre sprækkesæt. Disse dominerende sprækkesæt vil kunne skabe en strømninganisotropi eller et foretrukket strømningmønster, se også afsnit 3.3.3.

Anbefalinger

Som en del af forarbejdet med at opstille en geologisk model anbefales det også at udføre en regional tektonisk analyse ud fra undergrundskort og en terrænanalyse, inklusive opstilling af hypoteser omkring dominerende sprækkemønstre.

Et dominerende sprækkesæt er som regel relateret til bestemte tektoniske begivenheder eller forhold og det tilhørende stressfelt. Hvis dannelsen af det dominerende sprækkesæt kan forklares ved en bestemt tektonisk model, kan det være muligt at opskalere en sprækkemodel som er baseret på lokale observationer til at gælde for et større område (kortlægningsområde, region etc.). Den opskalerede sprækkemodel kan så eventuelt benyttes til at opstille en strømningsmodel gældende for kalken i området (Jakobsen & Rosenbom, 2002; Rosenbom & Jakobsen, 2005).

Den mest detaljerede viden om sprækkesystemerne i en kalkbjergart opnås ved at undersøge dem i profiler. Sprækkedata indsamles langs målelinjer der er udlagt langs vægge af blottet kalk ved en kystklint eller i en kalkgrav. For at få repræsentative data, skal man måle langs 3 linjer. En vertikal linje hvor man registrerer de horisontale sprækker, og to horisontale linjer vinkelret på hinanden hvor man registrerer de vertikale sprækker. De to horisontale målelinjer skal være vinkelrette, eller næsten vinkelrette på hinanden, for at sikre at sprækkesystemer, der er næsten parallelle med væggen man måler på, ikke overses eller bliver underrepræsenteret.

Langs med linjerne indmåles sprækkernes skæring med disse, og den enkelte sprækkes orientering måles. Desuden måles sprækkesporslængden og sprækkens form beskrives. For vertikale sprækker angives der ligeledes, hvorvidt de er afgrænset af horisontale sprækker, eller om de skærer flere. De vertikale sprækker kan kategoriseres som enkeltlags- eller flerlagssprækker. I hydraulisk henseende har flerlagssprækkerne en større konnektivitet end enkeltlagssprækkerne og må forventes at have en større betydning for det hydrauliske system.

Ved sprækkeopmåling og sprækkeanalyse kan følgende sprækkeparametre anvendes:

- Orientering: strygning, hældning og hældningsretning måles for hver sprække. Sprækkernes orientering kan vises i et stereonet hvor polen til sprækkeplanerne er udtegnet, eller de vertikale sprækkes strygning kan vises i et rosedigram. I rosedigrammet kan hyppigheden af sprækker med en given orientering aflæses i procent.
- Sprækkesystem: et sprækkesystem defineres ud fra sprækkernes orientering og består af parallelt orienterede sprækker. I et stereonet vil et sprækkesystem blive udtegnet samlet. Ikke-systematiske sprækker udtegnes spredt i stereonet.
- Sprækkeafstand: sprækkeafstand er defineret som den gennemsnitlige afstand mellem sprækkerne vinkelret på et sprækkesystem.
- Sprækkens skæring med andre sprækker: for de vertikale sprækkes vedkommende er det vigtigt at beskrive om de skærer horisontale sprækker, og om de skærer flere af dem.
- Sprækkefladebelægning: det registreres hvorvidt sprækkefladerne har en belægning af jernoxider og/eller manganoxider, hvilket indikerer hydraulisk aktivitet i sprækken.
- Fyld i sprækken: ler og andre materialer vil reducere den hydrauliske aktivitet.
- Udsivning af vand fra en sprække viser at den er vandførende.

I borer kan udførelse af flowlogs benyttes til at fastlægge og analysere indstrømningshorisonter i kalken og dermed til at vurdere hvor dybt kalken er opsprækket. Optræder indstrømningshorisonter som spring på flowkurven over få centimeter eller decimeter, er strømmingen relateret til en eller flere større sprækker. Indstrømningshorisonter der optræder som en jævnt hældende flowkurve over et længere interval, indikerer derimod at strømmingen er relateret til mange små sprækker eller er matrixdomineret. Også måling af temperatur og elektrisk ledningsevne med og uden pumpning kan bidrage med information om indstrømningsmønstret i en boring.

I borer er det også muligt at karakterisere sprækker ved hjælp af de to avancerede logsonder optisk og akustisk televiwer. Sonderne optager et 360 grader henholdsvis optisk og akustisk billede af borehulsvæggen hvor det akustiske billede viser variationer i hårdheden af væggen. Begge logtyper vil vise forekomsten af f.eks. sprækker og flintlag med mulighed for at tolke både deres strygning og hældning. Optisk og akustisk televiwer viser imidlertid kun hvor der er sprækker i formationen, og ikke om de er hydraulisk aktive. En hydraulisk tolkning af disse skal derfor kombineres med målinger fra flowlogs og temperatur og ledningsevne med og uden pumpning.

Endelig kan prøvepumpninger ofte give oplysninger om kalkens samlede hydrauliske egenskaber og f.eks. foretrukne strømningsretninger (se også afsnit 3.3.3 og Appendix A).

4.2.2 Kortlægning af lavpermeable horisonter

Lavpermeable horisonter i kalken kan have betydning for både grundvandsdannelsen, grundvandsstrømningen og vandkvaliteten. De kan både medvirke til at begrænse nedtrængende forurening og begrænse saltvandsudvaskningen samt udgøre barrierer for grundvandsstrømningen.

Problemstillinger

Især i Lellinge Grønsand Formationen og skrivekridtet optræder lavpermeable horisonter bestående af lerede eller merglede lag. Betydningen af disse horisonter er størst hvor kalken er mindst påvirket af sprækker, dvs. uden for tektonisk påvirkede områder og i områder hvor kalken f.eks. er mindre påvirket af isbelastning og -aflastning.

I praksis betyder det at lavpermeable horisonter f.eks. kan have stor betydning i skrivekridtet. Hvor overgangszonen mellem fersk og salt grundvand i skrivekridt mange steder optræder som et diffusionsprofil med dybden, kan tilstedeværelsen af ler eller mergellag medføre en mere abrupt grænse i forbindelse med det lavpermeable lag som begrænser udvaskningen af det salte vand (Klitten og Wittrup, 2006; Hinsby m.fl., 2003). I Nielsen og Jørgensen (2008) konkluderes det at der syd for Aalborg optræder en lokalt udbredt mergelhorisont, som opdeler skrivekridtet i et øvre og nedre grundvandsmagasin med forskellige trykniveauer og grundvandskemi. I det øvre magasin træffes ofte nitratholdigt vand, mens saltvand som hovedregel kun findes under mergelhorisonten. Saltvandsgrænsen optræder som en gradvis overgangzone over 50 m som typisk først indtræffer 20 m eller mere under mergelhorisonten.

I Jensen (2003) er det endvidere beskrevet hvordan man ud fra prøvepumpningsresultater tolker, at Lellinge Grønsand Formationen som reservoir er opdelt i mange mindre kalklag (aquiferer) adskilt af lerlag (aquitarder) og uden hydraulisk kontakt, og dermed fremtræder som lukkede kar. Det byder således på nogle særlige tolkningsmæssige udfordringer når boringer er filtersat i forskellige magasinhorisonter.

Herudover betyder kalkens specielle egenskaber som grundvandsmagasin hvor transmisiviteten primært er knyttet til sprækker og i langt mindre grad til matrixpermeabilitet - der som regel er flere størrelsesordener mindre end den sekundære sprækkepermeabilitet (Nygaard, 1993) - og hvor grundvandsstrømningen ofte er knyttet til bestemte intervaller i kalken, at f.eks. forsætninger af lagene kan komme til at udgøre vertikale hydrauliske barrierer ved afskæring af vandførende horisonter.

Anbefalinger

Mergellag og andre lavpermeable horisonter optræder typisk med beskedne tykkelser – ofte i cm-skala – og selvom der kan være en tilstrækkelig modstandscontrast mellem kalken og interne mergellag, er opløseligheden i de elektriske og elektromagnetiske metoder ikke tilstrækkelig god til at mergellagene kan identificeres. Den ringe mægtighed af mergellagene betyder også at de ikke kan kortlægges ved hjælp af seismiske metoder.

Lavpermeable horisonter af ler og mergel kortlægges således bedst med borehulslogging. Ler og mergellag fremtræder ofte tydeligt som maksima på både naturlig gamma og induktionlogs, og som minima på resistivitets-logs.

Der kan ofte optræde flere lavpermeable horisonter i en boring, og gennem logstratigrafisk tolkning (se også afsnit 4.1.2 og 4.1.3 samt Appendix C) kan det afgøres hvilke lag der skal korreleres til hinanden fra boring til boring. På den måde kan det f.eks. i Lellinge Grønsand Formationen være muligt at udrede hvilke boringer der er filtersat i hvilke magasinhorisonter. I nogle tilfælde kan tilstedeværelsen af lavpermeable horisonter som beskrevet ovenfor også tolkes indirekte ud fra prøvepumpningsresultater (se også Appendix A).

Bløde og ikke opsprækkede dele af kalken kan udgøre tykke intervaller med lav vandføringsevne. De kortlægges bedst med udførelse af flowlogs (se også afsnit 4.2.1) som viser indstrømningshorisonterne i kalken som spring eller hældende forløb på flowkurven, og hvor intervaller uden indstrømning vil fremvise et konstant kurveforløb. Hvis udførelse af flowlogs kombineres med inddeling af kalken i stratigrafiske enheder ved hjælp af logstratigrafi (se også afsnit 4.1.2 og 4.1.3 samt Appendix C) og karakteristik af enhedernes fysiske parametre, kan dele af kalken med lav permeabilitet og vandføringsevne identificeres og korreleres fra boring til boring.

4.2.3 Kortlægning af grundvandspotentialet

Kendskabet til grundvandspotentialet er relevant for at vurdere strømningsforholdene i kalken, størrelsen af den tilgængelige ferskvandsressource samt optegning af indvindingsoplunde hvor der skal ske beskyttelse af grundvandsmagasinet. Desuden har den tidlige

udvikling af grundvandspotentialer betydning for ændringer i grundvandets kemiske og kvantitative tilstand.

Potentialekortlægningen kan også medvirke til at give nye oplysninger om geologien. Det er i den sammenhæng vigtigt at holde øje med pludselige spring i potentialer som ikke umiddelbart kan forklares ud fra den eksisterende hydrogeologiske viden.

Problemstillinger

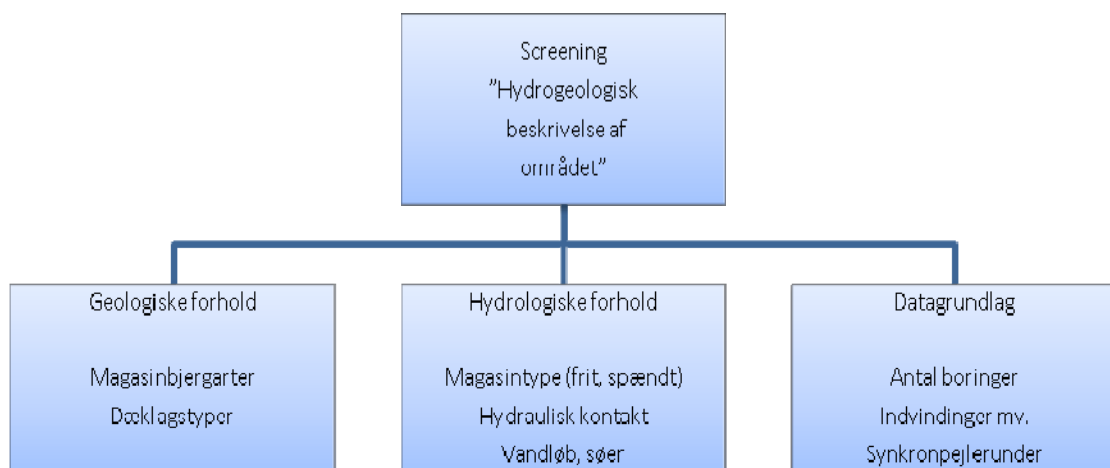
Kalkmagasinerne er kendetegnede ved at være regionalt udbredte magasiner hvor interne hydrauliske barrierer og sprækkesystemer har afgørende betydning for strømningsvejene. Kalkmagasinerne afviger herved - i forhold til kvartære og andre prækvartære grundvandsmagasiner - ved deres størrelse, og den måde hvorpå vandet strømmer i magasinet. Viden om disse interne forhold i kalken og eventuelle anisotropier skal derfor inddrages i potentialekortlægningen.

Anbefalinger

Det anbefales at følge de generelle principper i Geo-Vejledning nr. 4 "Potentialekortlægning. Vejledning i udarbejdelse af potentialekort" (Mielby m.fl., 2009), se uddrag nedenfor.

Først skal formålet med potentialekortet fastlægges. Herefter bør områdets geologi, grundvandsmagasiner, vandløb og vådområder samt det overordnede datagrundlag indledningsvis vurderes. Det skal fastlægges hvilken/hvilke hydrogeologiske enheder potentialekortet skal repræsentere. Herved sikres en korrekt udvælgelse af boringer, pejlinger og støttepunkter.

Endvidere bør man indledningsvis altid vurdere om der overhovedet kan udarbejdes et potentialekort til det givne formål baseret på det eksisterende datagrundlag, og om der skal indsamles yderligere pejledata, herunder eventuelt iværksættes en synkronpejlerunde. Screeningen vil ofte kunne bygge på eksisterende sammenfatninger fra tidligere potentialekort eller andre kortlægninger, se Figur 46.



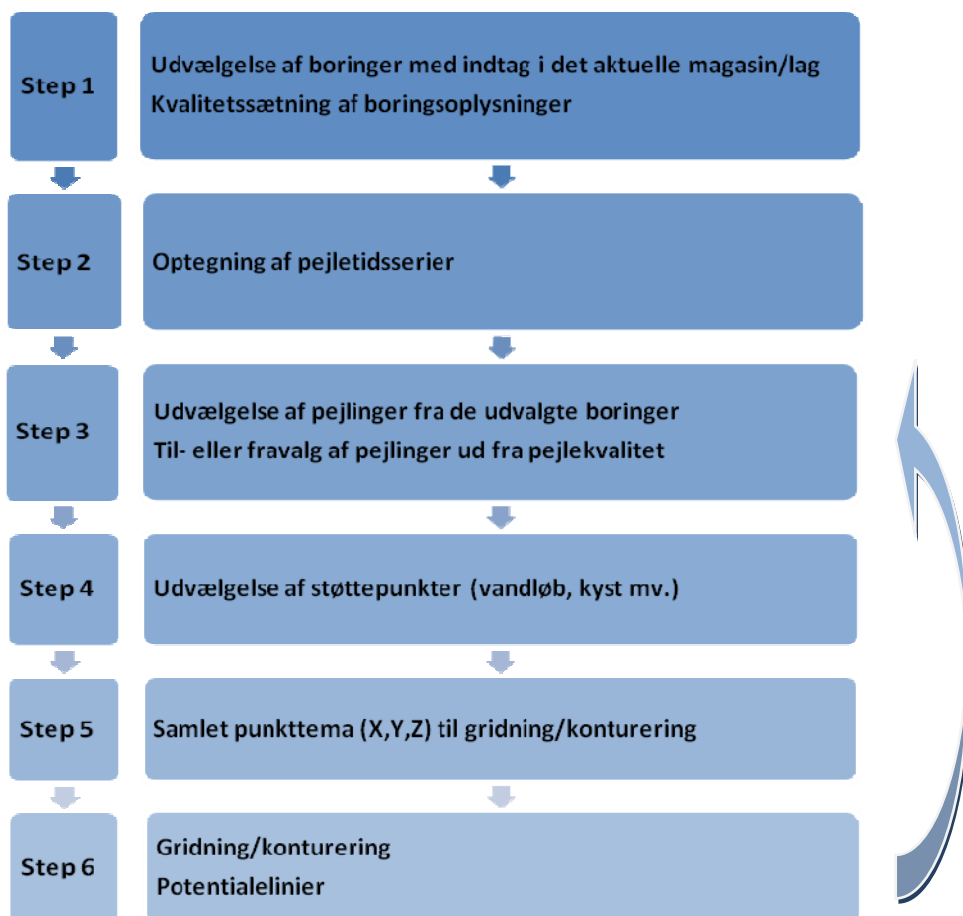
Figur 46. Indledende screening af de geologiske og hydrologiske forhold (efter Mielby m.fl., 2009).

Screeningen kan med fordel sammenfattes i en kort hydrogeologisk beskrivelse af området som kan indgå i den senere afrapportering. Det kan her anbefales at udarbejde nogle geologiske profilsnit gennem området. Det skal vurderes hvilke grundvandsmagasiner der er i området, og hvilke magasintyper der er tale om (frit, spændt, artesisk). Det vurderes endvidere om der er hydraulisk kontakt mellem grundvandsmagasinerne i området.

Vandløb, søer og vådområder beskrives med hensyn til strømningsretning, afstrømningsmængder osv. Eventuel kontakt mellem grundvand og vandløb vurderes. Dette kan gøres med udgangspunkt i topografi, medianminimumsdata, hydrografseparation eller ved vurdering af potentialet i forhold til kote af vandløbsbund. Omfanget af dette arbejde vil afhænge af datagrundlaget og formålet med potentialekortet.

Med hensyn til datagrundlag bør antallet af boringer, f.eks. relateret til forskellige dybder, vurderes. Vandindvindingerne i området og eventuelle beregnede indvindingsoplande beskrives, og indvindingernes betydning vurderes i forhold til potentialekortet. Det undersøges om der er gennemført synkronpejlerunder, og hvordan den geografiske fordeling af pejlinger er.

Databehandlingen til et potentialekort kan opdeles i 6 step som angivet i Figur 47. For en detaljeret beskrivelse af de enkelte step i arbejdet henvises til vejledningen.



Figur 47. Procedure for udvælgelse af data og udarbejdelse af potentialekort (efter Mielby m.fl., 2009).

I forbindelse med potentialekortlægning af kalkmagasiner er det specielt vigtigt at få fastlagt, så godt som muligt, om der er lavpermeable lag i kalkformationen. Det skal således afklares, om der er ét eller flere adskilte, oven på hinanden liggende, magasiner, og det skal besluttes om de skal behandles som ét eller flere magasiner.

Viden om sprækker, anisotropi og interne forhold i kalken er afgørende for at vurdere strømmingen i kalkmagasinet da de kan afstedkomme andre strømningsmønstre end potentialekortet for et område indikerer. Det kan have stor betydning i forbindelse med både indvinding og f.eks. forurening.

På grund af de særlige strømningsforhold i kalkmagasiner, er det afgørende for den efterfølgende korrekte anvendelse af potentialekortet at det færdige potentialekort suppleres med oplysninger på såvel kort og i tekst med alle oplysninger om forekommende hydrauliske barrierer (horisontale og vertikale), sprækker, forkastninger, bankestrukturer, anisotropier mv.

4.2.4 Oplandsberegninger i kalk

I forbindelse med oplandsberegninger for kalkmagasiner er det overordnet set de samme metodikker der gør sig gældende som for andre magasintyper. Der kan udarbejdes traditionelt håndtegnede oplande, oplande tegnet med AEM-metoden (Analytisk Element Model) og numerisk beregnede oplande for kalkmagasiner. Dog er der enkelte forhold som det er vigtigt at have for øje. For mere detaljeret information omkring indvindings- og grundvandsdannende oplande henvises til Geo-Vejledning nr. 2 "Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, (Del 1)" (Iversen m.fl., 2008).

Problemstillinger

I forbindelse med grundvandsmodellering i kalk (se også Appendix D) inddeles kalken ofte i en øvre meget opsprækket del og en nedre mindre opsprækket del da sprækkerne, og dermed den hydrauliske ledningsevne, som regel aftager med dybden. Placeringen af indvindingsboringers filtre i den numeriske model i forhold til denne opdeling kan have stor indflydelse på de beregnede oplandes form og udbredelse.

Ligeledes kan anisotropi i kalken, med forskelle i den horisontale hydrauliske ledningsevne (f.eks. $K_x / K_y = 10$ eller 100 , se også afsnit 3.3.3) have stor indflydelse på oplandenes form og udbredelse.

I forbindelse med oplandsberegninger beregnes ofte også partikelalder for de vandpartikler der når frem til en indvinding. Her har graden af opsprækning i kalken og den effektive sprækkeporøsitet stor betydning for de beregnede aldre, og ofte er den beregnede partikelalder betydelig mindre for kalkmagasiner end for sandmagasiner.

Anbefalinger

Oplandenes form og udbredelse er som bekendt styret af potentialeforholdene der igen er styret af de geologiske forhold. De beregnede oplande er ligeledes styret af parametriseringen af de hydrauliske egenskaber i de enkelte geologiske lag og zoner. Derfor er det

vigtigt med så mange informationer som muligt omkring trykniveauer, både i kalken og i overliggende magasiner. Kalkoverfladens beliggenhed er ligeledes overordentlig vigtigt da de hydrauliske egenskaber ændres markant, når vandstrømningen forløber fra sand og over i kalkmagasinet, og det er vigtigt at fladen er lagt korrekt ind i den numeriske model.

Indplacering af filtre

Ved placering af indvindingsfiltre i den numeriske model anbefales det at de så godt som muligt tilpasses en eventuel konceptuel model med en øvre og en nedre opsprækket del af kalkmagasinet. I nedenstående eksempel består modellen af følgende 3 lag:

- Lag 1: sand (0-20 m.u.t.)
- Lag 2: opsprækket kalk (20-35 m.u.t.)
- Lag 3: mindre opsprækket kalk (35-50 m.u.t.)

En boring som er filtersat 30-40 m.u.t. svarende til at boringen indvinder fra både den opsprækkede og den mindre opsprækkede del, vil typisk i modellen blive filtersat i enten den øvre eller nedre del af kalken. Hvis boringens filtre i modellen udelukkende indplaceres i den nedre mindre opsprækkende del af kalken, vil modelkørsler formodentligt vise kraftige sænkninger i grundvandsspejlet pga. den lavere transmissivitet i denne. Oplandet vil i form og udbredelse blive meget bredere sammenlignet med hvis oplandet var beregnet ud fra en filtersat boring, der er indplaceret i den øvre og mere opsprækkede del af kalken.

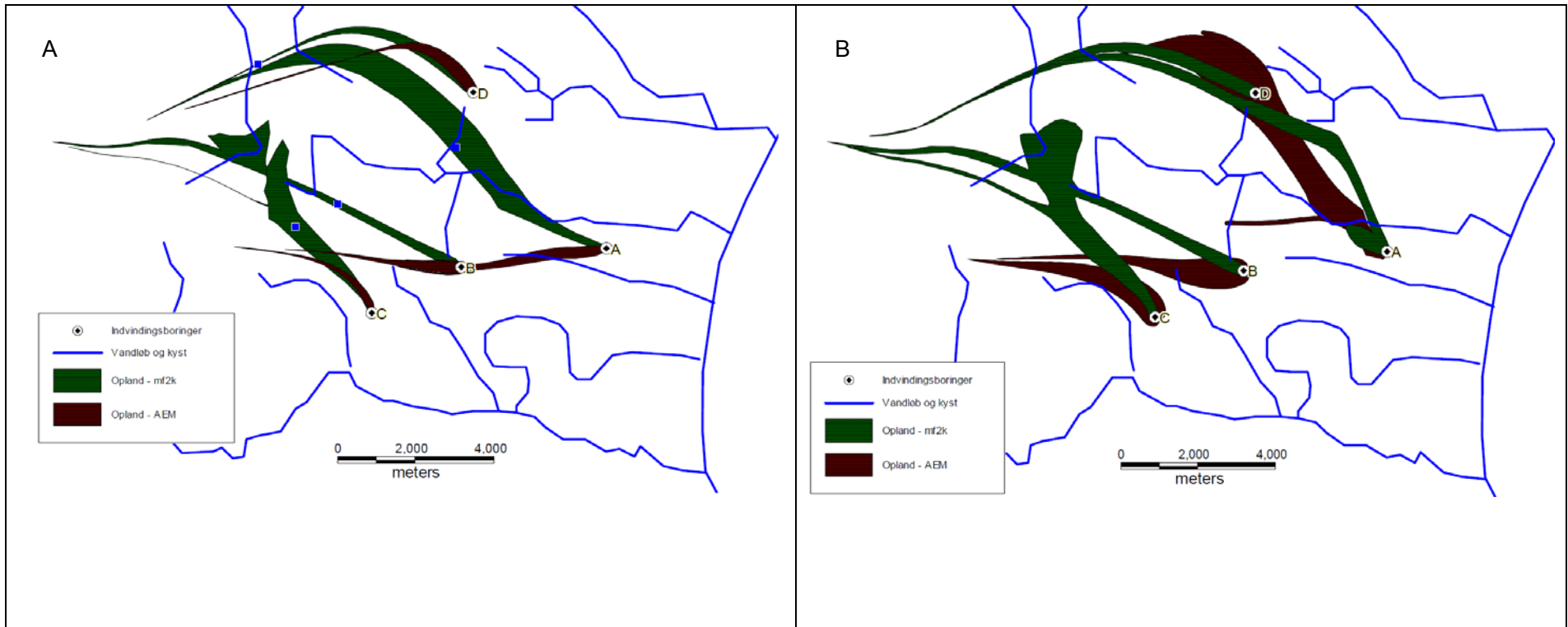
Anisotropi

Det anbefales at inddrage al tilgængelig information om eventuel anisotropi i kalken i form af f.eks. undersøgelser af/forventninger til dominerende sprækkemønstre eller ud fra prøvepumpninger og sænkningstragter fra f.eks. større kildepladser (se afsnit 3.3) og udnytte denne information i oplandsberegningerne. Oplandenes "haler" kan helt eller delvist skifte retning i forhold til hvis beregningerne udføres uden at tage højde for anisotropi. Som bekendt strømmer vandet normalt vinkelret på potentialelinjerne, men i visse tilfælde med kraftig anisotropi er der eksempler på at vandet endog kan strømme parallelt med potentialelinjerne i stedet.

I Figur 48 nedenfor er givet et eksempel fra en semisyntetisk model hvor der er beregnet oplande for 4 boringer A, B, C og D både ud fra en AEM (Analytisk element model) og en numerisk grundvandsmodel (Iversen m.fl., 2009). Boring A indvinder fra et kalkmagasin. På Figur 48, A ses en beregning af indvindingsoplandet til boring A uden anisotropi og på Figur 48, B ses en beregning af indvindingsoplandet hvor den horisontale anisotropi ($K_x:K_y$) er sat til 1:100. Det fremgår tydeligt af de 2 figurer at indvindingsoplandet både for AEM- og den numeriske model skifter retning fra en vestlig til en mere nordvestlig retning, og at ændringen er mest udtalt tæt på boring A.

Beregning af partikelaldre

I forhold til beregning af partikelaldre anbefales det at modellen valideres imod eventuelle tidsserier over diverse vandkemiske parametre som f.eks. nitrat og sulfat m.fl. På denne måde kan det sikres at modellen er i stand til at simulere realistiske transporttider fra grundvandsspejlet og ned til indvindingsfilteret.



Figur 48. Eksempel på oplandsberegning for boringer henholdsvis uden (A) og med (B) hensyntagen til anisotropi. Boring A på figuren indvinder fra et kalkmagasin (efter Iversen m.fl., 2009).

4.3 Kortlægning af saltvandsgrænsen

I områder hvor der kan risikeres indtrængning af saltvand i indvindingsboringer, er det vigtigt at kende både beliggenheden og karakteren af overgangszonen mellem fersk og salt grundvand. Et godt kendskab til hvorledes saltkoncentrationen stiger med dybden i overgangszonen, er vigtig for at kunne modellere dybden til saltvandet ud fra f.eks. fladedækkende TEM/SkyTEM kortlægninger.

Problemstillinger

Overgangen til det salte grundvand ligger ofte dybere end de lokale vandforsyningsboringer og er således sjældent repræsenteret i f.eks. analyser af vandprøver. Desuden udgør vandanalyser kun punktmålinger i både horisontal og vertikal forstand. Forudsat der findes tilstrækkelig dybe boringer, kan grænsen kortlægges ved hjælp af borehulslogging som dog i det horisontale plan også vil udgøre punktmålinger. Grænsens beskaffenhed som en overgangszone (i modsætning til en skarp grænse, se også afsnit 3.5) med varierende tykkelse og gradient i kloridkoncentrationen (stigning i koncentration pr. meter i dybden) udgør desuden en særlig udfordring ved kortlægning med elektriske og elektromagnetiske metoder. Endelig kan kalkmagasiner med salt grundvand forveksles med lerede aflejringer ved kortlægning med elektriske og elektromagnetiske metoder (se også afsnit 4.1).

Anbefalinger

Kortlægning af saltvandsgrænsen foretages bedst ved at kombinere fladedækkende kortlægning udført med elektriske og elektromagnetiske metoder og information fra boringer, vandanalyser og logs.

Det kan anbefales at der i kortlægningsområdet sættes én eller flere dybe boringer, der går gennem hele transitionszonen – eller i hvert fald så langt ned som muligt. Det anbefales også at udføre logging (se herunder) i boringen(-erne) for at få et detaljeret billede af modstandsforholdene i dybden, som kan anvendes ved fortolkning af f.eks. TEM-målinger (se herunder). På den måde kan opnås en god forståelse af beliggenheden og karakteren af saltvandsgrænsen/overgangszonen.

Ved efterfølgende at filtersætte boringerne strategisk, kan der tages vandanalyser til bestemmelse af saltindhold samt eventuelt ledningsevne og alder. Disse kan bidrage til fortolkningen af sammenhængen mellem vandtype, logresultater, geologi og alder og dermed oprindelsen til det salte vand. F.eks. kan det belyses ud fra ilt-isotop undersøgelser til hvilken dybde yngre ferskvand medvirker til fortynding af det residuale saltvand.

Filtersætningen kan efterfølgende bruges til overvågning af blandt andet saltvandskoncentrationen hvis der er behov for at øge indvindingen eller mængden af den ferske vandresource er kritisk.

Kortlægning af saltvandsgrænsen med logging

Til vurdering af saltvandsgrænsen i formationen omkring en boring er det ikke tilstrækkeligt at måle den elektriske ledningsevne af væsken i borehullet (Klitten og Wittrup, 2006). Intern

strømning i borehullet og opblanding af borehulsvæske med forskellige egenskaber betyder at forholdene i borehulsvæsken ofte kun i nogen grad afspejler forholdene i grundvandet, og kun sjældent viser den faktiske beliggenhed af eventuelle grænser eller overgange. Den elektriske ledningsevne og dermed saltindholdet i porevandet i formationen vurderes bedst ud fra induktions- eller resistivitetslogs som måler henholdsvis den samlede ledningsevne og resistivitet af matrix og porevæske. I Appendix C er beskrevet hvorledes et logprogram sammensættes optimalt i forhold til kortlægning af saltvandsgrænsen.

For at kunne konkretisere starten af overgangszonen foreslår Klitten og Wittrup (2006) at saltvandsgrænsen generelt placeres ved et kloridindhold på over 300 mg/l (tidligere grænseværdi for klorid i drikkevand). På baggrund af sammenhænge mellem ionkoncentrationer og elektrisk ledningsevne viser de hvordan et kloridindhold på ca. 300 mg/l svarer til en ledningsevne af porevandet på ca. 100 mS/m og dermed til en formationsledningsevne på 25 mS/m (ved en formationsfaktor på 4, se også Appendix C) eller en formationsresistivitet på 40 Ohmm. De foreslår således at man som tommelfingerregel kan placere saltvandsgrænsen ved en formationsledningsevne i skrivekridtet på 25 mS/m eller en formationsresistivitet på 40 Ohmm baseret på induktions- eller resistivitetslogs. Samtidig påpeger de at grænsen også kan placeres anderledes. Hvis niveauet for formationsledningsevnen er konstant og under 25 mS/m over et længere interval, og der f.eks. i forbindelse med et mergellag indtræffer en jævn stigning, vil grænsen sættes ved starten af denne stigning selvom formationsledningsevnen måske er mindre end 25 mS/m. Endelig viser de at gradienten for stigningen med dybden i kloridindholdet i skrivekridt typisk kan antages at være ca. 12 gange gradienten for stigningen i formationsledningsevne.

Kortlægning af saltvandsgrænsen med TEM

Ved tolkning af TEM sonderinger bestemmes normalt "*dybden til en god leder*" defineret som en relativt skarp grænse mellem et lag med høj elektrisk ledningsevne og et lag med lav ledningsevne. Da overgangen mellem fersk- og saltvand forekommer som en transitionszone hvor kontrasterne mellem lagenes elektriske ledningsevne ikke er skarpe, er der i Poulsen m.fl. (2006) foretaget et teoretisk modelstudie af karakteren af TEM-resultater under sådanne forhold. Resultaterne viser at ved tolkning af TEM-sonderinger i situationer med en gradvis ændring i den dybeste formations elektriske ledningsevne, er det nødvendigt at definere to gode ledere nederst i den geofysiske model:

- *en øvre god leder* defineret som det lag i modellen der har en resistivitet på 40 ohmm eller mindre, og hvor alle underliggende lag har mindre resistivitet.

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

Resultaterne har endvidere vist at når gradienten for stigningen af formationens ledningsevne er større end 5 mS/m, vil der i tolkningsresultatet kun optræde én god leder som vil have en resistivitet på 15 ohmm eller mindre. Når gradienten for stigningen af formationens ledningsevne er mindre end 5 mS/m, vil der i tolkningsresultatet optræde en øvre god leder med en resistivitet på mellem 15 og 40 ohmm oven over den nedre gode leder.

Modelstudiet viser også at toppen af den øvre gode leder ikke vil afspejle toppen af overgangszonen, men typisk ligge 10-35 m under denne (defineret som ovenfor ud fra borehulslogs og ved en formationsledningsevne på 25 mS/m eller en formationsresistivitet på 40 ohmm).

Samtidigt viser modelstudiet at hvor der i TEM-resultaterne kun optræder én god leder, vil toppen af denne typisk ligge mindre end 10 m under toppen af overgangszonen.

Ved sammenligning mellem et meget omfattende antal TEM-målinger (344) i den nordøstlige del af Sjælland og den geologiske lagfølge i borer og samt fastlæggelse af toppen af overgangszonen i nogle af borerne konstateres det i Poulsen m.fl. (2006), at i modsætning til antaget ud fra de teoretiske modelstudier, observeres toppen af den øvre gode leder i flere tilfælde at ligge 20-30 m over toppen af overgangszonen, mens de observerede gradienter for stigningen i elektrisk ledningsevne generelt svarer bedre til det forventede ud fra modelstudierne.

Kortlægning af saltvandsgrænsen med TEM-målinger kan således give et godt overblik, men bør altid sammenstilles med detailstudier baseret på borehulslogging for at bestemme det rigtige niveau for beliggenheden af saltvandsgrænsen i et område.

På Fyn og Sjælland forekommer kalkmagasiner hvor der er større områder med mere eller mindre permeable aflejringer af paleocæne lere, som har lav resistivitet og dermed kan forveksles med kalk med salt grundvand. Her kan det anbefales også at understøtte med geologisk information i form af borer.

4.4 Kortlægning af kemiske stoffer i kalken

4.4.1 Kortlægning af klorid i grundvandet

I kalkmagasiner er kloridindholdet i grundvandet en meget væsentlig kemisk parameter da kloridindholdet ofte sætter en begrænsning på indvinding af grundvand til drikkevandsformål (se også afsnit 3.5). I kalkmagasinerne kan et højt kloridindhold både stamme fra naturlige kilder eller menneskeskabte kilder. Ofte vil der være flere kilder til klorid i grundvandet og dette vil resultere i en akkumuleret kloridkoncentration. Indvinding fra kalkmagasiner i Danmark foregår blandt andet i de tættest befolkede områder med relativ lille grundvandsdannelse. Her er der et stort behov for drikkevand, og der foregår derfor en kraftig indvinding med risiko for indtrængning af salt grundvand enten i form af marint infiltrationsvand, salt marint residualt grundvand eller salt mineralsk grundvand.

Problemstillinger

Et problematisk højt kloridindhold større end grænseværdien på 250 mg/l i kalkmagasiner kan stamme fra flere kilder:

Naturlige kilder:

- Marint residuelt grundvand i kalken

Indvindingspåvirkede kilder:

- Indtrængning af salt marint infiltrationsvand i kystnære områder
- Optrængning af marint residuelt grundvand f.eks. under åer
- Optrængning af salt mineralsk grundvand f.eks. i forkastninger

Kilder på jordoverfladen:

- Anvendelse af vejsalt
- Anvendelse af gødning i landbruget etc.

Anbefalinger

Generelt anbefales det at følge anvisningerne i Geo-vejledning 6 "Kemisk grundvandskortlægning" (Hansen m.fl., 2009b) ved kortlægning af grundvandskemi i kalkmagasiner. Geo-vejledningen giver konkrete anbefalinger til arbejdsgang, datahåndtering, beskrivelse af vandindvindingen, indsamling af nye data, præsentationer, tolkning af kemiske processer herunder identifikation af vigtige processer og problemstoffer.

Desuden anbefales det at klassificere grundvandstyperne i kalkmagasinerne på baggrund af definitionerne i Larsen & Berger (2006), som er gengivet i appendix E.

Viden om påvirkning af det ferske grundvand med det salte grundvand kræver en præcis kortlægning af saltvandsgrænsen (se afsnit 4.3).

Viden om kilderne til klorid i grundvandet kan opnås ved brug af indikatorstoffer. F.eks. kan indholdet af bromid give indikationer på kilden til klorid og bromid anbefales derfor medtaget i analyseprogrammet i forbindelse med udførelse af undersøgelsesboringer i grundvandskortlægningen (Kristiansen m.fl., 2009).

I stærkt urbaniserede områder med mistanke om påvirkning fra vejsalt anbefales det, at inddrage en vurdering af grundvandsressourcens påvirkning fra vejsaltning f.eks. ved opstilling af et risikoværktøj baseret på en grundvandsmodel (Kristiansen m.fl., 2009).

4.4.2 Kortlægning af andre naturlige kemiske stoffer

Grundvandets kemiske sammensætning i kalkmagasiner er langt overvejende et resultat af naturlige kemiske processer. Kalkligevægt og opløsninger af karbonater med kuldioxid i det nedsivende vand er en grundlæggende naturlig kemisk proces der kontrollerer koncentrationen af en række ioner i grundvandet som f.eks. indholdet af calcium, magnesium og hydrogencarbonat samt pH. Ligeledes påvirkes koncentrationen af jern og mangan i reduceret grundvand i kalkmagasinerne af forskellige typer karbonatudfældninger. Ionbytningsprocesser er også almindelige i kalkmagasiner da der ofte ikke er ligevægt mellem saltindholdet i vandfasen og i den faste fase. Ionbytningsprocesser påvirker koncentrationen af kationer i grundvandet som f.eks. natrium og calcium, og påvirker dermed også kalkopløsningen.

Problemstillinger

Opløsning af mineraler i kalkmagasinerne kan føre til frigivelse af en række stoffer som er problematiske for grundvandskvaliteten. Fluoridholdigt grundvand i kalkmagasiner skyldes opløsning af fluoridholdige mineraler såsom fluorit/fluspat eller fosforit, som også kan være påvirket af ionbytning. Det tyder på at strontiumholdigt grundvand i kalkmagasiner skyldes opløsning af en mineralogisk kilde som f.eks. coelestin, og at opløsningen også kan være påvirket af ionbytning. Forekomsten af arsenholdigt grundvand i kalkmagasiner skyldes sandsynligvis et kompleks samspil mellem frigivelse af arsen ved pyritoxidation, udfældning i jernoxider og efterfølgende reduktiv opløsning af jernoxider med infiltrerende grundvand med reaktivt organisk stof.

Anbefalinger

Generelt anbefales det at følge anvisningerne i Geo-vejledning 6 "Kemisk grundvandskortlægning" (Hansen m.fl., 2009b) ved kortlægning af grundvandskemien i kalkmagasiner. Geo-vejledningen giver konkrete anbefalinger til arbejdsgang, datahåndtering, beskrivelse af vandindvindingen, indsamling af nye data, præsentationer, tolkning af kemiske processer herunder identifikation af vigtige processer og problemstoffer.

Desuden anbefales det at klassificere grundvandstyperne i kalkmagasinerne på baggrund af definitionerne i Larsen & Berger (2006), som er gengivet i appendix E.

Den rumlige fordeling af naturlige kemiske stoffer i kalkmagasiner kan undersøges ved en kombination af flowlogging, der kortlægger indstrømningshorisonter, og niveauspecifik vandprøvetagning. I nogle tilfælde kan der på grundlag heraf tilrettelægges en indvindingsstrategi der begrænser indholdet af eventuelle problemstoffer.

I områder med arsen i den øvre del af kalkmagasinerne og hvor der indvindes fra dybere sprækkezoner i hydraulisk kontakt med den højtliggende del af kalken, kan der være risiko for at trække arsen ned til indvindingszonen. Omvendt kan der i områder hvor der forekommer for høje arsen-koncentrationer i de øvre dele af kalken, være mulighed for at lokalisere dybere indvindingszoner med tilstrækkeligt lave koncentrationer af arsen. Det kan være muligt hvis der optræder udbredte lavpermeable lag i kalken, og hvis grundvandsdannelsen til de dybere lag foregår i områder hvor der ikke frigives arsen fra sedimenterne (Kjøller m.fl., 2009). I kalkmagasiner i områder med forhøjede koncentrationer af arsen anbefales det derfor at undersøge dybere dele af grundvandsmagasinet og kortlægge de grundvandskemiske forhold i dybe opsprækkede zoner. Samtidig anbefales det at undersøge om der er risiko for, at øget infiltration til de dybere lag kan medføre nedtrængning af arsenholdigt grundvand.

Ved kortlægning af grundvandet i kalkmagasiner bør der være speciel fokus på de naturlige problemstoffer fluorid, strontium og arsen. I nogle kalkmagasiner kan der også optræde andre naturlige problemstoffer end de tre nævnte, og der bør naturligvis også være fokus på disse.

4.4.3 Kortlægning af kemiske stoffer påvirket af menneskelig aktivitet

Grundvandet kemiske sammensætning i kalkmagasiner bærer ofte præg af kemiske processer påvirket af menneskelige aktiviteter.

Kraftig indvinding af grundvand kan påvirke grundvandskvaliteten i kalkmagasinerne negativt idet det øgede flow af iltende stoffer (ilt og nitrat) omkring indvindingsboringen på grund af den øgede vandstrømning kan resultere i et øget forbrug af reduktionskapacitet (f.eks. pyrit). Et eksempel er barometerånding, pyritoxidation og frigivelse af nikkel. Et andet eksempel, som er mere uafhængigt af magasinbjergarten, er forceret pyritoxidation, stigende sulfatindhold og nitrat i grundvandet, som også er koblet til udvaskning af nitrat fra landbrugsaktiviteter.

Problemstillinger

Sænkning af grundvandsspejlet på grund af kraftig indvinding kan forcere oxidationen af sulfidminerale. Et eksempel er oxidation af nikkelholdige sulfidminerale ved barometerånding. Nikkel frigivet til grundvandet vil efterfølgende bindes sekundært til manganoxider, lerminerale eller karbonater. Den sekundært bundne nikkel kan frigives igen ved hævnning af grundvandsspejlet og vil kunne mobiliseres lokalt (inden for 500 m) omkring indvindingsboringen.

Ligeledes kan kraftig indvinding også resultere i et u hensigtsmæssigt højt indhold af nitrat i grundvandet hvis reduktionskapaciteten opbruges eller ikke kommer i spil på grund af en relativ hurtig vandstrømning i forhold til den kemiske reaktionsrate.

Det er velkendt at landbrugsaktiviteter resulterer i udvaskning af nitrat til grundvandet, hvilket også gør sig gældende for kalkmagasiner. Specielt på Sjælland beskytter forholdsvist tynde lerdæklag (5-15 m) de dybere kalkmagasiner mod nitratforurening, mens opsprækkede kalkaflejringer med tynde dæklag på f.eks. Djursland, omkring Aalborg og i Nordjylland blandt andet resulterer i nitratsårbare kalkmagasiner.

Generelt øger kombinationen af opsprækket moræneler og stor befolkningstæthed samt manglende dæklag over kalkmagasinerne risikoen for udvaskning af miljøfremmede stoffer til grundvandet.

Anbefalinger

Generelt anbefales det at følge anvisningerne i Geo-vejledning 6 "Kemisk grundvandskortlægning" (Hansen m.fl., 2009b) ved kortlægning af grundvandskemi i kalkmagasiner. Geo-vejledningen giver konkrete anbefalinger til arbejds gang, datahåndtering, beskrivelse af vandindvindingen, indsamling af nye data, præsentationer og tolkning af kemiske processer, herunder identifikation af vigtige processer og problemstoffer.

Udover at anvende redox-vandtyperne i Geo-vejledningen anbefales det at klassificere grundvandstyperne i kalkmagasinerne på baggrund af definitionerne i Larsen & Berger (2006) som er gengivet i appendix E.

Den rumlige fordeling af problemstoffer i kalkmagasiner kan undersøges ved en kombination af flowlogging der kortlægger indstrømningshorisonter og niveauspecifik vandprøvetagning. I nogle tilfælde kan der på grundlag heraf tilrettelægges en indvindingsstrategi der begrænser indholdet af eventuelle problemstoffer.

Ved kortlægning af grundvandet i kalkmagasiner bør der være speciel fokus på problemstoffet nikkell som følge af en eventuel overudnyttelse af grundvandsressourcen. Det vurderes at nikkellproblemer i kalkmagasinerne på Sjælland i overvejende grad er knyttet til lokale nikkellplagede indvindingsboringer. Nikkellproblemer kan søges løst ved fysisk at forhindre ilttilførsel til den umættede zone via boringskonstruktionen, og ved driftsteknisk at forhindre eller reducere en eventuel sekundær nikkellfrigivelse betinget af vandspejlshævning (Jensen m.fl., 2003). Desuden kan alternative indvindingsmuligheder formentlig i mange tilfælde findes inden for kort afstand (400-500 m) af nikkellplagede indvindingsboringer (Kjøller m.fl., 2006).

Nedbringelse af indholdet af nitrat i drikkevandet kan også søges løst driftsteknisk ved at sprede indvindingen og pumpe mere regelmæssigt så store sænkninger af grundvandspejlet undgås.

Ved kortlægning af nitrat i grundvandet i kalkmagasiner skal der laves en stoffs specifik udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder på baggrund af en vurdering af kalkmagasinernes nitratsårbarhed efter anvisninger i Zoneringsvejledningen (MST, 2000) og Geovejledning 5 "Vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed" (Hansen m.fl., 2009a).

4.4.4 Særlige forhold ved overvågning af kalkmagasiner

Der er behov for overvågning af grundvandet i kalkmagasinerne i forbindelse med opfølgning på konkrete indsatsplaner. Det overordnede formål med denne overvågning er at skabe et tilstrækkeligt fremtidigt datagrundlag som gør det muligt fremover, fortsat at administrere grundvandet i området på et solidt og bæredygtigt grundlag.

Den anbefalede overvågning skal beskytte grundvandsressourcen både med hensyn til mængde og kvalitet. Der er behov for at følge variationer i grundvandsstanden, de oppumpede vandmængder og grundvandets kemiske sammensætning. Et andet vigtigt formål med overvågningen er at kunne vurdere konsekvenserne af eksempelvis ændrede oppumpningsmønstre eller klimatiske forandringer for de vandmængder der er til rådighed for vandforsyningen.

Forslag til en overvågningsplan for kalkmagasiner kan med fordel udarbejdes med udgangspunkt i allerede foreliggende kortlægningsresultater og viden. De konkrete anbefalinger til overvågning af grundvandet kan omfatte udpegning af eksisterende boringer der er anvendelige til at belyse specifikke formål. Udover de eksisterende boringer kan der dog også være behov for at etablere nye boringer afhængig af problemstillingerne i det konkrete område.

Problemstillinger

Der er behov for at overvåge grundvandets kemiske sammensætning for at kunne lave effektmålinger af indsatsplanen, og for at kunne identificere uønskede udviklingstendenser som enten skyldes forurening fra arealanvendelsen eller ændring i grundvandets strømningsretning, der påvirker grundvandskvaliteten i kalkmagasinet negativt, for eksempel ved oppumpning af saltpåvirket eller nikkelholdigt vand.

Anbefalinger

Der skal indsamles oplysninger om variationer i grundvandsstand og indvindingsmængde, således at det sikres at en eventuel overudnyttelse af grundvandsressourcerne bliver konstateret i tide. Systematiske observationer af variationer i såvel grundvandsstand som indvindingsmængde er en forudsætning for at kunne vurdere om det er nødvendigt at foretage justeringer i det eksisterende indvindingsmønster. Disse data indsamles til dels allerede i dag på vandværkerne, men der kan være et behov for en udbygning af omfanget af pejlinger, både med hensyn til antal filtre og pejlefrekvens.

Overvågning af grundvandsstanden bør ske ved pejling i udvalgte, hensigtsmæssigt placerede borer. Dette kan ske dels i særlige pejleboringer tilknyttet de enkelte vandværker, og dels i strategisk placerede pejleboringer der på et overordnet niveau dækker den samlede tilgængelige ressource i området. På denne måde dækkes såvel de allerede udnyttede magasiner som potentielt fremtidige indvindingsområder.

Særligt ved kalkmagasiner hvor forureningstruslen ofte kommer nedefra i form af saltvand, skal det overvejes at placere overvågningsfiltre dybere end indvindingsniveauet.

Overvågning af grundvandskvaliteten bør bygge på to elementer. For det første vandværkernes egenkontrol i produktionsboringer og pejleboringer og for det andet skal der, som et led i indsatsplanerne, etableres en særlig målrettet overvågning af relevante magasiner hvor påvirkningen fra identificerede problemstoffer i kalkmagasinerne overvåges:

1. Indtrængning af saltvand og kloridpåvirkning af grundvandet (se afsnit 4.3 og 4.4.1)
2. Naturlige kemiske stoffer (fluorid, strontium, arsen mv., se afsnit 4.4.2)
3. Kemiske stoffer påvirket af menneskelige aktiviteter (nikkel, sulfat, nitrat, miljøfremmede stoffer mv., se afsnit 4.4.3)

5. Ideer til fremtidig forskning og udvikling

Herunder beskrives kort en række emner for fremtidig forskning og udvikling med tilknytning til kalkmagasiner. Ideerne er baseret på diskussioner ved møde med følgegruppen til denne Geo-vejledning, og kan have relevans både for grundvandskortlægningen og mere generelt i forbindelse med forskning inden for kalkmagasiner.

Kort over udbredelsen af kalktyper

Der findes ingen landsdækkende kort over udbredelsen af kalktyper, og i f.eks. DK-modellen skelnes der ikke mellem de forskellige typer kalk, selvom deres hydrauliske egenskaber er meget forskellige. Der er således et behov for udarbejdelse af kort over hele landet med udbredelse og tykkelser af kalktyper eller en 3D-model i f.eks. GeoScene3D over kalken i Danmark med opdeling i kalktyper.

Saltvandsgrænsen i kalkmagasiner

Der er mange steder i Danmark i forbindelse med grundvandskortlægningen udført omfattende kortlægning af saltvandsgrænsen og overgangszonen mellem fersk og salt grundvand. Resultaterne af undersøgelserne kunne med fordel sammenstilles på et landsdækkende kort og inkluderes i en eventuel 3D-model over kalktyper. En sådan sammenstilling vil give et overblik over områder med saltvandsproblemer, og vil kunne danne baggrund for en prioritering af nye undersøgelser af saltvandsgrænsens/overgangszonens beliggenhed og beskaffenhed i kalkmagasinerne.

Sprækkesystemer

Eksisterende viden om sprækker og sprækkesystemer er relativt begrænset og meget lokal. Der er behov for yderligere undersøgelser af sprækkesystemer relateret til kalktyper, tektonik og grundvandsstrømning, ligesom der er behov for mere viden om opskalering fra detail-undersøgelser til regional skala. Den eksisterende viden kunne med fordel sammenstilles på landsdækkende kort sammen med kendte forkastninger i kalken/ved kalkoverfladen.

Strømning og transport i opsprækket kalk

Strømningen i kalkbjergarter foregår primært i sprækkerne, og en eventuel forurenings-transport i dette miljø vil primært foregå som advektiv strømning i sprækkerne og sekundært ved diffusion i matrix. På grund af høje transporthastigheder i sprækkerne kan der opnås fejlbehæftede resultater når transporten beskrives med anvendelse af en traditionel strømning- og transportmodel, som f.eks. den ækvivalente porøse medium (EPM) model, som kendes fra bl.a. MODFLOW og MIKE SHE (se Appendix D). Der er derfor behov for at undersøge hvornår det er acceptabelt at anvende en EPM model, og under hvilke forhold denne metode resulterer i for store fejl og andre metoder bør tages i brug. Dette kan være vigtigt i forbindelse med grundvandsbeskyttelse, herunder bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande samt fastlæggelse af boringsnære beskyttelsesområder (BNBO) i grundvandskortlægningen.

Prøvepumpning i kalkmagasiner

Den eksisterende litteratur om prøvepumpninger i kalkmagasiner er teknisk kompliceret at forstå. Derfor kunne det i forbindelse med grundvandskortlægningen være relevant med afholdelse af et kursus i emnet eller udarbejdelse af materiale som er lettere tilgængeligt. Endvidere foreligger der et stort erfaringsgrundlag med prøvepumpning i kalken fra store anlægsprojekter med grundvandssænkninger som kunne nyttiggøres i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Grundvandskemi i kalkmagasiner

Detaljerede undersøgelser af grundvandskemien (arsen, nikkel, strontium, saltvandsgrænsen etc.) i kalkmagasiner har hidtil primært omfattet kalkmagasinerne på Sjælland og danner, ud over resultater fra den nationale grundvandskortlægning, baggrund for beskrivelsen af grundvandskemien i kalkmagasiner i denne rapport. En fuldstændig beskrivelse af de grundvandskemiske forhold i alle typer kalkmagasiner i Danmark kræver udarbejdelse af nationale kort over grundvandskemien i disse baseret på eksisterende data i JUPITER evt. suppleret med detailundersøgelser i de egne af landet (Jylland og Fyn) hvor kemien i kalkmagasinerne er dårligere belyst. Ud over en beskrivelse af hovedkomponenterne (inkl. vandtypen) i grundvandet i kalkmagasinerne bør der specielt være fokus på klorid (inkl. saltvandsgrænsen), fluorid, strontium, arsen, nikkel og nitrat (inkl. nitratfronten). Et fyldestgørende nationalt overblik over grundvandskemien i kalkmagasiner vil f.eks. være et særdeles brugbart værktøj i forbindelse med vurdering af drikkevandsressourcens kvalitet i kalkmagasiner, og om der er antropogene eller naturlige stoffer som truer kvaliteten.

Beskyttelse af kalkmagasiner

Kalkmagasiner er særligt sårbare over for forurenende stoffer som nitrat i de tilfælde hvor der over kalkmagasinet kun er tynde eller slet ingen beskyttende dæklag og hurtig spræketransport i kalkmagasinet. Generelt er der en opfattelse af at kalkmagasinerne på Sjælland og Fyn er velbeskyttede i forhold til kalkmagasiner på Djursland og i Nordjylland. Der er behov for mere viden om den generelle beskyttelse af kalkmagasinerne mod nitratforurening hvilket bl.a. inkluderer syntese af eksisterende viden og muligvis nye undersøgelser af 1) dæklagenes beskaffenhed, 2) de interne mergellag, 3) nitratreduktionskapaciteten, 4) nitratfronten, 5) nitratindhold og 6) spræketransport og strømningsforhold på udvalgte lokaliteter. Viden om beskyttelsen af kalkmagasiner er yderst vigtig i forhold til den nationale grundvandskortlægning.

Kerteminde Mergel

Kerteminde Mergel kan enten være lavpermeabel og dermed udgøre et beskyttende dæklag eller være forkislet og opsprækket og dermed udgøre en vandførende enhed. Der er behov for en bedre afdækning af Kerteminde Mergels egenskaber og hvordan de eventuelt varierer geografisk.

6. Referencer

Andersen, L.T. 1998: Undersøgelse af Øvre Kridt og Kænozoikum med fokus på saltbevægelse og jordskælv i Det norsk-danske Bassin, Jyske Rev. Processering og tolkning af refleksionsseismiske data. Kandidatopgave ved Maringeologisk Afdeling Geologisk Institut, Aarhus Universitet April 1998.

Andersen, H., Juul, K. & Nielsen, A.M. 2005: Trykforskel i nordjysk Skrivekridt – findes der adskilte grundvandsmagasiner? *Geologisk Nyt* 3/05.

Anderson, M.P. & Woessner, W.W. 1992: *Applied Groundwater Modeling, simulation of Flow and Advective Transport*.

Appelo, C.A.J. & Postma, D. 2005: *Geochemistry, groundwater and pollution*. Second edition. A.A.Balkema Publishers, 649 p.

Archie, G.E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Petroleum Transactions, Volume 146, pages 54-62*.

Atkinson, T.C. 1975: Diffuse and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset, England. IAH Congress, Huntsville, Alabama.

Bear, J. 1993: Modeling flow and contaminant transport in fractured media. In: Bear, J., Tsang, C.F. & Marsily, G.: *Flow and Contaminant transport in fractured rock*. London. Academic Press, pp. 1-37.

Berthelsen, O. 1987: *Geologi i Aalborg området. Råstoffer – fundering – vandindvinding*. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet, 1987.

Bidstrup, T. & Klitten, K. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 1. Kortlægning af Danienkalk-Skrivekridt grænsen samt forkastninger i denne. GEUS rapport 2006/16.

Bjerager, M. 2003: *Danien bryozobanker i Stevns Klint, Danmark*. Ph.d-dag 2003, Geologisk Institut, Københavns Universitet. *Geologisk Tidsskrift* 2003 hæfte 2, pp. 29, København.

Blem, H. 2002: Carlsbergforkastningen – Historie, placering og betydning, I: Frederiksen, J.K., Eriksen, F.S., Hansen, H.K., Knudsen, C., Jørgensen, M.E., Møller, H.M.F. og Brendstrup, J. (eds.): *Ingeniørgeologiske forhold i København*. DGF Bulletin 19, 2002.

Chilton, P.J., Lawrence, A.R. & Barker, J.A. 1990: Chlorinated solvents in chalk aquifers: some preliminary observations on behaviour and transport. In: *Chalk, Proceedings of the International Chalk Symposium, Brighton Polytechnic, 4–7 September 1989*. Thomas Telford, London, 605–610.

Christensen, O. W. 1980: Hydrauliske forhold i kalkreservoir. Del 2., Vandteknik, nr. 3, 167-176, 10 p.

DGU & RH&H Consult. 1994: Geophysical borehole logging in the Danian limestone – Log stratigraphy in western part of Øresund. Øresundskonsortiet 1994.

Ditlefsen, C., Sørensen, J., Pallesen, T.M., Pedersen, D., Nielsen, O.B., Christiansen, C., Hansen, B. & Gravesen, P. 2008: Jordprøver fra grundvandsboringer. Vejledning i udtagning, beskrivelse og geologisk tolkning i felten. Geo-Vejledning 1. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-218-9 og 978-87-7871-224-0) 108 pp + Appendix 1-2 og Bilag 1-3.

COWI. 2011: Refleksionsseismisk kortlægning, Suså-Ringsted. Naturstyrelsen Roskilde, rapport.

Erlström, M., Thomas, S.A., Deeks, N. & Sivhed, U. 1997: Structure and tectonic evolution of the Tornquist Zone and adjacent sedimentary basins in Scania and the southern Baltic Sea area. *Tectonophysics* 271, 191–215.

Fallesen, J. 1995: Stratigraphy and structure of the Danian Limestone on Amager, examined with geophysical investigations – especial with regard to the Carlsberg Fault. University of Copenhagen, Geological Institute (upubliceret speciale).

Foged, N., Larsen, G., Larsen, B. & Thomsen, E. 1995: An overview on engineering geological conditions at Storebælt. The interplay between Geotechnical Engineering and Engineering Geology. Volume 5, Storebælt and Øresund. Danish Geotechnical Society- Bulletin 11, 7-30.

Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979: Groundwater. Prentice – Hall, Englewood. Cliffs, New Jersey, 604 pp.

Frykman, P. 2001: Spacial variability in physical properties in Upper Maastrichtian chalk outcrops at Stevns Klint, Denmark. *Marine and Petroleum Geology* 18. 1041-1062.

Frykman. P. 2006: Kalk-familien og dens egenskaber. ATV møde, Kalk på tværs, Sjøfergården 8. nov. 2006

Glover, R.E. 1959: The Pattern of Fresh-Water Flow in a Coastal Aquifer, *J. Geophys. Res.*, 64(4), 457–459.

Gravesen, P. 1994: Geologisk kort over Danmark 1:50.000. Kortbladet 1312 I Odense, Geologisk basisdatakort. DGU Kortserie nr. 36.

Hansen, B., Nielsen, A.M., Iversen, C.H. & Søndergaard V. 2009a: Vurdering af grundvandsmagasiners nitratsårbarhed. Geo-Vejledning 5. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-246-2 og 978-87-7871-247-9) 38 pp.

Hansen, B., Mossin, L., Ramsay, L., Thorling, L., Ernstsen, V., Jørgensen, J. & Kristensen, M. 2009b: Kemisk grundvandskortlægning. Geo-vejledning 6. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-261-5 og 978-87-7871-262-2) 112 pp.

Henriksen, H.J. & Sonnenborg, T.O. 2005: Ståbi i grundvandsmodellering, GEUS.

Hickey, J.J. 1984: Field Testing the Hypothesis of Darcian Flow Through a Carbonate Aquifere. *Ground Water*, Vol. 22, No. 5, Sep.-Okt. 1984, 544-547, 4 pp.

Hinsby, K., Jensen, T.F. & Bidstrup, T. 2003: European reference aquifers: The limestone aquifers around Copenhagen, Denmark. Report for the EU research project BASELINE. Natural Baseline Quality of European Groundwater. A basis for Aquifer Management.

Iversen, C.H., Lauritsen, L.U., Nyholm, T. & Kürstein, J. 2008: Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Del 1). Vejledning i oplandsberegninger i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning. Geo-Vejledning 2. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-225-7 og 978-87-7871-226-4) 107 pp.

Iversen, C.H., Wernberg, T. & Nyholm, T. 2009: Test af Analytisk Element Modeller (AEM) sammenlignet med den numeriske metode til udpegning af indvindingsoplande, GEUS.

Jakobsen, P.R. 1997: Koralkalk i Øresund. *Geologisk Nyt*, 4, 97. 3-5.

Jakobsen, P.R. & Klitten, K. 1999: Fracture Systems and Groundwater Flow in the København Limestone Formation. *Nordic Hydrology*, 30 (4/5), 1999, pp. 301-316.

Jakobsen, R. 1991: Hydraulik og stoftransport I en sprækket bjergart. Rapport H9, Lossepladsprojektet. Miljøstyrelsen.

Japsen, P. 1992: Uplift in late Cretaceous and Tertiary in northern Denmark. *Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1990-1991*, pp. 169-182.

Japsen, P. 1993: Influence of Lithology and Neogene Uplift on Seismic Velocities in Denmark: Implications for Depth Conversion of Maps. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. Vol. 77.2, pp. 194-211.

Japsen, P. & Bidstrup, T. 1999: Quantification of late Cenozoic erosion in Denmark based on sonic data and basin modellin. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 46, 1, pp. 169-182.

Jensen, L.N. & Michelsen, O. 1992: Tertiary uplift and erosion in Skagerak, Nordjylland and Kattegat. *Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1990-1991*, . 159-168.

Jensen, N.P. 2003: Grønsandskalken på Sjælland – høj transmissivitet I lukkede kar? DGF Grundvandsmøde 18. september 2003. *Geologisk Tidsskrift 2003 hæfte 2*, pp. 18-19, København.

Jensen, T.F., Larsen, F., Kjøller, C. & Larsen J.W. 2003: Nikkelfrigivelse ved pyritoxidation forårsaget af barometerånding/-pumpning. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 5 2003.

Jessen, A. 1905: Kortbladene Aalborg og Niebe (nordlige del). Danmarks Geologiske Undersøgelse I, nr. 10.

Johnson, T. 2005: Specific Capacity – A measure of Well Performance, Well Problems, and Aquifer Transmissivity: Part 1 of 2. Water Replenishment Department. Technical Bulletin, Volume 2, Winther 2005.

Jørgensen, J.B. 2002: Nitratforurening i et kalkmagasin med frit vandspejl – et eksempel fra Thisted, Viborg Amt. ATV-møde: Kalkmagasiner som drikkevandsressource – problemer og løsningsforslag. 24. oktober 2002 Hotel Marselis, Århus. 45-56, 17pp.

Jørgensen, F., Sandersen, P. & Bakker, M. 2006: Buried valleys – nature and groundwater interests, in: Groundwater Resources in Buried Valleys – a Challenge for Geosciences. BurVal Working Group. EU Project Report. Leibniz Institute for Applied Geosciences, ISBN-10: 3-00-020194-7, ISBN-13: 978-3-00-020194-3.

Jørgensen, F., Kristensen, M., Højberg, A.L., Klint, K.E.S., Hansen, C., Jordt, B.E., Richardt, N. & Sandersen, P. 2008a: Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. Geo-Vejledning 3. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-227-1 og 978-87-7871-228-8) 175 pp.

Jørgensen, N.O., Andersen, M.S. & Engesgaard, P. 2008b: Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Journal of Hydrology, 348, 257-269.

Jørgensen, F. & Sandersen, P. 2009: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2007-2009. Særudgivelse. ISBN 978-87-7871-259-2. Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Kelstrup, N. 1995: Geologisk kort over Danmark 1:50.000. Kortbladet 1312 IV Tommerup, Geologisk basisdatakort. DGU Kortserie nr. 39.

Kjøller, C., Jessen, S., Larsen, F., Postma, D. & Jakobsen, R. 2006: Binding af nikkel til og frigivelse fra naturlige kalksedimenter. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 8 2006.

Kjøller, C., Larsen, F., Sø, H.U. & Postma, D. 2009: Arsen i kalkmagasiner i Danmark. GEUS rapport.

Klitten, K., Ploug, C. & Olsen, H. 1994: Geophysical log-stratigraphy of the København Limestone. Proceedings of the Eleventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen. Bulletin of the Danish Geotechnical Society 11, Vol. 5, pp. 127-134.

Klitten, K. 2003: Log-stratigrafi for Selandien Lellinge Grønsand formationen og Kerteminde Mergel formationen. DGF Grundvandsmøde 18. september 2003. Geologisk Tidsskrift 2003 hæfte 2, pp. 20-22, København.

Klitten, K., Larsen, F. & Sonnenborg, T.O. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport. GEUS rapport.

Klitten, K. & Wittrup, C.S. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 2. Undersøgelse af saltvandsgrænsen ved hjælp af geofysisk borehulslogging. GEUS rapport 2006/17.

Knudsen C., Larsen B. & Jakobsen P.R. 1993: Geologisk beskrivelse prøvegravninger i Øresund. Prøvegravning 3, 4, 5 og 6. DGU Kunderapport nr 12-1993.

Knudsen, C. & Klitten, K. 1995: Bybane i København Kalk. DGU Information, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, nr. 3, November 1995. pp. 2-3.

Kristiansen, S.M., Christensen, F.D. & Hansen, B. 2009: Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt. Særudgivelse fra GEUS, 107 pp.

Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. 2000: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. ILRI publication 47.

Kærgaard, H. 1988: Systematisk bearbejdning af data fra langtidspåpumpninger. Kompendium til efteruddannelse nr. 210. Ingeniørhøjskolen, Horsens Teknikum.

Larsen, F. & Berger, K. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 5. Grundvandstyper i kalkmagasinerne. GEUS rapport 2006/20.

Larsen, F., Sonnenborg, T., Madsen, P., Ulbak, K.A. & Klitten, K. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6. Detailundersøgelser i Karlslunde værkestedsområde. GEUS rapport 2006/21.

Larsen, G. 1961: Kvantitativ petrografisk undersøgelse af nogle sjællandske Danienkalksten. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Række 4, Bind Nr. 7, 25 pp.

Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen B. & Baumann, J. 1988: Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse. Dansk Geoteknisk Forening, DGF-Bulletin Nr. 1, ISBN: 87-983058-2-4.

Liboriussen, J., Ashton, P. & Tygesen, T. 1987: The tectonic evolution of the Fennoscandian Border Zone in Denmark. Tectonophysics, Vol. 137, pp. 21-29.

Lykke-Andersen, H. & Surlyk, F. 2004: The Cretaceous–Palaeogene boundary at Stevns Klint, Denmark: inversion tectonics or sea-floor topography? Journal of the Geological Society, London, Vol. 161, 2004, pp. 343–352.

Markussen, L.M. 2002: Grundvandsforhold i København, I: Frederiksen, J.K., Eriksen, F.S., Hansen, H.K., Knudsen, C., Jørgensen, M.E., Møller, H.M.F. og Brendstrup, J. (eds.): Ingeniørgeologiske forhold i København. DGF Bulletin 19, 2002.

MC Aalborg. 2010: Regional grundvandskemi og boringer for aktivitetsområderne 1445 Støvring og 1453 Torsted. COWI rapport.

Mielby, S., Thøgersen, C. & Thomsen, R. 1983: Kortlægning af geologiske forhold og salt grundvand i Kolindsund/Grenå-området 1980-83. Århus amtskommune, 188 pp.

Mielby, S. & Sandersen, P. 2005: Indsatskortlægning i Nyborg-området. – Om samspillet mellem geologiske stor-skalastrukturer og forekomsten af salt grundvand. ATV-møde om Jord- og grundvandsforurening 2005, p. 353-365

Mielby, S., Ditlefsen, C. & Olesen, H. 2009: Potentialekortlægning. Vejledning i udarbejdelse af potentialekort. Geo-Vejledning 4. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-239-4 og 978-87-7871-240-0) 70 pp

Miljøministeriet. 2009: Administrationsgrundlag for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. Miljøministeriet. By- og Landskabsstyrelsen.

Miljøstyrelsen. 2000: Zonering. Detailkortlægning af arealer til beskyttelse af Grundvandsressourcen. Vejledning Nr. 3, 2000. Miljøstyrelsen. Miljø- og Energiministeriet.

Miljøstyrelsen, 2006: Radioaktive isotoper in Danish drinking water. Eds.: Sven P. Nielsen Risø National Laboratory. Working Report No. 11 2006.

Nielsen, A.T. 2010: Danmarks geologiske udvikling fra 1.450 til 65 Mio. år før nu. Geoviden, Geologi og Geografi, nr 2, Geocenter Danmark.

Nielsen, K.A. 2007: Fractured aquifers – Formation Evaluation by Well Testing. Trafford Publishing.

Nielsen, K.S. & Jørgensen, J.B. 2008: Lavpermeable horisonter i skrivekridtet – Fase A. Faglig rapport, Miljøministeriet, Miljøcenter Aalborg, Team Grundvand.

Nielsen, L., von Brockdorff, A.S., Bjerager, M. & Surlyk, F. 2009: Three-dimensional architecture and development of Danian bryozoan mounds at Limhamn, south-west Sweden, using ground-penetrating radar. Sedimentology (2009) 56 pp. 695–708.

Nielsen, L.H. & Japsen, P. 1991: Deep wells in Denmark 1935 – 1990. Lithostratigraphic subdivision. DGU Serie A, nr 31. pp 178.

Nordjyllands Amt. 2005: Aktivitetsområde 19. Regional grundvandskemi. Hedeselskabet.

Norling, E. & Bergström, J. 1987: Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of Scania, southern Sweden. Tectonophysics, Vol. 137. 7-19.

Nygaard, E. 1993: Denmark. In: Downing, R.A., Price, M. & Jones, G.P. (eds.): The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe. Oxford Science Publications, Oxford, pp. 186-207.

Odense Vandsekskab. 2006: Water Vision. Kildepaldsundersøgelse ved Lindved.

Olsen, H. & Nielsen, U.T. 2002: Logstratigrafisk inddeling af kalken i Københavns-områder, I: Frederiksen, J.K., Eriksen, F.S., Hansen, H.K., Knudsen, C., Jørgensen, M.E., Møller, H.M.F. & Brendstrup, J. (eds.): Ingeniørgeologiske forhold i København. DGF Bulletin 19, 2002.

Olsen, H., Lauritzen, S. E., Arildskov, N. P., Christiansen, C. & Lund, T. 2005: Naturbetingede saltvandsproblemer ved Mørkskov Vandværk? ATV-møde om Jord- og grundvandsforurening 2005, p. 417-428.

Parker, T.J. & McDowell, A.N. 1951: Scale Models as Guide to Interpretation of Saltdome Faulting. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. Vol. 35 nr. 9, pp. 2076-2094, 19 pp.

Pedersen, T. 2001: Selandien-aflejringerne på Midtsjælland og deres hydrologi. Baseret på geofysisk logtolkning. Upubl. Speciale, Geologisk Institut, Københavns Universitet.

Poulsen, L.H., Wittrup, C.S., Klitten, K. & Larsen, F. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 3. Undersøgelse af saltvandsgrænsen med transiente elektromagnetiske (TEM) sonderinger. GEUS rapport 2006/18.

Price, M., Downing, R. A. & Edmunds, W. M. 1993: The Chalk as an aquifer. In: Downing, R.A., Price, M. & Jones, G.P. (eds.): The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe. Oxford Science Publications, Oxford, pp. 35-58.

Rambøll. 1999: Kilde VI. Kildepladsundersøgelse. Københavns Vand, rapport.

Rambøll. 1999: Final Report Reflection seismic investigations. Malmö City Tunnel, rapport.

Rambøll, Hannemann & Højlund. 1995a: Sikring af drikkevandsressourcen. Delrapport 6. Geofysiske undersøgelser. Frederiksberg Kommune, rapport.

Rambøll, Hannemann & Højlund. 1995b: Hvidovre Vandforsyning. Geofysiske undersøgelser. Hvidovre Kommune, rapport.

Rasmussen, K.R. 2002: Kalk og kalkhydrologi, ATV-møde, oktober 2002.

Rasmussen, L.L. & Andersen, C. 1994: The value of high resolution seismic to establish a geological model, exemplified by a study for a planned bridge and tunnel between Denmark and Sweden Preprint of papers: Modern Geophysics in Engineering Geology. The Engineering group of the Geological Society, 93-103.

Refsgaard, J.C., Trolborg, L., Henriksen, H.J., Højberg, A.L., Møller, R.R. & Nielsen, A.M. 2010: God praksis i hydrologisk modellering. Geo-vejledning 7. GEUS særudgivelse (ISBN 978-87-7871-280-6 og 978-87-7871-281-3) 56 pp. + Appendix A-F.

Sigurdsson, T. & Overgaard, T. 1998: Application of GPR for 3-D visualization of geological and structural variation in a limestone formation. *Journal of Applied Geophysics* 40 (1998) pp. 29–36.

Sonnenborg, T.O. 2006: Vandressource- og stoftransport-modellering i kalk: Status og muligheder. ATV-møde, 8. nov. 2006.

Stenestad, E. 1976: Københavnsområdets geologi især baseret på citybaneundersøgelserne. Geological Survey of Denmark, 3 Række 45, 1–149.

Stenestad, E. 1982: *Karst. Varv*, 4, pp. 113-119.

Stenestad, E. 2006: Fluviokarst in the top of the Maastrichtian chalk at Rørdal, Northern Jutland, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, vol. 53, pp. 113-119.

Surlyk, F. & Lykke-Andersen, H. 2007: Contourite drifts, moats and channels in the Upper Cretaceous chalk of the Danish Basin. *Sedimentology* (2007) 54, pp. 405–422.

Surlyk, F., Damholt, T. & Bjerager, M. 2006: Stevns Klint, Denmark: Uppermost Maastrichtian chalk, Cretaceous-Tertiary boundary, and lower Danian bryozoan mound complex. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, Vol. 54, pp. 1-48.

Sørensen, T. 1977: Kalkboringers specifikke kapacitet. *Vandteknik* nr. 3.

Sørensen, T. 1983: Permeabilitetsforhold i danske kalkbjergarter i relation til geohydrologisk undersøgelsesmetodik og vandindvindningsteknik. Licentiatarbejde nr. 3. Institut for Teknisk Geologi. Danmarks Tekniske Universitet.

Thomsen, E. 1976: Depositional environment and development of Danian bryozoan biomicrite mounds (Karleby Klint, Denmark), *Sedimentology* 23, 485-509.

Thomsen, E. 1995: Kalk og kridt I den danske undergrund. I: Nielsen, O.B. (Ed.). *Danmarks geologi fra Kridt til i dag. Aarhus Geokompender Nr. 1*. Geologisk Institut, Aarhus Universitet. ISSN 1396-1578, 290 pp.

Vangkilde-Pedersen, T. 2010: Kravspecifikation for udførelse af geofysisk borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. GEUS. 21 pp.

Vangkilde-Pedersen, T. & Olsen, H. 1997: Grundvandssænkning – hvad sker der med saltvandsgrænsen, og kan det måles? Særtryk fra *Vandteknik* nr. 3.

Vejbæk, O.,V. & Britze, P. 1994: Geological map of Denmark, 1:750000. Top pre-Zeichstein (two-way travelttime and depth), Geological Survey of Denmark. Map series no. 45.

Viborg Amt. 2003: Kortlægning af grundvandsressourcen i et område i NØ-Salling.

Watertech. 2005: Strontium i grundvand & drikkevand i Roskilde Amt.

Ødum, H. 1935: Grundvand og vandindvinding. DGU, nr. 3 række 25, Kbh. pp. 5-36.

ØLC. 1995: The Øresund Link. Digest of geophysical borehole logging in the Danian limestone. Øresundskonsortiet 1995.

Århus Amt. 2004: Vandressourceredegørelse for Djurs Nord 2004.

Appendix A Prøvepumpning

Fastlæggelse af de hydrauliske egenskaber i et kalkmagasin sker ved at foretage indirekte målinger med prøvepumpninger af varierende tidshorisonter. De hydrauliske parametre anvendes blandt andet til at få en øget forståelse for grundvandsmagasinet, i afgrænsning af indvindingsoplande samt i opstilling af grundvandsmodeller. Varigheden af en prøvepumpning afgøres af undersøgelsens formål og problemstillinger så der sker en målrettet og optimal dataindsamling, som afspejler de hydrogeologiske forhold i magasinet.

Der er skrevet meget om planlægning af prøvepumpninger (blandt andet Kærgaard, 1988 og Kruseman & de Ridder, 2000), og emnet behandles derfor kun overfladisk her med en række forslag til overvejelser der bør indgå i planlægningen.

Tolkning af en prøvepumpning er kompliceret, og som det fremgår af litteraturen kræves der, ud over en god portion faglig viden om teoretiske modeller og formler, også en god portion erfaring med netop tolkning af prøvepumpninger fra kalkmagasiner. Dette er en ekstra udfordring da erfaringen trods alt kun kommer gennem arbejdet. Nielsen (2007) fokuserer på tolkning af prøvepumpninger i kalkmagasiner i en blanding af teori og eksempler, og har inddraget metoder anvendt i olieindustrien samt egne eksempler fra grundvandsområdet.

Forud for planlægning af prøvepumpningen inddrages tilgængelige resultater fra tidligere kortlægninger, så kendskabet til de geologiske forhold er bedst muligt (se også afsnit 3.3 og 4.2). Ved anvendelse af både nye og ældre borer kan boringernes tekniske udbygning være meget forskellig. Kalkboringer af ældre dato er ofte åbne borer med forerør ført blot et lille stykke ned i kalkmagasinet og indstrømning i flere zoner, mens borer af nyere dato kan være udbygget med filtre for at kunne styre indstrømningen måske kun fra én indstrømningszone, eller forerøret ført ned til den dybde man som minimum ønsker indstrømningen fra.

Kalkmagasiner

Kalkmagasiner er komplekse og anisotrope, blandt andet på grund af sprækkesystemerne, der sammen med matrix udgør et dobbeltporøst reservoir. Sprækkernes orientering, størrelse og hyppighed styrer sammen med matrix kalkmagasinets samlede hydrauliske egenskaber. Sprækkerne vil have en høj hydraulisk ledningsevne og en lav magasinkoefficient (se afsnit 3.3), mens matrix vil have en lav hydraulisk ledningsevne og en høj magasinkoefficient. I nogle kalkmagasiner kan der desuden optræde lavpermeable lag, som f.eks. mergellag, der introducerer en anden hydraulisk situation med lækageeffekt.

Sprækkesystemernes udbredelse og mønster kendes oftest ikke ved planlægningen af prøvepumpningen idet de kan være svære at kortlægge (se afsnit 4.2.1), og ofte først erkendes ud fra f.eks. prøvepumpningsdata.

Prøvepumpninger

Ved udførelse af en prøvepumpning pumpes der størst mulige vandmængde, dog uden at tørlægge boringen, i én pumpeboring, og der monitoreres i en række boringer i forskellig afstand og retning fra pumpeboringen. Pejleboringerne vil reagere forskelligt på pumpningen afhængig af omfanget og fordelingen af sprækker i magasinet og er derfor vigtige i tolkningen af data. Da den eksisterende tæthed af boringer pr. arealenhed måske ikke er tilstrækkelig for at kunne registrere alle magasinets reaktioner på prøvepumpningen, kan det være nødvendigt at etablere nye pejleboringer.

Gennemførelse af en prøvepumpning kræver en god planlægning, og for at få de bedste forudsætninger for tolkning af de indsamlede prøvepumpningsdata, kan det være en fordel at monitorere både pumpeboring og pejleboringer samt evt. det atmosfæriske tryk en periode op til pumpestart. Det kan ligeledes overvejes at foretage en kort testpumpning for at se hvordan sænkningen vil udvikle sig (Nielsen, 2007).

Det må forudsættes at når alle gode regler for udførelse af prøvepumpninger er overholdt, vil data afspejle kalkmagasinets hydrauliske forhold, og ingen data bør derfor sorteres fra som dårlige data medmindre der er meget vægtige argumenter der taler for det. Det er ligeledes vigtigt at prøvepumpningen forløber indtil data viser homogene forhold både i pumpeboringen og i pejleboringerne.

Databearbejdning og modeller

Behandling af prøvepumpningsdata og tolkning af disse til geologiske modeller beskrives, som Kærgaard (1988) nævner, altid idealiseret i litteraturen hvilket de så godt som aldrig er. I den litteratur der findes med danske rødder er her allerede nævnt Kærgaard (1988) og Nielsen (2007) og de behandler emnet med lidt forskellige vinkler.

Gennem Kærgaard (1988) finder man at data fra prøvepumpning i et kalkmagasin, som i ethvert andet grundvandsmagasin, vil kunne give mange homogene ækvivalente løsninger til den inhomogene virkelighed. Man skal derfor holde for øje at en ren matematisk løsning ikke er den ideelle løsning og at tolkningen bør foregå som en iterativ proces mellem matematiske teorier og forståelsen af områdets og magasinets hydrogeologiske forhold.

Da sprækkesystemerne, som tidligere nævnt, sjældent kendes er Nielsen (2007) inde på at det kan være en nødvendighed at finde kendetegn ved data gennem matematiske plot, før en teoretisk tolkningsmodel vælges. Plottene vil gøre det muligt at udelukke nogle teoretiske modeller. En faldgrube kan her være at ikke alle faser af magasinets reaktion på pumpningen nødvendigvis er med, hvis magasinet f.eks. reagerer meget hurtigt på pumpningen, eller der ikke er opnået homogene forhold i pumpeforløbet.

Ideelt set vil prøvepumpningsdata fra et dobbeltporøst magasin falde i tre perioder hvor den første periode afspejler sprækkernes hydrauliske forhold. Den næste periode er en overgangsperiode der afspejler begyndende påvirkning fra matrix med indstrømning fra matrix til sprækker, mens den sidste periode afspejler kombineret strømning fra sprækker og matrix. Strømningen i denne sidste periode vil være homogen hvis prøvepumpningen har stået på tilstrækkelig længe. Både Kærgaard og Nielsen er med deres erfaringer imidlertid enige om den faldgrube at data ikke nødvendigvis falder ideelt i de tre perioder. Især Kærgaard

er inde på vigtigheden af den geologiske forståelse for området, der kan bidrage til forståelsen af dynamikken i sænkningens form og udbredelse.

Sænkningens forplantningshastighed skal inddrages i tolkningen af pejledata da delforløb i pejleserierne kan relateres til pumpedata. Data fra pejleboringerne vil bl.a. afspejle hændelserne i pumpeboringen som kan være nøglen til den rette tolkning af pejledata (Kærgaard 1988).

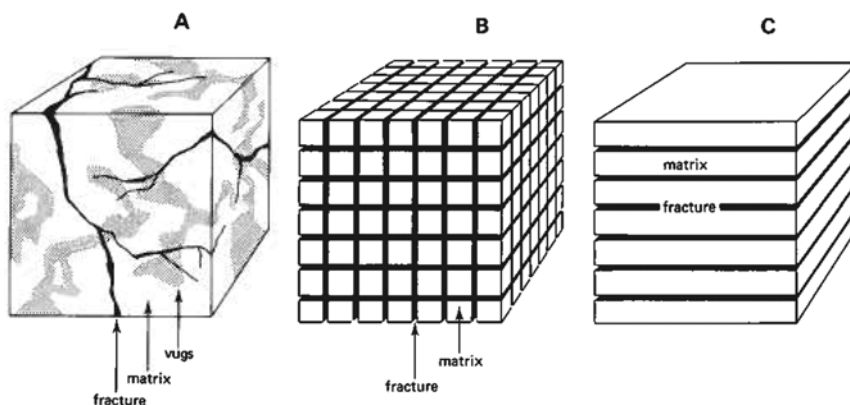
Korrektion af pejledata og detaljerede kommentarer til forskelle i data skal ikke behandles indgående her da den refererede litteratur tager godt hånd om disse emner. Blot skal det nævnes at der for kalkmagasiner særligt kan gælde, at de forskellige hydrauliske forhold i magasinet betyder, at der er store forskelle på hvordan pejledata ser ud, og hvordan de udvikler sig med pumpe tiden. På en række punkter er det værd at bemærke forskelle:

- Sænkings- og stigningsdata er forskellige da de afspejler magasinets hhv. sprække- og matrix-forhold.
- Antallet af forskellige perioder i pejledata afspejler de hydrogeologiske forhold.
- Længden af perioderne – reaktionstiden – i pejledata afspejler forholdet mellem sprækker og matrix.

Uanset hvordan data fra en prøvepumpning ser ud, tilstræbes det i tolkningen at plote data så de kan beskrives med homogene forhold i en teoretisk og dermed idealiseret geologisk model. Det vil sige at der f.eks. skal benyttes forskellige formler for at data kan plote lineært (Nielsen 2007) afhængig af de aktuelle hydrogeologiske forhold.

De homogene forhold opnås som nævnt ved at pumpe i en periode, hvis længde er afhængig af magasinets sprække-matrix forhold og dermed siger noget om hvilken teoretisk model der skal vælges. I Figur 1 er vist forskellige modeller for sprækkesystemer:

- Naturligt forekommende sprækker
- Tredimensionale ortogonale sprækker
- Enkelt horisontale sprækker



Figur 1. Eksempel på hvordan sprækker og matrix antages at optræde naturligt og kan opfattes idealiseret (efter Kruseman & de Ridder 2000).

Referencer

Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. 2000: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. ILRI publication 47.

Kærgaard, H. 1988: Systematisk bearbejdning af data fra langtidsprøvepumpninger. Kompendium til efteruddannelse nr. 210. Ingeniørhøjskolen, Horsens Teknikum.

Nielsen, K.A. 2007: Fractured aquifers – Formation Evaluation by Well Testing. Trafford Publishing.

Appendix B Boringers ydelse og kapacitet

I Kapitel 3 er det beskrevet hvordan de hydrogeologiske forhold (geologisk formation, tektonik, strukturer, vandstrømning, kemi og glaciationer) spiller ind på kalkens hydrauliske egenskaber. I dette appendix beskrives hvad kapacitetsdata er, og der gives nødvendig baggrundsviden for at kunne bruge dem. Endelig gives der en beskrivelse af forskellige udnyttelser af kapacitetsdata i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner.

Boringens specifikke kapacitet (ydelse pr. meter afsenkning) registreres i forbindelse med etablering af vandforsynings- og undersøgelsesboringer. I Jupiterdatabasen foreligger således en lang række data der er frit tilgængelige for udnyttelse i grundvandskortlægningen.

Hvis en boring har indtag med en høj specifik kapacitet, indikerer det at der i området er gode indvindingsforhold. Det giver også samtidig en oplysning om geologien idet boringer sat i en permeabel bjergart alt andet lige vil være mere ydende, end boringer sat i en homogen kalkmatrix med lav permeabilitet. Der er således gode indvindingsmæssige og hydrogeologiske årsager til at interessere sig for boringers kapacitet.

Kapacitetsdata og boretekniske forhold

Boringers ydelse eller kapacitet er et udtryk for den mængde vand der kan pumpes op, og ydelsen angives normalt i m^3/t . Boringens specifikke kapacitet er defineret som boringens ydelse pr. meter afsenkning, og den specifikke kapacitet angives normalt i $m^3/t/m$.

En borings opbygning (boringsradius, indtagets længde) påvirker boringens specifikke kapacitet, det vil sige hvor meget vand der kan strømme ind i boringskonstruktionen. Desuden afhænger den specifikke kapacitet af de hydrogeologiske forhold, længden af pumpetiden og den ydelse der pumpes med. Lave kapacitetsværdier kan også forårsages af ekstraordinære tryktab nær boringen hvorved boringens virkningsgrad forringes. Da kapaciteten afhænger af boringens virkningsgrad, øges kapaciteten hvis boringen forbedres teknisk ved oparbejdning, for eksempel med returskylning og trykluftbehandling (Sørensen, 1977 og 1983).

Som det fremgår af Kapitel 3 er det mest ideelt ud fra et hydraulisk synspunkt at anvende T-værdien (transmissiviteten) til at beskrive de hydrauliske egenskaber. Men dels eksisterer der få prøvepumpninger, og dels er det ikke altid der er registreret et tal for pumpetiden, som det kræves for beregning af T-værdien. Endelig er der oftest tale om anisotrope forhold i kalken. Disse forhold introducerer flere usikkerheder, og det kan derfor være mere simpelt og overskueligt at tage udgangspunkt i de mere simple og "rå" kapacitetsdata.

Af Mielby m.fl. (1983) fremgår at en øgning i pumpetiden fra 2 timer og op til 30 dage (som er de mest gængse tidsspan for ren-/prøvepumpninger), medfører en stigning på 13 % i den specifikke kapacitet for en 6" boring. I samme reference fremgår at en øgning i borerradius fra 3" - 6" medfører en stigning på 6 % i den specifikke kapacitet. I praksis er kalken dog ofte opsprækket, og den specifikke kapacitet for en boring vil være stærkt afhængig af opsprækningsgraden det pågældende sted. Som illustreret i en undersøgelse fra Djursland i Mielby m.fl. (1983) findes en stor spredning i de målte kapacitetsværdier, og det vurderes

at de lokale variationer langt kan overstige de 6 og 13 %. Der skal således meget detaljeret viden om lokalområdet til før det er relevant at korrigere de specifikke kapaciteter med yderligere magasinoplysninger. Det kan dog give god mening at tage højde for indtagets længde og beregne specifik ydelse pr. meter indtag ($m^3/t/m/m$),

Man kan generelt ikke forvente at måling af én værdi vil give det sande billede af områdets permeabilitet. For at opnå et mere nøjagtigt billede er det nødvendigt at benytte oplysninger fra mange borer og statistiske metoder til vurdering af gennemsnit og homogenitet i området.

Indledningsvis kan man undersøge om populationen af specifikke kapaciteter er logaritmisk normalfordelt eller dækker flere fordelinger ved anvendelse af hyppighedsplot. Det er her vigtigt at huske på at fordelingen ikke blot afspejler områdets forskellighed, men også spredningen i målinger (boringsplacering og indtagenes dybde).

Udnyttelse af kapacitetsdata i kortlægningen

Den hyppigste anvendelse af kapacitetsdata i grundvandskortlægningen er ved lokal understøttelse af modellering, for eksempel hvor der mangler T-værdier.

En anden relevant grund til at gøre brug af kapacitetsdata i kortlægningen er for at se, om der findes specielt høj- og lavpermeable zoner i et område. Ved optegning af kapacitetsdata på kort, kan disse bidrage til at opnå en generel forståelse af den horisontale fordeling af permeabiliteten. Et eksempel herpå er vist på Figur 1.

Det er også muligt at bruge kapacitetsdata til at beregne den forventede afsenkning i forbindelse med planlægning af nye indvindinger i et område. Kapacitetsdata kan endvidere bruges til at undersøge om der er specielt permeable zoner, og hvordan de fordeles sig i dybden, men som oftest vil denne oplysning kunne opnås væsentligt bedre ved brug af f.eks. flowlogs.

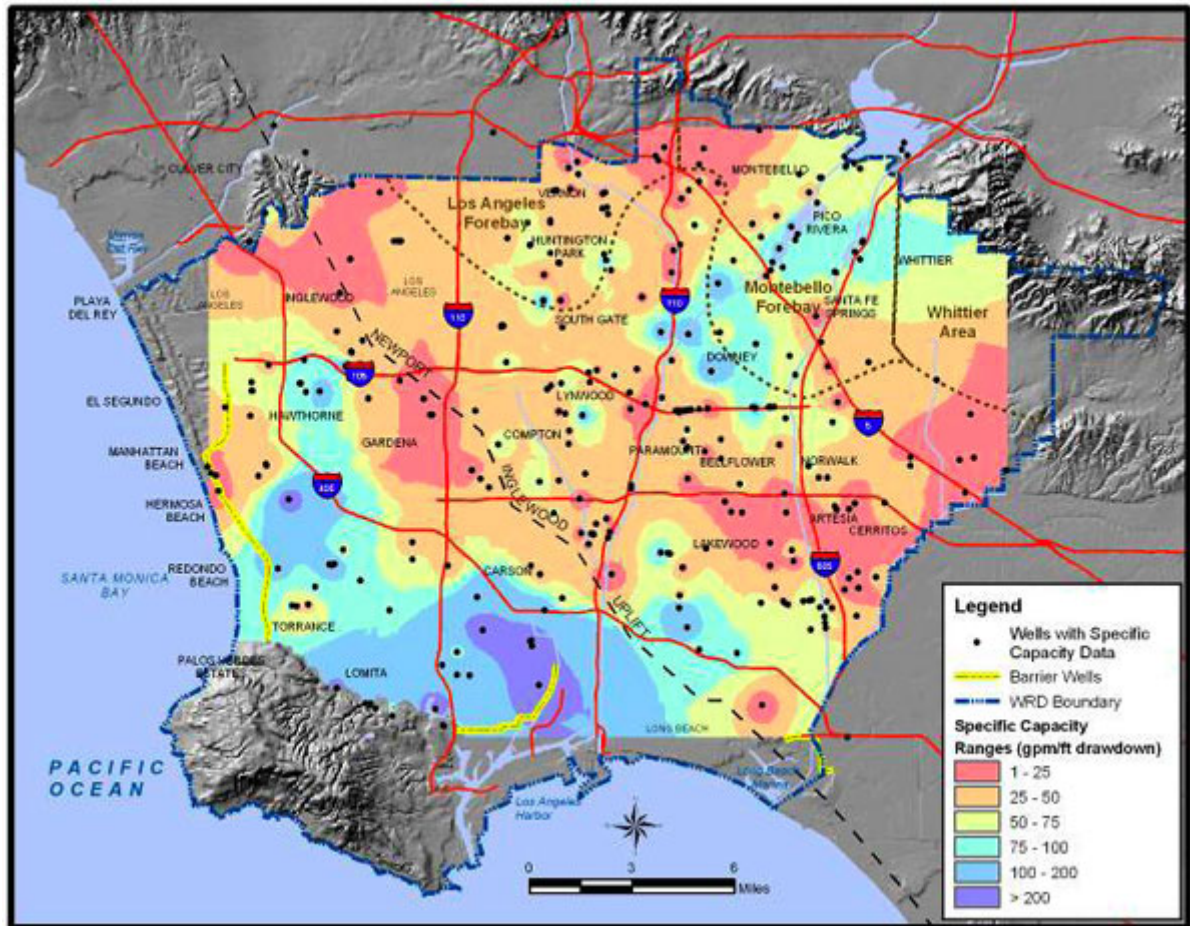
Referencer

Johnson, T. 2005: Specific Capacity – A measure of Well Performance, Well Problems, and Aquifer Transmissivity: Part 1 of 2. Water Replenishment Department. Technical Bulletin, Volume 2, Winther 2005.

Mielby, S., Thøgersen, C. & Thomsen, R. 1983: Kortlægning af geologiske forhold og salt grundvand i Kolindsund/Grenå-området 1980-83. Århus amtskommune, 188 pp.

Sørensen, T. 1977: Kalkboringers specifikke kapacitet. Vandteknik nr. 3.

Sørensen, T. 1983: Permeabilitetsforhold i danske kalkbjergarter i relation til geohydrologisk undersøgelsesmetodik og vandindvindingsteknik. Licentiatarbejde nr. 3. Institut for Teknisk Geologi. Danmarks Tekniske Universitet.



Figur 1. Eksempel på kort over specifikke kapaciteter baseret på boringsoplysninger i Californien (efter Johnson, 2005). De specifikke kapaciteter er læst ind i GIS, hvorefter der er foretaget en konturering af dem.

Appendix C Borehulslogging og logstratigrafi

Borehulslogging er en geofysisk undersøgelse der foregår ved at lade en sonde passere langsomt ned eller op gennem en boring. Ved hjælp af mekaniske, elektriske, nukleare og akustiske metoder måler sonden geofysiske parametre som f.eks. boringsdiameter, strømningshastighed, elektrisk modstand/ledningsevne, naturlig radioaktiv stråling, porøsitet, densitet og lydshastighed af de gennemborede geologiske formationer og væsken i boringen.

Borehulslogging anvendes i grundvandskortlægningen primært til lithologisk tolkning, logstratigrafisk korrelation, bestemmelse af vandkvalitet og kortlægning af saltvandsgrænsen, kortlægning af porøsitet, sprækker og indstrømningsmønstre og korrelation med seismiske data. Andre anvendelser i forbindelse med f.eks. indvindings- eller undersøgelsesboringer kan blandt andet være verifikation af boringsudbygning og filtersætning, lokalisering af utætheder i forerør, tilstand af filter og forureningsudbredelse.

Et optimalt logprogram i forbindelse med kalkkortlægning består af de logs som er angivet i Tabel 1 herunder.

Logtype	Bemærkninger
Naturlig gamma	kan optages i åbne og forede/filtersatte boringer - både stål og plastik
Induktion	kan optages i åbne og forede/filtersatte boringer - kun plastik, påvirkes af metal
Resistivitet	kan kun optages i åbne boringer, påvirkes af metal
Porøsitet	kan optages i åbne og forede/filtersatte boringer - både stål og plastik
Temperatur og ledningsevne	kan optages i åbne og filtersatte boringer - både stål og plastik
Sonic	kan kun optages i åbne boringer
Flow	kan optages i åbne og forede/filtersatte boringer - både stål og plastik (kan give informationer om utætheder i forede boringer)
Kaliper	kan optages i åbne og forede/filtersatte boringer - både stål og plastik (kan benyttes til kontrol af diameter i forede/filtersatte boringer)

Tabel 1. Oversigt over logtyper som er anvendelige i forbindelse med kortlægning af kalkmagasiner.

Naturlig gamma bidrager til den generelle geologiske tolkning og til vurdering af lerindhold og er vigtig i forhold til tolkning af logstratigrafi.

Induktions- og resistivitetslogs er afgørende for bestemmelse af saltvandsgrænsen og vigtige i forhold til tolkning af logstratigrafi.

Porøsitetslogs kan medvirke betydeligt til en bedre fastlæggelse af saltvandsgrænsen og er også vigtig i forhold til tolkning af logstratigrafi.

Temperatur- og ledningsevnelogs kan blandt andet bidrage til beregning af formationsfaktor i forbindelse med vurdering af grundvandets elektriske ledningsevne, men er typisk ikke direkte anvendelige til fastlæggelse af saltvandsgrænsen. Temperatur- og ledningsevnelogs udført under pumpning kan give informationer om selv ganske svage indstrømningshorisonter. Elektrisk ledningsevne er temperaturafhængig, og det kan være nyttigt at omregne ledningsevne målt ved formationstemperatur til standardbetingelser (25 grader celsius) ved sammenligning af målinger optaget under forskellige temperaturforhold. Omregning kan foretages med formlen:

$$EC_t = EC_{25} \times (0,47 + 0,0213 \times t)$$

hvor EC_t og EC_{25} er vandets elektriske ledningsevne ved henholdsvis 25 og t grader celsius. Benyttes ledningsevnen til beregning af formationsfaktor skal målinger ved den aktuelle temperatur benyttes.

Soniclogs giver informationer om lyd hastigheden i kalken. Lyd hastigheden hænger sammen med stivheden af formationen og kan dermed indirekte sige noget om i hvilken grad kalken kan forventes at være opsprækket. Loggen er også vigtig i forbindelse med tolkning af logstratigrafi.

Flowlogs giver information om indstrømningshorisonter og hermed om indstrømningen er matrix eller sprækkedomineret. Flowlogs er vigtige i forhold til opstilling af en hydrostratigrafi i kalken.

Kaliperlogs giver informationer om diametervariationer i boringen og benyttes til at vurdere kvaliteten af de øvrige logs i forhold til f.eks. kaviteter i boringen og til korrektion af flowlogs for diametervariationer.

For konkrete krav og anbefalinger til udførelse af de enkelte logtyper henvises til "Kravspecifikation for udførelse af geofysisk borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning" (Vangkilde-Pedersen, 2010).

I det følgende vil logstratigrafi i kalken og kortlægning af saltvandsgrænsen med logging blive nærmere beskrevet.

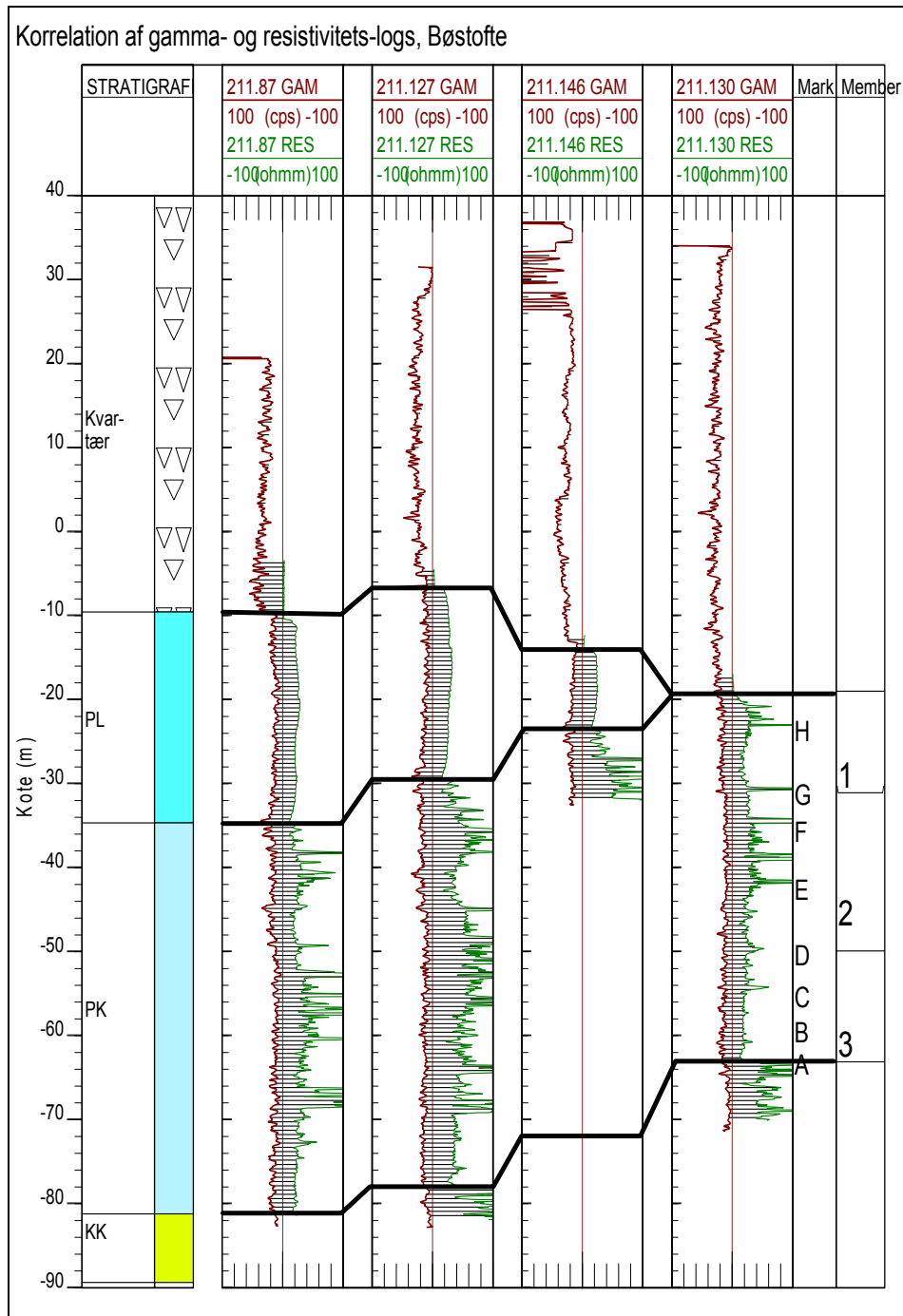
Logstratigrafi

Logstratigrafi består af en systematisk inddeling i geologiske enheder og korrelation af geologiske lag fra boring til boring baseret på karakteristiske log-mønstre og markante maksima/minima, såkaldte logmarkere (Olsen og Nielsen, 2002), se Figur 1.

Både København Kalk og Lellinge Grønsand Formationen er karakteriseret ved en tydelig og regionalt udbredt lagdeling med vekslende bløde og hårde horisonter og en relativ stor tæthed af flintbænke (Nygaard, 1993; Klitten m.fl., 1994; Klitten, 2003). Denne lagdeling gør kalksekvenserne velegnede til inddeling i logstratigrafiske enheder baseret på genkendelige logmønstre. I København-Amager-Saltholm området har det været muligt at opstille en regionalt udbredt logstratigrafi for København Kalken (Klitten m.fl., 1994), mens det i

resten af Nordøstsjælland (Klitten og Wittrup, 2006) og f.eks. for Lellinge Grønsand Formationen (Klitten, 2003) kun har været muligt at opstille en lokal logstratigrafi.

Selvom lagdelingen og dermed log-motiverne i bryozokalken ligesom i København Kalken er karakteriseret ved skiftende hårde og blødere lag, betyder bankestrukturen i denne kalktype at de enkelte kalkbænke som regel er svære at følge længere end få hundrede meter. Det har således hidtil ikke været muligt at opstille en logstratigrafi for bryozokalken (Klitten m.fl., 1994).



Figur 1. Eksempel på logstratigrafisk korrelation mellem 4 boringer på Bøstøfte kildeplads på Sjælland.

Kalken i skrivekridtet er mere blød, ensartet, kun svagt lagdelt og med væsentligt færre flintbænke (Nygaard, 1993). I den dybt begravede kalk er den stratigrafiske korrelation blevet forbedret væsentligt ved hjælp af borehulslogging fra omkring 1950 og frem, men i de øvre dele af skrivekridtet som er relevant for vandindvinding, har det vist sig svært at korrelere logs over større afstande (Nygaard, 1993). Flintlag og erosive hardgrounds er sparsomme, men der optræder flere mergelhorisonter som kan identificeres på naturlig gamma og elektriske logs. Ofte synes de dog både i det Nordøstsjællandske og Nordjydske område kun at have lokal udbredelse (Klitten og Wittrup, 2006; Nielsen og Jørgensen, 2008).

Lellinge Grønsand Formationen

I Klitten (2003) er det beskrevet at Lellinge Grønsand Formationen entydigt kan adskilles fra Kerteminde Mergel ud fra logmønstrene af naturlig gamma og resistivitetslogs. Det naturlige gammaniveau er generelt lavt i begge formationer, men der ses en jævn stigning efterfulgt af et jævnt fald i gammaniveau henover grænsen. I Kerteminde Merglen er resistiviteten generelt relativt lav og uden peaks, mens den i Lellinge Grønsand Formationen er højere og med mange markante resistivitspeaks og logmønsteret i de to formationer er således væsentligt forskelligt og nemt at adskille.

Ligeledes i Klitten (2003) er det beskrevet og vist hvorledes Lellinge Grønsand Formationen kan indeles i otte log-stratigrafiske enheder på basis af log-mønstrene fra resistivitetslogs eller induktionslogs.

København Kalk / kalksandskalk

Overgangen mellem Lellinge Grønsand Formation og kalksandskalk (eller København Kalk) vil typisk kunne identificeres ved et fald i gammaniveau til et lavere niveau i kalksandskalken og en stigning i resistivitet samt flere og mere markante resistivitspeaks i kalksandskalken (Klitten, 2003).

I København-Amager-Saltholm området er der opstillet en detaljeret logstratigrafi for København Kalk Formationen (Klitten m.fl., 1994; Olsen og Nielsen, 2002), med inddeling af denne i tre lithologiske sub-sekvenser: Nedre, Mellem og Øvre København Kalk. I Klitten og Wittrup (2006) konkluderes det at der inden for afgrænsede områder i form af kildepladser kan opstilles tilsvarende logstratigrafiske subsekvenser i kalksandskalken i Nordøstsjælland, men at logmønstrene ikke lader sig korrelere fra kildeplads til kildeplads. Der er således basis for lokal opstilling af logstratigrafi i kalksandskalken i sub-sekvenser med forskellige karakteristika og egenskaber, men ikke for nærværende basis for at udstrække lithostratigrafien for København Kalk til kalksandskalken i hele Nordøstsjælland.

Bryozokalk

Det er relativt sikkert at identificere grænsen mellem København kalk og bryozokalk i København-Amager-Saltholm området på baggrund af naturlig gammalogs. Niveaueet for den naturlige gammastråling er højere og mere varierende i København kalken og falder til et meget lavt og ensartet niveau i bryozokalken. Samtidig er tætheden af flintbænke generelt mindre i bryozokalken og højresistive peaks har derfor større afstande.

Uden for dette område eksisterer ikke umiddelbart undersøgelser af grænsens beskaffenhed ud fra logdata og det bør generelt antages at gammaniveaueet i både kalksandskalk og

bryozokalk er lavt og relativt ensartet, mens resistiviteten er relativt høj og med et uroligt mønster med mange peaks afspejlende en generelt inhomogen kalktype med vekslende bløde og hårde kalklag og med vekslende indhold af flint.

Bryozokalken er mere uregelmæssig i sin opbygning end København Kalk Formationen og mere præget af bankestrukturer end horisontal lagdeling. Klitten m.fl. (1994) konkluderer at der ikke for bryozokalken i København-Amager-Saltholm området kan opstilles en regional logstratigrafisk inddeling i underenheder som for København Kalken. Så vidt vides er der senere gjort forsøg, blandt andet i Malmø-området, hvor det imidlertid ikke har været muligt at korrelere fra boring til boring over andet end relativt korte afstande.

Skrivekridt

Overgangen mellem bryozokalk og skrivekridt kan identificeres ved en entydig forskel i logmønsteret på resistivitets- og induktionslogs (Klitten og Wittrup, 2006). I modsætning til logmønsteret i bryozokalk som er beskrevet ovenfor er resistiviteten i skrivekridtet generelt lavere og meget mere roligt, afspejlende en mere ensartet blød kalk med få flintlag og med en generelt højere porøsitet end i bryozokalk. Typisk ses ingen forskel i gammanniveau og gammamønster mellem de to kalktyper, men af og til kan der optræde en markant gamma-peak ved overgangen fra bryozokalk til skrivekridt, forårsaget af lokalt forekommende Fiskeler.

Kortlægning af saltvandsgrænsen

Ved hjælp af borehulslogging kan både toppen af overgangszonen mellem fersk og salt grundvand og størrelsen af gradienten (stigning i kloridkoncentration per meter dybde) i overgangszonen bestemmes. Man skal dog være opmærksom på at det meget sjældent er tilstrækkeligt at måle den elektriske ledningsevne af væsken i borehullet. Dels kan der være tale om at forskelle i porevandstryk i forskellige dele af kalken medfører intern strømning i borehullet, så porevand med forskellige egenskaber blandes i vandsøjlen, og dels kan også f.eks. barometereffekten foranledige strømninger i borehullet så ledningsevnen ned gennem væskesøjlen varierer tidsmæssigt (Klitten og Wittrup, 2006).

Den elektriske ledningsevne og dermed saltindholdet i porevandet i formationen vurderes bedst ud fra induktions- eller resistivitetslogs som måler den samlede henholdsvis ledningsevne og resistivitet af matrix og porevæske. Kalk og flint er elektrisk neutrale, og ledningsevnen eller resistiviteten af kalkformationer (med undtagelse af ler-/mergellag) kan derfor helt og fuldt tilskrives porevandets elektriske ledningsevne og så mængden af porevand, dvs. formationens porøsitet (Klitten og Wittrup, 2006).

Det betyder at variationer på induktions- og resistivitetslogs er en kombination af variationer i porevandets elektriske ledningsevne og variationer i formationens porøsitet. Derfor anbefales det ligeledes at optage en porøsitetslog for en bedre vurdering af de virkelige variationer af porevandets elektriske ledningsevne og dermed saltholdighed (Vangkilde-Pedersen og Olsen, 1997).

Formationsfaktor

Med kendskab til størrelsen af formationsfaktoren for en bjergart, er det muligt ud fra formationens elektriske ledningsevne at beregne porevandets ledningsevne som igen kan omsættes til en kloridkoncentration.

Formationsfaktoren (F) er defineret som forholdet mellem formationens resistivitet (R_f) og porevandets resistivitet (R_v):

$$F = R_f / R_v$$

For rene sandsedimenter er formationsfaktoren udelukkende bestemt ved porøsiteten (P) med følgende sammenhæng mellem (F) og (P):

$$F = (P)^{-m} \text{ (Archie's lov)}$$

For en stærkt cementeret sandsten kan (m) ifølge Archie (1942) sættes til 2,0 i Archie's lov herover. Denne sammenhæng bruges normalt også for stærkt cementerede kalksedimenter uden ler, men med aftagende cementering bliver (m) mindre og en typisk værdi for kun lidt cementerede kalkbjergarter er 1,6. For skrivekridt sættes (m) således ofte til 1,6, mens der i f.eks. Danienkalk formentlig skal anvendes en lidt højere værdi på 1,8-2,0 (Klitten og Wittrup, 2006).

I skrivekridt hvor porøsiteten typisk varierer mellem 35 % og 45 % varierer formationsfaktoren mellem 5,4 og 3,6 ved en værdi af (m) på 1,6. I Danienkalk varierer formationsfaktoren typisk mellem 4 og 6, svarende til en lidt mere cementeret bjergart og generelt lavere porøsitet (Klitten og Wittrup, 2006).

Baseret på ovenstående er det muligt at beregne resistiviteten af porevandet (R_v) ud fra formationens resistivitet (R_f) og formationsfaktoren (F):

$$R_v = R_f / F$$

Porevandets resistivitet kan nu omsættes til kloridindhold på baggrund af sammenhænge mellem ionkoncentrationer og elektrisk ledningsevne (Klitten og Wittrup, 2006).

Benyttes i stedet for resistivetslog en induktionslog angivet i enheden mS/m gælder følgende sammenhæng ved omregning mellem elektrisk ledningsevne og resistivitet:

$$\text{Ledningsevne (mS/m)} = 1000/\text{Resistivitet (Ohmm)}$$

Hvis der er udført en porøsitetslog kan porevandets resistivitet også beregnes som:

$$R_v = R_f \times (P)^m \text{ hvor (m) jf. ovenstående typisk kan sættes til en værdi mellem 1,6 og 2,0.}$$

Som kvalitetssikring er det nyttigt også at beregne formationsfaktoren ud fra borehulsvæskens temperatur og ledningsevne. Det kan ligeledes tjene som en kvalitetssikring af det

målte niveau for formationsledningsevnen idet formationsfaktoren gerne skal ligge nogenlunde som angivet i intervallerne ovenfor for henholdsvis skrivekridt og Danienkalk.

Fastlæggelse af saltvandsgrænsen

For at konkretisere starten af overgangszonen tager Klitten og Wittrup (2006) udgangspunkt i den tidligere grænseværdi for klorid i drikkevand på 300 mg/l. De viser hvordan 300 mg/l svarer til en ledningsevne af porevandet på ca. 100 mS/m og dermed til en formationsledningsevne på 25 mS/m (eller en formationsresistivitet på 40 Ohmm) for skrivekridt med en formationsfaktor på 4.

De foreslår således at man som tommelfingerregel kan placere saltvandsgrænsen ved en formationsledningsevne i skrivekridtet på 25 mS/m (eller en formationsresistivitet på 40 Ohmm). Samtidig påpeger de at grænsen også kan placeres anderledes. Hvis niveauet for formationsledningsevnen er konstant og under 25 mS/m over et længere interval og der f.eks. i forbindelse med et mergellag indtræffer en jævn stigning, sættes grænsen ved starten af denne stigning selvom formationsledningsevnen måske er mindre end 25 mS/m. Endelig viser de at gradienten for stigningen i kloridindholdet i skrivekridt typisk kan antages at være ca. 12 gange gradienten for stigningen i formationsledningsevne.

Baseret på en analyse af ca. 160 logging-datasæt fra den nordøstlige del af Sjælland konkluderer Klitten og Wittrup (2006) endvidere at overgangszonen til højt kloridindhold i skrivekridtet næsten altid ses på induktionslogs som en jævn stigning i formationsledningsevne med dybden. Det afspejler en jævnt stigende saltkoncentration da ledningsevnen er proportional med denne. Derimod er ledningsevne og resistivitet hinandens reciprokke og på resistivitetslogs ses derfor et ikke-liniært fald med aftagende gradient med dybden.

Referencer

Archie, G.E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Petroleum Transactions, Volume 146, pages 54-62.

Klitten, K., Ploug, C. & Olsen, H. 1994: Geophysical log-stratigraphy of the København Limestone. Proceedings of the Eleventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen. Bulletin of the Danish Geotechnical Society 11, Vol. 5, pp. 127-134.

Klitten, K. 2003: Log-stratigrafi for Selandien Lellinge Grønsand formationen og Kerteminde Mergel formationen. DGF Grundvandsmøde 18. september 2003. Geologisk Tidsskrift 2003 hæfte 2, pp. 20-22, København.

Klitten, K. & Wittrup, C.S. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 2. Undersøgelse af saltvandsgrænsen ved hjælp af geofysisk borehulslogging. GEUS rapport 2006/17.

Nielsen, K.S. & Jørgensen, J.B. 2008: Lavpermeable horisonter i skrivekridtet – Fase A. Faglig rapport, Miljøministeriet, Miljøcenter Aalborg, Team Grundvand.

Nygaard, E. 1993: Denmark. In: Downing, R.A., Price, M. & Jones, G.P. (eds.): The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe. Oxford Science Publications, Oxford, pp. 186-207.

Olsen, H. & Nielsen, U.T. 2002: Logstratigrafisk inddeling af kalken i Københavns-områder, I: Frederiksen, J.K., Eriksen, F.S., Hansen, H.K., Knudsen, C., Jørgensen, M.E., Møller, H.M.F. & Brendstrup, J. (eds.): Ingeniørgeologiske forhold i København. DGF Bulletin 19, 2002.

Vangkilde-Pedersen, T. & Olsen, H. 1997: Grundvandssænkning – hvad sker der med saltvandsgrensen, og kan det måles? Særtryk fra Vandteknik nr. 3.

Vangkilde-Pedersen, T. 2010: Kravspecifikation for udførelse af geofysisk borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. GEUS. 21 pp.

Appendix D Grundvandsmodellering i kalk

Når der skal opstilles en numerisk grundvandsmodel for et kalkmagasin, er det ikke umiddelbart de samme hydrauliske forhold som gør sig gældende i kalken sammenlignet med sandmagasiner.

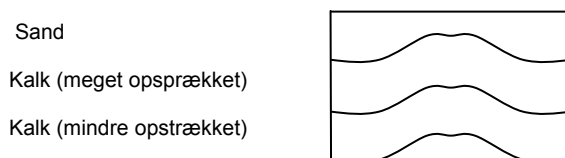
Den dobbeltpermeable strømning som er nævnt og beskrevet i afsnit 3.3.2 bevirker, at modellen skal parametriseres anderledes sammenlignet med sandmagasinet. F.eks. er den effektive porøsitet for et sandmagasin typisk sat til 20-30 %, hvor den for kalkmagasiner oftest sættes til mellem 0,001 % til 1% svarende til sprækkeporøsiteten i kalken.

Sprækkeintensiteten og dermed strømmingen i kalken er som tidligere nævnt stærkt aftagende med dybden hvilket man bør forholde sig til, og ikke må se bort fra i modelleringsprocessen. Endelig optræder der ofte som beskrevet i afsnit 3.3.3 anisotropi i kalken hvilket kan påvirke strømningsforholdene i et modelområde og dermed give store problemer, hvis ikke der tages højde for denne faktor inden modellen opstilles.

Håndtering af reduceret sprækkeintensitet med dybden

De øverste 5-15 meter af kalkmagasinet er ofte mere opsprækkede end resten (Henriksen & Sonnenborg, 2005) hvorfor der her foregår en større grundvandstrømning sammenlignet med dybere nede i kalken. Derfor vil man typisk i forbindelse med modellering af kalken inddele kalkmagasinet i en øvre opsprækket del (0-15 meter) og en nedre del (15-30 meter) med en reduceret opsprækkethed, se Figur 1. Den hydrauliske ledningsevne K vil således typisk ligge på 5×10^{-3} m/s - 5×10^{-4} m/s i den øvre opsprækkede del og på 5×10^{-6} m/s - 1×10^{-8} m/s for det dybereliggende kalkmagasin.

I de dybere dele af kalken er grundvandsstrømmingen ofte så lille at man kan negligere den. Derfor antages det som regel at kalken er impermeabel under de to henholdsvis meget opsprækkede og mindre opsprækkede intervaller af kalken beskrevet herover. I praksis vælges modellens nedre afgræsning således ofte at være beliggende ca. 30 meter under kalkoverfladen. Det er derfor selvsagt vigtigt at have et godt kendskab til kalkoverfladens forløb så man kan fastlægge lagfladerne i modellen korrekt, samt give et realistisk bud på f.eks. overgangen mellem et overliggende sandmagasin og kalkmagasinet.



Figur 1. Illustration af den konceptuelle opbygning af et modelleret kalkmagasin med en øvre meget opsprækket kalkenhed overlejret af et sandmagasin og en nedre mindre opsprækket kalkenhed hvorunder kalken antages at være impermeabel.

Modellering af lithologiske grænser i kalken

Kendskab til lithologiske grænseflader i kalken som f.eks. grænsen mellem Danienkalk og skrivekridt, større flint- og mergellag kan være vigtige informationer at få indarbejdet i den numeriske model. Da Danienkalken ofte er mere opsprækket end skrivekridtet (jf. afsnit

3.3.1) og derfor ofte har en større hydraulisk ledningsevne, kan modellen eventuelt zoneret efter skrivekridtet og Danienkalkens beliggenhed. Ligeledes kan tilstedeværelsen af større mergellag på tilsvarende vis med fordel zoneret og lægges ind i modellen.

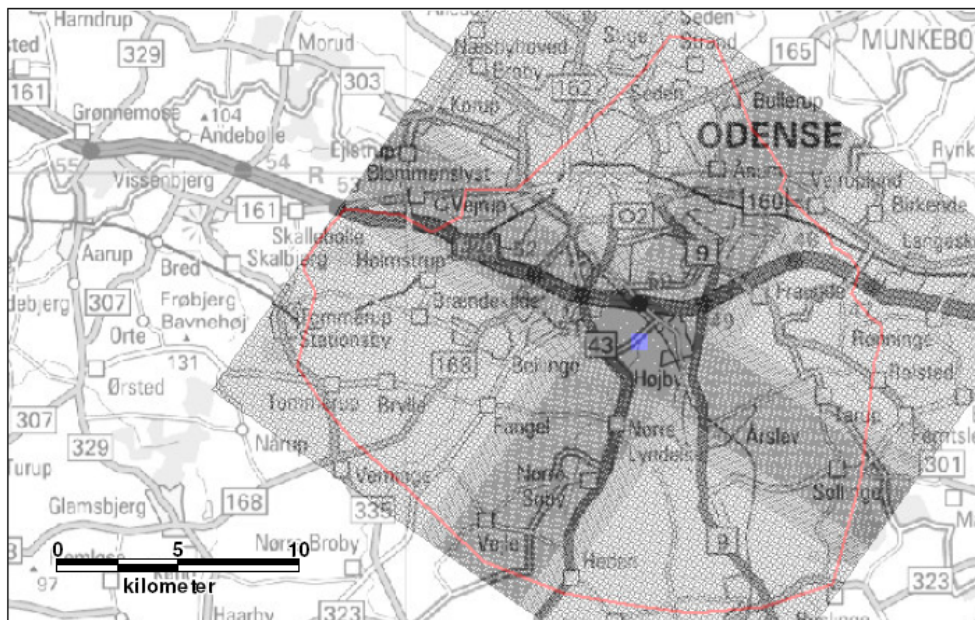
Anisotropi

Anisotropi er hyppigt forekommende i kalkmagasiner (afsnit 3.3.3) og derfor er det vigtigt at man i den indledende fase af modelleringen får et overblik over eventuel forekomst og retning af anisotropi.

Anisotropi som beskriver den foretrukne strømningsretning f.eks. i horisontal udbredelse, er stærkt styret af de dominerende sprække- og forkastningssystemer som hersker i modelområdet. Det er derfor vigtigt at geolog og modellør fra starten har kendskab til eventuelle overordnede sprække- og forkastnings-systemer i modelområdet.

Ved udførelse af prøvepumpninger kan forekomsten af eventuel anisotropi identificeres og realistiske hydrauliske størrelser for den hydrauliske ledningsevne (K_x , K_y) beregnes.

Nedenfor ses i Figur 2 et eksempel fra en kildepladsundersøgelse for Lindved kildeplads ved Odense hvor der er formodning om et NØ-SV-gående sprækkesystem. Det antages at sprækkesystemet kan have indflydelse på strømningsforholdene i kalken og medvirke til horisontal anisotropi. For at kunne modellere eventuel anisotropi i den numeriske grundvandsmodel er cellegriddet for modellen orienteret NØ-SV så anisotropien kan indarbejdes. I det konkrete eksempel er K_x og K_y værdierne sat til henholdsvis $1,54 \times 10^{-4}$ m/s og $1,0 \times 10^{-5}$ m/s (Odense Vandsekskab, 2006). Den hydrauliske ledningsevne er således en faktor 10 større i NØ-SV-retning i forhold til NV-SØ.



Figur 2. Beregningsgrid og modelrand for numerisk grundvandsmodel for kildepladsundersøgelse ved Lindved ved Odense (Efter: Odense Vandsekskab, 2006).

Modellering af kalken

Opsprækkede porøse medier kan typisk modelleres ud fra 3 forskellige konceptuelle modeller:

1. Ækvivalent porøst medium model (EPM)
2. Diskret sprækkemodel (DF)
3. Dobbelt porøsitet model (DP) (Anderson og Woessner, 1992)

1. Ækvivalent porøst medium model (EPM)

I en ækvivalent porøst medium model antages det at både sprækker og kalkmatrix fysisk kan beskrives som ét samlet medium, hvor der anvendes ét sæt parametre. Det forudsættes at magasinet opfører sig som et porøst medium, hvor Darcys' lov er gældende, og at der kan bestemmes effektive parametre som er i stand til at beskrive det integrerede opsprækkede system. Den effektive hydrauliske ledningsevne er givet ved:

$$K_b = n_f K_f + n_m K_m$$

hvor n_f og n_m er porøsiteten af henholdsvis sprækker og matrix, og K_f og K_m er de tilsvarende hydrauliske ledningsevner.

2. Diskret sprækkemodel (DF)

I den diskrete sprækkemodel (DF) antages det, at strømmingen udelukkende foregår i sprækkerne. DF-modellen anvendes typisk for magasinbjergarter hvor den primære permeabilitet i matrix er lav.

Vandgennemstrømningen i sprækkerne Q_f kan bestemmes ud fra ligningen:

$$Q_f = \frac{-\rho g (2b)^3}{12\mu} \times \text{grad}(H)$$

hvor ρ er vandets densitet (kg/m^3), g er tyngdeaccelerationen (m/s^2), $2b$ er spaltebredden (aperturen) (m), μ er den dynamiske viskositet (kg/m s) og H grundvandets trykniveau (m).

3. Dobbelt porøsitet model (DP)

I den dobbelt porøse model antages det at der kun foregår vandtransport i sprækkerne, mens der kan ske diffusion af stof mellem sprækkerne og kalkmatrix. Der er således tale om to strømningsdomæner, sprækkedomænet og matrixdomænet. Sprækkedomænet er kendetegnet ved at have en lav porøsitet og en høj hydraulisk ledningsevne, mens matrixdomænet har en høj porøsitet og en lav hydraulisk ledningsevne (Anderson & Woessner, 1992; Bear, 1993; Sonnenborg, 2006).

De fleste modelleringsopgaver i forbindelse med grundvandskortlægningen i kalkmagasiner anvender EPM-modellen. Det skyldes ofte at man ikke har nøjagtige informationer om størrelsen og udbredelsen af sprækkerne i kalkmagasinet, og derfor ikke kan anvende f.eks. DF-modellen. I stedet anvender man EPM-modellen hvor den hydrauliske ledningsevne K er udtrykt ved en effektiv hydraulisk ledningsevne, der omfatter både strømning i sprækker og matrix.

Anvendelse af EPM-konceptet forudsætter for det første at det modellerede område er betydeligt større end afstanden mellem sprækkerne. For det andet skal der være ligevægt

mellem koncentrationen af stof i sprækkerne og matrix. Sidstnævnte forudsætning kræver at opholdstiden er relativt stor, da diffusion er en langsom proces, hvilket igen betyder at strømningshastigheden skal være relativt lille, og at transportafstanden skal være relativ stor. Hvis begge forudsætninger er opfyldt, kan magasinet beskrives med en EPM model hvor der benyttes en effektiv hydraulisk ledningsevne givet ved ovenstående udtryk og en effektiv porøsitet givet ved porøsiteten af matrix.

I tilfælde hvor opholdstiden er relativt lille, f.eks. i nærheden af kildepladser, hvor der er stor hydraulisk gradient og dermed høje strømningshastigheder i sprækkerne, vil der være risiko for at antagelsen om ligevægt mellem sprækker og matrix ikke er opfyldt. Det vil resultere i at transporthastigheden underestimeres med EPM-modellen, hvilket svarer til at en given forurening vil blive transporteret hurtigere gennem magasinet end modellen forudsiger (altså at transporttiden overvurderes med EPM-modellen). I disse tilfælde bør der, hvis det betragtede strømningssystem er tilstrækkeligt stort, anvendes en DP-model som kan beskrive den dynamiske udveksling af stof mellem sprækker og matrix, og dermed give et troværdigt bud på transporttiden.

Hvis det modellerede område er sammenligneligt med afstanden mellem sprækkerne, kan hverken EPM- eller DP-metoderne anvendes. I det tilfælde er det nødvendigt at benytte en DF-model hvor strømning og transport i hver enkelt sprække beskrives eksplicit. Det vil imidlertid være sjældent at så små transportafstande er relevante i grundvandskortlægningens modellering af grundvandsmagasiner.

Alle de 3 ovenfor nævnte modeller bygger hver især på nogle simple antagelser, og for DP- og DF-modellernes vedkommende kræves desuden kendskab til f.eks. forekomst og størrelse af sprækker. Som bekendt forholder det sig ofte sådan at man i praksis ikke er i besiddelse af denne viden eller har erfaring med anvendelsen af disse modeltyper, herunder at estimere de pågældende størrelser, hvilket medfører at EPM-konceptet stort set altid anvendes i forbindelse med grundvandskortlægningen. Der er imidlertid grund til at vurdere resultaterne fra EPM-modellerne kritisk, især i områder og for problemstillinger hvor forudsætningerne for at anvende denne modeltype er tvivlsomme.

Referencer

Anderson, M.P. & Woessner, W.W. 1992: Applied Groundwater Modeling, simulation of Flow and Advective Transport.

Bear, J. 1993: Modeling flow and contaminant transport in fractured media. In: Bear, J., Tsang, C.F. & Marsily, G.: Flow and Contaminant transport in fractured rock. London. Academic Press, pp. 1-37.

Henriksen, H.J. & Sonnenborg, T.O. 2005: Ståbi i grundvandsmodellering, GEUS.

Odense Vandselskab. 2006: Water Vision. Kildepaldsundersøgelse ved Lindved.

Sonnenborg, T.O. 2006: Vandressource- og stoftransport-modellering i kalk: Status og muligheder. ATV-møde, 8. nov. 2006.

Appendix E Vandtyper

(fra Larsen & Berger, 2006)

I forbindelse med projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland" er der gennemført en klassificering af eksisterende udvalgte grundvandkemiske data med henblik på opstilling af grundvandstyper i kalkmagasiner i projektområdet (Larsen & Berger, 2006).

Ved etablering af klassifikationssystemet for grundvandstyper er der lagt vægt på følgende:

- Geokemiske processer
- Udvalgelse af parametre som påvirker vandets anvendelighed til drikkevand
- Overskuelighed
- Veldefinerede geografiske områder som kan henføres til geologi og hydrogeologi

Da forskellige geokemiske processer kan forekomme samtidigt i grundvandet, er der i klassifikationen lagt vægt på de dominerende processer, det vil sige de processer som er de væsentligste for grundvandets kemiske sammensætning, og hermed dets anvendelse som drikkevand. Da flere af de geokemiske processer ofte forekommer samtidigt i grundvandet, og ofte er koblede, er det ikke muligt at etablere et system som er fuldstændig entydigt. Dette problem kan dog reduceres ved at gøre det etablerede system fleksibelt med hensyn til navngivning af vandtyperne, se nedenstående.

Det er vurderet at hvor parametre har særlig betydning for grundvandets anvendelighed, bør disse indgå i klassifikationen af grundvandstyperne. Sådanne parametre er klorid, natrium, fluorid, sulfat, nikkel, metan og naturligt organisk stof.

Det er tilstræbt at skabe et relativt enkelt system som indeholder seks overordnede grundvandstyper, se Tabel 1. Vandtyperne er defineret ud fra nogle primære og sekundære kendetegn, der afspejler de processer, som har givet vandtyperne deres kemiske karakteristika.

- Grundvandstype 1 er Ca-HCO₃ vandtypen som de fem andre vandtyper er modifikationer af.
- Grundvandstype 2 er en vandtype som derudover indeholder residualt saltvand.
- Grundvandstype 3 er grundvand som foruden opløsning af kalcit er præget af ionbytning af natrium og calcium. Herved fremkommer en vandtype som kan betegnes en Na-HCO₃ vandtype.
- Grundvandstype 4 er grundvand med forhøjede koncentrationer af fluorid.
- Grundvandstype 5 er dannet som følge af forhøjede koncentrationer af oxidationsmidlerne ilt og nitrat. Denne vandtype indeholder forhøjede koncentrationer af nitrat, sulfat, calcium og mange steder nikkel.
- Grundvandstype 6 indeholder forhøjede koncentrationer af metan, organisk stof, ammonium samt lave koncentrationer af sulfat.

Det skal understreges at der kan forekomme grundvand, som indeholder kendetegn fra to vandtyper. Som eksempel kan nævnes at ionbytning ofte påvirker koncentrationen af fluorid, så en vandprøve både kan være ionbyttet og have forhøjet indhold af fluorid.

Det foreslåede klassifikationssystem er relativt enkelt og indeholder kun seks hovedtyper af grundvand. Nye vandtyper kan etableres ved kombination af navne, og eksempelvis vil grundvand som er præget af opløsning af kalcit og tilstedeværelse af residualt porevand med forhøjede koncentrationer af klorid, magnesium og fluorid, betegnes som en Ca-HCO₃ vandtype med forhøjede koncentrationer af klorid, magnesium og fluorid.

Vandtyper i kalkmagasinerne								
Vandtyper	Ca mg/l	HCO ₃ mg/l	Na mg/l	Cl mg/l	F mg/l	Sulfat mg/l	CH ₄ mg/l	Na/Ca mækv.
1) Ca-HCO ₃ grundvand	<100	<300	<200	<250	< 1,5	<100	<3	<1
2) Ca-HCO ₃ grundvand med NaCl	-	-	>175	>250	<1,5	<100	<3	<1
3) Na-HCO ₃ grundvand	<60	-	40-175	<50	-	<100	<3	>1
4) Ca-HCO ₃ grundvand med fluorid	-	-	<175	<250	>1,5	<100	<3	<1
5) Ca-HCO ₃ grundvand med sulfat med eller uden nitrat	>100	-	<175	<250	<1,5	>100	<3	<1
6) Ca-HCO ₃ grundvand med methan og lav sulfat	-	-	<175	<250	<1,5	<10	>3	<1

Tabel 1. Definition af de opstillede grundvandstyper i kalkmagasiner i Nordøstsjælland.

I Tabel 1 angiver koncentrationer med fed skrift de ioner der er lagt vægt på i definitionen af grundvandstypen, mens koncentrationer med normal skrift viser det normale indhold af andre ioner i vandtypen.

Referencer

Larsen, F. & Berger, K. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 5. Grundvandstyper i kalkmagasinerne. GEUS rapport 2006/20.



GEO-VEJLEDNING 8 KORTLÆGNING AF KALKMAGASINER

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med Naturstyrelsen faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen.

Disse vejledninger udgives i en serie kaldet geovejledninger, og skal blandt andet tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver som Naturstyrelsen foretager indenfor grundvandsområdet.

Denne geovejledning sammenfatter erfaringer med kortlægning af kalkmagasiner der er opnået i den allerede udførte grundvandskortlægning. Det er målet med geovejledningen at erfaringerne udbredes og kan indgå i den strategiske planlægning af de kortlægninger der endnu ikke er gennemført i kalkmagasiner.

Geovejledningen anvendes sidestillet med lærebøger og andet litteratur der f.eks. detaljeret beskriver behandling af indsamlede data.