

Geotermi i Danmark: Geologi og ressourcer

Kai Sørensen, Lars Henrik Nielsen,
Anders Mathiesen og Niels Springer



Geotermi i Danmark: Geologi og ressourcer

Kai Sørensen, Lars Henrik Nielsen,
Anders Mathiesen og Niels Springer

Indholdsfortegnelse

RESUMÉ	3
1. INDLEDNING	5
2. RESERVOIRMULIGHEDERNE	6
2.1 TEKTONISKE ELEMENTER	6
2.1.1 Det Danske Bassin.....	6
2.1.2 Skagerrak-Kattegat Platformen	6
2.1.3 Tomquist Zonen	6
2.1.4 Hølviken Graven.....	7
2.1.5 Ringkøbing-Fyn-Møn Højden	7
2.2 RESERVOIRET	7
2.2.1 Generelt om reservoirbjergarter.....	7
2.2.2 Hvorfra kommer vort kendskab til undergrunden?	8
2.3 RESERVOIRFORMATIONER	8
2.3.1 Bunter Sandsten og Skagerrak Formationerne	9
2.3.2 Gassum Formationen.....	9
2.3.3 Haldager Sand Formationen.....	10
2.3.4 Frederikshavn Formationen.....	11
2.3.5 Yderligere potentielle reservoirenheder.....	11
2.4 FAIRWAYS	12
3. GEOTERMISKE RESSOURCER	13
3.1 GENERELT	13
3.2 DATAGRUNDLAGET	13
3.2.1 Temperatur.....	14
3.2.2 Porøsitet	14
3.2.3 Permeabilitet	14
3.3 RESSOURCEOPGØRELSE	15
4. ÅLBORG OG KØBENHAVN	16
4.1 ÅLBORG.....	16
4.1.1 Datagrundlag.....	16
4.1.2 Reservoirpotentialet	16
4.1.3 Yderligere undersøgelser.....	17
4.2 KØBENHAVN	17
4.2.1 Datagrundlaget.....	17
4.2.2 Reservoirpotentialet	18
4.2.3 Yderligere undersøgelser.....	19
5. REFERENCER	21
6. TABEL- OG FIGUROVERSIGT	22
6.1 FORKLARENDE NOTER TIL TABEL 1	23

RESUMÉ

Som opfølgning på regeringens energiplan "Energi 21" blev der i sommeren 1996 nedsat et udvalg, "Energistyrelsens udvalg om geotermi" ("EUG"), som fik til opgave at vurdere geotermiens mulige rolle i det danske energisystem. Udvalget skulle: **1)** foreslå en by, hvor der kunne bygges et demonstrationsanlæg, **2)** foretage en landsdækkende vurdering af de geotermiske energiresourcer, **3)** diskutere mulighederne for at indpasse geotermi i det eksisterende, og fremtidige, energisystem.

Udvalget afsluttede sit arbejde i foråret 1998 med en rapport (Energistyrelsen, Udvalg om Geotermi, 1998). Som en del af udvalgets arbejde blev der nedsat en arbejdsgruppe, der skulle kortlægge det geotermiske potentiale. Arbejdsgruppen bestod af medlemmer fra Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS), DONG samt Energistyrelsen. Arbejdsgruppens ("Potentialeudvalget") vurdering fokuserede på en række store fjernvarmebyer og der blev foretaget en revurdering af de geologiske forudsætninger. Det grundlæggende arbejde blev kun summarisk gengivet i udvalgets slutrapport, og det blev derfor besluttet, at GEUS skulle udarbejde en speciel rapport om de geologiske overvejelser der lå bag hovedrapportens konklusioner. Rapporterne, der blev udarbejdet i starten af 80'erne (Michelsen, 1981; DGU, 1982) indeholder detaljerede beskrivelser, der tjente som baggrundsmateriale for nærværende rapport. Nærværende rapport er udarbejdet med en bred læserkreds for øje.

Den tidligere efterforskning havde dybtliggende reservoirer (dybere end 2000 m) som mål, men var baseret på fejlagtige forventninger til reservoirformationernes produktivitet. "Potentialeudvalgets" første væsentlige konklusion var derimod, at mere grunde reservoirer (mindre end 2000 m) kunne være velegnede til geotermisk produktion. Endvidere viser temperaturforholdene, at reservoirer i mindre end 1000 meters dybde er for kolde til at kunne bruges til geotermisk produktion, medmindre man anvender el-drevne varmepumper til at ekstrahere varmeenergien fra formationsvandet.

De dele af Danmark, hvori de gode reservoirer ligger i 1000-2000 meters dybde adskiller sig fra de områder, der i de tidligere undersøgelser blev betegnet potentielle geotermiområder. Skiftet i dybdefokus betyder, at store dele af Sjælland og Nordjylland nu må anses for at have et geotermisk potentiale. Da der ikke i de tidligere undersøgelser var foretaget en vurdering af Københavnsområdets geologi blev der som en væsentlig del af revurderingen iværksat en undersøgelse af geologien i Københavnsområdet, med udgangspunkt i skånske data (seismiske data og borer). Denne vurdering bygger på et arbejde, der blev foretaget af Sveriges Geologiske Undersøgelse (S.G.U.) i Lund (Sivhed og Erlström, 1997) på bestilling af "EUG". Det kan konkluderes, at der i Københavnsområdet kan forventes forekomst af flere potentielle reservoirformationer.

Ud fra laboratorieundersøgelser på borekerner og vurderinger af de potentielle formationers udbredelse, er det klart, at det geotermiske potentiale i Danmark først og fremmest knytter sig til Gassum Formationen. Det er også Gassum Formationen, der danner grundlag for den igangværende geotermiske produktion i Thisted, og hvor der sker gaslagring nær

Stenlille i det centrale Sjælland. I hele Danmark er der mindst 16 større byer, hvorunder, Gassum Formationen forventes i en dybde mellem 1000 og 2000 m og hvor net-sand tykkelsen er 25 m eller mere.

Flere byer har yderligere potentielle reservoirformationer. Det drejer sig især om Ålborg, Hjørring og Brønderslev, hvor Haldager Formationen er et muligt reservoir, eller byer som København og Slagelse, hvor Bunter Sandsten udgør et tillægspotentiale til Gassum Formationen. I nogle østjyske byer som Århus, Randers og Horsens udgør Frederikshavn Formationens sandsten et potentielt geotermisk reservoir.

Beregninger af de tilstedeværende energimængder under alle disse byer viser, at der vil være mulighed for at basere en stor del af deres varmforsyning på geotermisk energi fra undergrunden umiddelbart under byerne, skønt geotermisk energi kun tilnærmeth kan betragtes som en fornyelig energikilde.

Revurderingen af de geotermiske muligheder har vist, at især to byer skiller sig ud: København og Ålborg. I begge byer forventes en tyk Gassum Formation at være tilstede. Under Ålborg udgør Haldager Formationen et tillægspotentiale, mens Bunter Sandsten udgør et tillægspotentiale under København. Dette betyder, at den nye, nødvendige efterforskning omkring disse byer vil være forbundet med mindst risiko, idet der er mindst to reservoirmuligheder. Rapporten diskuterer afslutningsvis, hvilke yderligere undersøgelser, der er nødvendige for at bringe efterforskningen endnu videre og dermed dokumentere de to byers geotermiske potentiale.

1. INDLEDNING

I slutningen af 70'erne blev det geotermiske potentiale i Danmark undersøgt i et samarbejde mellem det daværende DGU (nu GEUS), Dansk Olie og Naturgas, Risø og Laboratoriet for Geofysik ved Århus Universitet på initiativ af det daværende Handelsministerium og under indtryk af tiårets oliekriser. Dette samarbejde resulterede i en landsdækkende kortlægning af de geotermiske ressourcer (Michelsen, 1981; DGU, 1982). Undersøgelsen danner grundlag for den nuværende revurdering, der er et resultat af opfølgningen på regeringens plan for Danmarks energimæssige fremtid: "Energi 21". Planen førte til, at der i sommeren 1996 blev nedsat et udvalg, der skulle vurdere mulighederne for geotermi i Danmark. Dette udvalgsarbejde, der har været forestået af Energistyrelsen har analyseret ikke blot de geologiske forudsætninger for geotermi, men også de planlægningsmæssige og økonomiske aspekter. Energistylens Udvalg om Geotermi (EUG) fremlagde sin rapport i foråret 1998 (Energistyrelsen, 1998). Udvalget fandt det formålstjenligt, at der blev udgivet en mere fyldig gennemgang af geologien og ressourcegrundlaget. Denne rapport er forfattet med det formål for øje.

I forbindelse med den tidligere undersøgelse blev der boret tre geotermiske borer, som alle viste, at det formentlig er urealistisk at producere fra undergrundens reservoirer på dybder mellem 2 til 3 km, hvor temperaturen er så høj, at den væsentligste del af energiuudtrækningen kan ske ved direkte varmeveksling (Michelsen, 1981). I det tidligere arbejde blev ressourcerne beregnet uden hensyn til brugerunderlaget. Den nærværende undersøgelse afviger på tre afgørende punkter fra den tidligere undersøgelse:

- 1: Da geotermi kun er en realistisk energikilde i forholdsvis store byer, har ressourceberegningen været koncentreret om disse byer.
- 2: Der er fokuseret på dybdeintervallet 1-2 km, idet der i dette interval forventes en optimal kombination af temperatur og reservoirregenskaber. Temperaturen i disse dybder vil betyde, at størstedelen af den geotermale energi må ekstraheres med varmepumpe. Den ændrede dybdefokusering betyder, at de geografiske områder, der er mest interessante nu, kun i begrænset grad er sammenfaldende med de områder, der i den tidligere undersøgelse blev betragtet som de mest lovende.
- 3: Det er i forbindelse med nærværende revurdering sandsynliggjort, at der er et geotermisk potentiale i Københavnsområdet, som ikke blev vurderet i den tidligere undersøgelse. At København har et geotermisk potentiale betyder, at de geologiske forudsætninger for at geotermi vil kunne bidrage væsentligt til den samlede varmeforsyning er tilstede.

2. RESERVOIRMULIGHEDERNE

2.1 TEKTONISKE ELEMENTER

Danmarks undergrund, på nær dele af Bornholm's og Christiansø's nærmeste omgivelser, består af sedimentære bjergarter. Disse sedimenter er aflejret i enkeltområder med karakteristiske indsynknings- og hævningshistorier og kaldes strukturelle enheder eller tektoniske elementer (Fig. 1). Det geotermiske potentiale varierer fra enhed til enhed.

2.1.1 Det Danske Bassin

Det Danske Bassin udgør den østligste del af det Norsk-Danske Bassin, et meget dybt, sedimentært bassin af hovedsagelig Perm og Trias alder. Mod vest afskæres det af Central Graven; mod øst bliver bassinet markant grundere under Sjælland (Fig. 1). De dybere dele af bassinet er karakteriseret af tykke Perm saltaflejringer, hvis flydning har givet ophav til en kompleks strukturering og store lokale variationer i sedimentmægtigheder, og tildels facies. De tre tidligere geotermiske borer er placeret i centrale dele af Det Danske Bassin. De dybeste dele af bassinet udgøres af forkastningsbetingede segmenter: Ålborg Graven og Himmerland Graven (Fig. 1).

2.1.2 Skagerrak-Kattegat Platformen

Mod nord afgrænses Det Danske Bassin af Skagerrak-Kattegat Platformen, som er karakteriseret af subhorizontale, forholdsvis tynde sedimenter af Trias, Jura og Tidlig Kridt alder. På grund af efterfølgende hævnung og dertil knyttet erosion kan Skagerrak-Kattegat Platformen mod nordøst siges at være begrænset af en arbitrær erosionsgrænse. Mod nordvest afsluttes den af en tilsvarende grænse i retning mod den norske kyst.

2.1.3 Tornquist Zonen

I området umiddelbart øst for Himmerlands Kattegat kyst, hvor man naturligt ville forvente den østlige forlængelse af Ålborg Graven, ændrer undergrundens struktur sig radikalt. Ålborg Graven er begrænset af normale forkastninger, der er den geometriske forudsætning for akkumulering af store sedimentmægtigheder. Mod sydøst er bevægelsesmønstret på disse brudzoner vendt om, "inverteret", således at de områder der tidligere har været karakteriseret af store sedimentmægtigheder er blevet hævet ved en proces, der kvalitativt kan beskrives som "oppresning". Denne oppresningszone kan følges hele vejen fra det vestligste Kattegat og mod sydøst. De mest markante resultater af inversionsbevægelserne er de skånske åse og deres havdækkede analoge strukturer i Kattegat, samt Bornholm. Denne oppresning foregik i den sidste del af Kridt tid og den ældste del af Tertiær. Langs

forkastninger, der begrænser Ålborg Graven, kan disse bevægelser også erkendes, men de har ikke været så markante som længere mod sydøst.

2.1.4 Hølviken Graven

Mod sydøst i det danske område ligger Hølviken Graven, som en trekantet, tektonisk enhed, der mod nordøst begrænses af Tornquist Zonen. De øvrige begrænsninger er to normalforkastninger, Svedala- og Øresundsforkastningen, som tilsammen skaber Hølviken Graven som en slags forlængelse af Det Danske Bassin. København er beliggende over Hølviken Gravens vestlige begrænsning.

2.1.5 Ringkøbing-Fyn-Møn Højden

En række af højtliggende grundfjeldsblokke kan spores gennem det sydlige Danmark, Ringkøbing-Fyn-Møn Højden, eller blot "Højderyggen" (Fig. 1). Disse områder er karakteriseret af tynde, eller slet ingen Perm aflejringer, tynde Trias sedimenter, og tynde eller ingen Jura sedimenter. I geotermisk sammenhæng er det vigtigt at bemærke, at disse højder består af en række kulminationer, med højdepunkter i området syd for Ringkøbing, på det vestligste Fyn, og i Møn-Stevns området. Fordelingen af højderne, og deres kulminationer er af betydning for det geotermiske potentiale i det sydlige Danmark. Mod vest begrænses højderne af Horn Graven. Vest for denne markante Trias struktur fortsætter rækken af højder mod vest på tværs af hele Nordsøen. I Sen Perm tid adskilte disse højder to dybe havbassiner, der kun stod i forbindelse via en række tærskler: det Nordlige og det Sydlige Zechstein bassin. Bassinet syd for højderne kaldes det Nordtyske Bassin.

2.2 RESERVOIRET

Sedimenterne i det danske område er tildels et resultat af de meget overordnede elementer i den geologiske historie: ændringer i den klimatiske udvikling og ændringer i fordeling af kontinenternes topografiske elementer (f.eks. bjergkæder). I tilgift hertil kommer variationer styret af fordelingen af de tektoniske elementer. I den lange og sammenhængende del af den geologiske historie, hvor sedimentationen i den danske undergrund er præget næsten udelukkende af ler og sand spiller de tektoniske elementer en afgørende rolle for fordelingen af fin- og grovkornede sedimenter, og dermed for de geotermiske muligheder. Denne periode omfatter Trias, Jura og Tidlig Kridt.

2.2.1 Generelt om reservoirstjerner

En af de muligheder man har for at udnytte undergrundens varmeenergi består i at pumpe det vand op, som findes i dens bjergarter mellem mineralkornene. For at dette skal kunne lade sig gøre er det nødvendigt at bjergarten dels har et stort porevolumen (porøsitet) og at vandet kan strømme forholdsvis frit fra pore til pore (permeabilitet). God gennemstrømmelighed forudsætter først og fremmest, at mineralkornene er store; det skaber god forbindelse fra pore til pore. I den aktuelle del af den danske undergrund betyder dette, at god po-

røsitet og permeabilitet kun kan forventes i sand og sandsten. Sådanne bjergarter betegnes reservoirer eller reservoirbjergarter (Fig. 2). Den naturlige forudsætning for en geotermisk produktion er derfor tæt knyttet til forekomsten af egnede reservoirer, og muligheden for at vurdere det geotermiske potentiale beror på forståelsen af undergrundens reservoirer, deres fordeling, kvalitet og beliggenhed.

2.2.2 Hvorfra kommer vort kendskab til undergrunden?

Den danske undergrunds reservoirbjergarter har været mål for olieeftersforskning i snart et halvt århundrede og det har ført til boring af mere end 50 dybe efterforskningsboringer på land i Danmark (Fig. 1 og 6). De er fordelt på en måde så forståelsen af den danske undergrund er "landsdækkende". I forbindelse med boringerne er der udført elektriske, radioaktive og akustiske målinger (logging) i borehullerne og der er også taget en del kerneprøver. Logdata og kerner, samt de borespåner, som frigøres under boringen, udgør det konkrete datagrundlag for den fysiske og geologiske beskrivelse af undergrundens bjergarter. Vores forståelse af porøsitetens, temperaturens og permeabilitetens variation med dybden i de danske sandstensreservoirer stammer således fra disse dybe boringer. For forståelsen af Københavnsområdets undergrund og reservoirpotentiale, har det været nødvendigt at inddrage svenske efterforskningsboringer i datagrundlaget (Fig. 6).

Skønt der er boret mange boringer i den danske undergrund giver disse i sig selv kun et groft billede af undergrundens struktur. I store dele af Danmark er undergrundens lag forstyrret (d.v.s. struktureret) så meget, at dybden til et givet reservoir, kendt fra en boring 10 km fra en by, f.eks., kan findes i helt anden dybde under selve byen. Gassum reservoiret ligger således i en dybde af 1500 m i Gassum-1 boringen nord for Randers (Fig. 6). Under selve Randers by ligger reservoiret i en dybde af ca. 2000 m eller mere. Det er således vigtigt at kende undergrundens struktur for at kunne vurdere det geotermiske potentiale. Dette kendskab er opbygget gennem tolkning af en række seismiske data, der er indsamlet som forberedelse til efterforskningsboringer. Tilsammen udgør seismik og boringer således grundlaget for vurderingen af det geotermiske potentiale i Danmark, forstået som potentialet under en række større byer.

2.3 RESERVOIRFORMATIONER

Fire tids- og aflejringsmæssigt forskellige sandstensreservoirer er af geotermisk interesse. For hvert af disse fire reservoirer er de områder hvor det skønnes tilstrækkeligt tykt og hvor det forekommer i dybdeintervallet 1000-2000 m kortlagt. Disse områder kaldes reservoirets (geotermiske) 'fairway'. Indenfor disse 'fairways' udgør større bysamfund de geotermiske "prospekter", hvis potentielle geotermiske ressourcer er beregnet og beskrevet i de næste afsnit.

De fire enheder er af Nedre Trias til Nedre Kridt alder og indeholder flere sandstenslag af god reservoirkvalitet: **1)** Bunter Sandsten Formationen inklusiv Skagerrak Formationen; **2)** Gassum Formationen; **3)** Haldager Sand Formationen; og **4)** Frederikshavn Formationen

(se Fig. 3). Derudover indeholder Fjerritslev Formationen sandstensaflejringer på Skagerrak-Kattegat Platformen. Især Gassum Formationens sandsten er vidt udbredte og med en tykkelse og reservoirmæssig kvalitet, som gør, at dette reservoir indtager en unik position i relation til de geotermiske muligheder i Danmark.

2.3.1 Bunter Sandsten og Skagerrak Formationerne

Bunter Sandsten Formationen er af Tidlig Trias alder og delvis jævnaldrende med Skagerrak Formationen, der findes mod bassinranden i nord og øst. Bunter Sandsten Formationen består syd for "Højderyggen" mest af finkornede sandsten og siltsten. I Det Danske Bassin bliver litologien gradvist mere grovkornet mod nordøst, og formationen fortsætter over i Skagerrak Formationen, der er mere grovkornet og dårligere sorteret. De to formationer findes tilsammen næsten overalt i området men forventes dog at mangle helt eller delvist på dele af "Højderyggen". Tykkelsen er typisk ca. 300 m, men centralt i Det Danske Bassin dog mere end 900 m. Sandstenene er oftest kraftigt diagenetisk påvirkede med mineraludfældninger.

Hovedparten af sandstenene i Bunter Sandsten Formationen blev aflejret som kanalsand af flettede floder i et tørt ørkenklima, med mindre partier af vinddannede klitaflejringer. De enkelte kanalenheder skærer sig ned og ind i hinanden, og sandstenene forventes derfor at udvise en stor lateral kontinuitet uden primære hydrauliske barrierer. Sandstenene i Skagerrak Formationen blev primært dannet på alluviale vifter langs bassinets rand og større forkastninger som f.eks. Børglum Forkastningen langs Ålborg Graven. Sorteringsgraden er ringe og litologien variabel med en større andel af bjergartsfragmenter og lerklaste, der i en vis udstrækning vanskeliggør en evaluering af reservoiret ud fra petrofysiske logs alene. Skagerrak Formationen er den dårligst kendte af reservoirenhederne, men pga. den store tykkelse og relativ lille variation i litologi skønnes den geologiske risiko relativt lille. Til gengæld er reservoirrisikoen stor (dvs. risikoen for at reservoiregenskaberne er dårlige på en given lokalitet).

2.3.2 Gassum Formationen

Denne formation er kendt fra en lang række borer med et stort antal kerner og er velundersøgt og velbeskrevet i en række rapporter og publikationer. I den centrale del af Det Danske Bassin er Gassum Formationen af sen Norien og Rhæt alder (sen Trias), men bliver gradvist yngre mod nordøstranden af bassinet og er hovedsagelig af Hettangien og tidlig Sinemurien alder (Tidlig Jura) i Tornquist Zonen og på Skagerrak-Kattegat Platformen. I de centrale og sydlige dele af Det Danske Bassin er formationen 50-150 m tyk afhængig af afstanden til saltstrukturer og større forkastninger. Tykkelsen stiger til 170-200 m i den forkastningsbetingede Himmerland Grav og i den nordlige del af Tornquist Zonen. I den sydøstlige del af denne zone øges tykkelsen til mere end 300 m. På Skagerrak-Kattegat Platformen falder tykkelsen til 10-80 m. I den nordlige del af det Nordtyske Bassin er formationen 140-180 m tyk. Formationen er erosivt afskåret langs med den nordlige og sydlige flanke af "Højderyggen", og mangler helt på det meste af ryggen.

Formationen er domineret af lav-marine og fluviale sandsten (Fig. 4), der er mellemløjret med marine og lagunale lersten, og tynde enheder af sø-lersten og kullag. Sandstenene er hovedsagelig vel- til moderat sorterede, fin- til mellem-kornede, stedvist grov-kornede og grusede. Cementeringsgraden varierer fra tæt til meget løs. De lav-marine sandsten, der dominerer formationen i det meste af bassinet, blev aflejret under en række havniveaufald, der forårsagede gentagen udbygning af kysten fra den nordlige, østlige og sydlige bassinkant ud i de centrale dele af bassinet. Under de efterfølgende havstigninger blev de nyligt dannede kystsletter gradvist oversvømmet. Ler og sand blev aflejret i laguner og estuarine kanaler inden kystsletterne blev helt oversvømmet og marine lersten afsat. Dette forløb blev gentaget flere gange, hvorved adskillige vidt udbredte lag af lav-marine og kystsandsten, 4-30 m tykke, hovedsagelig adskilt af marine lersten og lagunale ler og sandsten, blev dannet. Kyst-sandstenslagene består internt af imbrikerede (taglagte) linser af sandsten, der er delvist adskilt af svagt hældende lag af marine heterolither, der stedvist kan danne mindre hydrauliske barrierer. Op til 20 m tykke enheder af fluviale og estuarine kanalsandsten findes hyppigst mod nordøst.

Generelt stiger andelen af sandsten mod bassinkanten og sandsten dominerer i Hølviken Graven, i Tornquist Zonen, på Skagerrak-Kattegat Platformen og langs "Højderyggen". Formationen bliver gradvist mindre sandrig mod de distale dele af bassinet i området omkring borerne Mejrup-1, Vemb-1 og Vinding-1, hvor kun 6-20 m kyst og fluviale sandsten forekommer.

2.3.3 Haldager Sand Formationen

Denne formation er kendt fra en række borer med kerner og er velundersøgt og beskrevet i en række publikationer. Haldager Sand Formationen blev dannet i Aalenien til Callovien tid (Mellem Jura). Tykkelsen af formationen er meget påvirket af samtidige forkastningsbevægelser og salt-bevægelser. Formationen er tynd og pletvis udbredt med tykkelser på under 10 m i de sydlige og sydvestlige dele af Det Danske Bassin. I de centrale dele af bassinet stiger tykkelsen til 25-50 m. Mellem Fjerritslev og Børglum forkastningerne (Ålborg Graven) er formationen bedst udviklet med en tykkelse på 30-175 m. På Skagerrak-Kattegat Platformen er formationen 15-50 m tyk. Disse markante, tektonisk betingede tykkelsesvariationer er illustreret i Fig. 5.

Formationen består af sandsten stedvist mellemløjret af tynde lersten. Sandstenene er mellem- til grov-kornede, stedvist grusede, vel- til moderat sorterede, stedvist dårligt sorterede, og relativt tætte til meget porøse. Dannelsen af formationen er knyttet til en hævnning af "Højderyggen" og en nordøstlig tipning af Det Danske Bassin i slutningen af Tidlig Jura. De tektoniske ændringer blev yderligere forstærket af et stort fald i havniveau, og aflejningsbassinet skiftede totalt udseende fra et udbredt havområde i Tidlig Jura til et langt mindre bassinområde i Mellem Jura. Som følge af den ændrede bassinkonfiguration og det fornyede relief førte højenergi flettede floder erosionsprodukterne ind i Tornquist Zonen, der som det eneste større område stadigvæk sank ind som følge af forkastningsaktivitet. Sedimenterne blev tilført fra nord og øst med et væsentligt tilskud fra "Højderyggen" og dens nordlige flanke, hvor hævede nedre jurassiske lersten, samt triassiske og ældre sandsten blev eroderet. I Tornquist Zonen består formationen primært af tykke, lateralt

udbredte fluviale og kyst-sandstenslag adskilt af marine og lagunale lersten dannet i perioder med stigende havniveau. Udenfor Tomquist Zonen falder antallet og tykkelsen af sandsten markant og her består formationen primært af fluviale kanalsandsten dannet af flettede floder, og forventes derfor at være lateralt udbredte uden markante hydrauliske barrierer. Afvigelser i forhold til dette generelle mønster må forventes nær randsækken til salt-strukturerne.

2.3.4 Frederikshavn Formationen

Denne reservoirformation er gennemboret i en række borer, men er ikke tilbunds-gående undersøgt med hensyn til litologi, faciesfordeling og reservoirkvalitet. Frederikshavn Formationen blev dannet i Volgien til Valanginien tid (Sen Jura til Tidlig Kridt). Den viser stor variation i tykkelse, delvist afhængig af lokale forkastninger og saltstrukturer. I størstedelen af bassinet er tykkelsen mere end 50 m, hvorimod formationen mangler helt på "Højderyggen". I Himmerland Graven stiger tykkelsen til 145-180 m og i Tomquist Zonen er tykkelsen lokalt mere end 250 m. Længere mod nordøst på Skagerrak-Kattegat Platformen falder tykkelsen til 105-170 m.

I det nordlige og østligste Jylland består formationen primært af marine siltsten og lersten mellemløjret med lav-marine sandsten. Få og meget tynde kullag findes mod nordøst. I den vestlige og sydlige del af bassinet falder antallet og tykkelsen af sandsten og formationen er domineret af lersten. Lersten dominerer også i Tomquist Zonen. Formationen består af tre større enheder, der optræder i de fleste borer. Den nederste enhed viser et generelt opad-groende mønster stedvist med heterolitiske sandsten i den øverste del. De øverste to enheder viser ligeledes et generelt opad-groende mønster, som i den nordlige del af aflejringsområdet kulminerer med heterolitiske siltsten og sandsten. De tre enheder blev dannet som følge af større regressive faser med kyst og delta progradering. Tykke og rene lav-marine sandsten med gode reservoirgenskaber forventes at være tilstede på Skagerrak-Kattegat Platformen. De fleste andre steder forventes reservoiret at være af begrænset kvalitet.

2.3.5 Yderligere potentielle reservoirenheder

Den nedre jurassiske Fjerritslev Formation der næsten udelukkende består af marine lersten indeholder mod nordøst på Skagerrak-Kattegat Platformen 20-30 m lerede til næsten rene sandsten. Disse sandsten, der findes i den øverste del af F-II Member blev dannet ved kyst progradering under et markant fald i havniveau i sen Pliensbachien tid og de er kun veludviklet og med gode porøsiteter nordøst for Børglum Forkastningen, hvor de findes på dybder af 500-950 m.

Fra blotninger på Bornholm og borer i Skåne kendes et lag af sand af tidlig Sen Kridt alder, Amager Grønsand. Denne sandsten er af marin oprindelse med et karakteristisk indhold af det grønne mineral glaukonit. Sandstenen er intenst bioturberet og af meget varierende reservoirkvalitet. Ud fra seismiske data er det sandsynligt, at det forekommer i

Øresundsområdet og formentligt også under København (Sivhed og Erlström, 1997). I borer i Skåne har det en maksimal tykkelse på ca. 60 m.

2.4 FAIRWAYS

De områder, hvor et reservoir er tilstede med en tilstrækkelig tykkelse og forekommer i det rette dybdeinterval kaldes dette reservoirs 'Fairway'. På baggrund af vores nuværende kendskab til reservoirernes udbredelse og undergrundens strukturer kan følgende 'Fairway's for geotermisk efterforskning opstilles:

1. Frederikshavn 'Fairway'
2. Haldager 'Fairway'
3. Gassum 'Fairway'
4. Bunter Sand 'Fairway'

'Fairway'-kortet, Figur 6, viser den arealmæssige afgrænsning af disse fire 'fairway's, hvor de respektive reservoirer ligger i dybdeintervallet 1000-2000 meter og forventes at have mere end 25 m net-sand tykkelse. Overlap mellem 'fairway's er skraveret med de farver der svarer til de respektive 'fairway's farver. 'Net-sand cut-off' afgrænser den maksimale udbredelse for Frederikshavn reservoirs 'Fairway' og Gassum reservoirs 'Fairway' (Fig. 6). Kortene er baseret på boringsinformation, seismisk kortlægning og dybdekonvertering på basis af oplysninger fra efterforskningsboringerne.

3. GEOTERMISKE RESSOURCER

3.1 GENERELT

På grund af prisen for et simpelt geotermisk anlæg er det klart, at kun forholdsvis store byer er potentielle geotermibyer, og begrebet geotermiske ressourcer skal derfor i denne sammenhæng forstås som de teknisk tilgængelige varmemængder under større byer og deres nærmeste omegn. Den geotermiske ressource er ligefrem proportional med den potentielle afkøling og det aktuelle reservoirvolumen. Simpelt opkoblede absorptionsvarmepumper kan typisk afkøle geotermivandet til ca. 20°C. Ved lave returtemperaturer på fjernvarmenettet eller specialkobling af absorptionsvarmepumper kan lavere temperaturer nås, f.eks. 15°C. En yderligere afkøling kan opnås ved anvendelse af el-varmepumper, f.eks. til 5°C. I ressourceberegningen er det antaget, at kun den varmemængde, der er tilgængelig i reservoirets net-sand volumen vil blive udnyttet. Ved produktion vil der også tappes noget af den varme, der ligger udenfor net-sand voluminet, især i dele af reservoiret med tynde sandlag. Dette bidrag kan være væsentligt. Til gengæld vil der i en produktionssituation være lommer i reservoiret, der ikke udnyttes. Da vandet, som udfylder reservoirets porevolumen har ca. fire gange så høj specifik varmekapacitet som mineralerne, indgår også porøsiteten i beregningen af undergrundens varmeressourcer, idet formlen for varmeindholdet pr. arealenhed er:

$$\text{varmeenergi pr. km}^2 = (\text{energi i porevandet}) + (\text{energi i mineralerne})$$

eller

$$\begin{aligned} \text{varmeenergi pr. km}^2 = & (\text{net-sand tykkelse} \times \text{afkøling} \times \text{porøsitet} \times \text{varmefylde vand}) \\ & + (\text{net-sand tykkelse} \times \text{afkøling} \times (1 - \text{porøsitet}) \times \text{varmefylde mineral}) \end{aligned}$$

Denne energi er den tilstedeværende energi (på engelsk "in place" ressourcer). Den beregnede tilstedeværende energi pr. reservoir og pr. by, samt de benyttede parametre for net-sand tykkelse, dybde, temperatur og porøsitet, fremgår af Tabel 1 samt de tilhørende noter. De overvejelser, der ligger bag valget af parameterværdier, diskuteres i næste afsnit.

3.2 DATAGRUNDLAGET

I Tabel 1 er der nævnt hvilke kilder der ligger til grund for valget af reservoirtykkelse, reservoirdybde, samt net-sand tykkelse (Fig. 7). Valget af parameterværdier bygger især på det arbejde, der blev udført i slutningen af 70'erne (Michelsen, 1981).

Udover porøsitet og temperatur indgår en anden væsentlig parameter: permeabilitet, der et mål for, hvor let en væske kan strømme gennem reservoiret. Permeabilitet er den afgørende fysiske parameter for hvor hurtigt, og dermed med hvilken effekt, og økonomi, de tilste-

deværende ressourcer kan produceres. For porøsitet, temperatur og permeabilitet, har man i arbejdsgruppen under Energistyrelsens Udvalg om Geotermi (Energistyrelsen, 1998) valgt at anvende generelle relationer for egenskabens variation mod dybden: porøsitetens og permeabilitetens aftagen mod dybden og temperaturens tiltagen mod dybden. Datagrundlaget og de valgte dybderelationer, er illustreret i Fig. 8, 9 & 10.

3.2.1 Temperatur

På grund af en for mangelfuld undergrundsmode, og et for mangelfuldt detailkendskab til de enkelte bjergarters termale egenskaber, er der ikke grundlag for at beregne en temperaturgradient for hver by. Der er derfor anvendt en generaliseret temperatur-dybderelation for hele landet baseret på alle tilgængelige, korrigerede temperaturværdier i dybdeintervallet 0 til 3000 m. Temperaturværdierne er stillet til rådighed af Niels Balling, Århus Universitet, og der er valgt en landsdækkende relation med en temperatur på 32°C i 1000 meters dybde, og på 62°C i 2000 meters dybde, samt antaget at der er en lineær temperaturstigning over dette temperaturinterval (Fig. 8). Dette valg er "forsigtigt", idet der for enkelte byer kan være grunde til at vælge andre temperaturer. Et eksempel på arten af sådanne overvejelser gives i diskussionen af forholdene i Ålborg.

3.2.2 Porøsitet

Da Gassum Sand er det reservoir, der har det største potentiale for de fleste byer har vi brugt porøsitetstværdier målt på denne formation til at beskrive porøsitet-dybderelationen. Som det ses af Figur 9A er der en stor spredning på disse tværdier. Spredningens indflydelse på beregningen af de tilstedeværende ressourcer er ikke kritisk. En absolut usikkerhed på $\pm 5\%$ på porøsiteten giver sig faktisk kun udslag i en relativ usikkerhed på de beregnede tilstedeværende ressourcer på knap 5%.

3.2.3 Permeabilitet

Ved produktion fra et reservoir vil der kun blive produceret fra reservoirintervaller med store net-sand tykkelser. Normalt måles permeabilitet på prøver udboret i kerner med faste dybdeintervaller (normalt med ca. 30 cm afstand), hvorfor der også vil blive målt permeabilitet i de dele af formationen, der ikke vil bidrage til en produktion. Målt permeabilitet udviser derfor altid en meget stor variation (Fig. 9B). Den valgte permeabilitet-dybderelation skal derfor være i overensstemmelse med de få datapunkter, som stammer fra pumpeforsøg (Fig. 10). Relationen er behæftet med væsentlige usikkerheder, dels som følge af det spinkle datagrundlag, men også som følge af en stor naturlig variation. Den store naturlige variation skyldes, at der er flere processer, som tilsammen forringer reservoirs permeabilitet: kornstørrelse, kompaktion, indhold af partikler i lerstørrelse, temperaturfølsomme udfældningsprocesser (af f.eks. kvarts og kalcit i porerummet) og temperaturfølsomme omdannelsesprocesser (af f.eks. feldspatminerale til lerminerale); faktorene varierer både med tiden og mod dybde. Den samlede effekt af disse processer er en ikke-lineær aftagende permeabilitet mod dybde. Det forventes således, at permeabiliteten aftager op til

en størrelsesorden i dybdeintervallet 1000-2000 m. I 2000 meters dybde forventes en permeabilitet på nogle få hundrede millidarcy. Denne gennemsnitlige forventning er behæftet med store, absolutte usikkerheder, og det danner grundlaget for valget af 2000 m som maksimale dybdegrænse for alle, men især, Gassum reservoirets 'Fairway'. I det tidligere arbejde blev denne dybde anvendt som den øverste grænse (Michelsen, 1981). De negative erfaringer fra Års-1 og Farsø-1 boringerne samt den dybtliggende Skagerrak Formation i Thisted-2 boringen underbygger yderligere valget af 2000 meter som 'fairway'ens maksimale dybde.

3.3 RESSOURCEOPGØRELSE

Ressourceberegningerne baseret på de valgte porøsitets- og temperatur- dybderelationer, og antagelserne om reservoirtykkelse, reservoirdybde samt net-sand tykkelse viser, at der er en lang række byer, hvor der i undergrunden findes store, geotermiske ressourcer til mere end 100 års opvarmning, også i fald hele den nødvendige energi til opvarmning skulle komme fra undergrunden. Af særlig interesse er byer, hvor der i Gassum Formationen forventes mere end 50 m net-sand tykkelse i dybdeintervallet mellem 1000 og 2000 m. Disse byer er: Brønderslev, Hillerød, Hjørring, Holbæk, Kalundborg, Kerteminde, Korsør, København, Nyborg, Randers, Roskilde, Skive og Ålborg (Tabel 2). I listens øvrige byer forventes der enten en forholdsvis tynd net Gassum sandsten (f.eks. Horsens og Århus), eller reservoirer, hvis kvalitet er behæftet med større usikkerhed: Bunter og Frederikshavn reservoirerne (f.eks. Vejle, henholdsvis Horsens). I bysamfundene med god Gassum reservoirkvalitet bor, takket være Københavns tilstedeværelse på denne liste, ca. halvdelen af Danmarks befolkning.

Tabel 2 viser de potentielle geotermibyer arrangeret m.h.t. kvaliteten af deres naturgivne forudsætninger for geotermi, efter størrelsen af en til formålet defineret "naturfaktor". En "naturfaktor" er produktet af net-sand tykkelsen (i meter), permeabilitet (i Darcy) og afkølingen (i grader Celsius), svarende til et produkt af "transmissiviteten" og afkølingen. Der er beregnet to "naturfaktor"er, - én, hvor der forudsættes en afkøling af geotermivandet til 20°C (med absorptionsvarmepumpe), og én, hvor der forudsættes en afkøling til 5°C (med el-varmepumpe). Af listen ses, at to store bysamfund ligger højt på begge lister: Ålborg og København. Som eksempler på, hvordan videregående geotermisk efterforskning kunne udføres, vil forholdene i og omkring disse to byer blive diskuteret nærmere.

4. ÅLBORG OG KØBENHAVN

4.1 ÅLBORG

Ålborg ligger geologisk set i Ålborg Graven, der er en dyb rift af Trias alder (Fig. 1). Den er begrænset af to delvist overlappende forkastninger: mod nord Børglum Forkastningen og mod syd Fjerritslev Forkastningen. Mellem disse hovedforkastninger ligger en serie af mindre forkastninger, som tildels har været bestemmende for hvor saltstrukturer som f.eks. Suldrup salthorsten er beliggende i dag (Fig. 11).

4.1.1 Datagrundlag

Til forståelse af den dybtliggende geologi i Ålborg-området eksisterer der en række olieeffterforskningsboringer og en del seismiske data. Relevante boringer er vist i Figur 6: Sæby-1 og Frederikshavn 1, 2 og 3 beskriver geologien på Skagerrak-Kattegat Platformen nord for Ålborg Graven; Børglum-1 og Flyvbjerg-1 den nordlige del af Ålborg Graven; Vedsted-1 og Haldager-1 den centrale del af Ålborg Graven; Fjerritslev-2, Hyllebjerg-1, Års-1, Farsø-1 og Hobro-1 den sydvestlige del og Ålborg Gravens sydlige forlængelse, Himmerland Graven. Disse boringer muliggør en god semi-regional forståelse af reservoirpotentialiet i området. De seismiske data er til gengæld sparsomme. Af disse er kun et fåtal af en brugbar kvalitet. Profilet i Figur 11 er konstrueret på basis af linien der i SSV til NNØ-lig retning går gennem Haldager-1 boringen. Det sparsomme seismiske datagrundlag betyder, at afgørende strukturelementers placering i undergrunden under Ålborg og dens nærmeste omgivelser er dårligt kendt. Eksistensen af et forholdsvis detaljeret gravimetrisk kort betyder dog, at hovedretningerne af undergrundselementerne kan styres efter dette trods det forholdsvis åbne seismiske datagrundlag.

4.1.2 Reservoirpotentialiet

På basis af boringerne tegner der sig et meget positivt billede af reservoirpotentialiet i Ålborg-området. Både Gassum Sand og Haldager Sand er fortykkede i Ålborg Graven, dog således at der oveni denne fortykkelse er en generel tiltagende andel af finkornet materiale imod sydvest. Gassum reservoirs generelle udvikling er beskrevet af Bertelsen (1978), som også illustrerer fortykkelsen af Gassum Sand i Ålborg Graven. Ifølge Bertelsen har Gassum Formationen en tykkelse på nær 200 m i Vedsted-1 og med en net-sand tykkelse på ca. 140 m (Haldager-1 boringen blev ikke boret til Gassum dybde). Haldager Sand er generelt tyndere end Gassum Sand, men i Haldager-1 og Vedsted-1 boringerne er der henholdsvis 88 og 55 m net-sand i Haldager Formationen. Gassum og Haldager reservoirerne ligger under Ålborg i dybder på mellem godt 1000 og 2000 m. Der kan således med stor sikkerhed forudsiges, at der er exceptionelt gode reservoirmuligheder i og omkring Ålborg, afspejlet i den litologiske prognose for Ålborg (Fig. 12).

Den væsentligste usikkerhed skyldes den meget ringe, seismiske datadækning. Det seismiske profil, der danner grundlag for Figur 11 antyder eksistensen af en mindre saltstruktur over den centrale og dybeste del af Ålborg Graven. Fra analoge situationer vides, at dette formentlig betyder at der parallelt med de overordnede strukturer vil være forkastninger, som har haft væsentlig indflydelse på den strukturelle udvikling og opbygning af reservoi-erne. Der er derfor en stor usikkerhed i dybdeprognoseerne, og i forløbet af de forkastninger der er tilknyttet denne mulige lokale saltstruktur.

Hvis der er en saltstruktur med en betragtelig højde under Ålborg vil dette også have indflydelse på temperaturerne. Over en saltstruktur kan der forventes forhøjede gennemsnitstemperaturer på grund af saltets gode varmeledningsevne. Denne effekt kan være væsentlig, og der er af denne grund en ekstra stor usikkerhed på temperaturprognosen for Ålborg. Den exceptionel høje temperaturmåling i Haldager-1 boringen kan være et resultat af en sådan nærliggende saltstruktur (Fig. 8).

4.1.3 Yderligere undersøgelser

I tilfælde af en beslutning om at foretage nærmere undersøgelser af det geotermiske potentiale i Ålborg-området betyder det eksisterende datagrundlag, at indsamling af seismik med henblik på at besvare spørgsmålene om reservoirdybder, forkastningsforløb og evt. forekomst af en saltstruktur under Ålborg bliver det afgørende element i et forarbejde, der kan udgøre beslutningsgrundlaget for et valg af borested. En revurdering af de eksisterende boredata vil også være nødvendig for dels at kunne udarbejde en troværdig boreprognose og dels for at kunne planlægge omfang af dataindsamling i boringen (d.v.s. logtyper). Figur 13 viser et forslag til et net af nye seismiske linier.

4.2 KØBENHAVN

Det geotermiske potentiale i Københavnsområdet blev ikke vurderet i forbindelse med den tidligere kortlægning af det danske geotermiske potentiale (Michelsen, 1981), formentlig på grund af det dårlige datagrundlag, og forventningen om, at potentielle reservoirinformationer ikke var begravet dybt nok, idet man dengang fokuserede på dybder større end 2000 m.

4.2.1 Datagrundlaget

Det østlige og sydøstlige Sjællands undergrund er dårligt kendt på grund af manglende borer og dårlig seismisk dækning. I tilstødende dele af Skåne er der til gengæld en relativ rigidom på både borer og seismik, hvilket betyder at geologien i Københavnsområdet i grove træk kan skitseres på basis denne viden. Ser man på Danmark i sin helhed er der et stort område øst for og syd for den dybeste del af Det Danske Bassin, hvor en stor del af de jurassiske aflejringer mangler. Borer i dette område vil typisk have bjergarter af Nedre Kridt alder hvilende på sedimenter af Nedre Jura alder, eller ældre, triassiske sedimenter. Dette er således tilfældet i de to danske borer, der er beliggende nærmest

København: Lavø-1 og Stenlille-1 (i Stenlille er der en række tætliggende gaslagerboringer). I begge borerer hviler Nedre Kridt lersten og sandsten direkte på Nedre Jura lersten tilhørende Fjerritslev Formationen. Det samme er tilfældet i Slagelse-1 boringen. Den flade, der adskiller aldersdiskontinuerte lag kaldes en ukonformitet, og den aktuelle flade er regionalt kendt i Nordsø bassinet som "Basis Kridt Ukonformiteten", BKU. Kortlægningen af BKU i Københavnsområdet er af central betydning for områdets stratigrafi. Mellem de ældste, mesozoiske sedimenter og de underliggende palæozoiske sedimenter findes endnu en markant ukonformitet: "Basis Mesozoikum Ukonformiteten", BMU.

Strukturelt er Københavnsområdet beliggende henover en forkastningszone, der er markant udviklet under BKU, den såkaldte Øresundsforkastning. Sammen med Svedala Forkastningen i Sverige danner den vest- og sydgrænsen for Hølviken Graven (Fig. 1). Dens østlige begrænsning dannes af endnu en markant forkastning, Romele Forkastningen (Vejlbæk, 1997). Denne forkastning var en normal forkastning der i Sen Kridt blev "inverteret", således at området øst for forkastningen blev presset op over Hølviken Graven, se profilet i Figur 14.

I geotermisk sammenhæng knytter usikkerhederne om den københavnske undergrund sig til Øresundsforkastningen og især dens betydning for stratigrafien. I forbindelse med udvalgsarbejdet har Sveriges Geologiske Undersøgelse i Lund udarbejdet en prognose for Københavns undergrund på basis af det skånske datagrundlag, som er tæt, sammenlignet med det danske (Sivhed og Erlström, 1997). Borerer af væsentlig betydning er de danske Lavø-1 og Stenlille-boringerne og i mindre grad Teme-1 og Hans-1 (Fig. 6), og de svenske Hølviksnæs-1, Barsebäck-1, Falsterbo Rev-1 og Ljunghusen-1. Disse borerer ligger alle relativt langt fra København, men viser dog entydigt, at den potentielt bedste reservoirformation er vidt udbredt i området og med en betydelig tykkelse. Det boringsmæssige datagrundlag er således ganske godt, men ikke så godt som for Ålborgs-områdets vedkommende, hvor der er to nærliggende borerer i en strukturel position svarende til selve Ålborg by. Det seismiske datagrundlag i nærheden af København er på dansk område tyndmasket og af dårlig kvalitet. I selve Københavnsområdet er der ingen relevante seismiske data. Dette efterlader en stor usikkerhed i vores viden om den københavnske undergrund.

4.2.2 Reservoirpotentialet

Sivhed og Erlström (1997) har udarbejdet en prognose for to områder i nærheden af København ud fra en antagelse om, at borerer på og nær Falsterbo halvøen er et gyldigt grundlag for en sådan prognose.

Den strukturelle usikkerhed. Beliggenheden, og den detaljerede geometri af Øresundsforkastningen er usikker. Det er således uklart, hvorledes en forkastning, der er kortlagt øst for Lavø-1-boringen i Nordsjælland skal videreføres mod syd til området syd for Amager, hvor Øresundsforkastningen er defineret og dens opside anført i Falsterbo Rev-1-boringen. Med andre ord: man ved ikke, hvor grænsen mellem København Øst og København Vest forløber. Der er mange grunde til at undgå forkastninger ved dybe borerer. Den væsentligste er, at man risikerer ikke at gennembore de stratigrafiske enheder, som det er

formålet at undersøge. Alene forventningen om en Øresundsforkastning i Københavns undergrund betyder, at der er en usikkerhed i prognosen for byens undergrund.

Den stratigrafiske usikkerhed. Der hersker ingen tvivl om, at stratigrafien øst og vest for Øresundsforkastningen vil være væsentligt forskellige (Fig. 15). Vest for forkastningen forventes der kun en forholdsvis tynd lagserie mellem de to vigtigste ukonformiteter, BKU og BMU. I både Lavø-1 og Falsterbo Rev-1 boringerne er der Gassum Sand bevaret i denne lagserie, men det betyder ikke, at dette også vil være tilfældet umiddelbar vest for Øresundsforkastningen i Københavnsområdet. Bunter Sandsten forventes ikke bevaret på opsidens (vestsiden) af Øresundsforkastningen, medens Amager Grønsandsten formentlig er bevaret, idet den ligger over BKU. Men kvaliteten af Amager Grønsandsten er meget varierende i Skåne og kan derfor godt være af generelt dårligere kvalitet omkring København. Øst for Øresundsforkastningen forventes således Amager Grønsandsten, Gassum Sand og Bunter Sandsten. Sandsten af Mellem og Øvre Jura alder kan også tænkes at forekomme øst for forkastningen. Der er således en veludviklet Haldager Sand i Teme-1 boringen umiddelbart nord for Sjælland (Fig. 6). I de geotekniske boringer, der i tresserne blev boret i forbindelse med planerne om en fast forbindelse mellem Helsingør og Helsingborg blev der fundet sedimenter, både grovklastiske og finklastiske, af Mellem og Øvre Jura alder (Larsen et al., 1968). I Mellem Jura lagene findes der sandede lag med indslag af kul, hvilket tyder på, at der i den nordlige del af Hølviken Graven forekommer en Haldager Sand ækvivalent. Den samlede Jura tykkelse i tunnellinien anslås af Larsen et al. (1968) til at være ca. 1000 m, hvilket er af samme størrelsesorden som i Teme-1 boringen, men mere end dobbelt så meget som i den tilsvarende lagserie i Lavø-1 boringen. Man må forvente en væsentlig tyndere (eller evt. slet ingen) Mellem til Øvre Juraserie under København. Nogle af usikkerhederne i prognosen for Københavns undergrund kan elimineres for forholdsvis lave omkostninger; andre vil kræve en boring.

4.2.3 Yderligere undersøgelser

I betragtning af, at der totalt mangler seismiske data i Københavnsområdet er et vigtigt første skridt i efterforskning af det geotermiske potentiale i Københavnsområdet etablering af den nødvendige, seismiske database. Da kvalitetsseismik i det københavnske område på land vil være forholdsvis dyr og tidskrævende at indsamle, forekommer det fornuftigt at planlægge en faseinddelt seismisk indsamling.

Første fase seismik. Det er formentlig muligt at indsamle seismik i vanddækkede områder (d.v.s. marin seismik) i en første fase, langs linier som antydtes i Figur 16. På grundlag af sådanne data kan Øresundsforkastningens geometri og forløb kortlægges i grove træk, og med forbindelse til svenske boringer via eksisterende svenske seismiske data kan tykkelsen af de potentielle reservoir lag i undergrunden kortlægges. På grundlag af denne første marine seismik vil man formentlig ikke kunne vurdere risikoen for erosion af Gassum reservoiret vest for Øresundsforkastningen, da kun en lille del af denne blok vil blive dækket med marin seismik i Køge Bugt.

Anden fase seismik. Potentialet i det vestligste København vil kræve indsamling af landseismik (vibroseis). Beliggenheden og tætheden af de seismiske linier vil kunne planlægges

ges på basis af seismik indsamlet under første fase. Ideelt vil denne seismik kunne etablere en forbindelse til Stenlille området hvor Gassum reservoiret er tykt og af god kvalitet. Landseismik vil også være et nødvendigt grundlag for udvælgelse af mulige borelokaliteter i området både øst og vest for Øresundsforkastningen, og det vil derfor kunne blive nødvendigt at indsamle flere landseismiske linier igennem potentielle lokaliteter for geotermiske produktionsboringer.

Boringer. En fyldestgørende efterforskningsindsats vil indebære to boringer, en øst for, og en vest for Øresundsforkastningen. Muligheden for at finde Bunter Sandsten øst for Øresundsforkastningen vil formentlig betyde, at det vil være fornuftigst at placere en første efterforskningsboring i Københavnsområdet øst for Øresundsforkastningen. Denne boring vil imidlertid ikke besvare spørgsmålet om Gassum Sands tykkelse og kvalitet på opsidens af forkastningen og dermed i det område, der i resourceskemaet kaldes "Roskilde/København Vest" (Tabel 1). For at undersøge det geotermiske potentiale i hele Københavnsområdet tilfredsstillende vil det, uanset resultaterne af en første boring, også være nødvendigt at bore vest for Øresundsforkastningen.

5. REFERENCER

- Berthelsen, F., 1978. The Upper Triassic-Lower Jurassic Vinding and Gassum Formations of the Norwegian-Danish Basin. DGU Serie B, No. 3, 26 pp.
- Britze, P., 1989. Geological Evolution and Hydrocarbon Potential of the Lolland-Falster Area. Thesis, Copenhagen University.
- Britze, P. & Japsen, P., 1991. Geologisk Kort over Danmark, 1:400.000. Det Danske Bassin, Top Zechstein og Trias. DGU Kortserie, 31.
- Danmarks Geologiske Undersøgelse, 1982. Geothermal Reservoirs in Denmark. DGU Energistyrelsen, Udvalg om Geotermi, 1998. Geotermi i Danmark Energistyrelsen. Energistyrelsen, Juni 1998.
- European Community Commission, 1988. Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland.
- Larsen, G., Christensen, O. B., Bang, I. & Buch, A., 1968. Øresund. Helsingør-Helsingborg Linien. Geologisk Rapport. DGU Rapport Nr. 1, 90 pp. plus 24 tavler.
- Michelsen, O. (ed.), 1981. Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark. DGU Serie B, Nr. 5, 96 pp.
- Sivhed, U. & Erlström, M., 1997. Förstudie angående geotermisk potential i Köpenhamnsområdet. Sammanställning av geologiska basdata från Sydvästskåne. SGU. Lund, 83 pp.
- Vejbæk, O. & Britze, P., 1994. Top præ-Zechstein. DGU Kortserie, 45.
- Vejbæk, O., 1997. Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. Geologisk Tidsskrift, 4, 40 pp.

6. TABEL- OG FIGUROVERSIGT

Tabel 1	GEOTERMISKE RESSOURCER
Tabel 2	POTENTIELLE DANSKE GEOTERMIBYER ARRANGERET EFTER KVALITETEN AF "DET NATURLIGE POTENTIALE" FOR GEO- TERMISK PRODUKTION (Risikoelementet er negligeret).
Figur 1	TEKTONISKE ELEMENTER.
Figur 2	RESERVOIRSANDSTEN.
Figur 3	STRATIGRAFISK SØJLE.
Figur 4	GASSUM KERNELOG.
Figur 5	HALDAGER SAND I ÅLBORG GRAVEN.
Figur 6	GEOTERMISKE 'FAIRWAY's.
Figur 7	NET/GROSS.
Figur 8	TEMPERATURDATA.
Figur 9	PORØSITETS- OG PERMEABILITETSDATA.
Figur 10	MODEL PORØSITET OG PERMEABILITET.
Figur 11	GEOLOGISK PROFIL GENNEM ÅLBORG GRAVEN.
Figur 12	LITOLOGISK PROGNOSE FOR ÅLBORGS UNDERGRUND.
Figur 13	FORSLAG TIL SEISMISK PROGRAM I ÅLBORG-OMRÅDET.
Figur 14	GEOLOGISK PROFIL FRA SJÆLLAND TIL SKÅNE.
Figur 15	LITOLOGISK PROGNOSE FOR KØBENHAVNS UNDERGRUND.
Figur 16	FORSLAG TIL SEISMSIK PROGRAM FOR KØBENHAVNSOMRÅDET.

6.1 FORKLARENDE NOTER TIL TABEL 1

Kolonnerne **dyb** angiver dybder til top, henholdsvis bund af den navngivne reservoirformation, i meter under havniveau. Kolonnen **net sd** angiver den "rene" sandtykkelse indenfor formationen, net-sand tykkelsen. I kolonnen **temp** er anført temperaturen som vurderet ud fra den generelle relation (Fig. 8), ligesom værdierne for porøsitet (**por**) og permeabilitet (**perm**) er aflæst fra de generelle relationer i Figur 10. I **resource**kolonnen er de tilstedeværende varmeressourcer, under forudsætning af en afkøling til 20°C af geotermivandet, anført som terrajoule / kvadratkilometer. Tallet angiver de tilstedeværende ressourcer / kvadratkilometer, d.v.s. ressourcetætheden. Den specifikke varmekapacitet for bjergarten varierer med porøsitet, men for porøsiteter mellem 20 og 30% varierer varmekapaciteten kun fra 2,50 til 2,73 J / gram / gr K. Det forholder sig således, at ressourcetætheden, målt som terrajoule / kvadratkilometer, er lig med produktet af varmekapacitet, net-sand i meter og afkøling. For de enkelte byer er der i kolonnen **areal** angivet arealet af den bymæssige bebyggelse plus en ca. to km bred zone omkring byen, således at produktet mellem dette tal og ressourcetætheden giver den anførte byressource i kolonnen **by-res.**, afrundet til nærmeste tusinde terrajoule. For at kunne perspektivere dette tal er byernes bruttovarmebehov (også i terrajoule) anført i kolonnen **behov**. De referencer, som ligger til grund for valg af dybder og net-sand tykkelser er anført i sidste kolonne.

Bemærkninger til udvalgte byer

Brønderslev. I dette tilfælde, som i andre hvor der under kilder til dybder og net-sand tykkelser er anført en, eller flere boringer, kommer data fra Michelsen et al, 1981. Ud fra eksisterende kort (Britze og Japsen, 1991: DDB kort i tabellen) er det vurderet, at Haldager Formationen under Brønderslev ligger ca. 100 m dybere end i Børglum-1 boringen.

Esbjerg. Dybder er vurderet ud fra top pre-Zechstein kortet (TPZ kort) (Vejbæk og Britze, 1994).

Haderslev. Net-sand tykkelsen er, som for Esbjerg, anført som "nul til". Dette afspejler en stor risiko for at der intet, eller kun et meget tyndt reservoir er tilstede. Bunter Sand reservoirs kvalitet er i øvrigt usikker og der er derfor ikke angivet hverken porøsitets- eller permeabilitetsværdier. Dette er gennemført systematisk for alle byer med en Bunter reservoirmulighed.

Hillerød. Dybder er vurderet på basis af en kortlægning af Gassum-niveau'et fra EU Atlas'et over geotermiske ressourcer i Europa, EU Atlas i Tabel 1 (European Community Commission, 1988), samt tykkelser som defineret i Lavø-1 boringen.

Holbæk. IR (ikke relevant) i sidste kolonne afspejler at Holbæk ikke er en fjernvarmeby.

Kerteminde. Det anførte bruttovarmebehov er opgjort for det område, der forsynes med fjernvarme fra Fynsværket, incl. Odense.

København Øst. Området øst for en linie fra Furesøen til Avedøre og syd for en linie fra Klampenborg til Bagsværd. I geologisk forstand er denne grænse meget usikker. Dybder og net-sand tykkelser er på basis af en rapport udarbejdet af Sveriges Geologiske Undersøgelse (SGU), SGU 97 i Tabel 1 (Sivhed og Erlstrøm, 1997).

Roskilde / København Vest. Geologisk er det området vest for Øresundsforkastningen (se afsnit 4.2). Det benyttede areal inkluderer for Roskilde en ca. 2 km bred zone omkring byen.

Skive. Skive ligger over en saltpude, hvorfor Gassum reservoiret forekommer i stærkt varierende dybde. Reservoiret er iøvrigt gennemsat af forkastninger og den optimale placering af evt. geotermisk indvinding kan først foretages efter et nærmere studium.

Ålborg. Dybderne er vurderet på basis af den seismiske linie DNJ-100. Usikkerhederne på både dybder og tykkelser skønnes at være store, da der i Ålborg-området kan forekomme en saltstruktur i undergrunden (se afsnit 4.1).

Århus. Arealet medtager selve Århus samt en 2 km zone heromkring. At fjernvarmesystemet er udbygget mod Skanderborg er der ikke taget hensyn til i arealberegningen.

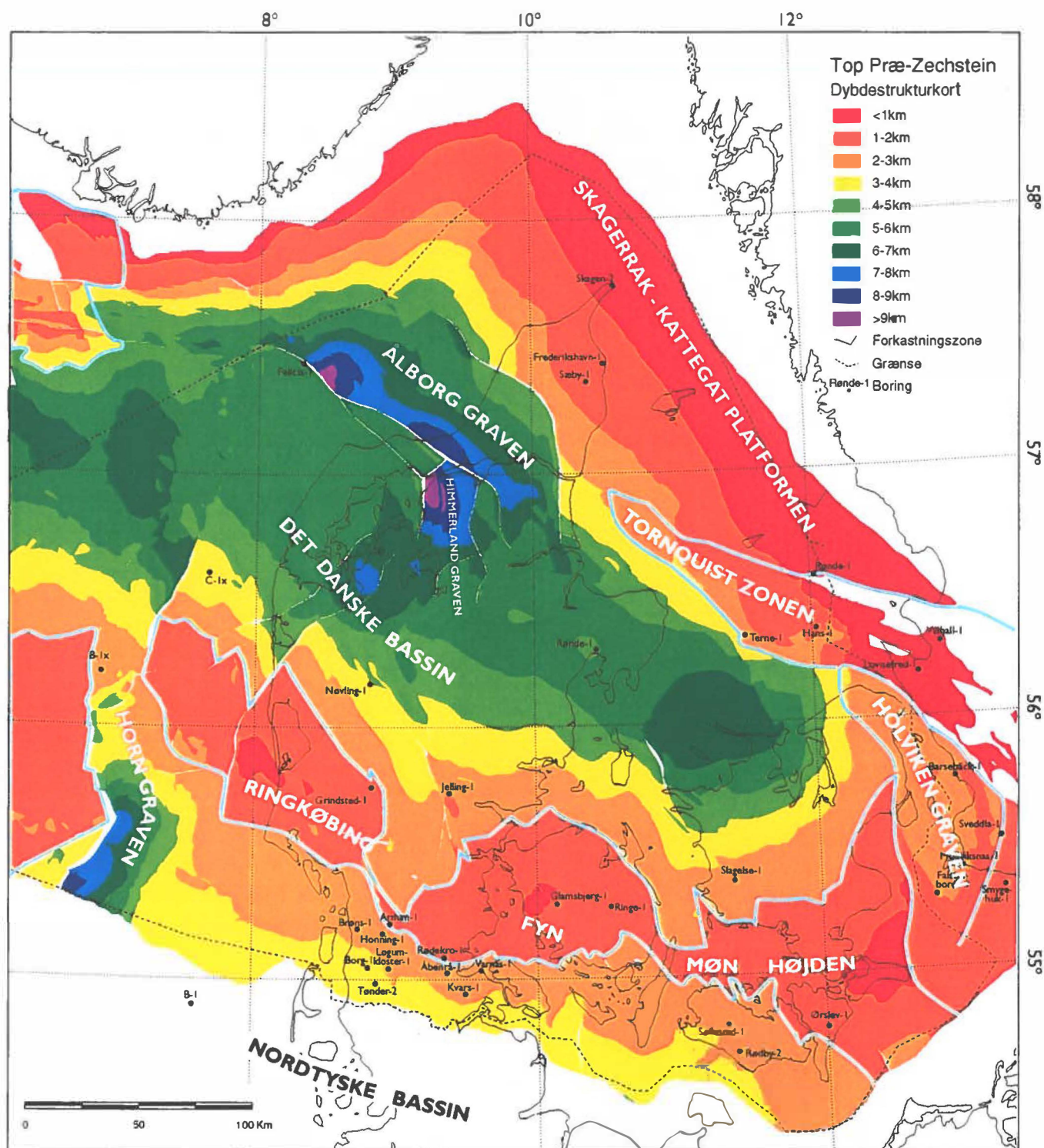
	RESERVOIR	dyb top,m	dyb bund	net sd (m)	temp gr C	por (%)	perm mdarcy	resource TJ / KV KM	areal (KV KM)	by-res. (TJ)	behov (TJ / ÅR)	kilder;dybder, tykkelser og net-sand
BRØNDERSLEV	Haldager	1130	1160	20	36	29	3000	864	32	28000	563	Børglum-1 + 100m (DDB kort) / Børglum-1
BRØNDERSLEV	Gassum	1450	1600	50	48	26	1200	3682	32	118000	do	Børglum-1 + 100m (DDB kort) / Børglum-1
ESBJERG	Bunter	1640		0-40	52				67		4614	DDB og TPZ kort / Grindsted-1
HADERSLEV	Bunter	1200		0-20	38						740	TPZ kort, Rødekro-1 / Rødekro-1 som max.
HILLERØD	Nedre Kridt	1770	1850	35	56	22		3175	38	121000	1209	EU Atlas, Lavø-1 / Lavø-1
HILLERØD	Gassum	1900	2100	90	62	20	400	9337	38	355000	do	EU Atlas, Lavø-1 / Lavø-1
HJØRRING	Haldager	1000	1060	40	33	30	3300	1420	50	71000	1215	Flyvbjerg-1 + 50 m (DDB kort) / Flyvbjerg-1
HJØRRING	Gassum	1300	1500	90	44	27	1500	5724	50	286000	do	Flyvbjerg-1 + 50 m (DDB kort) / Flyvbjerg-1
HOLBÆK	Gassum	1850	2000	90	60	21	500	8964	33	296000	IR	EU-atlas, Stenlille-1/Stenlille-1
HORSENS	Frederikshavn	1170	1230	35	38	29	2300	1707	72	123000	1421	DDB kort, Horsens-1/Horsens-1
HORSENS	Gassum	1450	1550	25	47	26	1200	1850	72	133000	do	DDB kort, Horsens-1/Horsens-1
KALUNDBORG	Gassum	1600	1750	90	52	21	800	7171	50	359000	846	EU Atlas, Stenlille-1 / Stenlille-1
KERTEMINDE	Gassum	1000	1100	50	34	30	3100	1918	27	52000	8868	EU Atlas, Ullerslev-1 / Ullerslev-1
KORSØR	Gassum	1050	1200	40	36	29	3000	1728	28	48000	863	EU Atlas, Slagelse-1 / Slagelse-1
KORSØR	Bunter	1750	1950	70	58	22		6703	28	188000	do	EU Atlas, Slagelse-1 / Slagelse-1
KBHVN. ØST	Arnager	1300	1400	30	43	27		1829			42391	SGU 97 / SGU 97
KBHVN ØST	Gassum	1400	1600	100	47	26	1200	7101	250	1775000	do	do.
KBHVN ØST	Bunter	2000	2200	70	65	20		7781			do	do.
NAKSKOV	Bunter	1600	1900	40	55	23		3570	36	129000	614	P.Britze (1989) , Søllested-1 / Søllested-1
NYBORG	Gassum	1000	1100	50	34	30	3100	1918	42	81000	739	EU Atlas,Ullerslev-1 / Ullerslev-1
NYKØBING F.	Bunter	1100		0-20	35	29					903	Ørslev-1/Ørslev-1
NÆSTVED	Bunter	1300	1500	70	44	26		4418	56	247000	979	Michelsen 91, fig.14, Slagelse-1 / Slagelse-1
RANDERS	Frederikshavn	1400	1500	25	46	26	1400	1710	76	130000	2791	DDB kort, Gassum-1 / Gassum-1
RANDERS	Gassum	1900	2030	50	61	22	400	5166	21	108000	do	DDB kort, Gassum-1 / Gassum-1

Geotermiske resourcer

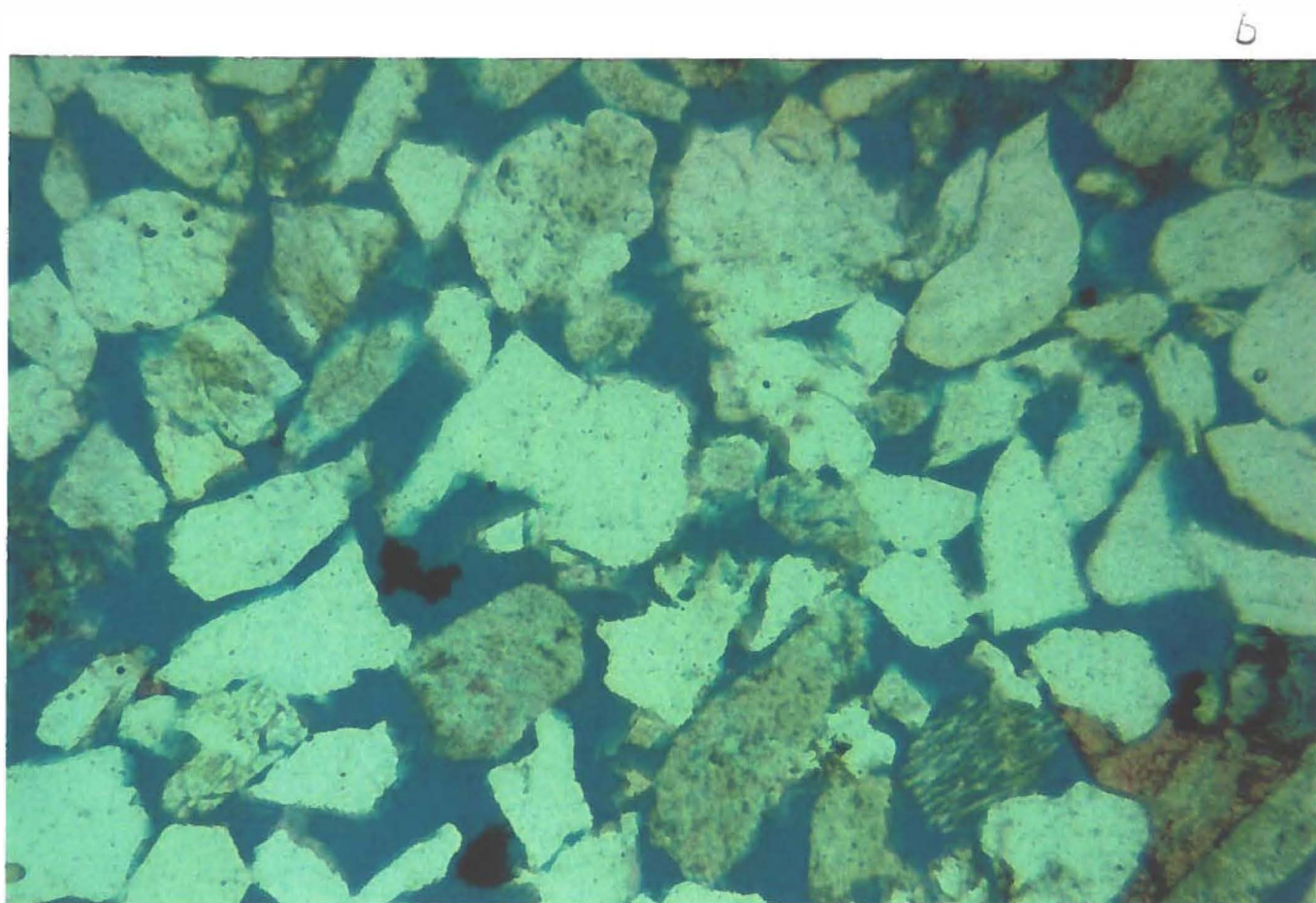
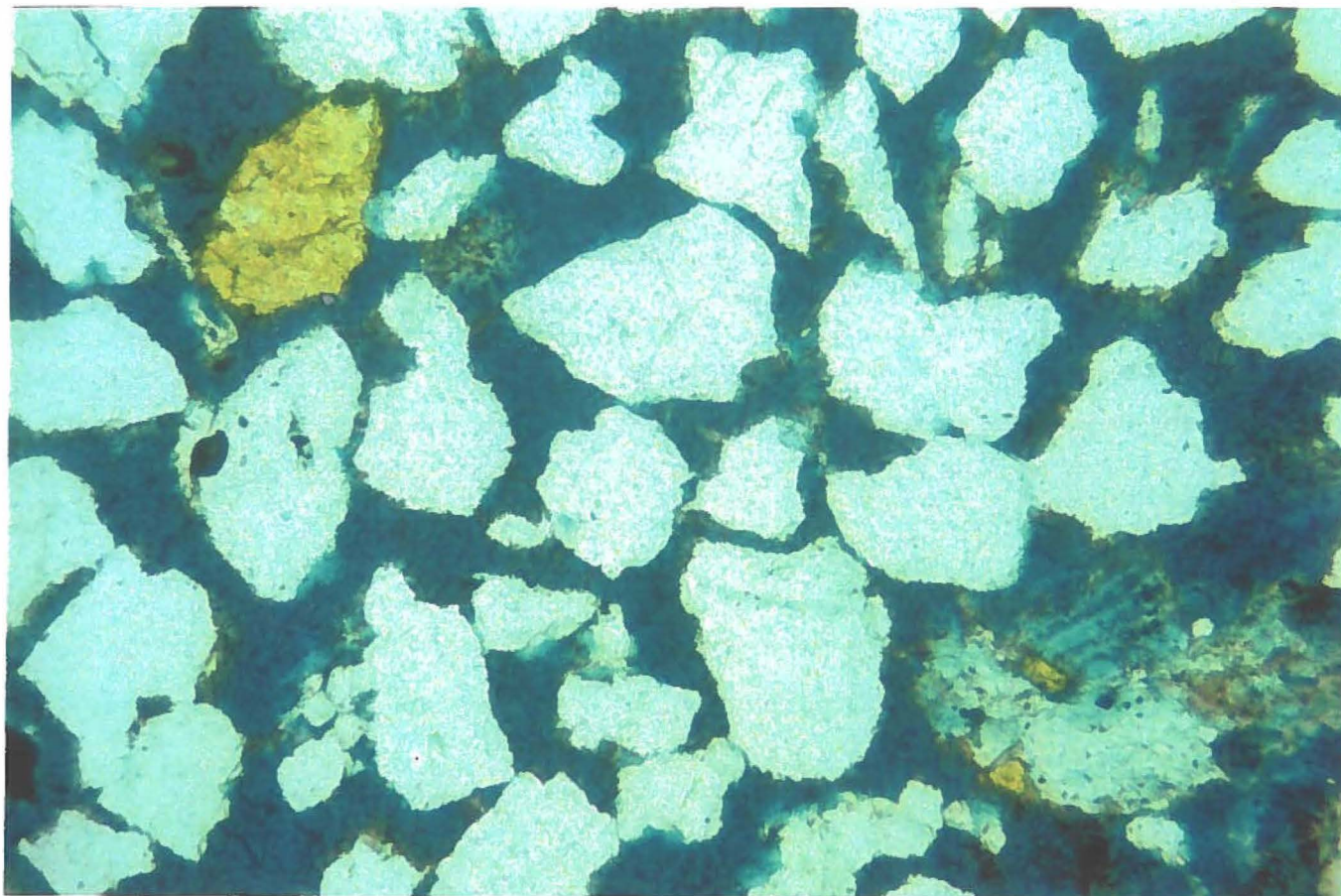
TABEL 1

ROSكيلDE/KBH V	Gassum	1600	1800	90	53	24	800	7633	65	496000	42391	EU-atlas, Stenlille-1/Stenlille-1
SKIVE	Gassum	300-2000		30-50	41-62		1900-400	?			661	detailstudium nødvendigt
SLAGELSE	Gassum	1100	1250	40	37	28	2400	1822	45	82000	853	Slagelse-1/Slagelse-1
SLAGELSE	Bunter	1800	2000	70	59						do	do.
SVENDBORG	Bunter	1050		0-20	34						553	
VEJLE	Bunter	1650	1750	85	53				70		6915	Jelling-1 + 100m/Jelling-1
ÅBENRÅ	Bunter	1470	1580	0-30	48						1184	Åbenrå-1
ÅLBORG NØ	Haldager	1000	1100	65	34	30	3000	2493	50	125000	7426	DNJ-100, Flyvbjerg-1,Haldager-1/do.
ÅLBORG NØ	Gassum	1400	1550	100	46	26	1400	6838	50	342000	do	DNJ-100, Vedsted-1/Vedsted-1
ÅLBORG SV	Frederikshavn	900	1000	45	30	30	4000	1233	80	99000	do	DNJ-100, Flyvbjerg-1,Haldager-1/do.
ÅLBORG SV	Haldager	1200	1350	80	40	28	2000	4502	80	360000	do	DNJ-100,Haldager-1/Haldager-1
ÅLBORG SV	Gassum	1800	1950	100	58	23	500	9690	80	775000	do	DNJ-100,Vedsted-1/Vedsted-1
ÅRHUS	Frederikshavn	1600	1680	30	51	25	900	2418	127	307000	13419	DDB kort, Voldum-1, Horsens-1/ do
ÅRHUS	Gassum	1900	1960	30	60	22	400	3024	127	384000	do	DDB kort, Voldum-1, Rønde-1, Horsens-1/do.

BY&RESERVOIR	"NATURFAKTOR" 1 (afkøling til 20 gr C)	BY & RESERVOIR	"NATURFAKTOR" 2 (afkøling til 5 gr C)
1 Ålborg NØ/Gassum	3640	1 Ålborg NØ/Gassum	5740
2 København Ø/Gassum	3240	2 Ålborg NØ/Haldager	5655
3 Hjørring/Gassum	3240	3 Ålborg SV/Haldager	5600
4 Ålborg SV/Haldager	3200	4 Hjørring/Gassum	5265
5 Ålborg NØ/Haldager	2730	5 København Ø/Gassum	5040
6 Rosk.Kbh.V/Gassum	2376	6 Ålborg SV/Fr.Havn	4500
7 Kalundborg/Gassum	2304	7 Nyborg/Gassum	4495
8 Nyborg/Gassum	2170	8 Kerteminde/Gassum	4495
9 Kerteminde/Gassum	2170	9 Hjørring/Haldager	3696
10 Ålborg SV/Gassum	1900	10 Rosk.Kbh.V/Gassum	3456
11 Ålborg SV/Fr.Havn	1800	11 Kalundborg/Gassum	3384
12 Holbæk/Gassum	1800	12 Slagelse/Gassum	3072
13 Hjørring/Haldager	1716	13 Horsens/Fr.Havn	2657
14 Brønderslev/Gassum	1680	14 Ålborg SV/Gassum	2650
15 Slagelse Gassum	1632	15 Brønderslev/Gassum	2580
16 Hillerød/Gassum	1512	16 Holbæk/Gassum	2475
17 Horsens/Fr.Havn	1449	17 Hillerød/Gassum	2052
18 Brønderslev/Haldager	960	18 Brønderslev/Haldager	1860
19 Randers/Fr.Havn	910	19 Randers/Fr.Havn	1435
20 Århus/Fr.Havn	837	20 Horsens/Gassum	1260
21 Randers/Gassum	820	21 Århus/Fr.Havn	1242
22 Horsens/Gassum	810	22 Randers/Gassum	1120
23 Århus/Gassum	480	23 Århus/Gassum	660

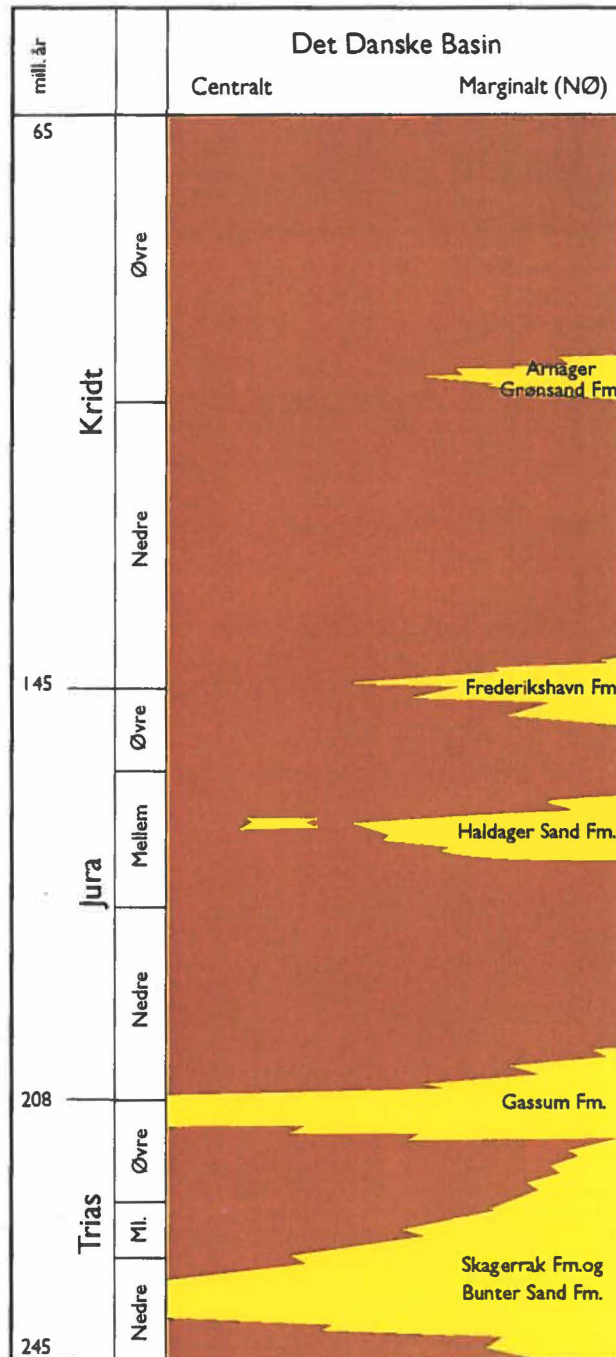


Figur 1. **TEKTONISKE ELEMENTER.** Det dybeste niveau i det danske område, der kan kortlægges regionalt benævnes "Top Præ-Zechstein Fladen" (Vejbæk og Brtze, 1994). Dybden til denne flade, hvis natur og kortlægning er beskrevet af Vejbæk (1997), er afbildet som farve-konturkort. De vigtigste tektoniske elementer i undergrunden, samt elementer som iverigt er nævnt i teksten er afgrænset på basis af dette konturkort. Kun de dybe borer, der har nået den kortlagte flade, er vist.



B

Figur 2. RESERVOIRSANDSTEN. Tyndslidsbilleder af sandsten fra Det Danske Bassin. De enkelte kom er ca 0,5 mm store. A: Haldager Sand fra 1154 meters dybde i boringen Haldager-1 i Ålborg Graven (se Fig. 1 og Fig. 11). Kvarts (lystfarvet og klar) er hovedmineralet. Porerummet er imprægneret med atrazin (blåt) og det udgør ca. 30 % af sandstensens volumen (den porøsitet). Dette er en meget høj porøsitet (se Fig. 10 for en generaliseret relation mellem porøsitet og dybde). B: Gassum Sand fra 1633 meters dybde i Gassum-1 boringen, umiddelbart nord for Randers (se Fig. 6). Porøsiteten er 20% og kan klassificeres som "god". Fotos af Palle Rubæk Andersen



Figur 3. **STRATIGRAFISK SØJLE.** Generaliseret og forenklet stratigrafisk model for reservoirsandsten i den centrale del af Det Danske Basin (til venstre) og i det nordøstlige, bassin marginale område, som igennem store dele af Trias, Jura og Nedre Kridt har ligget nært oprindelsesområdet for sandet. Mod nordøst er sandet tykkere og aflejringen er udstrakt over længere tid end i de centrale dele af Det Danske Basin.

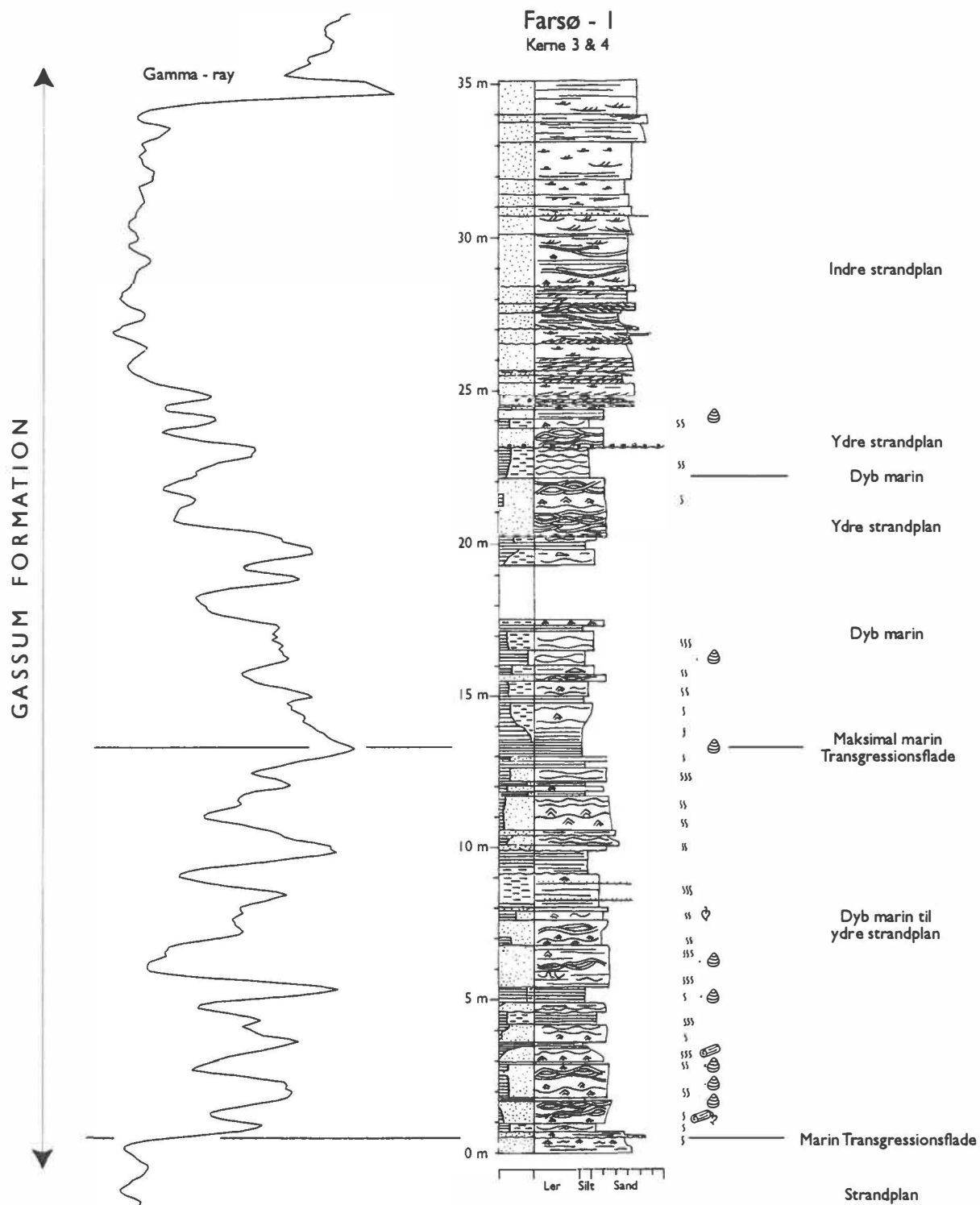
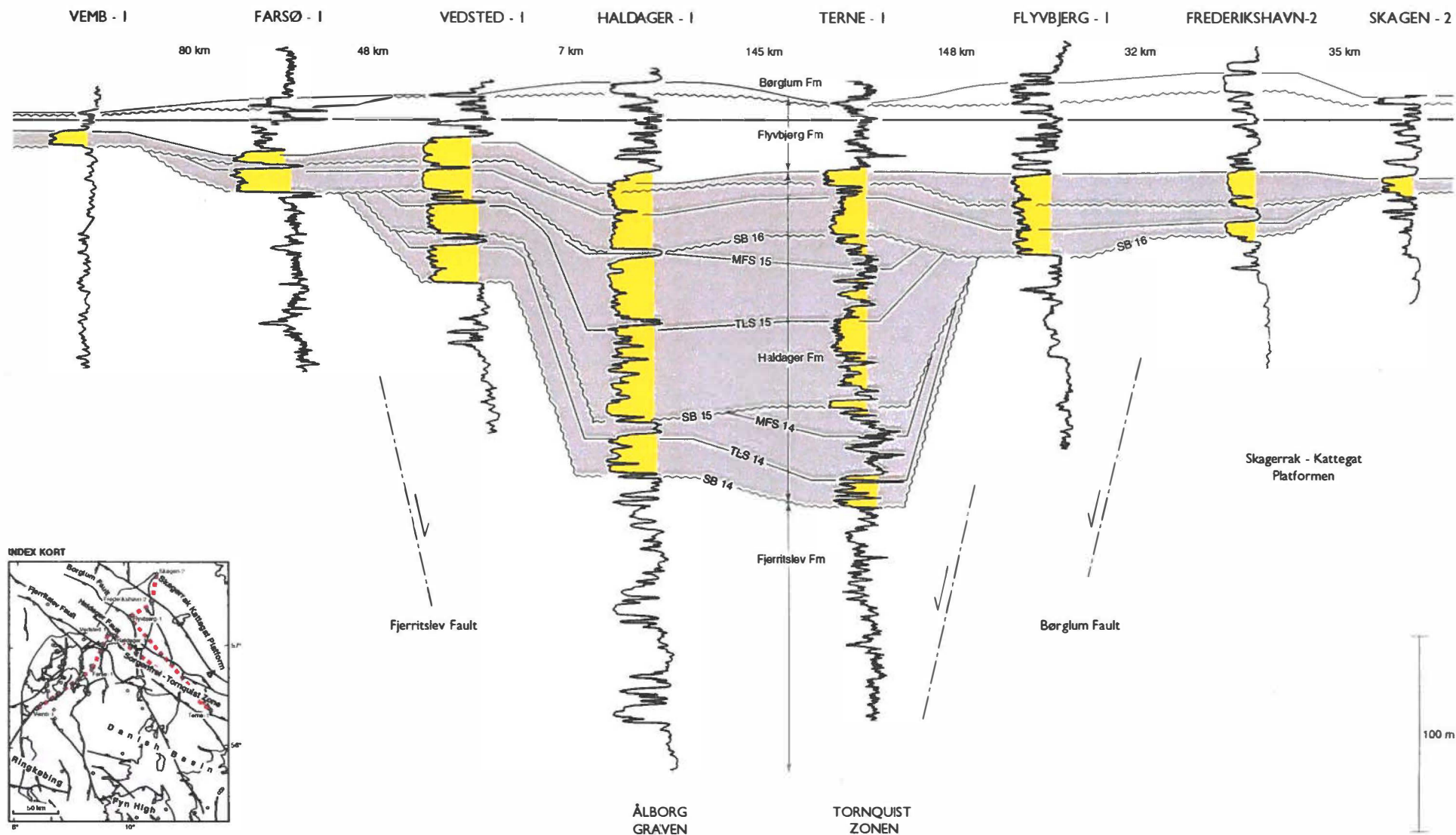
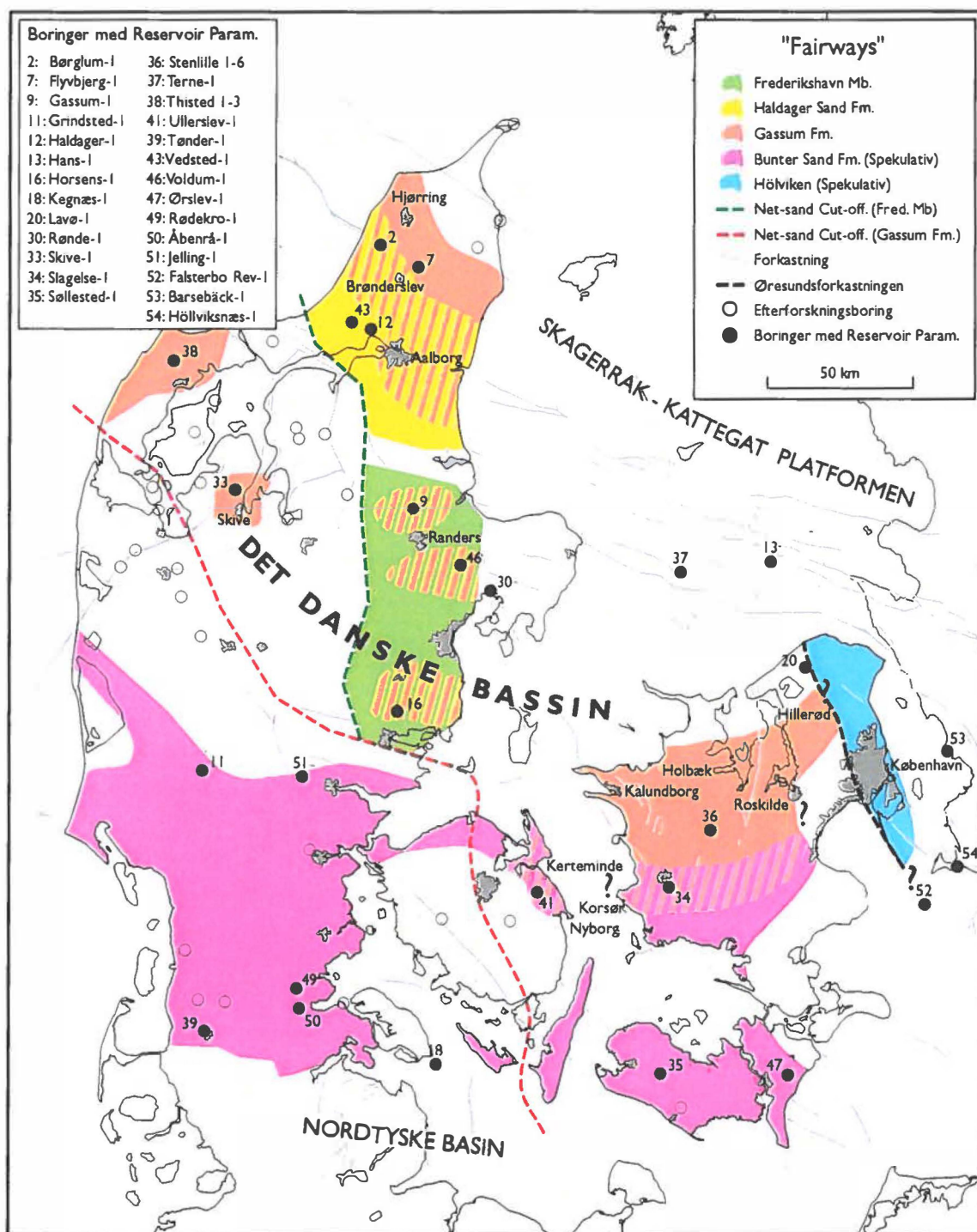


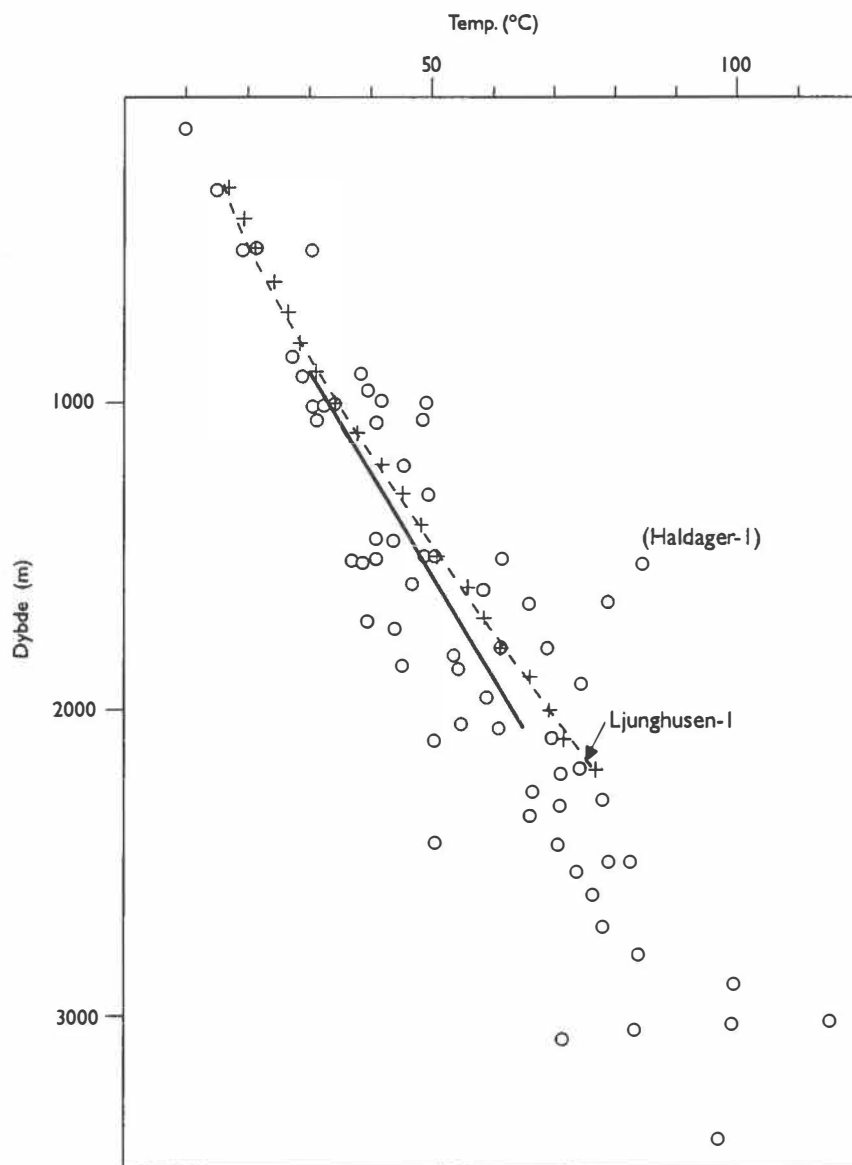
Figure 4. GASSUM KERNELOG. I Farsø-1 boringen blev der taget kerner i Gassum Formationen i næsten 3 kilometers dybde. På basis af kernerne er der foretaget en sedimentologisk tolkning af de skiftende aflejringsmiljøer. Til venstre for kernetolkningen er vist intensiteten af gammastrålingen (en "gamma log"). Udslag til venstre, dvs. lave værdier, indikerer tilstedeværelsen af sand, mens udslag mod højre antyder tilstedeværelsen af lersten eller lerskifer. Dette eksempel viser, at et "gross" reservoirsand interval oftest er en kompleks "pakke" af reservoir og ikke-reservoir (se i øvrigt Fig. 7).



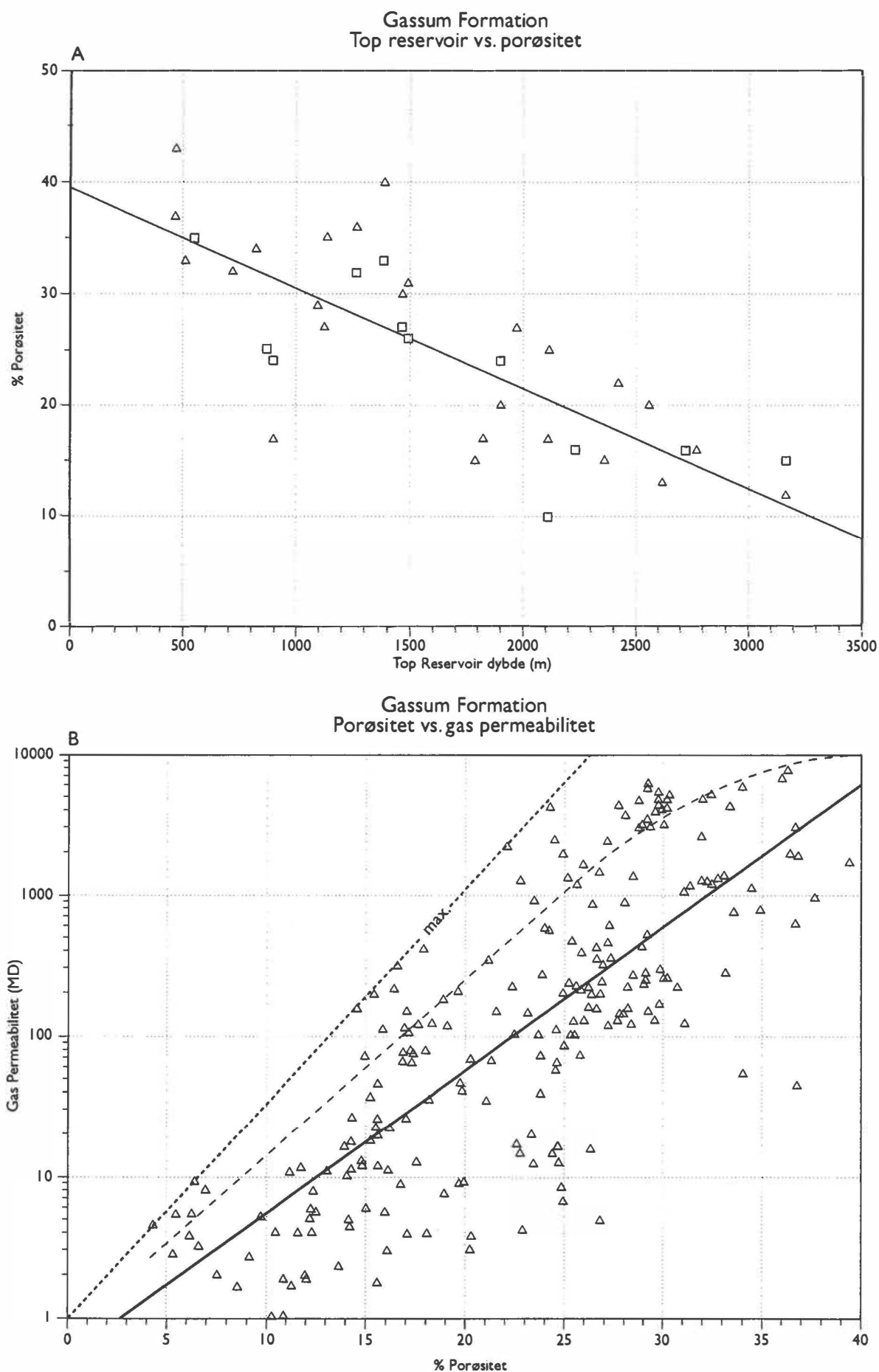
Figur 5. HALDAGER SAND I ÅLBORG GRAVEN. Haldager Formationen er markant fortykket i Ålborg Graven, som det fremgår af denne sammenstilling af logs fra en række nordjyske borer. For hver boring er der vist en SP ("Spontaneous Potential") log. Sandlagene i Haldager Formationen er vist med gul farve. Det ses også, at der i Terne-1 boringen forekommer en tyk Haldager Formation. Terne-1 er beliggende i Tornquist Zonen, som før inversion udgjorde en tektonisk fortsættelse af Ålborg Graven. (Se index kort.)



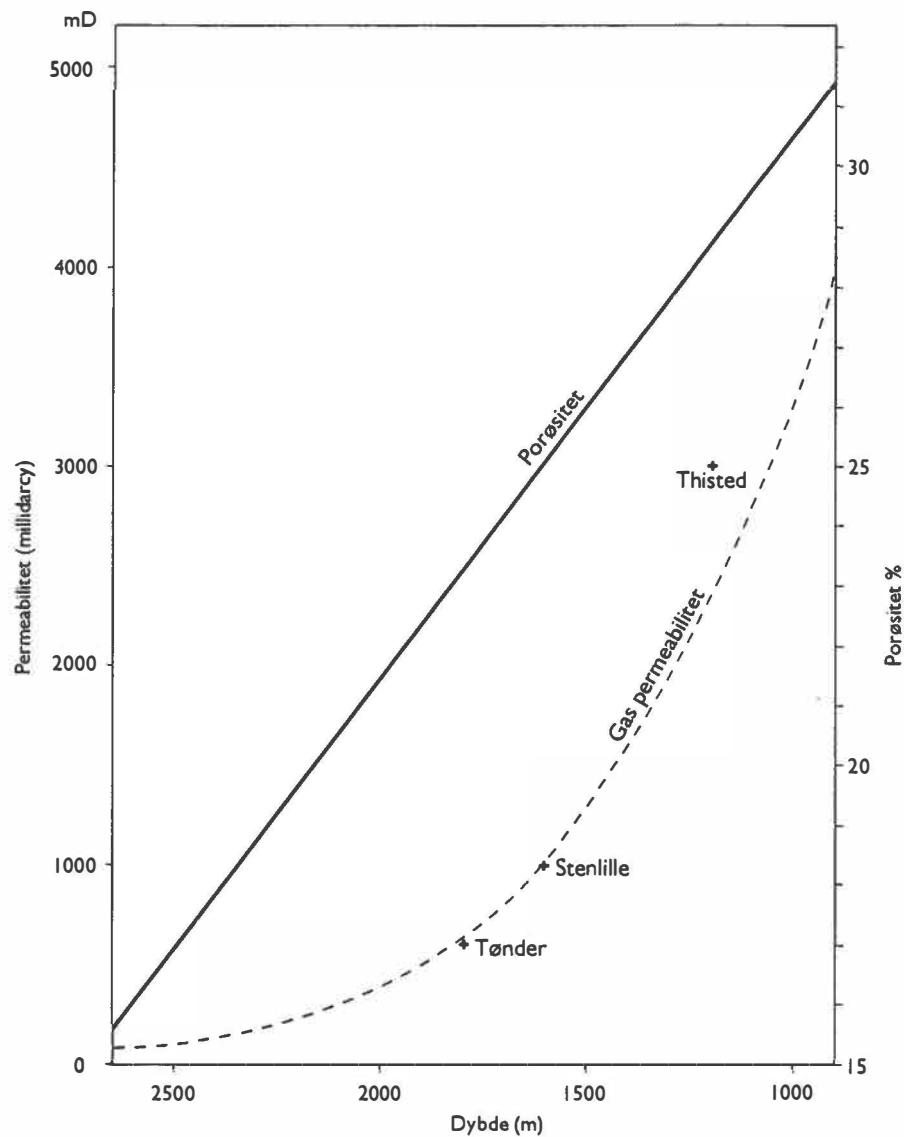
Figur 6. GEOTERMISKE "FAIRWAYS". For hvert reservoir, er de områder, hvor reservoiret findes i en dybde på 1000-2000 m og har en net-sand tykkelse over ca. 20 m anført. Dette kaldes reservoirets "fairway" og er det område hvor reservoiret forventes at kunne anvendes til geotermisk produktion. "Hölviken Fairway" indeholder flere potentielle reservoirer, herunder Gassum Fm. Spørgsmålsteget SØ for Roskilde skal illustrere, at Gassum Formationen muligvis er eroderet væk, evt. ikke aflejret, i et område vest for Øresundsforkastningen (se Fig. 14, hvorledes Gassum Fm., der anvendes til gaslagring i Stenlille, kan tænkes at "forsvinde" mod øst på den højeste del af Møn Højden).



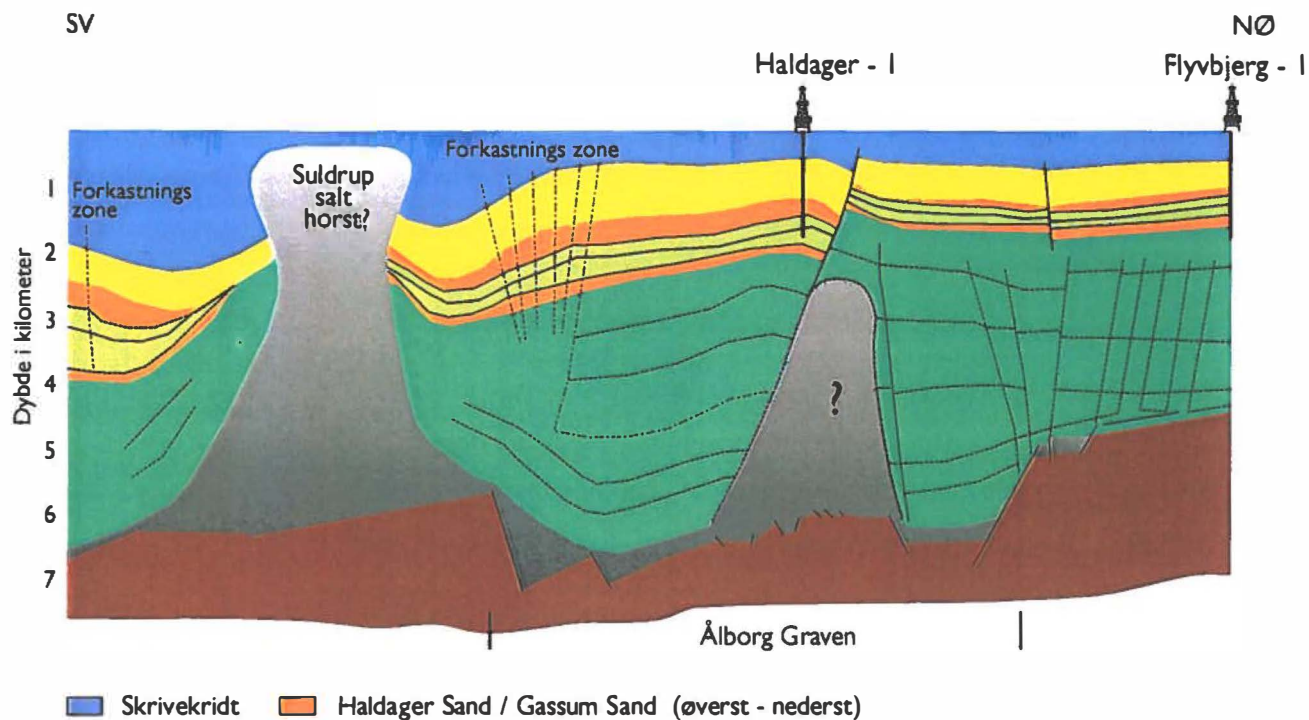
Figur 8. **TEMPERATURDATA.** Korrigerede temperaturværdier fra dybde danske landboringer(o). Ved en normal boring måles temperaturen i forbindelse med "logging" af et åbentstående borehul før der sættes foringsrør. For hver boring eksisterer der derfor normalt kun få temperaturmålinger. I den svenske Ljunghusen-1 boring, blev der temperaturlogget i mange niveauer(+). Denne kurve er vist sammen med de danske enkeltboringer. Ljunghusen-1 målingerne kan anvendes som prognose for temperaturforholdene under København. Bemærk den stærkt afvigende Haldager-1 måling og den "landsdækkende relation", vist som en tyk linie. De korrigerede danske temperaturdata er stillet til rådighed af Niels Balling, Århus Universitet



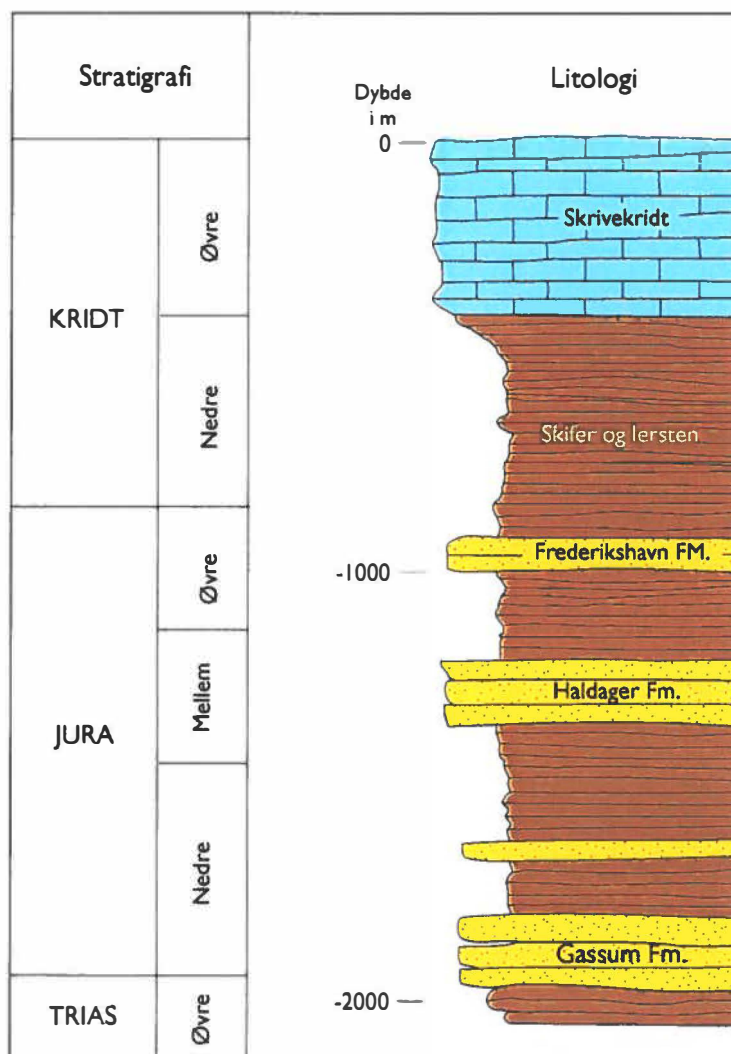
Figur 9. PORØSITETS OG PERMEABILITETS DATA. A: Porøsitet som funktion af dybde for Gassum Formationen. Hvert punkt repræsenterer et gennemsnit af værdier i én boring. Firkanter angiver porøsiteter målt på kerner og trekanter angiver porøsiteter beregnet på grundlag af logmålinger. B: Permeabilitet af gas mod porøsitet i Gassum Formationen. Hvert punkt angiver en måling på én "plug". Den logaritmiske "medianlinje" og en afgrænsning af de maksimale værdier er vist fuldt optrukket, henholdsvis tyk stiple. Imellem disse to linier er med fin stipling angivet en valgt generel relation for sammenhængen mellem porøsitet og permeabilitet.



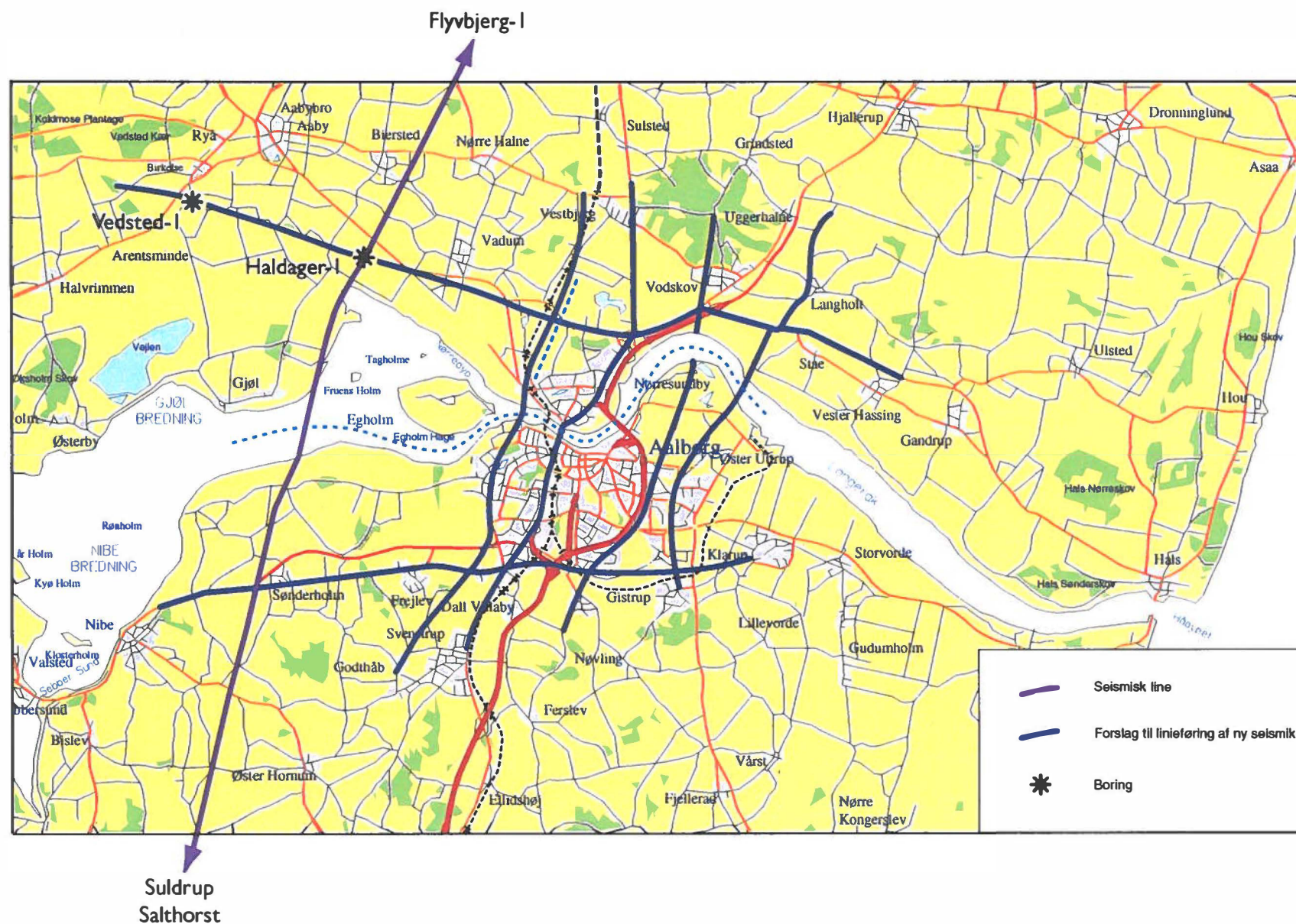
Figur 10. MODEL PORØSITET OG PERMEABILITET. Modelporøsitet for sandstensreservoirer i den danske undergrund (Gassum og Haldager formationerne) fra Fig. 9A. I beregningen af den geotermiske ressource forudsættes kun net-sand intervallet "tappet". Den gennemsnitlige porøsitet i net-sandet er ikke kendt, men forventes kun at afvige ubetydeligt fra den vist i Fig. 9A, da porøsiteten i skifer ikke afviger væsentligt fra porøsiteten i sand. For permeabilitet er forholdet anderledes, og derfor er der i modelrelationen (fint stiplede linie i Fig. 9B) for permeabilitet kun taget hensyn til de 50% højeste permeabiliteter. Hvorvidt det bagvedliggende ræsonnement er relevant kan kun kontrolleres ved sammenligning med pumpedata (+): (Thisted, Stenlille og Tønder.) Den gennemsnitlige permeabilitet i de producerende intervaller i disse tre borer ses at falde tæt på den valgte modelpermeabilitet, som derfor må anses for at være en tilfredsstillende model (uanset om måden hvorpå den er fremkommet må anses for "videnskabeligt utilfredsstillende"). Pumpedata for borerne Tønder, Stenlille og Thisted, er stillet til rådighed af D.O.N.G.

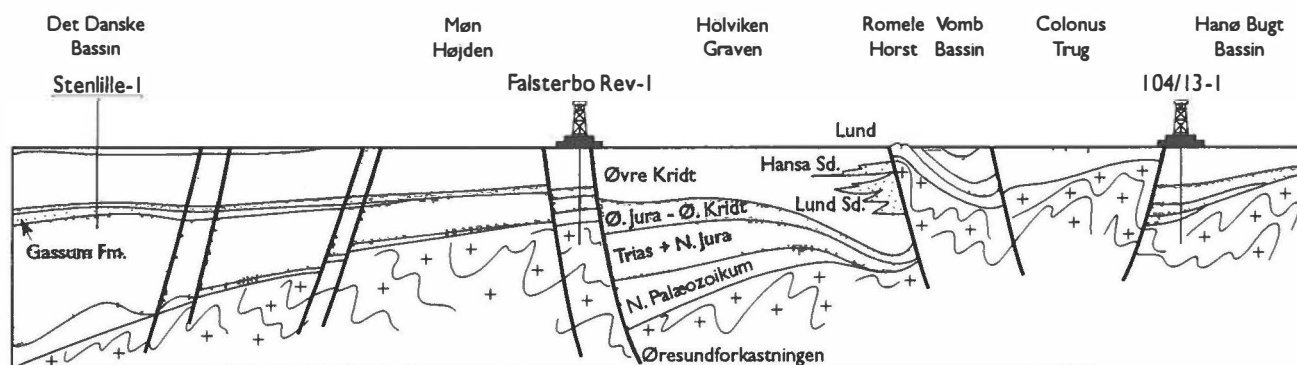


Figur 11. GEOLOGISK PROFIL GENNEM ÅLBORG GRAVEN. Profilet er konstrueret på basis af en seismisk linie gennem Suldrup salt horsten og Haldager-1 boringen. Profilets beliggenhed er vist i Fig. 13. Den seismiske kvalitet er dårlig umiddelbart nord for Haldager-1 boringen. En forklaring herpå kan være, at der ligger en mindre salt struktur i nærheden af boringen (vist med ? i profilet). Hvis dette er tilfældet kan både den store tykkelse af Haldager Sand, og den høje temperatur i Haldager-1 boringen (Fig. 8) være et lokalt fænomen. Profilet er konstrueret på basis af tolkning og dybdekonvertering af Ioannis Abatzis. GEUS.



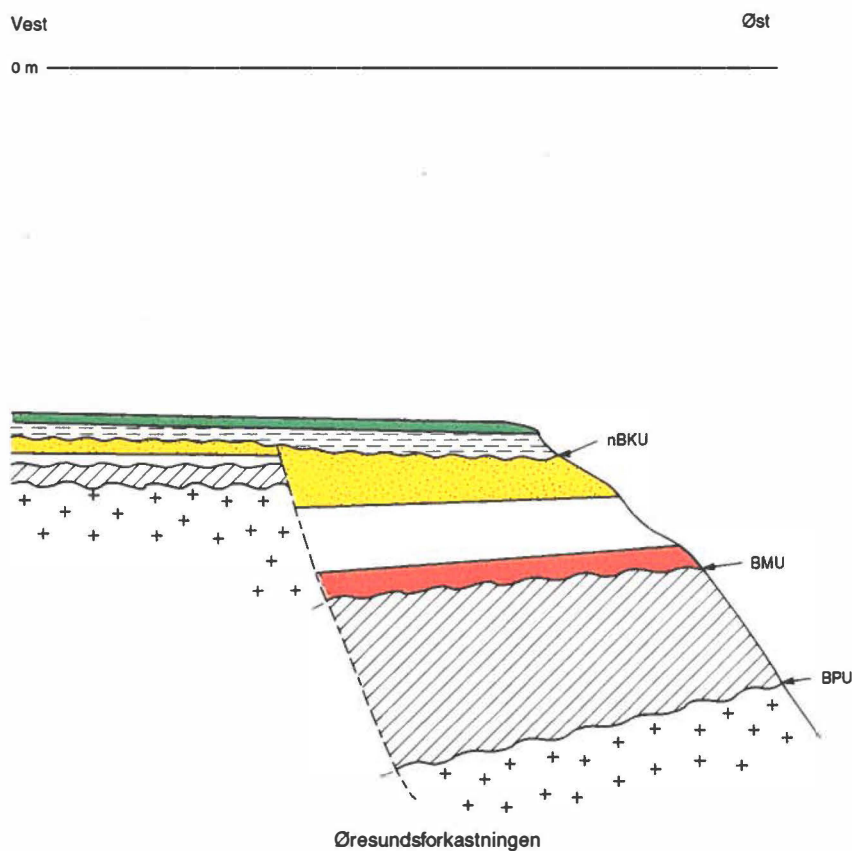
Figur 12. LITOLOGISK PROGNOSE FOR ÅLBORGS UNDERGRUND. Dette er en meget skematisk prognose for Ålborg-områdets undergrund, idet en eventuel tilstedeværelse af salt strukturer har betydning for litologien (jvf. bemærkningerne i teksten til Fig. 11). En prognose for Ålborgs undergrund, med samme detaljeringsgrad som prognosen for København (Fig. 15), kan først fremstilles efter indsamling af seismik, se Fig. 13.





Figur 14. GEOLOGISK PROFIL FRA SJÆLLAND TIL SKÅNE. Profilet illustrerer Hølviken Gravens beliggenhed i forhold til Det Danske Bassin og inversionszonen i Skåne (Tomquist Zonen). Se også Fig. 1, 6.

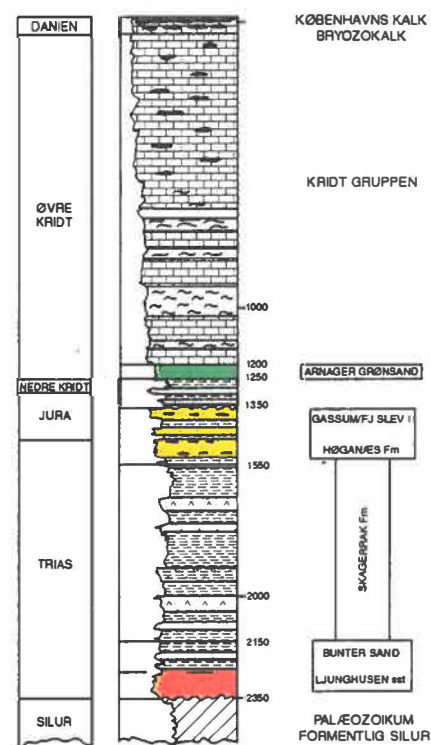
"Principskitse" gennem undergrunden syd for København



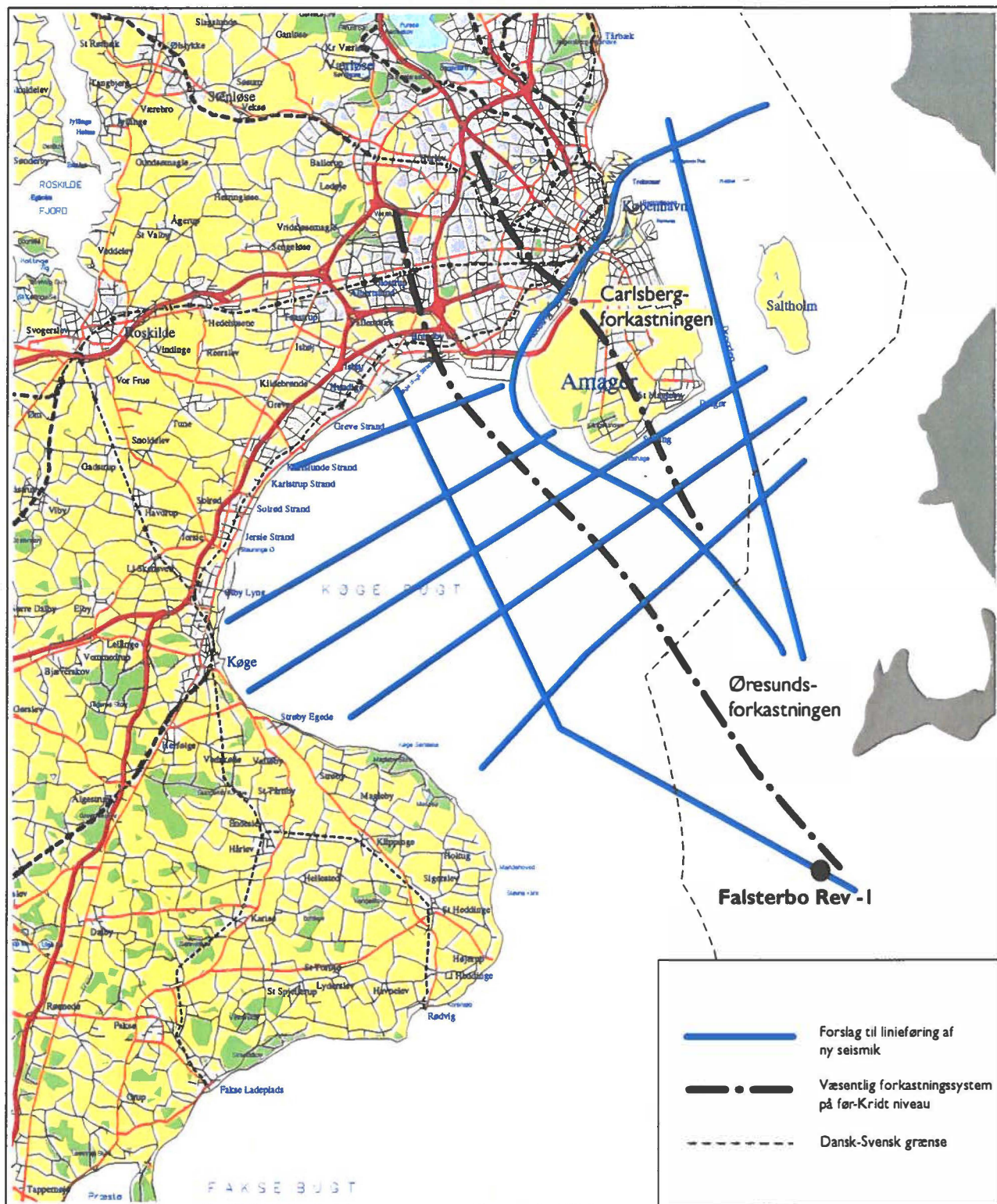
nBKU Nær basis Kridt ukonformitet
 BMU Basis Mesozoikum ukonformitet
 BPU Basis Palæozoikum ukonformitet

Prognose for
 Københavns nedside
 af
 Øresundsforkastningen

Litologi



Figur 15. LITOLOGISK PROGNOSE FOR KØBENHAVNS UNDERGRUND. De bedste reservoirmuligheder i København findes sandsynligvis på nedsiden (østsiden) af Øresundsforkastningen, hvis formodede forløb gennem København er vist på Fig. 16. En prognose for litologien på nedsiden af Øresundsforkastningen er vist til højre i figuren. Til venstre er skematisk vist forskellen på op- og nedsiden af Øresundsforkastningen. Tre potentielle reservoirintervaller er fremhævet med farver. For nærmere forklaring se tekst.



Figur 16. FORSLAG TIL SEISMISK PROGRAM I KØBENHAVNS-OMRÅDET. Der findes en del seismik i området syd for Amager, og et endeligt program for seismisk indsamling i København med henblik på placering af en evt. geotermisk boring i området må planlægges med hensyntagen til den eksisterende seismik og dennes anvendelighed. Det viste forslag tjener derfor kun som et eksempel. Det er forudsat, at der kan indsamles brugbar seismik i en linie gennem Københavns havn. Skulle dette vise sig ikke at være muligt kan det blive nødvendigt at indsamle landseismik. For at undersøge de geotermiske muligheder vest for Øresundsforkastningen vil det være nødvendigt med indsamling af flere landseismiske linier, herunder forbindelseslinier til Stenlille-området samt, måske, til Lavø-1 boringen i nærheden af Helsingør i Nordsjælland. (Se Fig. 6)