

Undersøgelse af muligheden for geologisk lagring af gas nær Storkøbenhavn

Karen Lyng Anthonsen, Anders Mathiesen, Henrik Vosgerau,
Lars Hjelm & Lars Henrik Nielsen

Undersøgelse af muligheden for geologisk lagring af gas nær Storkøbenhavn

Karen Lyng Anthonsen, Anders Mathiesen, Henrik Vosgerau,
Lars Hjelm & Lars Henrik Nielsen

Indhold

1.	Sammenfatning	4
2.	Introduktion	5
3.	Den geologiske ramme	7
4.	Reservoir- og seglformationer	10
4.1	Primære reservoirer	13
4.1.1	Bunter Sandsten Formationen	13
4.1.2	Gassum Formationen	18
4.2	Sekundære reservoirer	22
4.2.1	Nedre Jurassisk enhed	22
4.2.2	Nedre Kretassisk enhed	22
4.2.3	Saltstrukturer	22
5.	Kortlagte strukturer og lagringsvolumen	23
5.1	Kortlægning af geologiske strukturer	23
5.2	Beregning af teoretisk porevolumen	29
6.	Yderlig screening af potentiale for Gaslagring	33
6.1	Kortlagte fokusområder	34
6.1.1	Nord for Helsing (Område A)	34
6.1.2	Bendstrup (Område B)	34
6.1.3	Karlebo strukturen (Område C)	34
6.1.4	Offshore Øst for Rungsted (Område D)	34
6.1.5	Furesø-Virum (Område E)	34
6.1.6	Sydvest Amager (Område F)	35
6.1.7	SØ Vallensbæk (Transitionszone) (Område G)	35
6.1.8	Offshore Syd for Avedøre Holme (Område H)	35
6.1.9	Indre Køge Bugt (Område I)	35
6.1.10	Offshore Ydre Køge Bugt (Område J)	35
6.2	Prioriterede fokusområder	35
6.3	Diverse kommentarer	36
7.	Summarisk beskrivelse af modning af en geologisk struktur til et lager	38
7.1	Myndighedskrav	38
7.2	Geologisk modning af et undergrundslager	38
7.2.1	Regional vurdering	39
7.2.2	Vurdering af interesseområdet	39
7.2.3	Fokuseret efterforskning af potentielle lagringskomplekser	39

1. Sammenfatning

- Den geologiske screening af studieområdets undergrund har identificeret 33 strukturer. Disse er inddelt i tre klasser, baseret på mængden og kvaliteten af de eksisterende data og den seismiske kortlægning. Ud af de 33 strukturer er 10 strukturer udvalgt til beregning af et teoretisk porevolumen. Strukturernes har et teoretisk porevolumen på mellem 0,6 mio. m³ og 2.270 mio. m³.
- HOFOR har angivet et behov for en lagringskapacitet på ca. 33 mio. Nm³ svarende til ca. 300.000 geometriske m³ (ved 200 bars tryk og inkl. dødvolumen). Da lagret gas må forventes at diffundere væk fra injektionsboringerne og ud i hele reservoiret er de mindre strukturer mest egnede for at reducere tabet af den lagrede gas. Mobiliteten af den lagrede gas kan dog reduceres og til dels kontrolleres ved dynamisk reservoir management via aktiv brug af injektions- og produktionsboringer.
- De eksisterende data er ikke tilstrækkelige til at den geologiske kortlægning kan definere strukturernes præcise form og udstrækning. Volumenberegningerne er derfor også behæftet med stor usikkerhed.
- Det er sandsynligt, at en bedre datadækning vil vise tilstedeværelsen af flere strukturer end de, der for indværende kan identificeres.
- På baggrund af det oplyste lagringsbehov og sikkerhed i data er det ikke muligt umiddelbart at udpege en egnet struktur.
- Med udgangspunkt i en supplerende seismiske tolkning, er der lokaliseret 10 fokusområder nær København, hvor der er mulighed for at nye data kan definere egnede strukturer. Ud af de 10 områder vurderes Furesø-Virum, Indre Køge Bugt, Offshore Syd for Avedøre Holme og Sydvest Amager, som mest lovende for yderligere undersøgelser.
- De identificerede strukturer vil, såfremt de er egnede til lagring af biogas, umiddelbart også være egnede til lagring af CO₂ og CO₂ – H₂ blandinger. Lagring af ren H₂ vil sandsynligvis kræve saltkaverner, som ikke er vurderet i dette studie.
- Næste naturlige skridt frem mod identifikation og evaluering af et egnet lagringskompleks er at udvælge en eller flere strukturer til videre undersøgelser og evaluering. Der må påregnes gennemførelse af en efterforskningsfase inkluderende en ansøgning til Energistyrelsen, indsamling af seismiske data, og ved positiv identifikation af en struktur, udførelse af en eller flere testboringer. Et samlet tidsforløb for etablering af et solidt geofagligt beslutningsgrundlag må forventes at være 2-4 år.

2. Introduktion

GEUS har af HOFOR fået til opgave at screene den dybe undergrunds egnethed til at lagre biogas. I screeningen medtages hele Sjælland samt Lolland-Falster. Ved lagring af gas i undergrunden skal tre væsentlige geologiske elementer være til stede:

- 1) Et egnet reservoir, hvori gassen kan lagres i tilstrækkeligt stort volumen (oftest en lagserie af porøs sandsten).
- 2) En geologisk struktur, der danner en fælde med tilstrækkeligt stort volumen, som sikrer, at gassen holdes indfanget inden for et afgrænset og kontrollerbart område.
- 3) Et segl over fælden som er tilstrækkelig tæt og tykt til, at gassen ikke kan bryde igennem det (oftest en lagserie af lersten).

I den danske undergrund udgør lagserier domineret af sandsten, de mest oplagte reservoirer til at deponere gas i, men også til eksempelvis at udvinde varmt vand til geotermisk produktion. En anden mulig reservoirtype er lagring i saltkaverner, som er 100.000-1.000.000 m³ hulrum i salthorste dannet ved udskylning. Salthorste er strukturer, hvor salt er trængt op fra dybtliggende saltholdige formationer i den danske undergrund. Ved Lille Torup i Nordjylland udnytter Energinet saltkaverner til lagring af naturgas.

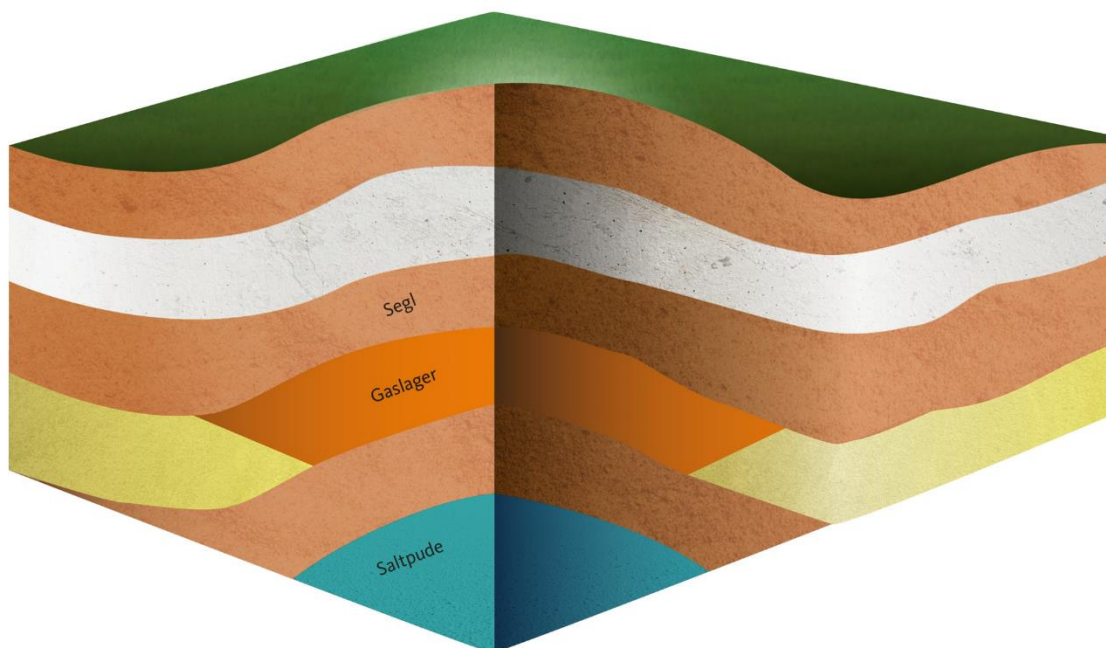
Der findes flere typer af geologiske strukturer, som danner fælder i undergrunden. Den mest oplagte, som vi fokuserer på i dette studie, er 4-vejs lukningsstrukturer. Populært sagt kan en sådan struktur ses som et enormt grydelåg, hvorunder gassen kan indfanges under det konkave rum, som låget afgrænser (Figur 1).

Hvor 4-vejs lukningsstrukturen kan siges at beskrive formen og størrelsen på grydelåget, som holder på gassen, udgør seglet det materiale, som låget består af (Figur 1). Et godt og effektivt grydelåg (segl) består i den danske undergrund af en tyk lagserie af lersten, som er kendetegnet ved at have en meget finkornet og tæt matrix, som gassen har vanskeligt ved at trænge igennem.

Nogle steder gennemskæres undergrunden af forkastninger, som har resulteret i, at lagserier, der oprindeligt var sammenhængende, er blevet forskudt i forhold til hinanden. Forkastninger kan have flere effekter på en lagringstruktur. Hvis en forkastning findes inden for områder afgrænset af 4-vejs lukningsstrukturer, er der risiko for, at gassen kan trænge gennem topseglet langs forkastningerne og associerede spræknetsværk ("via revner i grydelåget"). Men forkastningsaktiviteten kan også medføre, at det underliggende sandstensreservoir er brudt op i mindre og adskilte reservoirzoner, hvor forkastningen virker forseglende mellem zonerne og vanskeliggør lagring i hele strukturen da gassen ikke kan strømme frit mellem reservoirzonerne.

I denne rapport er ovennævnte forhold screenet og belyst inden for undersøgelsesområdet i det omfang de tilgængelige data om undergrunden tillader det. Afrapporteringen er opbygget således, at der først gives et overblik over den geologiske ramme for undersøgelsesområdet i kapitel 3. Kapitel 4 giver en introduktion til de reservoirer, som egner sig bedst til at deponere gas i samt de segl, der kan være til stede over reservoirerne. I kapitel 5 præsenteres oversigtskort over de geologiske strukturer, der er kortlagt i undersøgelsesområdet. De mest oplagte strukturer behandles, inklusiv foreløbige estimater af reservoirkvaliteten og lagringsvolumen af gas i det reservoir, som knytter sig til den enkelte struktur. Endvidere gives der estimater på tykkelsen af de segl, som findes over reservoirerne, og risikoen for tilstedeværelsen af eventuelle forcastninger belyses ligesom usikkerheder i kortlægningen af den enkelte struktur diskuteres ud fra en vurdering af tæthed og kvalitet af de data, som indgår i kortlægningen. Endelig gives der i kapitel 6 en beskrivelse af hvordan en geologisk struktur i undergrunden kan modnes i et videre undersøgelsesforløb, så dens egnethed til lagring af gas kan afgøres.

Det tekniske arbejde tager udgangspunkt i GEUS' generelle viden om den danske undergrund samt lettere modificerede udgaver af de kort og data, som ses på GEUS' WebGIS portal over dyb geotermi (<https://dybgeotermi.geus.dk/>).



Figur 1. Konceptuel figur der viser et udsnit af undergrunden igennem en 4-vejs lukningsstruktur. Gas kan pumpes ned i sandstensreservoiret (gul), men kun holdes indfanget inden for den del af reservoiret, som indgår i det konkave rum (orange), som "grydelåget" afgrænser. Selve grydelåget består af tæt lagserie af lersten (brun), som gassen ikke kan gennemtrænge. I figuren er 4-vejs lukningsstrukturen dannet ved, at dybereliggende saltaflejringer (blå) er blevet plastisk deformerede og mobiliseret, hvorved de overliggende lagserier er foldet over saltpuden.

3. Den geologiske ramme

Undersøgelsesområdet strækker sig over tre overordnede strukturer i den danske undergrund: Det Danske Basin, Ringkøbing–Fyn Højderyggen og det Nordtyske Basin (Figur 2). De to bassiner repræsenterer områder, hvor der gennem lange tidsrum er sket en indsynkning samtidig med, at der løbende er tilført sedimenter til bassinerne. Dette har resulteret i, at undergrunden i de to bassiner i dag består af tykke sedimentære lagserier (op til 9 km tyk i Det Danske Basin og 4 km i den danske del af det Nordtyske Basin). De to bassiner adskilles af Ringkøbing–Fyn Højderyggen, som er et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg af højtliggende grundfjeld i undergrunden, og hvor over undergrundens sedimentære lagpakke derfor er væsentlige tyndere end i de to bassiner. Strukturernes tog form i slutningen af Permtiden, for omkring 260 millioner år siden.

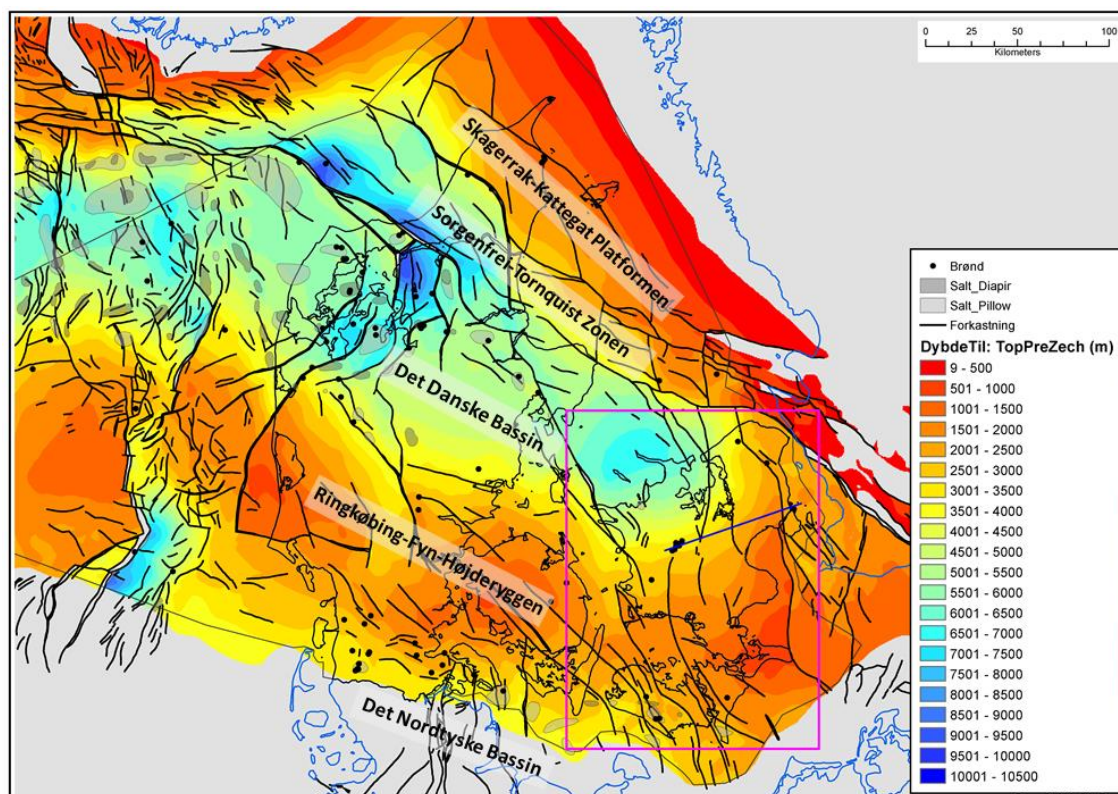
Sedimenterne i bassinerne består af vekslende aflejringer, der afspejler betydelige variationer i aflejrmiljøet gennem de flere hundrede millioner år, sedimenterne blev aflejret. Efter en indledende aflejring af Rotliegend grovkornede sedimenter (primært sand og grus) fulgte en lang periode med indsynkning, hvor tykke aflejringer af Zechstein-salt blev dannet i bassinerne efterfulgt af aflejring af sand, mudder, karbonater og mindre saltdannelser i Trias og Tidlig Jura perioderne. Regional hævnning i tidlig Mellem Jura førte til en betydelig erosion af underliggende sedimenter, specielt op mod flankerne af og over det højtliggende grundfjeld i Ringkøbing–Fyn Højderyggen. Forkastningsbetinget indsynkning fortsatte dog i Sorgenfrei–Tornquist Zonen, hvor der aflejredes sand og mudder. Sorgenfrei–Tornquist Zonen er en nordvest–sydøst orienteret blokforkastet zone, der strækker sig fra Skagerrak over Nordjylland, gennem Kattegat, dele af Øresund og Skåne til Bornholm og som sammen med Skagerrak–Kattegat Platformen udgør den Fennoskandiske Randzone, der afgrænser det Danske Basin mod nord (Figur 2).

Regional indsynkning fandt atter sted i løbet af den sene del af Mellem Jura og fortsatte generelt indtil Sen Kridt – Palæogen tid, hvor indsynkningen blev afløst af opløft og erosion relateret til den alpine deformation og åbningen af Nordatlanten. Aflejringerne fra den sidste periode med indsynkning består af Øvre Jura – Nedre Kridt sandsten og i særdeleshed mudder- og siltsten efterfulgt af tykke karbonat- og kalkaflejringer fra Øvre Kridt, der udgør den øverste del af den mesozoiske lagserie i bassinerne.

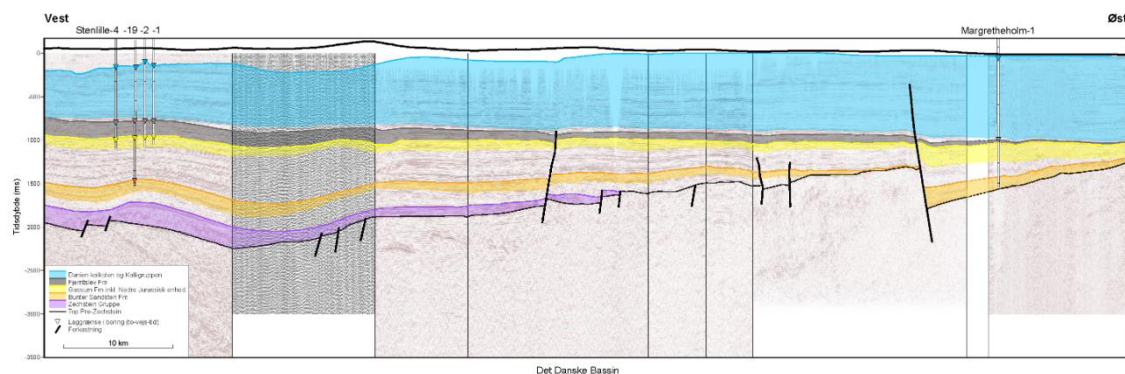
De betydelige mængder sedimenter, der blev aflejret gennem Mesozoikum, førte i perioder til, at underliggende aflejringer af salt fra Zechstein-tiden blev plastisk deformeret og nogle steder søgte opad langs svaghedszoner, ofte ledsaget af forkastningsaktivitet. Dette resulterede nogle steder i, at de overliggende lag blev deformeret (omkring og over saltpuder) eller gennembrudt af den opstigende salt (af salt diapirer). I mange tilfælde har trykket fra den opstigende salt ført til dannelsen af 4-vejs lukningsstrukturer i den overliggende lagserie, og sådanne strukturer kan som nævnt danne fælder, hvori gas kan deponeres, hvis de øvrige geologiske forudsætninger for gaslagring også er til stede (Figur 1). Saltbevægelse er dog mindre udpræget i den Sjællandske undergrund i forhold til i undergrunden i Jylland og det sydligste Danmark. Dette

kan skyldes at salt ikke blev aflejret under de østligste dele af Sjælland, samt at saltlagene er relativt tynde i det vestlige Sjælland.

Undergrundens strukturelle opbygning kan illustreres med geologiske profilsnit, der er konstruerede lodrette snit gennem undergrunden. Profilsnittene giver et indblik i undergrundens strukturelle opbygning, herunder hvor der forekommer forkastninger og saltstrukturer i undergrunden samt fordelingen, udstrækningen og kontinuiteten af de geologiske lagserier. I Figur 3 ses et eksempel på et profilsnit, der viser undergrundens opbygning på stor skala i et vest-øst orienteret snit gennem Sjælland.



Figur 2. Dybdekort til Top Præ-Zechstein (TPZ) fladen, der er den dybeste flade, som kan kortlægges kontinuerligt i den danske undergrund baseret på eksisterende seismiske data kombineret med informationer om dybder og lithostratigrafi fra borer. Kortet giver indirekte et billede af tykkelsen af den sedimentære lagserie i den danske undergrund, idet de viste dybder omtrentligt kan oversættes til tykkelsen af den overlejrende lagserie op til havniveau. De største tykkelser (op til 9 km) er til stede i det Danske Bassin og Sorgenfrei-Tornquist Zonen efterfulgt af det Nordtyske Basin, hvorimod tykkelserne er betydelig mindre hen over Ringkøbing-Fyn Højderyggen og Skagerrak-Kattegat Platformen (ca. 500-800 m). Den omtrentlige udstrækning af undersøgelsesområdet er markeret med lilla ramme, mens den blå linje på kortet angiver placeringen af et omtrentligt vest-øst orienteret geologisk profilsnit gennem Sjælland, der er vist i Figur 3.



Figur 3. Eksempel på et profilsnit, som viser undergrundens opbygning på stor skala gennem i et vest-øst orienteret snit gennem Sjælland (profilets omtrentlige forløb er vist på oversigtskort i Figur 2). Profilsnittet er konstrueret på baggrund af sammensatte seismiske profiler, der vises som baggrund på snittet, og dybden er angivet som seismisk to-vejs-tid i millisekunder. Enkelte steder langs profilet ses forkastninger (markeret med sorte næsten lodrette streger), der i varierende grad gennemskærer og forsætter dele af lagserien. Den mest markante af disse ses i den højre del af profilet og er en SSØ-NNV orienteret forkastning, som går gennem den østlige del af Hovedstadsområdet. Nogle af de geologiske lagserier er fremhævet med farver på profilet. Disse inkluderer de to mest oplagte sandstens reservoirer for gas deponering i undersøgelsesområdet; Bunter Sandsten Formation markeret med orange farve og Gassum Formationen markeret med gul farve. Med grå farve er den lerstens dominerede Fjerritslev Formation fremhævet, som udgør et segl for Gassum Formationen. Den lyseblå farve markerer Kridt og Danien lagseriens tykke kalkaflejringer, der kan betragtes som et sekundært segl til hindring for, at gas i undergrunden trænger op til terrænoverfladen. Endvidere er Zechstein Gruppen, der indeholder tykke saltaflejringer, fremhævet med lilla farve. Det ses at laget tynder ud mod højre og forsvinder idet der ikke er saltlag i det østlige Sjælland. Bemærk at saltaflejringerne danner en saltpude ved Stenlille (placering af Stenlille angivet ved de lodrette Stenlille borer), og at saltbevægelsen desuden har deformeret den overliggende lagserie, så der også er dannet pudestrukturer på både Bunter Sandsten og Gassum niveau. Stenlille er et eksempel på et område, hvor de geologiske kriterier for gas deponering er opfyldt. Således deponeres der ved Stenlille naturgas i Gassum reservoir, pudestrukturen på Gassum niveau udgør en 4-vejs lukningsstruktur og seglet består af Fjerritslev formationens tætte aflejringer af lersten.

4. Reservoir- og seglformationer

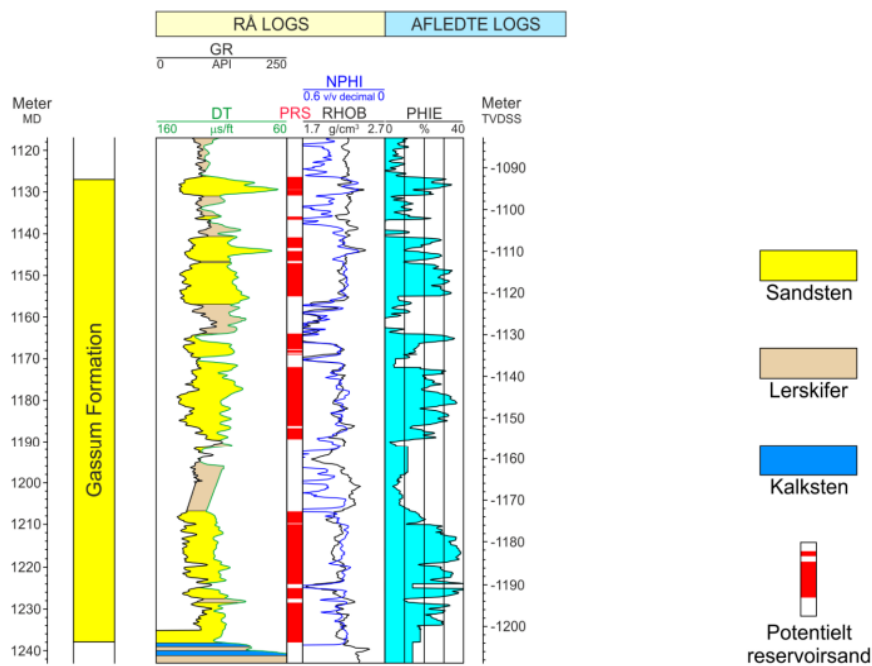
I dette kapitel omtales de reservoirer og segl, som egner sig bedst til at indgå i en geologisk deponering af gas i undersøgelsesområdet. Kort fortalt består et reservoir af en porøs bjergart som i sin porestruktur, det vil sige hulrummene mellem mineralkornene, indeholder vand, der ved injektion af gas kan fortrænges og derved give plads til, at gassen kan deponeres i reservoiret. Det er vigtigt, at gassen kan strømme tilstrækkeligt frit mellem porerne (reservoiret skal have en tilstrækkelig høj permeabilitet) til, at gassen kan injiceres i reservoirbjergarten og sidenhen pumpes op igen. Et ideelt reservoir er tykt og består af en bjergart med gode reservoir egenskaber, det vil i den danske undergrund først og fremmest sige sandsten med høj porøsitet og permeabilitet. Det er dog vigtigt at gøre sig klart, at et reservoir næsten aldrig udelukkende består af sandsten, men i varierende grad også indeholder silt- og lersten, som er karakteriseret ved at have en lav permeabilitet. Endvidere vil dele af den sandsten, som indgår i reservoiret, ofte have dårlige reservoir egenskaber, eksempelvis fordi ler er iblandet sandstenen eller at mineralisering i porerum (diagenese) har reduceret reservoir egenskaberne.

Et godt segl er modsat et godt reservoir først og fremmest kendetegnet ved at have en meget lav permeabilitet, der gør det vanskeligt for gassen at trænge igennem bjergarten. Et godt segl er tykt og består således af en bjergart med dårlige reservoir egenskaber, hvilket i den danske undergrund først og fremmest vil sige lagserier domineret af lersten, men også tykke, finkornede kalkaflejringer kan mange steder danne et godt segl.

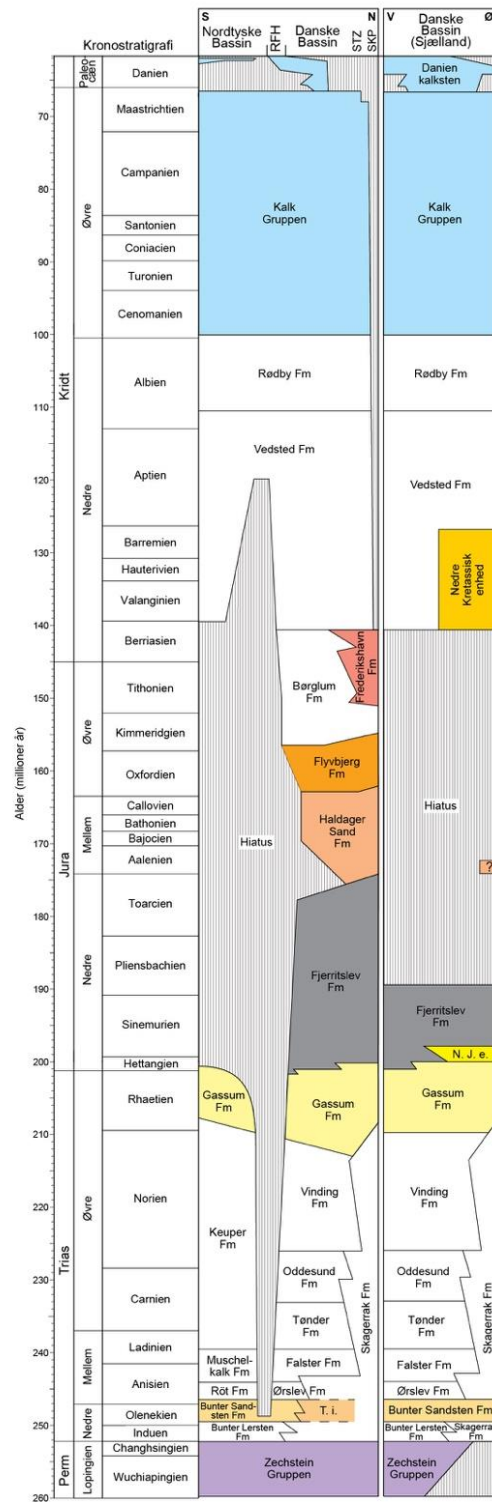
Vurderingen af reservoirkvaliteten af undergrundens bjergarter beror i høj grad på data indsamlet i forbindelse med udførelsen af de dybe borer. I nogle borer er der udtaget borekerne af dele af de gennemborede bjergarter, hvilket muliggør en direkte beskrivelse og testning af fysisk reservoirmateriale. Eksempelvis kan sandstens porøsitet og permeabilitet måles direkte på små kerneprøver (plugs) udtaget fra borekerner. Oftest må man dog bruge borehuls-målinger (petrofysiske logs), når eksempelvis andelen og tykkelsen af sandsten med gode reservoir egenskaber skal estimeres inden for et givet reservoir. Petrofysiske logs optages under selve boringen og/eller ved efterfølgende at sende forskellige målesonder ned i borehullet, som i dybden kontinuerligt måler sedimenternes gammastråling, densitet, elektriske modstand, ledningsevne, lydets hastighed mm. På baggrund af disse logdata, sammenholdt med eventuelle beskrivelser af kerner og borespåner, fås indirekte information om de gennemborede sedimenters fysiske egenskaber, herunder deres lithologi og porøsitet. Det er ikke muligt direkte at måle en bjergarts permeabilitet med petrofysisk logs. I stedet udledes permeabiliteten indirekte ved anvendelse af porøsitetsloggen samt en udarbejdet relation mellem porøsiteten og permeabiliteten. I Figur 4 er vist et eksempel på en petrofysisk log-tolkning af Gassum Formationen.

I Figur 5 ses en inddeling af den danske undergrund i lithostratigrafiske enheder, og hvor der er vist de reservoirer og segl, som der fokuseres på i det følgende. Geologer

inddeler og navngiver undergrundens sedimentære lagserie i lithostratigrafiske enheder, som har forskellige aldre og sammensætning. Inddelingen sker på baggrund af sedimenternes fysiske karakteristika såsom dominerende kornstørrelse, farve, mineralogi mm. En sådan inddeling er praktisk, da de lithostratigrafiske enheder ud fra deres karakteristika kan adskilles fra hinanden og kortlægges over store afstande. Enhederne kan således erkendes fra boring til boring, og i samspil med seismiske undersøgelser kan deres udbredelse ofte kortlægges og afgrænses. I de fleste tilfælde svarer de lithostratigrafiske enheder til formationer, som er betegnelsen for den basale og primære enhed i den lithostratigrafiske klassifikation.



Figur 4. Eksempel på en petrofysisk log-tolkning baseret på data indsamlet fra en boring, der går gennem Gassum Formationen. Formationens fordeling af sandsten og lersten (lerskifer) er afledt ud fra en tolkning af de forskellige logdata. Ved siden af lithologi-søjlen er der endvidere tilføjet en tynd kolonne, hvor der med rød udfyldning markerer, hvor der forekommer potentielt reservoirsand (PRS), som er sandsten, der vurderes til at have gode reservoir-egenskaber (svarende til de dybdeintervaller, hvor logdata viser, at indholdet af ler er mindre end 30 % samtidig med at porøsiteten er større end 15 %). I det viste eksempel er formationen ca. 110 meter tyk, mens de akkumulerede tykkelser af Potentielt reservoirsand er 54 meter. Den gennemsnitlige porøsitet af reservoirsandstenene er ud fra logtolkningen bestemt til 28,6 %.



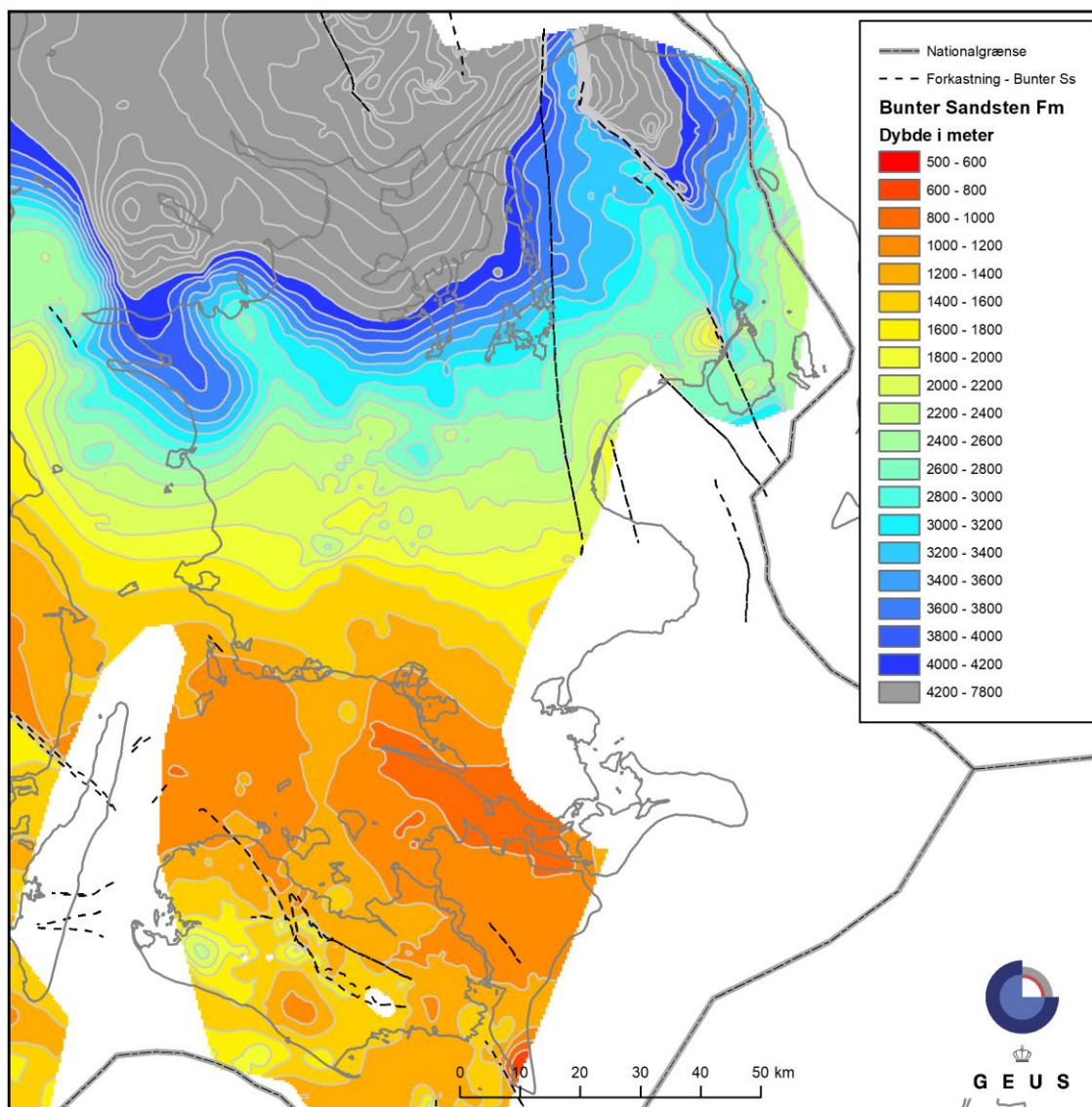
Figur 5. Lithostratigrafisk inddeling af den del af den danske undergrund, hvor inddelingen fra venstre dækker den danske del af det Nordtyske Bassin, Ringkøbing-Fyn Højderyggen (RFH), det Danske Bassin og længst mod nord Sorngrenfri-Tornquist Zonen (STZ) og Skagerrak-Kattegat Platformen (SKP). Til højre ses inddelingen af den sjællandske undergrund fra vest mod øst inden for det samme tidsinterval. Til venstre i skemaet er angivet hvilke geologiske tidsperioder de lithostratigrafiske enheder tilhører samt deres omtrentlige aldre i millioner år (enhedernes tykkelse afspejles således ikke af skemaet). Den tidsmæssige udstrækning af Nedre Jurassisk enhed og Fjerritslev Formationen i Østsjælland er under revision. Anvendte forkortelser, der ikke fremgår ovenover: N. J. e.: Nedre Jurassisk enhed; T. i.: Tidsækvivalent interval til Bunter Sandsten Formationen i Skagerrak Formationen.

4.1 Primære reservoirer

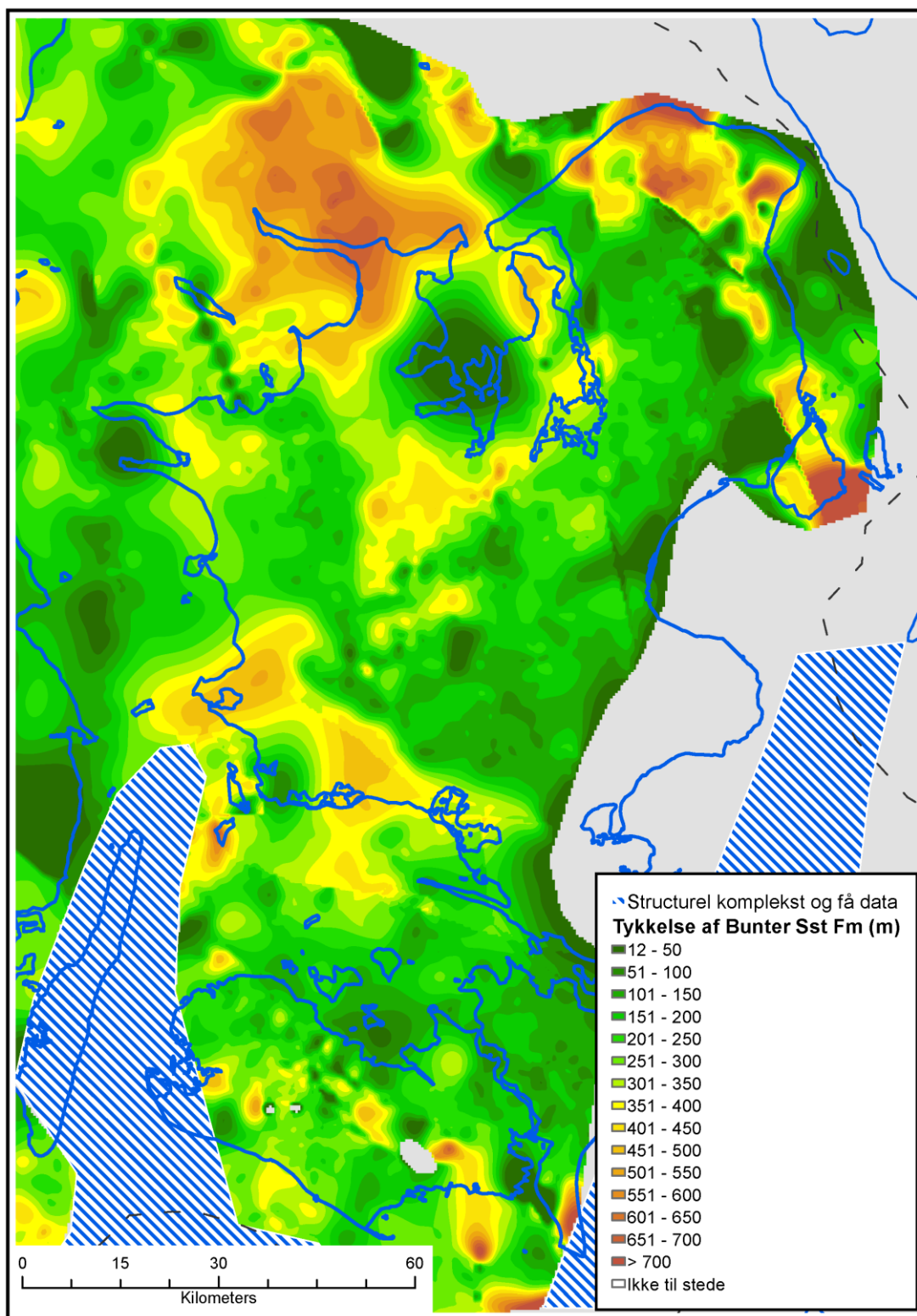
Inden for undersøgelsesområdet vurderes Bunter Sandsten og Gassum formationerne at udgøre de primære reservoirer til deponering af gas. Vores viden er størst om Gassum Formationen, og sandsten fra denne udnyttes endvidere allerede til geotermisk indvinding i Thisted og Sønderborg samt til gaslagring ved Stenlille. Desuden er vores kendskab til de formationer, der danner seglet for Bunter Sandsten reservoirret meget begrænset i forhold vores kendskab til den lerstens-dominerede Fjerritslev Formation, som danner seglet for Gassum reservoirret. Overordnet set vurderes Gassum Formationen derfor til at være mest egnet til gaslagring, men i områder hvor denne ikke er til stede indenfor lukningsstrukturer, eller reservoirregenskaberne er ringe, kan andre enheder være mere oplagte. I det følgende gennemgås de to reservoirer og deres tilhørende segl kortfattet. Dybde- og tykkelseskort over Bunter Sandsten, Gassum og Fjerritslev formationerne med markering af, hvor der findes mulige 4-vejs lukningsstrukturer, vises i det følgende kapitel.

4.1.1 Bunter Sandsten Formationen

Bunter Sandsten Formationen kendes fra adskillige dybe boringer i Danmark, Sverige og Tyskland og er til stede inden for undersøgelsesområdet i en dybde fra ca. 500 meter i det sydligste område til mere end 4000 meter i Nordsjælland (Figur 6). Tykkelser varierende fra ca. 10 til 700 meter (Figur 7). Bunter Sandsten Formationen består af rødbrune og gulbrune, fin- til grovkornede sandsten, foruden silt- og lersten. Lokalt er aflejringerne stærkt kalk-, anhydrit- og glimmerholdige. Sedimenterne blev aflejret i Tidlig Trias i et tørt og varmt ørkenklima. Vidtforgrenede og periodisk vandførende floder transporterede sand ind i den centrale del af aflejringsbassinet, hvor sandet blev aflejret i flodkanaler. Vegetationen var yderst sparsom, og i nedbørspauser dannede vinden sandklitter. Imellem flodkanal- og klitsandet, dannedes der i perioder søer, hvor lag af ler blev aflejret.

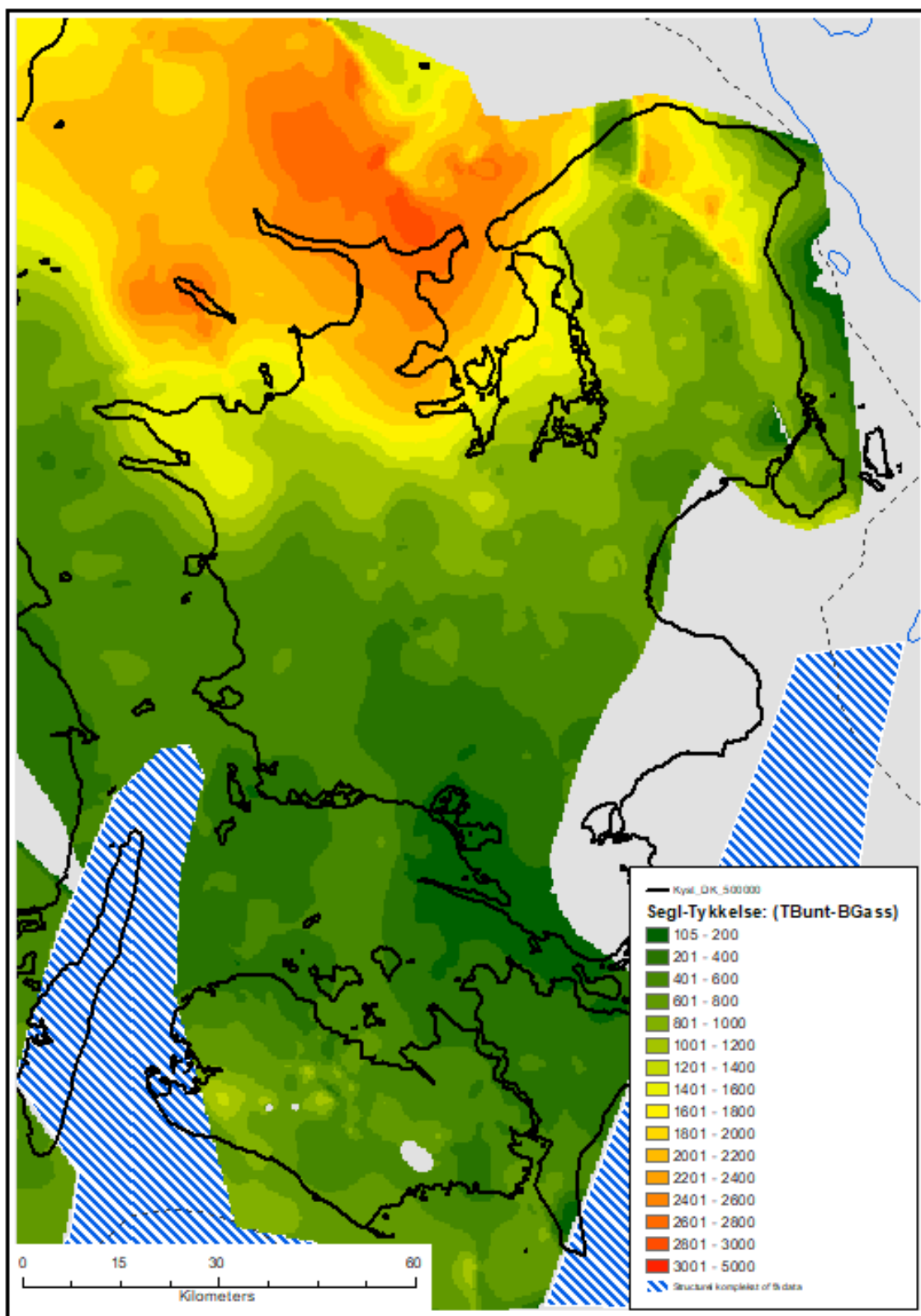


Figur 6. Dybden til toppen af Bunter Sandstens Formationen.



Figur 7. Udbredelsen og tykkelsen af Bunter Sandstens Formationen. De to blå-skraverede områder repræsenterer områder hvor undergrunden er kompleks og hvor kvaliteten af de seismiske data er ringe (se også Figur 12).

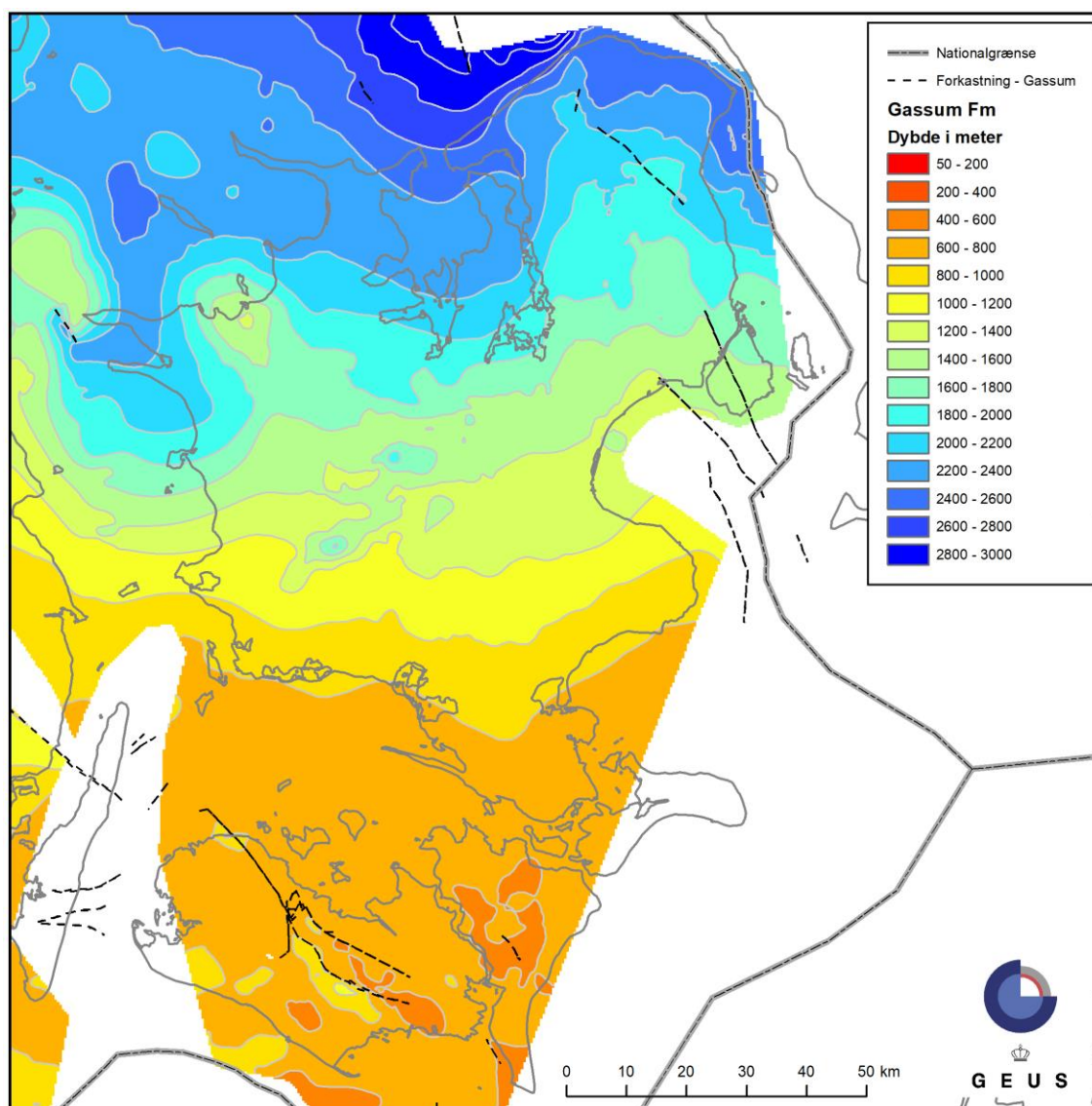
Over Bunter Sandstenen følger en række formationer, der domineres af lersten og sekundært kalksten og stedvis tynde sandstenslag (Ørslev, Falster, Tønder, Oddesund og Vinding formationerne, se Figur 5). Disse formationer udgør seglet for Bunter sandstens Formationen (Figur 8). Den stratigrafisk nederste af disse, Ørslev Formationen, markerer, at havet i overgangen til Mellem Trias perioden trængte indover det ørkenmiljø, som herskede da Bunter Sandsten Formationen blev dannet. Ørslev Formationen består således af stensalt, anhydrit og rødbrunt ler, der blev aflejret i saltsøer, laguner og lave kystsletter i et tørt, varmt klima. Kendskabet til den geografiske udbredelse og seglegenskaberne af Ørslev Formationen og de enkelte overliggende lerstensdominerede formationer er væsentlig mindre end for Fjerritslev Formationen, som udgør seglet for Gassum Formationen.



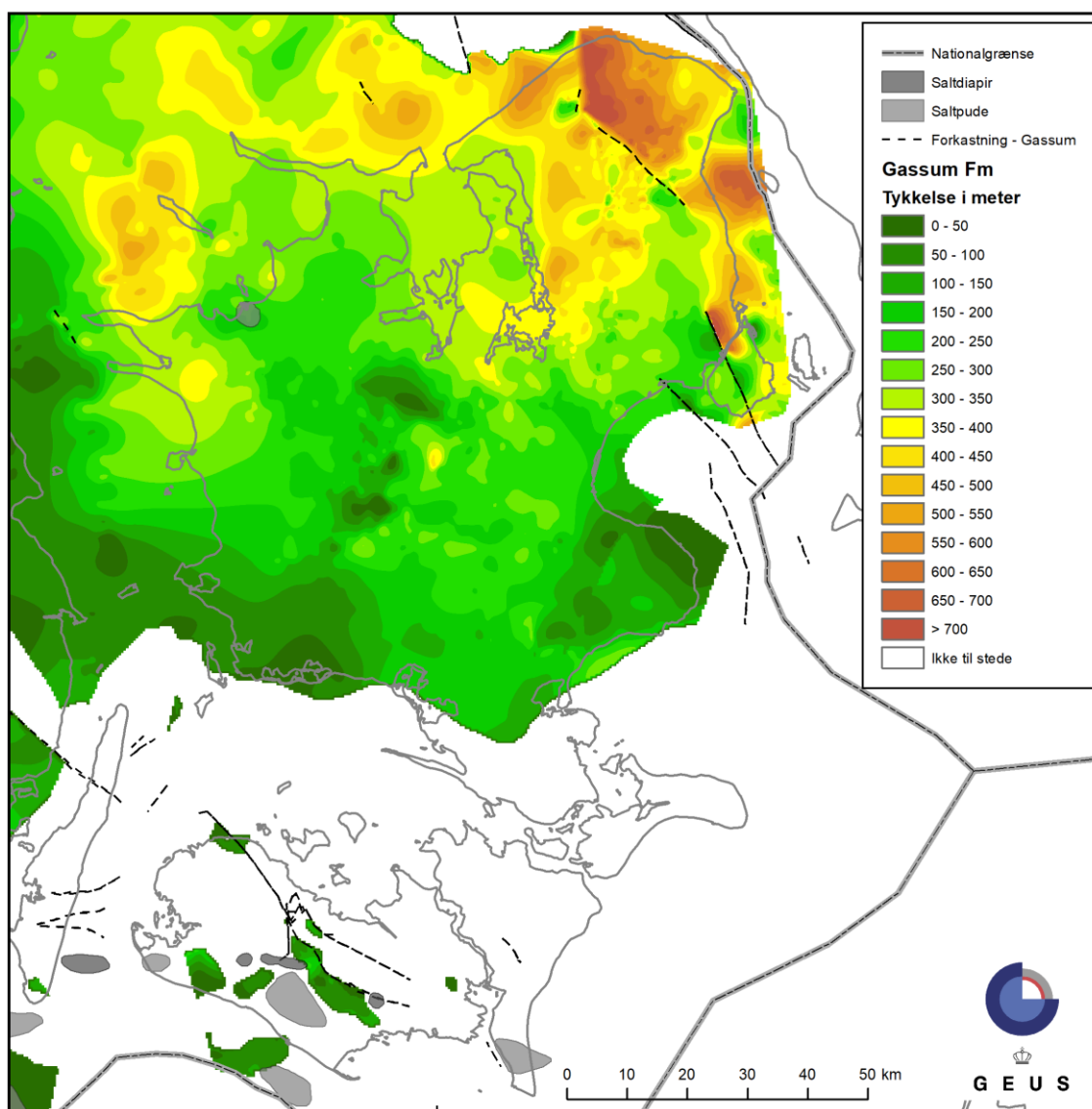
Figur 8. Udbredelsen og tykkelsen af Ørslev, Falster, Tønder, Oddesund og Vinding Formationerne, som er segl for Bunter Sandstens Formationen. De to blå-skraverede områder repræsenterer områder hvor undergrunden er kompleks og hvor kvaliteten af de seismiske data er ringe (se også Figur 12).

4.1.2 Gassum Formationen

Gassum Formationen er vidt udbredt i det Danske Bassin og til dels også i den danske del af det Nordtyske Bassin. Dybden til formationen ligger i undersøgelsesområdet fra omkring 500 meter på Lolland-Falster til omkring 2500 meter i Nordsjælland (Figur 9). Den generelle formationstykkelser er på 30–150 meter vurderet ud fra boringer, men seismiske data tyder på at den lokalt kan være mere end 500 meter tyk (Figur 10). Derimod synes formationen generelt ikke at være til stede henover Ringkøbing–Fyn Højderyggen og langs dens flanker. Endvidere kan formationen stedvis mangle på grund af lokal hævnings og erosion relateret til saltbevægelser i undergrunden. Gassum Formationen domineres af fin- til mellemkornede, stedvis grovkornede, lysegrå sandsten, der veksler med mørkere-farvede ler- og siltsten og tynde kullag. Sedimenterne afspejler afsætning under gentagne havniveausvingninger i den sidste del af Trias Perioden og i starten af Jura Perioden. I dette tidsrum var hovedparten af det danske indsynkningsområde et lavvandet havområde, hvortil floder transporterede store mængder sand eroderet fra det Skandinaviske grundfjeldsområde og i mindre grad også fra Ringkøbing–Fyn Højderyggen i perioder, hvor denne var blotlagt. Noget af sandet blev afsat i flodkanaler og estuarier, men det meste blev aflejret i havet som kystsand. Herved blev der dannet forholdsvis sammenhængende sandstenslegemer med stor geografisk udbredelse. Senere forkastningsaktivitet har i nogle områder dog ændret på dette, ligesom senere kompaktion og mineraludfældninger (diagenese) har modificeret reservoiregenskaberne.

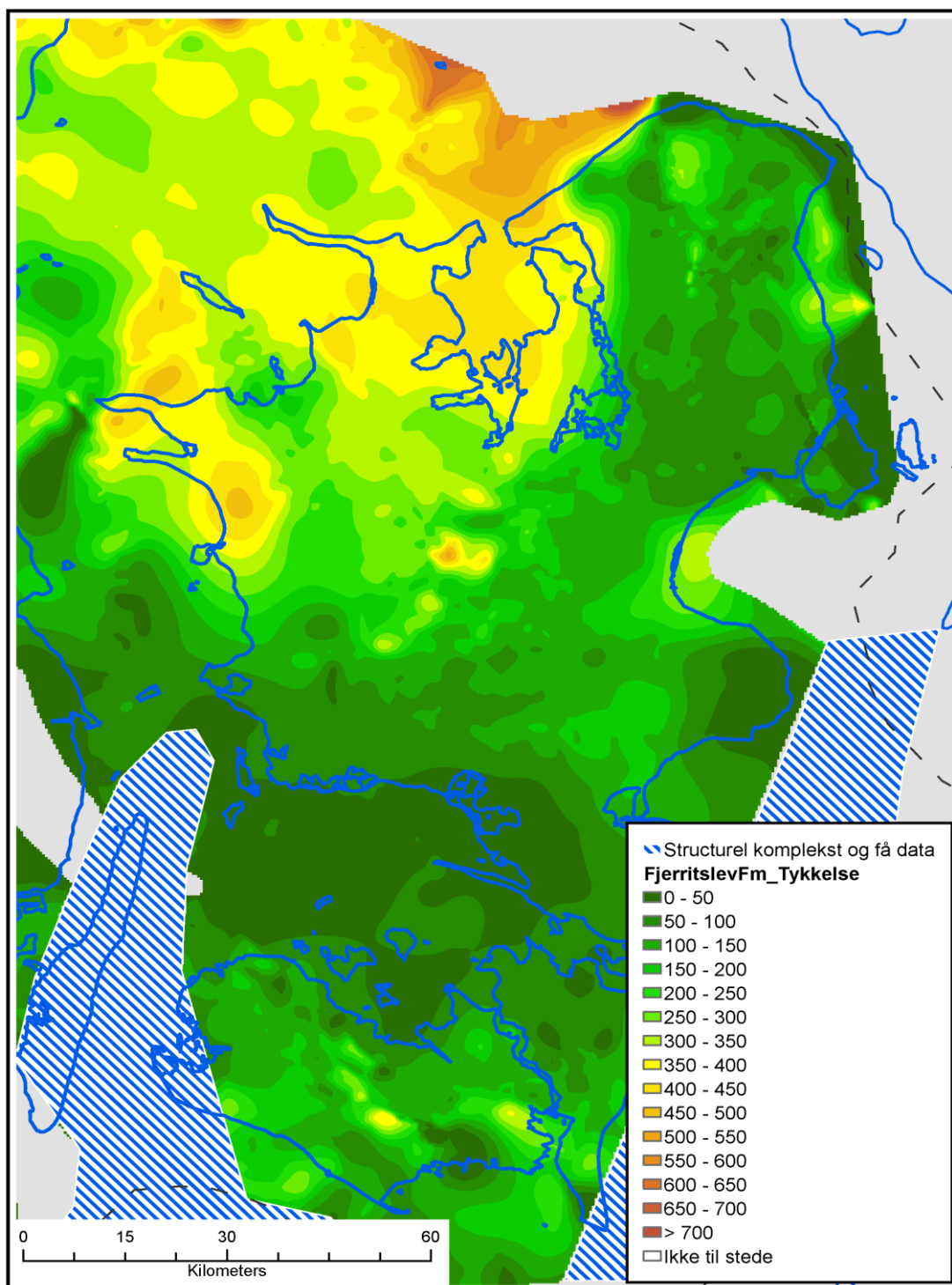


Figur 9. Dybden til toppen af Gassum Formationen.



Figur 10. Udbredelsen og tykkelsen af Gassum Formationen.

Seglet for Gassum Formationen udgøres af den Nedre Jurassiske Fjerritslev Formation (Figur 5 og 11), der domineres af marine ler- og muddersten. I den danske undergrund kan formationen lokalt være mere end 1000 meter tyk, men som en følge af opløft og erosion i Mellem Jura, og senere også lokalt hen over saltstrukturer, varierer tykkelsen betydeligt. Inden for undersøgelsesområdet varierer formationstykkelsen fra ca. 50 til 500 meter. Aflejringskiftet til finkornede marine sedimenter afspejler en overordnet drukning af de sandede aflejringsystemer, som dannede det underliggende Gassum reservoir samt det sekundære reservoir "Nedre Jurassisk enhed", og er et resultat af den bassinindsinking og overordnede havniveaustigning, der fandt sted gennem aflejringsperioden.



Figur 11. Udbredelsen og tykkelsen af Fjerritslev Formation, som er segl for Gassum Formationen. De to blå-skraverede områder repræsenterer områder hvor undergrunden er kompleks og hvor kvaliteten af de seismiske data er ringe (se også Figur 12).

4.2 Sekundære reservoirer

4.2.1 Nedre Jurassisk enhed

Nedre Jura enhed ('N. J. e' i Figur 5) er endnu ikke opstillet som en formel lithostratigrafisk enhed og er kun påtruffet i enkelte borer i det østlige Sjælland, hvor den findes umiddelbart over Gassum Formationen. Lithologisk svarer den i store træk til Gassum Formationen, og den er sandsynligvis også aflejret i de samme typer aflejringsmiljøer som denne. Enheden er op til 200 meter tyk, men er vanskelig at adskille seismisk fra Gassum Formationen og dermed vanskelig at kortlægge; i praksis kan den sammen med Gassum Formationen betragtes som udgørende ét samlet sandstensreservoir. Ligesom for Gassum Formationen består seglet af den lerstensdomineret Fjerritslev Formation.

4.2.2 Nedre Kretassisk enhed

I hovedparten af det Danske Basin består Nedre Kridt af marine lersten og lerede fin-kornede sandsten uden nævneværdigt reservoirpotentiale. I det østlige Sjælland viser borerne imidlertid, at der i Nedre Kridt forekommer en lagserie af mere rene sandstenslag, der adskilles af intervaller af lersten. Lagserien, der endnu ikke er opstillet som en formel lithostratigrafisk enhed, er ca. 20–75 meter tyk og er benævnt "Nedre Kretassisk enhed" i Figur 5. Enhedens sandstenslag kan potentielt udgøre et reservoir for gaslagring. Enhedens sandsten er fin- til grovkornede og stedvis kalkcementeret. De kan indeholde glaukonit, pyrit, planterester og aftryk af muslingeskaller. I de mellemliggende intervaller af lersten kan der lokalt forekomme tynde kullag. Sedimenterne blev sandsynligvis afsat i aflejringsmiljøer, der vekslede mellem at være marine og fersk- og brakvandsprægede.

Det har ikke været muligt at kortlægge enheden regionalt på baggrund af eksisterende data. Som følge heraf er det heller ikke muligt at sprede boringsdata om enheden ud som et fladedækkende kort ved hjælp af seismiske data. Reservoirenheden overlejres af en tyk lagserie af Danien- og Kridttidens kalkaflejringer, der som tidligere nævnt kan udgøre et segl, hvis kalken er tæt og homogen i sin struktur og ikke opsprækket.

4.2.3 Saltstrukturer

Antallet af saltstrukturer identificeret i undersøgelsesområdet er få og hovedsageligt forekommende i den sydlige del af Lolland-Falster området, som det vil fremgå af oversigtskort i det efterfølgende kapitel (Figur 13). Da saltstrukturerne ligger langt fra Hovedstadsområdet, og da deres egnethed til gas deponering endvidere kræver en detaljeret kortlægning af deres geometri, udgør de ikke et fokusområde i indeværende screening af egnede områder for gas deponering.

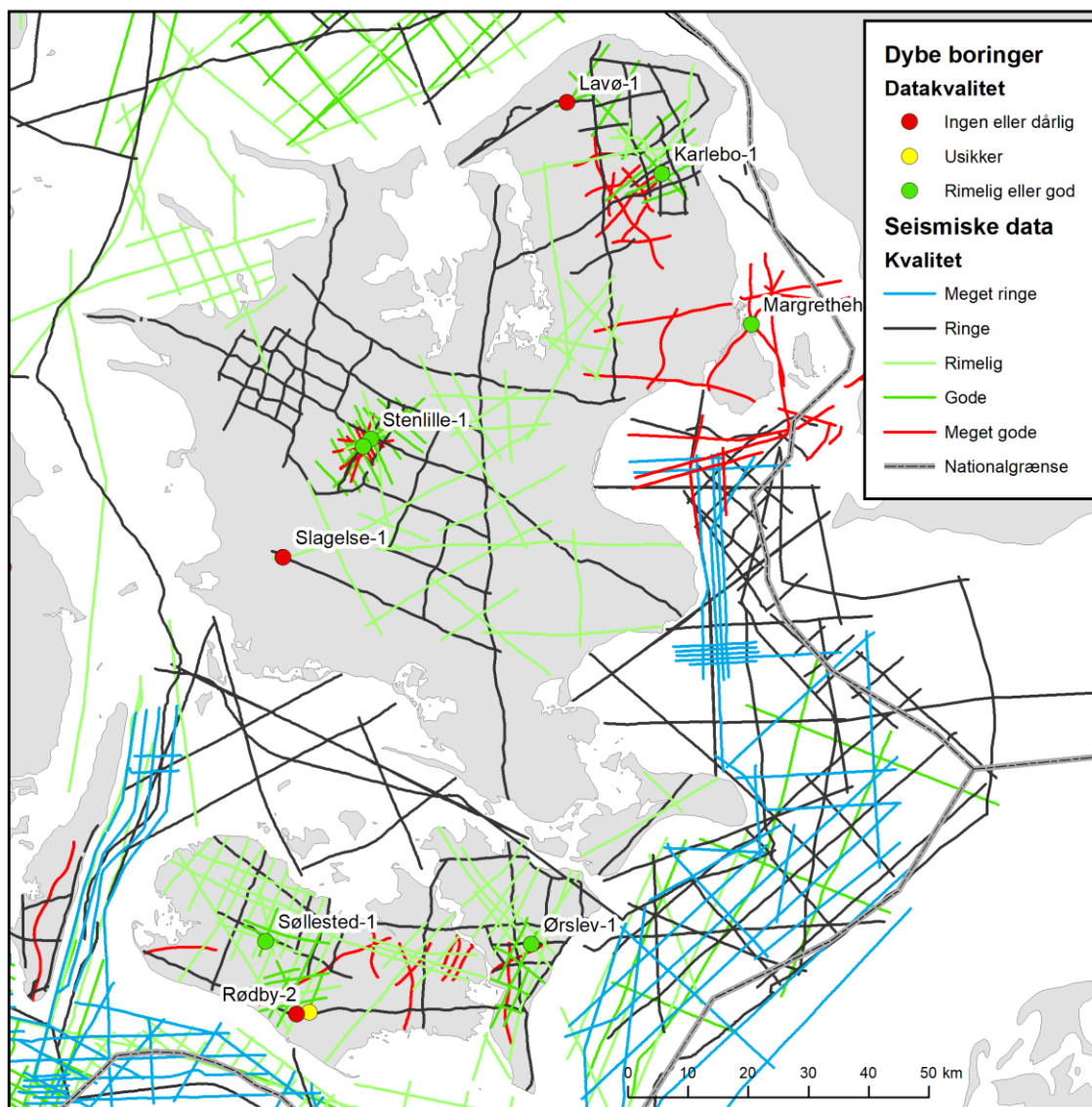
5. Kortlagte strukturer og lagringsvolumen

Der er kortlagt 13 sandstensstrukturer (akviferer), samt et antal saltstrukturer. Herunder redegøres for datagrundlag, identifikation og klassificering af sandstensstrukturerne. Desuden er der foretaget meget præliminære vurderinger af lagringsvolumen for de enkelte strukturer.

5.1 Kortlægning af geologiske strukturer

På baggrund af de eksisterende seismiske data og dybe borer er der udarbejdet kort over toppen af de to relevante reservoirformationer, Bunter Sandsten Formationen og Gassum Formationen (Figur 6 og 9). Disse kort er blevet kontureret og lukkede konturer kan indikere tilstedeværelsen af en struktur, som kan være egnet til lagring af gas. Der er blevet søgt efter sådanne lukkede konturer på toppen af Gassum og Bunter Formationerne.

Da eksisterende data er indsamlet i forbindelse med olie/gas efterforskning, og senere geotermi, er kvalitet og fordelingen af data stærkt varierende (Figur 12). De seismiske linjer der er markeret med blå og sort er af ringe eller meget ringe kvalitet da de er indsamlet før 1970, hvor teknikken var dårligere udviklet og standarderne afveg fra dem der bruges i dag, eller data er indsamlet i forbindelse med undersøgelser af meget overfladenære aflejringer. Disse seismiske data er derfor meget vanskelige at tolke. De grønne linjer (både lysegrønne og mørkere grønne linjer) er indsamlet i perioden 1970-1990 og er af rimelig til god kvalitet, men med en begrænset opløselighed. De bedste data er de rødmarkerede linjer som er indsamlet efter 1990 (Figur 12).



Figur 12. Dækning og kvalitet af seismiske data og borer.

Områder med god datadækning er Nordsjælland, Midtsjælland og Lolland-Falster, hvilket afspejler sig i identifikationen af mulige strukturer (Figur 13). Detaljerede kort med de kortlagte mulige strukturer i de tre områder kan ses på figur 14, 15 og 16.

De geologiske strukturer er identificeret som lukkede konturer på Top Bunter Sandsten og Top Gassum Formationskortene. Strukturernes er herefter klassificeret efter konfidens i datadækning og kvalitet for den enkelte struktur. Ligger strukturen i området mellem de seismiske linjer er der med stor sandsynlighed tale om et artefakt som følge af interpolation, og strukturen har fået klasse 0 (Figur 13). Krydses strukturen af kun én linje kan dette skyldes mindre uregelmæssigheder i tolkningen, og strukturen betragtes derfor som meget usikker og har fået klasse 1 (Figur 13). For klasse 2 gælder at der er mindst 2 seismiske linjer der viser tilstedeværelsen af en struktur, og strukturen vurderes som rimelig sikker. Klasse 3 indeholder strukturer som er identificeret på 3 eller flere seismiske linjer, og disse strukturer vurderes som sikre. For både klasse 2 og 3

gælder, at tilstedeværelsen af en struktur er rimeligt sikker, men udbredelsen er usikker.

Der er i alt kortlagt 32 lukkede konturer. Der er 21 lukkede konturer på Top Bunter Sandsten Formations fladen, hvoraf 8 er identificeret på 2 eller flere seismiske linjer (klasse 2 og 3), og derfor med rimelig sikkerhed indikerer at der er en struktur. På Top Gassum Formations niveau er der identificeret 11 lukkede konturer, hvoraf de 4 er klassificeret som 2 og 3 (Figur 13).

I forbindelse med de enkelte lagringsstrukturers konfidens er det desuden vigtigt at være opmærksom på, at den eksisterende kortlægning primært er lavet med henblik på en regional sammenhængende model af de lithostratigrafiske enheders udbredelse, og at man i forbindelse med den seismiske tolkning ikke nødvendigvis har haft fokus på identifikation og kortlægning af potentielle lagringsstrukturer med et givent volumen. Ligeledes kan det ikke udelukkes at der kan være lagringsstrukturer i områder, hvor de seismiske data er begrænset (Figur 12).

Udover geologiske strukturer er veldefinerede saltpuder og salt diapirer¹ kortlagt. Disse findes i det Vestsjællandske område og på Lolland-Falster (Figur 13). Desuden er medtaget mulige saltstrukturer som er tolket i tidligere kortlægningsprojekter, men som skal bekræftes ved hjælp af nærmere undersøgelser.

De identificerede strukturer vil, såfremt de er egnet til lagring af biogas, umiddelbart også være egnet til lagring af CO₂. Lagring af ren H₂ vil sandsynligvis kræve saltkaverner.

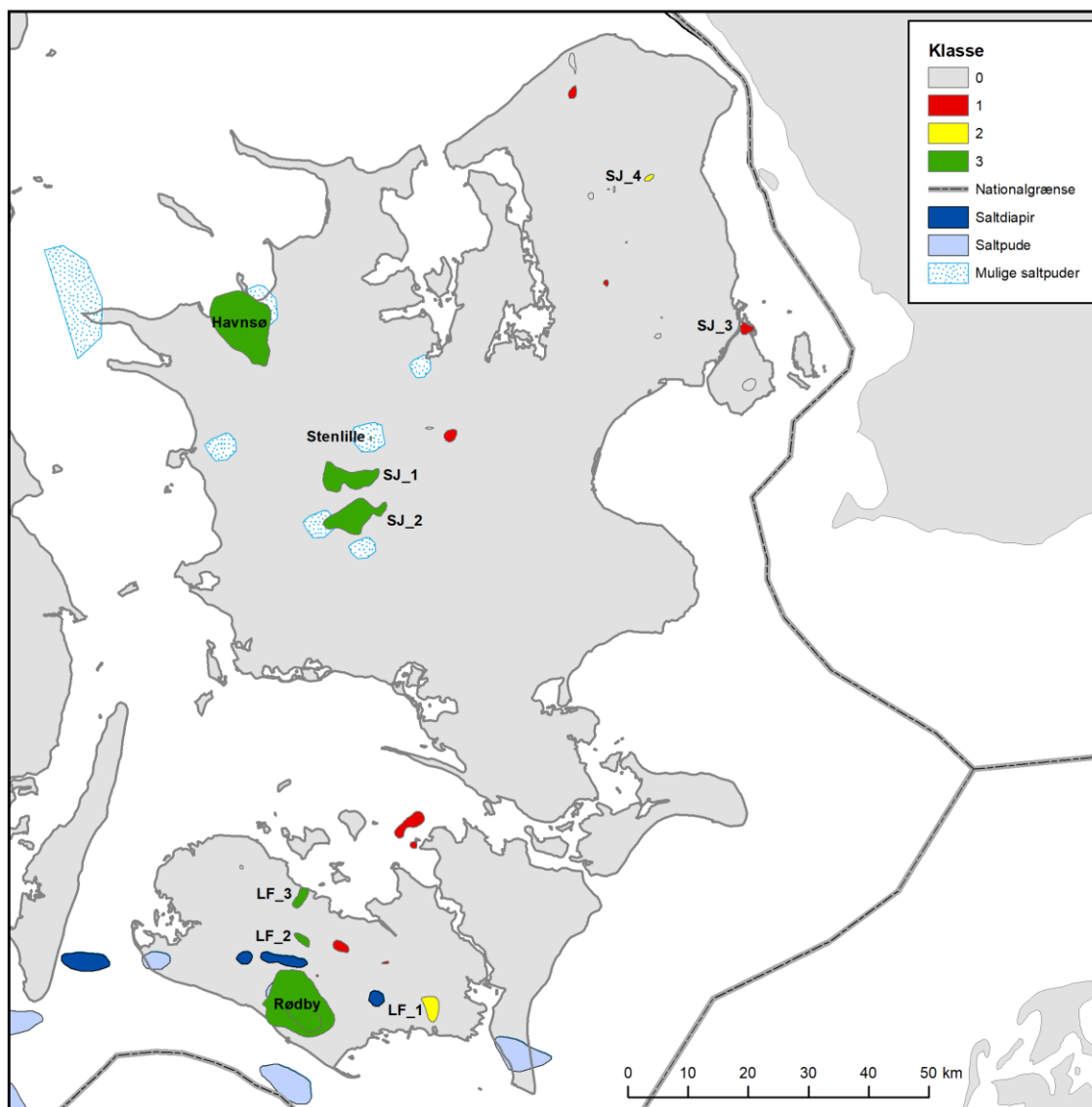
Forundersøgelse af mulighederne for stor-skala lagring af hydrogen gas har vurderet de mulige uønskede reaktioner med H₂ i det geologiske lager, der udover bakterielle metandannelse også omfatter sulfid dannelse via sulfatreducerende bakterier (Amid et al., 2016²; Panfilov, 2016³) og frigørelse af jernoxider (Henkel et al., 2014⁴). Bakteriell aktivitet anses almindeligvis at være mindre betydende i et saltmættet miljø, som fx i saltkaverner, selvom salt tolerante bakterie kendes. Dvs. at man i forbindelse med lagring af H₂ bør være opmærksom på muligheden for dannelse af både metan og sulfid (H₂S), hvoraf sidstnævnte udgør den alvorligste gene.

¹ En salt diapir gennembyder de overliggende lag, hvorimod en saltpude kun "løfter" overliggende lag.

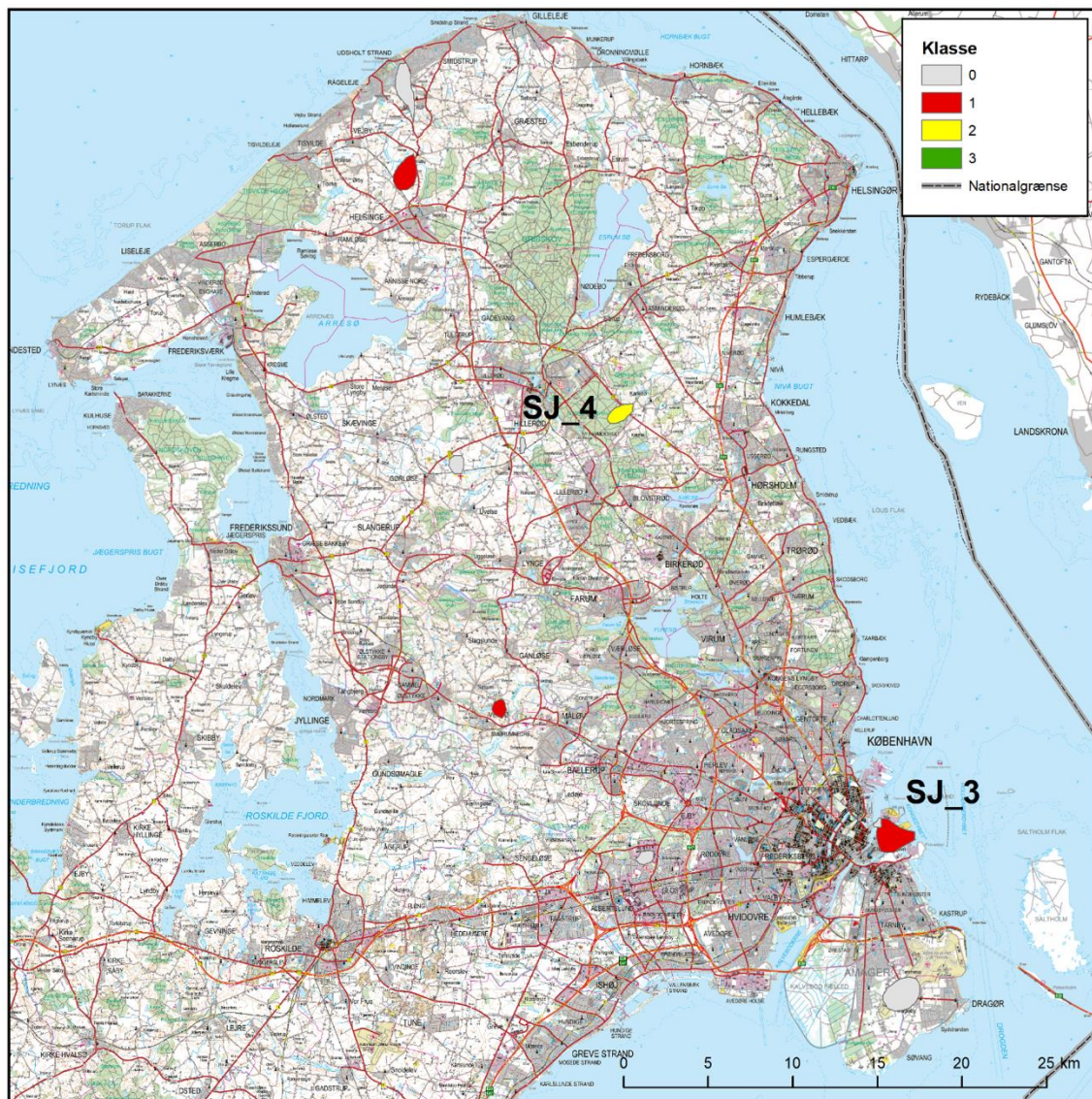
² Amid A, Mignard D, Wilkinson M, 2016. Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. Int J Hydrogen Energy 41, 5549-58

³ Panfilov M, 2010. Underground storage of hydrogen: in situ self-organisation and methane generation. Transp Porous Med 85, 841-65.

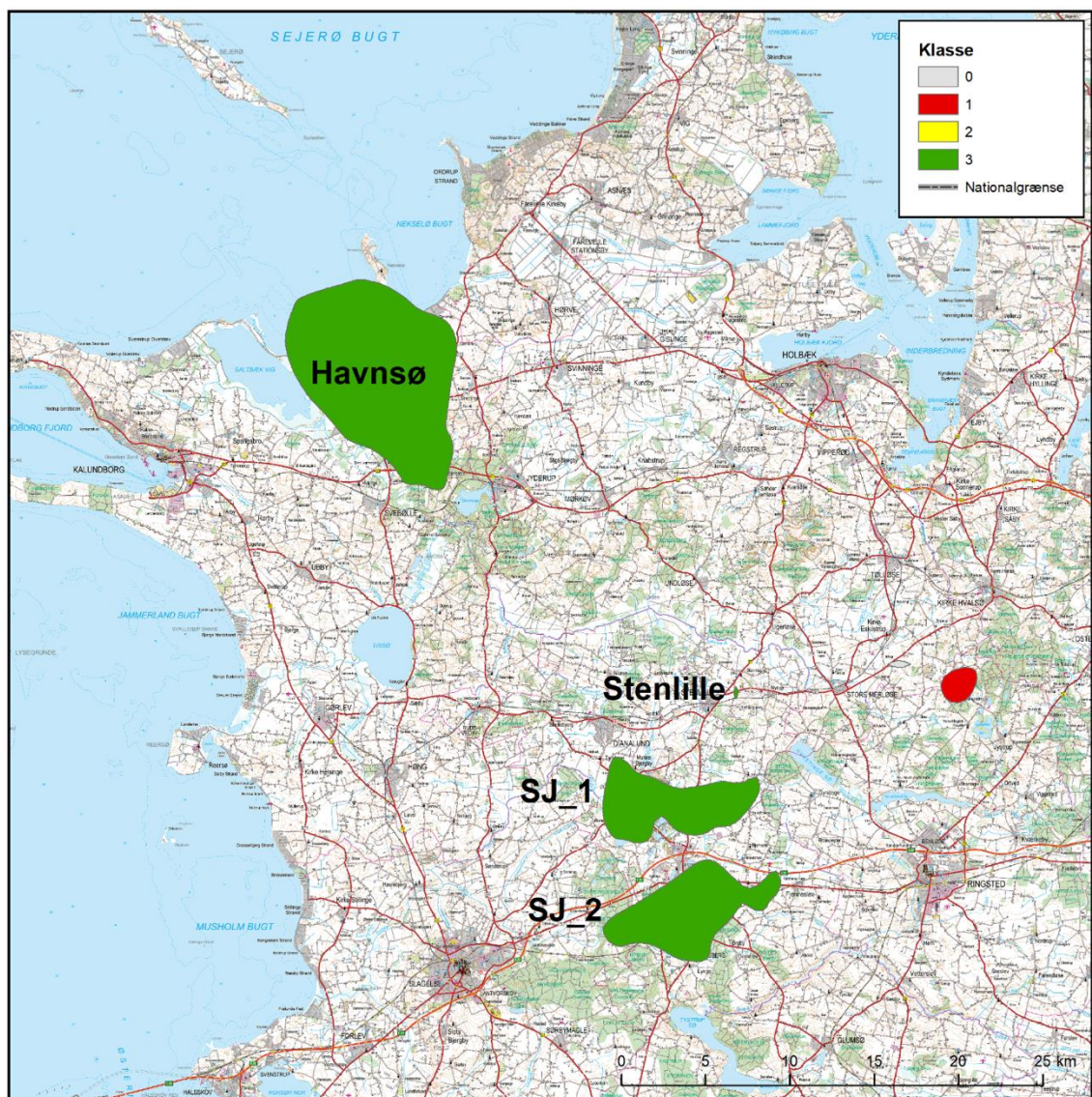
⁴ Henkel S, Pudlo D, Werner L, Enzmann F, Reitenbach V, Albrecht D, et al., 2014. Mineral reactions in the geological underground induced by H₂ and CO₂ injections. Energy Proc., 63: 8026-35.



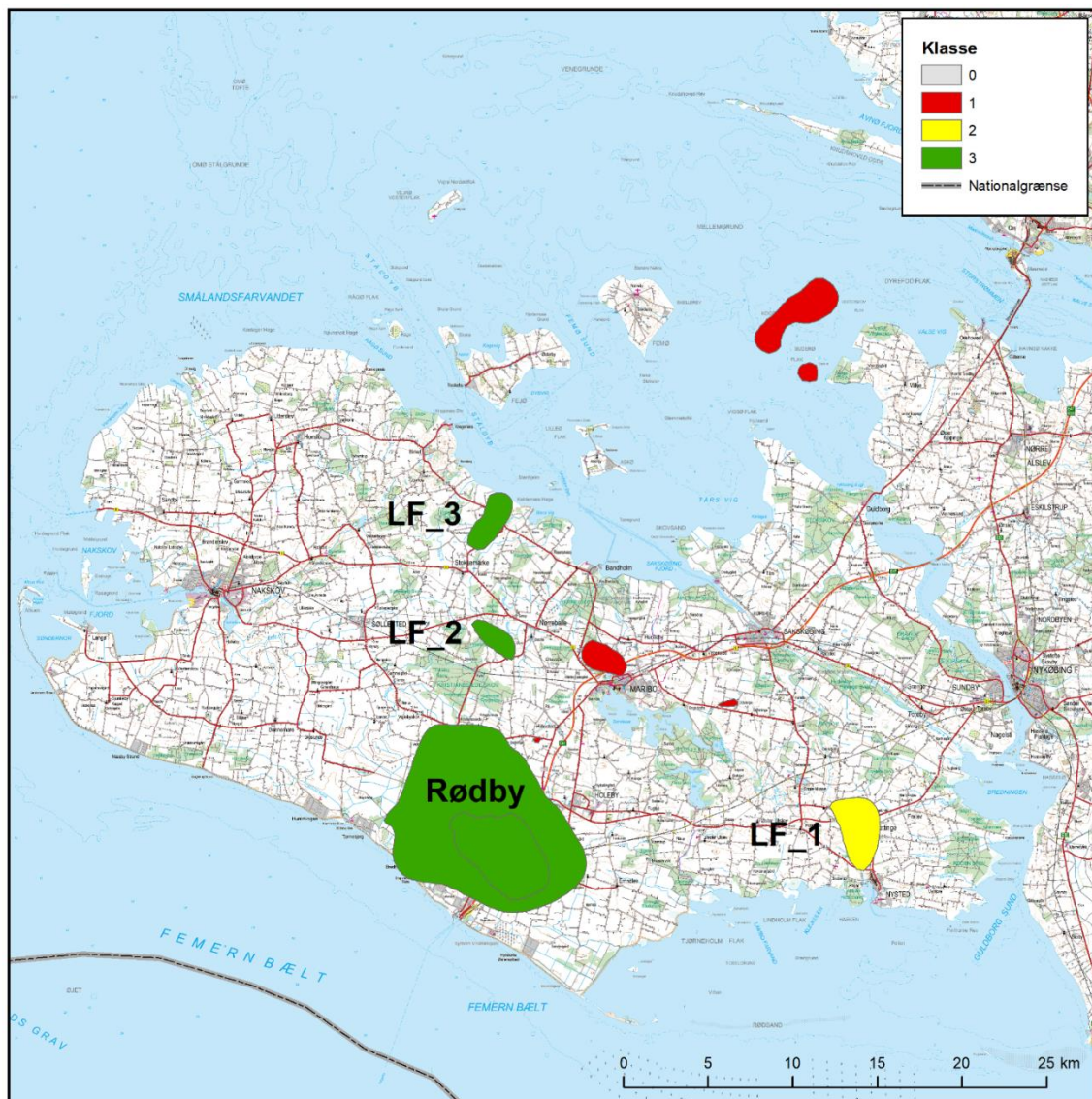
Figur 13. Identificerede geologiske strukturer med angivelse af klasse 0 til klasse 3 (grå, røde, gule og grønne). Klas-sens nummer angiver antallet af seismiske linjer som definerer strukturen. Blå områder viser saltpuder og saltdiapi-rer. Prikkede områder viser mulige saltpuder som kræver en nærmere undersøgelse.



Figur 14. Detaljeret kort med strukturer i Nordsjælland.



Figur 15. Detaljeret kort med strukturer i Vestsjælland.



Figur 16. Detaljert kort med strukturer på Lolland-Falster.

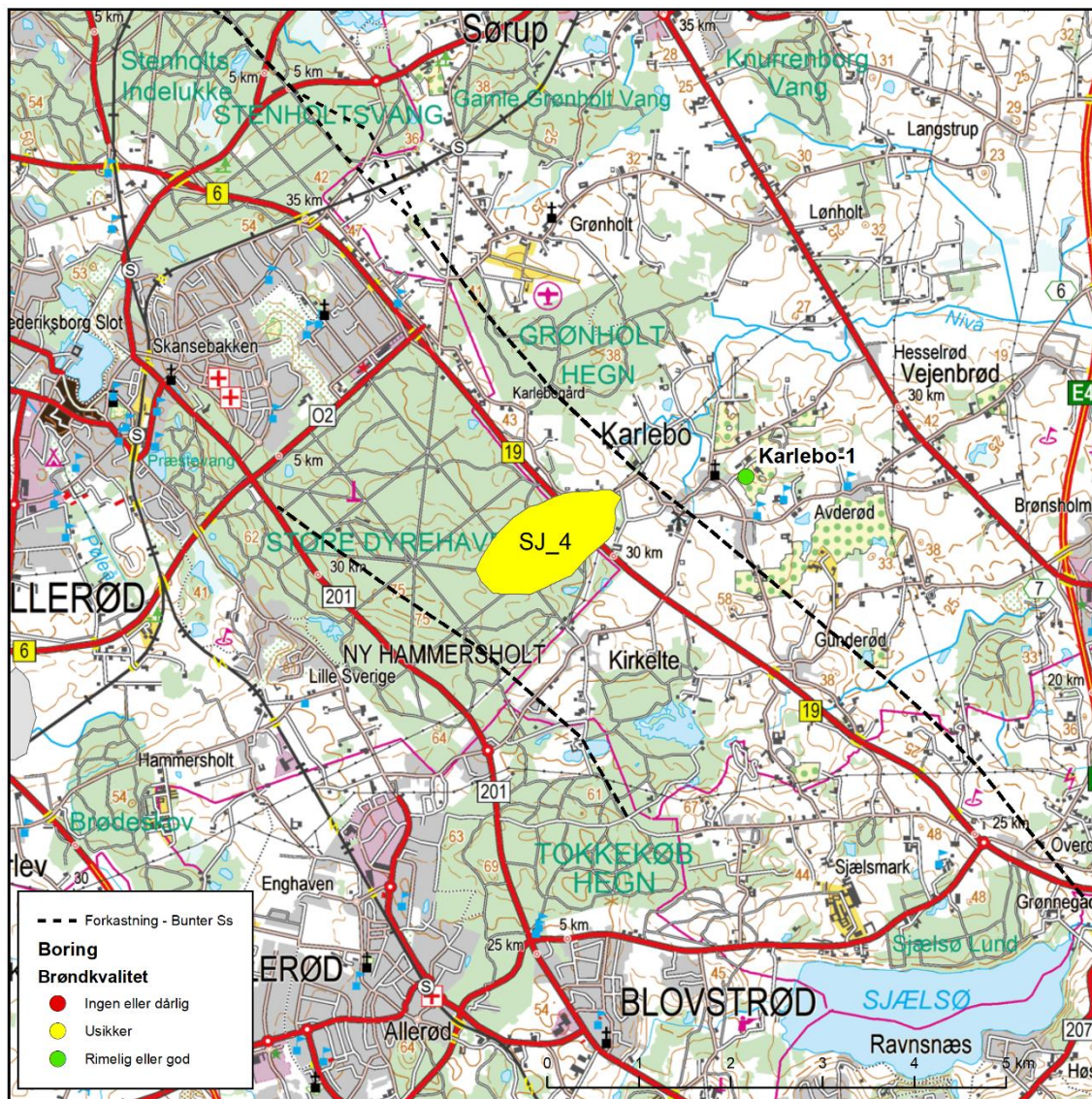
5.2 Beregning af teoretisk porevolumen

Det teoretiske porevolumen er beregnet for i alt 10 kortlagte strukturer. For tre af disse strukturer (Havnsø, Stenlille og Rødby) er der lagringspotentiale i to stratigrafiske niveauer, mens der kun er lagringspotentiale i et enkelt stratigrafisk niveau i de øvrige strukturer. De 9 af strukturerne er klasse 2 og 3, hvilket betyder at mindst to seismiske linjer viser en mulig struktur (Tabel 1). Desuden er der inkluderet en struktur som er klasse 1 (SJ 3) og derfor kun identificeret på en seismisk linje., men da den linje er af god kvalitet og placeringen er i København, er den medtaget i beregningerne. Bemærk at de to linjer som ser ud til at krydse hinanden i Margretheholm-1 boringen på figur 12 ikke har forbindelse med hinanden (Figur 17). Derimod er det ikke muligt at beregne det teoretisk lagringsvolumen for strukturen SJ 4, da reservoirparametrene ikke er kendte for Bunter Sandsten Formationen på denne lokalitet. Strukturen blev boret i

forbindelse med olie/gas efterforskning i 2006 og når kun ned til Gassum Formationen. Derfor kan der være mulighed for et egnet reservoir findes i Gassum Formationen ved Karlebo, men der er ikke identificeret en lukket struktur i den eksisterende kortlægning. SJ_4 er desuden omgivet af forkastninger, hvilket øger risikoen for at strukturen ikke er egnet som reservoir (Figur 18).



Figur 17. Forløbet af de seismiske linjer i København nær Margretheholm-1 boringen.



Figur 18. SJ 4 strukturen og de afgrænsende forkastninger.

Beregningen af det teoretiske porevolumen er baseret på areal af strukturen, formationstykkelsen, andelen af reservoirsand i forhold til hele formationen (Net/Gross) og porøsiteten for reservoirsandet. Værdierne for areal og formationstykkelse er afrundet, da afgrænsningen af strukturerne bygger på en regional seismisk kortlægning, og strukturerne størrelse og udbredelse derfor er behæftet med stor usikkerhed.

Ud fra Tabel 1 og gennemgangen i de foregående kapitler kan det konkluderes, at ift. et gaslager er det sandsynligt, at både sandstensreservoir med betydelige porevolumen, overliggende segl, samt saltstrukturer i form af saltpuder er til stede indenfor undersøgelsesområdet.

Tabel 1. Oversigt med 10 kortlagte strukturer med beregning af et bedste bud (best estimate) af porevolumen. For strukturen SJ 4 findes ikke data som muliggør beregning af teoretisk porevolumen. Bemærk at værdierne for areal og formationstykkelser er afrundet, hvilket afspejler usikkerheden for beregningerne.

Navn	Formation	Klasse ⁵	Areal (mio. m ²)	Formati- onstyk- kelse (m)	Formations volumen (mio. m ³)	N/G ⁶	Porøsi- tet	Porevolumen (mio. m ³)	Dybde (m)	Kommentar
Havnsø	Gassum	3	86,0	200	17.200	0,6	0,22	2.270,4	1.500	
Havnsø	Bunter Ss	3	8,4	170	1.428	0,1	0,2	28,56	2.775	
Stenlille	Gassum	3	8,2	130	1.066	0,8	0,25	213,2	1.507	Nuværende gaslager
Stenlille	Bunter Ss	3	0,1	300	30	0,1	0,2	0,6	2.200	
SJ 1	Gassum	3	27,1	150	4.065	0,6	0,22	536,58	1.350	
SJ 2	Bunter Ss	3	31,7	320	10.144	0,1	0,2	202,88	1.900	
SJ 3	Bunter Ss	1	3,0	300	900	0,4	0,2	72,0	1.625	
SJ 4	Bunter Ss	2	1,1	nd		nd	nd		2.900	Ingen reservoir data
Rødby	Gassum	3	19,9	130	2.587	0,4	0,26	269,0	550	
Rødby	Bunter Ss	3	89,7	250	22.425	0,2	0,21	941,85	1.125	
LF 1	Bunter Ss	2	8,5	400	3.400	0,2	0,21	142,8	1.200	
LF 2	Bunter Ss	3	3,1	300	930	0,2	0,17	31,6	1.300	
LF 3	Bunter Ss	3	5,0	250	1.250	0,2	0,17	42,5	1.150	

Det vil ikke være muligt at udnytte hele porevolumen i et reservoir til gaslagring fx kan al formationsvandet ikke helt fortrænges af gassen. Man bør derfor forvente at maksimalt 80% af det teoretiske porevolumen kan udnyttes.

⁵ Klassen henviser til klassifikationen beskrevet i afsnit 5.1 og vist på figur 13.

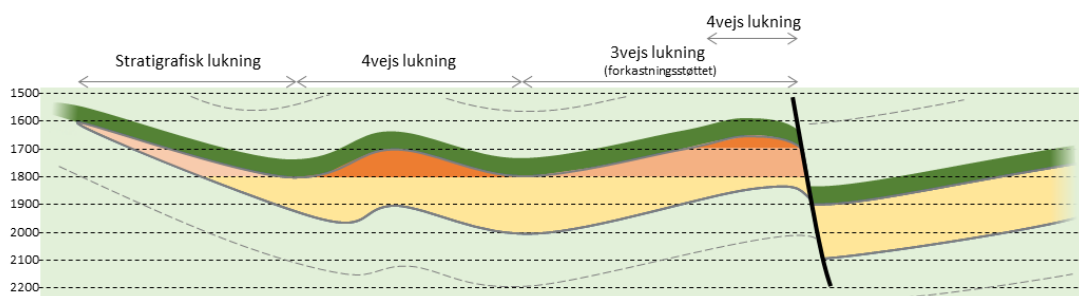
⁶ Andel af reservoirsand i forhold til hele formationen (Net/Gross)

6. Yderlig screening af potentiale for Gaslagring

Den begrænsede seismiske datadensitet gør det vanskeligt at udvælge egnede gaslagringsstrukturer nær København. På baggrund af usikkerheden har GEUS gerne ville udfordre data med yderligere seismisk tolkning- og screeningsarbejde for måske at kunne identificere fokusområder hvor nye data kunne hjælpe med at definere egnede strukturer. De få seismiske data vanskeliggør rumligt at udbrede viden fra brønde til områder uden brønde pga. datakvaliteten, men den primære kilde til usikkerhed ligger i tolkningen og kortlægning af undergrundens struktur og geometri.

Flere store forkastninger kan identificeres på de spredte seismiske profiler, og tolkningen af deres 3D geometri ved korrelationen mellem de spredte profiler er vanskelig og har stor indflydelse på kortlægningen af gaslagringsstrukturer.

I denne screening er fokus på analyse og kortlægning af Bunter Sst. Fm, da dette reservoir er mest påvirket tektonisk og derfor vil kunne indeholde flere typer lagringsstrukturer, fx 4-vejs, 3-vejs dvs. forkastningsstøttet strukturer og muligvis også stratigrafiske lukninger (Figur 19). Flere af disse typer strukturer har muligvis også påvirket udviklingen af potentielle reservoir højere oppe i lagserien og vil kunne lette den videre tolkning af strukturer i f.eks. Gassum Fm. I dette tillægsstudie er der ikke defineret specifikke individuelle strukturer for volumenberegning, men fokuseret på at identificere mulige områder hvor strukturer kunne findes og defineres.



Figur 19. Konceptuelt tværsnit af undergrunden der viser mulige gaslagringslukninger. Reservoirer ses i gul overlejret af et segl i mørkegrøn. Lukningerne er anvist med orange nuancer. En stratigrafisk lukning udgør en fældetype hvor reservoiret er stratigrafisk afgrænset ved f.eks. aflejningsgrænse eller ved en erosionsgrænse af reservoiret. 4-vejslukningen eller domeformen er en struktur hvor reservoirtoppen hælder væk fra toppunktet i alle 4 retninger. En 3-vejslukning eller en forkastningsstøttet lukning er en fældetype hvor strukturen defineres ved at hældende lag væk fra toppunktet i 3 retninger og en vertikal afgrænsning i form af en forkastning. Disse fælder ses tit i kombination med en mindre 4-vejslukning på toppen. Identifikation af fokusområder (Bunter Fm).

6.1 Kortlagte fokusområder

Kortlægningen af Bunter Sst. Fm peger på 10 fokusområder, hvor mulige gaslagringsstrukturer er observeret eller kunne forekomme. Områderne er vist på Figur 20 og hvert fokusområde er kort beskrevet herunder. Der er ikke foretaget en rangering af områder samt taget hensyn til strategisk placering iht. Infrastruktur, onshore/offshore/transitionszone, beboelse, miljøhensyn, etc. Områderne skal betragtes som lokationer hvor seismiske data skal indsamles, før endelige konklusioner kan tages, men GEUS har på baggrund af screeningen af den seismiske data vurderet at der er en sandsynlighed for at gaslagringsstrukturer er til stede, men at alle områder vil kræve flere data og en nærmere analyse for at de-riske specifikke lagringskomplekser.

6.1.1 Nord for Helsing (Område A)

Her tolkes en forkastningsstøttet struktur, hvor der evt. kunne være en associeret 4-vejslukning. Strukturelt komplekst område der potentielt kunne have en eller flere lukninger.

6.1.2 Bendstrup (Område B)

I området langs den sydlige del af Nordsjællandsforkastningen findes et potentiale for flere mulige lagringsstrukturer. Stor usikkerhed pt. da nogle af strukturerne fremkommer som følge af den valgte gridding-algoritme.

6.1.3 Karlebo strukturen (Område C)

Her findes et interessant men meget strukturelt komplekst område hvor Nordsjællandsforkastningen forgrener sig. I dette forgreningsområdet kan der observeres og forventes flere strukturer, men deres reelle geometri er pt. umuligt at kortlægges med god sikkerhed, grundet manglende datadækning.

6.1.4 Offshore Øst for Rungsted (Område D)

Dårligt defineret struktur (en linje), men med muligheder.

6.1.5 Furesø-Virum (Område E)

Interessant område selvom datadensiteten er ringe. De omkringliggende seismiske profiler indikerer en strukturel kulmination i området og selvom en mulig interaktion mellem Amager- og Nordsjællandsforkastningen er mulig, er der indikationer på et større strukturelt potentiale med en eller flere lagringsmuligheder.

6.1.6 Sydvest Amager (Område F)

Her er der gode indikationer på en stor forkastningsstøttet struktur der strækker sig fra sydøst Amager og måske helt op til Vanløse. Strukturen er primært onshore, evt. med et mindre offshore element.

6.1.7 SØ Vallensbæk (Transitionszone) (Område G)

To seismiske profiler indikerer en struktur i området, men strukturen er spekulativ, relateret til to forkastninger og vanskelig at udbrede i området.

6.1.8 Offshore Syd for Avedøre Holme (Område H)

Samspillet mellem Vallensbæk- og Vest Amagerforkastningen muliggør en eller flere strukturer i offshore området syd for Avedøre Holme.

6.1.9 Indre Køge Bugt (Område I)

Der er indikationer på at Bunter Sst. Fm muligvis strækker sig fra vest og ud i den indre del af Køge Bugt. De seismiske data indikerer også, at der i store dele af den ydre del af Køge bugt er erosion af Bunter Sst. Fm. I den indre del af Køge Bugt kan der tolkes flere typer af mulige strukturer (4-vejs, 3-vejs (dvs. forkastningsstøttet) og muligvis også stratigrafiske trunkeringslukninger). En enkelt forkastning er observeret tæt ved Køge by (offshore). Der kan derfor argumenteres for, at der muligvis i dette område har være tektonisk aktivitet der kunne genere mulige lagringsstrukturer.

6.1.10 Offshore Ydre Køge Bugt (Område J)

I dette område er der tolket en mulig tilstedeværelse af Bunter Sst. Fm selvom det er behæftet med stor usikkerhed pga. dataenes ringe beskaffenhed. På nuværende tidspunkt synes strukturen og forseglingen kompleks og er sandsynligvis en kombination af flere lukningstyper. Meget spekulativt område.

6.2 Prioriterede fokusområder

En prioritering af de 4 mest sandsynlige fokusområder, hvor mulige gaslagringsstrukturer er observeret eller kunne forekomme, er listet herunder og kan være relevante områder for nærmere undersøgelser og indsamling af nye data.

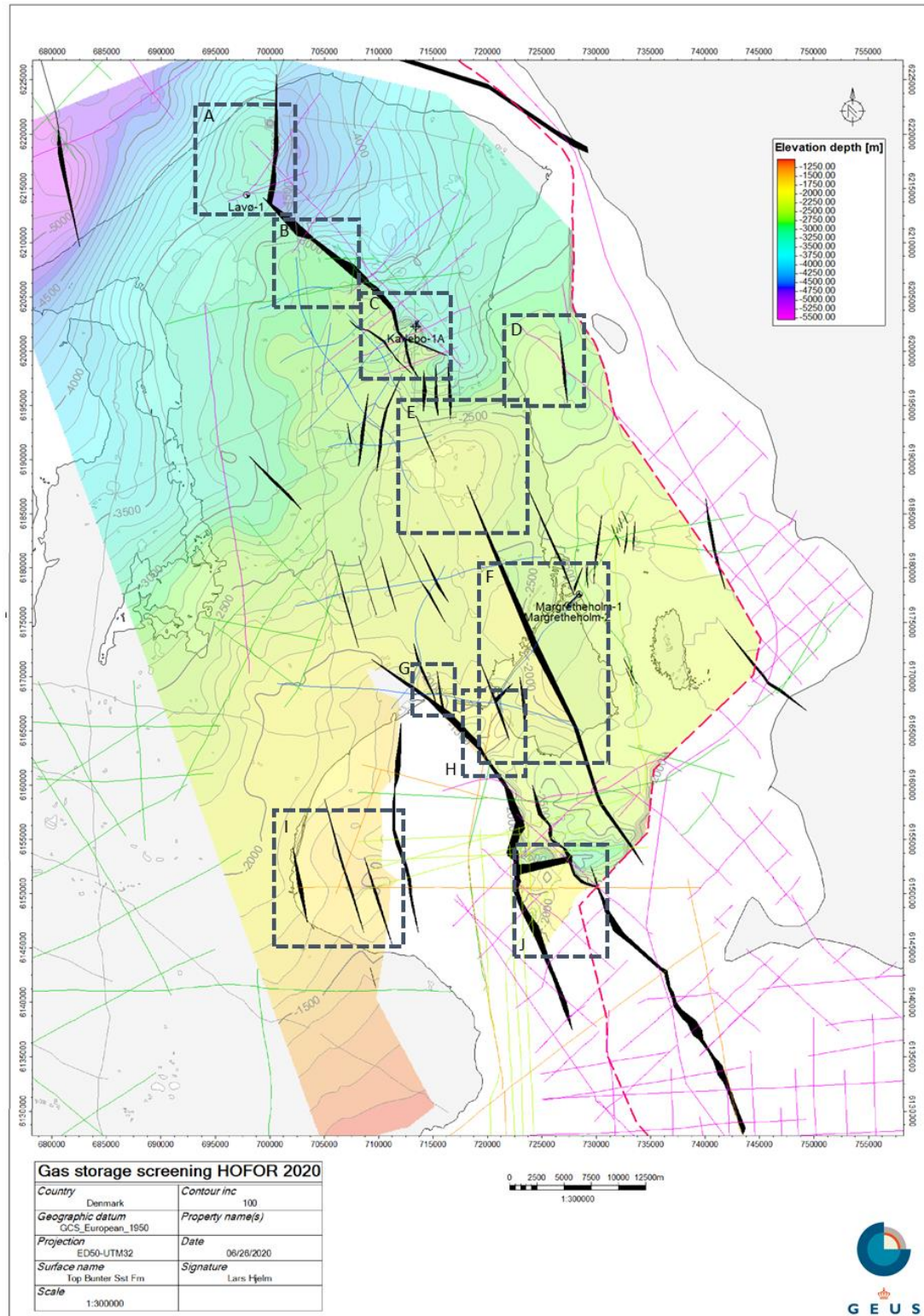
1. Furesø-Virum (Område E)
2. Indre Køge Bugt (Område I)
3. Offshore Syd for Avedøre Holme (Område H)
4. Sydvest Amager (Område F)

6.3 Diverse kommentarer

Der er identificeret strukturer på den svensk-dansk grænse på den svenske side af grænsen som ikke er medtaget i denne evaluering.

Konklusionerne her er primært fortaget på tidstrukturkort da konvertering til dybde kan introducere nogen usikkerhed, men også genere nye (dog usikre) strukturer. Korrekt på Figur 20 er estimeret dybde til Bunter Sst Fm.

I denne screening er forkastningsstøttede strukturer medtaget. Disse kan have en forøget risiko for lækage langs forkastninger i forhold til 4-vejs lukninger. Fældetypen er dog kendt fra olie-/gasindustrien og flere kan også findes i kombination med mindre 4-vejslukninger.



Figur 20. Strukturkortet viser dybden til Top Bunter Sst. Fm. Bunter Sst. Fm er i højere grad end f.eks. Gassum Fm, påvirket af tektoniske processer, hvilket ses ved tilstedeværelse af flere forkastninger der skærer fladen (sorte linje-elementer). Forkastningernes geometri er estimeret (dvs. mest sandsynlig) og de har stor indflydelse på typen og strukturernes udformning. De 10 fokusområder er angivet (blåstiplede kasser) hvor mulige strukturer er observeret eller hvor de kunne forekomme, men hvor det er vigtigt med indsamling af yderligere seismiske data før en endelig beslutning kan fortages.

7. Summarisk beskrivelse af modning af en geologisk struktur til et lager

I det følgende beskrives i kort form de væsentligste forhold, der regulerer området og nogle af de opgaver, som skal udføres for at modne en identificeret struktur til et fungerende gaslager.

7.1 Myndighedskrav

Anvendelse af dansk undergrund reguleres af Undergrundsloven, som administreres af Energistyrelsen. Hvis en geologisk struktur ønskes anvendt til fx et lager af gas, skal operatøren (HOFOR) ansøge Energistyrelsen om en licens i henhold til Undergrundsloven. Ansøgningen skal bl.a. indeholde en beskrivelse af formål, en foreløbig geologisk model for området, som sandsynliggør, at undergrunden kan anvendes til det planlagte formål, et geologisk-teknisk arbejdsprogram, som nøje beskriver hvorledes og i hvilke trin, operatøren vil udføre den dataindsamling og de analyser, som er nødvendige for dokumentation af egnethed. Herunder skal en række juridiske, økonomiske og organisatoriske forhold hos operatøren beskrives, så energistyrelsen kan vurdere om operatøren kan udføre opgaven.

Ofte gives en efterforskningslicens for en periode på 6 år opdelt i tre faser af fx 2 år, hvor hver fase 1 forventes at indeholde dataindsamling (fx seismiske data og testboring), bearbejdning og tolkning efterfulgt af en beslutning om at forsætte undersøgelse frem mod etablering af den ønskede aktivitet eller opgivelse af efterforskningslicensen. Hvis efterforskningen leder frem til en positiv vurdering og beslutning om, at undergrunden lever op til de krav, der stilles ift. lagringsvolumen, sikkerhed etc. tildeles operatøren efter fornyet ansøgning en 30-årig indvindingstilladelse (tilladelse til lagring). Ansøgningen skal indeholde tilstrækkelig geologisk dokumentation, herunder en reservoirmodel der kan simulere injektion og produktion af gassen, en analyse af risici og sikkerhed foruden en monitoringsplan. Det må forventes, at der skal præsenteres en detaljeret risikoanalyse med planer for afværge-foranstaltninger, samt miljøvurderinger.

7.2 Geologisk modning af et undergrundslager

Geologiske undersøgelser af undergrunden, som skal lede frem til identifikation af en ressource (olie-gas, geotermisk vand e.l.), et muligt gaslager eller lignende anvendelse falder typisk i en serie af trin.

7.2.1 Regional vurdering

Indledningsvis udføres en analyse af områdets generelle geologiske udvikling for at vurdere om områdets udvikling taler for at undergrunden kan indeholde de ønskede og nødvendige elementer. I denne fase anvendes alle tilgængelige data om undergrunden, primært regionale seismiske data, relevante borer og evt. magnetiske og gravimetriske data, samt internationale publikationer om de aktuelle geologiske bassiner. GEUS' analyser udført ifm. en række forskellige formål og præsenteret i vores WebGIS-geotermi portal repræsenterer en sådan regional analyse udført med geotermi for øje. Konklusionen er her ift. et gaslager, at det er sandsynligt, at både sandstensreservoir, overliggende segl, samt saltstrukturer i form af saltpuder er til stede indenfor et interesseområde, der omfatter Sjælland og Lolland-Falster området. Dermed er det relevant at fortsætte analysen, hvor der zoomes ind på interesseområdet. Første opgave vil være at mobilisere relevante data i området – dvs. lokale seismiske data og data fra de dybe borer, der vurderes at præsentere relevante informationer. Det er denne del af modningsopgaven, GEUS har udført og rapporterer med nærværende rapport.

7.2.2 Vurdering af interesseområdet

Som det fremgår af nærværende rapport, er konklusionen på screeningen af undergrunden i interesseområdet positiv i den forstand, at GEUS vurderer, at Bunter Sandsten og Gassum formationerne begge er til stede i store dele af interesseområdet i en passende dybde. Endvidere vurderes det, at Gassum Formationen er overlejret af et tilstrækkeligt tæt segl i form af lersten i Fjerritslev Formationen, hvorimod de forseglende egenskaber af bjergarterne overlejrende Bunter Sandsten Formationen er dårligt kendte pga. af få valide data. Desuden viser den eksisterende regionale kortlægning, at der er strukturer i form af "omvendte skåle", som formentlig kan modnes videre frem mod et lagerkompleks.

Det er vigtigt her atter at understrege, at der er tale om en regional kortlægning udført på basis af eksisterende, seismiske data af meget varierende kvalitet og densitet sammenholdt med et lille antal dybe borer placeret spredt i interesseområdet (Margretheholm, Stenlille, Slagelse, Lavø, Karlebo, Rødby og Søllested) (Figur 12). Det er derfor sandsynligt, at der findes strukturer i undergrunden, som de nuværende data og afledte kort, præsenteret i nærværende rapport, ikke viser.

7.2.3 Fokuseret efterforskning af potentielle lagringskomplekser

Næste naturlige skridt frem mod identifikation og evaluering af et egnet lagringskompleks er at udvælge en eller flere strukturer til videre undersøgelser og evaluering på baggrund af overstående analyser. Flere kriterier vil spille ind på udvælgelsen, bl.a. sikkerhed i nuværende data, vurdering af lagringskapaciteten, omkostninger til dataindsamling og evaluering, infrastrukturmæssige forhold og afstand til forbrugere. Det kan fx ikke udelukkes, at en struktur, som på baggrund af nuværende og utilstrækkelige

data vurderes som egnet, viser sig ikke at opfylde kriterierne for sikker lagring, når ny-indsamlede og bedre data med højere opløselighed fremskaffes. På lignende måde kan det ikke udelukkes, at nye data kan nedgradere vurderingen af lagringskapaciteten, og at strukturen må opgives pga. utilstrækkeligt volumen. Ideelt set vil det være at foretrække, at den valgte struktur har et lagringsvolumen, der nogenlunde svarer til det volumen gas, der maksimalt ønskes deponeret.

Efter valg af hvilket (hvilke) potentielt lagringskompleks, der skal undersøges nærmere, skal der planlægges og udføres en detaljeret dataindsamlingskampagne. Kampagnen skal beskrives og efterfølgende godkendes af Energistyrelsen. En sådan kampagne vil indledes med en vurdering af hvilke data, der er nødvendige.

7.2.3.1 Seismiske undersøgelser

For de strukturer, der her er identificeret, vil første skridt være indsamling af seismiske data. Forhold som densitet (dvs. linjetæthed), linjeretning, placering ift. eksisterende seismiske linjer og overflade infrastruktur, mulighed for en forbindelseslinje til en nærliggende, eksisterende dyb boring, samt de rette indsamlingsparametre med fokus på det forventede dybdeinterval skal nøje overvejes, og den seismiske undersøgelse skal herefter designes. Efterfølgende sendes seismik-opgaven i internationalt/EU-udbud, indkomne bud evalueres, kontrakt indgås og kampagnen planlægges i detaljer. Denne fase kræver involvering af lokale myndigheder, politi, lodsejere etc. ifm. regulering af trafik, varsling af lodsejere, dokumentation af fysiske forhold med henblik på evt. erstatningskrav fra lodsejere, husejere etc. Desuden bør en seismisk rådgiver involveres. Baseret på erfaringer fra geotermiske projekter er varigheden af denne fase 1–2 år.

Efter at rådata er kommet i hus, skal de processeres og i denne fase er det, som under selve indsamlingen af rådata, vigtigt at en uafhængig rådgiver for licenshaveren (HOFOR) følger processen, så datakvalitet optimeres ift. målet. Når data er færdig processeret fra et processeringscenter skal de integreres med de eksisterende data og den samlede datapakke tolkes og strukturen kortlægges i detaljer. Processering og efterfølgende tolkning tager typisk ½–1 år.

7.2.3.2 Testboring

Når de seismiske data er tolket, vurderes det om lagringskomplekset forsat ser lovende ud. Hvis det er tilfældet, planlægges udførelse af en testboring, som har til formål at bekræfte tilstedeværelsen af sandstensreservoiret, tilvejebringe information om reservoirets dybde, tykkelse og net/gross forhold, samt porøsitet og permeabilitet. I boringen skal der foretages en række petrofysiske målinger af boreprofilet, og der skal udføres en flowtest. Herudover er det formålstjenligt at skære en borekerne af seglet og af akviferens sandsten, så en række test og målinger kan foretages i laboratoriet.

7.2.3.3 Reservoirmodel

Baseret på den samlede pakke af seismiske data, data fra boringen (wireline logs), borepåner og borekerner etableres en digital reservoirmodel, som kan bruges til at modellere og simulere gasinjektion, -udbredelse og -produktion, og skabe grundlag for en vurdering af hvor mange boringer, der er nødvendige for at drive og overvåge gaslageret.

7.2.3.4 Indvindingsplan

Hvis reservoirmodellen og simuleringerne, samt de øvrige forhold af økonomisk og infrastrukturel karakter er tilfredsstillende, ansøger licenshaveren Energistyrelsen om lov til at drive et gaslager (en såkaldt indvindingstilladelse – begrebet stammer fra olie-gas sektoren). Der må påregnes nogen tid til behandling og godkendelse af ansøgningen, som skal dokumentere en række tekniske forhold som bl.a. omtalt ovenfor.