

# Strømning og stoftransport i kalklagene på den københavnske vestegn

Geologisk og hydrologisk vidensopsamling og typemodel

GEO projekt nr. 37208  
Rapport 1, 2014-06-19



Udarbejdet for  
Region Hovedstaden  
Koncern Miljø  
Att.: Henriette Kerrn-Jespersen  
Kongens Vænge 2  
3400 Hillerød

Udarbejdet af  
Jens Galsgaard, jng@geo.dk, GEO  
Magnus Rohde, mmr@geo.dk, GEO  
Rasmus Jakobsen, raj@geus.dk, GEUS  
Peter Roll Jakobsen, prj@geus.dk, GEUS

Kontrolleret af  
Jens Baumann, jeb@geo.dk, GEO

## Indhold

1.....	Forord og læsevejledning .....	4
1.1..	Forfattere og styregruppe .....	4
2.....	Indledning .....	5
2.1..	Metode og problemafgrænsning .....	5
3.....	Formål.....	6
4.....	Regionale forhold .....	7
4.1..	Københavnsområdet .....	9
4.2..	Stratigrafi.....	10
4.2.1	Biostratigrafi.....	10
4.2.2	Logstratigrafi .....	13
4.3..	Hærdning .....	15
4.4..	Bryozokalk .....	16
4.4.1	Lithologiske variationer .....	17
4.4.2	Bankestrukturer .....	19
4.5..	Forkastninger og sprækker .....	22
4.5.1	Forkastninger.....	22
4.5.2	Sprækker .....	25
4.6..	Kalkoverfladen .....	29
4.7..	Grænsen mellem kvartærslag og kalk: kalkpræget moræne og glacialt forstyrret kalk .....	31
4.8..	Hydrauliske forhold .....	40
4.8.1	Porøsitet .....	40
4.8.2	Hydraulisk ledningsevne .....	42
4.8.3	Transmissivitet ud fra boringsdata .....	44
4.8.4	Vandtransporthastigheder i bryozokalken .....	49
4.8.5	Stoftransporten i bryozokalken .....	49
4.8.6	Opsummering af de hydrauliske parametre. ....	52
5.....	Malmø som nøgleområde .....	52
5.1..	Resume af undersøgelser for Malmø Citytunnel .....	54
5.2..	Vingestyrke i morænen korreleret med hærdningsgraden i kalken .....	56

5.3..Vingestyrker og hærtningsgrader korreleret med T-værdier i kalken .....	57
5.4..Geofysiske logs .....	59
5.5..Kaliberlog og flinthorisonter korreleret med indstrømningszoner .....	59
5.6..Sammenligning med værkstedsområder .....	60
6..... Værkstedsområder .....	64
6.1..Bryozokalken i værkstedsområderne .....	64
6.2..Hydrauliske forhold .....	66
6.2.1 Porøsitet .....	66
6.2.2 Hydraulisk ledningsevne .....	66
6.2.3 Hydrauliske parametre i værkstedsområderne .....	67
6.2.4 Potentialeforhold .....	67
7..... Typemodel .....	68
7.1..Strømning i kalk .....	68
7.2..Parametre .....	69
7.3..Værkstedsområderne ved Albertslund og Hedehusene.....	72
8..... Anbefalinger .....	79
9..... Ordliste .....	81
10 .. Referencer .....	83

## Bilag

Bilag 4.1	Kote af kalkoverfladen
Bilag 4.2	Kalkmagasinets transmissivitet
Bilag 5.1	Malmö Citytunnel, Geofysiske logs
Bilag 5.2	Malmö Citytunnel, Vandindhold
Bilag 5.3	Malmö Citytunnel, Flowlog og caliperlog
Bilag 6.1	Dybden til kalkoverfladen
Bilag 6.2	Områder med frie magasinforhold i kalkmagasinet

# 1 Forord og læsevejledning

Denne rapport har til formål at belyse forholdene omkring strømning og stoftransport i kalklagene på den københavnske vestegn, med henblik på at opbygge en viden inden for dette fagområde, så at der kan sættes mere effektivt ind inden for dette geografiske område over for tilfælde af forurening, som har bredt sig ned i kalklagene.

Selvom rapportens emner er geologi og hydrologi, har vi bestræbt os på også at gøre den forståelig for folk med anden baggrund. Rapporten henvender sig derfor til alle, som arbejder med planlægning af hvordan forurening i kalk kan afværges.

Som det er sædvane i denne slags undersøgelser, nærmer vi os emnets kerne gradvist. Således beskriver vi i kapitel 4 forholdene i større, regionalt perspektiv, bla m.h.t. overordnede strukturelle forhold, hvilket især vil sige forkastninger, og m.h.t. kalkens sammensætning og hydrauliske egenskaber. I kapitel 5 gennemgås resultater fra geotekniske undersøgelser for Malmö Citytunnel udført i bryozokalk, og der drages sammenligninger til forholdene på den københavnske vestegn. Kapitel 6 zoomer ind og fokuserer på forholdene i og lige omkring værkstedsområderne.

Kapitlerne 4-6 kan betragtes som en optakt til kapitel 7, som præsenterer rapportens egentlige resultat, eller facit om man vil: principper bag og eksempler på en typemodel, dvs en metodik for hvordan strømning og stoftransport inden for et geografisk afgrænset kalk-volumen kan fastlægges. Vi har her samlet de væsentlige elementer fra de foregående kapitler i tabelform, såvel de beskrivende som de kvantitative, og har anvist farvekoder beregnet til at give overblik over, hvor nøjagtigt typemodellens parametre er bestemt. Det vil jo som oftest være svært (og dyrt) at bestemme alle de ofte ret komplekse parametre med den nøjagtighed, et detaljeret og fuldt optimeret afværge design forudsætter.

Dette sidste fører os naturligt til kapitel 8, som gennemgår en liste af anbefalinger og forslag til videre tiltag, især med det formål at forbedre videngrundlaget for opstilling af typemodeller.

Fagtermer er populære blandt fagfolk, fordi de er dejligt præcise; de er til gengæld oftest uforståelige for andre. Vi har søgt at begrænse brugen af fagtermer, men det er svært at lykkes fuldstændigt med, og vi har derfor i kapitel 9 inkluderet en lille ordliste.

## 1.1 Forfattere og styregruppe

Følgende har bidraget med tekst og figurer til rapporten:

Jens Baumann (JEB), GEO (projektleder)

Jens Galsgaard (JNG), GEO (især kap. 5)

Magnus Rohde (MMR), GEO (især kap. 4 og 6)



Peter Roll Jakobsen (PRJ), GEUS (især kap. 4 og 6, generel geologi, forkastninger og sprækker)

Rasmus Jakobsen (RAJ), GEUS (især kap. 4 og 6, hydrauliske forhold)

Styregruppen bestod af følgende:

Henriette Kerrn-Jespersen (HKJ), RH

Arne Rokkjær (AR), RH

Anna Toft (AT), RH

Ida Damgaard (ID), RH

Mette Broholm (MMB), DTU

Kristine Duelund Vilsgaard (KDVI), DTU

Lise Celine Pedersen (LICPE), DTU

Poul Bjerg (PLBJ), DTU

## 2 Indledning

Region Hovedstaden (RH) har i en årrække haft fokus på sammen med DTU at opbygge viden til brug for undersøgelser og afværge af forurening i moræneler. Det betyder, at man i dag besidder en langt større forståelse af de processer, der foregår i moræneleret og har langt bedre forudsætning for at undersøge og afværge forurening i lavpermeable aflejringer, herunder vurdere realistiske oprensningstider og effektivitet.

Anderledes forholder det sig med de underliggende kalklag. Den mest almindelige indsats over for en forureningsfane i et kalkmagasin er stadig at udføre afværgeoppumpning. Ulemperne ved denne afværgeindsats er blandt andet lange tidshorisonter og høje driftsudgifter. Der findes alternative in situ metoder (reduktiv deklorering, kemisk oxidation og reduktion), men de er endnu ikke blevet almindelige i kalkmagasiner.

### 2.1 Metode og problemafgrænsning

RH har et ønske om en vidensopbygning omkring undersøgelse og afværge af forurening i kalk, som svarer til hvad der tidligere er opnået omkring moræneler. Baggrunden er, at der er mange sager i Region Hovedstaden, hvor det ikke er tilstrækkeligt at oprense forureningen i kildeområdet, idet der allerede er en forureningsfane i grundvandet, der udgør en risiko og bør afværges. Drikkevandet i Region Hovedstaden bliver i alt overvejende grad indvundet fra kalken og i betydelige dele af regionen er kalken beliggende meget terrænnært, så tæt som ca. 5 m under terræn i nogle områder. Afværgeforanstaltninger over for forureningsfaner etableres derfor ofte i kalkmagasiner.

Men på samme måde som moræneler i hydraulisk henseende er en komplekst opbygget jordart, gælder noget tilsvarende for bjergarten kalk: strømning og transport af miljøfremmede stoffer foregår i kalk på mindst ligeså indviklet vis som i moræneler. Vilsgaard

og Pedersen (2013) har bl.a. udført numerisk modellering af den permanente afværgepumpning på den stærkt forurenede Naverland-lokalitet i Albertslund, ud fra hydrogeologiske og forureningsmæssige vinkler. RH savner dog stadig en mere detaljeret forståelse af, hvordan kalkens geologiske forhold indvirker på, hvordan forurening kan bekæmpes og bortskaffes, når først den er trængt ned i kalken.

I efteråret 2013 afholdt repræsentanter for RH, DTU-Miljø, GEO og GEUS derfor et antal møder, hvor RH præsenterede deres ønske om på sigt at kunne udvikle et værktøj til brug ved undersøgelse og afværge af forureninger i kalk. RHs overordnede ønske var at kunne anvende metoder til oprensning af forureningsfaner i kalk, der ikke omfatter langvarig drift af et anlæg, som det er tilfældet i dag.

Man enedes i november 2013 om indholdet af et kalkudredningsprojekt udført af GEO og GEUS i samarbejde, og med et formål der er beskrevet i kapitel 3. Nærværende rapport er projektets resultat.

En del af projektet bestod i afholdelse af en ekskursion til kalk-lokaliteter, hvor de involverede sammen kunne besigtige og diskutere projektets emne. Ekskursionen fandt sted 2013-11-28, hvor man i flot solskinsvejr besøgte først Limhamn kalkbrud lige syd for Malmö og siden Karlstrup Mose Kalkgrav nord for Køge. Denne rapportes forsidebillede er taget i kalkgraven i Limhamn og viser bryozobanker fordelt på forskellige afgravningstrasser

### 3 Formål

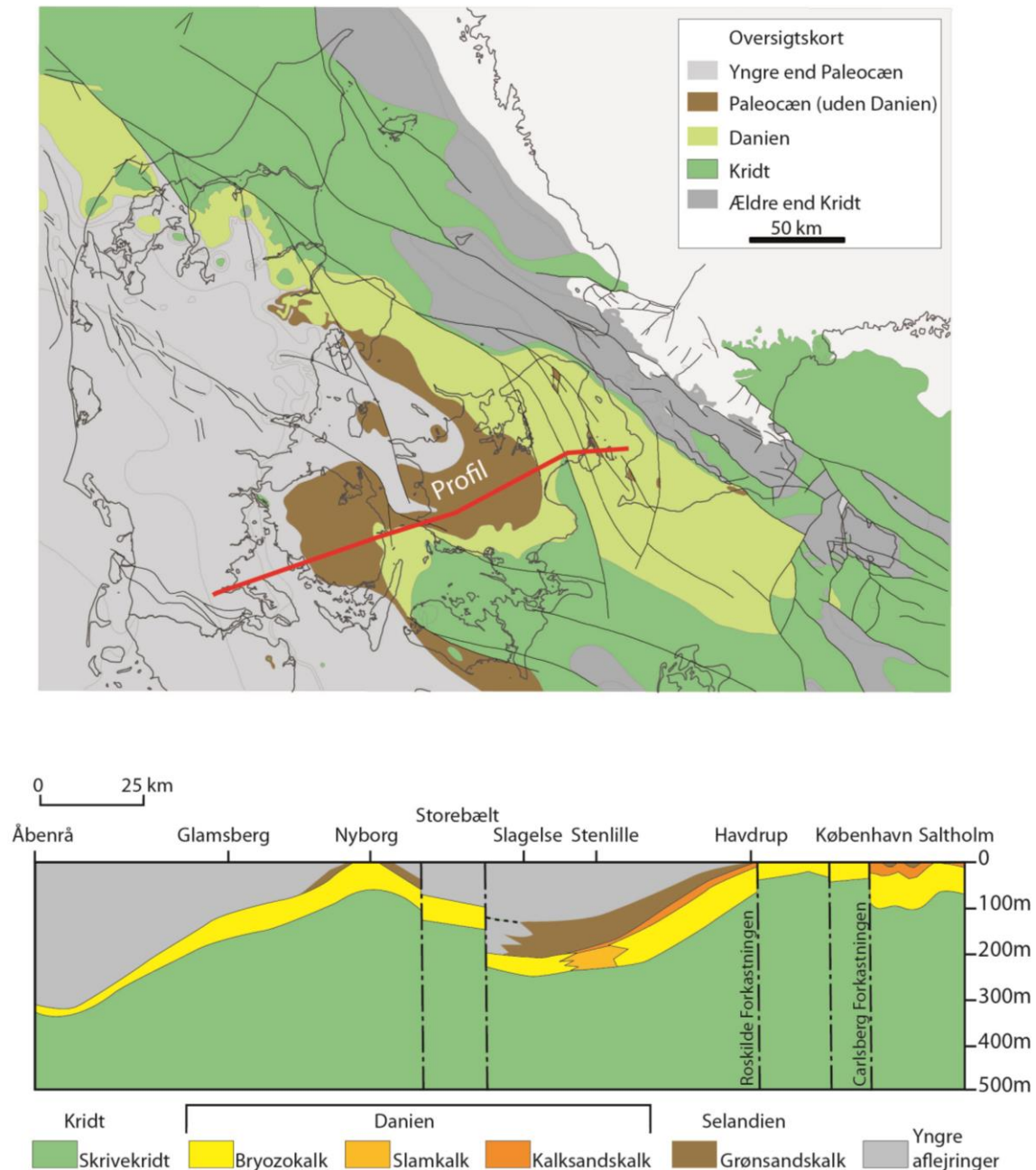
Det overordnede formål med projektet er, at få identificeret de mest betydende parametre i forhold til forståelsen af strømning og stoftransport i kalkmagasiner og muligheden for at gennemføre bedre afværgeforanstaltninger end pump and treat. Det er desuden et formål at kunne forbedre risikovurderingen og dermed målrette planlægning og udførelsen af forureningsundersøgelser, både V2- og videregående undersøgelser.

Dette søges løst gennem tre delmål:

1. Udarbejde en geologisk beskrivelse af de væsentligste kalkformationer i Region Hovedstaden med særlig vægt på egenskaber, som har betydning for forureningstransport. Der skal lægges særlig vægt på betydende geologiske enheder i forhold til Vestegnen, hvor kalken er mere overfladenær end i resten af Region Hovedstaden.
2. Udarbejde en geologisk og hydrogeologisk typemodel for et nøjere defineret område på Vestegnen.
3. Give forslag til yderligere undersøgelser i forhold til at belyse hydrauliske forhold i forhold til forureningstransport, herunder forekomst og samspil mellem matrix og sprækker.

## 4 Regionale forhold

Kalkbjergarterne i prækvartæroverfladen ligger i Danmark i et buet bånd fra Lolland-Falster op over Østsjælland og op gennem det nordlige Jylland. Generelt dykker kalkbjergarterne mod sydvest (Figur 4.1).

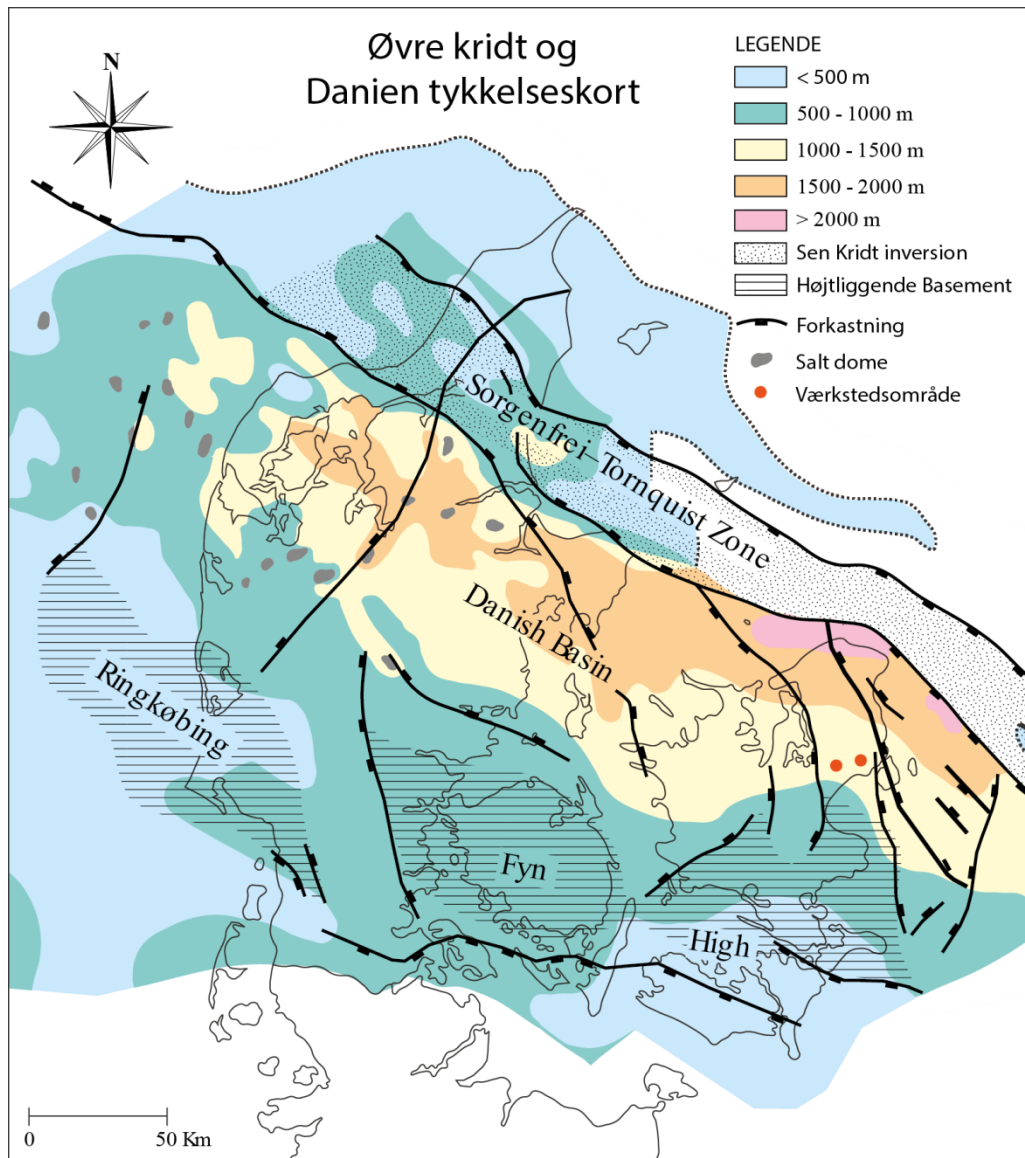


Figur 4.1. Profil der viser et snit gennem de danske kalkbjergarter (efter Fallesen, 1995, Foged et al. 1995, Gravesen 1994, Kelstrup 1995, Klitten 2003, Mielby & Sandersen 2005, Nielsen & Japsen, 1991, Pedersen 2001, Stenestad 1976)

København – Øresundsområdet ligger geologisk set i det Danske Bassin tæt op ad den Fennoskandiske Randzone (Fig. 4.2). Den Fennoskandiske Randzone er en markant tek-

tonisk zone der afgrænser det Fennoskandiske grundfjeldsskjold mod det Danske Bassin, hvor store sedimentmægtigheder er aflejret. Den Fennoskandiske Randzone afgrænses af store forkastninger, og området har en lang og kompleks tektonisk historie (Liboriusen et al. 1987, Norling & Bergstrøm 1987, Vejrbæk & Britze 1994, Erlström et al. 1997). Det overordnede tektoniske forkastningsmønster er allerede anlagt i Palæozoikum. Op gennem Palæozoikum og i Mesozoikum sker der en bassinudvikling i det danske bassin og adskillige tektoniske hændelser kan spores i Den Fennoskandiske Randzone. I Kridttiden er aflejret store mægtigheder af marint skrivekridt i det Danske Bassin (Fig. 4.2). I tidlig øvre kridt er der transpressionel kompression med en tilhørende dextral sideværts forskydning 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 Europæiske kontinentplade. Efter denne hændelse aflejres yderligere skrivekridt i Maastrichtien. De transpresionelle bevægelser fortsætter op i tidlig tertiær.

I Neogen foregår der en regional hævnning med en resulterende erosion, hvor der eroderes ca. 500 til 750 m af palæocæne, eocæne og oligocæne aflejringer (Jensen & Michelsen 1992, Japsen 1992, 1993 og Japsen & Bidstrup, 1999).



Figur 4.2. Tektonisk kort der viser beliggenhed af Den Fennoskandiske Randzone, også kaldet Sorgenfrei-Tornquist zonen. Tykkelserne af kridt og kalkaflejringer i det danske bassin er også angivet.

#### 4.1 Københavnsområdet

Prækvarteroverfladen i Københavnsområdet (omtrentligt svarende til det tidligere København Amt) består af skrivekridt, bryozokalk, Københavns Kalk formationen og Grøn-sandskalk (Figur 4.3). Kalkbjergarterne er aflejret i Kridt, Danien og tidlig Paleocæn, og når man finder dem side om side i prækvartæroverfladen skyldes det en kombination af tektoniske deformationer og erosion. En af de mest markante deformationer er Carlsberg forkastningen, der sidestiller bryozokalk og København Kalk formationen. En anden markant forkastning er Roskilde forkastningen. Kalkbjergarterne bliver nedforkastet henholdsvis øst for Carlsberg Forkastningen og vest for Roskilde Forkastningen, og imellem dem kommer lidt ældre kalkbjergarter op til prækvartæroverfladen. I Figur 4.3 er der vist en konceptuel model i form af et generaliseret tværprofil fra Roskilde til København. Profilet er baseret på boringsoplysninger, borelogs og tolkninger af seismiske linjer. I



Naverlandsområdet er der desuden brugt nye stratigrafiske oplysninger fra nanofossil analyser. Der er relativt gode boringsoplysninger fra Naverland og mod øst, hvorimod boringsdybderne generelt er mindre fra Hedehusene og mod vest, hvilket giver færre oplysninger. I den vestlige del varierer boringsoplysningerne en del mellem KK og BK. Der er dog overvejende beskrevet KK. Her er den øverste kalkenhed tolket som Københavnskalk Formationen. Det er den ud fra antagelsen af at kalkenhedernes tykkelse er tilnærmelsesvis ens i hele området, hvilket de ser ud til at være fra Naverlandsområdet og mod øst. På de seismiske profiler kan man se, at den øverste kontinuerlige reflektor slår et knæk ved forkastningerne i den centrale del af regionen. Reflektoren dykker ca. 50 ms TWT, hvilket svarer til ca. 50 m mod øst. Hvis kalkenhederne har ensartede tykkelser, må der således være Københavnskalk i overfladen ved Hedehusene. Borehullogs fra boringer fra Marbjerg kildeplads nordvest for Hedehusene tyder på, der er tale om nedre København kalk (Figur 4.5). Logs fra Københavns Amts undersøgelser på Akacievej i Hedehusene (Københavns Amt, 2006) viser dog ikke genkendelige logmønstre, der kan henføres til København Kalk. Forekomsten af bryozokalk i området tyder også på en anden sammensætning en den man træffer i København. En tolkning kunne være at denne kalktype generelt er opbygget som Københavnskalk Formationen men, at dele af sedimentet der aflejres herude består af større andele af omlejrrede bryozoaer. Det vil derfor være af stor betydning at få gode boringsoplysninger (kerneboringer) og stratigrafiske analyser, så man bedre vil kunne bestemme alder og aflejningsmiljø.

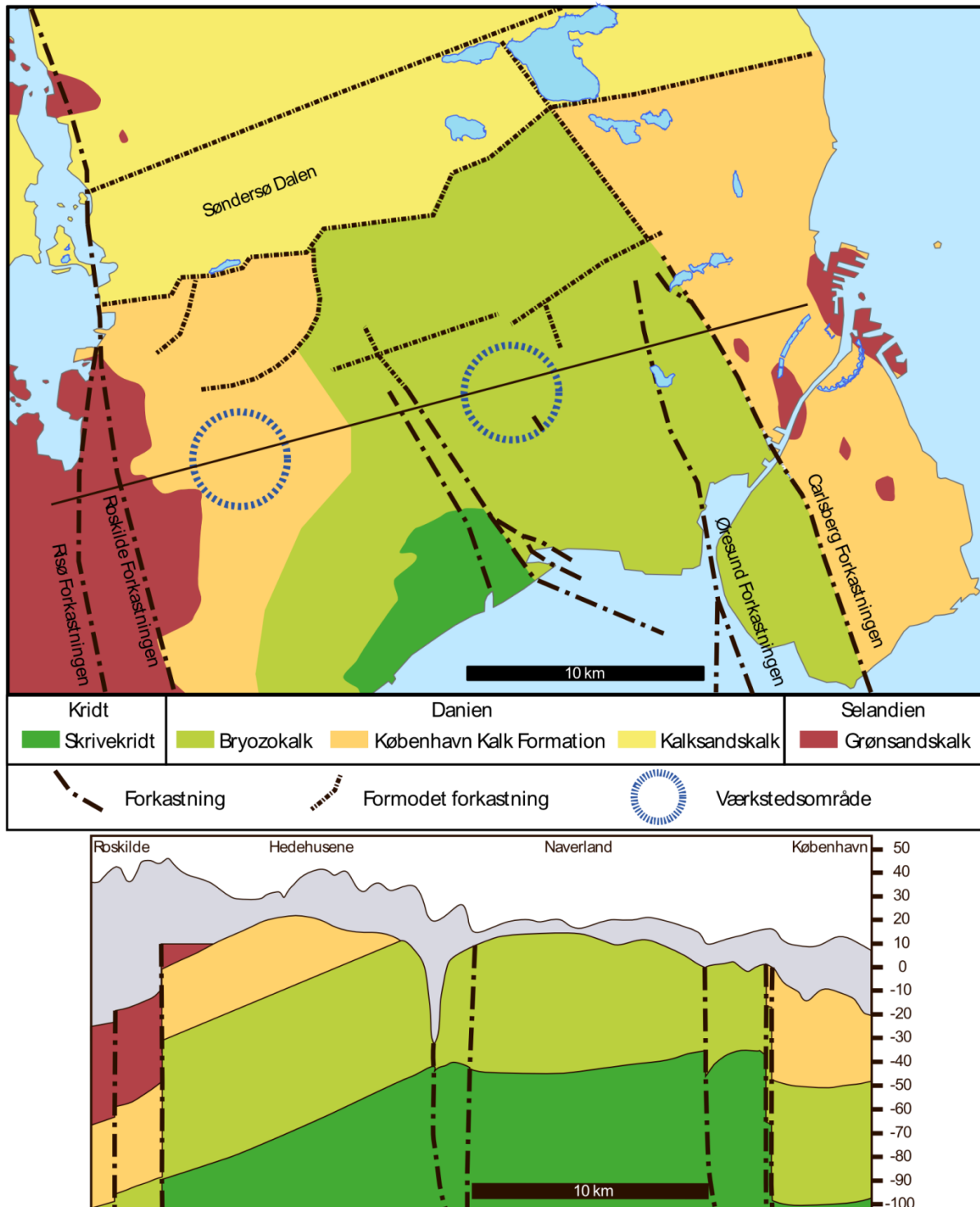
Afgrænsningen mellem bryozokalk og kalksandskalk mod nord er lagt langs Sønderødalens sydlige afgrænsning. Der er antagelig tale om en gradvis overgang, men den ligger heromkring.

## 4.2 Stratigrafi

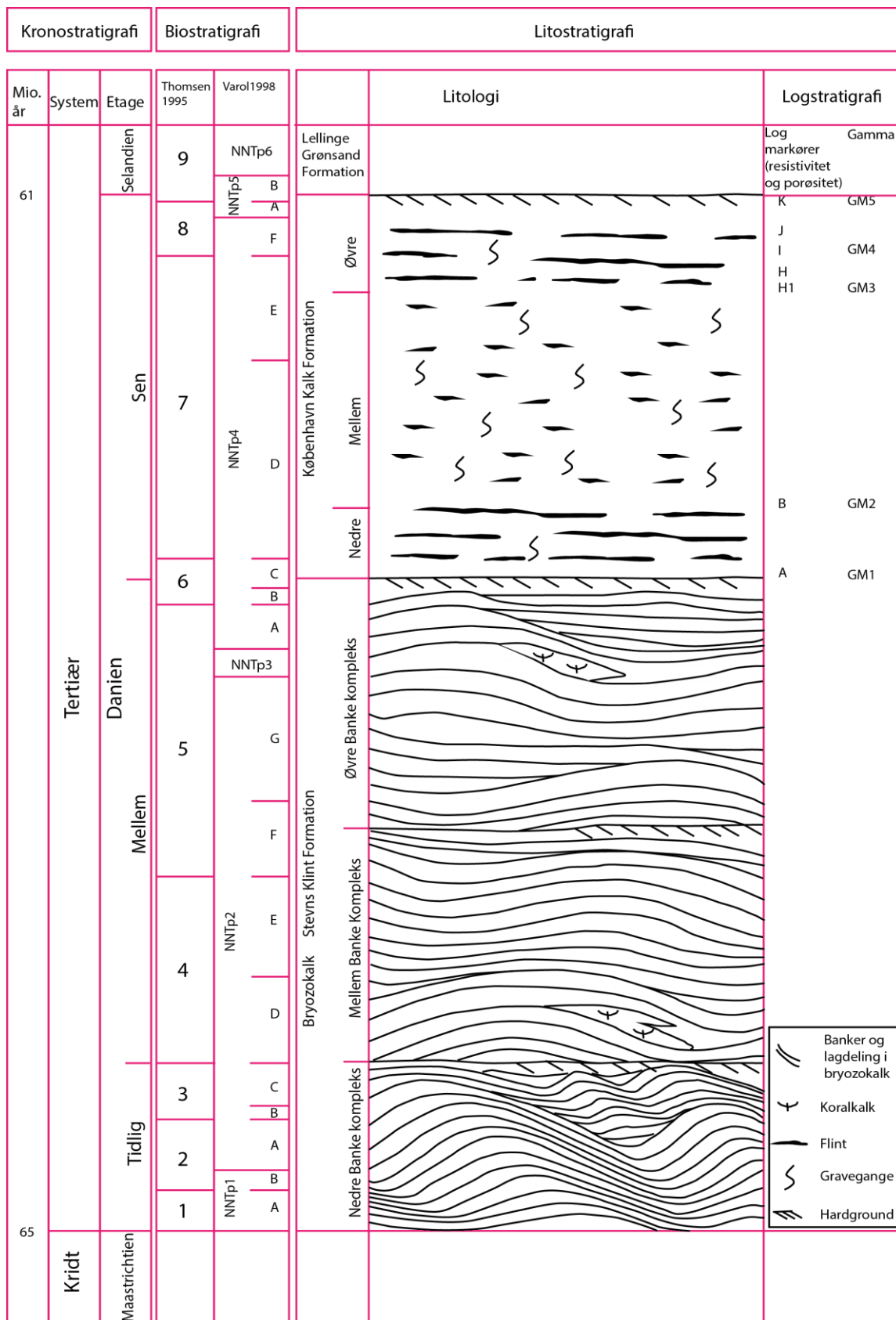
Kalkbjergarterne på Østsjælland kan inddeles efter alder (kronostratigrafi), indhold af fossiler (biostratigrafi) og sammensætningen/litologien (litostratigrafi), se Figur 4.4.

### 4.2.1 Biostratigrafi

Biostratigrafiske inddelinger kan laves på makrofossiler og mikrofossiler. At anvende makrofossiler kræver normalt mere materiale end det man får i boringer, og mikrofossil inddelingen har også en større opløselighed. I Danien aflejringer bruger man kokkoliter til at lave biostratigrafiske inddelinger. Thomsen (1990, 1992, 1995) har inddelt Danien i Danmark i 9 forskellige kokkolitzoner. Bryozo kalken er inddelt i zonerne 1 til nederste del af 6 (Figur 4.4). I Nordsøen bruger man en lidt anden inddeling, der er lidt mere detaljeret (Varol, 1998), se Figur 4.4. I Thomsens zoner er bankekompleks 2 og 3 således inddelt i 2 zoner, og i Varols zoner er dette interval inddelt i 6 zoner.



Figur 4.3. Øverst: Kalkbjergarter i prækvartæroverfladen mellem København og Roskilde (modificeret efter Stenestad, 1976). Nederst: Konceptuel model/profil for området mellem Roskilde og København



Figur 4.4. Krono-, bio- og lithostratigrafisk skema over Danien bjergarterne i det østlige Sjælland og Øresundsområdet (modificeret efter Lund m.fl. 2002).

#### 4.2.2 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 4.5.

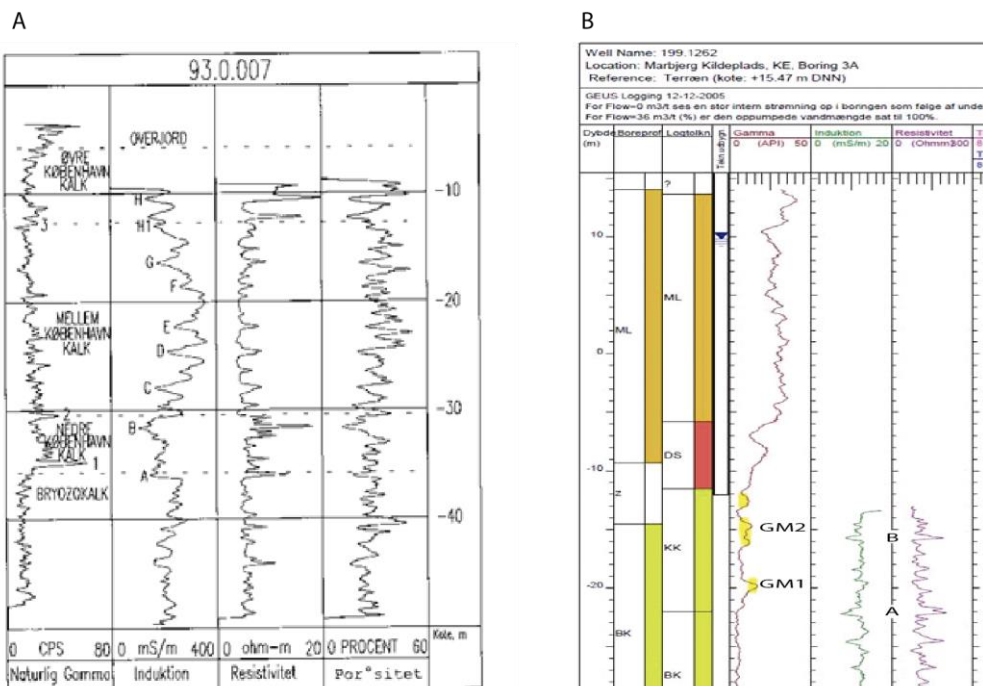
Både København Kalk og Lellinge Grønsand Formationen er karakteriseret ved en tydelig og regionalt udbredt lagdeling med vekslende bløde og hårde horisonter og en relativ stor tæthed af flintbænke (Nygaard, 1993; Klitten m.fl., 1994; Klitten, 2003). Denne lagdeling gør kalksekvenserne velegnede til inddeling i logstratigrafiske enheder baseret på genkendelige logmønstre. Overgangen mellem Lellinge Grønsand Formation og kalksandskalk (eller København Kalk) vil typisk kunne identificeres ved et fald i gamma-niveau til et lavere niveau i kalksandskalken og en stigning i resistivitet samt flere og mere markante resistivitetspeaks 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 litologiske sub-sekvenser: Nedre, Mellem og Øvre København Kalk (Figur 4.4).

I Nordøstsjælland konkluderer Klitten og Wittrup (2006), 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 der er for nærværende ikke basis for at udstrække litostratigrafien for København Kalk til kalksandskalken i hele Nordøstsjælland.

Det er relativt sikkert at identificere grænsen mellem København kalk og bryozokalk i København-Amager-Saltholm området på baggrund af naturlig gammalogs. Niveaulet 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.

Ved Marbjerg kildeplads ved Hedehusene er der set logmønstre, der svarer fuldstændig til den nederste del af København Kalk Formationen (Figur 4.5B). I Hedehusene er der dog også logmønstre som man typisk kender fra bryozokalk.

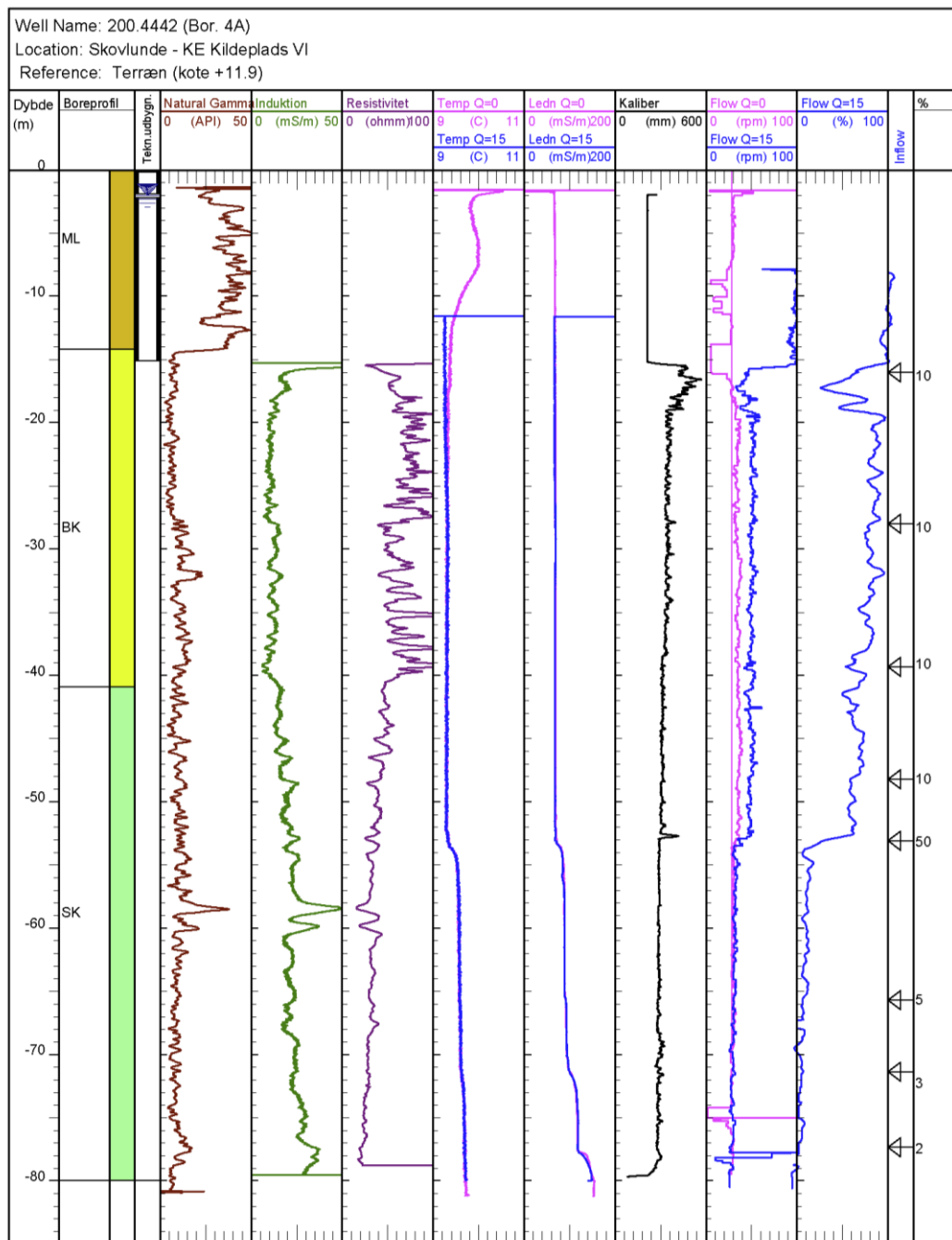


Figur 4.5. A: Bryozokalk – København Kalk Formationen grænsen i en boring under den kunstige halvø ved Øresundstunnelen (fra Olsen & Nielsen 2002). Bryozokalken har et lavere og mere regelmæssigt gammastrålings niveau. Bogstaverne ved induktionsloggen svarer til dem i stratigrafiskemaet i Figur 4.4. B: Logmønstre fra boring ved Marbjerg kildeplads nordvest for Hedehusene. Logmønstrene svarer til den nederste del af Københavnskalk Formationen.

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 over længere afstande. Det har således hidtil ikke været muligt at opstille en logstratigrafi for bryozokalken (Klit-ten m.fl., 1994).

Kalken i skrivekridtet er mere blød, ensartet, kun svagt lagdelt og med væsentligt færre flintbænke (Nygaard, 1993). Flintlag og erosive hardgrounds er sparsomme, men der optræder flere mergelhorisonter som kan identificeres på naturlig gamma og elektriske logs (Figur 4.6).





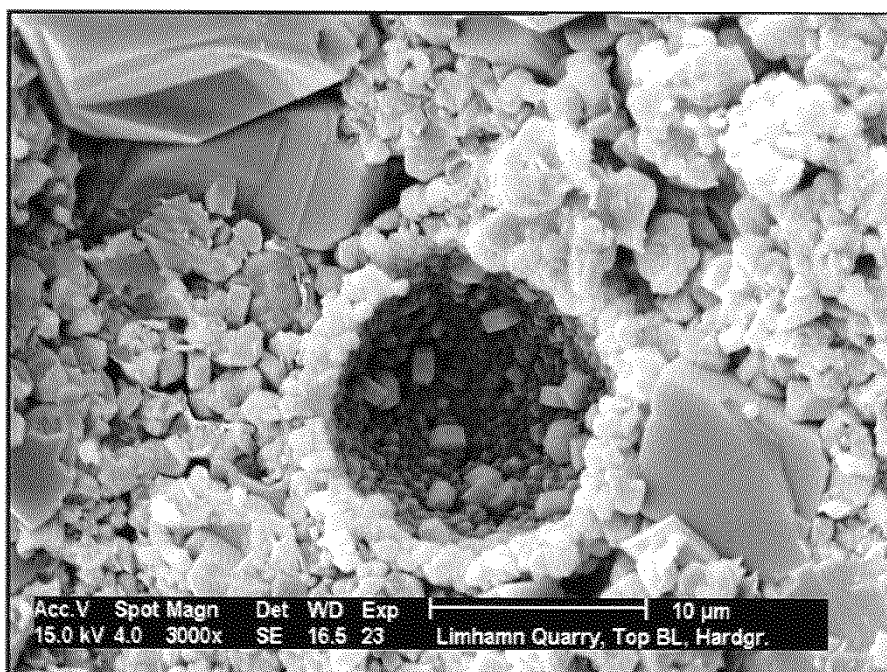
Figur 4.6. Eksempel på borehulslogging i en boring ved Ejby, der viser overgangen mellem bryozokalk (BK) og skrivekridt (SK). Bryozokalken har et lavere gamma niveau, med undtagelse af de nederste ca. 15 m. Det kunne være det nederste bankekompleks, der har et lidt højere niveau end bankekomplekserne 2 og 3. Grænsen ses tydeligt på resistiviteterne, hvor bryozokalken har væsentligt højere værdier.

### 4.3 Hærdning

Kalksandkalk og bryozokalk er efter aflejring omdannet eller cementeret således, at der optræder bænke med forskellig hærdningsgrad/hårdhed. Under cementeringen er der udfældet calcitkrystaller i porerummene, hvilket binder kalken sammen (cementerer)

(Figur 4.87) og porøsiteten og permeabiliteten nedsættes. Hærdningen følger generelt bænkingen, men hårdhedsvariationer ses også i de enkelte bænke. 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 rid-ses 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 la-der sig ikke løsne med en kniv.
- H5: Meget stærkt hærdnet (flint). Materialet lader sig ikke ridse med en kniv.



Figur 4.7. SEMbillede af bryozokalk fra Limhamn. Bemærk de kantede nydannede calcitkrystaller, der har udfyldt hulrum og derved cementeret kalken. Prøven er fra den øverste stærkt hærdnede bryozokalk bænk lige under København Kalk Formationen, på den sydlige væg i Limhamn kalkbrud.

#### 4.4 Bryozokalk

Bryozokalken er karakteriseret ved at indeholde skeletfragmenter af bryozoaer der ligger i en finkornet matrix (Figur 4.8). Bryozokalken danner oftest bankestrukturer. Bryozokalkenheden på Østsjælland svarer til nedre og mellem Danien (Figur 4.4). Bryozokalken har nu fået et formelt formationsnavn; Stevns Klint Formationen (Surlyk et al. 2006).



Figur 4.8 Nærbillede af bryozokalk fra Saltholm. De aflange bryozostængler ligger i en sandet (kalksand) matrix.

#### 4.4.1 Lithologiske variationer

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). I prøvebeskrivelser træffer man indenfor bryozokalkenheden på betegnelser som bryozokalk (BK), kalksandskalk (KK), slamkalk (LK) og kalk og flint (ZK). Bryozokalken danner oftest bankestrukturer.

Bryozokalken har et højt indhold af flint, som gennemsnitligt udgør 20-30 % (Lund m.fl. 2002). Flinten optræder dels som knolde og dels som flintrige bænke, der følger lagdelingen i kalken, hvorved de fremhæver bankestrukturerne. Flinten adskiller sig fra flint i andre kalkbjergarter ved at den ofte har en mørk kerne og en lys, porøs kalkholdig rand.

I bryozokalken findes linser af koralkalk (Figur 4.9). Større forekomster findes i Faxe kalkbrud. Relativt store forekomster af koralkalk er set i seismiske linjer, boringer og midlertidige udgravninger i Øresund (Knudsen et al. 1995, Rasmussen & Andersen 1994 og Jakobsen 1997), men generelt findes koralkalk som relativt små forekomster i bryozokalken. Koralkalk er dannet af grene fra koralkolonier, som er afbrækkede fragmenter aflejret på havbunden med en mellemliggende finkornet masse af kalkslam. Bjergarten forekommer også som 'pibet' kalk, hvor de oprindelige koraller er opløst og nu ses som hule rør i kalken. Koralkalk er ofte stærkt hærdenet, og fri for flint.





*Figur 4.9. Koralkalk (grå linse i midten af billedet) langs flanken af bryozokalkbanke (lys grå) i Limhamn kalkbrud. Koralkalken er ca. 1 - 1,5 m tyk (foto: Magnus Marius Rohde)*

I Bryozokalken optræder hardgrounds, der er hærdnede bænke der markerer en gammel overflade. De der er dannet ved et sedimentationsstop, hvor den blottede overflade så har været udsat for diagenese/hærdning.

I Limhamn kunne man tidligere se hele Bryozokalkenheden. Brotzen (1959) opdelte den i tre bankekomplekser; nedre, mellem og øvre bankekompleks. Komplekserne er adskilt af hardgrounds. Det nederste bankekompleks kan ikke ses mere, men det er denne del man kan se ved Stevns Klint og i Karlstrup kalkgrav og den er nu opstillet som Korsnæb Member (Surlyk et al. 2006).

I Københavnsområdet er hele enheden kun gennemboret i fuld tykkelse i få borer, herunder Tuba 13, udført ved Frihedsstøtten på Vesterbrogade. Herudover er Bryozokalken gennemboret på Saltholm og i Øresund. På Amager er der ligeledes nogle borer der gennemborer bryozokalken. I Tuba 13 er bryozokalken 53 m tyk, på Saltholm er den 63 m tyk og i Limhamn er den ca. 60 m tyk. I Tuba 13 består store dele af bryozokalkenheden af slamkalk, hvorimod boringen på Saltholm viser at hele enheden her, er langt mere præget af bryozoaer (Stenestad 1976). Det store indhold af bryozoaer kan være med til at holde på sedimenterne, og derved give en højere sedimentationsrate som igen giver en større tykkelse af enheden. Generelt er bryozokalken i København stærkt præget af slamkalk, og bryozokalken er fattig på bryozofraktement.

Overgrænsen af bryozokalken er en markant hardground, der uden vanskelighed har kunnet fastlægges i København (Stenestad, 1976). Desuden er der et stigende indhold af glauconit op mod bryozokalkens øvre grænse. Undergrænsen ned mod skrivekridtet er ligeledes markeret af en hardground, og generelt er bryozokalken mere hærdnet end skrivekridt.

#### 4.4.2 Bankestrukturer

Som nævnt ovenfor er bryozokalk karakteriseret ved bankestrukturer. I Limhamn kalkbrud har Brotzen (1959) opdelt bryozokalken i tre bankekomplekser, eller bioherm grupper; dels ud fra fossiler og dels ud fra bankekaraktistika og hardgrounds der adskiller komplekserne.



Figur 4.10. Nedre bankekompleks ved Stevns Klint. Den bølgede lagdeling i bryozoban-kerne markeres af mørke flintlag (foto: Morten Bjerager).

Bankerne i det nederste/ældste bankekompleks, der svarer til Korshøj Member, der er blottet på Stevns Klint og i Karlstrup kalkgrav, adskiller sig formmæssigt fra bankekompleks 2 og 3, ved at have et større længde-bredde forhold. Ved Stevns klint er bankerne 45-110 m brede og 50-300 m lange, og de er asymmetriske med stejle flanker mod SSV og svagt hældende flanker mod NNØ (Bjerager & Surlyk 2007)(Figur 4.10).

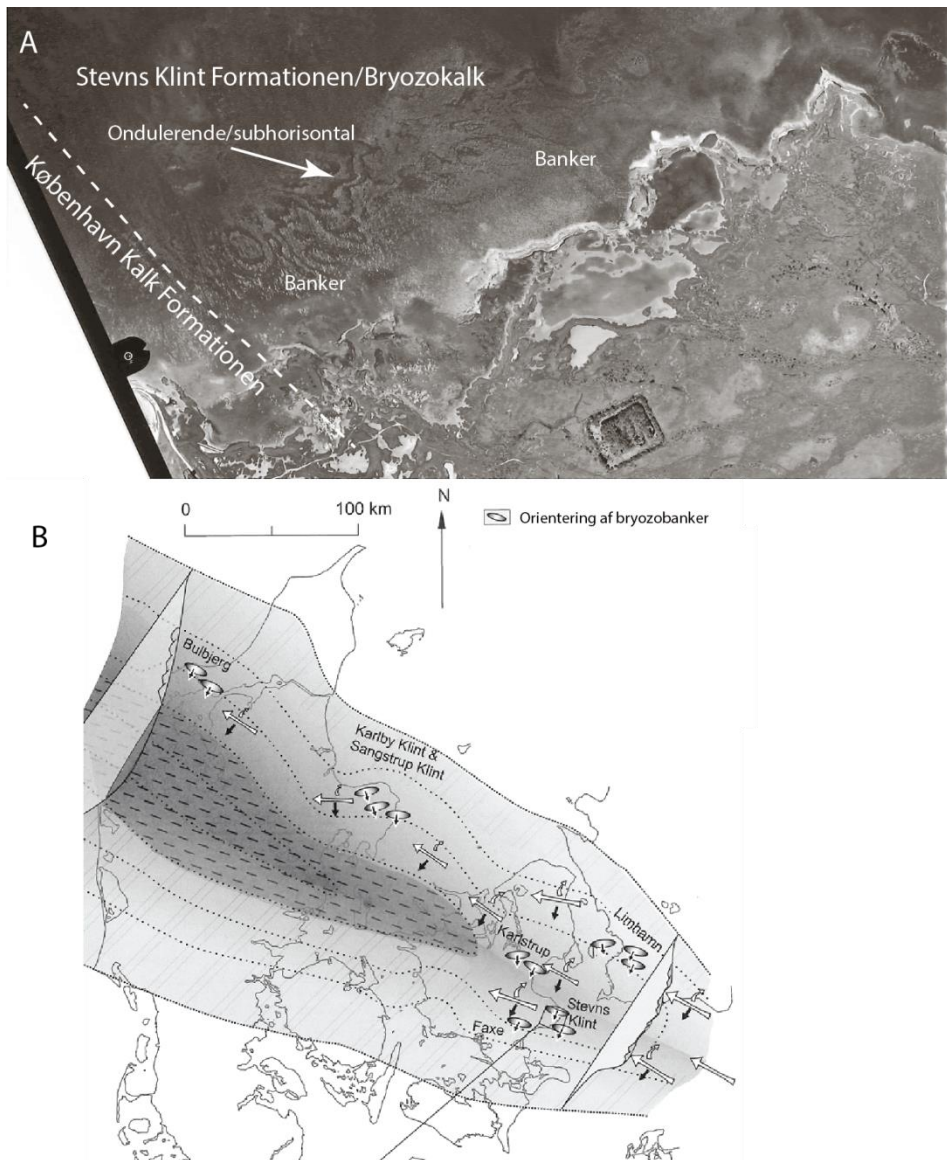


Figur 4.11. Profil i mellemste bankekompleks i Limhamn kalkbrud. Bankerne er symmetriske og dele af bryozokalken er ondulerende til horisontal.



Profiler og georadar undersøgelser (Nielsen m.fl. 2009) i Limhamn kalkbrud viser at bankerne her i bankekompleks 2 er symmetriske, og de har et længde bredde forhold der er mindre end ved Stevns Klint og nogle banker er lige så brede som de er lange. Desuden er der partier, hvor der ikke er banker og lagdelingen er sub-horisontal (Figur 4.11). På havbunden nord for Saltholm kan man på flyfoto se et horisontalt snit gennem bankerne der er udviklet lige under grænsen til den overliggende København Kalk Formation og dermed antagelig i bankekompleks 3 (Figur 4.12). Her ses banker med varierende længde-breddeforhold og laggrænser der er svagt ondulerende. Længde-bredde forholdet er også her mindre end ved Stevns.

På landsplan er der en lille variation i længderetningen af bankerne i bryozokalk. Generelt varierer længderetningen mellem øst vestlig og sydøst-nordvestlige retninger (Bjerrager & Surlyk 2007)(Figur 4.12)

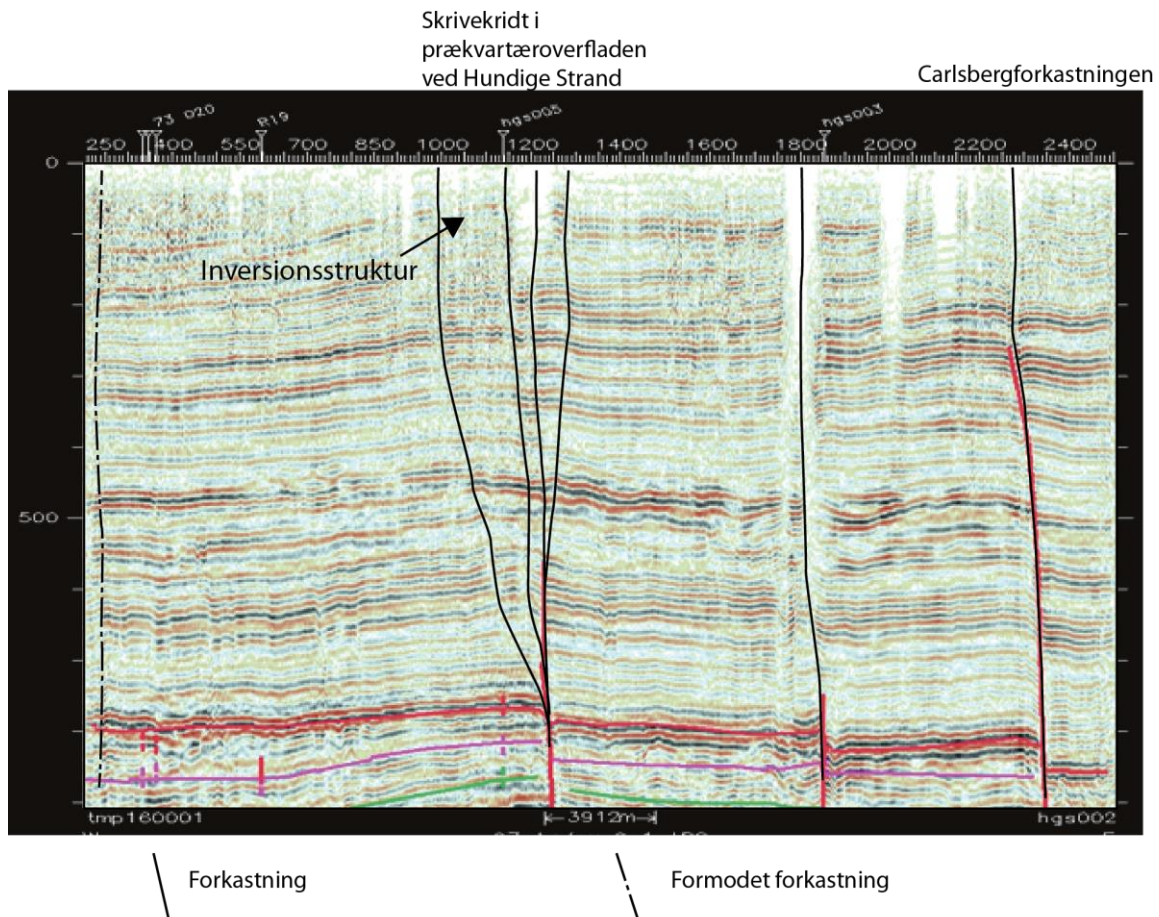


Figur 4.12. Eksempel på bankestrurer på havbunden nord for Saltholm. Snittet er lige under kontakten til Københavnkalk formationen og dermed i bankekompleks 3. Dele af bryozokalken er ondulerende til horisontal. Længderetningen varierer fra øst-vest til nordvest-sydøst. Den lille rektangulære lund nederst th måler ca. 135 x 115 m. B: Kort over orienteringer af bankestrukturer i bryozokalk i Danmark. Bankerne er generelt orienteret i øst-vestlig til nordvest-sydøstlig retning (fra Bjerager & Surlyk 2007).

## 4.5 Forkastninger og sprækker

### 4.5.1 Forkastninger

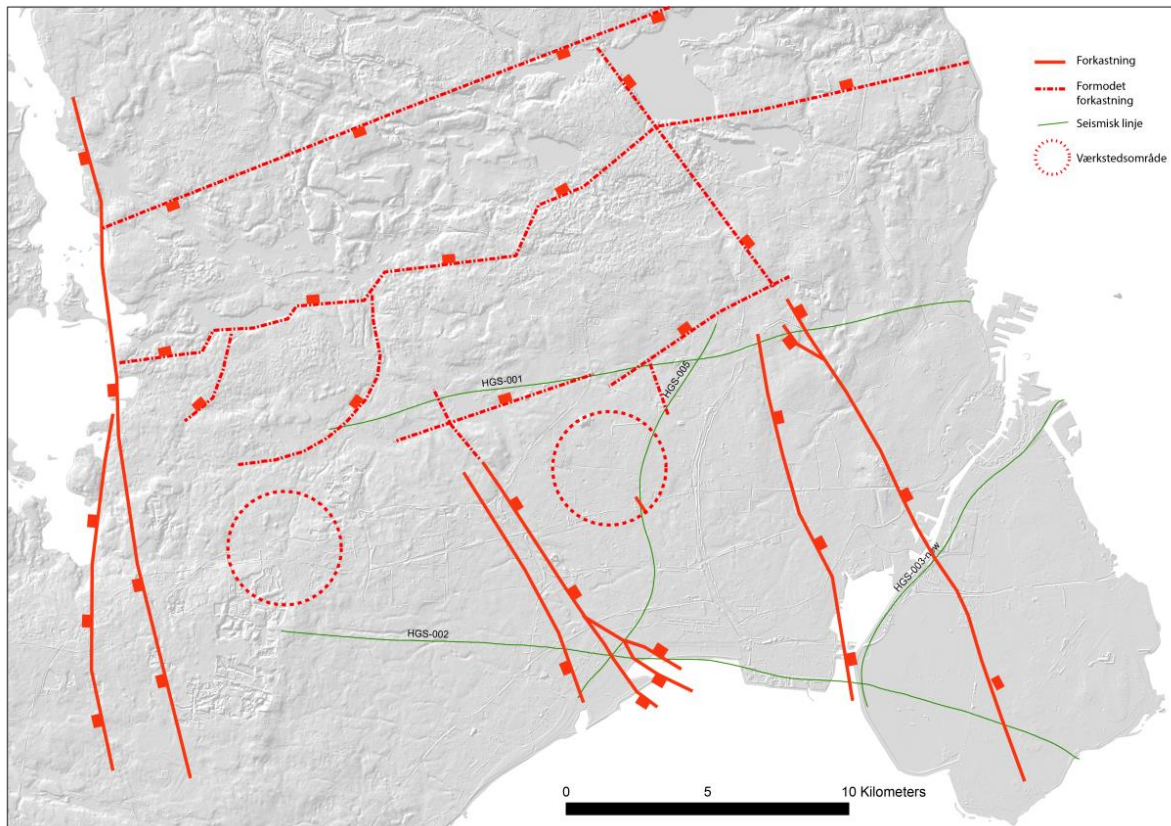
Der er specielt i forbindelse med den Fennoskandiske Randzone dannet en del større forkastninger der har medført forsætninger i kalkbjergarterne. Fra den Fennoskandiske Randzone udgår ligeledes en række forkastninger ind i det Norsk-Danske bassin (Figur 4.1).



Figur 4.13. Seismisk linje HGS-002, der går fra Reerslev over Avedøre Holme og på tværs af den sydlige del af Amager. Mod øst ses Carlsberg forkastningen, der er et markant strukturgeologisk element, idet den adskiller København Kalk Formationen og bryozokalk i København. Desuden er der en forkastning ved Kalveboderne. Ved Hundige Strand er der et system af forkastninger der er en del af en inversionsstruktur, der har bragt skrivekridtet op i prækvartæroverfladen ved Hundige Strand. På den vestlige del af linjen er der antydninger af noget der kan tolkes som mindre forkastninger, men de kan også tolkes som forstyrrelser i de seismiske data. Bemærk også at den øverste kontinuerlige reflektor i skrivekridtet dykker ca. 50 mS i to-vejs-løbetid fra Hundige Strand til den østlige afgrænsning af profilet

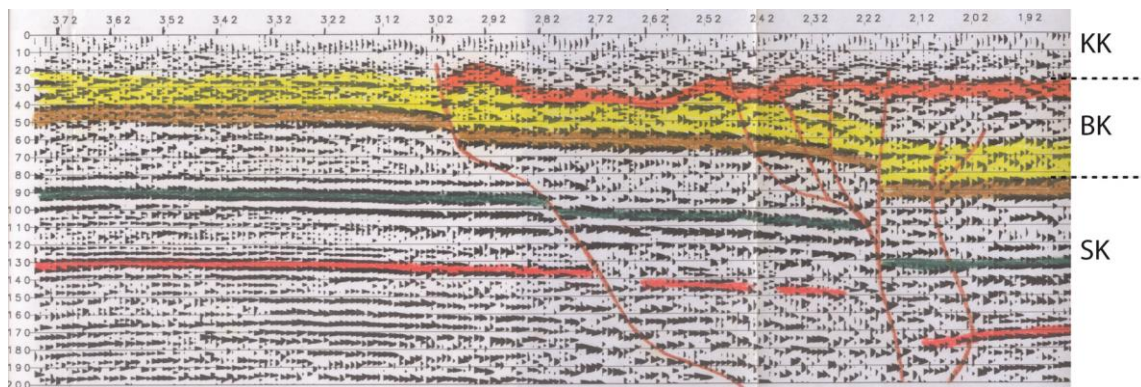
I det storkøbenhavnske område er der lavet dyb-seismiske undersøgelser for at kunne bedømme potentielle muligheder for jordvarmeanlæg. I disse seismiske linjer kan man erkende flere forkastninger, der ser ud til at gå op i prækvartæroverfladen (Figur 4.13). De tolkede forkastninger er tegnet op på Figur 4.14. Desuden er der tolket formodede forkastninger på baggrund af prækvartær overfladen.





Figur 4.14. Forkastninger og seismiske linjer omkring København i prækvartæroverfladen.

Forsætningen på tværs af forkastningerne kan være med til at afgrænse og styre udbredelse af kalkenheder. Et eksempel herpå er Carlsbergforkastningen (Figur 4.15) der i københavnsområdet afgrænser København Kalk Formationen og bryozokalk. Carlsbergforkastningen består ikke blot af ét forkastningsplan, men af en zone med en serie indbyrdes relaterede forkastninger. Forsætningen på Carlsbergforkastningen er ca. 50 m på Amager (Fallesen 1995) og ca. 80 m i København (Stenestad 1976). Roskilde forkastningen har en forsætning på ca. 60m. Forkastningerne mellem de to hovedforkastninger har mindre forsætninger. Desuden er der en sideværts bevægelse i forkastningerne (Fallesen 1995)



Figur 4.15. Seismisk profil på tværs af Carlsbergforkastningen på Amager (frakørsel 19 på E20, ved Fields). Dybden er to-vejs-løbetid i millisekunder (ms) som i kalken svarer omtrentligt til dybde i meter. Hele forkastningszonen er ca. 300 m bred og den tætteste koncentration af forkastninger ligger i en ca. 100 m bred zone (fra Fallesen, 1995).

I selve forkastningszonen sker der en stærk opsprækning af kalken (Figur 4.16), og Carlsbergforkastningen har stor lokal betydning i form af øget hydraulisk ledningsevne i kalken (Blem, 2002; Markussen, 2002).



Figur 4.16. Tætsiddende vertikale sprækker i bryozokalk i udgravning i Sydhavnsgade, København, tæt på Carlsbergforkastningen. Sprækkerne er parallelle med forkastningen.



#### 4.5.2 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 (isafsmelting, neogen erosion)
- Knust kalk, typisk forårsaget af gletsjerpåvirkning

##### **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 4.17).

Orienteringen af de vertikale sprækker følger i store træk orienteringen af de forkastninger man finder i et område. Hvis man ikke har konkrete sprækkeopmålinger fra profiler, vil tommelfingerreglen være at de vil være orienteret mere eller mindre parallelt med de forkastninger der måtte være i området (Figur 4.20).



*Figur 4.17. System af parallelt orienterede vertikale sprækker i København Kalk Formationen i midlertidig udgravning på Amager.*

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. Der ved får et sprækkesæt en højere konnektivitet (kontakt med andre sprækker) og kan være med til at opbygge et sammenhængende sprækkemagasin.

### Horisontale sprækker

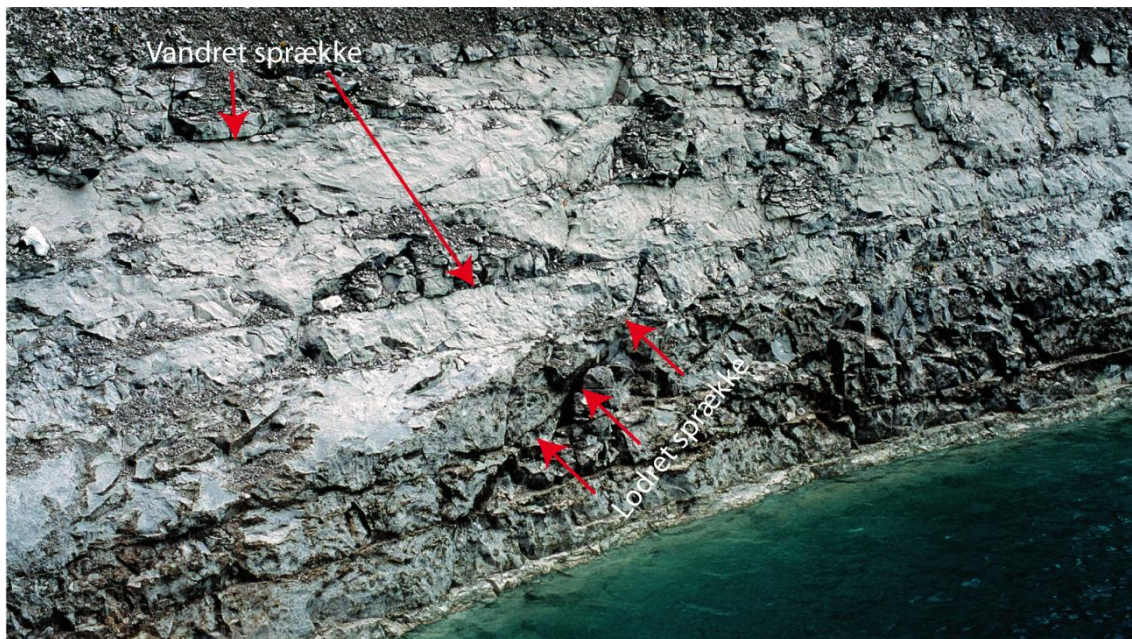
I de fleste kalkbjergarter optræder horisontale og sub-horisontale sprækker (Figur 4.18). I skrivekridt kan man se at de horisontale sprækker skærer flade bankestrukturer der markeres ved flintlag, hvilket viser at de ikke følger nogen lagdeling i kridtet. I København Kalk Formationen er lagdeling og bænknings næsten horisontal, og her følger de store horisontale sprækker bænknings, og optræder mellem bænke med forskellig hårdhed eller mellem kalk og flint. I bryozokalk derimod er bænknings med skiftende hårde og mindre hårde lag styret af bankestrukturer, og sprækker der er dannet mellem bænke med forskellig hårdhed følger bankernes form (Figur 4.19). Det har vist sig, at bankernes struktur har stor indflydelse på vandbevægelsen i bryozokalk (Jakobsen, 1991).

Der er foretaget opmålinger af sprækker og sprækkesæt i forbindelse med flere undersøgelser af stoftransport (salt og nikkel) i bryozokalk (Roskilde Amt, 2005; Larsen et al., 2006; Milter, 2007). Opmålingerne er foretaget på intakte prøver og i udgravninger. Sprækkeaperturer og sprækkeafstand er vist i Tabel 4.1, hvor det også er angivet om værdien er målt direkte eller er fremkommet på baggrund af hydrauliske modelberegninger eller forsøg.

Undersøgelse	Målt sprækkeapertur	Målt sprækkeafstand	Hydraulisk apertur	Afstand ml. hydraulisk aktive sprækker
Roskilde Amt, 2005	-	-	0,15 mm - 0,87 mm	0,1 m - 3 m
Larsen et al., 2006, horisontale sprækker	ca. 5 mm	1,4 m -1,7 m	0,1 mm (bund) - 0,6 mm (top)	5 m - 7 m
Larsen et al., 2006, vertikale sprækker	"få millimeter"	3 m - 4 m	-	-
Milter, 2007	0,5 mm -5 mm	-	0,01 mm - 0,2 mm	-

Tabel 4.1. Sprækkeaperturer og sprækkeafstande målt ved tre undersøgelser i bryozokalk.

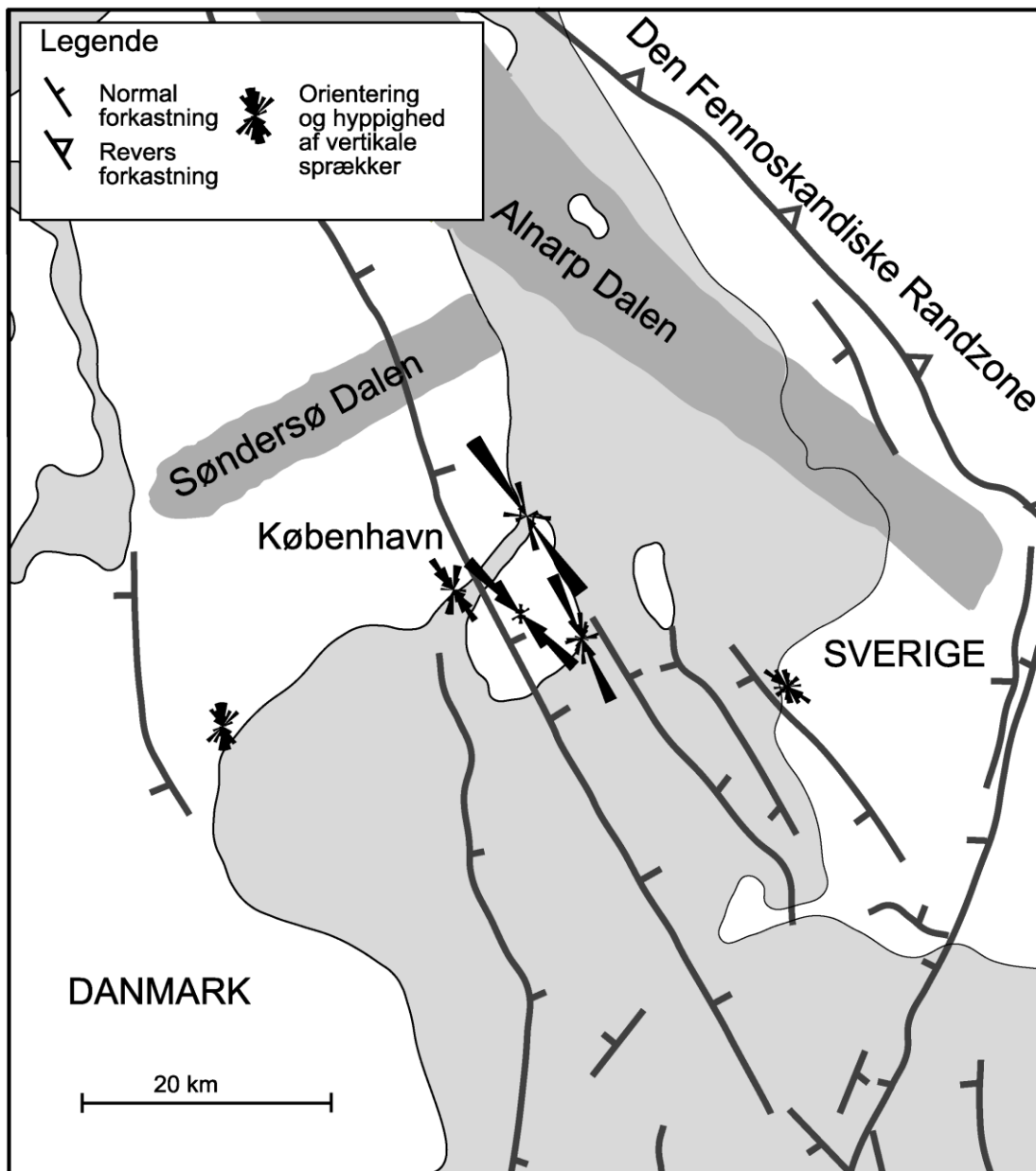




Figur 4.18. Sub-horisontale og sub-vertikale sprækker i skrivekridt (foto: Peter Roll Jakobsen).



Figur 4.19. 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).



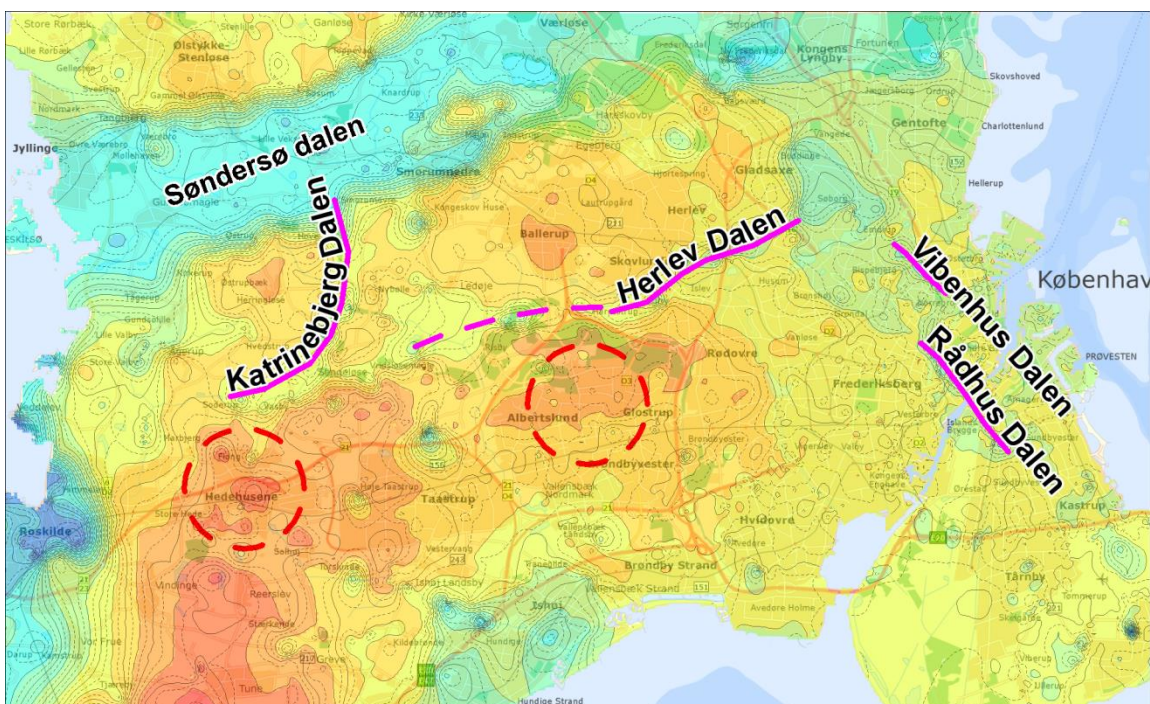
Figur 4.20. Orienteringen af de vertikale sprækker følger i store træk orienteringen af de forkastninger man finder i et område. Hvis man ikke har konkrete sprækkeopmålinger fra profiler, vil tommelfingerreglen være at de vil være orienteret mere eller mindre parallelt med de forkastninger der måtte være i området.



## 4.6 Kalkoverfladen

I Københavnsområdet er der udført mange borer, og det er derfor muligt at fastlægge kalkoverfladens højdeforhold udelukkende ud fra boreringsoplysninger. I området vest for København er der udarbejdet et kort der viser kalkoverfladens højdeforhold (bilag 4.1). Kortet er lavet på baggrund af geologiske modeller fra GEO og NST (Naturstyrelsen, 2013) samt et automatiseret udtræk fra GEUS's Jupiterdatabase. Kilden til de enkelte datapunkter, kan ses på bilag 4.1. Højdekurverne er beregnet på baggrund af en interpolation foretaget med en kriging rutine.

Nordligst på kortet kan man ses Søndersø Dalen (Figur 4.21), der løber i en vestsydvestlig - østnordøstlig retning, hvor kalkoverfladen ligger i kote -30 m til -40 m. Syd for Søndersø dalen findes en mindre dal der løber parallelt med denne, ved Herlev. Denne mindre dals (Herlev Dalen, Figur 4.21) fortsættelse kan følges som en række fordybninger i kalkoverfladen mod vestsydvest, stadig parallelt med Søndersø Dalen. Nord for Sengeløse mødes den med en afstikker-dal fra Søndersø Dalen, der løber under Katrinebjerg Kildeplads. Hele forløbet af mindre dale og fordybninger løber parallelt med Søndersø Dalen, og ca. 5 km syd for denne. Syd for Herlev Dalen – Katrinebjerg Dalen ligger kalkoverfladen ca. 10 m til 15 m højere end nord for.



Figur 4.21. Dalstrukturer i kalkoverfladen, beskrevet i teksten. Kortet er ca. 40 km bredt. Udsnit af bilag 4.1.

De højest liggende områder af kalkoverfladen ligger syd for Tune, hvor kalkoverfladen ligger over kote +30 m. Ved Hedehusene kan kalkoverfladen træffes over kote +20 m og i et større område ved Hedehusene – Høje-Taastrup og ved Albertslund – Rødovre findes kalkoverfladen over kote +10 m. De laveste områder af kalkoverfladen ligger mellem

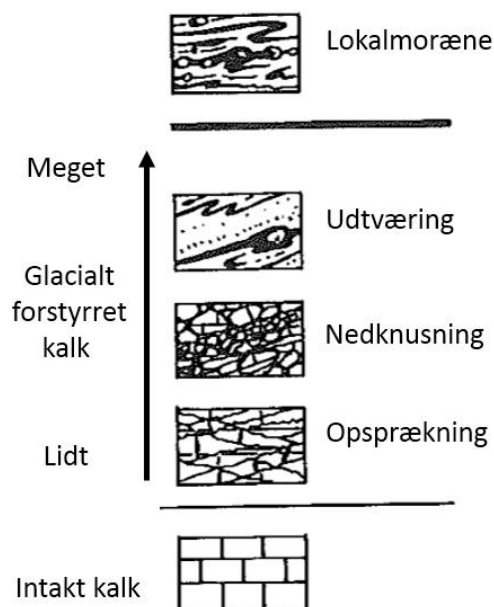
Greve strand og Ishøj. Kalkoverfladen består her af skrivekridt og det lave område er mod øst afgrænset af en forkastningszone.

Samlet kan kalkoverfladen anses for at være formet af to overordnede processer, tektoniske (forkastninger) og glaciale. De store strukturer som Sønderø dalen, niveauforskellen nord og syd for Herlev Dalen – Katrinebjerg Dalen og niveauforskellen øst og vest for Roskilde synes at være kontrolleret af forkastninger. De mindre strukturer som Herlev Dalen, Katrinebjerg Dalen samt Rådhus Dalen og Vibehus Dalen (Figur 4.21) i indre København synes formet af glaciale processer, selvom placeringen af dalene kan være kontrolleret af tektonik. De glacialt formede dales bredde er sammenlignelige med de mindre fordybninger der findes f.eks. nord for Taastrup og i Herlev Dalens fortsættelse. Boringstæthed er ikke stor i disse områder, og det er derfor muligt at disse fordybninger er dele af begravede dale i samme størrelsesorden som f.eks. Rådhus Dalen eller Herlev Dalen, der pga. mangelfulde boringsdata ikke kan erkendes som en dalstruktur.

## 4.7 Grænsen mellem kvartærslag og kalk: kalkpræget moræne og glacialt forstyrret kalk

Mange af gletsjerfremstødene i forbindelse med Kvartærtidens nedisninger i Danmark har på Østsjælland eroderet sig gennem de overliggende lag og ned i kalklagene, hvis øvre del herved dels er blevet forstyrret, nedknust og opsprækket, se Figur 4.22, og dels er blevet dækket med moræner og smeltevandsaflejringer.

Grænsen mellem de kvartære moræner og smeltevandsaflejringer og den underliggende kalk udgør et svagt punkt i forståelsen af de geologiske forhold, såvel inden for vestegnens værkstedsområder som generelt, hvor prækvartæroverfladen udgøres af kalk. Især fordi det boreteknisk er meget vanskeligt at optage prøver af almindelig god kvalitet i dette grænselag. Hvilket igen skyldes, at jordmaterialerne her oftest er sammensat på en måde, som hverken passer godt til de sædvanlige boremetoder i kvartærslag, nemlig kop- eller snegleboring, eller til den sædvanlige boremetode i kalk, kerneboring. Bortset fra kystkliner er egentlige blotninger af grænselagene både sjældne og kortvarige, se fx Figur 4.24 og Figur 4.27.



Figur 4.22. Principskitser af grænselaget mellem kalk og moræne, hvor den glacielle påvirkning af den intakte kalk gradvist medfører flere og flere forstyrrelser, indtil kalken i lokalmorænen øverst blot ses som et forhøjet kalkindhold og/eller udtværede slirer og flager af kalk (modificeret efter Pedersen 1988).

I grænselaget mellem kalk og moræner/smeltevandsaflejringer er jordmaterialet oftest stærkt præget af begge dele, dvs man har at gøre med 1) en moræne (eller en smeltevandsaflejrings) med et vist indhold af kalk-materiale, eller med 2) en kalk med et vist indhold af moræne- eller smeltevandsmateriale. I første tilfælde forekommer kalken dels i form af findelt kalkslam eller -sand, som gør materialet mindre kohæsivt, og dermed sværere at tage gode prøver i, og dels som sten eller blokke af hærnet kalk, eller parti-

er af uhærdnet kalk, som gør materialet heterogent at bore i, og dermed også sværere at tage gode prøver i. I andet tilfælde forekommer de kvartære jordarter indlejret i kalken, som følge af den glaciære påvirknings kraftige forskydningspændinger, som har svækket, opsprækket og/eller opæltet og blødgjort den oprindelige forholdsvis kompetente bjergart, så den i geoteknisk forstand ikke længere opfører sig som fjeld, men nærmere som jord. Figur 4.23 viser et eksempel på et sådant grænselag, som består af nogenlunde lige dele kalk og moræne.



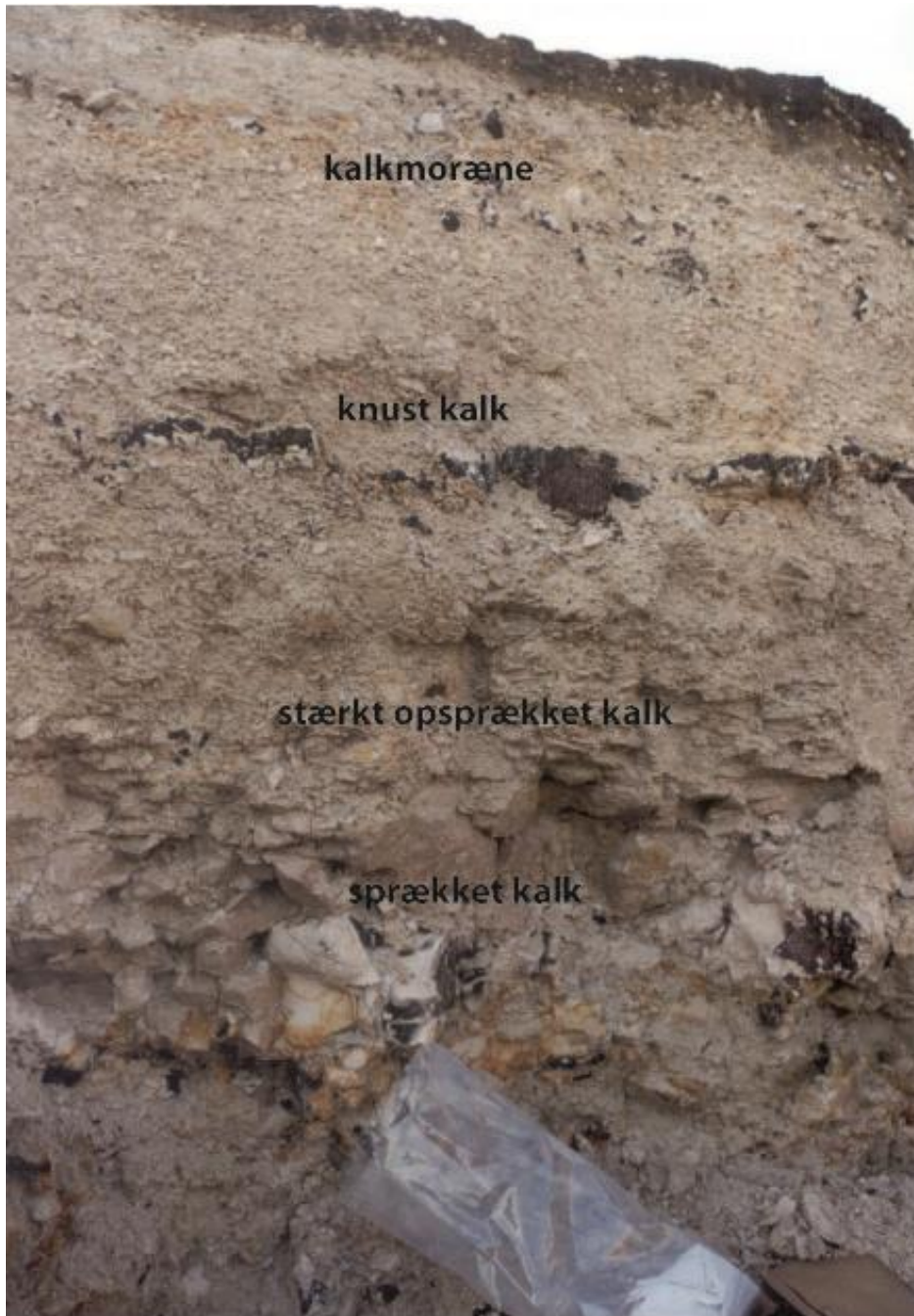
*Figur 4.23. Grænsen mellem moræneler og København Kalk i Cityring-skakten for Frederiksberg station. De stiplede linjer afgrænser et stærkt deformeret grænselag mellem moræne foroven og kalk forneden, hvor partier af moræne og kalk er blandet og æltet ind i hinanden. Rødt dolkskaft er 11 cm. Foto Joakim Stiel Korshøj.*

I mange tilfælde vil grænsen mellem kvartære lag og kalk være ret så skarp (Figur 4.31), og de eneste tegn på, at moræne/smeltevandsaflejring hhv. kalk ligger tæt på grænsen, kan være et forhøjet indhold af store og små kalkkorn i den nederste del af de kvartære lag, hhv. en forøget opsprækning og dermed hydraulisk ledningsevne (permeabilitet) i den øverste del af kalken, som derfor også betegnes som "glacialt forstyrret" (på engelsk "glacially weathered") eller som "glaciotectonit" (Pedersen 1988).

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, hvor de enkelte kalk-klaster kan være ned til ca. 1 cm i størrelse. Sprækkerne i den knu-



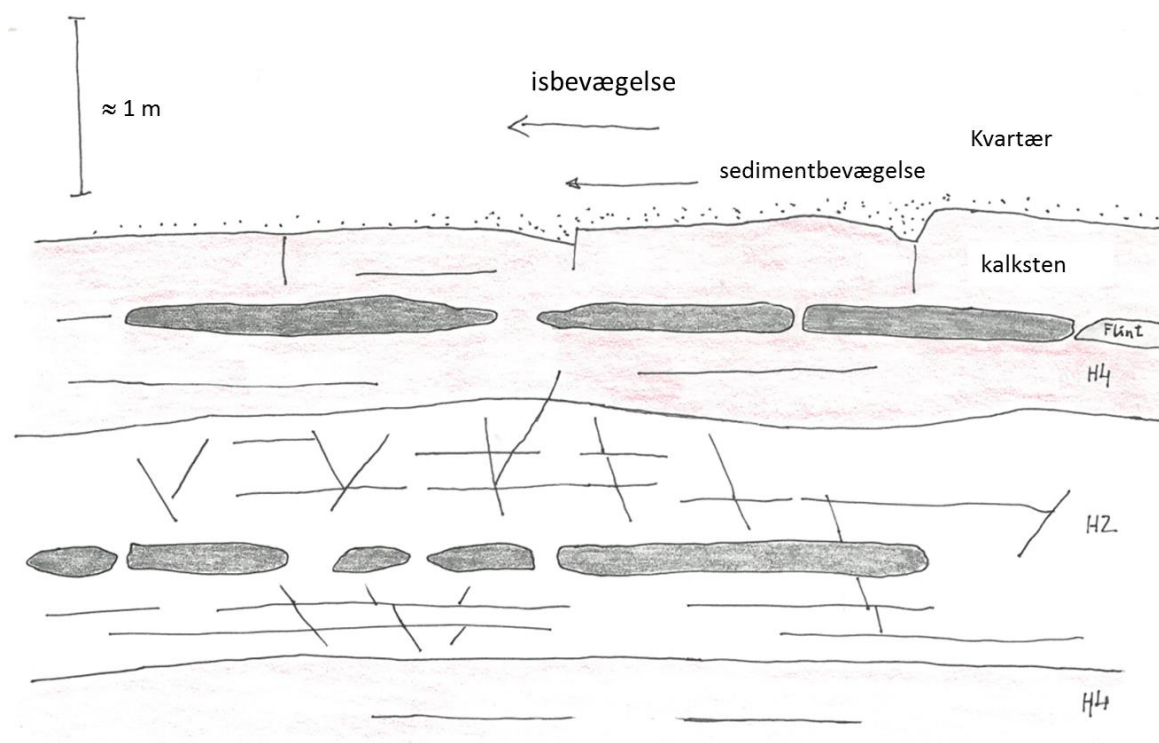
ste kalk kan være fyldt med siltet materiale. Hvor det øverste lag i kalken er et meget hårdt lag, er kalken normalt ikke knust, men blot stærkt opsprækket.



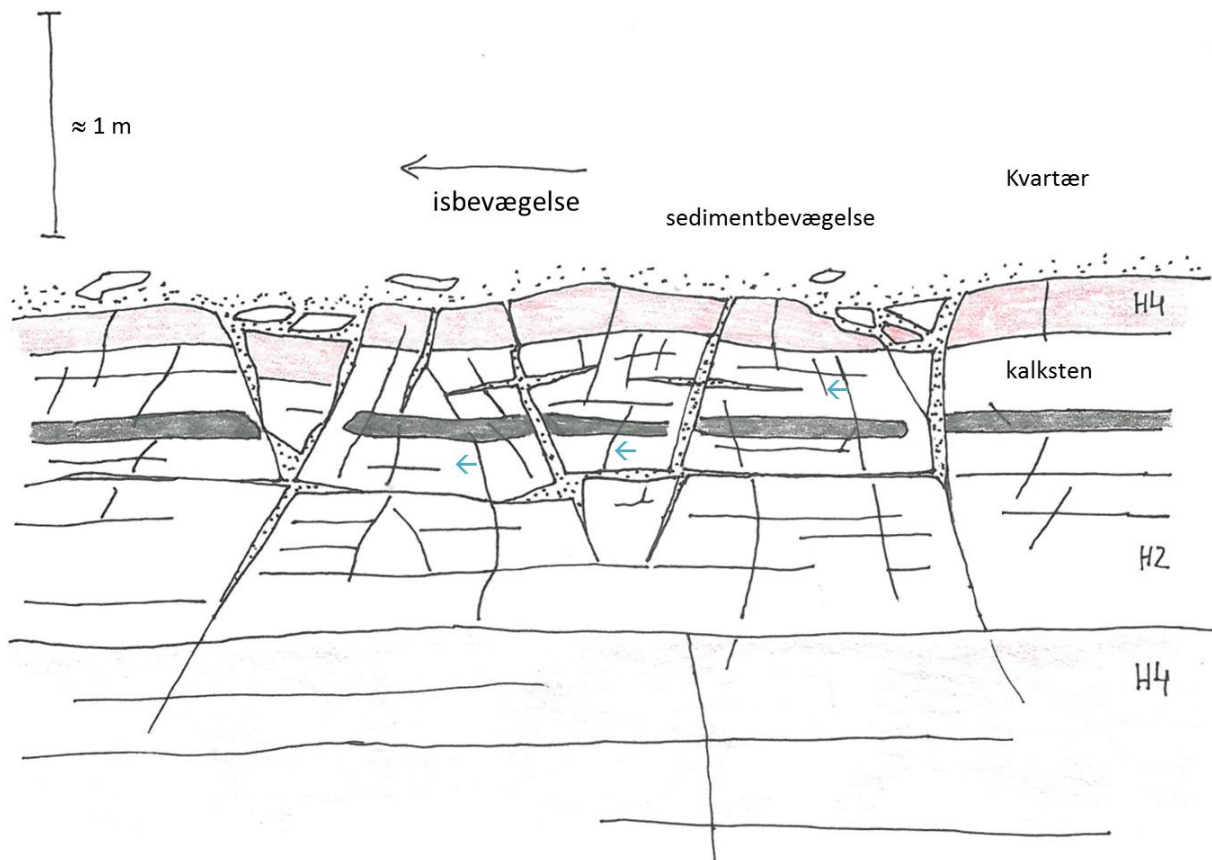
*Figur 4.24. Glacialt knust kalk ved Lernacken, syd for Malmø. Øverst ses en stenet moræne, der gradvist går over i en kalkmoræne, der igen gradvist går over i knust kalk. Det øverste sammenhængende flintlag (lige under "knust kalk") viser at i denne dybde er kalken in situ, men stærkt opsprækket. Nedefter går den knuste kalk over i stærkt opsprækket kalk. Sammenlign med Figur 4.23*

En gletsjers evne til at frembringe glaciale forstyrrelser i kalkens øverste del vil afhænge af, hvor modstandsdygtig denne del af kalken er. Figur 4.25 og Figur 4.26 er konceptuelle skitser af to forskellige scenarier, yderpunkter om man vil, for omfanget af glaciale

forstyrrelser og deraf følgende karakteristika for den forstyrrede bjergart. Udgangsbjergarten er i begge tilfælde en (vilkårlig) bænket kalksten, hvor lag med forskellig hårdhed, herunder flintlag, veksler med hinanden. I Scenarie A er kalken øverst så kompetent, at gletsjeren kun i ringe grad vil kunne påvirke den, mens gletsjeren i Scenarie B derimod i langt højere grad vil kunne påvirke ("forstyrre", "forvitre") kalken. Som eksempler på de to scenarier ses i Figur 4.27 og Figur 4.28 kompetent kalk (Scenarie A), mens Figur 4.29, Figur 4.30, Figur 4.31 og Figur 4.32 viser langt mindre kompetent kalk (Scenarie B).



Figur 4.25. Scenarie A kalkoverside, hvor kalken øverst afsluttes med en tyk stærkt hærtnet bænke (rødt H4-lag). Isbevægelsens træk i kalkoversiden påvirker næsten ikke H4-laget, men i højere grad det underliggende H2-lag, med opsprækning og små deformationer til følge. Hvis det dækkende H4-lag ikke herved gennemses af sprækker, sker der ikke yderligere. Ikke før isen med sine fastfrosne sedimentpartikler har slebet den stærkt hærtnede bænke ned til en tykkelse som i Scenarie B, hvilket, specielt ved flintlag, tager meget lang tid.



Figur 4.26. Scenarie B kalkoverside, hvor kalken øverst afsluttes med en tynd stærkt hærnet bæk (rødt H4-lag). Isbevægelsens træk har frembragt opsprækning og deformationer i det blødere H2-lag, hvorved det tynde H4-lag har givet efter og er blevet gennemsat af sprækker, så det efterhånden er brudt op i ikke-forbundne blokke. Herefter vil isens træk kunne deformere de øverste lag yderligere (vist med små blå pile), og derved dannede åbne sprækker ned i kalken kan fyldes med nedpresset eller nedskyldt materiale (vist med prikker) fra de kvartære lag. Herved er dannet et grænselag øverst i kalken af ca. 1 m tykkelse.



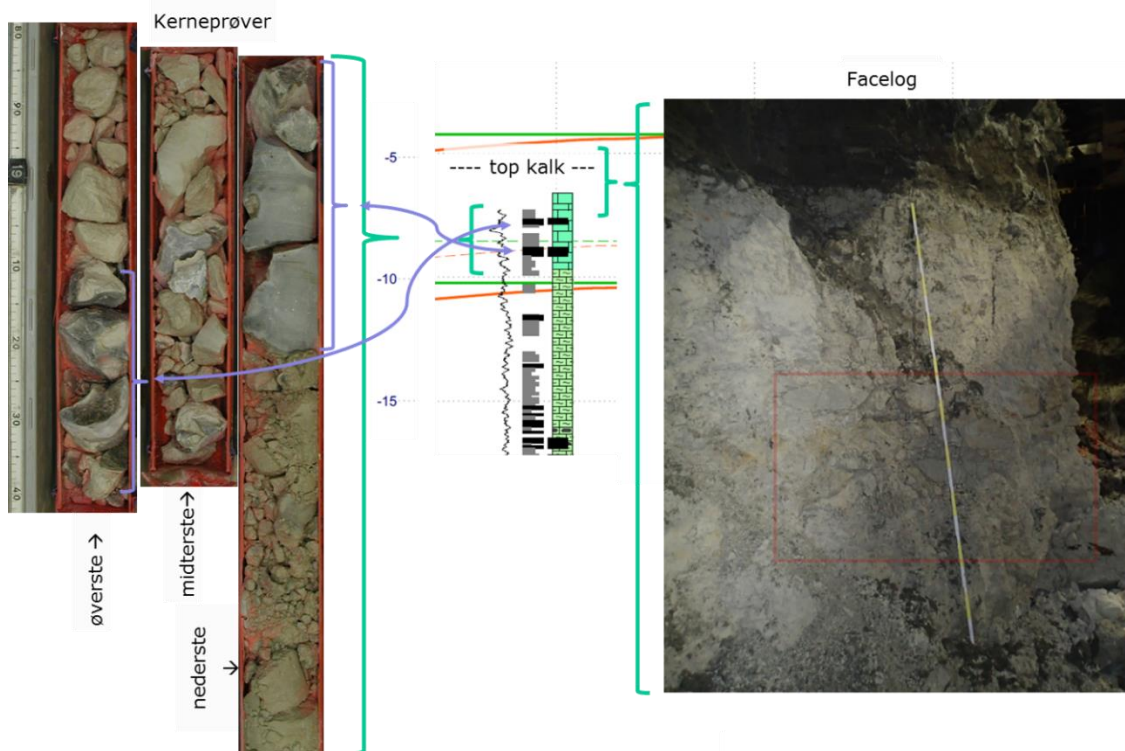


Figur 4.27. Profil i skakt ved Amagerværket, gravet for anlægget af Københavns Fjernvarmetunnel. Ca. 1 m tyk stærkt hærdnet lysgrå kalkbænk med store, uregelmæssige grå og mørkgrå flintlegemer grænser her skarpt op mod det overliggende mørke stærkt stenede morænesand. Kalklagene er ganske upåvirkede af gletscherens træk i sit underlag. (Landmålerstok har 20 cm markeringer. Foto: Kristian Andersen)

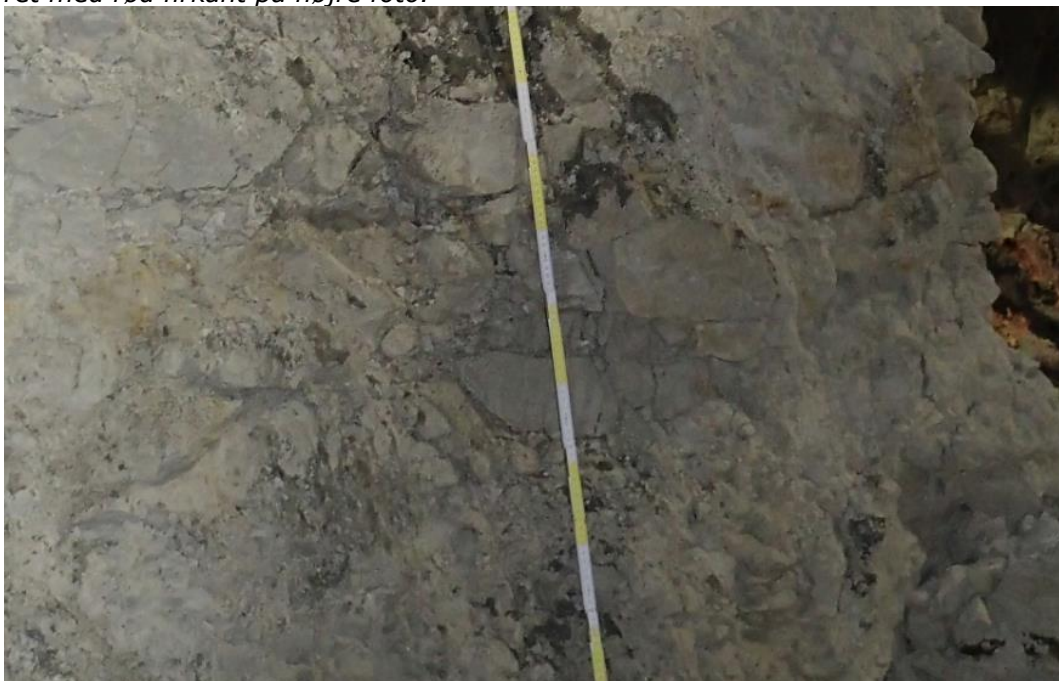


Figur 4.28. Kerneprøve fra Cityringsboring på Edisonsvej på Frederiksberg (nedad er mod højre). Ved 13.22 m overlejres hærdnede kalklag af uhærdnet men fast moræneler. I intervallet 13.16-13.22 m er morænenens finkornede dele skyllet bort under borearbejdet, så kun grus og sten ligger tilbage.





Figur 4.29. Sammenligning af kerneprøver og udgravet kalkvæg tæt ved kerneboringen. I midten ses et udsnit af et boreprofil: højre søjle viser med grønne nuancer øvre og mellem enhed af København Kalk, samt med sort flintlag; søjlen i midten viser hærdningsgrad (H1-H4-lag er grå, H5-lag er sorte, mens kernetab er hvidt); kurve t.v. er gammalog. Omkring boringen viser grønne tuborg-klammer placeringen af hhv. kerneprøver (t.v.) og facelagget væg i udgravning (t.h.) Blå pile og tuborg-klammer forbinder flintlag i kernefotos med de samme flintlag på boreprofilet. Udsnittet nedenfor er markeret med rød firkant på højre foto.



Figur 4.30. Udsnit svarende til rød firkant på højre foto, Figur 4.29. Gule bånd på tomme stok er 10 cm. Kalken er stærkt opsprækket, men ikke iblandet materiale fra de overliggende kvartære lag. Foto: Joakim Stiel Korshøj.

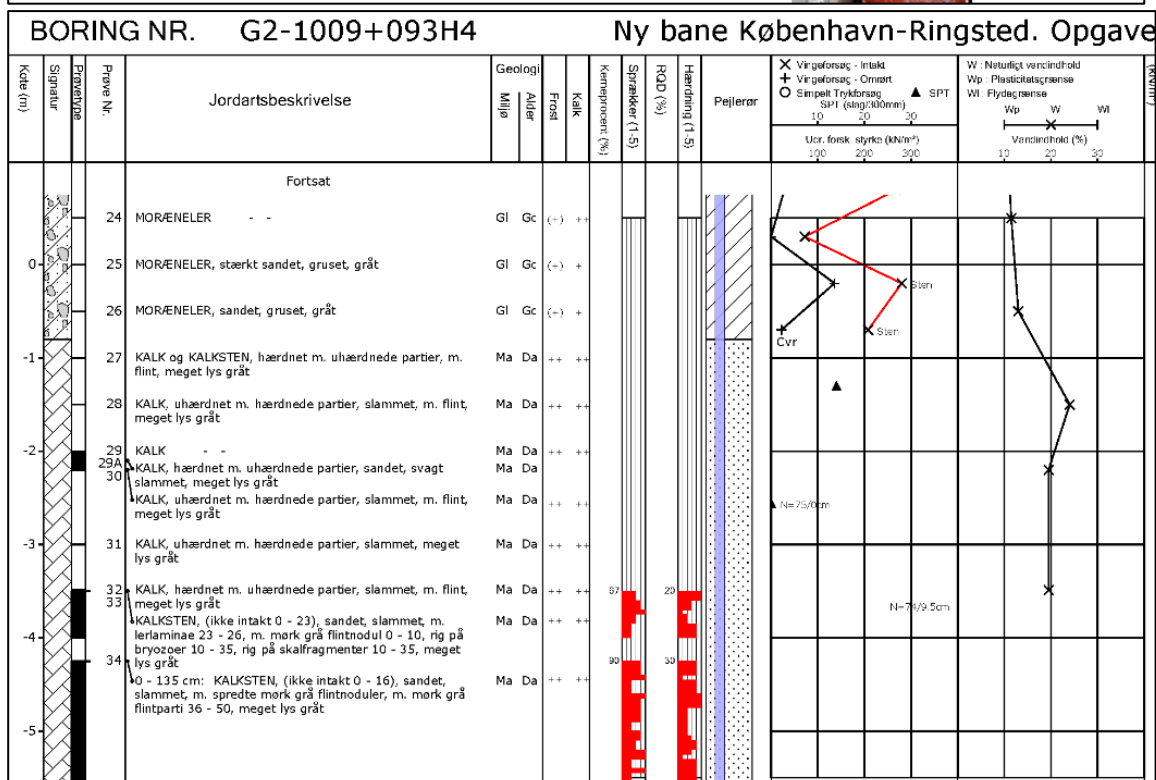
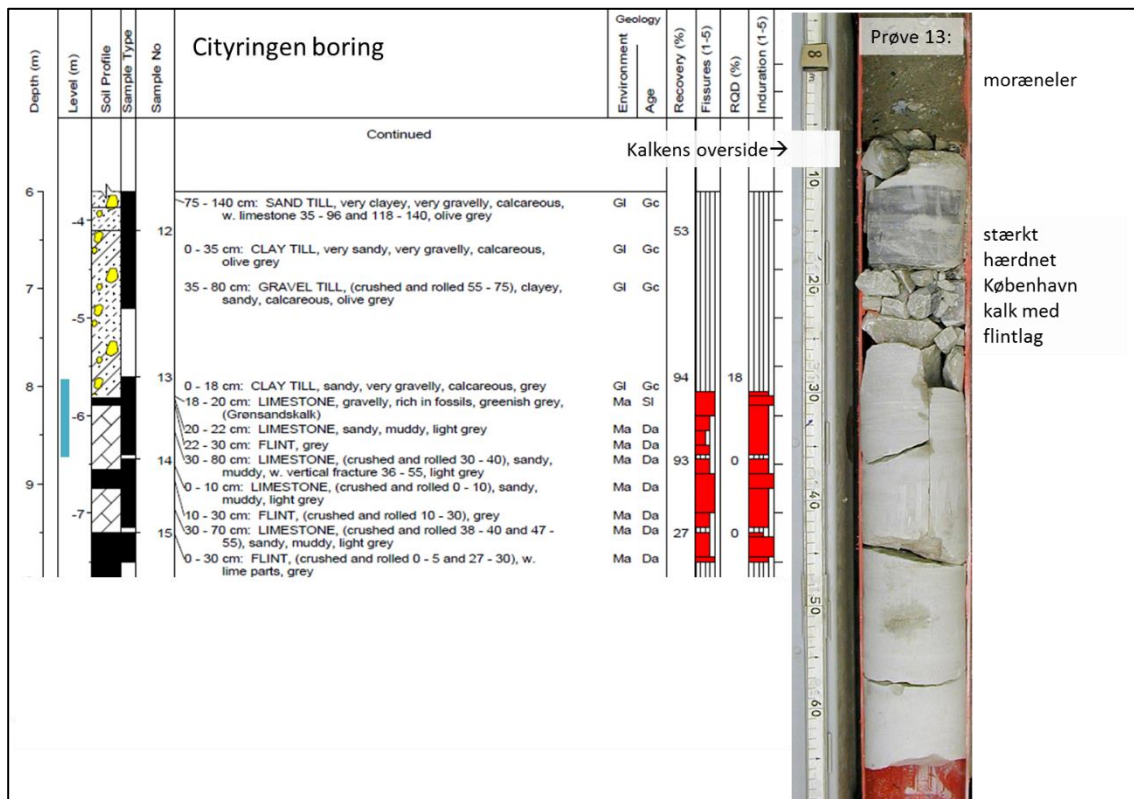


Figur 4.31. Grænsen mellem moræneler og kalk i Cityring-skakten for Frederiksberg station. Bemærk den skarpe grænse mellem kalk og moræne, og graveskovlens tandmærker i både moræne og kalk. Foto: Jens Galsgaard.



Figur 4.32. Flager af skrivekridt indlejret i stenet ler, Hvideklint på Møn (fra Larsen 2006, foto: Michael Houmark-Nielsen).





Figur 4.33. Eksempler på boreprofiler fra moræneler og ned i kalk, i Scenarie A kalk foroven og Scenarie B kalk forneden.

På boreprofiler af tørboringer vil grænselaget mellem kalk og moræne ofte blot vise sig som prøver beskrevet som en blanding af kalk- og morænemateriale, uden at man med sikkerhed kan afgøre, om de tilhører en kalkpræget moræne lige over kalken eller en morænepræget, opsprækket kalk. I værste fald er boringen stoppet på en kalkblok oppe i morænen, så at grænselaget slet ikke er nået. I andre tilfælde, som på Figur 4.33 foroven, er der tilsyneladende en skarp grænse mellem 'ren' moræne og 'ren' kalk, men beskrivelsen af kalkmaterialet er, som næsten altid ved tørboring, ikke tilstrækkelig detaljeret til at afgøre, hvor prøverne ligger i forhold fx til inddelingen i Figur 4.22.

Den optimale prøve kvalitet fra grænselaget fås, når der kernebores hele vejen fra den rene moræne og ned i den rene kalk. Her er situationen dog paradoksalt nok, at det boreteknisk er problematisk at kernebores gennem opsprækkede, glacialt forstyrrede grænselag, fordi boreholsvæggen her ofte er så ustabil, at der er risiko for, at materiale fra væggen kan falde ind og blokere det åbne borehul. Sådanne indfald ønsker man for enhver pris at undgå, bla. af hensyn til evt. efterfølgende udførelse af geofysiske logs eller pumpeforsøg, og derfor føres foringsrøret fra tørboringen normalt så langt ned i kalklagene som overhovedet muligt. Herved sikres boringen altså mod indfald, men på bekostning af kvaliteten af de optagne prøver.

## 4.8 Hydrauliske forhold

### 4.8.1 Porøsitet

I kalkbjergarter findes der forskellige typer porøsitet. Der er den totale porøsitet, dvs. den del af volumen som ikke er mineraler. Sprækkeporøsiteten er den del af det totale volumen, der udgøres af sprækkehulrum. Matrixporøsiteten er den porøsitet der findes i de ikke-opsprækkede dele af kalkbjergarten. Den totale porøsitet domineres i danske kalkbjergarter af matrixporøsiteten, mens sprækkeporøsiteten er langt mindre. Desuden kan karstporøsitet (opløsningsbestemte større kanaler og huler) være betydende i kalkbjergarter andre steder i verden. Direkte bestemmelser af matrixporøsiteten kan foretages på plugs ("propper" af kalk), og data indsamlet fra Albertslund (Naverland 26), Brøndby, Lyksager, Karlstrup, København, Øresund, Limhamn, Stevns og Faxe er plottet mod den hydrauliske ledningsevne i Figur 4.34.



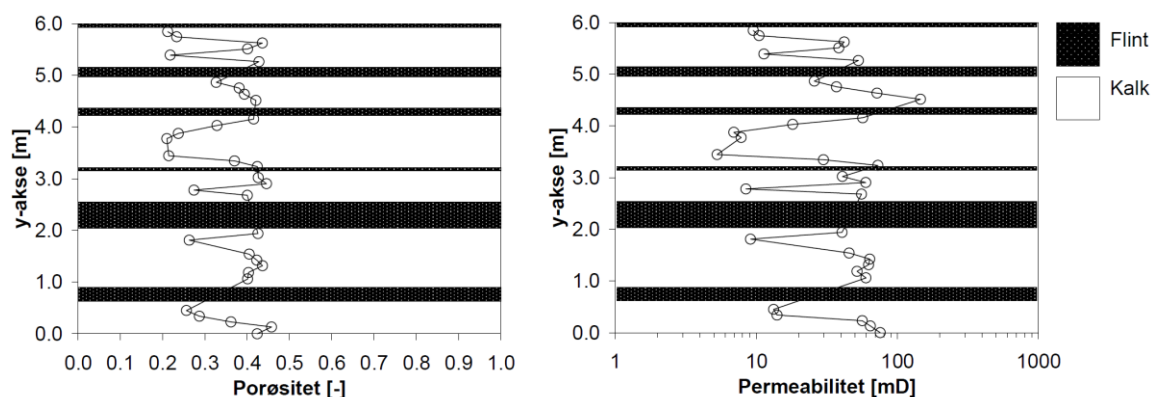


Figur 4.34: Porøsitet og permeabilitet målt på plugs fra matrix i kalksandkalken i værkstedområdet sammenholdt med andre data fra nærområdet og Stevnsområdet. Nogle af datasættene indeholder målinger af plugs taget parallelt med lagdelingen (Horiz) og vinkelret på lagdelingen (Verti.), for datasæt uden angivelse kendes orienteringen ikke, men den er sandsynligvis parallel med lagdelingen. Data forbundet med punkter er fra profiler endepunkterne dækker dataintervallet, det midterste punkt middelværdierne. Den hydrauliske ledningsevne er beregnet ud fra den målte permeabiliteten i mDarcy som er divideret med  $9.1 \times 10^7$ . Det vertikale profil fra Karlstrup Kalkgrav er gengivet i figur 4.21B

Sprækkeporøsiteten er ikke bestemt direkte nogen steder men er skønnet ud fra modellering af sporstofforsøg og prøvepumpninger (Jakobsen, 1991; Mejlby, 2005) til at ligge omkring 1 - 1.5 % i den del hvor den største del af strømmingen foregår, dvs. de øverste 5-10 meter.

#### 4.8.2 Hydraulisk ledningsevne

Den hydrauliske ledningsevne kan ligesom porøsiteten måles for bjergarten som sådan, en bulkværdi, der inkluderer både sprækker og matrix og her vil det typisk være den hydrauliske ledningsevne for sprækkerne der er altdominerende, eller den kan måles for plugs taget af matrix. Værdier målt i matrix på plugs er plottet i Figur 4.34 hvor de er sammenholdt med porøsiteterne. Der er en positiv sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet og permeabilitetsværdierne er spredt over et interval på ca. 5 størrelsesordner (en faktor 100000). Indenfor den samme lokalitet kan den hydrauliske ledningsevne variere op til 2 størrelsesordner (en faktor 100). Dette fremgår også af Figur 4.35 hvor porøsitet og permeabilitet fra et vertikalt profil i en banke i Karlstrup Kalkgrav er vist. På den baggrund ser det ikke ud til at det er muligt at bruge målte porøsitets og permeabilitetsværdier til at sige noget om det stratigrafiske niveau eller omvendt. Det fremgår dog af Figur 4.35 at bryozokalken på Stevns og i Faxe generelt har en højere hydraulisk ledningsevne og permeabilitet end prøver fra Karlstrup. Alle tre steder er bryozokalken fra den nedre del af formationen.



Figur 4.35: Fordeling af porøsitet og permeabilitet bestemt på plugs over et 6 m højt interval indenfor den samme bankestruktur i bryozokalken i Karlstrup Kalkgrav. Især omkring det tykke flintlag ser det ud til at der er både højere porøsitet og permeabilitet som indikerer at der under væksten af flintlaget opløses  $\text{SiO}_2$  (fra skaller) fra den tilstødende kalk. (Madsen, 2003)

Hydrauliske ledningsevner for bulkbjergarten kan bestemmes ved en modellering af en påvirkning af magasinet, det typiske er en prøvepumpning der tilpasses til en teoretisk modelkurve, men det er også muligt at tilpasse en numerisk model til observationer fra f.eks. prøvepumpninger eller forsøg på store blokke (Milter 2007, Pedersen og Hørlück 2012). Ved en prøvepumpning bestemmes transmissiviteten, der er den hydrauliske ledningsevne integreret over hele grundvandsmagasinet tykkelse, og transmissiviteten vil typisk være domineret af sprække-transmissiviteten. Forholdet mellem sprække- og ma-

trixtransmissivitet kan bestemmes vha. længerevarende prøvepumpninger med observationsboringer og mere avancerede tolkningsmetoder (se f.eks. Nielsen, 2007).

Når der er tale om kalk med en markant højere opsprækning i de øverste dele, så vil det være den øverste del, der dominerer transmissiviteten. Det betyder at den gennemsnitsværdi for den hydrauliske ledningsevne som man kan beregne ved hjælp af transmissiviteten, bestemt ud fra en påvirkning af hele magasinet bliver meget afhængig af hvilken højde/tykkelse af formationen man dividerer med. Man kan derfor finde mere retvisende bulkværdier af den hydrauliske ledningsevne ved at teste et interval af bjergarten af gangen. Dette er gjort enkelte steder i bryozokalken. I Karlstrup Mose Kalkgrav (Jakobsen, 1991) er det gjort ved separationsinjektion hvor udstrømningen fra boringen er delt op i 10% udstrømningsintervaller og K-værdien for intervallerne er fundet ved at fordele den samlede transmissivitet efter de enkelte intervaller højde. I Grosen et al. (2002) er der værdier fra slugtest udført mellem pakkere på 1 meters intervaller fra to boringer (Naverland 26AB). Resultaterne fra de to undersøgelser er opsummeret i Tabel 4.2 og Tabel 4.3. Til sammenligning har Milter (2007) målt den hydrauliske ledningsevne i en storformat kerne fra Lille Skensved til  $1,93 \times 10^{-5}$  m/s.

*Tabel 4.2: Min., maks og gennemsnitlig hydrauliske ledningsevne fra den hydraulisk mest aktive zone, defineret som de 9 øverste af 10 10% udstrømningsintervaller i 9 boringer ved Karlstrup Mose Kalkgrav, bestemt ved separationsinjektion.*

Boring	K m/s			Samlet interval for 90% udstrømningen (m)
	Min	max	skønnet gens. for øverste 90%	
207. 2801	$4 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$	8,2
207. 2802	$6 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	5,5
207. 2803	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$	8,5
207. 2804	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	9,6
207. 2805	$7 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	7,3
207. 2806	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-4}$	9,9
207. 2807	$4 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	12,2
207. 2808	$12 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-2}$	8,7
207. 2809	$4 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$	7,3
Gens.	$4 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$	8,2

Tabel 4.3: Intervalspecifikke hydrauliske ledningsevner fra Naverland.

Boring	Dybde interval (m u.t.)	K (m/s) gns. af 2 målinger
K12N (200.5096)	18,8 - 19,9	$3,45 \times 10^{-4}$
	26,4 - 27,5	$0,98 \times 10^{-4}$
	31,9 - 33,0	$0,64 \times 10^{-4}$
	36,4 - 37,7	$0,39 \times 10^{-4}$
K11N (200.5097)	9,2 - 10,3	$4,80 \times 10^{-4}$
	13,9 - 15,0	$1,23 \times 10^{-4}$
	16,0 - 17,1	$0,56 \times 10^{-4}$

Sporstofforsøgene fra Karlstrup Mose (afsn. 6.6.4) har kunnet modelleres med en hydraulisk ledningsevne på såvel  $4 \times 10^{-4}$  m/s som  $8 \times 10^{-4}$  m/s (Brettmann et al., 1992; Mejlby, 2005). Det sidste tal svarer til gennemsnittet for de intervalbestemte transmissiviteter fra Karlstrup Mose. Værdierne fra Naverland, boring K11N og K12N (Tabel 4.3) ligger omkring minimumsværdierne målt i Karlstrup Mose Kalkgrav (Tabel 4.2). I modeller for området er der brugt værdier på  $3 \times 10^{-4}$  for den øvre del og  $0.7 \times 10^{-4}$  for den nedre del (Københavns Amt, 2002).

#### 4.8.3 Transmissivitet ud fra boringsdata

Fordelen ved at bestemme transmissiviteten for kalkmagasinet ud fra boringsdata er at der er mange tilgængelige data og regional og lokale variationer kan bestemmes. I en ideel situation med høj datatæthed kan f.eks. knusningszoner og stærkt opsprækkede zoner ved forkastninger identificeres og deres sammenhæng med andre strukturer vises.

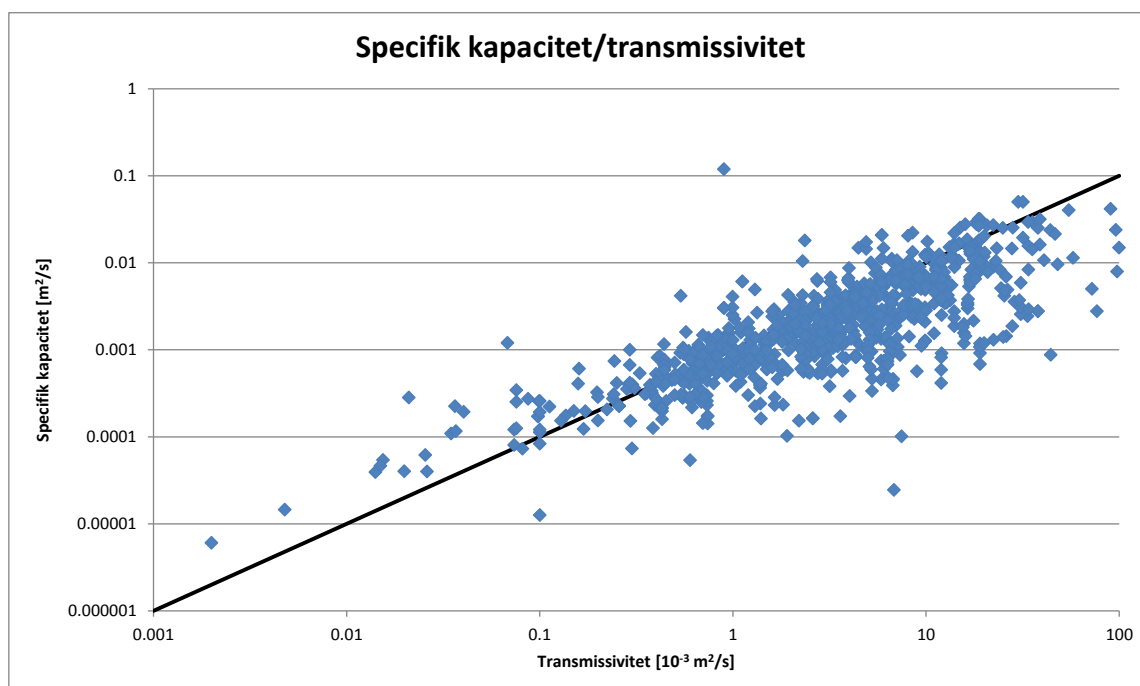
Transmissiviteten bliver typisk bestemt ved hjælp af et pumpeforsøg som beskrevet ovenfor. Transmissiviteten tolkes ved hjælp af forløbet af sænkningen i pumpeboringen og evt. observationsboringer. Øvrige magasinforhold og -parametre kan også bestemmes ud fra sænkingsforløbet, oftest bestemmes magasintallet. Frie magasiner udviser andre sænkingsforløb end spændte magasiner ligesom dobbeltporøse (opsprækkede) magasiner udviser et anderledes sænkingsforløb end almindelige enkeltporøse magasiner (f.eks. sandmagasiner).

Transmissivitetsdata fra pumpeforsøg findes f.eks. indberettet i GEUS's Jupiterdatabase, og dér findes også indberettede stigningsdata, der kan bruges til at tolke transmissiviteter. For at beskrive transmissiviteten af kalken vest for København, er der samlet data fra de tilgængelige kilder. Indberettede transmissiviteter i Jupiterdatabase er brugt direkte, dog er et mindretal af værdierne justeret på baggrund af en sandsynlig indtastningsfejl. For et mindre antal boringer fra Københavns vestegn findes der data indberettet, men i ikke digital form. Disse data er indtastet i en lokal database og benyttet på lige fod med de allerede digitaliserede data. Det samme gælder tolkede transmissiviteter i GEO's projektdatabase.



Ud fra de indberettede stigningsdata i Jupiter er der beregnet en transmissivitet ved hjælp af retlinje-metoden også kendt som dekade-hældnings eller Cooper-Jacob metoden. Der er foretaget en automatisk tilpasning af data til en ret linje i et semilogaritmisk koordinatsystem, og hældningen er benyttet til at beregne en transmissivitet i den pågældende boring. Hvis  $R^2$  for den lineære regression er under 0.85 er den fravalgt. Der er ikke foretaget en egentlig tolkning og manuel kontrol af de enkelte resultater. I alt er der fundet en transmissivitet for 763 pumpeforsøg inden for projektområdet

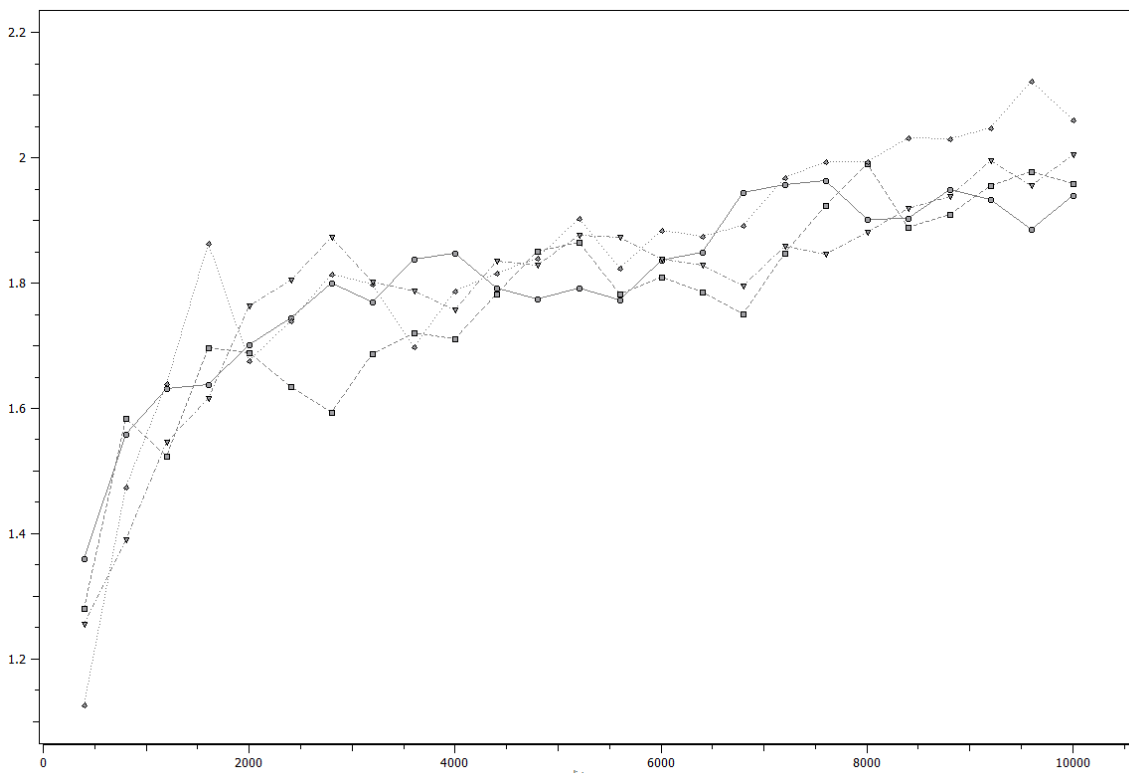
Hvis der ikke er udført et egentligt pumpeforsøg i en boring er den specifikke kapacitet ofte målt. Den specifikke kapacitet er den oppumpede vandmængde pr m. sænkning af vandspejlet i boringen, og kan ses som en prøvepumpning med et observationspunkt. Den giver en indikation af grundvandsmagasinet's transmissivitet, men da der ikke tages højde for sænkingsforløbet over tid kan den specifikke kapacitet ikke direkte omregnes til en transmissivitet uden simplificerende antagelser (se f.eks. Miljøstyrelsen, 2007, appendix 2).



Figur 4.36. Samhørende transmissiviteter og specifikke kapaciteter for 924 pumpeforsøg udført i kalk på Sjælland, indberettet til Jupiterdatabasen. Den sorte linje viser hvor den specifikke kapacitet er lig transmissiviteten.

For at illustrere sammenhængen mellem transmissiviteten, er de samhørende transmissiviteter og specifikke kapaciteter plottet i Figur 4.36, hvor alle data fra filtre i kalk på Sjælland er medtaget. I Figur 4.36 ses en lineær sammenhæng mellem transmissiviteten og den specifikke kapacitet i et dobbeltlogaritmisk koordinatsystem. Det vurderes derfor at variationer i den specifikke kapacitet kan give information om variationer i transmissivitet, også indenfor projektområdet. Inden for projektområdet er der oplysninger om specifik kapacitet i 3513 pumpeforsøg.

På baggrund af de tilgængelige data er der udarbejdet et kort der viser transmissiviteten i værkstedsområderne (bilag 4.2). De interpolerede værdier på kortet er beregnet ved co-kriging af de logtransformerede transmissivitetsdata med de logtransformerede specifikke kapaciteter som sekundære data. På bilag 4.2 er der desuden vist forcastninger og mulige forcastninger tolket ud fra seismik og kalkoverfladen. Der synes ikke at være et overordnet mønster i fordelingen af transmissiviteten ligesom der heller ikke er et sammenfald med forcastninger. Dette underbygges yderligere af den variogramanalyse af data der er foretaget inden co-krigingen. Retningsbestemte variogrammer for den logtransformerede specifikke kapacitet er vist i Figur 4.37. Variogrammet giver information om variationen i data med stigende afstand. Der er ikke markant forskel på variogrammerne i de 4 retninger, og det indikerer at fordelingen af den specifikke kapacitet er ensartet i alle retninger, og der er dermed ikke en tendens til at værdier der ligner hinanden danner bånd eller aflange former med en bestemt kompasretning.



Figur 4.37. Variogram der viser den logtransformerede specifikke kapacitet (4 retninger). Værdier langs x-aksen er afstand i m, værdier langs y-aksen er variansen.

Der er dog en tendens til at transmissiviteten er nogenlunde ensartet mellem forcastningerne. Dette ses tydeligst vest for Carlsbergforcastningen, hvor et område med relativt høje værdier mellem ca.  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  og  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  er afgrænset mod vest af en forcastning ved Hvidovre. Et område ved Taastrup og Hedehusene er kendetegnet af høje værdier op til  $20 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , området er afgrænset mod øst og nord af forcastninger. Syd herfor er et område med lave værdier, under  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ved Greve Strand og Ishøj. Dette område er sammenfaldene med et lavtliggende område, hvor kalkover-

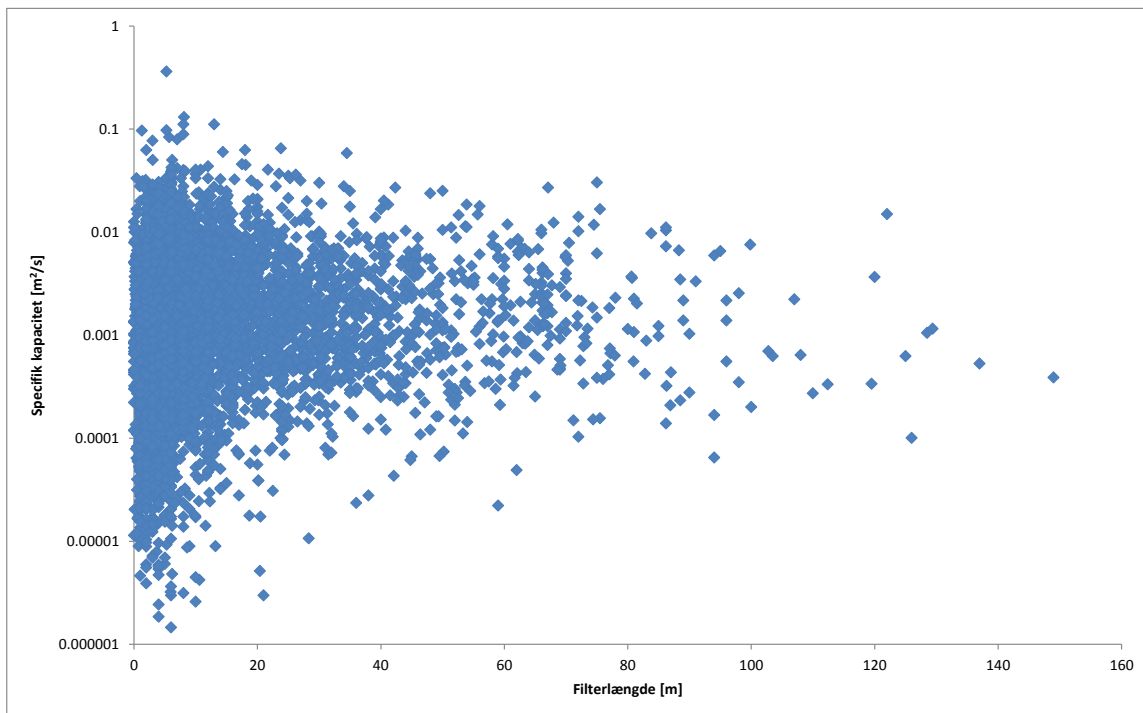
fladen ligger under kote -10 m (bilag 4.1) og består af Skrivekridt. Det er derfor nærliggende at konkludere at Skrivekridtet har lavere transmissivitet end bryozokalken.

Den nogenlunde ensartede transmissivitet indenfor de enkelte forkastningsblokke kan forklares, hvis transmissiviteten varierer med det stratigrafiske niveau. Det har dog ikke været muligt at finde mere hydraulisk ledende sekvenser i bryozokalken (Klitten og Wittrup, 2006), og tendensen til ensartet transmissivitet inden for enkelte forkastningsblokke kan derfor ikke umiddelbart forklares.

Der kan optræde anisotrope (retningsbestemte) strømningsforhold som følge af forkastninger eller dominerende sprækkeretninger. For at kunne erkende dette skal der analyseres på både pumpeboringer og observationsboringer fra flere pumpeforsøg, hvilket der ikke har været muligt med de tilgængelige data.

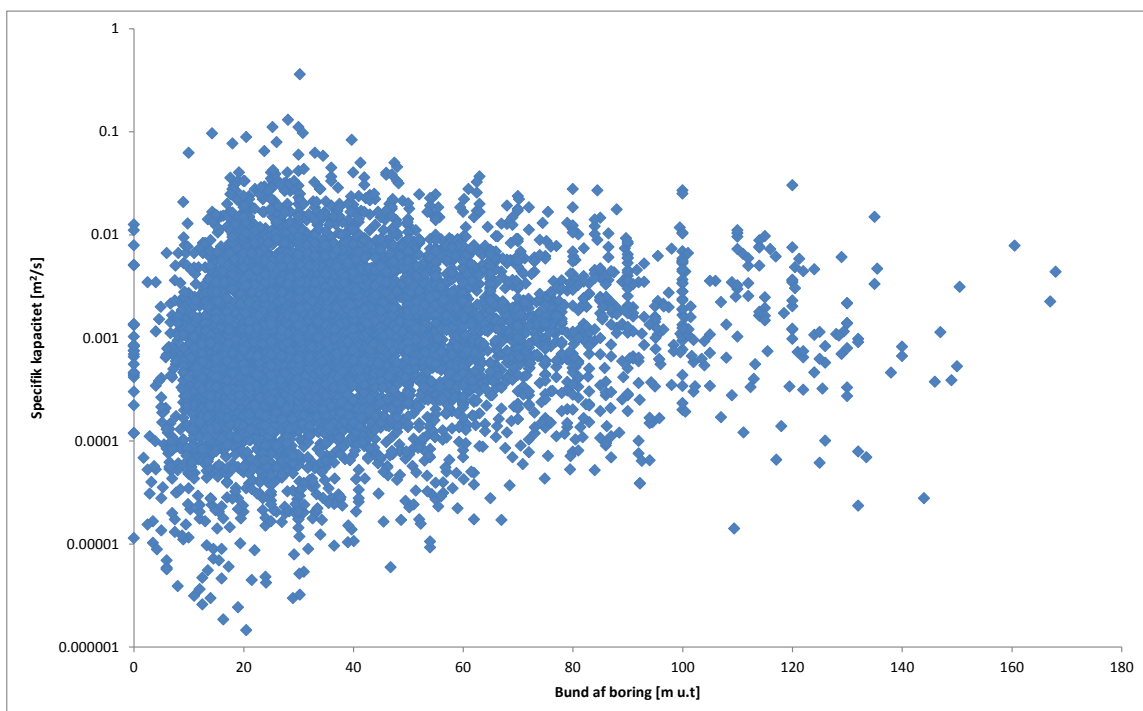
Data fra pumpeforsøg, indberettet til Jupiter-databasen kan stamme fra meget forskellige boringer. Der kan både være udført pumpeforsøg i dybe boringer med lange eller korte filtre, og der kan være data fra boringer med korte filtre i den øverste del af kalken. Filterets længde og boringens specifikke kapacitet er vist i Figur 4.38, og der ses ikke en tydelig sammenhæng, dog er der en tendens til at de længste filtre ikke har meget høj specifik kapacitet. En vandforsyningsboring vil dog sjældent være boret dybere end det er nødvendigt, for at kunne pumpe den ønskede vandmængde af økonomiske årsager. I områder med meget høj transmissivitet og deraf følgende høj specifik kapacitet, er der et økonomisk incitament til at udføre kortere boringer, hvilket kan have påvirket datasættet.





Figur 4.38. Den specifikke kapacitet i 6943 boreriger på Sjælland plottet mod filterlængden. Der ses ikke en tydelig sammenhæng, dog er der en tendens til at de længste filtre ikke har meget høj specifik kapacitet.

Hvis man sammenligner boringens dybde og den specifikke kapacitet (Figur 4.39) kan man komme til en lignende konklusion.



Figur 4.39. Den specifikke kapacitet i 6943 boreriger på Sjælland plottet mod boringedybden. Der ses ikke en tydelig sammenhæng, dog er der en tendens til at de dybeste boreriger ikke har meget høj specifik kapacitet.

#### 4.8.4 Vandtransporthastigheder i bryozokalken

Vandtransporthastigheder er afhængige af såvel sprækkeporøsiteten, den hydrauliske ledningsevne relateret til sprækkerne og gradienten, som igen er en funktion af den vandmængde der transporteres.

Den bedste metode til at fastlægge troværdige vandtransporthastigheder i opsprækkede bjergarter som kalk er p.t. sporstofforsøg, som også kan give indtryk af dispersiviteten, dvs. spredningen i transporthastighederne for bjergarten. Der er udført et sporstofforsøg i felten i bryozokalken ved Karlstrup Mose Kalkgrav og i Lille Skensved og i en kerne fra Lille Skensved. Resultaterne fra feltforsøgene er opsummeret i Tabel 4.4

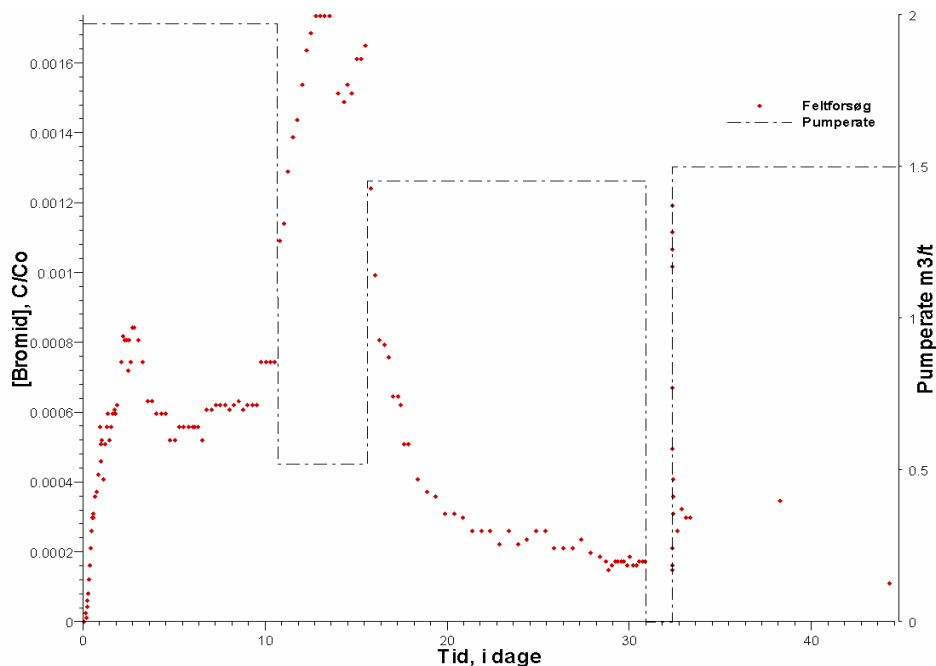
*Tabel 4.4: Transporthastigheder, gradienter, tilsyneladende bulk værdier for den hydrauliske ledningsevne og dispersiviteter fra sporstofforsøg i bryozokalk. DS for Ll. Skensved forsøget angiver at det er modelleret med diskrete sprækker. Aperturen (sprækkeåbningen) i modellen ligger mellem 0,5 og 5 mm.*

Feltforsøg	Model K (m/s)	Model sprække porøsitet %	Modelleret longitudinal dispersivitet (m)	Modelleret Transversal Dispersivitet (m)	Gradient under forsøg ‰	Gennem- bruds- hastighed m/time	Injiceret koncen- tration mg/l	Observeret max kon- centration mg/l
Karlstrup Mose*	$4-8 \times 10^{-4}$	0,7	8	0,001-0,05	10	0,5-1	1000	3
Ll. Skensved**	DS	DS	1	0,1	24	0,18	81000	69

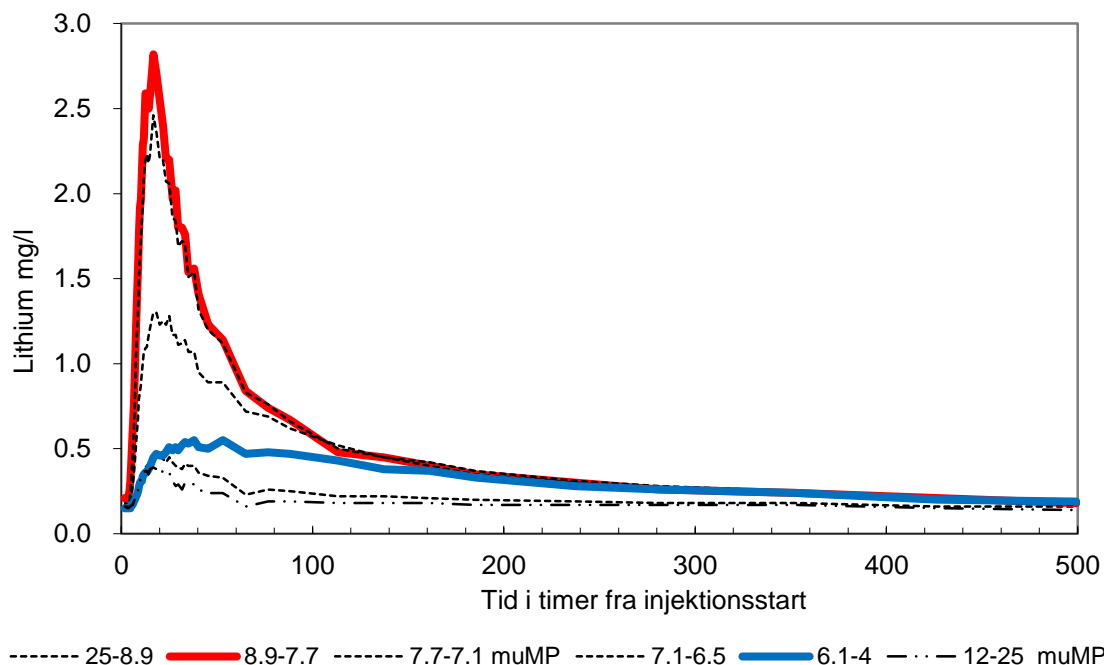
\*Jakobsen (1991); \*\*Milter (2007)

#### 4.8.5 Stoftransporten i bryozokalken

Der er udført to sæt sporstofforsøg i bryozokalken, dels to forsøg i Karlstrup Mose Kalkgrav (Jakobsen, 1991), som er blevet modelleret i 1992 (Brettmann et al.) og igen i 2005 (Mejlby) og dels to i Lille Skensved et på feltskala og et på laboratorieskala som er modelleret af Milters (2007). Udvalgte data som tydeligt viser det meget hurtige gennembrud af sporstofferne efterfulgt af en meget lang hale er vist i Figur 4.40 og Figur 4.41. Det hurtige gennembrud er relateret til transporten gennem sprækkerne, koncentrationen der observeres er imidlertid meget lav, promiller af den injicerede koncentration. Dette skyldes at langt den største del af stoffet er transporteret ind i matrix ved diffusion inden vandet når observationsboringen. Den lange hale opstår ved at stoffet, efter at koncentrationen i sprækkerne er faldet diffunderer fra matrix og tilbage i sprækkerne.



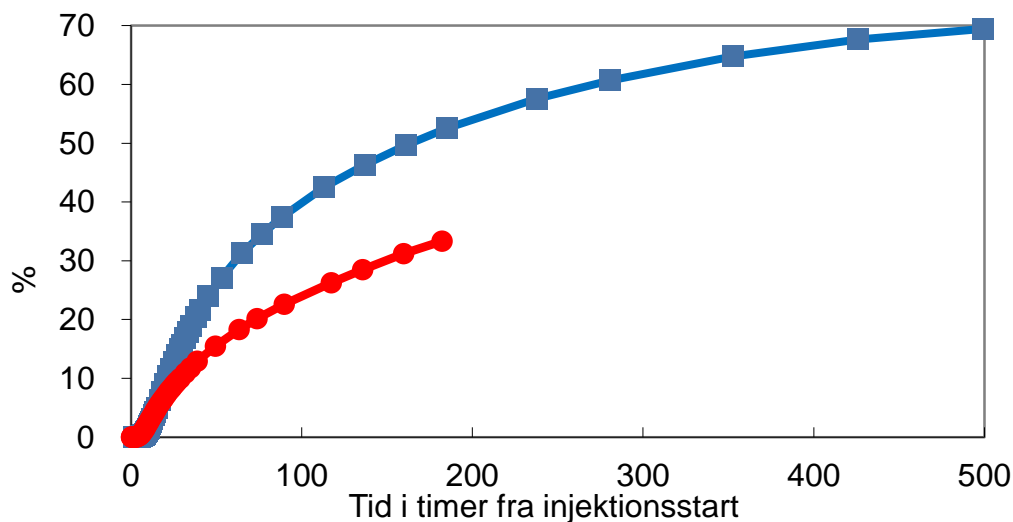
Figur 4.40: Gennembrudskurve fra sporstofforsøg gennemført i bryozokalken. Forsøg fra LI. Skensved, med en afstand på 13 m mellem injektions og observationsboring. Der er injiceret 101 kg Bromid i løbet af 15,5 dage i en opløsning med 81.000 mg/l. Pumperaten er varieret over tid, bemærk at koncentrationen i den første top kun er omkring promille af den injicerede koncentration og den i den anden top kun cirka 2 promille.



Figur 4.41: Gennembrudskurver fra sporstofforsøg gennemført i bryozokalken. Forsøg fra Karlstrup Mose Kalkgrav, der er injiceret ca.  $1 \text{ m}^3$  vand med en koncentration på ca. 1000 mg/l i løbet af ca. 1 time, ca. 25 meter fra pumpeboringen hvor der blev pumpet fra 6 intervaller. Som i figur 4.26A er det markant at der maksimalt ses en koncentration på ca. 3 promille af den injicerede.

LI. Skensved data er blevet modelleret (Milter, 2007) med specifikke sprækker, og et af resultaterne var at udvekslingen af stof mellem sprækker og matrix kun er meget lidt påvirket af den hydrauliske ledningsevne i matrix, men i høj grad af matrixporøsiteten, som det derfor kan anbefales at man indsamler data for. En anden vigtig parameter er hvor stor den reelle kontaktflade mellem sprækker og matrix er. Sprækkerne er ikke alle lige velforbundne hydraulisk set, og strømmer vandet i kanaler i sprækkesystemet bliver kontaktfladen mellem det strømmende vand og matrix markant mindre og dermed også udvekslingen mellem de to domæner. Det er i forvejen vanskeligt at indsamle kvantitative data om sprækker og en mere præcis kortlægning af strømningsveje i kalken forekommer ikke mulig at udføre på feltskala.

I Karlstrup Mose Kalkgrav blev der udført to forsøg. Ud fra bankernes orientering i Karlstrup Kalkgrav, som svarer til den retning der i øvrigt er observeret, er det ene forsøg formodentlig gået på tværs af bryozobankernes længdeakser, mens det andet er gået mere på langs af bankerne. Den akkumulerede stofmængde i % af den injicerede for de to forsøg er vist i Figur 4.42 og viser at bankernes orientering formentlig har stor indflydelse på stoftransporten idet den genoppumpede stofmængde er langt mindre for forsøget på tværs af bankerne, på trods af at afstanden mellem injektion og oppumpning var kortere. Der sker altså et større tab af stof til matrix, formentlig fordi spredningen på tværs af banken er større og dermed bliver der en større kontakt til matrix som giver en større transport ind i matrix ved diffusion. Der er indtil nu ikke tilstrækkeligt med data fra Vestegnen til at afdække hvorvidt kalken ligger i tydelige banker eller ej.



Figur 4.42. Den akkumulerede oppumpede stofmængde for to sporstofforsøg fra Karlstrup Mose Kalkgrav. Den røde kurve er for et forsøg på tværs af bankernes formodede længdeakse, mens den blå kurve er for et forsøg der gik mere på langs af bankerne.

Kalk har typisk et lavt indhold af organisk materiale (Skrivekridt har et meget lavt indhold). Undersøgelser af kalkens sorptionsegenskaber (Witthüser et al., 2003) indikerer, at på grund af dette meget lave indhold, kan oktanol-vand fordelingskoefficienten og indhold af organisk kulstof ikke altid benyttes til beregning af sorptionen ( $K_d$ ). Piwoni & Banerjee (1989) har opstillet en sammenhæng der kan benyttes i aflejringer med lavt



indhold af organisk materiale. Denne sammenhæng er dog opstillet på baggrund af forskning udført på et ikke nærmere beskrevet "akvifer materiale".

#### 4.8.6 Opsummering af de hydrauliske parametre.

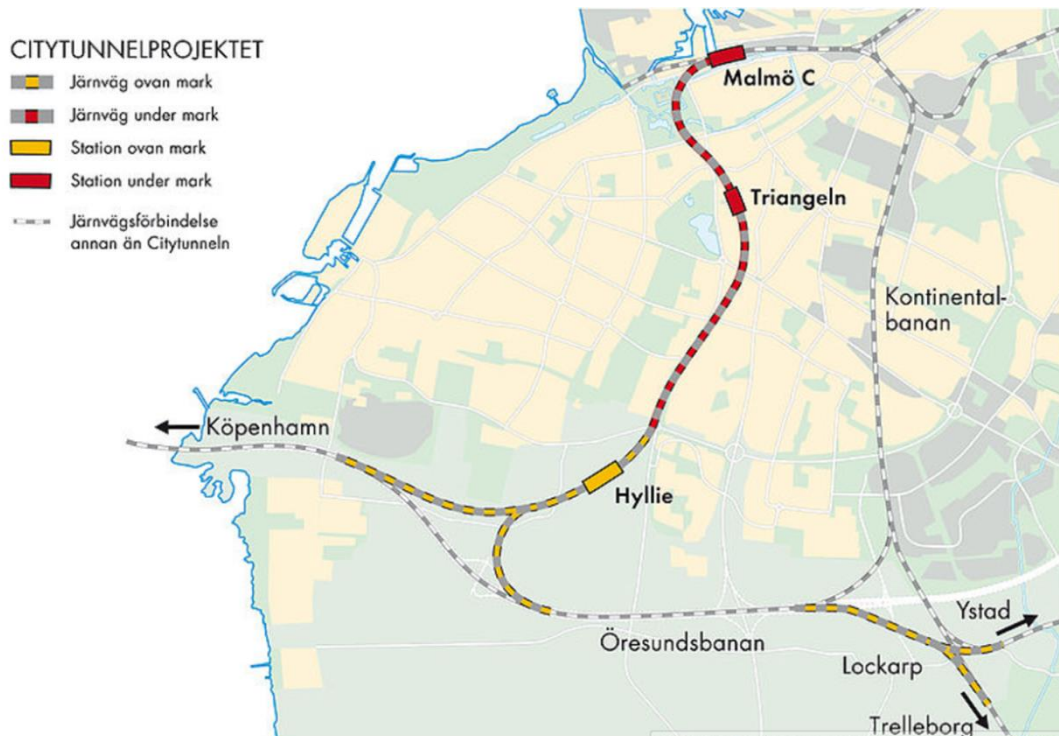
Ud fra de ganske få data der ligger fra Vestegnen ser det ud til at kalken er sammenlignelig med den kalk der ligger SV for ved Karlstrup, mens resultater fra Stevns og Faxø ligner mindre. Desværre er det vanskeligt umiddelbart at anvende denne information fordi variationen i både bulk og matrix porøsitet og hydraulisk ledningsevne begge steder er meget stor. Ved hjælp af modeller der spænder over det kendte interval af de vigtigste parametre kan det formentlig lade sig gøre at afgrænse vigtige parametre såsom vandtransporthastigheder og graden af udveksling af stof mellem sprækker og matrix.

## 5 Malmø som nøgleområde

De geologiske forhold på den københavnske vestegn, herunder værkstedsområderne, er ikke undersøgt med så stor datatæthed og -kvalitet som det er tilfældet i det centrale København, et forhold der oftest gør sig gældende, når man sammenligner geologiske datamængder i travle og tætbebyggede storbymidter med datamængder fra disse mere spredt bebyggede og åbne forstæder, hvor behovet for bekostelig, underjordisk infrastruktur er mindre.

I mangel af tilstrækkelige mængder af højkvalitets historiske geologiske data fra vestegnen ville det oplagte derfor umiddelbart være i stedet at se på datamængder fra det centrale København. Men her er problemet, at prækvartæroverfladen i det centrale København udgøres af en anden slags kalk end den på vestegnen, jf. kapitel 4. I modsætning til vestegnens bryozokalk med sine bankestrukturer er den indre by København kalk helt overvejende vandret bænket og viser tykkere og mere lateralt udstrakte flintlag. Man kan derfor ikke forvente, at de hydrauliske egenskaber, herunder måden forurening spredes på, kan sammenlignes mellem Københavns indre by og vestegnen. I Malmø derimod, lige på den anden side af Øresund, og ca. 50 km øst for værkstedsområderne, forekommer bryozokalk ret tæt under overfladen.

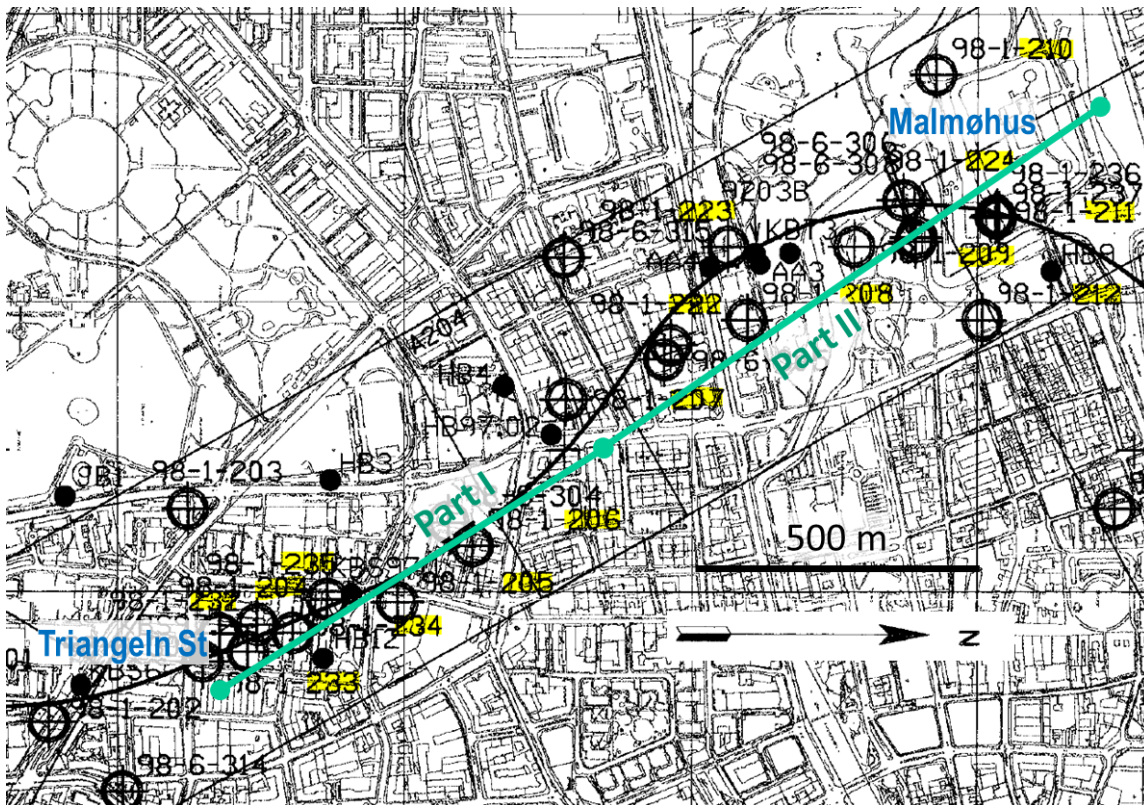
Op gennem 1990-erne blev der i det centrale Malmø udført en omfattende mængde forundersøgelser for byggeriet af Malmø Citytunnel, en delvis underjordisk jernbaneforbindelse mellem den nyopførte Øresundsbro og Malmø Centralstation. Indtil Malmø Citytunnel blev indviet i 2010, gik jernbanetrafikken fra København til Malmø øst om byen og østfra ind til Malmø Centralstation, som oprindeligt var en sækbanegård, hvor togene kørte ind og ud samme vej. For den ny jernbane var især den 6 km lange borede tunnel gennem det sydvestlige og centrale Malmø, se Fig. 5.1, genstand for en betydelig mængde forundersøgelser.



Figur 5.1. Den underjordiske del (rød) af Malmö Citytunnel er 6 km lang.

I 1998 udførte GEO et større antal kerneboringer for den borede tunnel, og i 35 af disse er kalklagene biostratigrafisk inddelt i bryozokalk og den overliggende København kalk. Data for disse boringer, i form af geologiske beskrivelser, hårdhedsmålinger og vandindholdsbestemmelser af kerneprøverne, foruden geofysiske gamma-, densitets- og kaliberlogs, samt flowlogs og indstrømningszoner bestemt ved pumpeforsøg, er i forbindelse med dette projekt samlet i en database.

I afsnit 5.2 og 5.3 er behandlet data fra alle de 35 ovennævnte boringer, mens der i afsnit 5.4 og 5.5 for overskueligheden skyld kun er medtaget de 16 boringer vist på Figur 5.3.

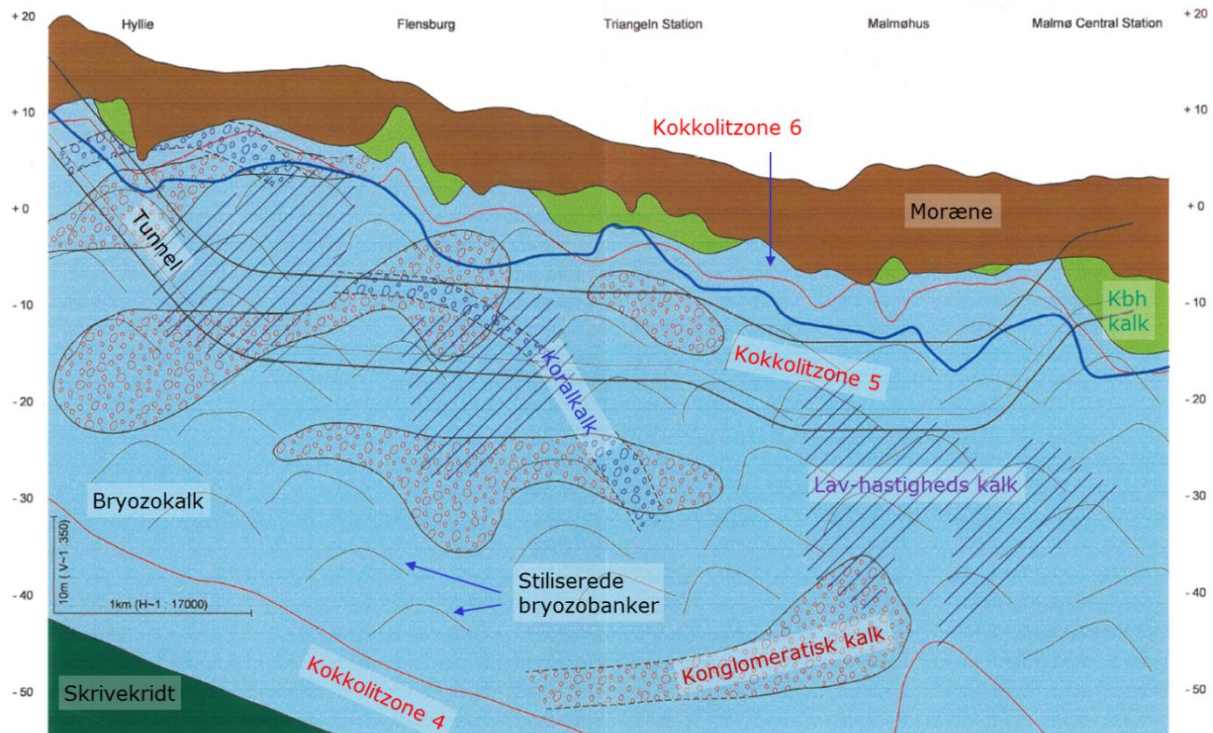


Figur 5.2. Situationsplan med beliggenhed af boringer (med gult) og placering af længdesnit vist på bilag 5.1 til 5.3 (modificeret efter DGI (1999)).

## 5.1 Resume af undersøgelser for Malmö Citytunnel

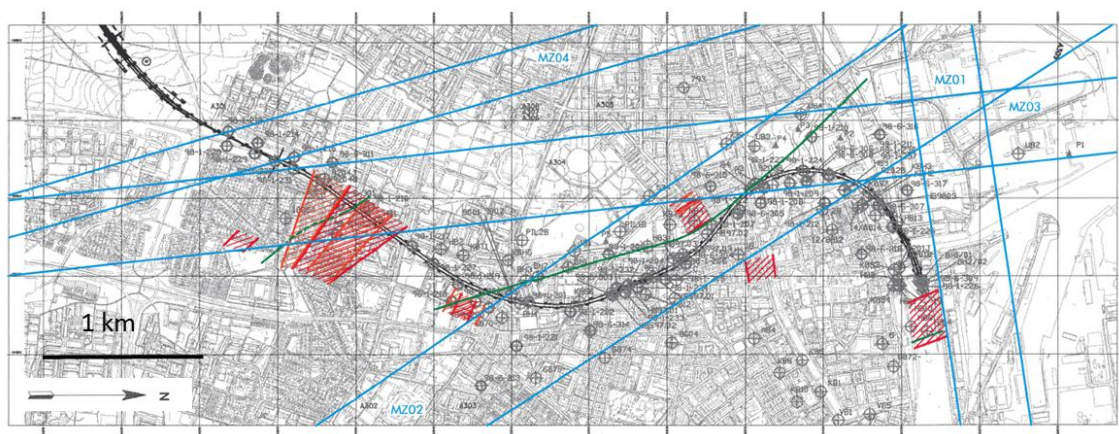
Et overblik over de geologiske forhold i Malmö Citytunnel linjeføringen ses på Fig. 5.3. I et terræn som hælder ned mod det centrale Malmö ved øresundskysten overlejrer et 5-10 m tykt lag af sandet moræneler en prækvartær serie opbygget hovedsageligt af bryozokalk, med små indslag øverst af den overliggende København Kalk, begge af Danien alder. Morænelagene består helt overvejende af moræneler, men indeholder indslag af morænesand og, specielt ned mod den underliggende kalk, af morænegrus. I morænen ses spredte forekomster af smeltevandssand og -grus.





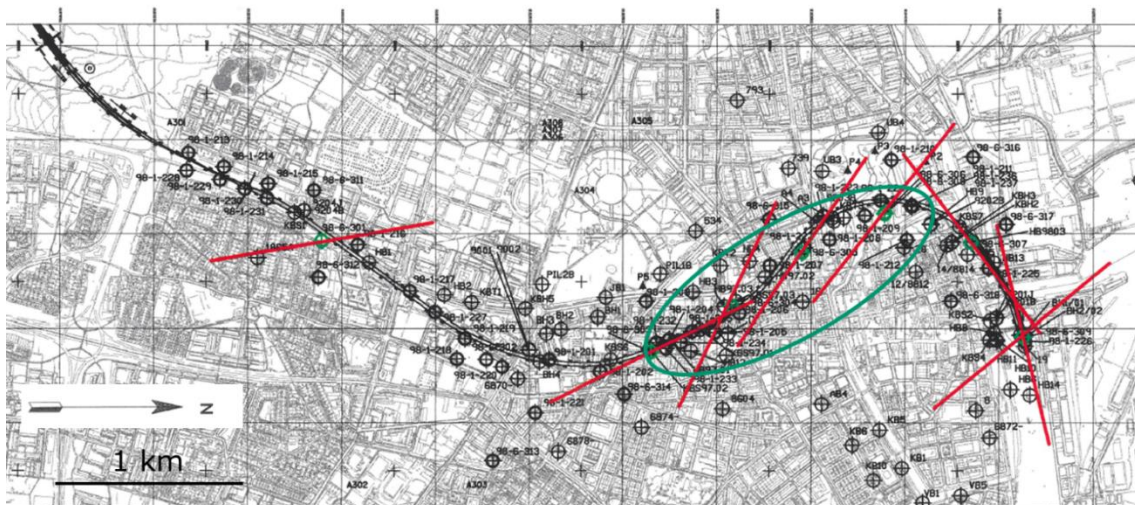
Figur 5.3. Konceptuel geologisk model for tunnelstrækningen af Malmö Citytunnel, fra Hyllie t.v. til Malmø C t.h. Bryozokalken er opbygget af banke-strukturer, vist med stiliseret signatur. Øvrige signaturer og områder afspejler påviste forekomster. Blå streg øverst i bryozokalken viser undersiden af kalk med lydshastigheder  $< 2000$  m/s, kalken under stregen har hastigheder mellem 2000 og 2500 m/s (modificeret efter DGI (1999)).

Strukturelt er kalklagene i Malmö Citytunnel-linjeføringen præget af et antal forkastninger eller strukturelle zoner, se fig. 5.4, hvoraf nogle krydser hinanden i Malmøs havneområde, hvor kalklagene er kendt for at være stærkt vandførende. Forkastningerne påvirker grundvandsstrømningen kraftigt, hvilket bl.a. fremgår af de generelt ganske aflange sænkningstragter man ser ved pumpeforsøg, se fig. 5.5.



Figur 5.4. Lokale (rød og grøn) og regionale (blå) forkastningszoner i linjeføringen for Malmö Citytunnel (modificeret efter DGI 1999).





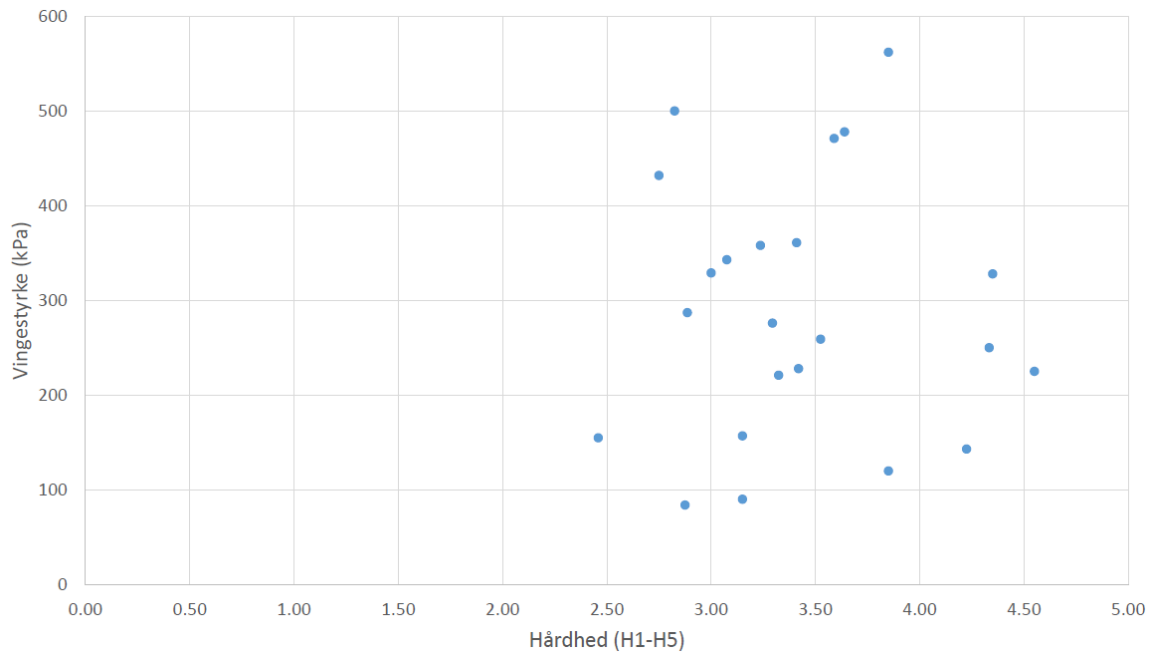
Figur 5.5. De røde streger angiver den lange akse af asymmetriske sænkningstragter ved pumpeforsøg. Den grønne oval angiver delstrækningen som ses på Bilag 5.1 til 5.3, samt på fig. 5.2 (modificeret efter DGI 1999).

Ved opstilling i sin tid af den geologiske model for kalklagene (DGI 1999) var det kun meget sjældent muligt at korrelere bestemte horisonter, f.eks. med særligt højt lerindhold eller hærtningsgrad, fra boring til boring, hvilket netop er karakteristisk for en formation opbygget af bryozobanker, se fig. 6.2 og 6.3. Der blev dog konstateret et generelt skift i kalkens lithologi omkring Triangeln station, idet kalken mod nord bl.a. var blødere, mørkere, mere silicificeret og med lavere lydshastighed og densitet end mod syd. Skiftet er formentlig betinget af et ændret aflejringsmiljø i retning ind mod den daværende kyst, som muligvis lå så tæt på som langs med Romeleåsen ca. 20 km NØ for Malmö.

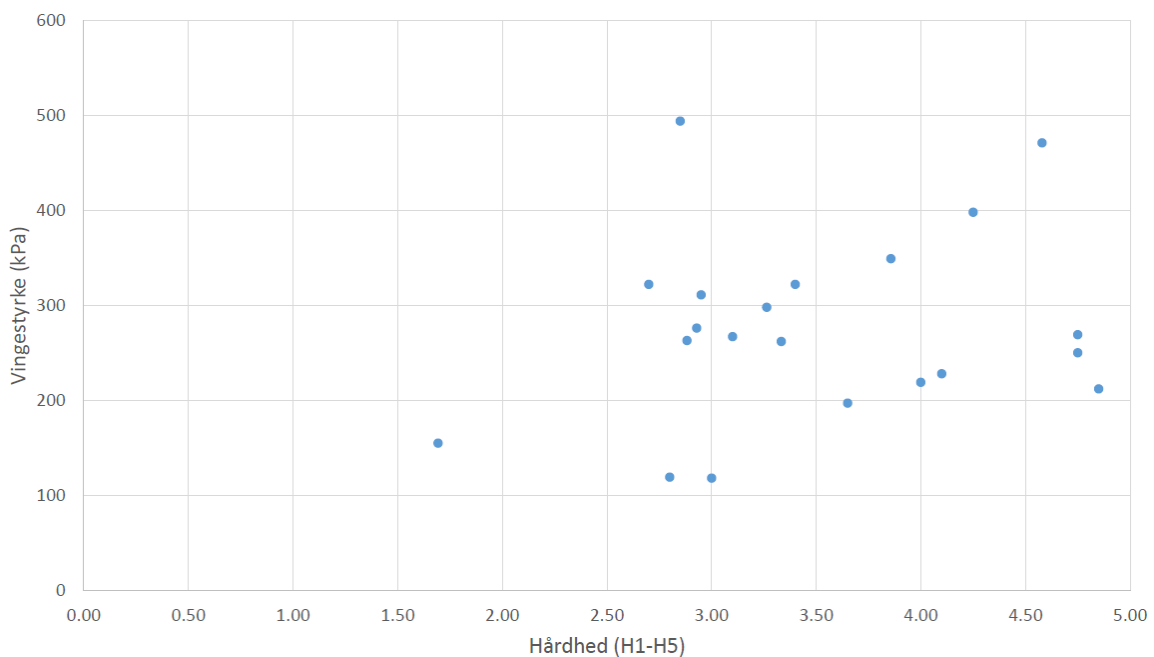
## 5.2 Vingestyrke i morænen korreleret med hærtningsgraden i kalken

På større regional skala har der i Jylland og på Fyn (Kirkegaard og Madsen 1996?) vist sig at være en sammenhæng mellem styrken af morænelagene og sammensætningen af morænernes prækvartære underlag. Hvis en sådan sammenhæng også gælder inden for mindre områder, ville det være interessant. Data fra Malmö blev derfor undersøgt med henblik på dette.

Fig. 5.6 viser, for de 35 ovennævnte borer, sammenhængende værdier for morænenes styrke, taget som gennemsnittet af alle vingestyrkemålinger i morænenes nederst 2 m, og kalkens styrke, taget som gennemsnit af hårdhedsbestemmelser i kalkens 2 øverste m. Fig. 5.7 viser samme sammenhæng, men for de nederste 4 m moræne og den øverste 1 m kalk. Der ses hverken på Fig. 5.6 eller 5.7 nogen ikke-tilfældig sammenhæng.



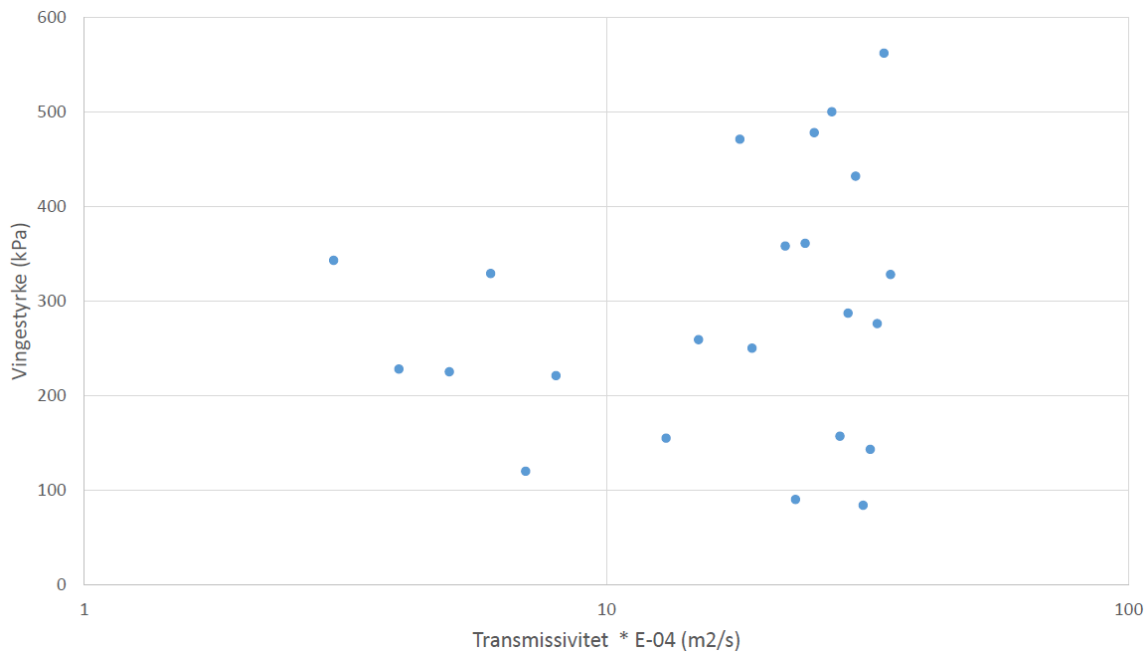
Figur 5.6. Sammenhæng mellem vingestyrke i nederste 2 m moræne og hårdhed af de øverste 2 m af den underliggende kalk.



Figur 5.7. Sammenhæng mellem vingestyrke i nederste 4 m moræne og hårdhed af de øverste 1 m af den underliggende kalk.

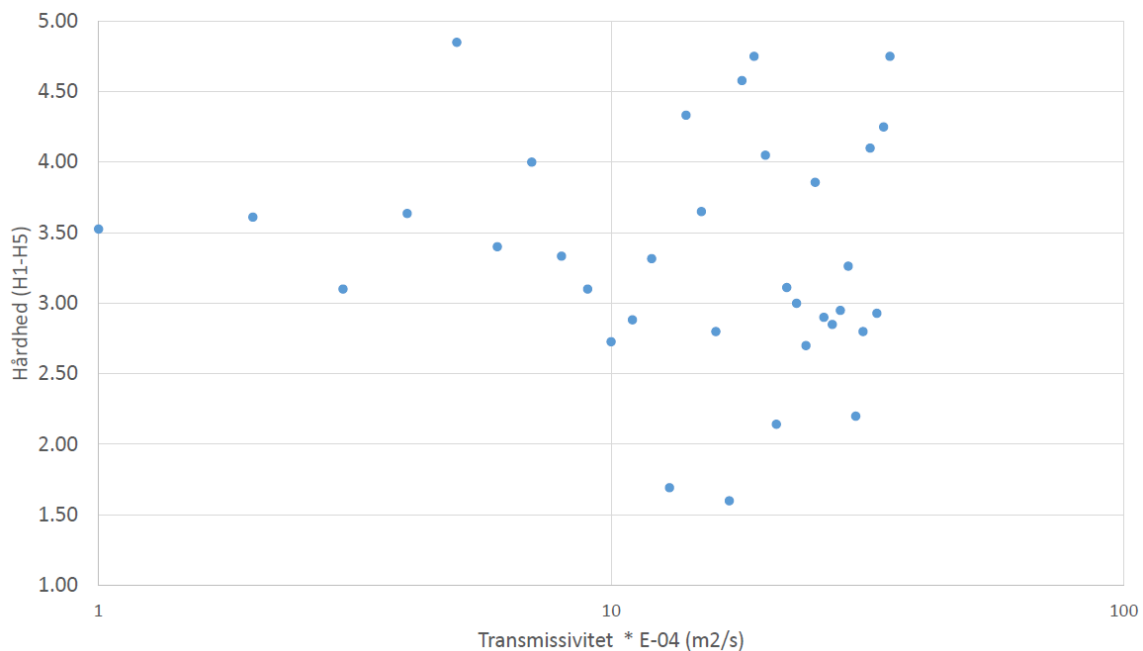
### 5.3 Vingestyrker og hærdningsgrader korreleret med T-værdier i kalken

Ligeledes blev værdier for morænenes styrke, taget som gennemsnittet af alle vingestyrkemålinger i morænenes nederst 2 m, og kalkens hydrauliske transmissivitet, eller T-værdi, sammenlignet, se Fig. 5.8.



Figur 5.8. Sammenhæng mellem vingestyrke i nederste 2 m moræne og kalkens T-værdi.

Og endelig blev kalkens hårdhed, taget som den gennemsnitlige hårdhed i den øverste m af kalken, og kalkens hydrauliske transmissivitet, eller T-værdi, sammenlignet, se Fig. 5.7. Det var heller ikke her muligt at finde frem til entydige sammenhænge.



Figur 5.9. Sammenhæng mellem hårdhed i øverste 1 m kalk og kalkens T-værdi.

## 5.4 Geofysiske logs

Den geofysiske gammalog måler bjergartens naturlige indhold af radioaktivt materiale, som typisk findes i forbindelse med ler eller organisk materiale. Gammaloggen vil mange steder, fx i København Kalk fra Øvre Danien, kunne bruges til at fastlægge gennemgående marker-horisonter, som kan bruges til stratigrafisk opdeling af bjergarten.

Densitetslogs måler vha udsendt gammastråling våddensiteten, som bla er et mål for bjergartens styrke. Ligesom for gammalog vil densitetslog i visse bjergarter afsløre gennemgående høj- eller lav-densitets markere, som kan bruges til stratigrafisk opdeling.

Kaliberloggen måler vha nogle fjederbelastede arme borehullets diameter, som ideelt set vil være lig borekronens diameter, men som ofte er større end borekronen, nemlig dér hvor kalken er blød eller opsprækket. Når borekronen skærer sig ned gennem kalken, og skyllevand blandet med de friskårne cuttings eroderer, spuler og sliber den frilagte borehulsvæg på deres vej op, vil bløde dele af væggen kunne opslemmes i skyllevandet, eller små stykker af sprækket kalk i væggen kan falde ud i borehullet. I alle tilfælde øges borehullets diameter.

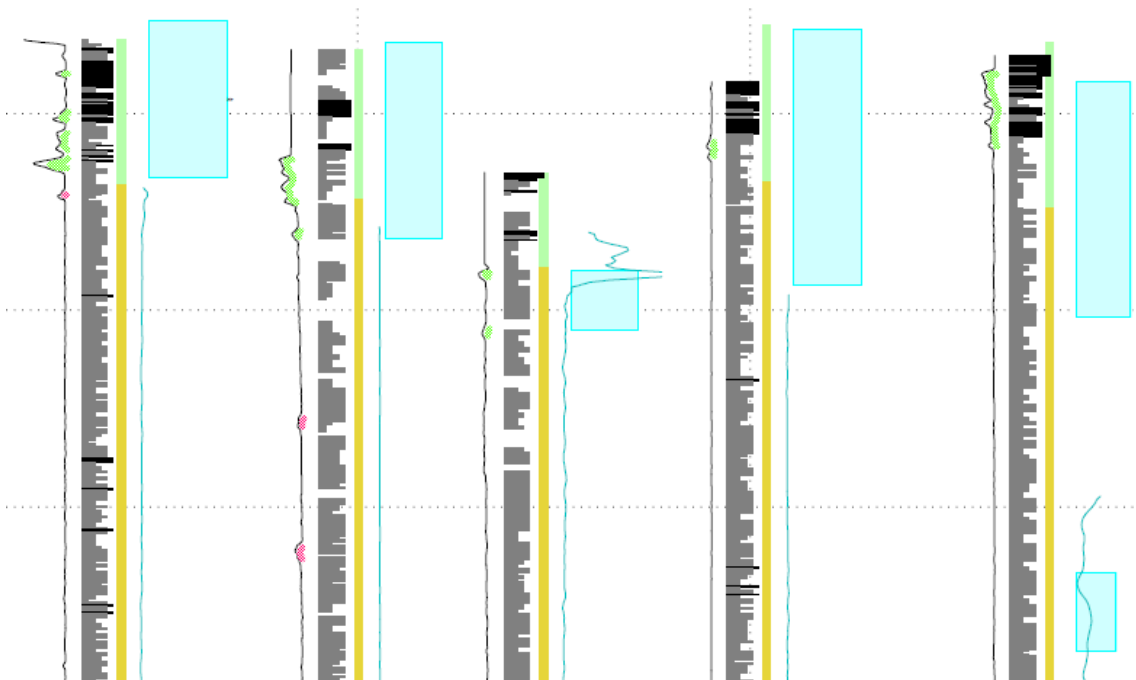
Det viste sig i sin tid, at de geofysiske gamma- og densitetslogs fra Malmø Citytunnel kun kan bruges til stratigrafisk korrelation af kalklagene inden for ganske korte afstande. Over længere afstande er det ikke muligt at følge nogen marker-horisonter, se Bilag 5.1, mens der dog i et område af linieføringen blev konstateret en lav-densitets-zone, med små værdier på densitetslog, se Bilag 5.1, og høje vandindhold, se Bilag 5.2.

## 5.5 Kaliberlog og flinthorisonter korreleret med indstrømningszoner

Den malmøske bryozokalk er en forholdsvis kompetent bjergart, hvor det var muligt at udføre kerneboringer med høj kerneprocent, hvor borehulsvæggen over lange strækninger i diameter nøje svarede til diamantkronen brugt under borearbejdet. Der var altså som regel (næsten) intet udfald ud i borehullet af kalkmateriale fra borehulsvæggen. På kaliberloggen ses dog, især i den øverste del af kalklagene, af og til små udslag, som markerer strækninger, ofte blot horisonter, med større borehulsdiameter end på diamantkronen. På Bilag 5.3 ses at disse udslag på kaliberloggen ofte ligger inden for samme dybde som flintlag, markeret med sort. Kaliberloggens udslag er helt sikkert relateret til svaghedszoner, bla sprækker. Det er da også karakteristisk, at der rundt om flintlag ofte ses sprækker.

Bilag 5.3 viser dels kaliberlog, dels flowlog med tolkede indstrømningszoner, se udsnit på Fig. 5.10. Indstrømningszonernes tykkelse og dybde varierer temmelig tilfældigt, så at der ikke er gennemgående vandførende horisonter i bestemte dybder i kalken, men højst områder, se koteintervallet -15 til -35 på højre del af side 2 af 2 på bilag 5.3, hvor indstrømningszoner forekommer hyppigere end ellers.





Figur 5.10. Udsnit af bilag 5.3, hvor udsving på kaliberloggen er markeret med grønt hvor de ligger inden for de tolkede indstrømningszoner (blå kasser) og med rødt hvor de ligger udenfor. Samme signaturer som på bilag 5.1 – 5.3. Vandrette net-linier har 5 m afstand.

## 5.6 Sammenligning med værkstedsområder

De topografiske forhold i Malmö minder meget om forholdene på den københavnske vestegn, hvor en morænedomineret og forholdsvis tynd kvartær lagserie overlejrer prækvartære lag af bryozokalk, se kapitel 6. Landskabet er desuden begge steder forholdsvis jævnt uden markante bakker og dale.

Tabel 5.1. Gennemsnitsværdier for bryozokalks hårdhedsfordeling, samt kernetab, bestemt i kerneboringer på tre forskellige lokaliteter. De fleste af borerne fra Vestegnen er udførte for den nye Ringsted-bane, mellem Brøndby og Karlslunde.

Område	Vestegnen	Cityringen	Malmö
Antal boringer	16	12	28
Dybde under top kalk (m)	0-12	> 20	0-50
Kokkolitzone	5*	5-6 (?)	4-6
Hårdhed (%)	H1	1,3	4,2
	H2	20,8	22,4
	H3	19,5	24,1
	H4	25,2	43,4
	H5	15,3	2,0
Kernetab (%)	17,9	2,8	3,9
I alt (%)	100,0	100,0	100,0

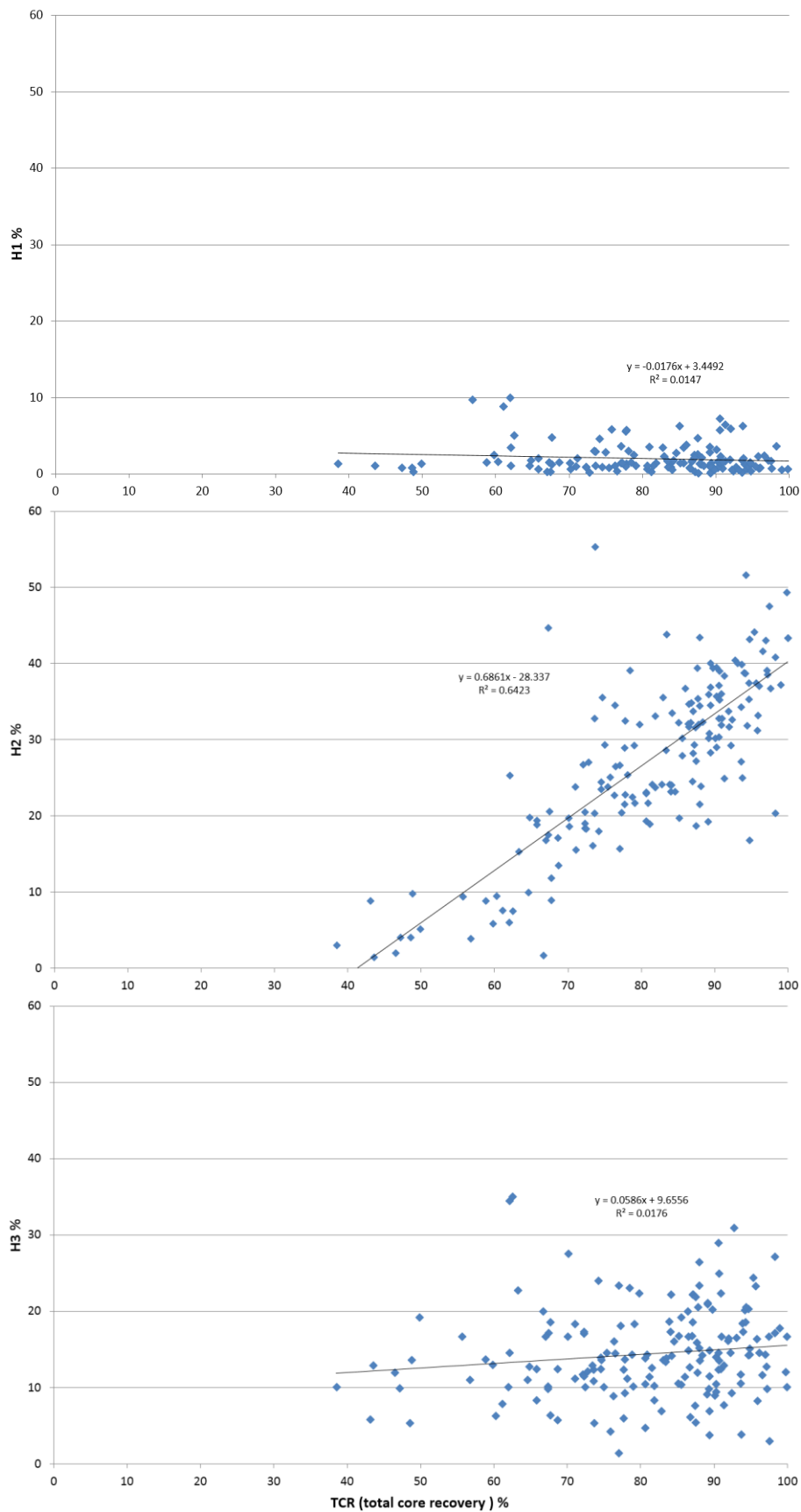
\*: gælder for Naverland

Bryozokalken i Malmö tilhører samme geologiske formation som bryozokalken på den københavnske vestegn, hvilket bl.a. vil sige at kalken begge steder er aflejret under samme overordnede geologiske betingelser og er opbygget af de samme komponenter, i dette tilfælde en rigdom af bryozofragmenter arrangeret i store lagdelte, hvælvede bankestrukturer. Men inden for samme formation kan kalken godt variere i sammensætning, som det ses i Tabel 5.1

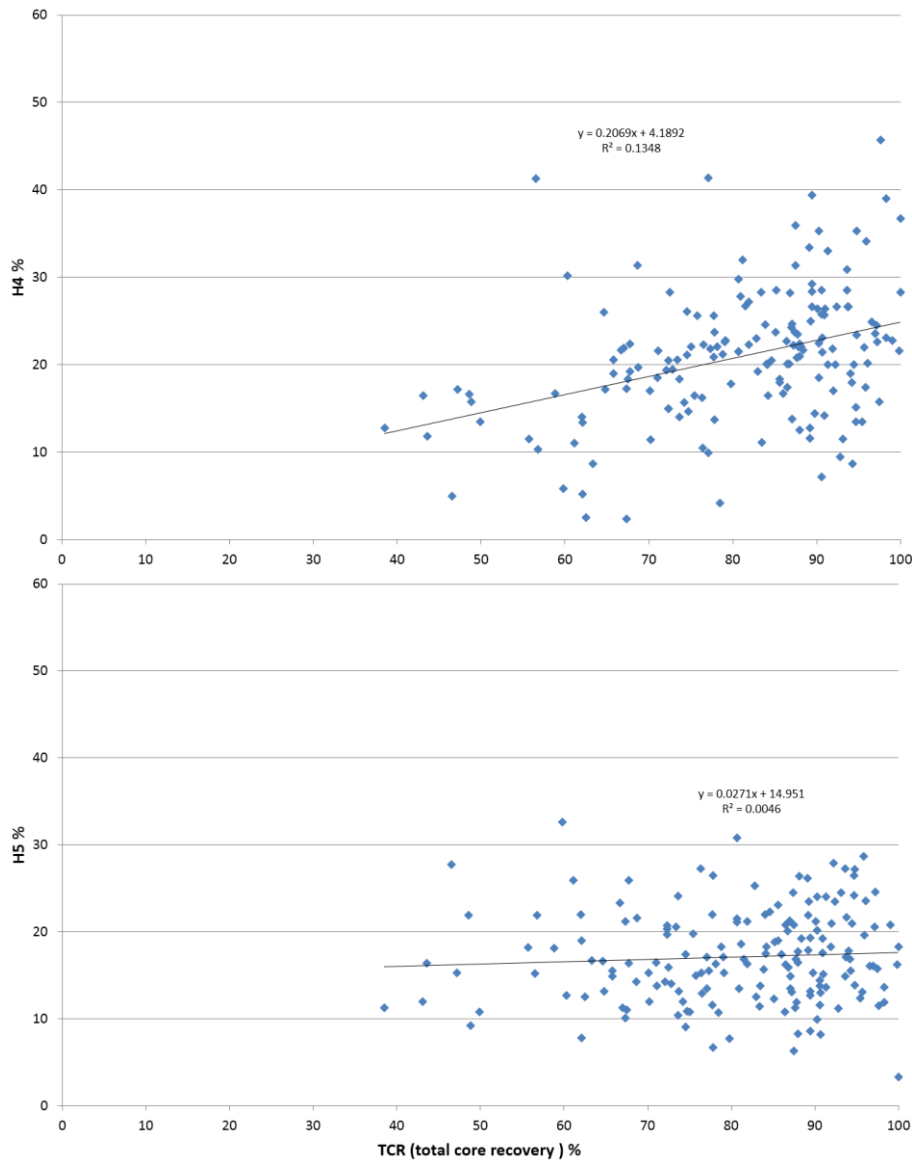
Den malmøske bryozokalk er en bjergart med gode rock mass egenskaber, bla er den forholdsvis godt hærdnet. Den er forholdsvis nem at kernebore i, giver høje kerneprocenter, og er mht rock mass så forholdsvis stabil, at der under byggeriet af Malmø City-tunnel os bekendt ikke opstod særlige problemer med kalkens stabilitet.

Fra vestegnen har vi ikke kendskab til erfaringer, herunder rock mass egenskaber, fra udgravninger i bryozokalk, så det eneste sammenligningsgrundlag er de få kerneboringer vist i Tabel 5.1. Heraf fremgår, at vestegnskalken viser noget højere kernetab, samt noget lavere andel af H4, end kalken i Malmö. Værdier for de øvrige hårdheder er nogenlunde de samme.

Ved boringer med kernetab melder spørgsmålet sig: Hvad er det der går tabt? Er det bestemte dele af kalken, bestemte hårdheder, eller er kernetabet måske jævnt fordelt på de forskellige hårdheder? De 16 kerneboringer fra Vestegnen vist i Tabel 5.1 er i Figur 5.11 undersøgt nærmere. Det ses, at det især er H2, samt i mindre grad H1 (som kun forekommer i små mængder), H3 og H4, der tabes, når der ikke opnås fuld kerne. Det er kun indholdet af H5, som forbliver nærmest uændret. Noget ganske lignende gør sig for øvrigt gældende for de mange boringer i København Kalk for Cityringen. Boringerne for Malmö Citytunnel er i denne sammenhæng mindre interessante, idet de generelt har meget høje kerneprocenter.



Figur 5.11 (fortsættes næste side)



Figur 5.11 (foregående side og denne side). For 16 kerneboringer på vestegnen er her for hver boring plottet samlet indhold af H1, H2, H3, H4 hhv H5 mod samlet kerneprocent TCR (dvs der tages ikke hensyn til dybden under kalkoversiden). Desuden er angivet ligning og determinationskoefficient  $R^2$  for bedste rette linie gennem punkterne. For H1 til H4 ses en vis korrelation med samlet kerneprocent, modsat for H5.



## 6 Værkstedsområder

Værkstedsområderne er de områder, udpeget af Region Hovedstaden, som skal danne geografisk grundlag for opgaveløsningen. De er markeret på bilag 4.1 – 4.3. Værkstedsområde A omfatter bebyggelserne Fløng og Hedehusene i Høje Tåstrup kommune, mens værkstedsområde B omfatter Glostrup og den østlige del af Albertslund i området nord for jernbanen København – Roskilde. Udstrækningen af områderne er ikke nøjagtigt defineret, men omfatter hver ca. 12 km<sup>2</sup>. Områderne er udvalgt ud fra følgende overordnede krav:

- Højt prioriteret grundvandsområde (OSD, OD med betydende vandindvinding)
- Området kortlagt eller kortlægningsarbejdet er igangsat
- Området omfatter forureningsfaner i kalk
- Området er relevant ift. udfordringen med at risikovurdere faner i kalk
- Førstkommende kalktype er repræsentativ for større geografisk område

### 6.1 Bryozokalken i værkstedsområderne

I værkstedsområderne er der ganske få gode data om kalken, da der ikke er kendskab til mere end 3 kerneboringer og ingen udgravninger, hvor kalken har været blottet. Det er derfor kun muligt at ekstrapolere information om sprækker, sprækkeretninger, bryozobanker mv. fra andre lokaliteter, hvor disse forhold kan iagttages.

Kalken i værkstedsområderne er typisk beskrevet som bryozokalk eller kalksandkalk (se f.eks. Københavns Amt, 2002). Det forventes derfor at kalken tilhører Stevns Klint Formationen (Figur 4.3). Foreløbige resultater af biostratigrafiske analyser viser at kalken ved Naverland 26 i Albertslund tilhører coccolith-subzone NNTp2F (Varol, 1998), hvilket også svarer til den nederste del af Zone 5 (Thomsen, 1995) (pers. komm. Jakobsen P.R., 2014). Bryozokalken i værkstedsområdet ved Albertslund ligger således omkring grænsen mellem Mellem og Øvre bankekompleks.

I værkstedsområdet ved Hedehusene består kalken sandsynligvis af København Kalk Formationen i den øverste del (Figur 4.3). Forekomsten af København Kalk i dette område er ikke verificeret ved

I blotninger i bryozokalken findes der bryozobanker, og det forventes at der også findes bryozobanker i værkstedsområderne. De nærmeste synlige banker findes i Karlstrup, hvor bankerne er asymmetriske, hvilket også forventes i værkstedsområderne. Bankeformerne må dog forventes at variere som f.eks. ses på Figur 4.8, ligesom retningen af bankerne formodes at være VNV-ØSØ.

Som beskrevet i afsnit 4.2.2 har det ikke kunnet lade sig gøre at opstille en egentlig logstratigrafi i bryozokalken. Dog er det muligt at følge lokale horisonter og markører på "kildeplads skala". I nærheden af værkstedsområderne, ved Taastrup, har tidligere undersøgelser (Københavns Amt, 2002b), kunnet følge strømningszoner i kalken over en

lignende afstand. I afgrænsede områder er det derfor muligt at der findes lignende lokalt udstrakte strømningszoner og zoner med ensartet log-markører.

Da kalken i værkstedsområdet ved Hedehusene består af København Kalk, er det sandsynligt at logmarkører i dette område kan følges over længere afstande.

I værkstedsområderne er der ikke konstateret egentlige gennemgående forkastninger (Figur 4.14). I området ved Albertslund er der en mindre forkastning i nord-sydgående retning (NNV-SSØ) tæt på den sydlige afgrænsning af området. Parallelt med denne mindre forkastning findes flere forkastninger øst for området ved Albertslund, og mellem værkstedsområderne findes en gennemgående forkastning med samme retning. Nord for begge områder løber en forkastning i øst-vestgående retning (VSV-ØNØ). De vertikale og subvertikale sprækker forventes at have samme retning som de overordnede forkastninger. I værkstedsområderne forventes de dominerende retninger af de vertikale sprækker at være NNV-SSØ, idet de fleste forkastninger løber i denne retning. Indflydelsen fra den øst-vestgående forkastning er ukendt, men der kan også forekomme sprækker med denne orientering. De horisontale og subhorisontale sprækker forventes at følge bryozobankestrukturen, men da der også optræder gennemgående hardgrounds i bryozokalken kan der også forekomme mere gennemgående sprækker. Afstanden mellem sprækkerne og sprækkeaperturen forventes at være som vist i Tabel 4.1. I området ved Hedehusene, forventes de subhorisontale sprækker i København Kalken at følge lagdelingen.

Fra vestegnen har vi ikke kendskab til erfaringer fra udgravninger i bryozokalk, så det eneste sammenligningsgrundlag er de få kerneboringer vist i Tabel 5.1. Heraf fremgår, at vestegnskalken viser noget højere kernetab, samt noget lavere andel af hård kalk (H4) og mere flint (H5), end kalken i Malmö.

Det underjordiske landskab der udgøres af kalkoverfladen er forskelligt i de to værkstedsområder (bilag 4.2). I området ved Albertslund er kalkoverfladen ret jævn og hældes mod syd. Kalkoverfladen ligger mellem kote 0 m og kote 15 m i dette område. I området ved Hedehusene har kalkoverfladen flere lokale højdepunkter over kote 20 og den ligger mellem kote 5 m og kote 25 m.

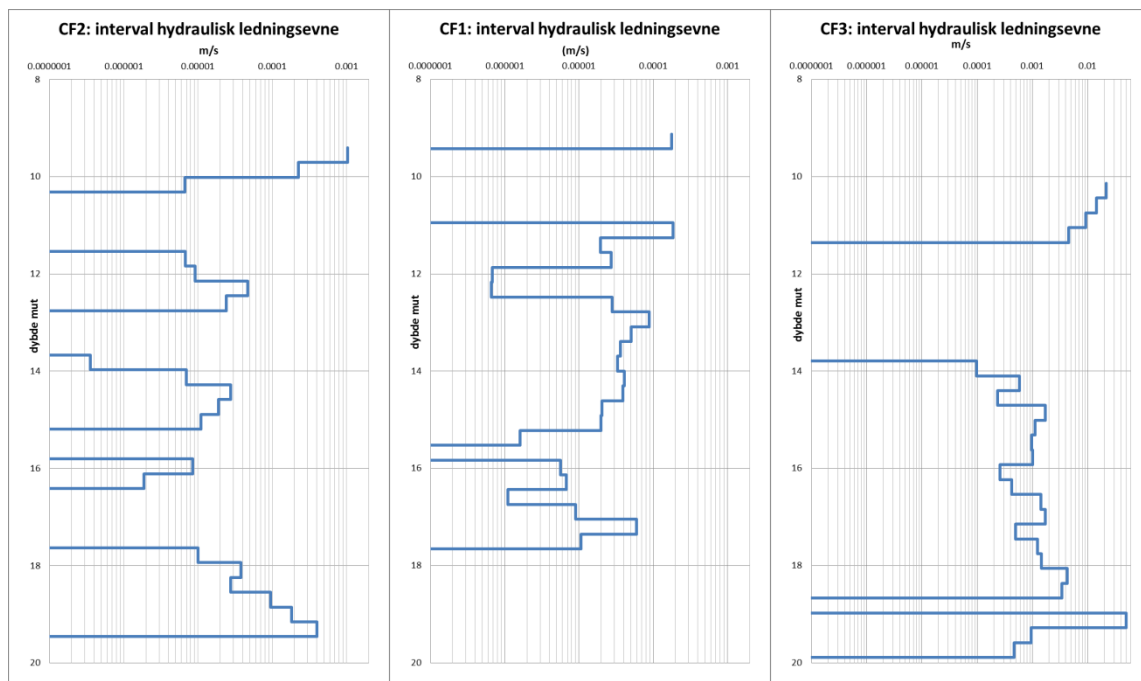
Dybden til kalkoverfladen er beregnet ud fra kalkoverfladens kote (bilag 4.2) samt terrænkoten. Resultatet er vist i bilag 6.1, der viser dybden til kalkoverfladen i meter. I værkstedsområdet ved Albertslund ligger kalkoverfladen i ret ensartet dybde, typisk mellem 5 m og 10 m u.t. I værkstedsområdet ved Hedehusene ligger kalkoverfladen lidt dybere og der er mere variation i dybden. Kalkoverfladen ligger her typisk mellem 5 m og 20 m u. t.

## 6.2 Hydrauliske forhold

### 6.2.1 Porøsitet

Der er kun enkelte direkte bestemmelser af porøsiteten (matrixporøsitet) på intakte kernestykker (plugs) fra værkstedsområderne, nemlig fra undersøgelserne på Naverland 26. For at supplere dem er der inddraget data fra flere andre undersøgelser af det der litologisk set er kalksandskalk som både er københavnskalk og bryozokalk. De nærmeste data er fra Brøndby og lidt længere væk Lyksager og Karlstrup og noget længere væk København, Øresund, Limnhamn, Stevns og Faxe. Data er plottet mod den hydrauliske ledningsevne i Figur 4.34, hvor data fra Vestegnen er i røde varianter.

### 6.2.2 Hydraulisk ledningsevne



Figur 6.1: Hydraulisk ledningsevne for intervaller i boring CF1-3 fra Naverland 26AB (bemærk den ændrede skala på CF3) bestemt ved hydraulisk profilering, hvor transmisiviteten beregnes ud fra hastigheden hvormed vandet i boringen fortrænges under udfyldning af boringen med en impermeabel membran.

Der er målt intervalspecifikke hydrauliske ledningsevner mellem pakkere på Naverland 26AB (Københavns Amt, 2002) værdierne som ligger mellem  $0,4 \times 10^{-4}$  og  $5 \times 10^{-4}$  m/s, er gengivet i tabel 4.2. Udover disse målinger er der fornyligt udført såkaldt hydraulisk profilering i 3 boringer på Naverland 26AB (Janniche et al., 2013), de målte profiler er samlet i Figur 6.1. Data fra intervalmålingerne i Tabel 4.3 viser den generelt større bulk hydrauliske ledningsevne i de øvre dele, dog viser data fra den hydrauliske profilering at der i dybereliggende intervaller enkelte steder kan være en endnu højere hydraulisk ledningsevne. Boringerne brugt til den hydrauliske profilering ligger mellem 10 og 30 meter fra boringerne K11 og K12 hvor de hydrauliske ledningsevner (Tabel 4.3) er målt for

intervaller mellem pakkere. Værdierne er meget forskellige, en del skyldes muligvis at man ved en pakkertest beslutter sig for et interval, og det interval kan omfatte både høje og meget lave hydrauliske ledningsevner som det fremgår af Figur 6.1. Derudover kan der, som det fremgår af Figur 6.1, være meget store forskelle indenfor kort afstand, også når der anvendes samme metode. Boringerne brugt til CF2 , -1 og -3 (Figur 6.1) ligger således i en trekant med en sidelængde på ca. 10 m.

### 6.2.3 Hydrauliske parametre i værkstedsområderne

Ud fra de ganske få data der ligger fra Vestegnen ser det ud til at kalken er sammenlignelig med den kalk der ligger SV for ved Karlstrup, mens resultater fra Stevns og Faxe ligner mindre (Figur 4.34). Desværre er det vanskeligt umiddelbart at anvende denne information fordi variationen i både bulk og matrix porøsitet og hydraulisk ledningsevne begge steder er meget stor. Variationen inden for den samme lokalitet er typisk lige så stor som eller større end variationen lokaliteterne i mellem. Ved hjælp af modeller der spænder over det kendte interval af de vigtigste parametre kan det formentlig lade sig gøre at afgrænse vigtige parametre såsom vandtransporthastigheder og graden af udveksling af stof mellem sprækker og matrix.

Den overordnede bulk hydrauliske ledningsevne kan bedømmes ud fra transmissiviteten i kalken (bilag 4.2) sammenholdt med tykkelsen af den hydrauliske aktive del af kalken. Tykkelsen sættes typisk til 10 m, men der vil ofte også kunne findes strømningszoner dybere i kalken end 10 m, ned til bunden af bryozokalken (Klitten & Wittrup, 2006). Hvis data fra Klitten & Wittrup (2006)'s zone 4 (Syd for Sønderø Dalen) summeres opnås ca. 75 % af strømningen i de øverste 20 m til 30 m af kalken.

Hvis magasintykkelsen sættes til 25 m med transmissivitetsværdierne på bilag 4.1 finder man i Albertslund gennemsnitlige hydrauliske ledningsevner mellem  $4 \times 10^{-5}$  m/s og  $2 \times 10^{-4}$  m/s (transmissivitet mellem  $1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s og  $5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s). I værkstedsområdet ved Hedehusene er den anslåede hydrauliske ledningsevne mellem  $8 \times 10^{-5}$  m/s og  $8 \times 10^{-4}$  m/s (transmissivitet mellem  $2 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s og  $20 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s). Disse værdier er i fin overensstemmelse med de konstaterede værdier på Naverland 26 og værdier fra øvrige lokaliteter på Sjælland (se afsnit 4.8.2).

### 6.2.4 Potentialeforhold

Flere steder i værkstedsområderne er der mulighed for at grundvandspejlet ligger under kalkoverfladen, og der er således mulighed for at der kan findes umættet kalk. Hvis der findes en umættet zone i kalken har dette betydning for undersøgelsesmetoder (f.eks. valg af boremetode for at opnå vandprøve), men også forureningsspredningen i den umættede zone kan være anderledes end i kvartære aflejringer. På baggrund af Region Hovedstadens potentialekort fra 2009 og kalkoverfladens kote (bilag 4.1) er der udarbejdet et kort der viser hvor på Københavns vestegn der er mulighed for umættet kalk (bilag 6.2). På grund af bl.a. årstidsvariationer (f.eks. ca. 1 m ved Naverland 26, Janniche et al., 2013) og variationer i indvindingsmønstre kan tilstedeværelsen af umættede forhold i kalken ændre sig. Områder hvor forskellen mellem grundvandspotentialet og



kalkoverfladen er mindre en 1 m, er derfor tegnet på kortet som områder, hvor det er usikkert om der kan optræde umættet kalk.

Ved at sammenligne med bilag 4.1 ser man at områder, hvor der er mulighed for at finde umættet kalk, typisk falder sammen med områder, hvor kalken er højtstående, hvilket flere steder falder sammen med lave områder på potentiale kortet (sænkningstragte). Dette er f.eks. tilfældet i værkstedsområdet ved Hedehusene.

## 7 Typemodel

I dette kapitel beskrives opbygningen af en typemodel for strømning og stoftransport i kalklagene, som derefter illustreres med eksempler fra de to værkstedsområder, Albertslund og Hedehusene. Typemodellen skal først og fremmest anvendes til at foretage en risikovurdering af en given forurening, men vil formentlig også ofte kunne bruges ved design og projektering af afværgeforanstaltninger. Typemodellen er opdelt i en

- *tabel*, som skal kvantificere de parametre som har betydning for modellen, en
- *tekst*, som dels skal udgøre en forståelsesramme for modellen, dels fungere som supplement til og uddybning af den kvantitative del og en
- *profiltegning*, der illustrerer de væsentlige strukturer og elementer beskrevet i tekst og tabel

### 7.1 Strømning i kalk

Ud fra de tilgængelige data må bryozokalk anses for at være en af de dominerende kalkbjergarter i området omkring de to værkstedsområder. Bryozokalk er overvejende opbygget af aflange eller grenede bryozofragmenter i mm- til cm-størrelse aflejret sammen med finkortet kalkslam i hvælvede banker dannet ved de koloni-dannende bryozoorganismers vækst. Under denne vækst vil bryozobankerne vokse sig højere, samtidig med de forskydes sidelæns, især styret af havstrømmes styrke og retning, og mængden af føde i vandet. Ofte vil bankerne ses at afskære hinanden langs erosionsflader, se Figur 4.11. Bryozobanker er normalt altid ovale. Bankerne på Figur 4.12 fra N for Saltholm er ca. dobbelt så lange som de er brede, med en længde på minimum 80 til 150 m.

Bryozobankerne fremstår lagdelte, opbygget af bænke med vekslende hårdhed og flintindhold, og på grænsen mellem de enkelte bænke er der med tiden opstået sprækker. I kalkbjergarter vil strømning i udpræget grad foregå langs sprækkerne, både de vandrette og lodrette. I bryozokalk foregår strømning derfor overvejende langs (de lagparallelle) sprækker, dvs. langs skrånende eller bølgede flader, som følger bryozobankernes lagdeling. Dette i modsætning til både skrivekridt og København Kalk, som har en bænking/opsprækning, og dermed strømning, langs plane (vandrette) sprækker. Og derfor må strømning i bryozokalk opbygget af hvælvede banker anses for at foregå efter et mere komplekst mønster end strømning i kalk opbygget af vandrette bænke.

I København Kalk er strømningsmønsteret påvirket af lagdelingen der kan følges over længere afstande. De subhorizontale sprækkerne forventes at følge lagdelingen og danne et subortogonalt mønster sammen med de subvertikale sprækker.

I den glacialt forstyrrede del af kalken gælder særlige forhold for strømning, idet dette lag af nogle meters tykkelse øverst under istidslagene er noget mere opsprækket og forstyrret end den underliggende kalk. Især må sprækkepermeabiliteten forventes at være en del højere end i kalken længere nede, ligesom bryozobankernes indflydelse på strømmingen kan være mindre.

Overordnet set må man på den københavnske vestegn regne med, at i en almindelig lagserie falder de hydrauliske egenskaber i (mindst) 4 grupper, afhængig af de geologiske forhold, se Tabel 7.1.

*Tabel 7.1. Overordnede hydrauliske egenskaber for værkstedsområderne.*

Lag	Tykkelse (m)	Hydrauliske egenskaber
Kvartære lag	5-15	meget varierende
glacialt forstyrret kalk	0-10	større grad af opsprækning og dermed permeabilitet end i underliggende kalk
kalksandkalk	0 - 30	sandet og slammet kalk, som forekommer i bænkede lag, med moderat matrixpermeabilitet og væsentlig højere sprækkepermeabilitet; formentlig strømningsmønster gennem de subortogonale sprækkeflader langs kalkens interne lagdeling og de sub-vertikale tektonisk betingede sprækker
bryozokalk	30 - 60	sandet og slammet kalk, som forekommer i hvælvede banke-strukturer, med moderat matrixpermeabilitet og væsentlig højere sprækkepermeabilitet; formentlig komplekst strømningsmønster gennem de hvælvede, bølgede og afskårne sprækkeflader langs kalkens interne banke-lagdeling, samt sub-vertikale tektonisk betingede sprækker

## 7.2 Parametre

De parametre som er bestemmende for den overordnede strømning gennem en aflejring af bryozokalk er opstillet nedenfor i Tabel 7.2.

*Tabel 7.2. Typemodel-parametre.*

Parameter	Beskrivelse, eksempler på data	Parametertype
Kalkens litologi	bryozokalk, slamkalk, kalksandkalk	tekst
Kalkens hårdhed	Procentfordeling H1-H5	tal (%)
Flintindhold	tykkelse og form af lag/noduler;	tekst og tal

	procentandel flint	
Kalkens struktur	bankeform, -højde, -orientering; andel af bryozokalk i forhold til slamkalk	tekst
Glacialt forstyrret kalk	Kerneboring: prøvebeskrivelse, prø- vekvalitet, kerneprocent, placering af foringsrør DTH-boring: prøvebeskrivelse televiwer-logs: identificerede sprækker	tekst
Vandrette sprækker	Tæthed, længde, åbning (apertur); vurderes bedst fra televiwer-logs og flowlogs, ellers fra kerneprøver	tal (m)
Lodrette sprækker	Tæthed, længde, åbning (apertur), orientering; vurderes bedst fra tele- viwer-logs og flowlogs, ellers fra kerneprøver	tal (m)
Forkastninger	Ud fra seismik og/eller pumpeforsøg	tekst
Excentricitet af sænk- ningstragte	Ud fra pumpeforsøg	tal (%)
Matrixpermeabilitet	Ud fra poro/perm-målinger, alterna- tivt måling af vådrumvægt, pumpe- forsøg	tal (m/s)
Sprækkepermeabilitet	Ud fra flowlogs, pumpeforsøg	tal (m/s)
Samlet permeabilitet	Ud fra vurdering, pumpeforsøg	tal (m/s)
Grundvandspejl	Måling i pejlerør	tal (m)
Grundvandsstrømning, gradient	Pejlinger, grundvandsmodel	tal (%)

Mange af disse parametre kan kun fastlægges med omtrentlig nøjagtighed, og for fleres vedkommende vil unøjagtigheden, med mindre der foretages meget omfattende forundersøgelser, være stor. For at kunne vurdere kvaliteten af en typemodell er det derfor hensigtsmæssigt, at usikkerheden på de forskellige numeriske parametre er angivet, og farve- og talskalaen i Tabel 7.3 foreslås benyttet hertil. Der kan være stor forskel på usikkerheden af de enkelte parametre, og det er derfor ikke umiddelbart muligt at hæfte kvantitative usikkerheder på de 4 kategorier.

Farvekode	Talkode
sikker værdi	[1]
mindre sikker værdi	[2]
usikker værdi	[3]
meget usikker værdi	[4]

Tabel 7.3. Farvekoder og talkoder for usikkerhed.

Tabel 7.4. Typemodel-skema, udfyldt med data for Naverland 26. Her kan med dybden anføres værdier og usikkerheder for de forskellige parametre, jf. Tabel 7.2 og Tabel 7.3.

Kommune: Albertslund Område: Naverland		Datagrundlag: Københavns Amt, 2002; Janniche et al. 2013		Udført af: MMR Dato: 2014-06-01	
Parameter					
Porøsitet		Ukendt		14% - 48%	
Grundvandsstrømning		Overvejende mod ØNØ		Overvejende mod ØNØ	
Grundvandsspejl		13,4 m – 14,4 m DVR90		13,4 m – 14,4 m DVR90	
Samlet permeabilitet		Ukendt		$0,32 \cdot 10^{-4} \times \text{m/s} - 8,22 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	
Sprækkepermeabilitet		Ukendt		$0,32 \cdot 10^{-4} \times \text{m/s} - 8,22 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	
Matrixpermeabilitet		Ukendt		$3,3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	
Anisotrop strømning og stoftransport		Ukendt		Ukendt	
Forkastninger		Ingen		Ingen	
Lodrette sprækker		Så mange mange så kalken kan opfattes som homogen?		Subvertikale, afstand 3-4 m, NNW-SSØ	
Vandrette sprækker		Så mange mange så kalken kan opfattes som homogen?		Stigende tæthed mod toppen, færrest i hård kalk (H5-H5).	
Glacialt forstyrret kalk		Ja, knust og blandet med kvartære aflejringer		Nej	
Kalkens struktur		Knust		Banker? 8 – 20 m u.t.	
Kalkens hårdhed		Ukendt		H1-H5, stigende indhold af H4-H5 mod bunden	
Kalkens litologi	Kvartære aflejringer	Knust bryozokalk og smeltevandssand		Bryozokalk	
Kote / Dybde	0 – 6,5 m u.t.: H1-H3	6,5 – 7,3 m u.t.: H4		7,3 m u.t. – 20 m u.t.: H5	

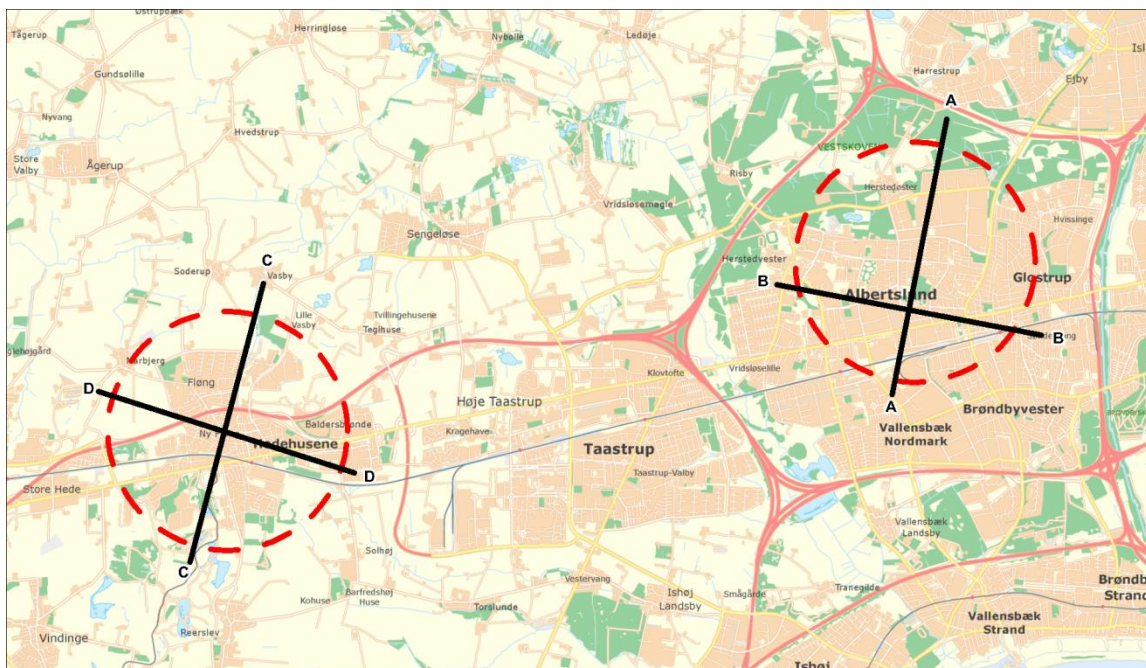


Ved hjælp af denne skala kan kvaliteten af typemodellens kvantitative del umiddelbart vurderes og danne grundlag for en vurdering af, hvor de væsentligste usikkerheder findes, og dermed hvor yderligere undersøgelser skal foretages eller hvilke parametre, der er kritiske ved projektering af afværgeanlæg.

De parametre for en lokalitet eller et område, der udgør en typemodel kan opstilles i skemaform sammen med den vurderede usikkerhed, f.eks. som det er vist i Tabel 7.4, hvor data for kalken ved Naverland 26 (Københavns Amt, 2002; Janniche et al. 2013) er opsummeret.

### 7.3 Værkstedsområderne ved Albertslund og Hedehusene

Den geologiske viden der sammenfattes i typemodellerne for værkstedsområderne er beskrevet i tekst i kapitel 6 og afsnit 7.1. Typemodellskemaet i Tabel 7.4, der opsummerer parametrene i typemodellen er udfyldt i Tabel 7.5 og Tabel 7.6, for værkstedsområderne ved Albertslund og Hedehusene hhv. Typemodellerne for værkstedsområderne er illustreret i profilerne AA, BB, CC og DD (Figur 7.2 til Figur 7.5). Placeringen af profilerne er vist i Figur 7.1.



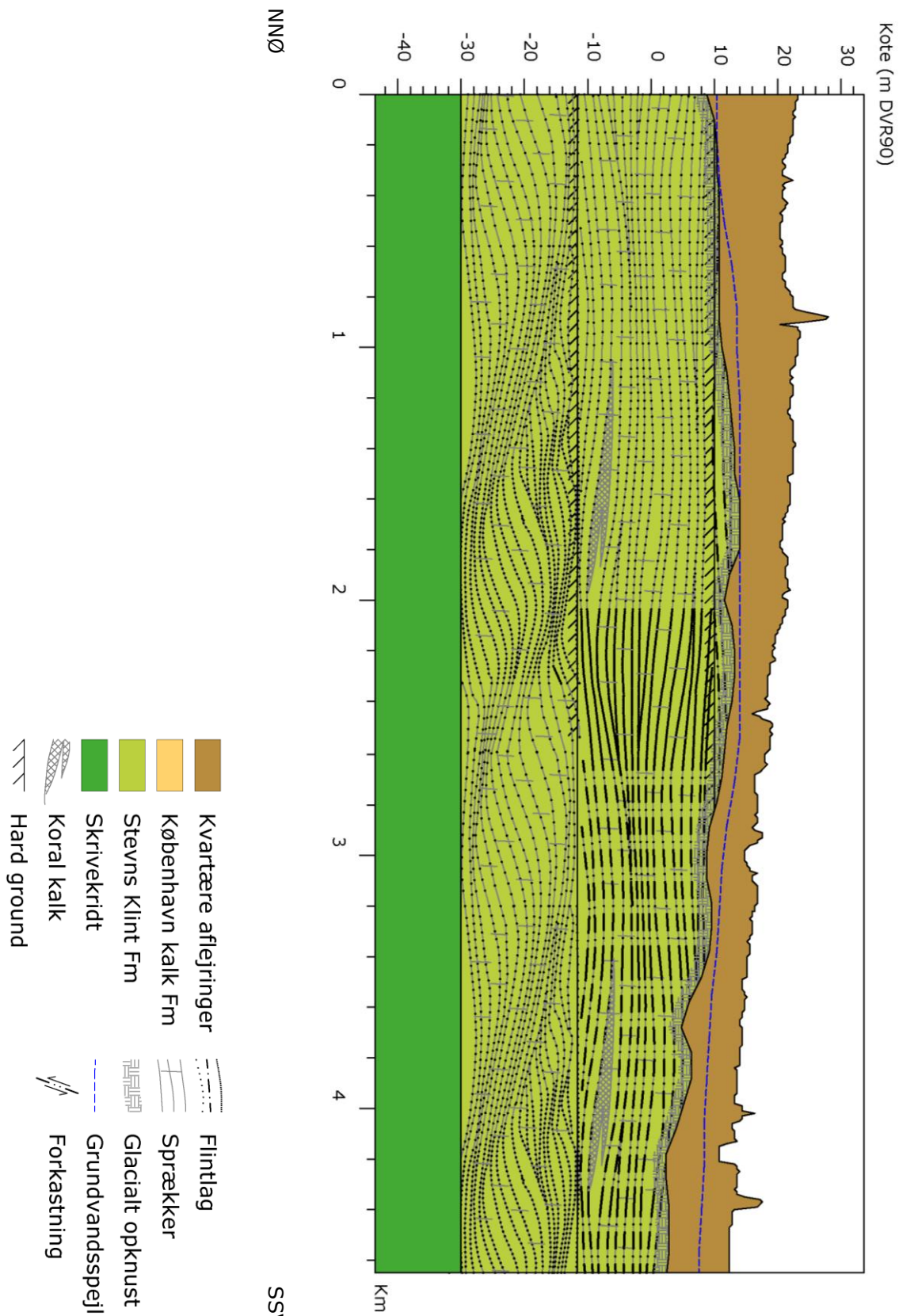
Figur 7.1. Placering af typemodellprofilerne AA – DD i værkstedsområderne.

Tabel 7.5. Typemodel for værkstedsområdet ved Albertslund.

Kommune: Albertslund, Glos-trup og Brøndby Område: Albertslund		Datagrundlag: Denne rapport	Udført af: Dato:
Parameter	Beskrivelse	Usik.	
Porøsitet	10 % - 30 %, sprækkeporøsitet, 1 % - 1,5 %	[2]	
Grundvandsstrømning	Et grundvandskkel findes i den nordlige del, her fra strømning mod nord og syd	[1]	
Grundvandsspejl	Ca. kote 7 m til 14,5 m, mindre områder med umættet kalk	[1]	
Samlet permeabilitet	$4 \times 10^{-5}$ m/s til $2 \times 10^{-4}$ m/s i øverste 25 m	[2]	
Sprækkepermeabilitet	1 glacialt forstyrret del: $0,4 \times 10^{-3}$ m/s til $2 \times 10^{-3}$ m/s $0,4 \times 10^{-4}$ m/s til $2 \times 10^{-4}$ m/s gennemsnit i øverste 25 m.	[4] [3]	
Matrixpermeabilitet	$0,05 \times 10^{-8}$ m/s til $1 \times 10^{-8}$ m/s	[3]	
Anisotrop strømning og stoffransport	Ukendt	[4]	
Forkastninger	1 i den sydlige del, retning: NNW-SSØ	[3]	
Lodrette sprækker	Forkastningsstyret, dominante retninger: NNW-SSØ og VSV-ØNØ, sprækkeafstand: 0,1 m - 10 m, hydraulisk apertur: 0,01 mm - 1 mm	[4]	
Vandrette sprækker	Langs bankestrukturer eller lagparallelle, sprækkeafstand: 0,1 m - 10 m, hydraulisk apertur: 0,01 mm - 1 mm	[4]	
Glacialt forstyrret kalk	1 m i toppen af kalken	[3]	
Kalkens struktur	Overvejende banker i retning VNV-ØSØ med mere bænket kalk, fordeling ukendt	[4]	
Kalkens hårdhed	H1: 1 %, H2: 21 %, H3: 20 %, H4: 25 %, H5: 15 %, Kernetab (mest H2): 18 %	[2]	
Kalkens litologi	Overvejende bryozokalk (Stevens Klint Fm), forekomst af kalksandskalk ukendt	[4]	
Kote / Dybde	Top: kote +5 m - +15 m / 5 - 15 m u.t. Bund: kote -40 m - -20 m	[1]	

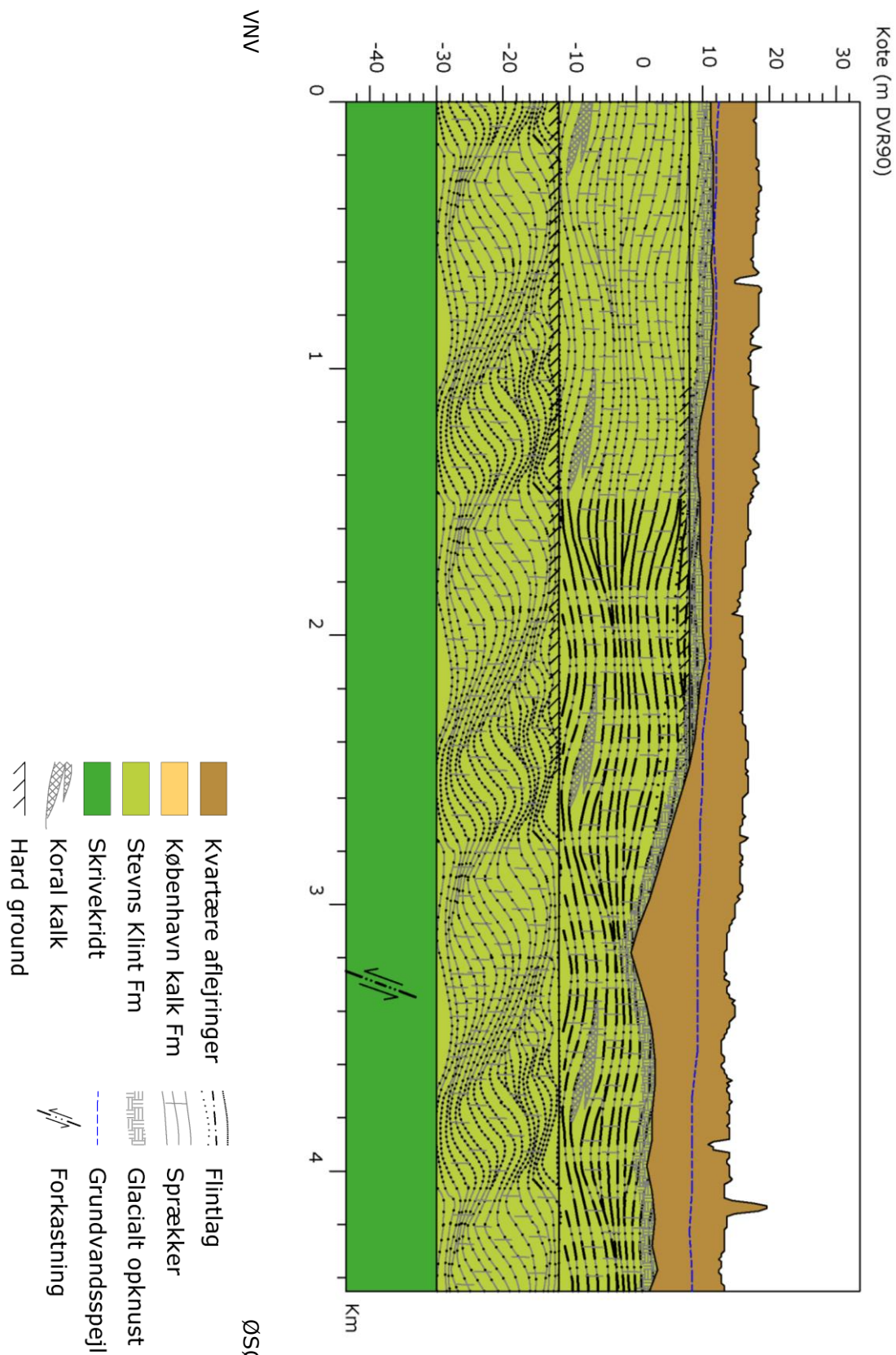
Tabel 7.6. Typemodel for den øverste del af kalken i værkstedsområdet ved Hedehusene.

Kommune: Høje-Taastrup Område: Hedehusene		Datagrundlag: Denne rapport	Udført af: Dato:
Parameter	Beskrivelse		Usik.
Porøsitet	10 % - 30 %, sprækkeporøsitet, 1 % - 1,5 %		[2]
Grundvandsstrømning	En sænkningsegle findes centralt i området, overvejende strømning mod nord		[1]
Grundvandsspejl	Ca. kote 16,5 m til 19 m, en del områder med umættet kalk, op til 5 m		[1]
Samlet permeabilitet	$0,8 \times 10^{-4}$ m/s til $8 \times 10^{-4}$ m/s i øverste 25 m		[2]
Sprækkepermeabilitet	I glacialt forstyret del: $0,8 \times 10^{-3}$ m/s til $8 \times 10^{-3}$ m/s $0,8 \times 10^{-4}$ m/s til $8 \times 10^{-4}$ m/s gennemsnit i øverste 25 m.		[4] [3]
Matrixpermeabilitet	$0,05 \times 10^{-8}$ m/s til $1 \times 10^{-8}$ m/s		[4]
Anisotrop strømning og stoftransport	Ukendt		[4]
Forkastninger	Ingen		[2]
Lodrette sprækker	Forkastningsstyret, dominante retninger: NNW-SSØ og VSV-ØNØ, sprækkeafstand: 0,1 m - 10 m, hydraulisk apertur: 0,01 mm - 1 mm		[4]
Vandrette sprækker	Lagparallelle, sprækkeafstand: 0,1 m - 10 m, hydraulisk apertur: 0,01 mm - 1 mm		[4]
Glacialt forstyret kalk	0-10 m i toppen af kalken		[4]
Kalkens struktur	Lagdelt, med flintlag, fordeling ukendt		[4]
Kalkens hårdhed	H1: 1 %, H2: 21 %, H3: 20 %, H4: 25 %, H5: 15 %, Kernetab (mest H2): 18 %		[3]
Kalkens litologi	Kalksandskalk, (København Kalk Fm), bryozokalk? fordeling ukendt		[4]
Kote / Dybde	Top: kote +5 m - +25 m / 5 - 25 m u.t. Bund: kote -10 m - -20 m		[1]

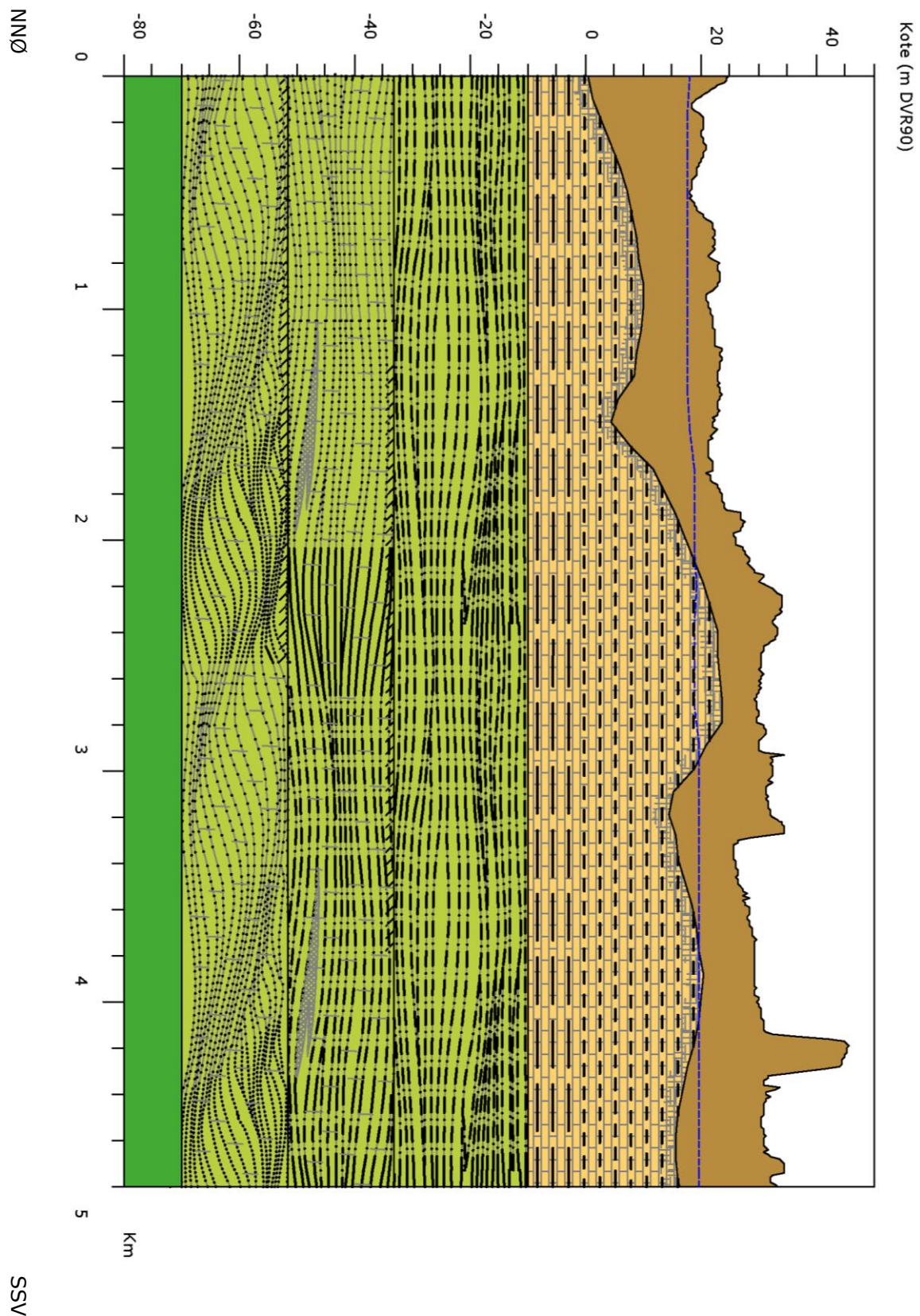


Figur 7.2. Profil AA: Albertslund NNØ-SSV. Strukturerne (sprækker, flintlag mv.) i kalklagene er skitserede for at give en indtryk af deres indbyrdes afhængighed og fordeling, og de er således ikke til skala.



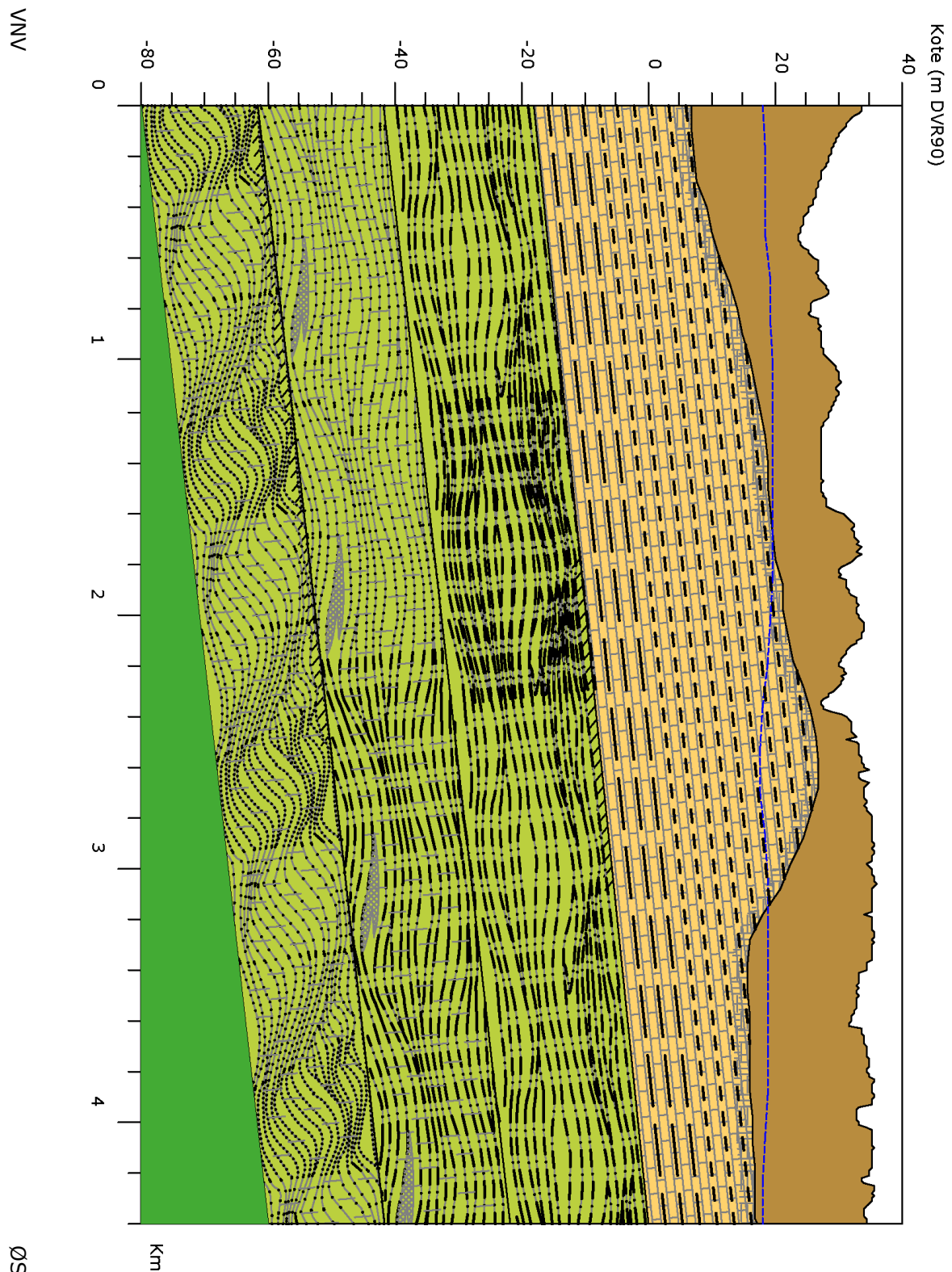


Figur 7.3. Profil BB: Albertslund NNØ-SSV. Strukturerne (sprækker, flintlag mv.) i kalklagene er skitserede for at give en indtryk af deres indbyrdes afhængighed og fordeling, og de er således ikke til skala.



Figur 7.4. Profil CC: Hedehusene NNØ-SSV. Strukturerne (sprækker, flintlag mv.) i kalklagene er skitserede for at give en indtryk af deres indbyrdes afhængighed og fordeling, og de er således ikke til skala.





Figur 7.5. Profil DD: Hedehusene VNV-ØSØ. Strukturerne (sprækker, flintlag mv.) i kalklagene er skitserede for at give en indtryk af deres indbyrdes afhængighed og fordeling, og de er således ikke til skala.

## 8 anbefalinger

Som det er fremgået adskillige steder i denne rapport, er der mange aspekter mht strømning og stoftransport i kalklagene på den københavnske vestegn, herunder værkstedsområderne, som for nærværende er ret dårligt belyst. I typemodellskemaerne er de vurderingsmæssigt usikre parametre tildelt kategorierne [3] og [4]. Hvis undersøgelser og afværgeprojekter inden for værkstedsområderne skal kunne projekteres optimalt, vil det forudsætte, at disse forhold bliver bedre belyst. I Tabel 8.1 nedenfor har vi anført et antal forslag hertil, samt hvilke parametre forslagene retter sig mod.

*Tabel 8.1 Liste over forslag til konkrete undersøgelsesmetoder, der retter sig mod de mest usikre forhold, sammen med et kortfattet overordnet formål.*

<b>Undersøgelser</b>	<b>Formål</b>
Kerneboringer	Bedre beskrivelser af kalkens litologiske variationer, flintindhold mv.
Niveauspecifikke pumpeforsøg f.eks. i korte filtre i grænsen mellem kvartære lag og kalken.	Hydraulisk beskrivelse af den glacialt forstyrrede zone i toppen af kalken med højere datatæthed.
Pumpeforsøg med observationsboringer evt. kombineret med tracerforsøg, f.eks. kan den naturlige turbiditet benyttes som tracer.	Hydraulisk beskrivelse af kalkens dobbeltporøse egenskaber, herunder sprækkeegenskaber og sprækkegeometri.
Geofysiske logs, herunder optisk og akustisk televiwer	Beskrivelse af sprækker og flintlag i kalken, størrelse, hældning, tæthed mv.
Tracerforsøg	Beskrivelse af stoftransport hastigheder, sprækkeegenskaber mv.
Undersøgelser af kalkens sorptionsegenskaber.	Bedre forståelse for fordelingen af forurenede stoffer i kalken, varierer det med f.eks. hærdningsgrad?
Integreret tolkning af geologi og forureningsspredning f.eks. med inddragelse af NEMLA	Kan målinger af forurening med meget høj datatæthed forbedre geologiforståelsen?
Biostratigrafiske undersøgelser	Fastlæggelse af stratigrafisk niveau til overordnet tolkning af geologiske forhold, herunder tykkelse af bryzokalk, bankeforekomst mv.

Kalklagene i de to værkstedsområder bør systematisk undersøges nærmere, med henblik på at kunne indplacere dem biostratigrafisk i danielkalken, dels bryzokalken fra Stevns Klint Formationen og kalksandskalken fra København Kalk Formationen, se Figur 4.4. Desuden bør det undersøges, i første omgang måske vha. gammalogs eller televiwer-



logs i et antal nærliggende borer, om bryozokalken forekommer i bankestrukturer, hvis størrelse og retning i givet fald må forsøges bestemt.

Endnu vigtigere er det, inden for værkstedsområderne at få kalkens hydrauliske egenskaber (jf. afsnit 4.8) bestemt så tilstrækkelig nøjagtigt, herunder få beskrevet tykkelse og hydrauliske egenskaber for den øvre, glacialt forstyrrede zone.

Standardværdierne for kalk i JAGG regnearket, der benyttes som værktøj til risikovurdering (Miljøstyrelsen, 1998) er 15 % for den effektive porøsitet og  $1 \times 10^{-7}$  m/s for den hydrauliske ledningsevne. Som beskrevet i afs. 4.8 er typiske værdier på 1,5 % for den effektive porøsitet, svarende til sprækkeporøsiteten, og  $1 \times 10^{-5}$  m/s til  $1 \times 10^{-4}$  m/s for porøsiteten, svarende til bulk hydraulisk ledningsevne. Hvis disse værdier benyttes i stedet for JAGG's standardværdier opnås en forøgelse af porevandshastigheden på en faktor 1000 til 10000. På grund af denne meget store forskel bør beregninger foretaget i JAGG med henblik på risikovurdering, ikke benyttes til vurdering af transporthastigheder f.eks. med henblik på udbredelsen af forureningsfaner.

Optimering af afværgemetoder afhænger i høj grad af de forurenendes stoffer opførsel i, og samspil med kalklagene, og en større forståelse for disse forhold vil i fremtiden kunne føre til bedre afværgemetoder. Evt. kunne, hvis det er teknisk og økonomisk muligt, en midlertidig løsning overvejes, hvor pump-and-treat borer kombineres med et anlæg til jordvarme/fjernkøling, sådan at den herved producerede jordvarme-energi kan medvirke til at finansiere dyre afværgepumpninger.

## 9 Ordliste

<b>Udtryk</b>	<b>Forklaring</b>
dextral forkastning	sideværts forkastning hvor lagene på den fjerne side af forkastningen, betragtet hen over denne, er forskudt mod højre (det modsatte, forskudt mod venstre, kaldes sinistral forkastning)
formation	den grundlæggende geologiske enhed ved stratigrafisk inddeling af jordlag, omfattende alle de lag som er dannet inden for et naturligt afgrænset geologisk rum i løbet af en bestemt geologisk begivenhed; fx alle lagene i en bestemt flods delta, eller alle de lag, både smeltevandsaflejringer og moræner, som er afsat under et bestemt gletscherfremstød; en formation kan underinddeles i led
frit magasin	magasin som ikke er 'fyldt', dvs med grundvandsspejl under magasinets overside
hydraulisk gradient	grundvandsspejlets hældning
hydraulisk ledningsevne	en aflejrings evne til at lade sig gennemstrømme af en bestemt væske, typisk grundvand
inversion	i sedimentbassiner, som fx Nordsøbassinet eller det danske bassin, vil havbunden normalt synke ind, så der hele tiden bliver plads til at mere sediment kan aflejres; ved en inversion løftes bassinbunden op, ofte pga tektoniske bevægelser, og aflejringen vil afbrydes eller ændre karakter
led (eng: member)	under-enhed inden for stratigrafisk inddeling af jordlag, omfattende lag som omtrentligt har samme sammensætning og dannelsesmåde; fx de usorterede jordlag svarende til morænen fra et bestemt isfremstød, eller smeltevandsaflejringerne fra isfremstødet smeltevandsfloder; flere led kan samles i en formation, fx alle de aflejringer som stammer fra et bestemt gletscherfremstød
lithologi	fysiske karakteristika for et jord- eller fjeldmateriale, i form af fx mineralogisk sammensætning, kornstørrelse, farve, hårdhed osv.
magasin	permeabelt vandførende lag, typisk af smeltevandssand, -grus eller kalk

magasintal	
Mesozoikum	tidsperiode fra 251 til 66 mill. år siden, omfattende perioderne Trias, Jura og Kridt
orogenese	bjergkædedannelse
pakkertest	Pumpeforsøg hvor dele af boringen er isoleret med en eller flere gummipakninger
Palæozoikum	tidsperioden fra 542 til 251 mill. år siden, omfattende perioderne Kambrium, Ordovicium, Devon, Karbon og Perm
permeabilitet	en aflejrings evne til at lade sig gennemstrømme af væske eller gas, uanset densitet og viskositet; udelukkende et mål for porerummenes størrelse, antal og rumlige forgrening
pumpeforsøg	forsøg hvor man i jord/fjeld-lagene omkring en boring måler evnen til vandgennemstrømning; normalt udført ved at man
slugtest	type af pumpeforsøg hvor man ved hurtige ændringer af vandspejlet i boringen kan undersøge lagene nærmest borehullets væg
sorption	den mekanisme at forureningsbestanddele, som er trængt ned gennem jorden, binder sig til jordpartikler
specifik ydelse (=specifik kapacitet?)	oppumpet vandmængde pr. m sænkning af vandspejlet i en boring
spændt magasin	'fyldt' magasin, hvis grundvandsspejl ligger over magasinets overside
stratigrafi ('lagbeskrivelse')	underdisciplin inden for geologien, som har til formål at inddele jord og fjeld i lag, med hver sin karakteristiske sammensætning og dannelsesmåde; i lithostratigrafi laver man hovedsageligt inddelingen ud fra lagenes mineralogiske og kornstørrelsesmæssige sammensætning, mens man i biostratigrafi laver inddelingen ud fra lagenes indhold af fossilrester, som oftest kan dateres ret præcist
transmissivitet	den samlede hydrauliske ledningsevne for (en bestemt del af) et grundvandsmagasin

transpressionel kompres- sion	
----------------------------------	--

## 10 Referencer

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.

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.

Brettmann, K.L., K.H. Jensen, Jakobsen, R. (1993): Tracer test in fractured chalk, 2. Numerical analysis

Brotzen, F. 1959: On tylocidaris species (Echinoides) and the stratigraphy of the Danian of Sweden. SGU Ser. C, 571, 1-81.

DGI 1999: "Malmö. Citytunneln. Boring Campaign 1998. Geological Model". Danish Geotechnical Institute job 155 16214, Report no. 1, 1999-08-05, 33 pp samt bilag

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.

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, Sjæfergården 8. nov. 2006

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

Jacobsen, P.R. 1994: Geological description of the Lernacken II test pit. DGU/PRJ 08.02.94, 3 pp

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 opsprækket kalkbjergart. Rapport H9, Lossepladsprojektet, Miljøstyrelsen.



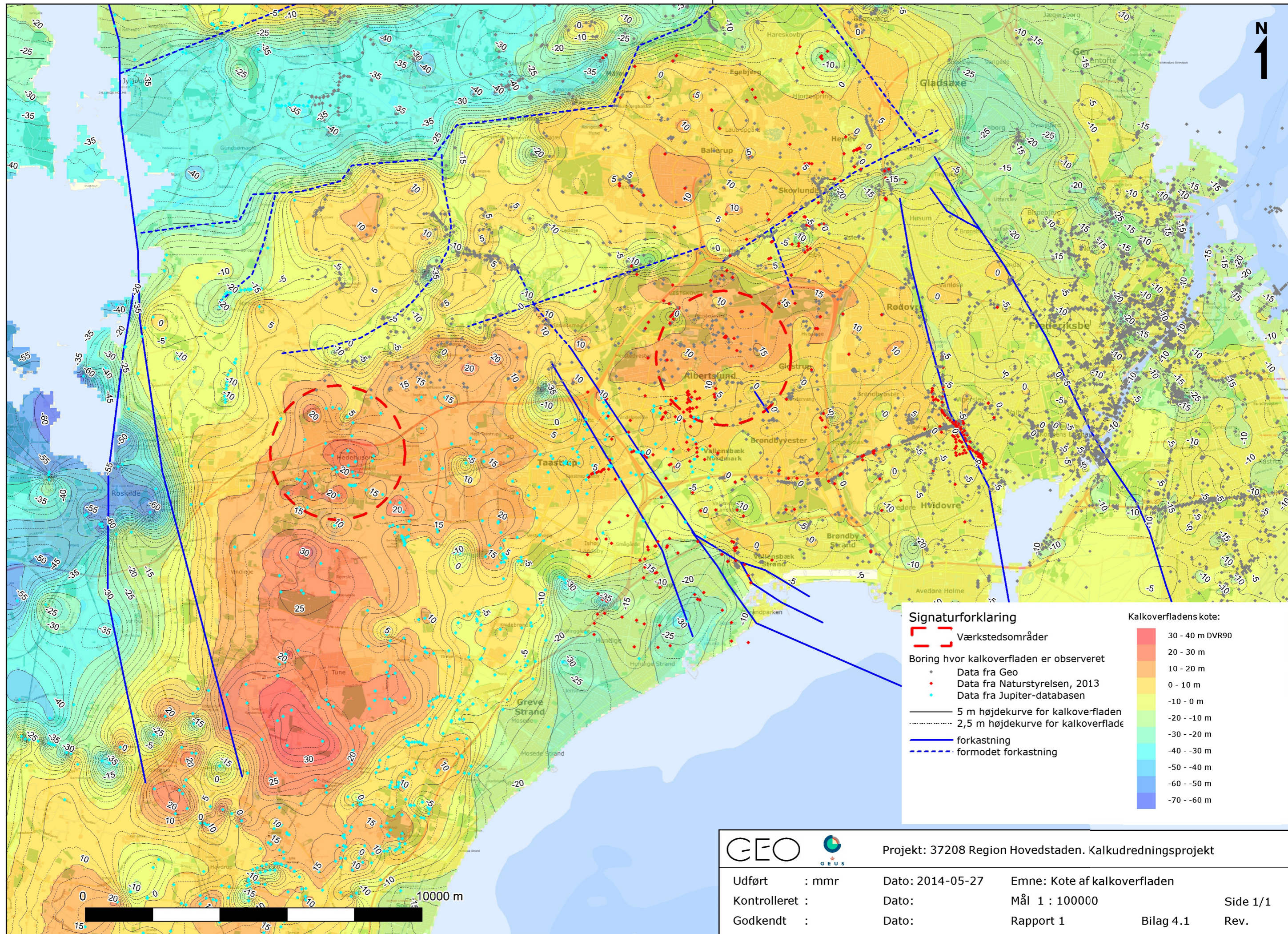
- Jakobsen, R., K.H. Jensen, Brettmann, K.L. (1993): Tracer test in fractured chalk, 1. Experimental design and results
- Janniche, G.S., Fjordbøge, A.S., Broholm M.M. (2013): DNAPL i moræner og kalk – vurdering af undersøgelsesmetoder og konceptuel modeludvikling, Naverland 26AB, Albertslund, DTU Miljø
- 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.
- Kelstrup, N. 1995: Geologisk kort over Danmark 1:50.000. Kortbladet 1312 IV Tommerup, Geologisk basisdatakort. DGU Kortserie nr. 39.
- Kirkegaard, M. & Madsen, B. 1996? (årstal usikkert): Styrkeforholdene i den øverste bundmoræne - set i relation til prækvartæroverfladen. Afgangprojekt fra Institut for Geologi og Geoteknik, DTU
- 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., 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., 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 borehul-slogging. GEUS rapport 2006/17.
- Knudsen, C., Jakobsen, P.R., Andersen, C., Larsen, B. & Foged, N. 1995: Stratigraphy and engineering geology of 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.
- Københavns Amt 2002; Grosen, B., et al.: Omfattende undersøgelser Naverland 26AB, Albertslund, Københavns Amt.
- Københavns Amt 2002b; Holm, J. & Furdal, J., Høje Tåstrup, Tåstrup-Valby og St. Vejeleå-oplandene, Resultater af fase 1 og 2-undersøgelser, GEO projekt 20747, Københavns Amt.

- Københavns Amt 2006: Holm, J. Bastrup, J.U., Høje Tåstrup. Fløng. Hydrologiske og grundvandskemiske undersøgelser. GEO projekt nr. 28837. Rapport 1. Københavns Amt.
- Larsen, F., Sonnenborg, T.O., Madsen, P., Ulbak, K. A. & Klitten, K. 2006: Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6. Saltvandsudvaskning i Danienkalk og Skrivekridt - Detailundersøgelser i Karlslunde værkstedsområde. 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. (red.) 2006: Naturen i Danmark. Geologien. Gyldendal, 549 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 Fenoscandian Border Zone in Denmark. Tectonophysics, Vol. 137, pp. 21-29.
- Lund, N.S., Nielsen, L.H. & Knudsen, C. 2002: Københavns undergrund med fokus på Danien aflejringerne. In: Frederiksen, J.K. et al. (eds.): Ingeniørgeologiske forhold i København, DgF Bulletin 19, p. 5-18
- 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.
- Madsen, P.R. 2003: Simulering af fersk/salt-vandsgrænsens stabilitet i opsprækkede kalkaflejringer - udvaskning af klorid fra opsprækket bryozokalk. Specialrapport DTU Miljø.
- 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.
- Mejlby, F. (2005): Numerisk modellering af grundvandsmagasiner ved Karlstrup Kalkgrav, Specialkursus, DTU Miljø
- 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
- Miljøstyrelsen (1998): Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 6, Oprydning på forurenede lokaliteter - Hovedbind. Miljøstyrelsen.
- Miljøstyrelsen (2007): Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 2, Boringsnære beskyttelsesområder - BNBO. Miljøstyrelsen.
- Milner, H. (2007): Transport af en tracer gennem opsprækket bryozokalk. Speciale Københavns Universitet, Geologi.
- Naturstyrelsen, 2013: Rambøll. Herlev-Glostrup kortlægningsområde, trin 1. Hovedrapport. Juni 2013.

- 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.
- Nielsen, K. A. 2007: *Fractured Aquifers, Formation Evaluation by Well Testing*. Trafford Publishing.
- 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 Vandselskab. 2006: *Water Vision*. Kildepladsundersøgelse ved Lindved.
- Olsen, H. & Nielsen, U.T. 2002: Logstratigrafisk inddeling af kalken i Københavnsområdet, 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.
- Pedersen, S.A.S. 1988: Glacitetonite: Brecciated sediments and cataclastic sedimentary rocks formed subglacially. In: Goldthwait, R.P. & Matsch, C.L. (eds.): *Genetic Classification of Glacigenic Sediments*, p. 89-91, Balkema, Rotterdam
- Piwoni, M. D., Banerjee, P., 1989: Sorption of Volatile Organic Solvents From Aqueous Solution Onto Subsurface Solids, *Journal of Contaminant Hydrology*, 4 (1989), 163-179.
- 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.
- Roskilde Amt 2005: Jørgensen, P.R.; Hoffmann, M.; Nørskov, N.D.; Karlby, L. & Stipp, S.L.S., Nikkelmobilitet i kalk. Hovedrapport. Hedeselskabet og Geologisk Institut, Københavns Universitet. Marts 2005.
- Stenestad, E. 1976: Københavnsområdets geologi især baseret på citybaneundersøgelserne. *Geological Survey of Denmark*, 3 Række 45, 1–149.
- Surlyk, F., Damholt, T. & Bjerager, M. 2006: Stevns Klint, Denmark: Uppermost Maastriechian chalk, Cretaceous-Tertiary boundary, and lower Danian bryozoan mound complex. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, Vol. 54, pp. 1-48.
- Thomsen, E. 1976: Depositional environment and development of Danian bryozoan biomicrite mounds (Karleby Klint, Denmark), *Sedimentology* 23, 485-509.
- Thomsen, E. 1990: Biostratigrafiske undersøgelser af Danien aflejringer mellem Amager og Limhamn. In: *Den faste forbindelse over Øresund – Geologi*. DGU rapport nr 10 (1991), 31-68.
- Thomsen, E. 1992: Biostratigrafiske undersøgelser af Danien aflejringer omkring Carlsberg forkastningen på Amager. DGU rapport nr 5 (1992), 18 pp.

- 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.
- Varol, O., 1998: Palaeogene. In: Bown, P.R. (Ed.), Calcareous Nannofossil Biostratigraphy. British Micropalaeontological Society Series, Chapman & Hall/Kluwer Academic, 200–224.
- Vejbæk, O.,V. & Britze, P. 1994: Geological map of Denmark, 1:750000. Top pre-Zechstein (two-way traveltime and depth), Geological Survey of Denmark. Map series no. 45.
- Vilgaard, K.D. og Pedersen, L.C. 2013: Evaluering af afværgepumpning til afskæring af en forurening med klorerede opløsningsmidler i et kalkmagasin. Naverland 26AB, Albertslund, kandidatspeciale, Institut for Vand og Miljøteknologi, DTU Miljø, 95 p.
- Witthüser, K., Reichert, B. & Hotzl, H. 2003: Contaminant Transport in Fractured Chalk: Laboratory and Field Experiments. Groundwater, Volume 41, Issue 6, p. 806–815, November 2003.

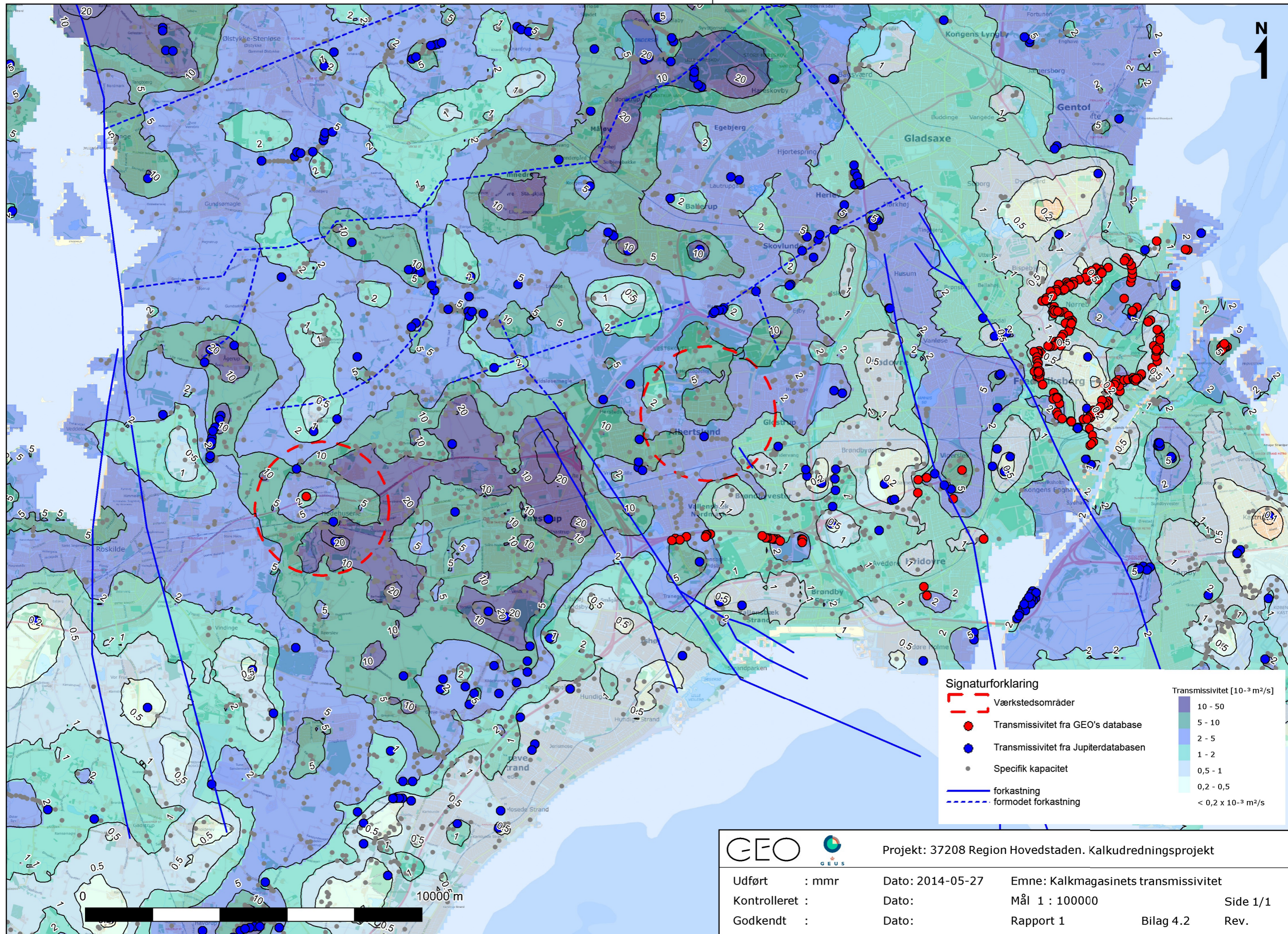




Projekt: 37208 Region Hovedstaden. Kalkudredningsprojekt

Udført : mmr	Dato: 2014-05-27	Emne: Kote af kalkoverfladen	
Kontrolleret :	Dato:	Mål 1 : 100000	Side 1/1
Godkendt :	Dato:	Rapport 1	Bilag 4.1 Rev.

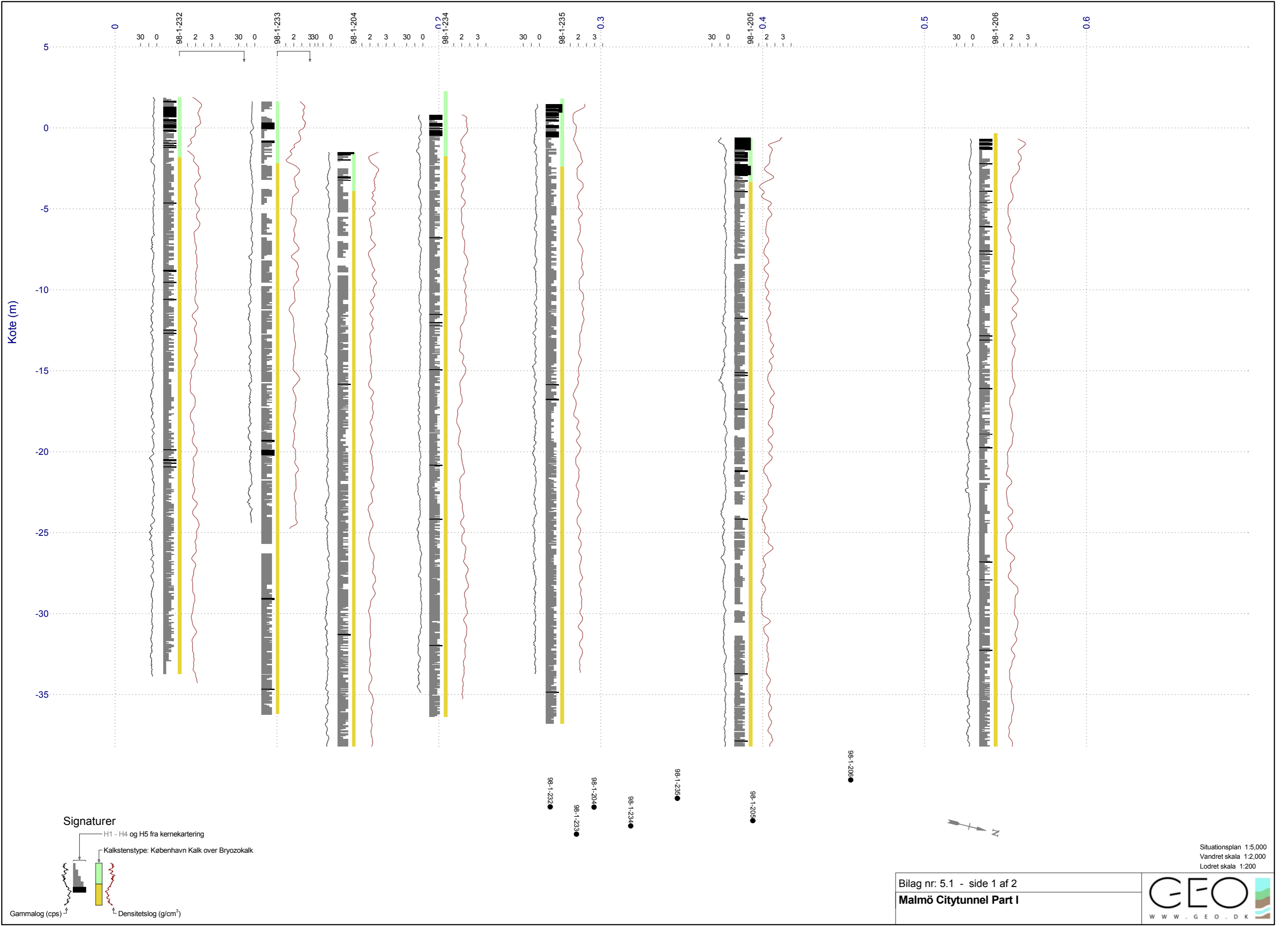


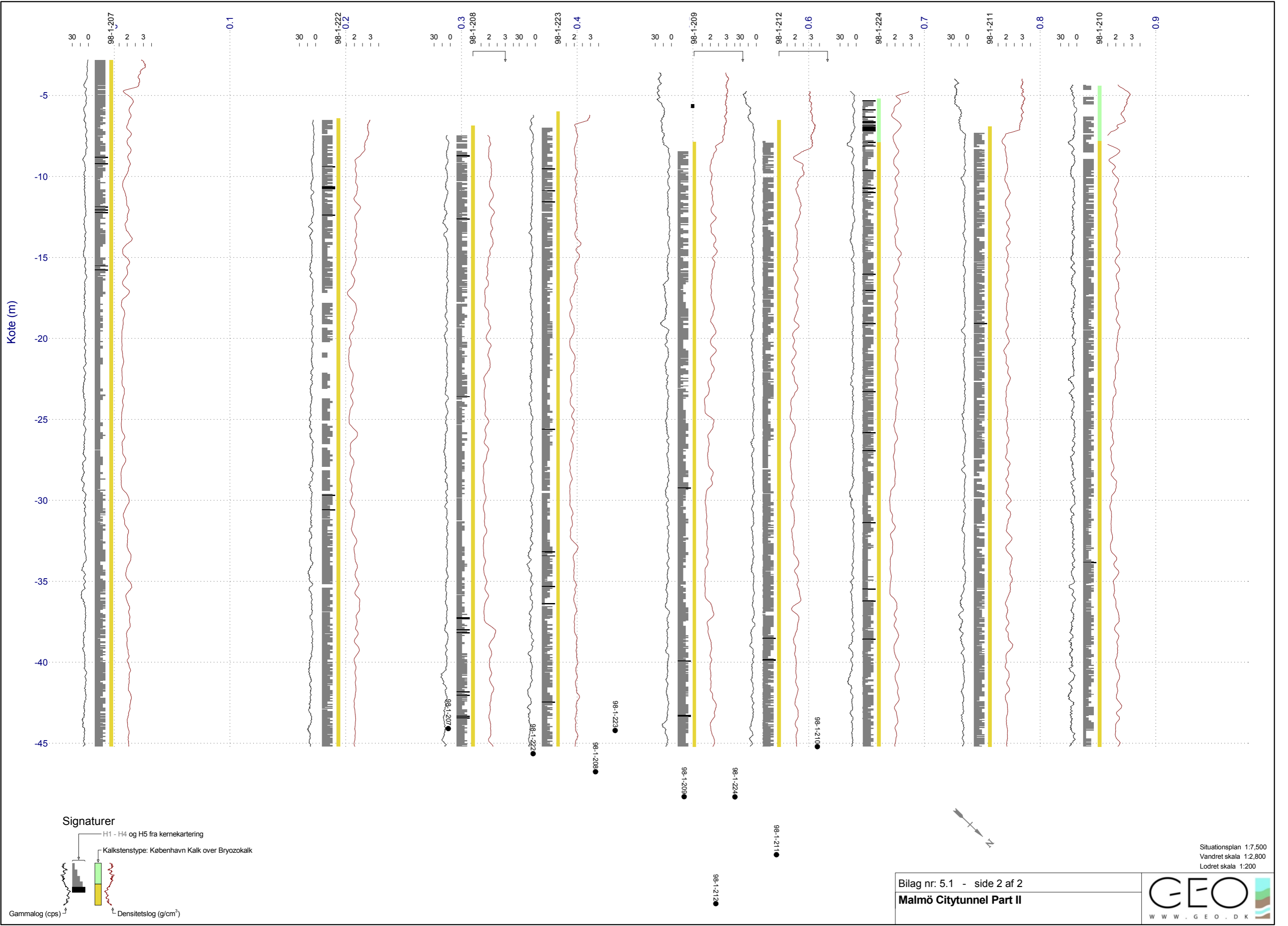


Projekt: 37208 Region Hovedstaden. Kalkudredningsprojekt

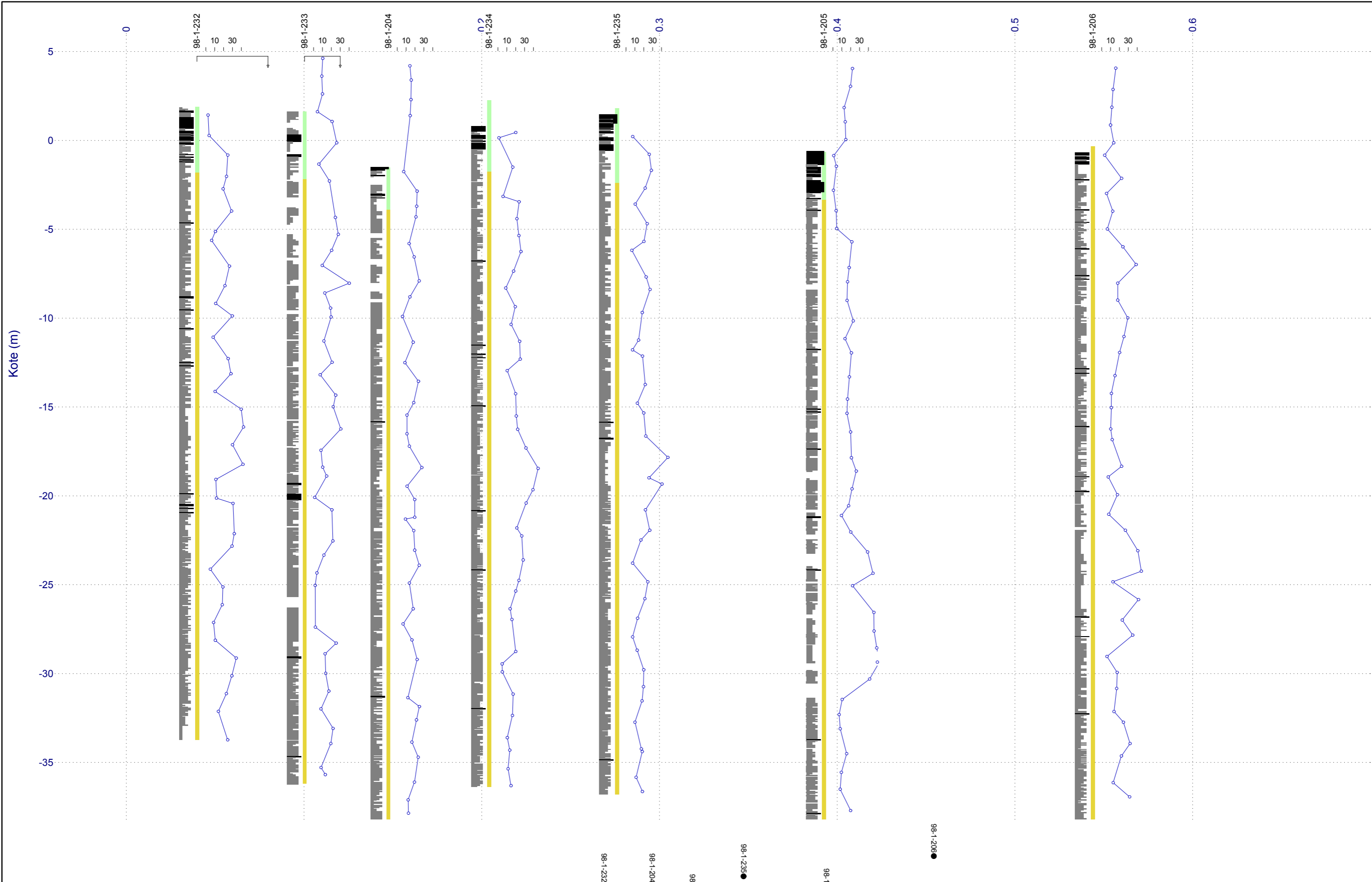
Udført : mmr	Dato: 2014-05-27	Emne: Kalkmagasinets transmissivitet	
Kontrolleret :	Dato:	Mål 1 : 100000	Side 1/1
Godkendt :	Dato:	Rapport 1	Bilag 4.2 Rev.



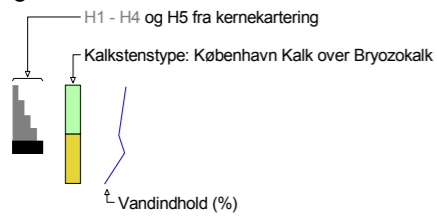


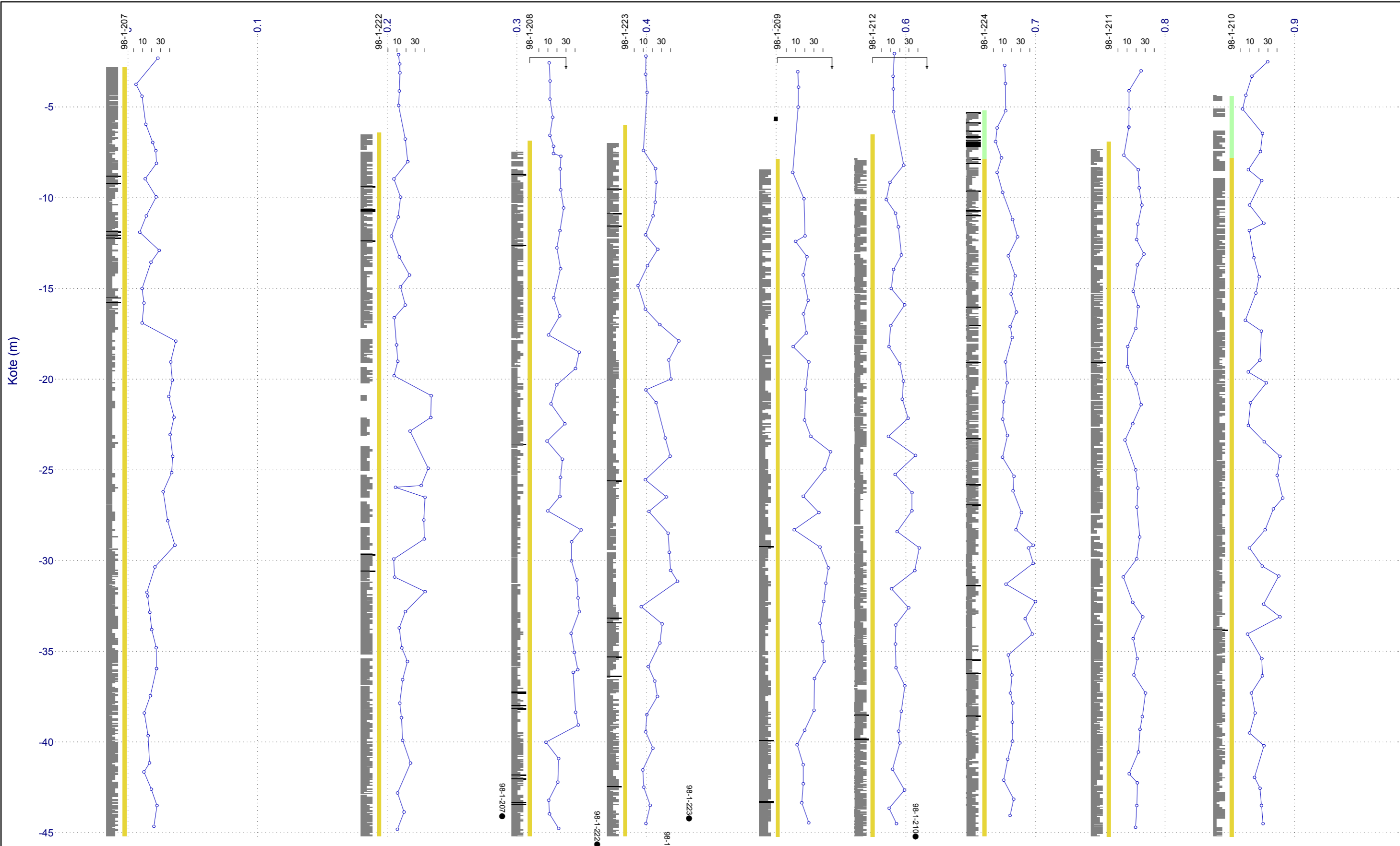




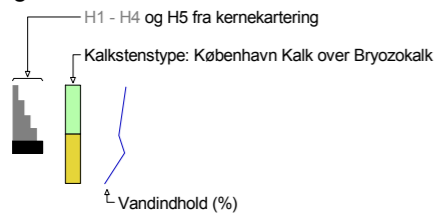


Signaturer



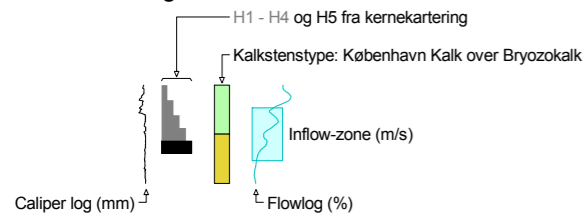


Signaturer





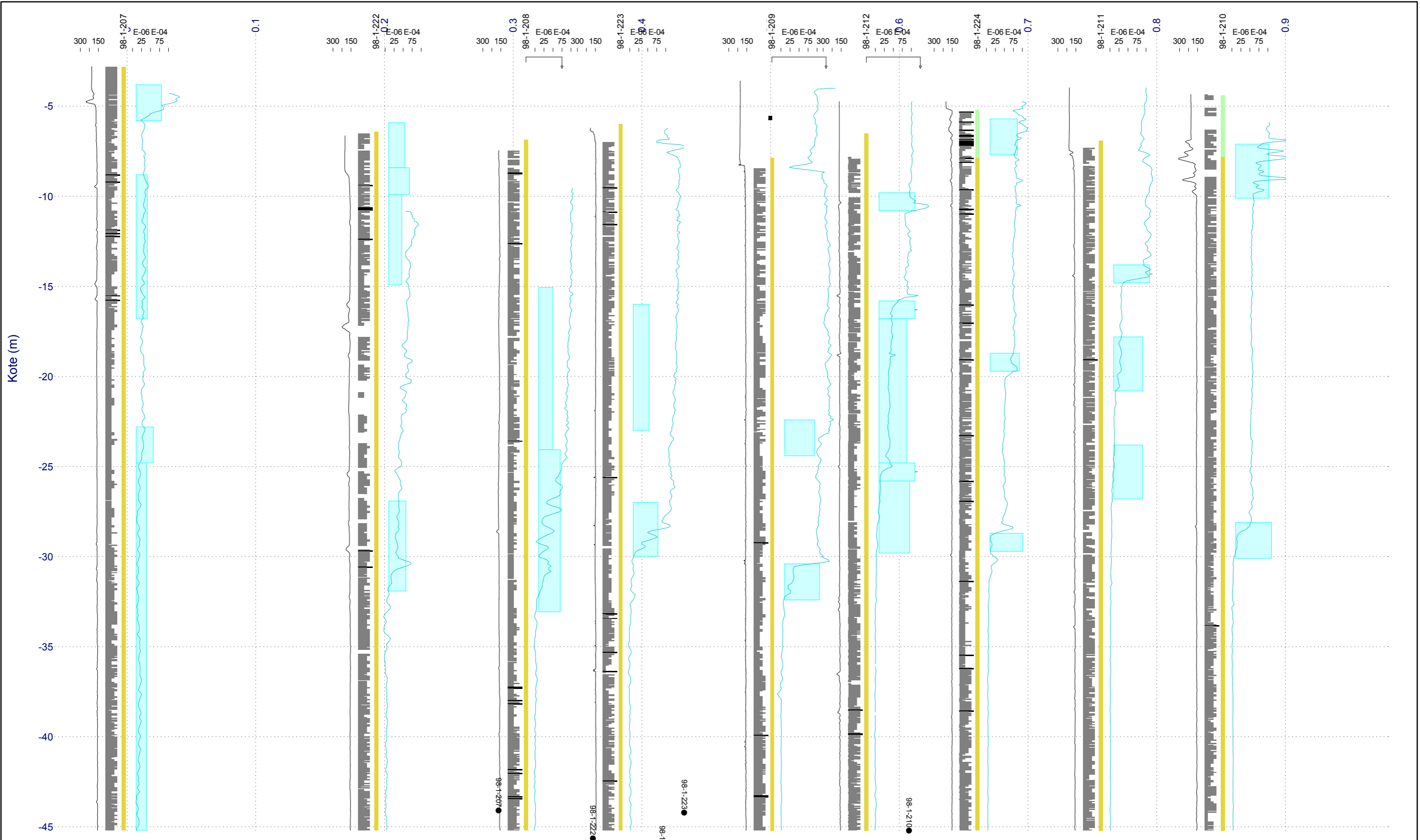
Signaturer



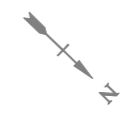
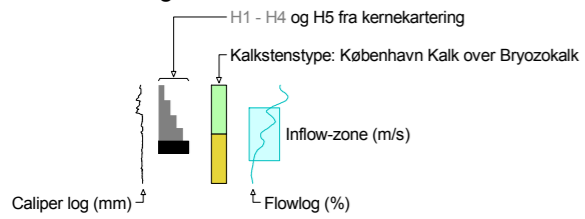
- 98-1-232 ●
- 98-1-204 ●
- 98-1-233 ●
- 98-1-234 ●
- 98-1-235 ●
- 98-1-205 ●
- 98-1-206 ●



Situationsplan 1:5,000  
 Vandret skala 1:2,000  
 Lodret skala 1:200

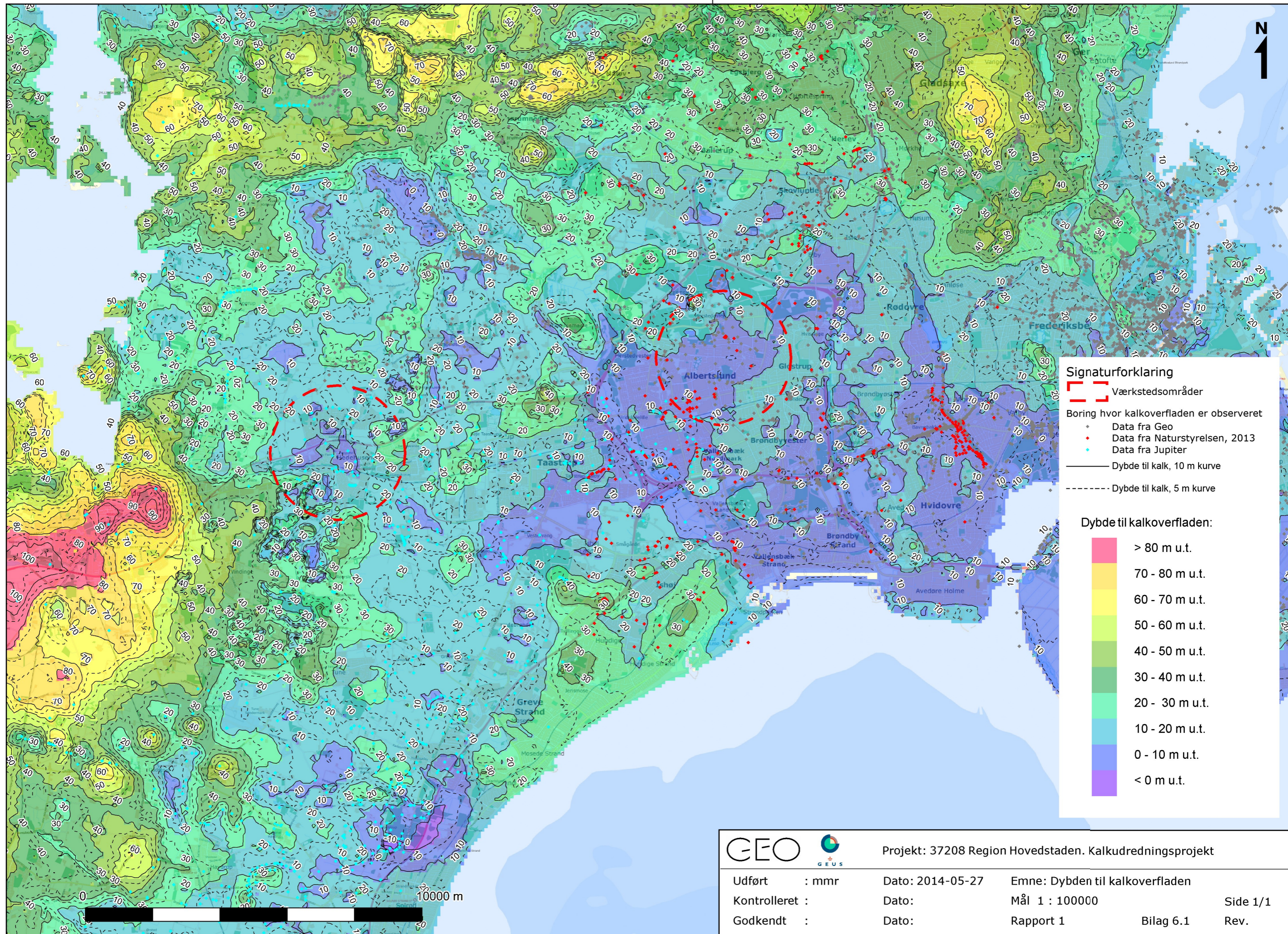


Signaturer



Situationsplan 1:7,500  
 Vandret skala 1:2,800  
 Lodret skala 1:200





**Signaturforklaring**

Værkstedsområder

Boring hvor kalkoverfladen er observeret

- Data fra Geo
- Data fra Naturstyrelsen, 2013
- Data fra Jupiter

Dybde til kalk, 10 m kurve

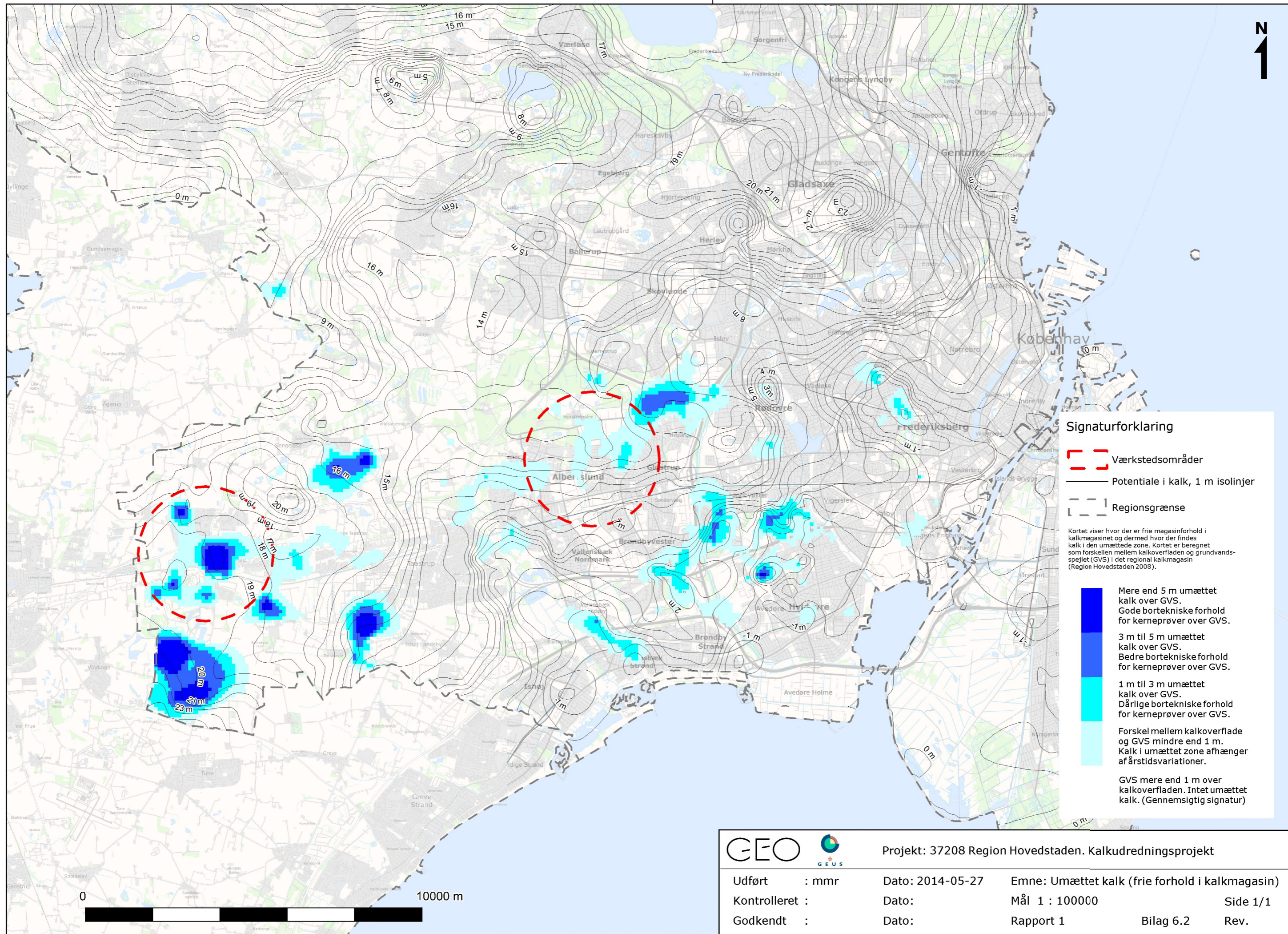
Dybde til kalk, 5 m kurve

**Dybde til kalkoverfladen:**

- > 80 m u.t.
- 70 - 80 m u.t.
- 60 - 70 m u.t.
- 50 - 60 m u.t.
- 40 - 50 m u.t.
- 30 - 40 m u.t.
- 20 - 30 m u.t.
- 10 - 20 m u.t.
- 0 - 10 m u.t.
- < 0 m u.t.

		Projekt: 37208 Region Hovedstaden. Kalkudredningsprojekt					
Udført	: mmr	Dato:	2014-05-27	Emne:	Dybden til kalkoverfladen		
Kontrolleret	:	Dato:		Mål 1	: 100000		Side 1/1
Godkendt	:	Dato:		Rapport 1		Bilag 6.1	Rev.





**Signaturforklaring**

Værkstedsområder  
 Potentiale i kalk, 1 m isolinjer  
 Regionsgrænse

Kortet viser hvor der er frie magasinforhold i kalkmagasinet og dermed hvor der findes kalk i den umættede zone. Kortet er beregnet som forskellen mellem kalkoverfladen og grundvandspejlet (GVS) i det regionale kalkmagasin (Region Hovedstaden 2008).

Mere end 5 m umættet kalk over GVS. Gode bortechniske forhold for kerneprøver over GVS.  
 3 m til 5 m umættet kalk over GVS. Bedre bortechniske forhold for kerneprøver over GVS.  
 1 m til 3 m umættet kalk over GVS. Dårlige bortechniske forhold for kerneprøver over GVS.  
 Forskel mellem kalkoverflade og GVS mindre end 1 m. Kalk i umættet zone afhænger af årstidsvariationer.  
 GVS mere end 1 m over kalkoverfladen. Intet umættet kalk. (Gennemsnitlig signatur)

		Projekt: 37208 Region Hovedstaden. Kalkudredningsprojekt	
Udført	: mmr	Dato:	2014-05-27
Kontrolleret	:	Dato:	
Godkendt	:	Dato:	
		Emne:	Umættet kalk (frie forhold i kalkmagasin)
		Mål 1 :	100000
		Rapport 1	Bilag 6.2
			Side 1/1
			Rev.