DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE **RAPPORT 2021/60**

Studies of geological properties and conditions for deep disposal of radioactive waste, Denmark. Phase 1, report no. 9

Karakterisering og evaluering af geologiske egenskaber og forhold i 500 meters dybde

Helle H. Midtgaard, Lars Hjelm, Rasmus Jakobsen, Sachin Karan, Claus Kjøller, Bertel Nilsson & Mette Lise K. Poulsen

GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK AND GREENLAND
DANISH MINISTRY OF CLIMATE, ENERGY AND UTILITIES

G E U S

Studies of geological properties and conditions for deep disposal of radioactive waste, Denmark Phase 1, report no. 9

Karakterisering og evaluering af geologiske egenskaber og forhold i 500 meters dybde

For engelsk oversættelse se rapport 2021/61

Helle H. Midtgaard, Lars Hjelm, Rasmus Jakobsen, Sachin Karan, Claus Kjøller, Bertel Nilsson & Mette Lise K. Poulsen

GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK AND GREENLAND
DANISH MINISTRY OF CLIMATE, ENERGY AND UTILITIES

GEUS

Forord

Nærværende rapport er det afsluttende bidrag til den første fase af et større geologisk projekt, der har til formål at undersøge, om der kan identificeres geologisk egnede lokaliteter til mulig dyb deponering af det danske radioaktive affald. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) har ved Folketingets beslutning B90 fået tildelt opgaven at kortlægge og karakterisere formationer af lavpermeable bjergarter, der har tykkelser på 100 meter eller mere og forekommer horisontalt udbredte i dybder omkring 500 meter. Arbejdet i første fase er baseret hovedsageligt på eksisterende data fra den danske undergrund og er præsenteret i en serie på ti rapporter, der er publiceret på GEUS' hjemmeside.

Den geologiske karakterisering og evaluering udgør det geologiske grundlag for udvælgelsen af to lokaliteter, hvor detaljerede geologiske undersøgelser skal udføres i projektets anden fase. De to lokaliteter vil blive udvalgt igennem en dialogproces mellem Uddannelses- og Forskningsministeriet (UFM) og kommunerne. De nye geologiske data, der frembringes i projektets anden fase, vil indgå i en sikkerhedsvurdering af det samlede depotkoncept, når et egnet koncept for en langsigtet løsning er udviklet af Dansk Dekommissionering (DD). Sikkerhedsvurderingen skal undersøge, om de geologiske egenskaber og forhold i kombination med de konstruerede barrierer i et dybt geologisk slutdepot kan levere den nødvendige sikkerhed på både kort og lang sigt.

I den danske undergrund i 500 meters dybde findes lavpermeable bjergarter, der potentielt kan anvendes som værtsbjergart for slutdeponering af det radioaktive affald. Bjergarterne udgøres af lersten i Jura og Nedre Kridt formationer, kalksten i Øvre Kridt formationer samt granit og gnejs i det prækambriske grundfjeld. Som en del af nærværende projekt er disse stratigrafiske intervallers udbredelse kortlagt, og bjergarternes geologiske egenskaber er beskrevet. Bjergarternes egenskaber i forhold til at tilbageholde radioaktive nuklider i undergrunden er undersøgt indledningsvist ved konceptuelle 1D numeriske modeller. Endelig er geologiske forhold og processer, der har indflydelse på stabiliteten på kort og lang sigt, beskrevet. Informationen, der er samlet i de geologiske rapporter, danner grundlaget for den endelige karakterisering og evaluering af egenskaber og forhold i 500 meters dybde.

Baseret på givne krav og generelle internationale retningslinjer er kriterier defineret for hvilke geologiske egenskaber, der er favorable for etablering af et dybt geologisk slutdepot. For at evaluere undergrundens egenskaber i forhold til de definerede kriterier er Danmark inddelt i 11 områder. Hvert område er karakteriseret og evalueret med hensyn til, i hvilken grad de definerede kriterier er favorable, potentielt favorable eller mindre favorable. Resultaterne af projektet er præsenteret i følgende rapporter:

1. Requirements and criteria for initial evaluation of geological properties and conditions
2. Geological setting and structural framework of Danish onshore areas
3. Upper Cretaceous – Paleocene chalk, limestone and marl distribution and properties
4. Jurassic and Lower Cretaceous claystone distribution, sedimentology, and properties
5. Precambrian crystalline basement distribution and properties
6. Subsurface distribution of Jurassic and Cretaceous fine-grained formations based on seismic mapping
7. Evaluation of long-term stability related to glaciations, climate and sea level, groundwater, and earthquakes
8. Conceptual 1D modelling of nuclide transport in low permeable formations
9. Karakterisering og evaluering af geologiske egenskaber og forhold i 500 meters dybde
10. Characterization and evaluation of geological properties and conditions at 500 meters depth (engelsk version af rapport nr. 9, udgives i efteråret 2022).

Denne rapport er nr. 9. Den præsenterer inddelingen i geologiske områder og de definerede geologiske kriterier, der anvendes for evalueringen. Evalueringen af de geologiske kriterier for hvert område er præsenteret sammen med datagrundlaget for evalueringerne. En engelsk version af rapport nr. 9 bliver tilgængelig i efteråret 2022 som rapport nr. 10.

Indholdsfortegnelse

0. Introduktion til indholdet i rapporten 6

1. Introduktion 9

1.2 Retningslinjer for identificering af en egnet lokalitet for dyb geologisk slutdeponering 9
1.3 Koncept for dyb geologisk deponering af radioaktivt affald 11
1.4 Det geologisk slutdepotprojekt 12

2. Geologiske krav og kriterier til en lokalitet for slutdeponering 14

2.1 Krav til værtsbjergart og de generelle geologiske forhold....14
2.1 Kriterier for favorable geologiske egenskaber og forhold 15
2.3 Baggrund for inddeling i geologiske områder 16

3. De geologiske egenskaber af mulige værts- og barrierebjergarter 18

3.1 Ler og mineraler med gunstig effekt for barriereegenskaber....19
3.2 Ler og lersten i Jura og Nedre Kridt formationer....21
3.3 Kalksten i Øvre kridt og Palæocen (Kalkgruppen)....24
3.4 Barriereeffektivitet af lersten og kalksten 28
3.5 Krystallinsk grundfjeld (Prækambrium) 29
3.6 Kænozoiske ler- og sandaflejringer – (ikke barrierebjergarter) 31

4. Inddeling i geologiske områder 33

4.1 Udbredelsen af geologiske formationer i undergrunden....33
4.2 Introduktion til geologiske kort....35
4.3 Geologiske profiler 42
4.5 Geologisk områdeinddeling....59

5. Anvendelse af kriterier for område-evaluering 65

5.1 Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen 65
5.2 Naturlig stabilitet i området....67
5.3 Geoteknisk gennemførlighed 68
5.4 Pålidelighed af nye geologiske data....69
5.5 Scoring af de geologiske egenskaber baseret på kriterier 70

6. Område karakterisering og evaluering 73

6.1 Nordjylland....75
6.2 Limfjord Øst 86
6.3 Midt-Vestjylland 97
6.4 Østjylland....106
6.5 Sydvestjylland....115
6.6 Sønderjylland....124
6.7 Fyn....133
6.8 Sydlige Øhav 142
6.9 Sydvestsjælland 153

6.10 Nordøstsjælland 162
6.11 Bornholm 171

7. Opsummering af områdeevalueringerne 175

8. Referencer 182

8.1 Rapporter fra projektet om dybt geologisk slutdepot 184
8.2 Rapporter fra tidligere geologiske studier om deponering af det danske radioaktive affald 185

Appendix A
Detaljeret evaluering af områder

Appendix B
Blechschmidt, I., Frieg, B., Vomvoris, S., Turner, J., and Tweed, C., 2021: Geological siting project on deep disposal of the Danish radioactive waste. Review of: Phase 1, report no. 8. Criteria and requirements for identification of suitable sites. (The reviewed report is the present report no. 1).

0. Introduktion til indholdet i rapporten

Denne rapport præsenterer en evaluering af den danske undergrund med henblik på at identificere områder i omkring 500 meters dybde, hvor de geologiske egenskaber og forhold er favorable for eventuel etablering af et dybt slutdepot til det danske radioaktive affald. Evalueringen, som er opsummeret i rapportens Kapitel 7, er baseret på en karakterisering og kortlægning af den danske undergrund i dybder ned til 500 meter. Den detaljerede kortlægning og karakterisering er præsenteret i syv geologiske rapporter, der er udarbejdet som en del af det geologiske slutdepotprojekt (jf. referencer i Kapitel 8.1). En række geologiske kriterier for undergrundens egenskaber og forhold, der skal bidrage til at identificere effektive geologiske barrierer og stabile geologiske forhold, er defineret og beskrevet i Rapport nr. 1 i rapportserien fra det geologiske slutdepotprojekt (jf. referencer i Kapitel 8.1) på baggrund af krav, der er givet i Folketingets beslutning B90 (Folketinget, 2018) og anbefalinger fra tilsvarende internationale projekter om dyb geologisk slutdeponering.

Dette indledende kapitel beskriver kort indholdet i den nærværende rapport.

Kapitel 1 indeholder en introduktion til det danske slutdepotprojekt og beskriver retningslinjer for dyb geologisk slutdeponering af radioaktivt affald. Det geologiske slutdepotprojekt er et resultat af Folketingets beslutning B90 om, at mulighederne for at identificere en egnet lokalitet for dyb geologisk deponering af det danske radioaktive affald i en dybde omkring 500 meter under terræn skal afsøges. Det geologiske slutdepotprojekt ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) omfatter to overordnede faser. Resultatet af den første fase, som er baseret hovedsageligt på en gennemgang og sammenstilling af eksisterende data, danner det geologiske grundlag for at to lokaliteter for detailundersøgelser kan udvælges igennem en dialogproces mellem Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (UFS) og kommunerne. I projektets næste fase skal der foretages detaljerede geologiske og geofysiske undersøgelser på de to lokaliteter. Undersøgelserne omfatter dybe boringer til mere end 500 meter og indsamling af nye seismiske data. Resultaterne af detailundersøgelserne skal vise, om tilstedeværelsen af favorable geologiske egenskaber og forhold for dyb deponering kan bekræftes.

I Kapitel 2 præsenteres de overordnede geologiske krav og kriterier, der skal være opfyldt, for at en lokalitet er egnet til dyb geologisk deponering af det radioaktive affald. Kriterierne er defineret på baggrund af internationale anbefalinger og erfaringer fra lignende projekter, og kriteriernes relevans for sikkerheden i depotet beskrives. I et geologisk slutdepot skal tætte geologiske formationer udgøre barrierer, der sammen med konstruerede barrierer sikrer tilbageholdelse af radioaktive nuklider dybt i undergrunden. Den geologiske formation, som depotet kan etableres i, refereres til som værtsbjergarten. I intervallet over værtsbjergarten skal en tæt formation, her refereret til som barrierebjergarten, udgøre en yderligere barriere for tilbageholdelse af radioaktive nuklider. Kriterierne omfatter den rumlige udbredelse og homogenitet af bjergarterne, geokemiske forhold, områdets stabilitet på både kort og langt sigt, geotekniske egenskaber samt mulighederne for at indsamle pålidelige og repræsentative nye geologiske data ved detaljerede undersøgelser af en lokalitet i området.

Kapitel 3 præsenterer den eksisterende viden om de geologiske barriereegenskaber af de jurassiske og kretassiske lersten og kalksten samt det prækambriske krystallinske grundfjeld,

der findes i den danske undergrund. Der er endvidere givet en kort beskrivelse af de yngre kænozoiske sedimenter, der generelt ikke udgør en barrierebjergart. En opsummering af de konceptuelle, numeriske 1D modeller for stoftransport i lersten og kalksten er ligeledes præsenteret. Modelleringen viser, at med de anvendte parametre kan både lersten og kalksten fungere som en geologiske barriere, der kan bidrage til retardation af radioaktive nuklider i undergrunden. En parameter, der ses at have særligt stor indflydelse på stoftransport, er den hydrauliske gradient.

Kapitel 4 præsenterer udbredelsen af de geologiske formationer, der indeholder mulige værtsbjergarter og barrierebjergarter, og som er kortlagt på grundlag af seismiske data og dybe boringer. Den karakteristiske geologiske og strukturelle opbygning af undergrunden i forskellige dele af landet illustreres med en række repræsentative geologiske profiler gennem lagserien. På baggrund af den generelle geologiske opbygning og kompleksitet i dybder ned til 500 meter er Danmark inddelt i 11 områder, der hver især har en karakteristisk geologisk lagserie og strukturel opbygning. Inddelingen i områder er foretaget for at kunne evaluere de geologiske egenskaber og forhold i hvert område i forhold til de definerede kriterier.

Kapitel 5 præsenterer de geologiske kriterier og en række specifikke egenskaber, der er relateret til de enkelte kriterier. I kapitlet beskrives konceptet for evalueringen af, hvorvidt kriterierne er opfyldt i områderne. De specifikke egenskaber for hvert kriterie bliver tildelt en del-score, som danner grundlaget for den samlede evaluering af hvert kriterie. Evalueringen af kriterierne er kvalitativ og bliver scoret med farver på en skala med tre trin. En grøn farve anvendes, når pålidelige data viser, at overvejende favorable egenskaber for kriteriet er til stede i størstedelen af området. En gul score anvendes, når analogier eller mindre sikre data indikerer, at favorable egenskaber generelt kan forventes i størstedelen af området. En orange score anvendes, når pålidelige data fra området viser, at egenskaberne generelt er mindre favorable.

Kapitel 6 præsenterer evalueringen af de forskellige kriterier for hvert område. I nogle områder, hvor både lersten og kalksten forekommer i dybder omkring 500 meter, er en evaluering lavet for begge typer af mulige værtsbjergarter. Kapitlet indeholder for fuldstændighedens skyld detaljerede geografiske temakort, litologisk tolkning af petrofysiske borehulslogs samt dybde og tykkelseskort for alle de kortlagte stratigrafiske intervaller for hvert område. De viste kort og figurer danner sammen med de geologiske profiler (Kapitel 4) og de generelle egenskaber af hhv. lersten, kalksten og granit/gnejs (Kapitel 3) grundlaget for evalueringen i forhold til kriterierne. Kortene, der præsenteres i Kapitel 6, kan desuden anvendes ved udvælgelsen af specifikke lokaliteter for de geologiske undersøgelser i projektets næste fase.

Kapitel 7 præsenterer en opsummering af evalueringerne og nogle generelle kommentarer til evalueringerne. Mange kriterier scorer grøn eller gul, hvilket betyder, at overvejende favorable egenskaber er til stede eller forventes at være til stede i mange områder. De mange gule scorer afspejler den generelle mangel på specifikke geologiske data fra den danske undergrund i dybder ned til 500 meter. For alle kriterier, der er scoret som mindre favorable (orange), er der en kort beskrivelse af hvilke specifikke geologiske egenskaber, der har resulteret i scoringen som mindre favorable og den mulige betydning for deponering i området.

Kapitel 8 indeholder en liste over de referencer, der er henvist til i rapportteksten. Herudover er angivet forskellige rapporter og publikationer, der er udarbejdet forbindelse med tidligere

geologiske undersøgelser og studier relateret til mulig deponering af det danske radioaktive affald i et terrænnært eller mellemdybt depot (omegnsstudier og mellemlagerstudier).

Appendix A indeholder detaljerede evalueringer af de geologiske egenskaber relateret til kriterierne samt kommentarer til egenskaber og deres del-scorer.

Appendix B indeholder en rapport med anbefalinger til GEUS' definition af de geologiske kriterier og konceptet for evaluering af områderne, som er udarbejdet af en international ekspertgruppe (Blechschmidt et el. 2021).

1. Introduktion

I 2018 vedtog Folketinget beslutningsforslag B90 om, at en langsigtet løsning for håndtering af Danmarks radioaktive affald skal indeholde en lokalisering af en muligt egnet lokalitet for etablering af et dybt geologisk slutdepot, som kan tages i brug senest i 2073 (Folketinget, 2018). Det radioaktive affald består af ca. 10,000 m^3 lavradioaktivt affald og mindre mængder af mellemradioaktivt affald, inklusiv 233 kg særligt affald, men intet højradioaktivt varmegenererende affald. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) har af Folketinget fået tildelt opgaven med at undersøge, om der eksisterer områder i den danske undergrund, der i en dybde omkring 500 meter, har de nødvendige geologiske egenskaber for etablering af et slutdepot for det radioaktive affald. De geologiske undersøgelser udføres sideløbende med aktiviteter hos Uddannelses- og Forskningsministeriet (UFM), der er overordnet ejer af slutdepotprojektet og Dansk Dekommissionering (DD), som dels har ansvaret for at opbevare affaldet midlertidigt og dels for den fremtidige slutdeponering (UFM, 2021).

Det geologiske slutdepotprojekt blev påbegyndt i januar 2019 og forventes at forløbe over en 7-årig periode. Projektet udgør den geofaglige del af det samlede projekt om et muligt geologisk slutdepot, som er defineret i Folketingets beslutning B90 (Folketinget, 2018). Det geologiske projekt varetages af GEUS' personale med bidrag fra eksterne forskningsinstitutioner, konsulentfirmaer og internationale eksperter, hvor det er nødvendigt. Resultaterne af dette projekts første fase med geologisk karakterisering og evaluering af undergrundens geologiske egenskaber udgør det geologiske fundament for udvælgelsen af to lokaliteter, hvor detaljerede geologiske undersøgelser skal udføres i projektets anden fase.

UFM har delegeret opfølgningen på B90 til Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (UFS), herunder interessentinddragelse og dialogproces. Udvælgelsen af områder skal gennemføres i samarbejde mellem UFS og interesserede kommuner. Aspekter, der vedrører socioøkonomiske forhold og aktiviteter vedrørende borgerinddragelse, design af slutdepotet, sikkerhedsvurderinger og andre ikke-geologiske problemstillinger og forhold, bliver håndteret af UFS og DD med geofaglige bidrag fra GEUS, hvor det er relevant.

1.2 Retningslinjer for identificering af en egnet lokalitet for dyb geologisk slutdeponering

Internationale anbefalinger for formålet med de geologiske undersøgelser, der skal lede til identificering af en egnet lokalitet for dyb geologisk deponering af radioaktivt affald, er præsenteret af bl.a. det Internationale Atom Energi Agentur (IAEA, 2011) og Norris (2012) – her oversat til dansk:

"At identificere og kortlægge lav-permeable bjergarter, der udgør tilstrækkeligt tykke formationer (mere end 100 meter), og som har en kontinuert lateral udbredelse (flere kilometer i hver retning) indenfor studieområdet. Formationen skal være homogen og må ikke indeholde betydelige diskontinuiteter så som store forkastninger og sprækker. Formationen skal være

så mineralogisk homogen og ensartet som muligt. De geologiske forhold skal være stabile på både kort sigt og indenfor en længere tidshorisont afhængigt af affaldets karakter."

Projektet vil følge retningslinjer fra det Internationale Atom Energi Agentur (IAEA, 2011; IAEA 2018a; IAEA 2018b), Det Nukleare Agentur under OECD (NEA, 2005; NEA, 2008; NEA, 2012) og EU-direktiver indenfor området (EU, 2011).

IAEA (2018a) understreger, at det ikke vil være muligt at finde ”den mest sikre” lokalitet baseret på bjergarternes egenskaber, da det er umuligt at undersøge og karakterisere alle de geologiske egenskaber i høj detaljegrad i mange områder. Opgaven er derfor at identificere en lokalitet, hvor de geologiske egenskaber og forhold for sikker deponering i det krævede tidsrum samt funktionalitet ved etablering og opfyldning er accepteret af beslutningstagere og interessenter.

Omfanget af de geologiske undersøgelser, der er nødvendige at udføre, er defineret på basis af erfaringer fra lignende projekter i bl.a. Frankrig, Sverige, Belgien, Schweiz, Holland og Finland (ANDRA, 2005; SKB, 2007; ONDRAF/NIRAS, 2015; Nagra, 2017; COVRA, 2017; POSIVA 2017a, b). Kontakter er i løbet af projektet etableret til flere af disse organisationer med henblik på udveksling af erfaringer samt rådgivning og kvalitetssikring for det geologiske slutdepotprojekt. Som et resultat af dette internationale samarbejde, blev der i første fase af slutdepotprojektet udført et review af de definerede geologiske kriterier (præsenteret i Rapport nr. 1), hvor kommentarer og anbefalinger er afrapporteret i Blechschmidt et al. (2021) (Appendix B).

De lande, der har arbejdet i flere årtier på at identificere geologisk egnede områder for deponering af radioaktive affald, er særligt dem, der producerer højradioaktivt affald, som stammer fra kernekraftanlæg. Dette affald adskiller sig fra det danske affald både i volumen og i indholdet af langlivede radioaktive isotoper. Tilsvarende er de geologiske kriterier fra disse landes lokaliseringsprojekter defineret med henblik på etablering af et slutdepot, der kan indeholde både store mængder højradioaktivt affald, og som også kan tilbageholde affaldet i en meget lang tidsperiode. Slutdeponering af affald fra disse lande er derfor af en større kompleksitet end deponering af det danske radioaktive affald. Ved at anvende tilsvarende kriterier og undersøgelsesmetoder for det danske slutdepotprojekt ud fra et forsigtighedsprincip, sikres det at alle nødvendige og relevante forhold omkring undergrundens egenskaber undersøges og kortlægges. De helt specifikke geologiske egenskaber, der er nødvendige for slutdeponering af det danske affald, vil afhænge af depotkonceptet og depotdesign, som endnu ikke er fastlagt.

På grundlag af flere årtiers undersøgelser og forskning i føromtalte lande er det konkluderet, at et dybt geologisk slutdepot kan etableres i såvel marine lersten, lerholdige kalksten (mergel) som krystallinsk grundfjeld. Hvorvidt de geologiske egenskaber er favorable, afhænger af de lokale geologiske forhold og egenskaberne af de specifikke formationer i lokalområdet, hvor et slutdepot påtænkes etableret. I Sverige og Finland er det besluttet at etablere slutdepoter i krystallinsk grundfjeld. I Schweiz er flere lokaliteter identificerede som egnede med mulige værtsbjergarter i både lersten og mergel. Den endelige beslutning om placeringen af et geologisk slutdepot er ofte baseret på socio-økonomiske forhold når først en anvendelig geologi er identificeret.

Resultater og erfaringer fra forskning relateret til slutdeponering af radioaktivt affald er tilgængelige fra flere store organisationer (f.eks. NAGRA-Schweiz, ANDRA–Frankrig, ONDRAF/NIRAS–Belgien, NDA-England, SKB–Sverige og Posiva-Finland).

1.3 Koncept for dyb geologisk deponering af radioaktivt affald

Konceptet for dyb geologisk deponering af radioaktivt affald omfatter et samlet system med tre forskellige barrierer, der indelukker affaldet på følgende måder (IAEA, 2011):

1. Den inderste barriere (konstrueret). Denne barriere består af containere eller tønder af rustfrit stål, kobber eller andet resistent materiale, som det radioaktive affald er pakket ned i og indstøbt i med f.eks. cement eller beton.
2. Den mellemste barriere (konstrueret): En underjordisk konstruktion i ordets bredeste betydning (kaverne/skakt/borehul) hvor containere og/eller tønder eller specialdesignede beholdere er placeret og indkapslet i forseglende materiale som f.eks. bentonit eller cement.
3. Den yderste barriere (geologisk formation): Den yderste barriere er de tætte geologiske formationer, der danner en naturlig passiv barriere for tilbageholdelse og retardation (forsinket transport) af radioaktive nuklider i undergrunden. Formationen, som affaldet kan deponeres i, refereres til som værtsbjergarten og de tætte formationer i den overliggende barrierezone refereres til som barrierebjergarter.

De konstruerede barrierer designes til at sikre forsegling og retardation af radioaktive nuklider i længst mulig tid. Kemiske reaktioner mellem grundvandet og affaldscontainerne vil sandsynligvis forårsage korrosion og dermed en gradvis nedbrydning af de konstruerede barrierer over tid. Når denne nedbrydning sker, er tilbageholdelsen af radioaktive nuklider i den dybe undergrund afhængig af værtsbjergartens og de overliggende barrierebjergarters egenskaber som barrierer, der skal sikre, at radioaktive nuklider tilbageholdes i undergrunden og ikke bevæger sig opad mod mindre dybder og videre ind i biosfæren.

For det danske slutdepotprojekt er identificering og udvikling af et optimalt og realiserbart depotdesign/-koncept en iterativ proces, som bl.a. er afhængig af de geologiske og geotekniske egenskaber og forhold i både værtsbjergarten og barrierebjergarterne. Derudover har de geologiske forhold betydning for geoteknisk stabilitet og sikkerheden under udgravning/boring i undergrunden og efterfølgende konstruktion, opfyldning og forsegling af depotet. I tilfælde af at det besluttes at deponere kun det mest langlivede affald i et dybt depot og deponere det øvrige affald i en lavere dybde, må andre relevante geologiske kriterier anvendes for det mindre dybe depot.

I nærværende projekts næste fase (fase 2) med detaljerede geologiske undersøgelser i to områder vil der blive indsamlet data, der giver viden om de geologiske og geokemiske forhold i værtsbjergarten, i barrierebjergarterne og i grundvandet. Disse data vil blive anvendt til en vurdering af barriereegenskaberne og til undersøgelse af den geokemiske vekselvirkning mellem de radioaktive nuklider og værtsbjergartens hydrogeokemi. Denne viden kan anvendes til at udvikle og sikre et optimalt design af de konstruerede barrierer, så de kan tilbageholde radioaktive nuklider tilstrækkeligt længe.

Et specifikt designkoncept for et dybt geologisk slutdepot er ikke besluttet af DD, men en række konceptuelle design er identificeret (Dansk Dekommissionering, 2021). De identificerede koncepter spænder fra et dybt, vertikalt borehul til deponering af en mindre del af affaldet (det særlige affald) kombineret med et depot på lavere dybde til det øvrige affald, til en underjordisk konstruktion med et depot i 500 meters dybde, der kan indeholde alt det radioaktive affald. De geologiske kriterier er defineret ud fra antagelsen om, at alt det radioaktive affald skal deponeres samlet i et dybt depot for at sikre, at de geologiske egenskaber og forhold på lokaliteterne, der skal undersøges i fase 2, er egnede for alle koncepter.

Før en evt. endelig beslutning om dyb slutdeponering af det radioaktive affald træffes, skal en samlet sikkerhedsvurdering foretages for at undersøge, om de konstruerede og geologiske barrierer tilsammen kan forventes at levere den nødvendige sikkerhed og tilbageholdelse af radioaktivt materiale (IAEA, 2011).

1.4 Det geologisk slutdepotprojekt

Forud for det igangværende projekt blev en foreløbig screening af den danske undergrund udført med henblik på at undersøge om lavpermeable (stort set tætte) bjergarter findes i 500 meters dybde i den danske undergrund. Denne screening viste, at i 500 meters dybde findes der lagserier fra Jura og Kridt perioderne, der indeholder lavpermeable formationer af lersten og kalksten samt prækambrisk grundfjeld bestående af granit og gnejs. Alle disse bjergarter kan potentielt set fungere som en værtsbjergart for et slutdepot (Gravesen, 2016). Baseret på denne kortlægning blev undersøgelserne i nærværende projekts første fase igangsat.

I projektets første fase er de geologiske krav og kriterier til undergrundens egenskaber, der er favorable for dyb geologisk deponering af det lav- til mellemradioaktive danske affald, defineret og beskrevet i Rapport nr. 1 (jf. referencer i Kapitel 8.1). Krav og kriterier er baseret på erfaringer og anbefalinger fra tilsvarende internationale projekter og udgør grundlaget for en evaluering af undergrundens egenskaber i forskellige områder. Internationale eksperter har, som nævnt, været inddraget i processen med at definere kriterierne og et koncept for evaluering af områderne (Blechschmidt et al., 2021, Appendix B). Evalueringen af områderne, som er præsenteret i denne rapport, foretages med afsæt i resultaterne af de geologiske studier, der udgør en stor del af projektets første fase og er beskrevet i Rapport nr. 2-8 (jf. referencer i Kapitel 8.1).

De geologiske studier i projektets første fase omfatter kortlægning og karakterisering af de mulige værtsbjergarters egenskaber baseret på eksisterende data i GEUS' arkiver og databaser samt konceptuel 1D numerisk modellering. Det skal i den sammenhæng bemærkes, at den tilgængelige information er ujævnt fordelt både geografisk og geologisk. De eksisterende data fra 500 meters dybde stammer hovedsageligt fra tidligere olie- og gasefterforskningsboringer og relaterede seismiske undersøgelser og i mindre omfang fra geotermiske, geotekniske og videnskabelige undersøgelser. De fleste dybe boringer i Danmark har haft som hovedformål at påvise tilstedeværelsen af sandsten og karakterisere deres reservoiregenskaber. Der eksisterer derfor kun få relevante data fra de tætte bjergarter som lersten, kalksten og granit/gnejs, der kan anvendes som værtsbjergarter, og som nærværende slutdepotprojekt har fokus på. Det nuværende billede af undergrundens geologi er derfor behæftet med varierende grad af usikkerhed og pålidelighed for de forskellige parametre.

Gennemgangen af de eksisterende data og den kriteriebaserede områdeevaluering har derfor også bidraget til at identificere områder med manglende geologiske data og informationer, hvor det er vigtigt at sikre indsamling af nye data i den næste fase af projektet.

Resultaterne af projektets første fase er præsenteret i ni rapporter, som dækker forskellige geologiske emner og aspekter omkring de geologiske egenskaber og forhold inklusiv: Krav og kriterier for de geologiske egenskaber i undergrunden, overblik over de geologiske forhold i den danske undergrund; seismisk kortlægning; geologisk karakterisering af kalksten fra Kalkgruppen, lersten fra Nedre Kridt - Jura og prækambrisk krystallinsk grundfjeld; samt naturlige processer der påvirker stabiliteten i undergrunden og terrænoverfladen (jf. referencer i Kapitel 8.1). Konceptuel numerisk 1D modellering af stoftransport i lavpermeable bjergarter er foretaget med udgangspunkt i de egenskaber, der er præsenteret i de geologiske rapporter for at undersøge hvilke parametre, der har størst indflydelse på retardationen i de forskellige bjergarter. Nærværende rapport afslutter fase 1 og præsenterer en evaluering af, i hvilken grad favorable egenskaber og forhold for dyb geologisk deponering eksisterer i forskellige områder i Danmark. Rapporten bidrager med det geologiske grundlag for udvælgelsen af de to egnede lokaliteter, hvor detaljerede geologiske undersøgelser skal foretages i projektets næste fase og bidrager herudover med viden, der kan anvendes af DD til identificering af et egnet depotkoncept.

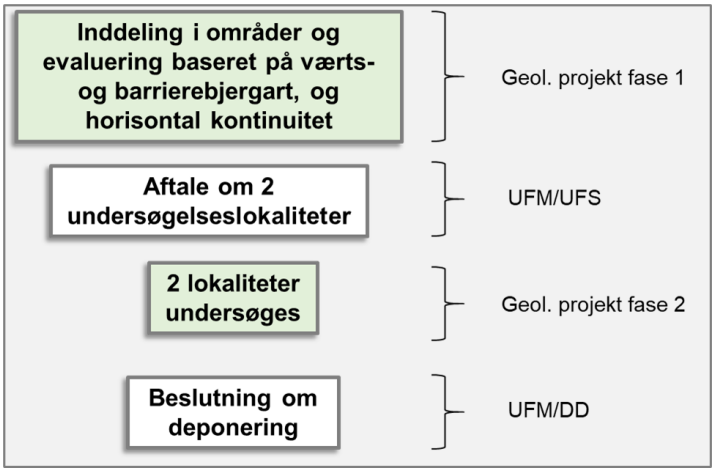
Den anden fase af det geologiske projekt omfatter detaljerede geologiske undersøgelser på to lokaliteter. Først kortlægges behovet for nye data, dernæst planlægges og udføres undersøgelserne på de to lokaliteter. Undersøgelserne vil blandt andet omfatte indsamling af seismiske profiler med geofysiske metoder og boringer til mere end 500 meters dybde. I borehullerne udtages borekerner og vandprøver, og der udføres petrofysiske målinger for efterfølgende analyser med henblik på karakterisering af forseglingsegenskaberne og geotekniske egenskaber. Disse data vil indgå bl.a. i modellering af stoftransport, bestemmelse af geokemisk retardation, seismisk kortlægning og vurdering af geoteknisk stabilitet. De geologiske og geotekniske egenskaber vil også have indflydelse på hvilket depot-design, der er teknisk muligt og sikkerhedsmæssigt forsvarligt.

De indsamlede data og analyser vil efterfølgende indgå i den sikkerhedsvurdering, der skal afklare, om det samlede depotkoncept, der omfatter de geologiske barrierer i kombination med de konstruerede barrierer, kan levere den nødvendige sikkerhed for deponering på både kort og lang sigt.

2. Geologiske krav og kriterier til en lokalitet for slutdeponering

Formålet med de geologiske undersøgelser i nærværende projekt er, som beskrevet i Folketingets beslutning B90 "*…at skabe klarhed over, om det vil være muligt at finde geologisk egnede lokaliteter for et slutdepot i større dybde (end tidligere mellemlager studier).*" (Folketinget, 2018).

Kravene til de geologiske egenskaber, der følger af B90, er, at et slutdepot skal kunne placeres i en dybde omkring 500 meter i en lavpermeabel værtsbjergart, der har en tykkelse på 100 meter eller mere og har en horisontal udstrækning over flere kilometer. Bjergarten skal være tilstrækkeligt litologisk og mineralogisk homogen, og den skal være uden betydende diskontinuiteter som f.eks. større sprækker og forkastninger. Endelig skal de generelle geologiske forhold i området være stabile på både kort og langt sigt (Folketinget 2018). Det geologiske slutdepotprojekt omfatter, som også nævnt ovenfor, to overordnede faser, som illustreret i Figur 2.1.



Figur 2.1. *Det geologiske slutdepotprojekt består af to overordnede faser. Den igangværende fase 1, som afsluttes med nærværende rapport, og den efterfølgende fase 2, hvor detaljerede geologiske undersøgelser skal foretages på to lokaliteter forud for en eventuel beslutning om dyb geologisk slutdeponering.*

2.1 Krav til værtsbjergart og de generelle geologiske forhold

På baggrund af de krav til værtsbjergarten for et dybt geologisk slutdepot, som er beskrevet i Folketingets beslutning B90 (Folketinget, 2018), er en række specifikke geologiske kriterier defineret med henblik på at kunne evaluere mulige værtsbjergarters egenskaber og den geologiske stabilitet i forskellige egne af Danmark. De geologiske kriterier er i høj grad defineret på baggrund af erfaringer og anbefalinger fra tilsvarende internationale slutdepotprojekter. Ved at anvende tilsvarende kriterier sikres det, at alle relevante geologiske egenskaber og forhold er eller bliver undersøgt og beskrevet for at levere det bedst mulige grundlag forud for en eventuel beslutning om etablering af et dybt geologisk slutdepot.

2.1 Kriterier for favorable geologiske egenskaber og forhold

De geologiske kriterier er defineret og beskrevet i detalje i Rapport nr. 1 (jf. referencer i Kapitel 8.1). De definerede kriterier (Tabel 2.1) skal sikre, at alle relevante aspekter af de geologiske egenskaber og forhold i undergrunden, der kan have indflydelse på sikkerheden af et geologisk slutdepot og effekten af de geologiske barrierer på kort og lang sigt, bliver undersøgt og vurderet. Den systematiske proces med at evaluere alle kriterierne sikrer, at geologiske egenskaber og forhold, hvor der mangler data og viden, bliver identificeret, så de nødvendige data kan blive indsamlet som en del af de detaljerede geologiske undersøgelser i fase 2.

Tabel 2.1. *Oversigt over overordnede grupper af kriterier.*

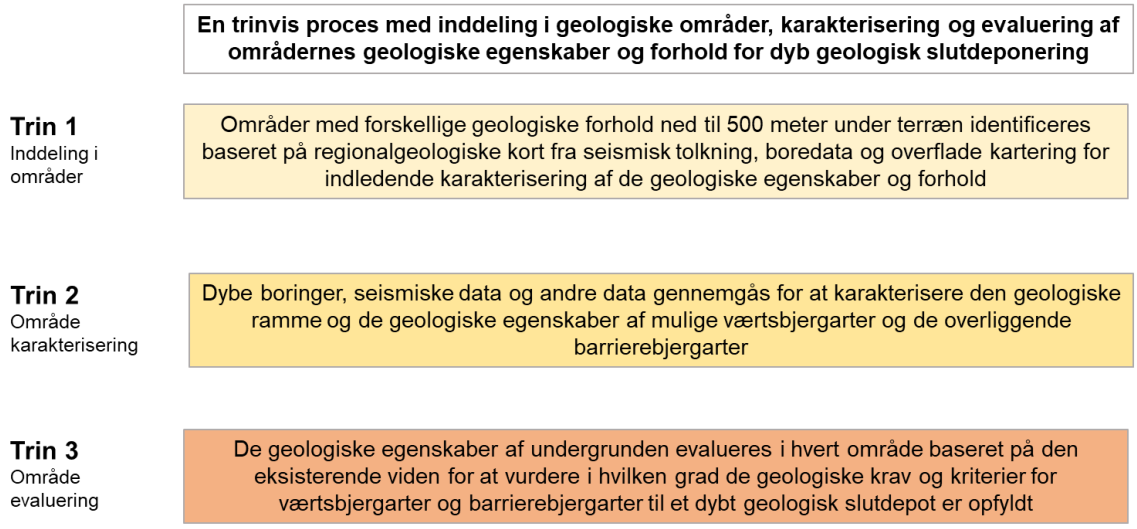
Grupper af kriterier	Kriterier
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værts- og barrierebjergarten 1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer 1.3 Geokemiske forhold for retardation 1.4 Strømningsveje
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne 2.2 Erosion 2.3 Selv-helende egenskaber overfor depotgenererede mikrofrakturer
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold 3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Mulighed for bjergartskarakterisering 4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden 4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området

Kriterierne og de relaterede favorable geologiske parametre er afhængige af både deponeringskonceptet samt affaldets karakter og volumen. En foreløbig beskrivelse af mulige depotkoncepter er præsenteret af Dansk Dekommissionering (2021). Sikker deponering i undergrunden er betinget af den samlede effekt af de geologiske og de konstruerede barrierer i depotet. Nogle af de geologiske kriterier kan være vigtigere at opfylde end andre, men på det nuværende stadie af det geologiske projekt er det ikke muligt at differentiere, da det afhænger af depotkonceptet og det endelige depotdesign. Alle kriterier og de relaterede geologiske egenskaber og forhold er defineret med henblik på at sikre effektive barrierer og stabile geologiske forhold, som på både kort og lang sigt forhindrer radioaktivt materiale i at trænge op i grundvandszonen og i biosfæren.

Det skal bemærkes, at kriterierne i høj grad er defineret på baggrund af anbefalinger fra internationale projekter om deponering af radioaktivt affald, der indeholder højradioaktivt varmeudviklende materiale, som ikke findes i det danske affald. Det betyder, at nogle af de definerede kriterier kan være af mindre vigtighed for et slutdepot til det danske affald, der ikke indeholder højradioaktivt materiale. Processen med at vurdere, i hvilket omfang kriterierne er opfyldt i forskellige områder, sikrer imidlertid en systematisk gennemgang og evaluering af alle geologiske parametre og forhold, der kan have indflydelse på sikkerheden i depotet.

2.3 Baggrund for inddeling i geologiske områder

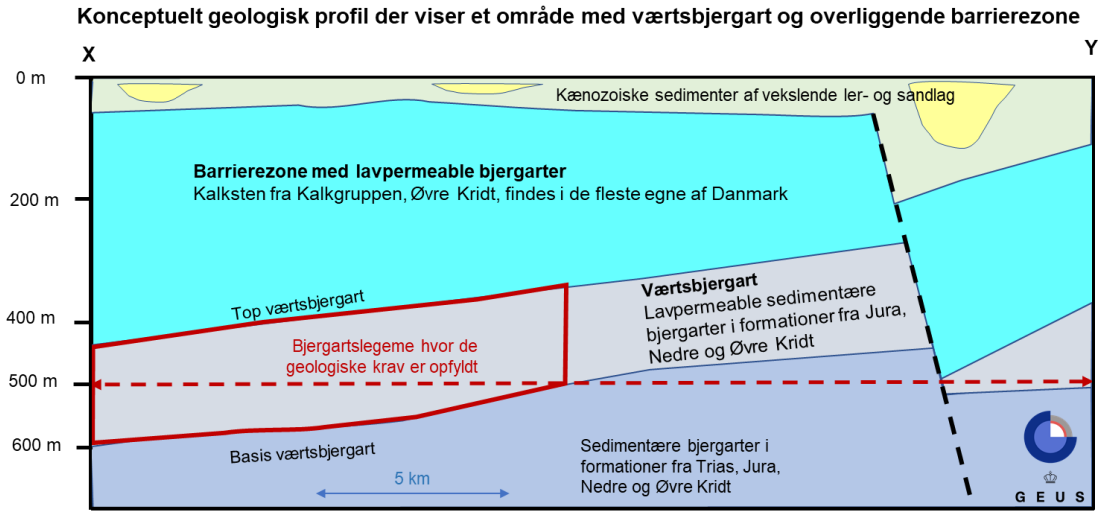
Formålet med at inddele Danmark i geologisk set forskellige områder er at kunne foretage en generel evaluering af, i hvilket omfang favorable geologiske egenskaber og forhold er til stede i hvert område. Det er ikke hensigten at identificere det bedste område og den bedste lokalitet, hvilket ikke vil være muligt på grund af de mange forskellige, ofte ukendte, parametre og deres samspil med de designede barrierer. Derimod skal evalueringen bidrage til at identificere områder, hvor favorable geologiske egenskaber kan forventes at blive påvist ved de detaljerede geologiske undersøgelser af to lokaliteter i projektets næste fase. Inddelingen i geologiske områder og evalueringen er udført i en trinvis proces, som illustreret i Figur 2.2 og beskrevet i detalje i Rapport nr. 1 (jf. referencer i Kapitel 8.1).



Figur 2.2. *Illustration af trinvis proces for inddeling i geologiske områder og evaluering.*

Inddelingen i områder med en karakteristisk geologisk opbygning bidrager også som det geologiske grundlag for at identificere et (eller flere) depotkoncepter, der er egnede til de lokale geologiske forhold.

På baggrund af den geologiske kortlægning og karakterisering af undergrunden (Rapport 2-8 jf. referencer i Kapitel 8.1), er det danske landområde blevet inddelt i 11 områder. Den præsenterede områdeinddeling er relevant udelukkende for nærværende geologiske projekt om muligt egnede lokaliteter for slutdeponering. Hvert område er karakteriseret ved en dominerende type værtsbjergart i dybder omkring 500 meter. De mulige værtsbjergarter er ler i Jura og Nedre Kridt intervallerne, kalk i Øvre Kridt (Kalkgruppen) og granit/gnejs i grundfjeld. I store områder af den danske undergrund findes kalksten i barrierezonen over værtsbjergarten, som illustreret konceptuelt i Figur 2.3. Herover findes oftest en varierende, men relativt tynd pakke af kænozoiske sedimenter. Den kænozoiske lagserie består af vekslende lag af sand og ler, der varierer i tykkelse og horisontal udbredelse, ofte over korte afstande. I nogle områder findes de kænozoiske aflejringer i hele intervallet fra terræn til dybder på 400-500 meter eller mere, og i de tilfælde er der på grund af det høje indhold af sand ikke påvist en effektiv barrierebjergart. I området med grundfjeld udgør granit/gnejs både værts- og barrierebjergarten. Udover værtsbjergarten er også den generelle strukturelle opbygning af



Figur 2.3. *Figuren illustrerer en konceptuel geologisk lagserie med værtsbjergart omkring 500 meters dybde og kalksten i den overliggende barrierezone. I profilets højre side er en forkastning, der har forsat de geologiske formationer til større dybder. En afgrænset formation, hvor krav til dybder og tykkelser for en værtsbjergart og en overliggende barriere er opfyldt, er vist med den røde linje, og dybden 500 meter er markeret med den røde stiplede linje.*

undergrunden taget i betragtning ved områdeinddelingen. I nogle områder er lagserien præget af horisontal diskontinuitet, som skyldes, at der forekommer mange forkastninger over korte afstande på grund at tektoniske forstyrrelser af lagserien, herunder tilstedeværelsen af saltdiapirer.

En geologiske lagserie, der består af en værtsbjergart i 500 meters dybde og barrierebjergarter i den overliggende barrierezone, udgør den samlede geologiske barriere for et dybt slutdepot, og den samlede barriere er i Rapport nr. 1 (jf. reference i Kapitel 8.1) refereret til som ECZ (effective containment zone) i analogi til andre projekter (SFOE 2008). I nærværende projekt antages det, at barrierezonen fortsætter opad til en dybde på ca. 140 m under terræn, som er en gennemsnitlig dybde for grundvandsinteresser, der er anvendt i den konceptuelle numeriske modellering af barriere-egenskaberne (Rapport nr. 8, jf. referencer i Kapitel 8.1). Under antagelse af, at et depot placeres i en værtsbjergart, der findes i dybdeintervallet fra 400 til 500 meter under terræn, er der således 260 meter til den gennemsnitlige basis af intervallet med grundvandsinteresser. For definitionen af barrierezonens nødvendige tykkelse er en afrundet tykkelse på omkring 250 meter anvendt, idet dybden til de kortlagte formationer i undergrunden kan være associeret med en usikkerhed på et tital af meter (Rapport nr. 6, jf. referencer i Kapitel 8.1). Den nødvendige tykkelse af barrierebjergarten på en specifik lokalitet vil være en funktion af den samlede effekt af de geologiske egenskaber og hydrogeologiske forhold, og en tykkelse på 250 meter bør betragtes som vejledende i denne indledende fase af det geologiske slutdepotprojekt.

3. De geologiske egenskaber af mulige værts- og barrierebjergarter

Mulige værtsbjergarter i den danske undergrund er, som beskrevet, overordnet set lersten, kalksten og krystallinsk grundfjeld. Lersten findes i Jura og Nedre Kridt formationer, kalksten og lerholdig kalksten findes i Øvre Kridt, og de krystallinske bjergarter granit og gnejs findes i det prækambriske grundfjeld. I Jura og Nedre Kridt formationerne findes også sandsten, der generelt har høj porøsitet og permeabilitet, der gør denne bjergart uegnet som værts- og barrierebjergart. Sandsten bidrager således ikke til de geologiske barrierer, men kan derimod fungere som strømningsveje. I den kænozoiske lagserie findes også vekslende lag af sand og ler, hvor ler-rige intervaller kun findes lokalt i dybder ned til 500 meter. Det antages derfor, at den kænozoiske lagserie generelt ikke bidrager til den samlede geologiske barriere. Tidligere undersøgelser relateret til deponering af radioaktivt affald viser, at tykke formationer af lersten lokalt findes på mindre dybder ned til ca. 100 meter under terrænoverfladen (rapporter er listet i Kapitel 8.1).

En bjergarts effektivitet som barriere afhænger af, at den har en lav permeabilitet, dvs. at den har en meget lav gennemtrængelighed for væsker. En lav permeabilitet er en forudsætning for, at stoftransport vil være styret af diffusion, som er meget langsom i forhold til, hvis stoftransporten var styret af strømning (advektion). De geologiske egenskaber, der har indflydelse på permeabiliteten, er porøsiteten, som beskriver volumen af hulrum mellem sedimentkorn, den litologiske homogenitet, mængden af ler i en given bjergart samt mængden o af lermineraler i leret. Typen af lermineraler er derudover vigtig, fordi lermineraler kan bidrage til geokemisk tilbageholdelse (retardation) af nuklider i undergrunden, og fordi særlige lermineraler kan resultere i selv-helende egenskaber (”self-healing”) af mikro-frakturer, der kan opstå i formationerne under konstruktionen af depotet eller ved naturlige geologiske processer. Udover lave permeabiliteter i værts- og barrierebjergarterne, er gradienten i et lokalområde i høj grad bestemmende for, om stoftransport igennem de geologiske formationer er styret af diffusion, dispersion (stofspredning forårsaget af bjergartens porestruktur) eller advektiv strømning.

Bjergarternes geologiske egenskaber har betydning for den tekniske gennemførlighed af både konstruktionen og opfyldningen af depotet. Hvilke specifikke egenskaber, der er favorable, vil i høj grad afhænge af det endelige koncept og design af et slutdepot. Ved en større konstruktion i undergrunden vil fravær af lag eller zoner med stor vandgennemstrømning være af stor betydning for konstruktionsarbejdet i undergrunden - både teknisk og sikkerhedsmæssigt.

Der eksisterer en meget begrænset mængde data og analyser for specifikke geologiske parametre fra dybder omkring 500 meter. En opsummering af den eksisterende viden om de geologiske egenskaber og deres indflydelse på barriere-effektiviteten er præsenteret i dette kapitel. Repræsentative data er vist under områdeevalueringerne (Kapitel 6).

I dette kapitel præsenteres en generel karakteristik og opsummering af den eksisterende viden om de tre mulige værtsbjergarters geologiske egenskaber baseret på de detaljerede beskrivelser, der er præsenteret i Rapport nr. 2, 3, 4, 5 og 8 (jf. referencer i Kapitel 8.1).

Derudover beskrives kort den kænozoiske lagserie, der i de fleste områder ligger over den effektive barrierezone med varierende tykkelser (Rapport nr. 2, jf. reference i Kapitel 8.1). Omfattende beskrivelser af de øverste 100-200 meter af lagserien findes i rapporter fra tidligere projekter om mulig deponering af det radioaktive affald i mere terrænnære geologiske formationer (jf. referencer i Kapitel 8.2) og er ikke inkluderet i nærværende projekt, der har fokus på større dybder ned til 500 meter.

På grund af de meget få data om de geologiske egenskaber i dybder ned til 500 meter, er barriereeffektiviteten af lersten og kalksten undersøgt indledningsvis ved konceptuel 1D modellering af stoftransport (Rapport nr. 2 jf. referencer i Kapitel 8.1). Modellerne undersøger ved stokastiske scenarier forskellige parametres indflydelse på bjergarternes barriere-egenskaber med henblik på at vurdere lersten og kalksten som værtsbjergart. Den overordnede konklusion fra disse modelstudier er, at begge bjergarter under en række forudsætninger har potentiale som værtsbjergarter. En opsummering af resultaterne præsenteres i Kapitel 3.4.

Data

Information om de potentielle værts- og barrierebjergarters geologiske egenskaber kan overordnet opnås fra to typer af data, som begge kræver, at der etableres en boring, hvor der kan udtages prøver af den pågældende bjergart. De to datatyper er henholdsvis ”hårde” data fra borekerner og geofysiske data fra borehulslogs. Borekerner er den datatype, som giver de mest detaljerede og præcise informationer om undergrundens geologiske opbygning og egenskaber (bjergarternes og den samlede lagpakkes karakteristika i borepunktet). Borehulslogs repræsenterer forskellige fysiske egenskaber registreret ved forskellige målemetoder. Litologiske variationer i en formation på en skala nær ved eller mindre end målenøjagtigheden for instrumenterne (30-100 cm) kan derfor kun identificeres fra borekerner. For at få så pålidelige og præcise data som muligt, er det således vigtigt for tolkningen af borehulslogs, at de kan kalibreres til data fra borekerner, som repræsenterer de forskellige typer af litologier og egenskaber, der findes i det loggede interval. I de tilfælde, hvor logs ikke er kalibreret til kernedata, vil der for både tolkning af litologi samt porøsitet og permeabilitet være en større eller mindre grad af usikkerhed, som er vigtig at erkende.

3.1 Ler og mineraler med gunstig effekt for barriereegenskaber

Ler er en fælles betegnelse for mineraler, der danner partikler i kornstørrelsen for ler, dvs. mindre end 2 µm. Lermineral anvendes som betegnelse for lagsilikater og andre mineraler, der giver ler dets plasticitet, og som hærder ved tørring og brænding. Lermineraler, der typisk findes i den danske undergrund i dybder ned til 500 meter omfatter kaolinit, smectit, glimmer og chlorit. Lersten anvendes som betegnelse for en bjergart, der består af kompakteret sediment, hvor størstedelen består af sedimentkorn, der er mindre end 2 µm. Lersten kan således anvendes om formationer, der overvejende består af ler, men som også har et indhold af grovere kornstørrelser som silt og sand. I nærværende rapport anvendes betegnelsen lersten om en bjergart, der indeholder store mængder (ideelt set >50%) partikler i ler-fraktionen. En bestemmelse af den præcise mængde lerpartikler i en sedimentær bjergart kræver detaljerede analyser, og der eksisterer kun spredte data fra den danske undergrund om bjergarternes lerindhold. Betegnelsen lersten er ofte baseret på et kvalificeret skøn over

bjergartens komposition og anvendes også på større skala for tykkere lerdominerede enheder, som kan indeholde tynde lag af silt og/eller sand.

Mængden af ler i en bjergart er en vigtig parameter i forhold til at vurdere en bjergarts egnethed som værtsbjergart, da en høj andel af ler giver en høj grad af kompaktion ved begravelse af sedimentet og dermed resulterer i en lav porøsitet og permeabilitet. Ved at vurdere lerindholdet i en lagserie ud fra tolkning af petrofysiske logs (typisk en gammalog) kan lagseriens vertikale homogenitet vurderes, og lerrige lag, som forventes at have relativt lille porøsitet og permeabilitet, sammenlignet med mere grovkornede lag, kan identificeres.

Homogeniteten af en lersten er en vigtig parameter, idet tilstedeværelsen af partikler i silt og sand fraktionerne, samt en eventuel lagdeling hvor de enkelte lag består af velsorterede sedimenter med en større kornstørrelse, vil påvirke permeabiliteten og resultere i store forskelle mellem horisontal og vertikal permeabilitet. Egenskaberne af lersten vil derfor være meget forskellige afhængig af hvor meget sediment med større kornstørrelser, den indeholder.

Tilstedeværelse af sandlag i en lerdomineret bjergart resulterer i inhomogenitet, for porøsitet, permeabilitet og geomekaniske egenskaber. Det kræver specifikke data fra et område at vurdere, hvilken indflydelse tilstedeværelsen af sandlag har på barriere-egenskaberne, da det vil afhænge af lagenes tykkelse og hældning, frekvensen af sandlag samt porøsiteten og permeabiliteten af hhv. sand- og lerlag.

For at kunne vurdere barriere-egenskaber af en lerstensformation er det derfor vigtigt at undersøge og karakterisere mængden af lerpartikler, indholdet af lermineraler, graden af opblanding mellem de forskellige kornstørrelser og lag af sand og silt.

Smectit repræsenterer en særlig gruppe af lermineraler, der har mulighed for at binde store mængder vand, hvilket resulterer i en kraftig udvidelse ved tilførsel af vand og en tilsvarende kraftig sammentrækning ved udtørring. Lersten med højt indhold af smectit har en høj plasticitet og høj kohæsion. Det betyder, at lersten, der indeholder smectit-mineraler, har et stort potentiale for at selv-hele lokalt dannede sprækker, der således hurtigt bliver lukkede. Derudover vil sedimenter med et højt indhold af smectit kompaktere relativt mere end tilsvarende sedimenter med mindre andel af smectit i samme dybde, hvilket vil resultere i en relativt lavere permeabilitet jo højere indhold af smectit. Indholdet af smectit kan bestemmes ved geokemiske analyser af bjergartsprøver, men er kun foretaget på et lille antal prøver for de relevante bjergarter og dybder for dette slutdepotprojekt.

Når indholdet af smectit er meget højt, kan leret betegnes som plastisk. Et meget højt indhold af smectit i de geologiske formationer kan være en teknisk udfordring for boringer og konstruktioner i undergrunden, men det kan håndteres, hvis et højt indhold er kendt på forhånd.

Calcit

Calcit-krystaller (af kalciumkarbonat) har den egenskab, at de kan opløses relativt nemt ved lave pH-værdier, transporteres i opløst form og (gen)udfældes. Calcit ses derfor ofte at udfylde sprækker eller porehulrum, hvis der er meget calciumkarbonat til stede i en bjergart. Muligheden for at udfælde calcit kan derfor være et vigtigt bidrag til en bjergarts selv-helende egenskaber.

3.2 Ler og lersten i Jura og Nedre Kridt formationer

Lersten i den danske undergrund kendes hovedsaligt fra dybe boringer, hvor data er indsamlet i form af borekerner og petrofysiske borehulslogs. Formationer, der er domineret af lersten, indeholder ofte sandlag af varierende tykkelse og hyppighed, hvor tykkelsen af såvel lerlag som sandlag kan variere fra en centimeter-skala, til meter, eller tital af meter (Figur 3.1 og 3.2). En opsummering af den eksisterende viden om lersten i Jura og Kridt formationerne findes i Rapport nr. 4 (jf. reference i Kapitel 8.1).

Figur 3.1. *Et eksempel på relativt homogen lersten (Nedre Jura) blottet i en tidligere lergrav ved Gantofta i Skåne. De tynde, lyse striber skyldes forekomsten af tynde silt- og sandlag (Rapport nr. 4).*

Figur 3.2. *Foto af borekerner der viser vekslen mellem ler og lyse sandlag i Fjerritslev Formationen, Stenlille-10 boringen. Hvert kernestykke er 1 meter.*

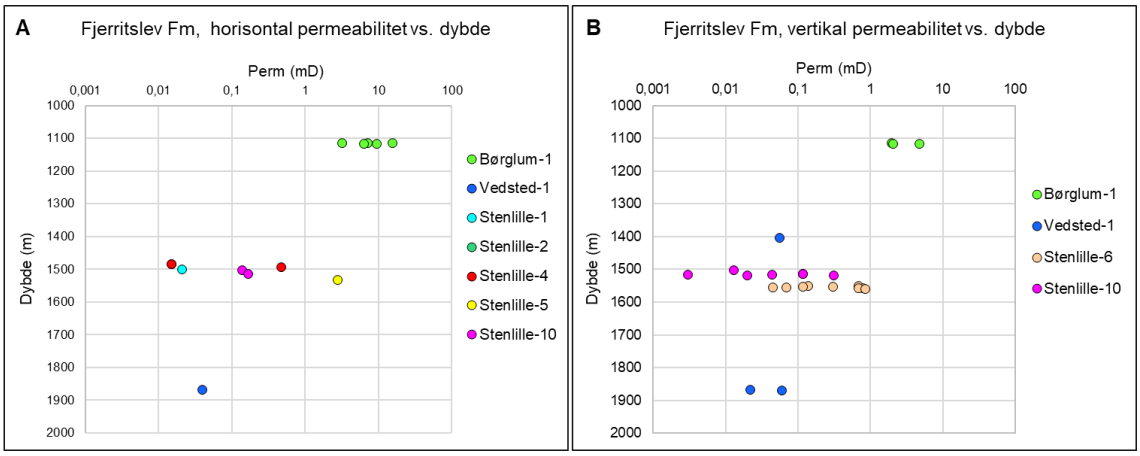
Porøsitet og permeabilitet

Fra 500 meters dybde i den danske undergrund eksisterer der ingen præcise målinger af permeabiliteten af lersten fra Jura og Kridt lagserierne. Som regel er der en korrelation mellem porøsitet og permeabilitet, hvorfor det kan være nyttigt at kende en bjergarts porøsitet. En generel korrelation mellem porøsitet og begravelsesdybden kan antages (Kristensen et al. 2016), men den er stærkt influeret af lokale forhold som sedimentsammensætning, indsynkningshastigheden, og lokale diagenetiske processer (omdannelser og cementeringer efter aflejringen). Et sediment domineret af partikler i lerstørrelse, der er aflejret for nyligt, har en porøsitet på mellem 70% og 90%. Under kompaktion falder porøsiteten hurtigt til ca. 30% i 1000 meters dybde (Tucker, 2001), og en parallel horisontal tekstur udvikles i sedimentet, hvilket resulterer i en målbar forskel mellem vertikal og horisontal permeabilitet.

En tendens til faldende permeabilitet med dybden ses også til en vis grad i intervallet 1100-1900 meter fra analyser af lersten fra Fjerritslev Formationen (Nedre Jura), dog med en stor spredning og baseret på et meget lille antal prøver (Figur 3.3, fra Olsen og Jørgensen, 2008).

Lersten og lermineraler

Der er en meget begrænset datamængde om indholdet af ler, lermineraler og andre mineraler i de jurassiske og kretassiske sedimenter, og de eksisterende analyser viser store variationer både geografisk og stratigrafisk. Overordnet set er der kun målt spor af i de jurassiske lersten, hvorimod smectit generelt forekommer i disse aflejringer. I Nedre Kridt lagserien findes generelt både smectit og calcit.



Figur 3.3. *Analyser af borekerner fra Fjerritslev Fm:* ***A****. Horisontal permeabilitet vs. dybde,* ***B.*** *Vertikal permeabilitet vs. dybde (Pedersen et al., 2021). Bemærk alle de analyserede prøver er fra dybder på 1100 meter eller mere, og er derfor ikke direkte analogier for 500 meters dybde.*

Hvis intet andet er nævnt, er lerindhold angivet i det efterfølgende baseret på volumenmæssige opgørelser. I Fjerritslev Formationen (Nedre Jura) findes smectit i mængder varierende fra 1% til mere end 40%. Variationen synes at være både stratigrafisk og geografisk, men der er ingen systematiske undersøgelser af udbredelsen af smectit i Fjerritslev Formationen. I materiale fra boringen Rødby-1 på Lolland indeholder Fjerritslev Formationen generelt 30-40% smectit. I Frederikshavn-1 og Fjerritslev-2 boringerne i Nordjylland, varierer smectitindholdet fra 1% til > 40%, hvor den øverste del af Fjerritslev Formation har et lavt indhold varierende fra 0 til 10%, og den dybere del indeholder op til 40%. Ørslev-1 boringen indeholder 1-10%, hvilket kan skyldes at Fjerritslev Formationen her er domineret af silt og har et relativt lavt indhold af ler (Rapport nr. 4, jf. reference i Kapitel 8.1).

Kaolinit udgør typisk en stor andel af lerindholdet varierende fra ca. 8% i Rødby-1 på Lolland til 20-27% i Nordjylland. Calcit er generelt ikke til stede i de jurassiske sedimenter, enkelte prøver indeholder spor af calcit (< 1%).

Der er ingen data fra lersten fra Øvre Jura formationerne, der oftest er domineret af sandsten.

I Nedre Kridt lagserien varierer både mængden af ler og smectit meget. Lersten i Fjerritslev-2 boringen i Nordjylland indeholder omkring 40% lermineraler - hovedsageligt illite, chlorit og kaolinit, mindre mængder af smectit og spor af calcit. Lersten fra Rødby-1 boringen på Lolland indeholder 30-40% lermineraler, hvoraf kaolinit udgør størstedelen og illite, glimmer og chlorit findes med nogle få procent. Smectit varierer fra 1% til 25%, med det laveste indhold i Sæby-1 boringen i Nordjylland og det højeste målt i Rødby-1 boringen på Lolland.

I Nedre Kridt lersten udgør kaolinit typisk 15-20% og op til 33% af det totale volumen. Mængden af kalcit varierer mellem 1% og 14% i Rødby-1 og Sæby-1 boringerne.

3.3 Kalksten i Øvre Kridt og Palæocen (Kalkgruppen)

Kalksten bruges i nærværende tekst som samlet betegnelse for de kalk-bjergarter, der udgør Kalkgruppen inklusiv Danian kalksandskalk, mergel (lerholdig kalksten) og bryozokalk samt Øvre Kridt skrivekridt, der er domineret af en finkornet kokkolit-matrix og varierende mængder af ler (mergel). Et eksempel på lerholdig grå kalksten ses i Figur 3.4 og ren hvid kalksten fra et kalkstensbrud på Stevns ses på Figur 3.5. En opsummering af den eksisterende viden om Kalkgruppens geologi findes i Rapport nr. 3 (jf. reference i Kapitel 8.1).

I områder hvor kalksten fra Kalkgruppen findes nær terrænoverfladen og udgør grundvandsmagasiner, findes mange data om kalkens fysiske egenskaber herunder permeabilitet, porøsitet og sprækkekarakterisering m.m. En opdateret viden om hydraulisk ledningsevne og effektiv porøsitet i kalkbjergarterne i grundvandszonen (øverste 50-100 m) er givet i Kidmose et al. (2021). Derimod er der meget lidt viden om egenskaberne af kalksten i intervallet fra 100 til 600 meter under terræn. Et vigtigt datapunkt er Stevns-1 boringen, hvor et detaljeret datasæt findes baseret på kerneanalyser og borehulsmålinger. Den tætte dataindsamling i Stevns-1 boringen, der er boret ned til 460 meter, gør det muligt at korrelere mellem målte fysiske parametre og geologiske parametre så som stratigrafi, lerindhold og lermineralindhold - og til seismiske data og geofysiske parametre (Nielsen et al., 2011).

Figur 3.4. *Vekslende lag af lys grå renere kalksten og mørke lag af lerholdig kalksten (mergel) fra Rørdal Led, blotlagt i Rørdal bruddet, Aalborg (foto: Erik Thomsen). Blotningen er 16-18 meter høj. Foto: Erik Thomsen*

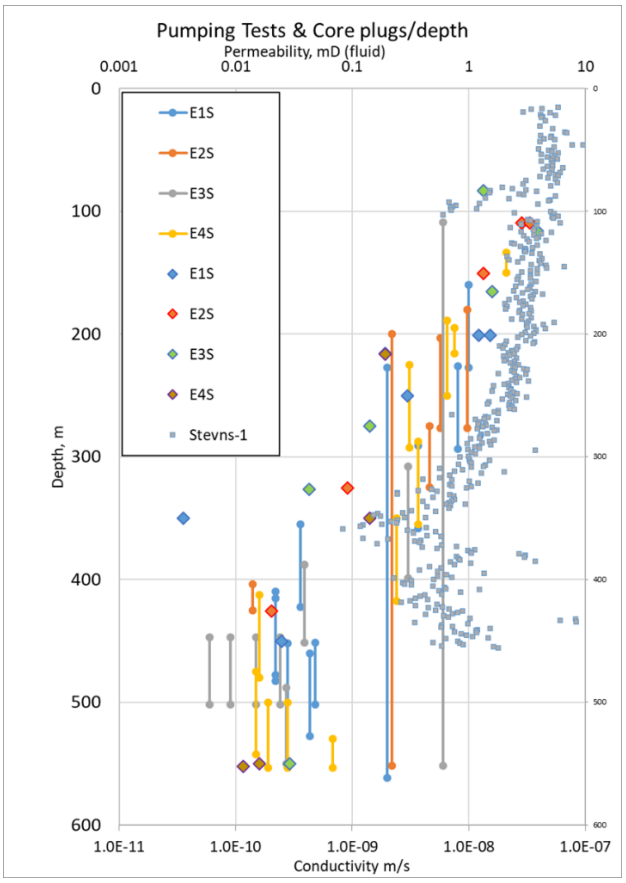
Figur 3.5. *Ren hvid kalksten fra Sigerslev Formationen blotlagt i Sigerslev bruddet på Stevns. Blotningen er ca. 20 meter høj. Foto: Peter R. Jakobsen.*

Porøsitet og permeabilitet

De hydrauliske egenskaber af kalksten er afhængige af bjergartens matrix egenskaber, og hvorvidt åbne sprækker forekommer. Indvinding af grundvand fra kalksten er betinget af tilstedeværelsen af åbne sprækker, som generelt er begrænset til de øverste 50 meter af kalken, og kalken bliver generelt hårdere og tættere, jo dybere den er begravet.

Et plot af permeabilitet som funktion af porøsitet for kalksten i Stevns-1 og i Erslev-boringerne viser, at der er en sammenhæng mellem høj porøsitet og høj permeabilitet. Generelt faldende værdier for permeabiliteten og porøsiteten med stigende dybder er observeret i plottet på Figur 3.6. Hvor porøsiteten af kalken kan bestemmes ud fra petrofysiske logs kan permeabiliteten bestemmes med en vis nøjagtighed ud fra en generel sammenhæng som vist i Figur 3.8 (por-perm plot). Målinger fra Erslev-boringerne viser lavere permeabiliteter end i Stevns-1 boringen for samme dybde, hvilket kan skyldes, at målingerne er foretaget i et andet stratigrafisk interval og/eller, at diagenetiske processer er forskellige i de to områder.

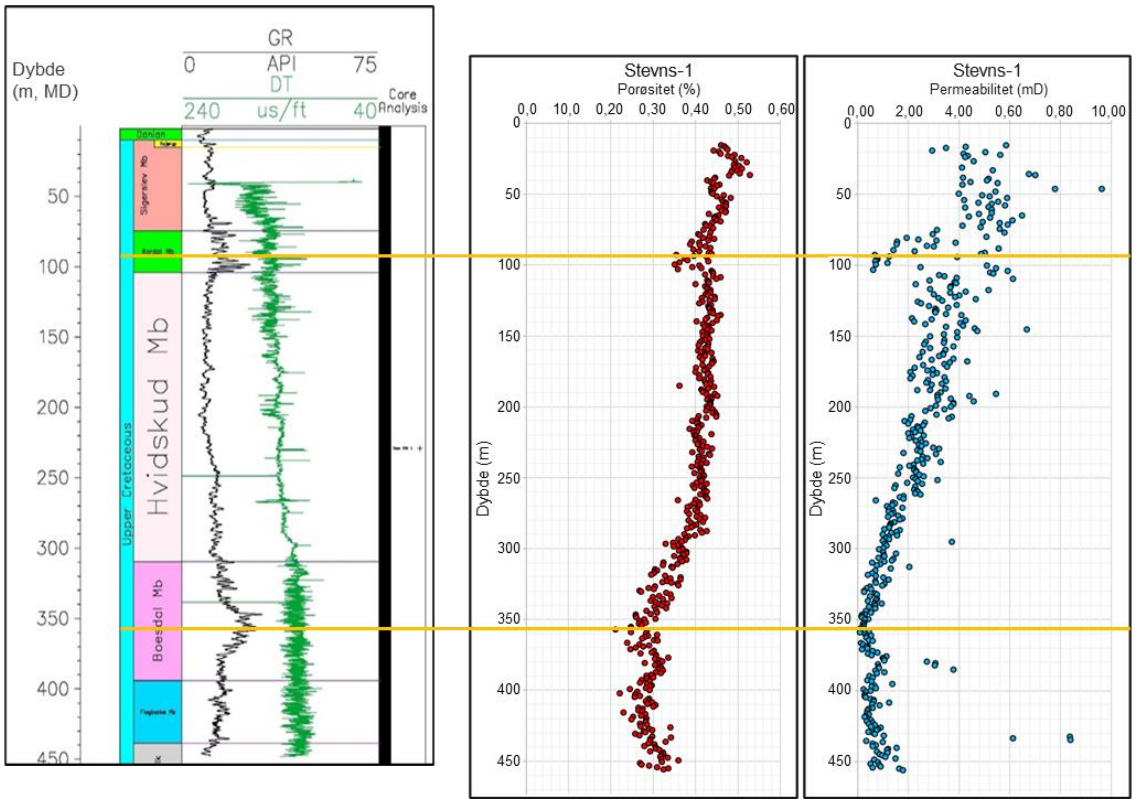
Danien kalksten, der udgør den yngste (øverste) stratigrafiske enhed af Kalkgruppen, har generelt betydeligt højere porøsitet og permeabilitet end de dybere lag (Figur 3.7). Dette skyldes, udover den mindre dybde, at kalken hovedsageligt består af bryozokalk, der har en grovere kornstørrelse end de underliggende (ældre) formationer. Der er således flere parametre, der har betydning for permeabiliteten.



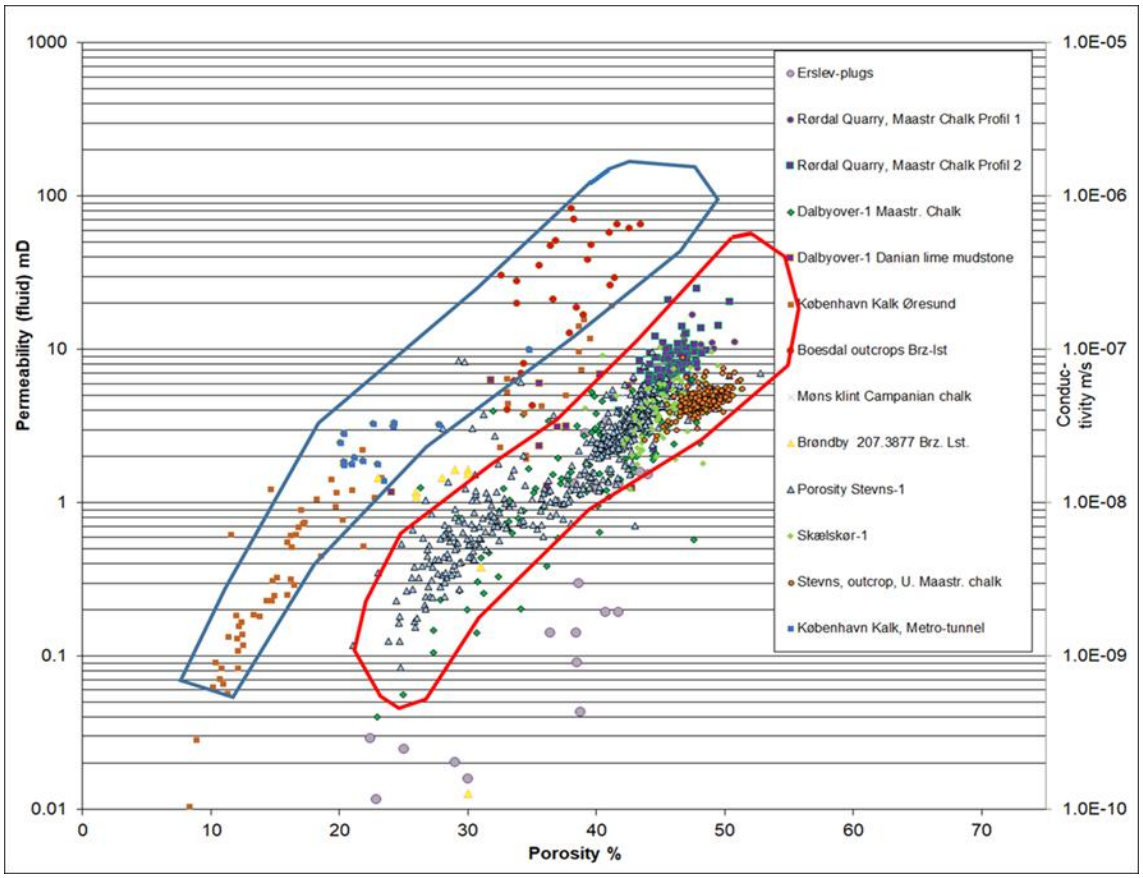
Figur 3.6. *Sammenligning af målte matrix permeabiliteter fra kerne materiale fra Erslev boringerne, interval permeabiliteter tolket fra pumpetests og kerneanalyser fra Stevns-1 boringen. Gas permeabiliteter målt på kerneprøver er omregnet til væskepermeabilitet. En permeabilitet på 1 mD svarer til en hydraulisk konduktivitet 1*10^{-8} m/s. (Rapport nr. 3).*

I boringer, hvor borekerner ikke eksisterer til nøjagtig bestemmelse af porøsitet og permeabilitet, kan man lave en kvalitativ vurdering af kalkstens permeabilitet og retardationsevne baseret på viden om mængden af ler i kalken. Lerindholdet kan vurderes fra gamma-logs og eventuelle andre logs sammenholdt med beskrivelser af cuttings (små bjergartsfragmenter fra boreprocerssen) fra boringer. Således kan det antages, at intervaller i Kalkgruppen, hvor gammaloggen viser høje værdier, vil indeholde ler og dermed have en relativt lav porøsitet og permeabilitet, som det ses på Figur 3.7. Boreprøver, der er beskrevet som mergel på grund af en grå farve, forventes ligeledes at have et relativt højt indhold af lermineraler. En grå farve ses ofte beskrevet fra intervaller, hvor gammaloggen viser højere værdier på grund af indholdet af ler.

Der findes kun få data, hvor indholdet af ler og lermineraler er målt i kalken. Data viser, at der generelt er op til 2% smectit og 0,05-5% lermineraler i de hvide og renere intervaller i kalken. De mere grå og mere lerede intervaller indeholder 3-15% lermineraler og totalt 2-8% smectit. Indholdet af smectit udgør typisk 50% eller mere af det totale lerindhold. Det kan derfor generelt forventes, at grå, lerede intervaller i kalken indeholder mellem 2-8% smectit. De lerrige intervaller i kalken kan identificeres fra gamma-log af god kvalitet og stor opløselighed og ved rapportering om grå kalksten i cuttings fra borehuller.



Figur 3.7. *Figuren viser to petrofysiske logs fra Stevns-1 boringen (en sammenstilling mellem gammastråleintensiteten, GR, og 1/lydhastigheden, DT) (Kristensen et al. 2017), der indikerer stigende lerindhold i de to intervaller, der er markeret med en gul streg. Det stigende lerindhold er sammenfaldende med intervaller med lavere porøsitet og permeabilitet, som er målt på kernestykker fra Stevns-1 boringen (Mortensen et al., 1998). Denne sammenhæng kan generelt forventes, idet lermineraler kompakterer mere end calcitkorn, og derfor ses lerrige intervaller at have lavere porøsitet og permeabilitet end mere rene kalksten. Samtidig ses, at det højere lerindhold findes i to specifikke stratigrafiske enheder, Boesdal Led og Rørdal Led, der også i andre boringer og i lokale kalkstensbrud ses at indeholder ler (se også Rapport nr. 3).*



Figur 3.8. *Figuren viser relationen mellem porøsitet og permeabilitet for forskellige dele af Kalkgruppen. Data, der plotter indenfor den blå polygon, er fra Danien kalksten/bryozokalk, og den røde polygon viser data fra de generelt mere finkornede bjergarter fra Kridt (Rapport nr. 3). På den højre y-akse er permeabiliteten omregnet til en typisk hydraulisk ledningsevne.*

3.4 Barriereeffektivitet af lersten og kalksten

Barriere-effektiviteten for lersten og kalksten er undersøgt indledningsvist ved konceptuelle 1D numeriske modelleringsstudier af stoftransport. De geologiske modeller, der er anvendt til dette formål, er baseret på gennemsnitlige forhold for den geologiske lagserie, der typisk findes i den danske undergrund. Modelleringerne er lavet for to forskellige overordnede scenarier, hvor hhv. kalksten og lersten udgør værtsbjergarten i dybdeintervallet 400 til 500 meter. I begge scenarier udgør kalksten den overliggende barrierebjergart i intervallet 400 til 140 meter. De øverste 140 meter repræsenterer intervallet, hvor grundvandsmagasiner forekommer i kalksten og kænozoisk sand, og hvor der også findes lerlag med lavere permeabilitet.

Den konceptuelle numeriske modellering af kalksten og lersten som værtsbjergart er udført med stokastisk varierede hydrauliske ledningsevner i de enkelte geologiske lag i scenarier med forskellige transportparameterværdier og randbetingelser. Modelleringen er konservativ, hvilket betyder at resultaterne afspejler simulerede transporttider for et nuklid under antagelse af de mindst favorable forhold for retardation. Eksempelvis er nuklidtransporten simuleret uden at inkludere sorption, som ville forårsage større tilbageholdelse og dermed længere transporttider. Ligeledes er densitetseffekter også udeladt, hvilket også vil forsinke

eventuel transport af nuklider yderligere. Endelig er de vertikale gradienter et udtryk for opadgående strømning fra 500 meters dybde som en antagelse, der ikke gælder for alle områder.

Modelleringen med kalksten som værtsbjergart viste, at den gennemsnitlige maksimale koncentration når grundvandsmagasinet inden for 33.000 til 530.000 år i de forskellige scenarier. Med lersten, som værtsbjergart, når den gennemsnitlige maksimale koncentration ikke grundvandsmagasinet inden for 1 million år. Modelleringen af både kalksten og lersten, som værtsbjergart viser, at det bl.a. er afgørende at bestemme de hydrauliske gradienter, de hydrauliske ledningsevner, og diffusionskoefficienter for at simulere repræsentative transporttider for nuklider. Modelleringen i nærværende fase er konceptuel og ikke stedsspecifik og viser, at både kalksten og lersten kan være anvendelige som potentielle værtsbjergarter. Samtidig viser modelleringsresultaterne vigtigheden i at bestemme stofspecifikke egenskaber relateret til bl.a. opløselighed af et givent nuklid.

3.5 Krystallinsk grundfjeld (Prækambrium)

Forskellige typer af granit og gnejs er identificeret i det bornholmske grundfjeld baseret på mineralsammensætning, kornstørrelse og strukturer. De dominerende bjergarters mineralogi og udbredelse er beskrevet i Rapport nr. 5 (jf. reference i Kapitel 8.1). Alle de krystallinske bjergarter blev dannet over en relativt kort periode fra 1460 til 1450 millioner år siden ved afkøling af indtrængende magma i flere faser. Grænserne mellem de forskellige bjergartstyper varierer fra skarp til gradvis, lokalt med intrusioner af den tilgrænsende bjergart. Da alle bjergarterne er dannet ved intrusion af flydende magma, både vertikalt og horisontalt, må det forventes, at fordelingen af de forskellige typer granit/gnejs i undergrunden vil være anderledes end i terrænoverfladen.

En opsummering af de dominerende mineraler, der generelt findes med et volumen på mere end 1 % af bjergarten, ses i Tabel 3.1. Derudover findes magnetit, titanit og apatit som typisk udgør 1% eller mindre, lokalt dog op til 3%. Accessoriske (spor af) mineraler inkluderer hypersthen, diopsid, fluorit, muscovit, zircon, epidot, chlorit, allanit, gadolit, titanit.

Ved forvitring i terrænoverfladen og i sprækker dannes typisk jernoxider, manganoxider, kaolinit, serecit og grønligt ler med chlorit. I båndede bjergarter forvitrer de mørke mineraler hurtigere end de lyse, hvorfor bjergarten i overfladen kan få et ”skifret” udtryk.

Tabel 3.1. *Oversigt over de mineraler der udgør størstedelen af bjergarterne (1 % eller mere). Herudover findes accessoriske mineraler, som typisk udgør mindre end 1 % men lokalt kan udgøre 1-3 % af bjergarten. Hvor et interval er angivet, er det fordi bjergarten er båndet eller migmatitisk og de forskellige dele har forskellig sammensætning (sammenstillet baseret på Rapport nr. 5 og referencer heri (Rapport nr. 5, jf. referencer i Kapitel 8)).*

	kvarts	plagioklas	K-feldspar /perthite	biotit	hornblende	Korn-størrelse	Intrusiver
Bornholm gnejs	29-72	12-31	11-38	1-8	1-0	Fin – grov, folieret – båndet	Diabas op til 60 m bred, applit, pegmatit
Rønne granit	21	30	29	5	10	Mellem	Pegmatiter og diabas
Paradisbakke migmatit	23-60	25-40	35-60	7	8	Fin – mellem, folieret	Pegmatit og aplit, sandfyldte sprækker
Vang granit	27	22	33	6	5	Mellem - grov	Pegmatit, aplit, dikes,
Svaneke granit	25	26	36	7	2	Grov	Pegmatit, aplit, dikes, kambrisk sandsten i sprækker
Hammer granit	33	18	41	4	1	Fin - mellem	Pegmatit og aplit
Almindingen granit	33	18	41	4	1	Mellem - grov	Diabaser

Bjergartsegenskaber

Matrix porøsitet i krystallinske bjergarter er normalt mindre end 1 % og er relateret til åbne inter- og intragranulare mikrofrakturer. Frakturer opstår ved deformation af bjergarten f.eks. sammentrækning ved afkøling, tektonisk stress og ved trykaflastning under opløft og erosion. Afhængig af den geologiske udvikling kan disse frakturer blive udfyldt og "selv-helet" af mineraler udfældet fra gennemsivende vand. I en homogen uforvitret krystallinsk bjergart (Figur 3.10) vil matrix-permeabiliteten således normalt være ekstremt lille og fordre stoftransport domineret af diffusion. Hvis bjergarten er gennemsat af sprækker og/eller forkastninger, kan det resultere i en betydelig sprække-permeabilitet og strømning i disse sprækker.

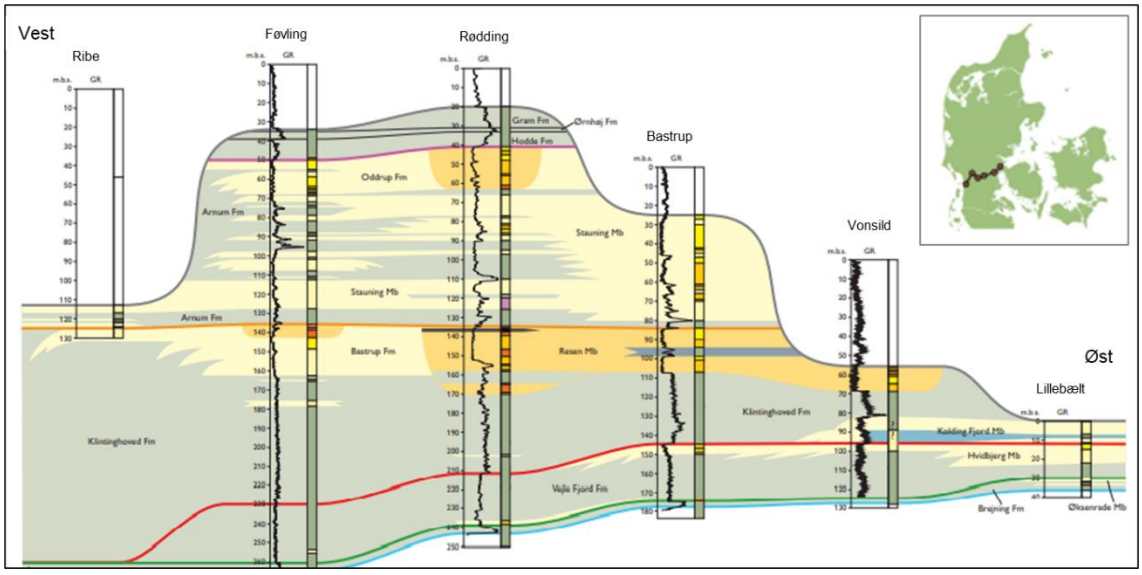
Figur 3.10. *Uforvitret Paradisbakke migmatit, Paradisbakkerne, Bornholm. Foto: Peter Gravesen.*

Det ses fra naturlige blotninger og stenbrud, at de øverste 50-100 meter af grundfjeldet på Bornholm ofte er gennemsat af horisontale og vertikale sprækker, men der er ingen data fra større dybder. Både sprækker og forkastninger er orienteret forskelligt fra strukturer og lagdeling i gnejs og grænser mellem forskellige bjergartstyper, og strukturerne i de krystallinske bjergarter har derfor ikke været styrende for forekomsten eller orienteringen af sprækker. Sprækkerne menes at være af både tektonisk og glacial oprindelse (Rapport nr. 5, jf. reference i Kapitel 8.1). Forekomsten af dykes og doleritgange er associeret til ekstensionelle forkastninger og sprækker, hvor bjergarten har været udsat for strækning.

Der er ikke foretaget numerisk modellering af stoftransport i granit/gnejs i denne fase af projektet, hovedsageligt fordi der eksisterer en del viden fra studier af det svenske grundfjeldsområde, der på mange måder er sammenligneligt med det bornholmske grundfjeld. På baggrund af denne viden er det i Sverige besluttet at etablere et dybt geologisk slutdepot i prækambrisk grundfjeld, ligesom det også er besluttet i Finland at deponere radioaktivt affald i et dybt depot i grundfjeld (SKB, 2021; Posiva, 2021).

3.6 Kænozoiske ler- og sandaflejringer – (ikke barrierebjergarter)

Kænozoiske sedimenter på dybder ned til 500 meter findes hovedsageligt i Midt- og Vestjylland. Sedimenterne består i denne dybde af vekslende lag af marint ler, deltaisk sand og lokale fluviale sandaflejringer (Figur 3.11), der kan være flere hundrede meter tykke (Rapport nr. 2, jf. referencer i Kapitel 8.1).



Figur 3.11. *Stratigrafisk logkorrelationen der viser, at mængden af sand og ler varierer betydeligt både horisontalt (fra vest til øst igennem det sydlige Jylland) og vertikalt i den miocæne lagserie (Rasmussen et al., 2010). De gule og orange farver viser udbredelsen af sand og grus, de grå farver viser udbredelsen af ler.*

Lerrige, lateralt udbredte marine sedimenter med tykkelser, der lokalt kan være flere hundrede meter, kan findes i paleocene og eocæne formationer. Lokalt kan lerformationerne være plastiske. Oligocæne, glaukonitholdige og glimmerrige ler- og siltaflejringer kendes fra den østlige og centrale del af Danmark med tykkelser op til 170 meter. Disse formationer overlejres af mere sandede sedimenter, der er aflejret i et stort deltasystem, der strækker sig fra den vestlige del af Danmark og ud i Nordsøområdet. I det centrale Jylland indeholder den kænozoiske lagserie tykke aflejringer af fluvialt sand fra Miocæn tid, mens lagserien i de mere vestlige områder er domineret af marint ler, silt og finkornet sand.

Kvartære sedimenter

Pleistocene glaciale og interglaciale aflejringer varierer i tykkelse fra 0 meter lokalt til en maksimal tykkelse på 350-400 meter i det nordligste Jylland, de sydligste dele af Fyn og i det sydvestlige Jylland. De glaciale aflejringer indeholder vekslende lag af lerede- og sandede tills (moræneler og -sand) med store sten og klippeblokke og smeltevandsaflejringer af grus, sand, silt og ler. Litologierne varierer meget både i vertikale sektioner og horisontalt over korte afstande på grund af de mange forskellige glaciale processer, der over tid har vekslet mellem erosion af undergrunden, aflejring af sedimenter og deformation.

Af særlig interesse er de såkaldte begravede dale, der er glacialt erodere dale, som er blevet fyldt med forskellige typer af sedimenter ofte fra flere forskellige tidsperioder. Mange af dalene er fyldt med sand, og de er i nogle områder af Danmark kortlagt i stor detalje som led i grundvandskortlægningen, da sandet kan udgøre vigtige grundvandsreservoirer, der kan udnyttes til grundvandsindvinding. Nogle dale ses at være eroderet flere hundrede meter under terræn (Rapport nr. 7, jf. reference i Kapitel 8.1).

I forbindelse med evaluering af risikoen for dyb erosion af de geologiske barrierer over et geologisk slutdepot er det relevant at undersøge muligheden for fremtidig, dyb glacial erosion i de enkelte områder. Dalene er ofte et resultat af gentagne episoder med erosion og aflejring, hvilket ses ved, at dalene indeholder varierende typer af sedimenter med forskellig alder. Dette viser, at glacial erosion fortrinsvis sker i områder, hvor der tidligere har eksisteret nedskårne dale. Det kan skyldes, at dalfyldet er relativt nemmere at erodere i end det omkringliggende materiale og/eller at mindre topografiske lavninger findes i terrænet over begravede dale og derved udgør foretrukne veje for overfladestrømning (Rapport nr. 7, jf. reference i Kapitel 8).

4. Inddeling i geologiske områder

Det danske landområde er på baggrund af den geologiske og strukturelle opbygning af intervallet 0 til 500 meters dybde blevet inddelt i 11 områder, hvor hvert område har en relativt ensartet geologisk opbygning. Baggrunden for inddelingen er dels forekomsten af et stratigrafisk interval, der indeholder mindst en mulig værtsbjergart, hvor Jura og Nedre Kridt kan indeholde lersten og Øvre kridt består af kalksten (Kapitel 3), samt hvorvidt kalksten er til stede i den overliggende barrierezone. Derudover har den strukturelle kompleksitet i området stor betydning for den horisontale kontinuitet af en homogen værtsbjergart og barrierebjergart over større afstande. For en illustration af konceptet med værtsbjergart, barrierebjergart og barrierezone henvises til Figur 2.3 (og Figur 5.1 i Kapitel 5). Krystallinske bjergarter findes i grundfjeldet på Bornholm, hvor de udgør både værtsbjergarten og barrierebjergarten, da toppen af grundfjeldet findes nær, eller i terrænoverfladen.

For at give et overblik over udbredelsen af geologiske formationer og de regionale forskelle, præsenteres i det følgende dybde- og tykkelseskort for de vigtigste stratigrafiske enheders udbredelse i hele det danske landområde. Kortene præsenteres sammen med en forklaring på hvordan informationerne skal læses. I Kapitel 6 præsenteres de samme temakort for hvert af de i dette kapitel definerede områder men i en større detalje, for at tydeliggøre de enkelte områders karakteristiske forhold og lokale variationer. Kortene udgør en del af datagrundlaget for evalueringen af, i hvilken grad de definerede kriterier er favorable i de enkelte områder. Herudover kan de detaljerede kort anvendes når specifikke lokaliteter for de detaljerede geologiske undersøgelser skal afgrænses.

Den geologiske lagserie og undergrundens strukturelle opbygning er illustreret ved en række geologiske profiler, for at give et indblik i undergrundens geologiske opbygning i forskellige områder af Danmark.

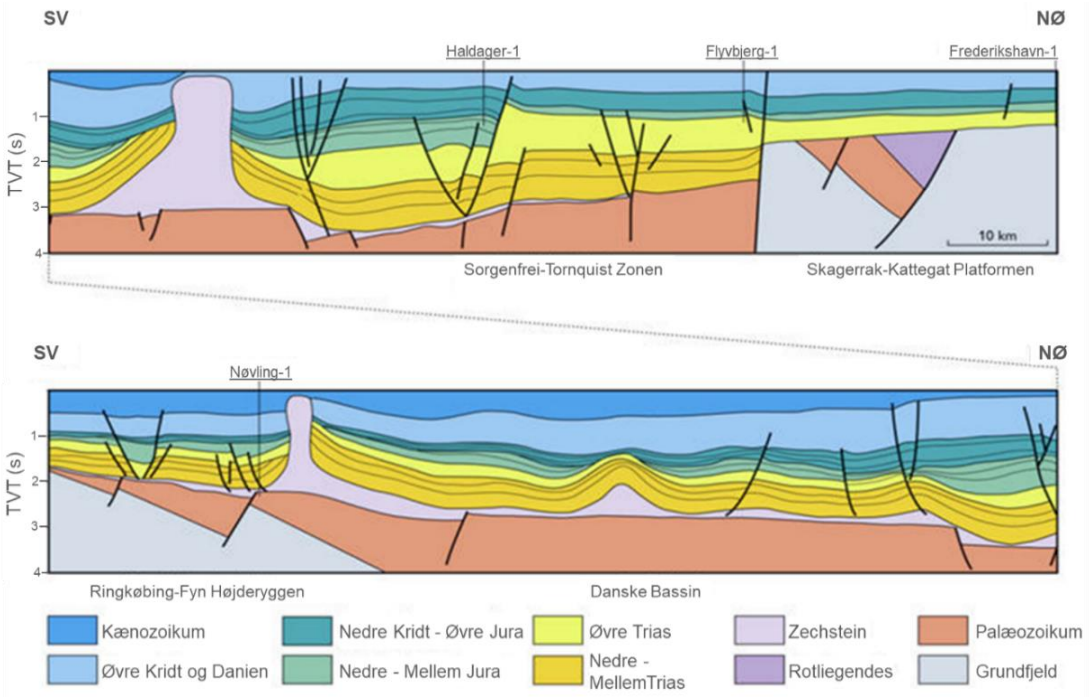
Områdeinddelingen i de 11 områder præsenteres sidst i kapitlet sammen med en kort geologisk karakteristik af de enkelte områder og med referencer til geologiske kort og profiler, der illustrerer de geologiske forhold i området.

4.1 Udbredelsen af geologiske formationer i undergrunden

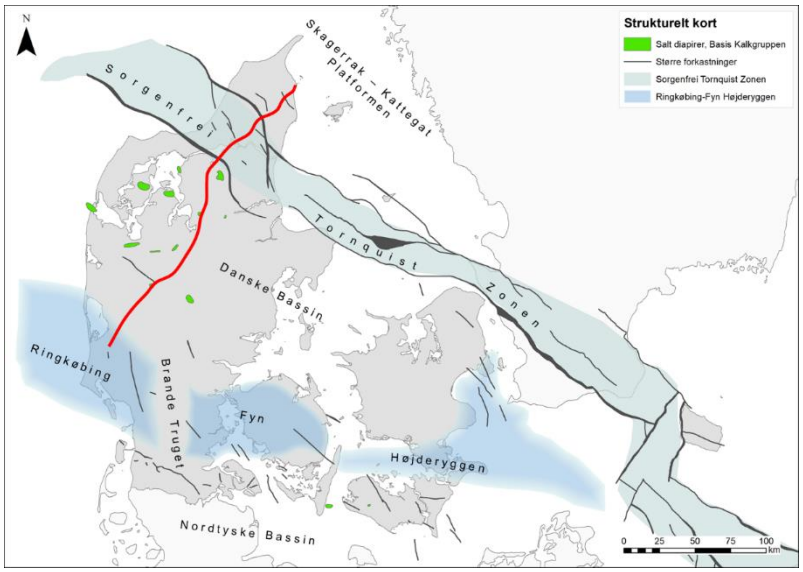
Det regionalgeologiske profil i Figur 4.1 illustrerer den geologiske lagserie, der typisk findes i den danske undergrund og de stratigrafiske enheders regionale variationer af tykkelser og dybder i relation til de strukturelle elementer (Figur 4.2). Det ses, at formationerne fra Jura og Kridt er udbredt langs hele profilets længde, med de største mægtigheder i det Danske Bassin, hvor de også findes på den største dybde. Øvre Jura intervallet er i mange områder så tyndt, at det ikke kan kortlægges seismisk. Kort og profiler viser derfor den samlede mægtighed af Nedre Kridt og Øvre Jura. Kænozoiske sedimenter findes i den sydlige del af profilet med store mægtigheder i det Danske Bassin og på Ringkøbing-Fyn Højderyggen, mens lagserien er stort set manglende på Skagerrak-Kattegat platformen i den nordlige del af profilet.

De stratigrafiske intervaller og strukturer i undergrunden er kortlagt baseret på seismiske data og dybe boringer (Rapport nr. 6, jf. reference i Kapitel 8.1). Herudover er tusinder af

terrænnære grundvandsboringer anvendt til kortlægning af de øverste 0 til ca. 100 meter af lagserien (Rapport nr. 2 og 7, jf. reference i Kapitel 8.1).



Figur 4.1. *Regionalgeologisk profil der strækker sig fra Frederikshavn-1 boringen, Nordjylland (NE) til Nøvling-1 boringen, Midt Jylland (SW). Profilet viser de øverste ca. 8 kilometer af lagserien og krydser Skagerrak-Kattegat Platformen, Sorgenfrei-Tornquist Zonen, det Danske Basin og Ringkøbing-Fyn Højderyggen (Fra Nielsen, 2003). (X-aksen angiver "To-Vejs-Tid" – den tid det tager lyden at nå ned til en reflektor og tilbage til overfladen).*



Figur 4.2*. Kortet viser de overordnede strukturelle elementer, der har været styrende for fordelingen og tykkelserne af de sedimentære bjergarter i undergrunden. Med rød er markeret placeringen af det regionalgeologiske profil på Figur 4.1.*

4.2 Introduktion til geologiske kort

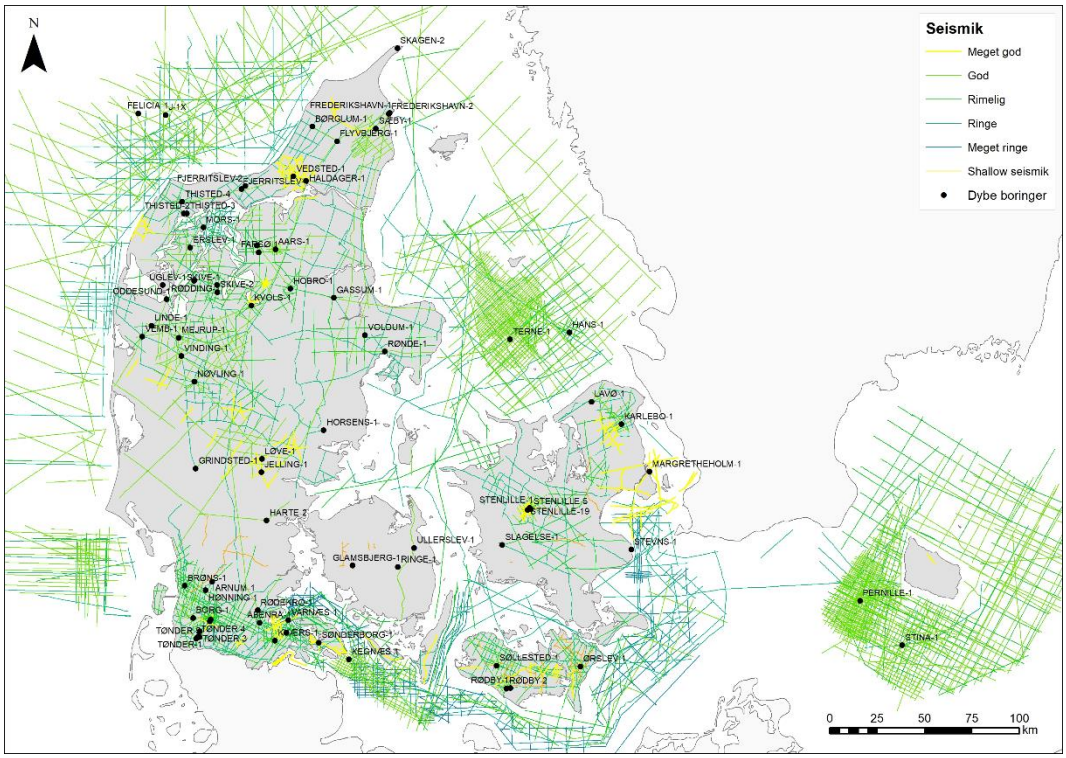
De geologiske kort er baseret på tolkning af de seismiske data og boredata, som er præsenteret i detalje i Rapport nr. 6 (jf. referencer i Kapitel 8.1). Kortet på Figur 4.3 viser, at der er stor forskel på både datatætheden i de forskellige dele af Danmark, og kvaliteten, som er vist med forskellige farver. De dybe seismiske data er indsamlet til forskellige typer af projekter, hvor de fleste er relateret til efterforskning efter olie og gas, nogle er relateret til lagring af gas og andre er til geotermiske projektet. De mindre dybe seismiske data (shallow seismik) er indsamlet hovedsageligt til grundvandsefterforskning og geotekniske undersøgelser og er generelt af høj kvalitet. De dybe boringer er også ujævnt geografisk fordelt og med data af varierende kvalitet og detaljegrad. De fleste er boret for at teste tilstedeværelsen af sandsten med reservoirkvalitet, og har derfor meget få data om tætte lersten og kalksten.

Geologiske kort, der viser dybden til de overordnede geologiske enheder Top Kalkgruppen (Øvre Kridt), Basis Kalkgruppen (Top Nedre Kridt), Top Fjerritslev (Top Nedre Jura) og Basis Jura (Top Gassum Formationen), er givet i Figur 4.4-4.7. De kortlagte enheder svarer til dem, der er vist i den øvre del af lagserien på Figur 4.1.

Dybderne er angivet i meter under terræn, da fokus i dette projekt er de formationer og bjergarter, der forekommer i dybder ned til 500 meter under terræn. Geologiske dybdekort er som regel angivet med reference til havniveau (mean sea level, msl), så ved en eventuel sammenligning med geologiske dybdekort produceret til andre formål, vil der derfor være en forskel på dybderne, hvis ikke de har samme referenceniveau. På kortene er kystlinjerne markeret med en hvid linje, og dybderne til de forskellige geologiske enheder er vist i en zone 5 kilometer ud fra kystlinjen. Dette er dels for at få et udjævnet forløb af kystlinjerne på kortene, og dels for at illustrere at seismiske data fra de marine områder også indgår i den geologiske kortlægning og at geologien er kontinuert i undergrunden uanset de lokale topografiske forhold. Endelig skal det nævnes, at de geologiske enheder ikke er kortlagt seismisk på Bornholm, da dybe seismiske data kun findes i havområdet omkring Bornholm og ikke hen over land. Kænozoikum er den eneste stratigrafiske enhed fra Bornholm, der er vist på de geologiske kort, idet den på Bornholm er kortlagt baseret på boringer.

Alle dybdekort er vist med samme farveskala, der viser dybder fra 0 meter (terrænoverfladen) til mere end 1500 meter under terræn, så den samme farve repræsenterer det samme dybdeinterval på hvert kort. Det skal bemærkes, at for dybder over 700 meter, repræsenterer de enkelte farver dybdeintervaller på mere end 100 meter.

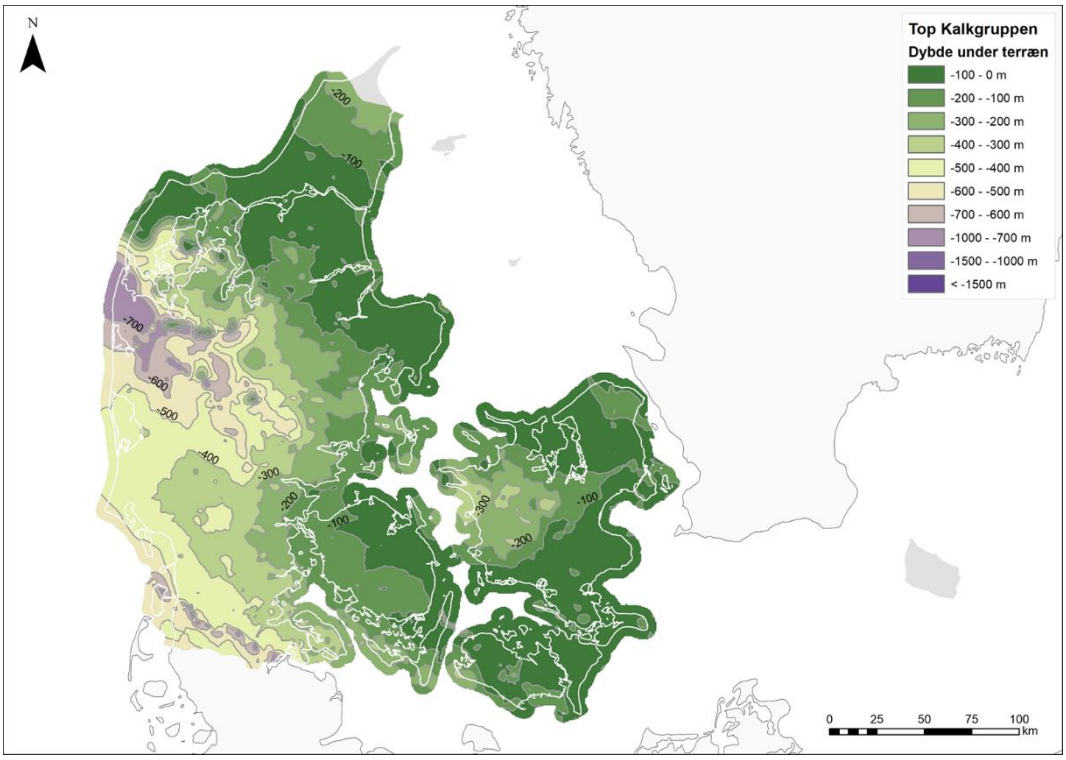
Farveskalaen for tykkelseskortene (Figur 4.9-4.12) går fra 0 meter til mere end 1500 meter og er ligeledes ens for alle tykkelseskort. De forskellige farver på farveskalaen repræsenterer forskellige tykkelser, hvor intervallet 0 til 200 meter er inddelt i 50 meters intervaller, dvs. tyndere intervaller end for resten af farveskalaen. Denne varierende inddeling er anvendt for at kunne kortlægge områder, hvor intervaller med mulige værtsbjergarter er omkring 100 meter tykke eller mere.



Figur 4.3*. Oversigt over placeringen af de seismiske data og dybe boringer, som viser, at der er store forskelle i data tætheden. Kvaliteten af de seismiske data er vist med farver. Detaljerede kort for hvert af de 11 områder findes i Kapitel 6.*

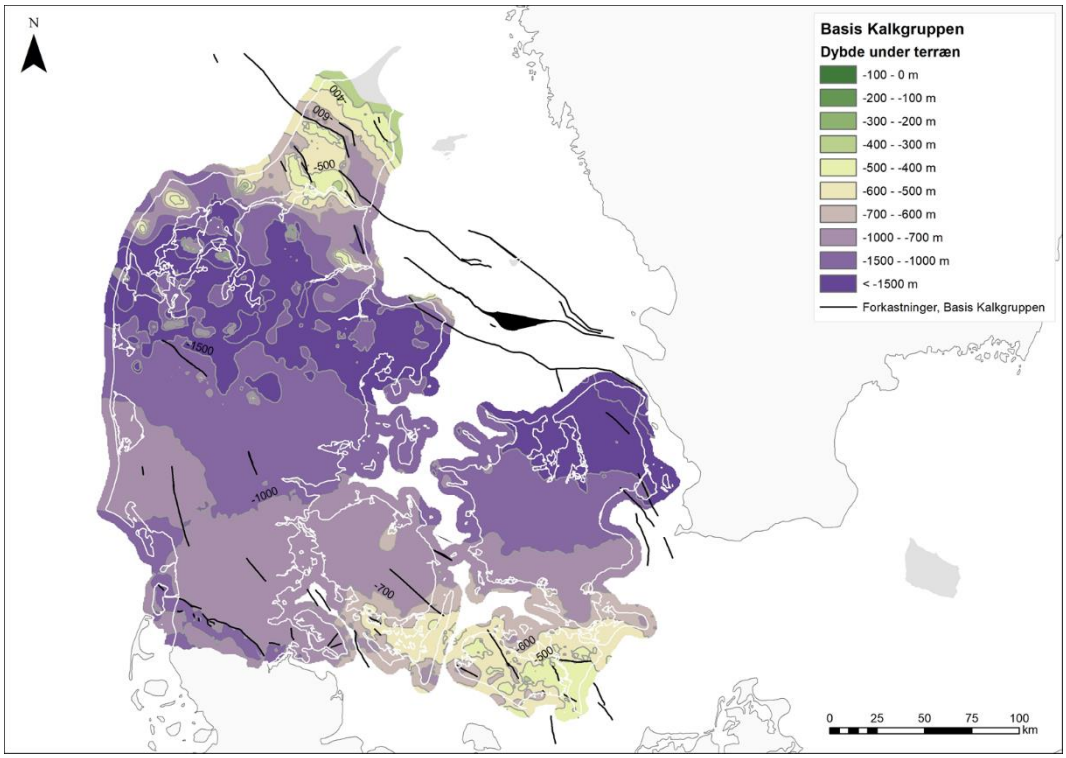
De kort, der er baseret på regional kortlægning af seismiske data og boredata, har en varierende grad af usikkerhed på dybderne og tykkelserne. Det skyldes en varierende afstand mellem de seismiske linjer og afstanden til boredata samt en stærkt varierende datakvalitet (Figur 4.3). Usikkerheden kan være 50 til 100 meter på dybdekort, og op til 50 meter på tykkelsen af de enheder, der er kortlagt i dybdeintervallet 0 til 800 meter (Rapport nr. 6, jf. reference i Kapitel 8.1). På større dybder vil usikkerheden generelt være større. Lokalt, hvor der er god korrelation til gode boredata, vil usikkerheden typisk kun være i størrelsesorden 10-50 meter. Denne usikkerhed er vigtig at erkende, når de enkelte områder karakteriseres og evalueres mht. om en værtsbjergart findes med en tykkelse på minimum 100 meter i dybdeintervallet 400-500 meter. Evalueringen præsenteret i Kapitel 5 er således baseret på de generelle forhold i områderne. Ved indsamling af nye data på en lokalitet i projektets næste fase, hvor dataindsamlingen er målrettet dybdeintervallet 0 til 1000 meter og korreleret til nye boringer, forventes der en meget større nøjagtighed på kortlægning af både dybder og tykkelser.

Dybdekortene (Figur 4.4-4.7) viser dybden til toppen af de forskellige stratigrafiske intervaller, der er kortlagt regionalt. Toppen af Kalkgruppen (Figur 4.4) findes i den østlige og nordlige del af Danmark i dybder mellem 0 og 100 meter, og i gradvist større dybder mod vest, hvor toppen af Kalkgruppen findes i dybder på 700 meter eller mere i den vestlige og sydligste del af Jylland. Basis af Kalkgruppen (Top Nedre Kridt) findes i størstedelen af landet på dybder større end 700 meter. I det nordligste Jylland og i Lolland - Falster området findes

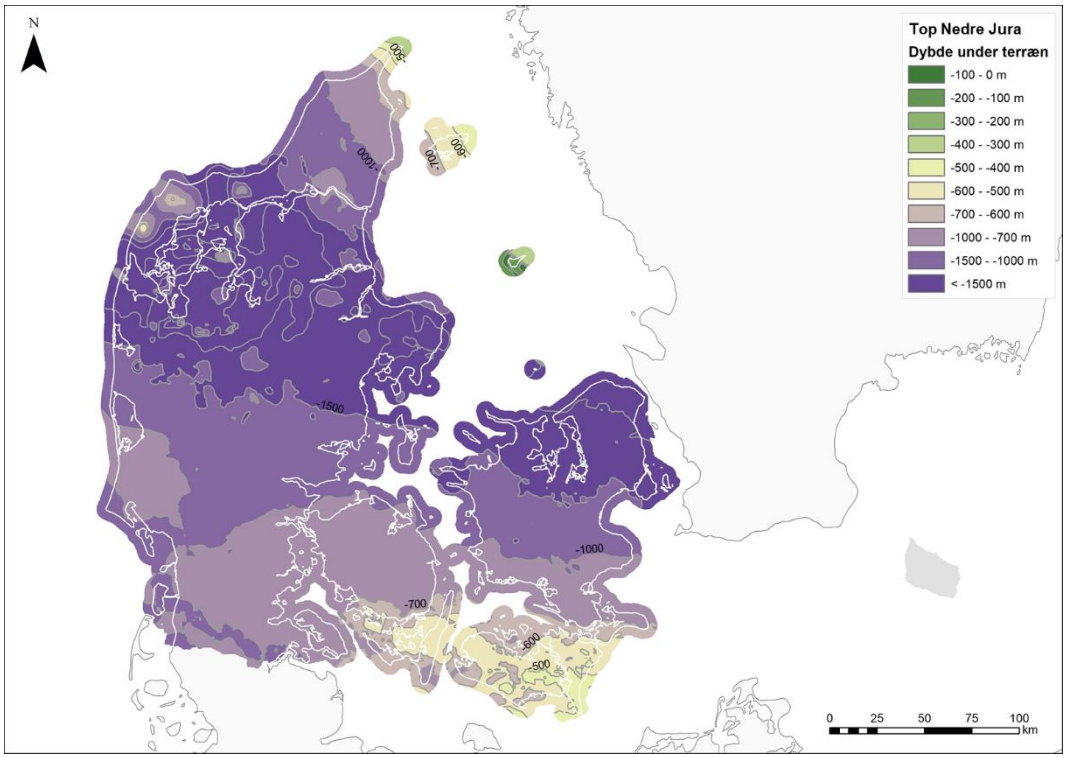


Figur 4.4. *Dybdekort for Top Kalkgruppen. Kortet viser store regionale forskelle fra 0-100 meter i det østlige og nordlige Danmark til mere end 700 meter i den vestlige del af landet (lyslilla områder).*

Basis af Kalkgruppen lokalt på dybder mindre end 500 meter. På kortet over Basis Kalkgruppen ses de kortlagte større forkastninger, som gennemskærer fladen. Nogle af forkastningerne afgrænser de større bassiner og højderygge i undergrunden, og har således været styrende for udbredelsen af de sedimentære aflejringer og tykkelserne af de stratigrafiske intervaller. Der findes mange forkastninger, som ikke er kortlagt i detalje, og som derfor ikke er vist på de geologiske kort. Eksempler på frekvensen, og typen af forkastninger i forskellige områder, er illustreret på de geologiske profiler (Kapitel 4.4).



Figur 4.5. *Dybdekort for Basis Kalkgruppen. Kortet viser, at Basis Kalkgruppen (Top Nedre Kridt) kun meget lokalt i det nordlige Jylland, og sydøstligste egne af landet, ligger i 400-500 meters dybde (områder med lyse gul-grønne farver).*

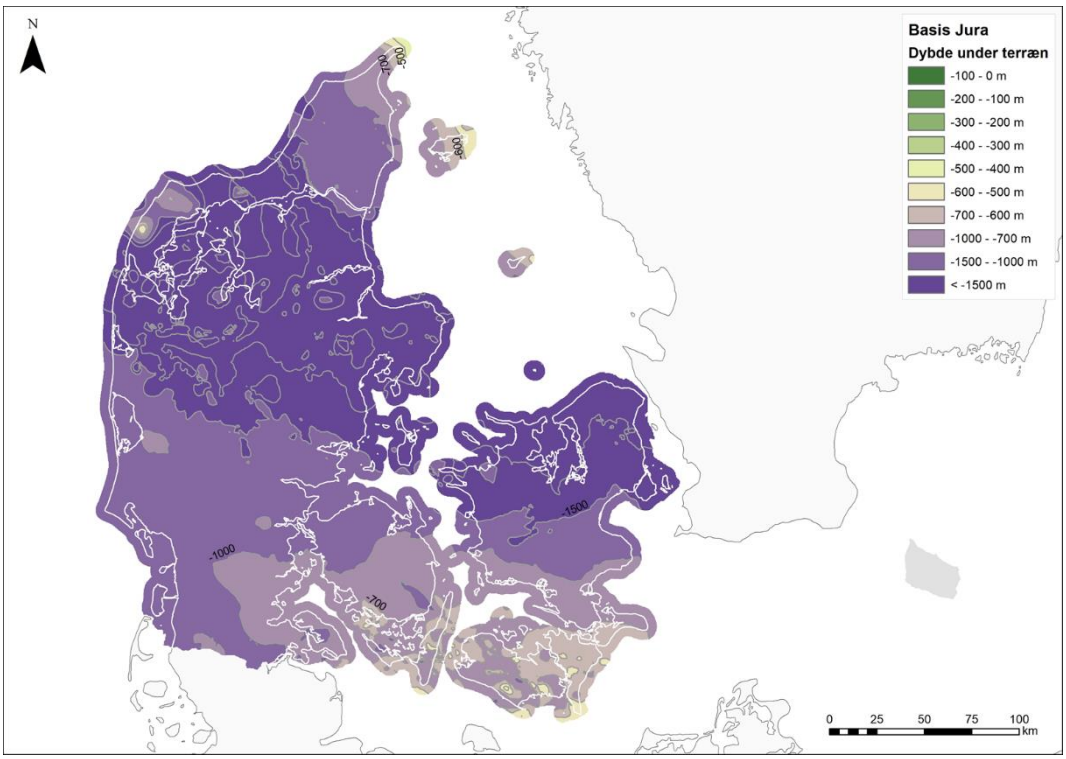


Figur 4.6. *Dybdekort for Top Nedre Jura (Top Fjerritslev Formationen) som viser, at Top Nedre Jura kun lokalt i den sydøstlige del af landet ligger i 400-500 meters dybde (områder med lyse farver) og generelt findes i dybder på 700 meter til mere end 1500 meter.*

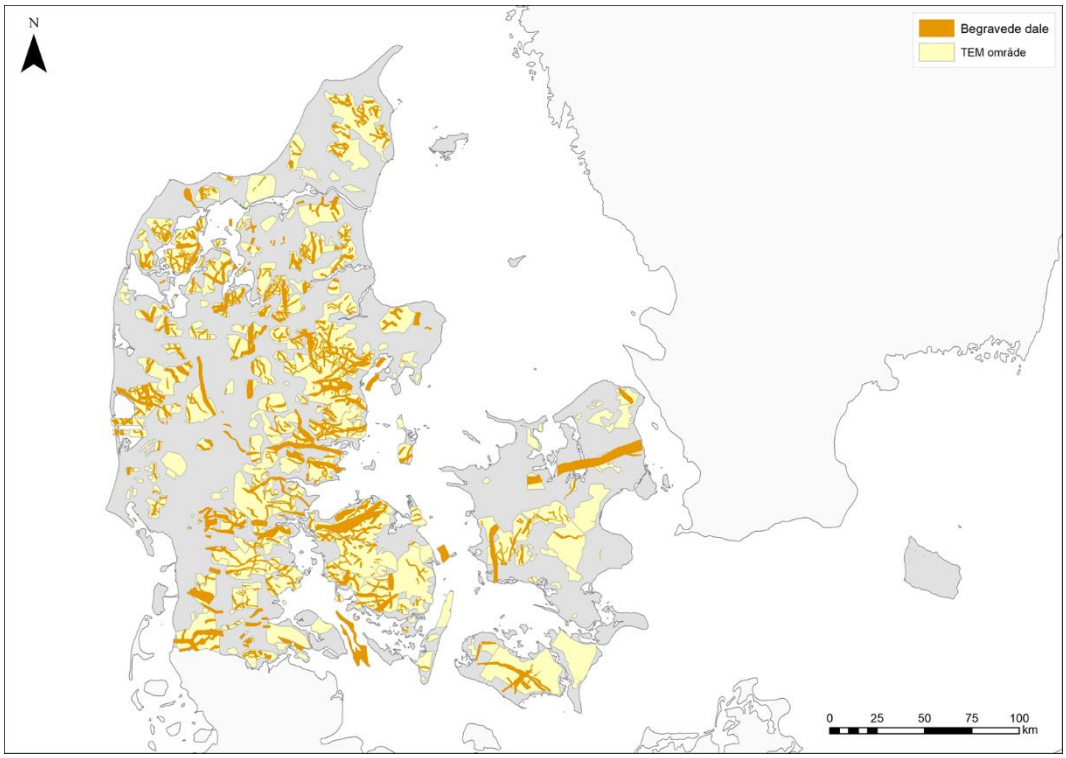
Basis af Jura findes i dybden 600-700 meter lokalt i Lolland-Falster området, og findes i den øvrige del af landet på dybder større end 1000-1500 meter.

Den Kænozoiske lagserie omfatter bl.a. kvartære glaciale aflejringer, der udgør den øverste og yngste del af lagserien. En særlig type glaciale erosions-strukturer, der ofte indeholder aflejringer af sand, findes i begravede dale, som kan kortlægges ud fra TEM data, der er betegnelsen for "Transient Elektro Magnetisme", som kortlægger den elektriske modstand i undergrunden (Rapport nr. 7, jf. referencer i 8.1). Kortet på Figur 4.8, viser i hvilke områder TEM data eksisterer, og hvor begravede dale er kortlagt på baggrund af TEM data. Kortet viser dalenes horisontale udstrækning, men ikke hvor dybt de har eroderet ned i de underliggende sedimenter. I områder, hvor der ikke er data, er det er uvist om, og hvor mange dale, der kan være.

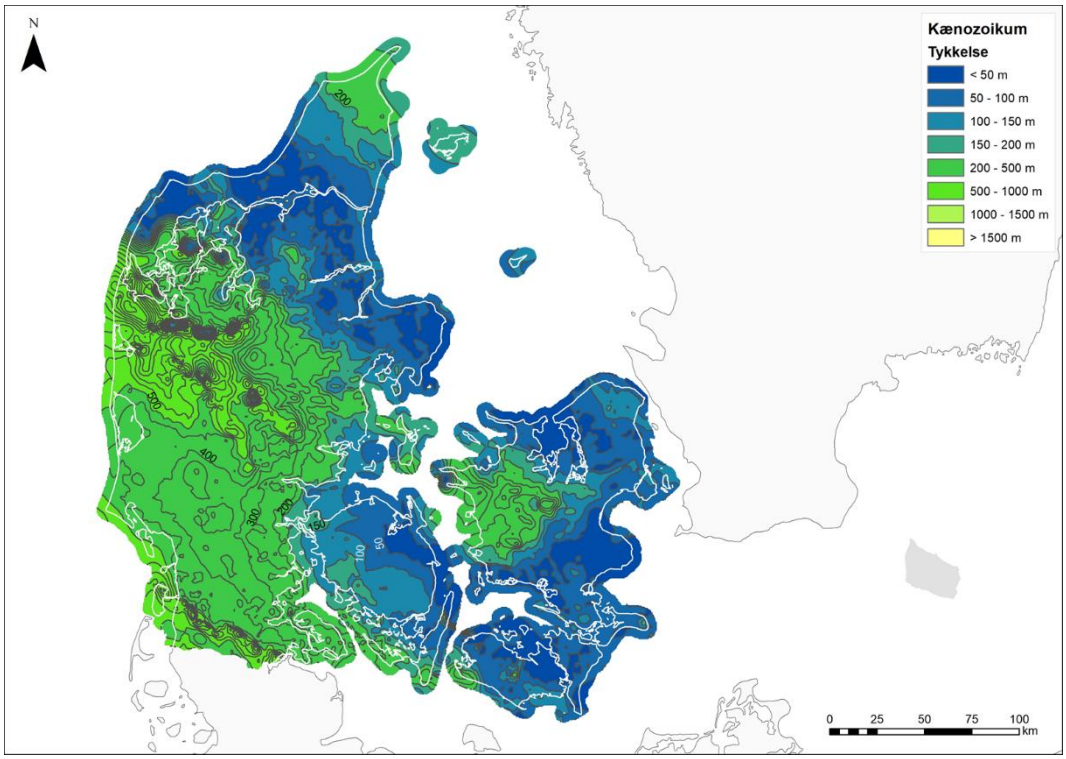
Den samlede tykkelse af den kænozoiske lagserie er vist på Figur 4.9. I den østlige og nordlige del af Danmark er tykkelsen generelt mindre end 200 meter, mens store mægtigheder lokalt på mere end 500 meter ses i den vestlige, og den nordligste del af landet. Kalkgruppen er udbredt i hele landet med varierende mægtigheder. Tykkelser på mere end 1500 meter ses i Midt-Nordjylland og Nordsjælland, og aftager i den nordligste og den sydligste del af landet hvor den typisk er mindre end 500 meter. Kalkgruppen kiler ud i det nordligste Jylland nord for Frederikshavn.



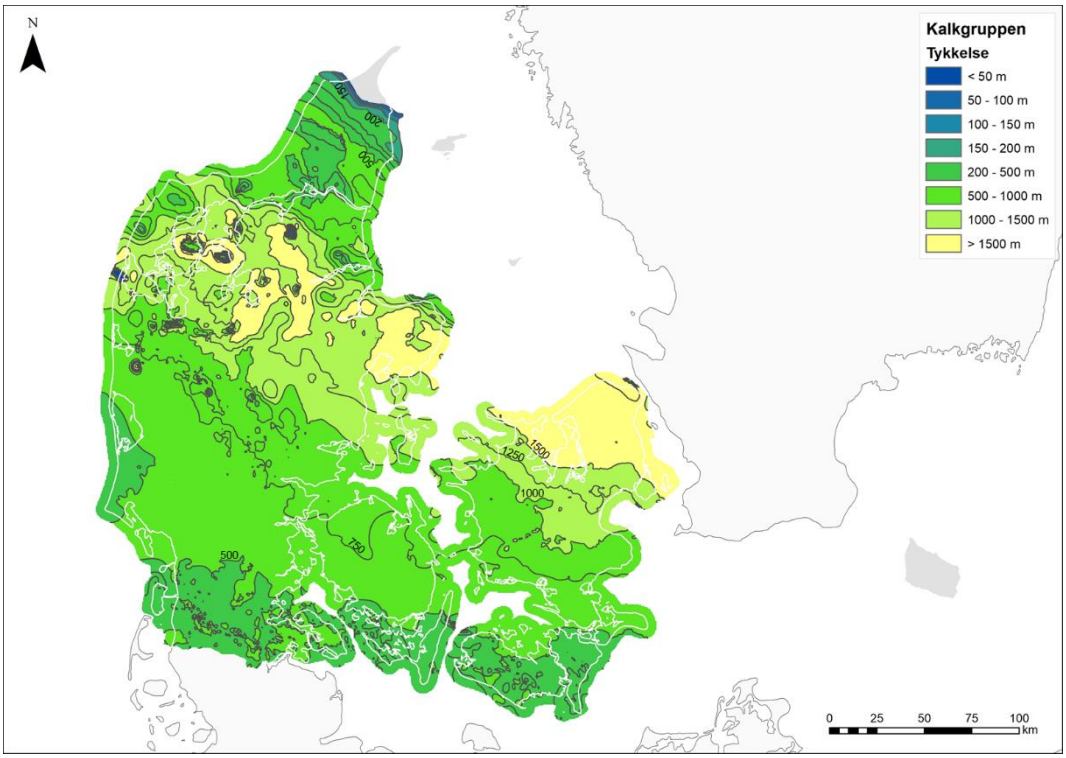
Figur 4.7. *Dybdekort for Basis Jura. Kortet viser, at dybden varierer fra mere end 1500 meter i centrale dele af Jylland og det nordlige Sjælland (mørkelilla områder) til 600-700 meter mod sydøst og i det nordligste Jylland.*



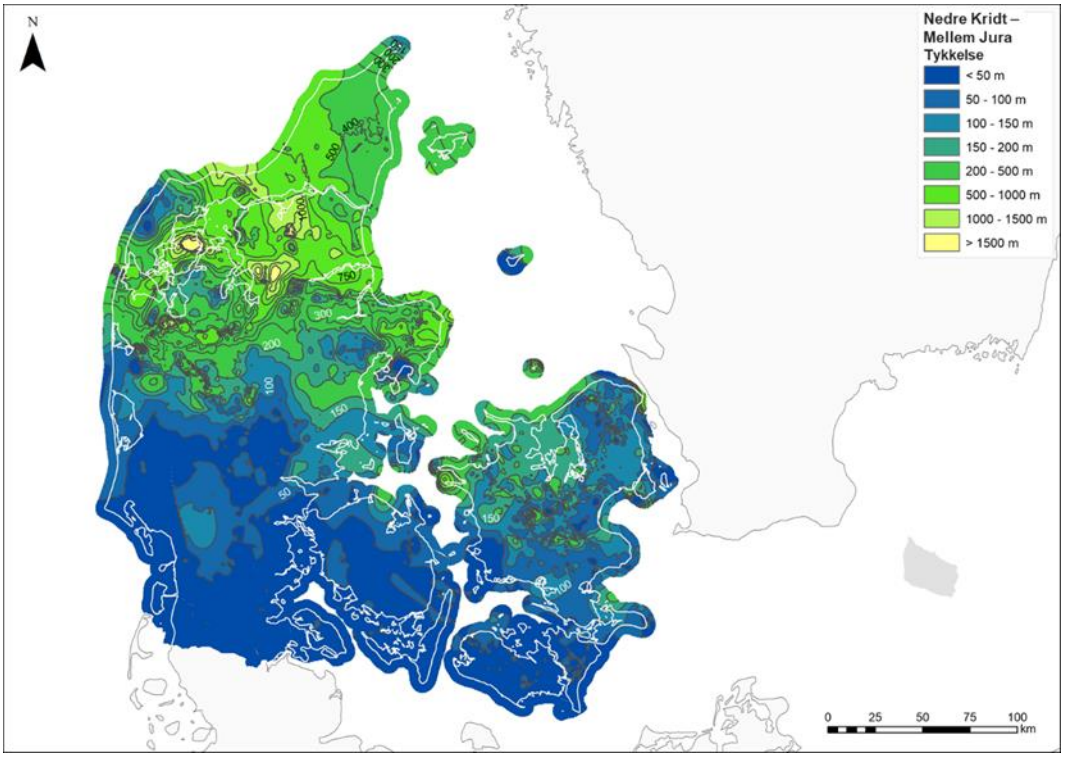
Figur 4.8. *Kortet viser områder med TEM data, og udbredelsen af kortlagte begravede kvartære dale er vist med orange (Sandersen et al. 2021).*



Figur 4.9. *Tykkelseskort for den kænozoiske lagserie. Tykkelsen varierer fra 0-100 meter i de nordlige og østlige dele af landet, mens det vestlige Sjælland og sydvestlige Jylland (grønne områder) har tykkelser på 200-500 meter og lokalt mere end 500 meter.*

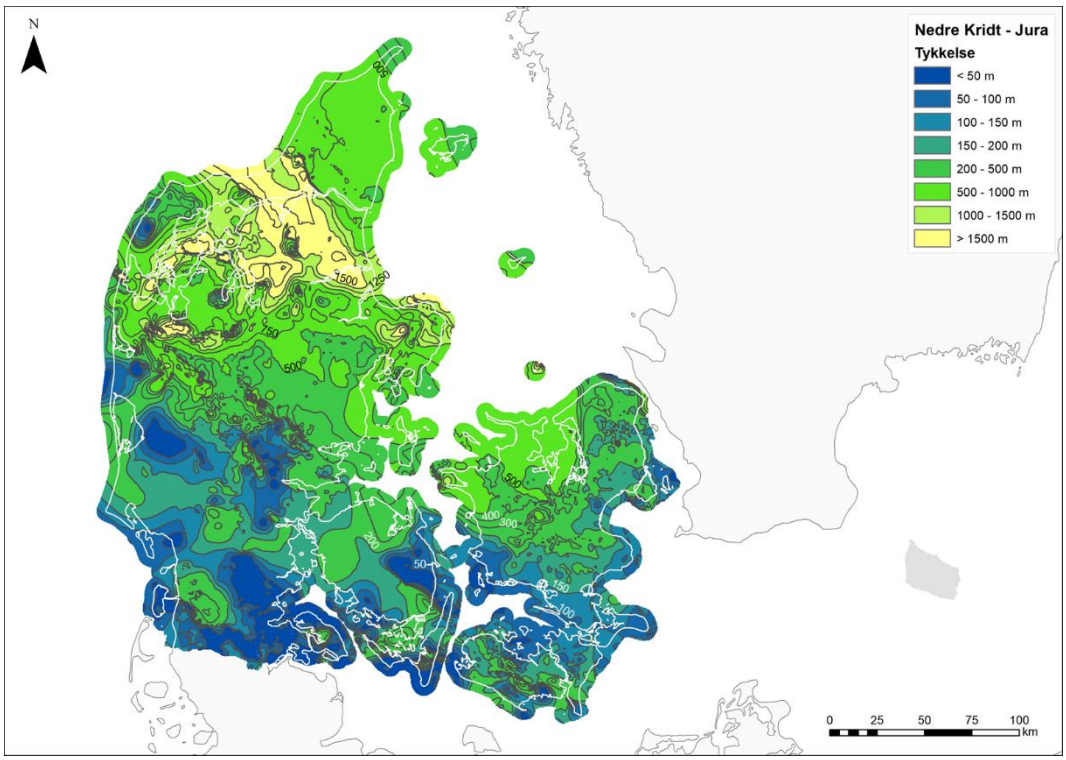


Figur 4.10 *Tykkelseskort Kalkgruppen. Tykkelser på mere end 1500 meter ses i et strøg fra det nordlige Sjælland til det nordlige Jylland (gule områder), og tykkelsen er generelt aftagende mod både nord og syd til 200-500 meter.*



Figur 4.11. *Tykkelseskort Nedre Kridt til Mellem Jura. De største mægtigheder på mere end 1000 meter ses lokalt i det nordlige Jylland (gule områder), mens mægtighederne i den øvrige del af landet generelt er mindre end 200 meter (blå områder).*

Sedimenter fra Øvre Jura findes kun i den nordlige del af Jylland og i mange områder er tykkelsen nær ved eller under grænsen for den seismiske opløselighed, hvorfor den samlede tykkelse af Øvre Jura og Nedre kridt lagserien er vist (Figur 4.11). Nedre Kridt – Øvre Jura intervallet er meget tyndt (mindre end 50 meter) i den sydlige del af landet (Figur 4.11) og lersten fra dette interval kan derfor ikke udgøre en værtsbjergart alene, når det er et krav, at en værtsbjergart skal være 100 meter tyk. Men i kombination med Nedre Jura intervallet kan der være mulighed for, at den samlede tykkelse af lersten er 100 meter eller mere. Derfor præsenteres også et kort over den samlede tykkelse af Nedre Kridt og Jura intervallerne (Figur 4.12).



Figur 4.12. *Tykkelseskort for den samlede Nedre Kridt og Jura lagserie. I det sydlige Danmark varierer tykkelser lokalt mellem 0 og 200 meter (blå og blågrønne områder), mens store mægtigheder generelt findes i den øvrige del af landet (gule og lysegrønne områder).*

4.3 Geologiske profiler

De geologiske profiler, der er præsenteret i det følgende afsnit, er udvalgt med henblik på at illustrere den geologiske opbygning af undergrunden og variationerne i forskellige egne af Danmark. Der er særligt fokus på udbredelsen af de geologiske formationer i intervallet 0 til 500 meter og relationerne til de strukturelle elementer (bassiner, højderygge og forkastningszoner). Udvælgelsen af de repræsentative seismiske linjer, der ligger til grund for profilerne, er betinget af tilstedeværelsen af seismiske data i de forskellige områder. Dybe boringer, der er boret langs den seismiske linje, er vist på profilet. De stratigrafiske intervaller, som er korreleret mellem boringen og de seismiske data, er vist med gule markeringer. Den geografiske placering af boringerne ses på kortet i Figur 4.13.

Profilerne giver et godt billede undergrundens opbygning, både hvad angår tilstedeværelsen og udbredelsen af de forskellige stratigrafiske enheder, samt lagenes geometri, der er et resultat af den strukturelle ramme og den geologiske tektoniske udvikling. I nogle områder ligger lagene nær-horisontalt, mens der i andre områder ses store forsætninger og tykkelsesvariationer, som skyldes en kompleks tektonisk udvikling i området med forkastningsaktivitet eller flydestrukturer i dybtliggende lag af Zechstein salt.

De geologiske profiler er grafiske gengivelser af tolkning af 2D seismiske data korreleret til dybe boringer. Den horisontale skala er i kilometer, og det skal bemærkes, at profilerne har forskellige størrelsesordener, hvor nogle viser regionalgeologiske tværsnit på 100 kilometer eller mere, mens andre viser mere lokale forhold over 10-50 kilometer.

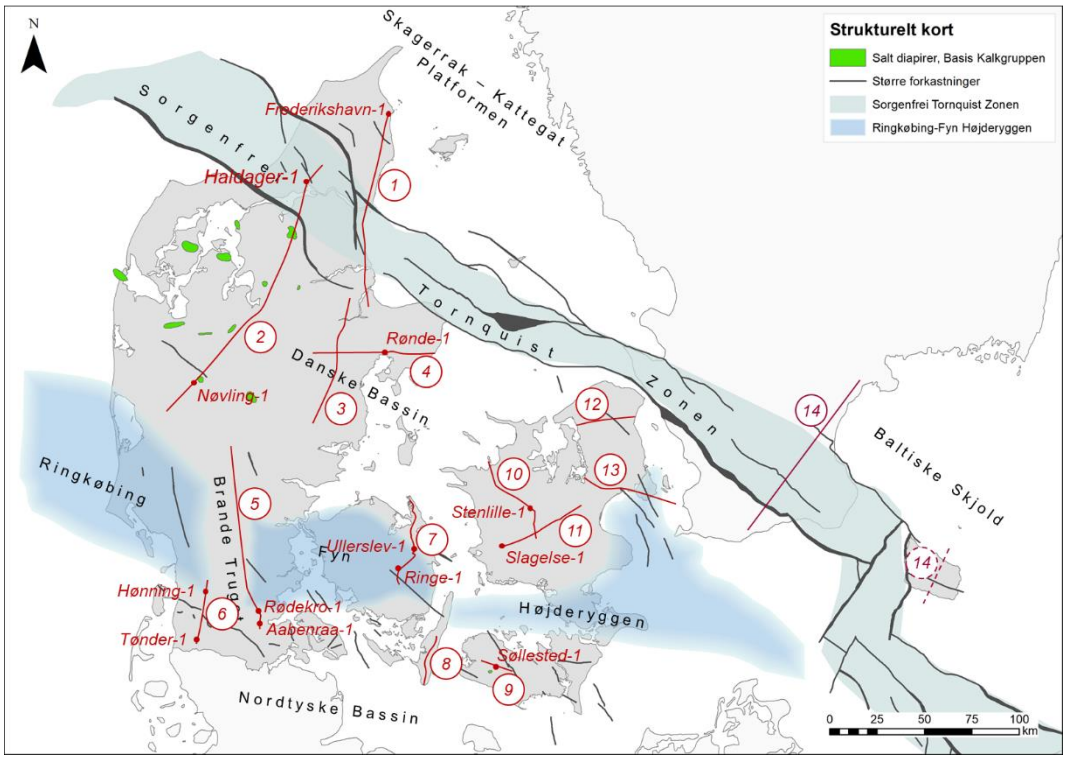
Den vertikale skala er ”to-vejs-tid” (TVT) angivet i millisekunder (ms), der er dybdeenheden for seismiske data (se yderligere forklaring i Rapport nr. 6, jf. referencer i Kapitel 8.1). For at fremhæve dybdeintervallet omkring 500 meter, er det indikeret med stiplede linjer, hvor dybdefladerne for hhv. 400, 500 og 600 meter er beregnet at ligge. I områder, hvor der er god korrelation mellem seismiske data og boredata, er dybdeangivelsen god, hvorimod der er en stigende usikkerhed på dybde-estimatet jo større afstand, der er til boredata, særligt i områder hvor lagene ikke ligger horisontalt.

I beskrivelsen af profilerne er fokus på den øverste del af lagserien i tidsintervallet 0-1000 ms, der indeholder dybdeintervallet fra 0 meter til mere end 500 meter. Derudover er fokus på tilstedeværelsen af forkastninger, som er hældende planer, hvor der er sket relative forskydninger af lagene. Forskydningerne kan være horisontale eller vertikale, og langs forkastningsplanet kan der dannes åbne mikrofrakturer, når forkastningerne bevæger sig og udløser jordskælv. Forkastninger er således en indikation af, at jordskælv har fundet sted i geologisk tid. Forkastninger ses på profilerne som sorte streger, der gennemskærer de geologiske formationer. I områder, hvor mange større forkastninger forekommer med korte afstande (mindre end 10 kilometer), kan det være en udfordring for placeringen af et slutdepot i forhold til kravet om horisontal kontinuitet af værtsbjergarten, som vil være usikker. Forkastningers vertikale udbredelse og deres geometrier kan anvendes til at forudsige nogle af bjergarternes egenskaber, herunder en vurdering af om forkastningerne stadig er aktive. Hvis forkastningsplanet strækker sig helt op til terrænoverfladen, kan der være en risiko for at forkastningen stadig er aktiv og derfor kan forventes at forskyde sig og forårsage jordskælv i den nærmeste (geologiske) fremtid. Forkastninger, der kun findes i de dybere dele af lagserien, har været inaktive i millioner af år og forventes generelt ikke at blive reaktiveret. Endelig skal det nævnes, at mange af de forkastninger, der ses på de geologiske profiler, ikke er indtegnet på de geologiske kort. Dette skyldes, at der i mange tilfælde ikke er data nok til at bestemme orienteringen af forkastningerne i kortplan (2D). Eksempelvis kan en forkastning, der ses på en nord-syd orienteret seismisk linje, have en orientering varierende fra NØ-SV til NV-SØ i kortplanet, og det kan derfor være misvisende at indtegne forkastningen på et kort uden yderligere data. For at få et billede af de enkelte områders geologiske og strukturelle kompleksitet er det derfor vigtigt at vurdere de seismiske profiler i kombination med de geologiske dybde- og tykkelseskort.

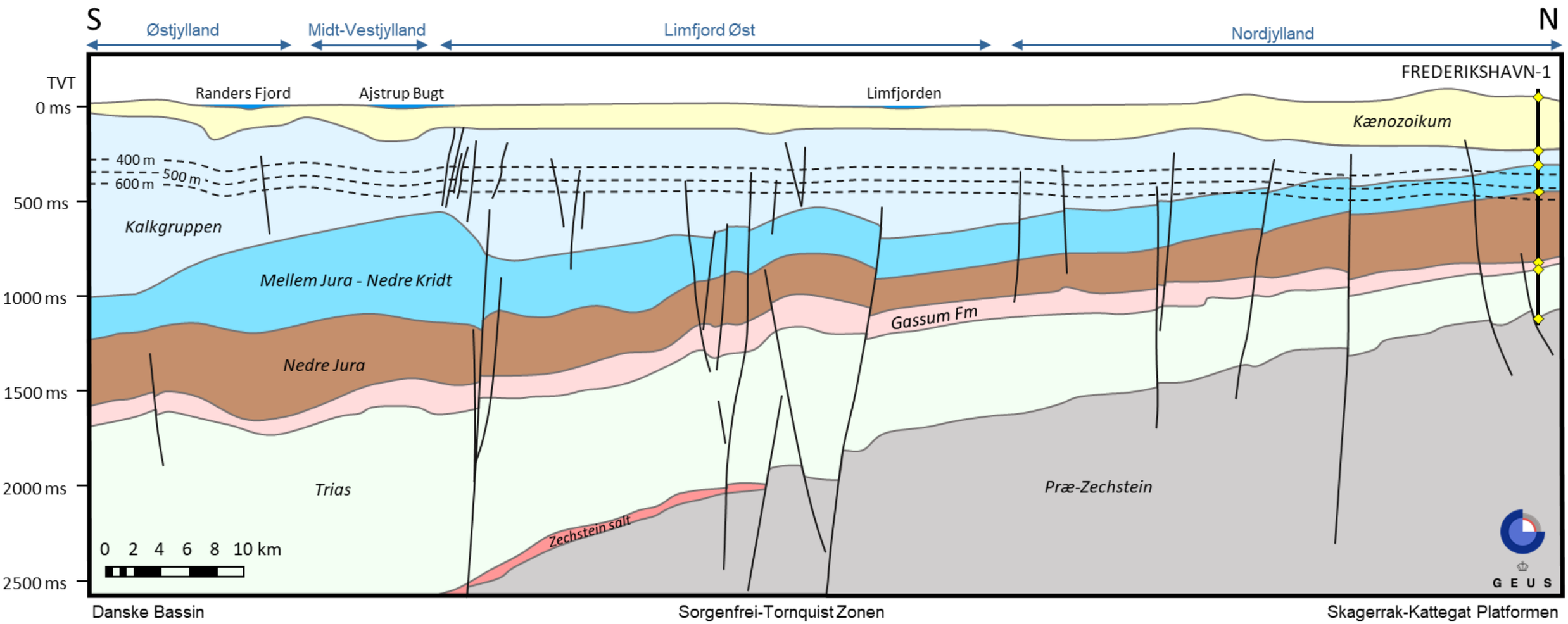
Da de seismiske data typisk er indsamlet med henblik på at kortlægge dybere dele af undergrunden, er data i de overfladenære lag ofte af en kvalitet, der ikke gør det muligt at lave en detaljeret kortlægning af forkastninger i denne del af intervallet. I de tilfælde, hvor forkastninger er kortlagt til at fortsætte ind i den kænozoiske lagserie, er der en mulighed for, at de rent

faktisk fortsætter helt til terrænoverfladen. Baseret på eksisterende data kan det derfor være vanskeligt at afgøre, om forkastningerne fortsætter helt til terrænoverfladen, men indsamling af nye fokuserede seismiske data vil kunne danne grundlag for detaljeret kortlægning af den øverste del af lagserien. Forekomsten af mindre, tætliggende forkastninger i relativt stejlt hældende lag, f.eks. over saltstrukturer eller i brede forkastningszoner, kan være associeret med sprækker, der kan være åbne eller lukkede.

Over profilerne er navne på områder, som profilet går igennem, vist med blåt (områder som defineret i Kapitel 4.5). Under profilerne er angivet de overordnede strukturelle elementer, som profilerne gennemskærer, og som er karakteristiske for de respektive områder. En oversigt over lokaliseringen af alle profilerne er vist på Figur 4.13 på baggrund af de regionale strukturelle elementer. Sammen med hvert profil er vist et oversigtskort, hvor profilets placering er markeret med en rød linje.



Figur 4.13 *Med røde linjer er vist placering af de geologiske profiler i relation til de større strukturelle elementer. Profilerne er vist i Figur 4.14 – 4. 27. Ringkøbing-Fyn Højderyggen repræsenterer et område, hvor grundfjeldet ligger relativt højt (1-1,5 kilometer under terræn) i forhold til det Danske Bassin og det Nordtyske bassin, hvor grundfjeldet findes på flere kilometers dybde. Profil 14 fra Skåne er baseret på regional seismik, og illustrerer den geologiske opbygning af Bornholm, hvor der ikke tolket regionale seismiske data.*



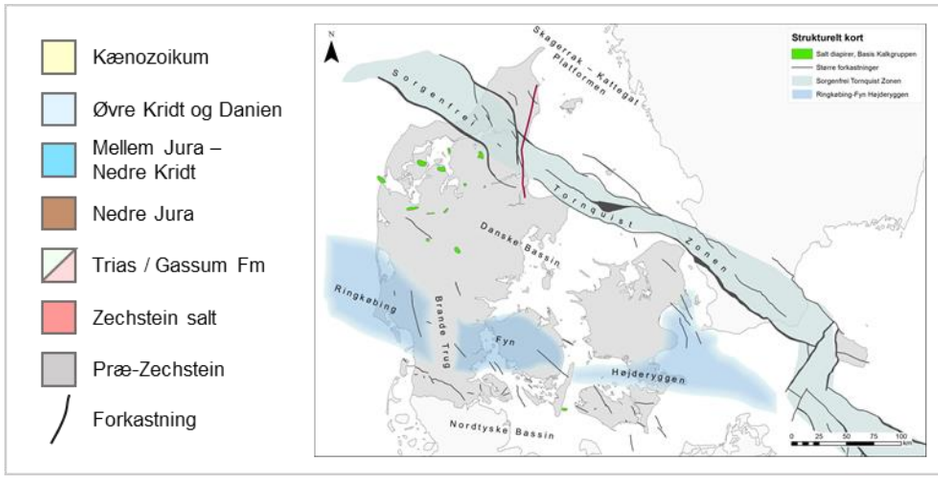
Figur 4.14. *Profil 1 er cirka 100 kilometer langt og strækker sig fra Skagerrak-Kattegat Platformen i nord hen over Sorgenfrei-Tornquist Zonen til det Danske Bassin mod syd.*

Kalkgruppen udgør størstedelen af intervallet fra nær terræn til mere end 600 meters dybde. Karakteristisk er, at kalken bliver tykkere mod syd og har en overordnet kileformet geometri på grund af opløft og erosion mod nord. Således har Kalkgruppen i profilets nordligste del en tykkelse på 100 meter (127 meter i Frederikshavn-1 boringen), hvor kun den nederste del af Kalkgruppen er bevaret, mens den mod syd opnår tykkelser i størrelsesordenen 1000 meter.

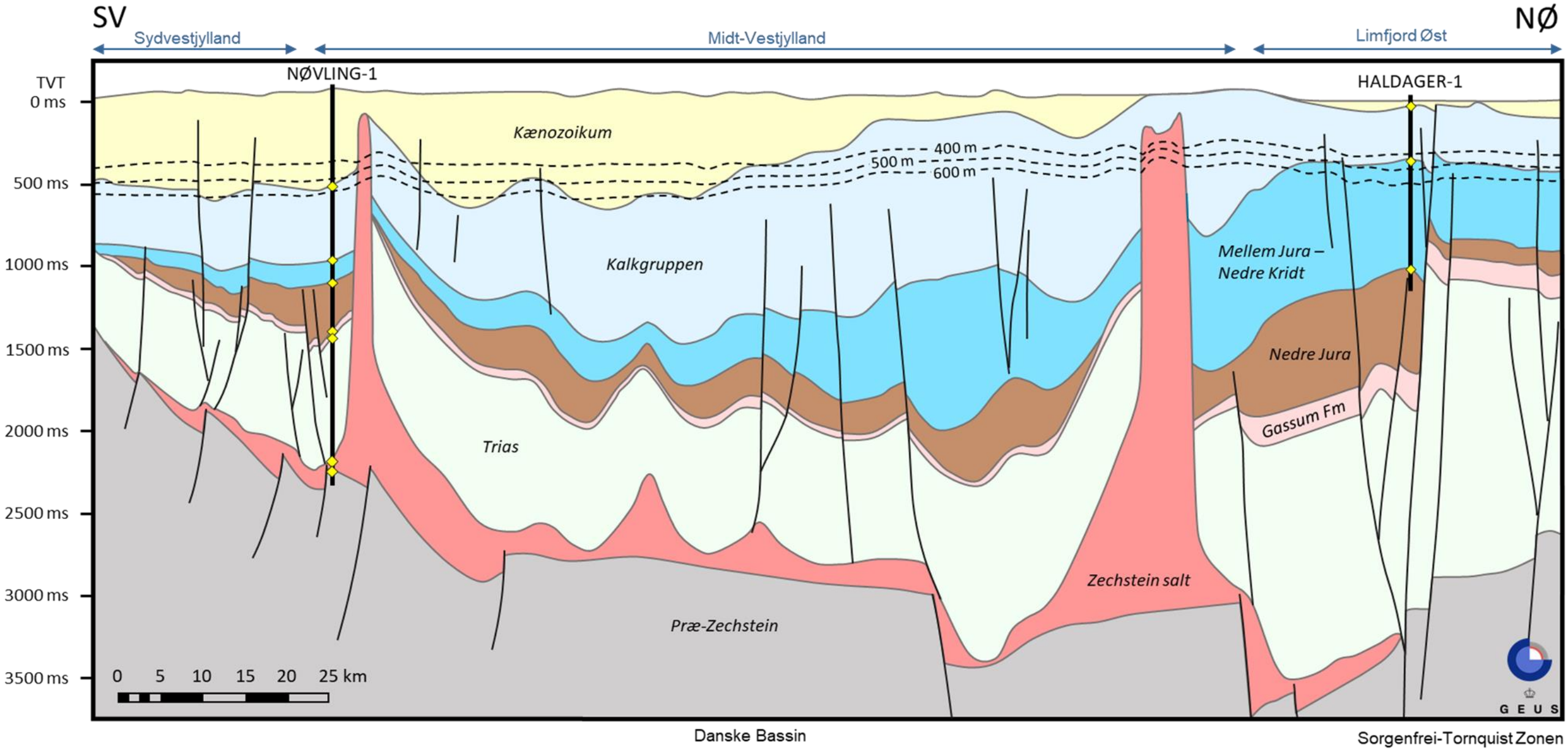
Under Kalkgruppen findes i hele profilets længde en lagserie fra Mellem jura – Nedre Kridt, der generelt er flere hundrede meter tyk og har størst mægtighed mod syd. Nordligst i profilet, omkring Frederikshavn-1, findes denne lagserie i 400-500 meters dybde, men generelt findes den dybere end 600 meter.

I den sydlige og centrale del af profilet består intervallet fra 400 meter og opefter hovedsageligt af Kalkgruppen, der overlejres af kænozoiske sedimenter af varierende tykkelse. Mod nord øges tykkelsen af den kænozoiske lagserie. I Nordjylland er den generelt mere end 100 meter tyk (206 m i Frederikshavn-1 boringen).

Lagserien gennemskæres af talrige både dybe og mindre dybe forkastninger, hvis indbyrdes afstande varierer fra få kilometer til 10 kilometer. Midt i profilet ses Sorgenfrei-Tornquist Zonen i form af flere komplekse forkastningssystemer, der gennemskærer lagserien fra præ-Zechstein til Øvre Kridt. Nær Frederikshavn-1 ses en forkastning, der strækker sig ind i den kænozoiske lagserie, og som derfor har været aktiv i kænozoisk tid. Internt i Kalkgruppen findes lokalt grupper af mindre forkastninger. De findes ovenover kompressions-strukturer i Sorgenfrei-Tornquist Zonen (Limfjord Øst), hvor lagserien fra Trias til Nedre Kridt er presset sammen i "buler", og de kan være associeret med sprækkesystemer.



Figur 4.14

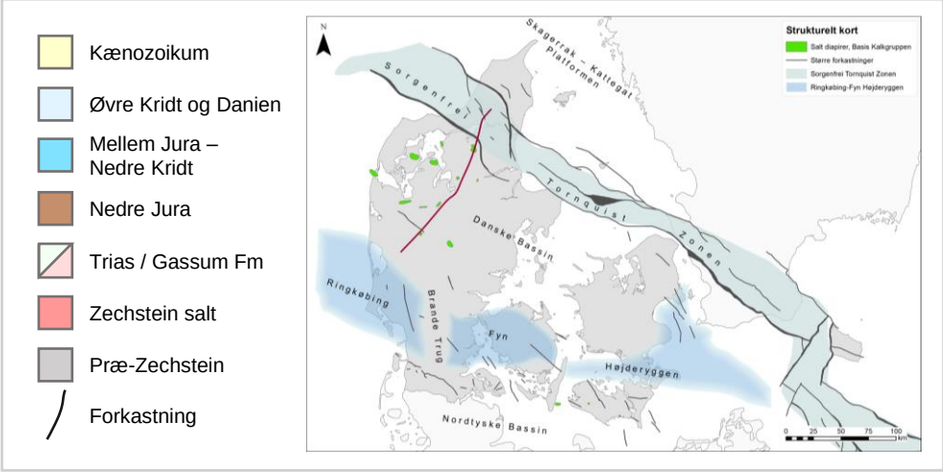


Figur 4.15. *Profil 2 er et cirka 175 kilometer langt geologisk snit igennem det Danske Bassin fra Ringkøbing-Fyn Højderyggen i sydvest til Sorgenfrei-Tornquist Zonen mod nordøst.*

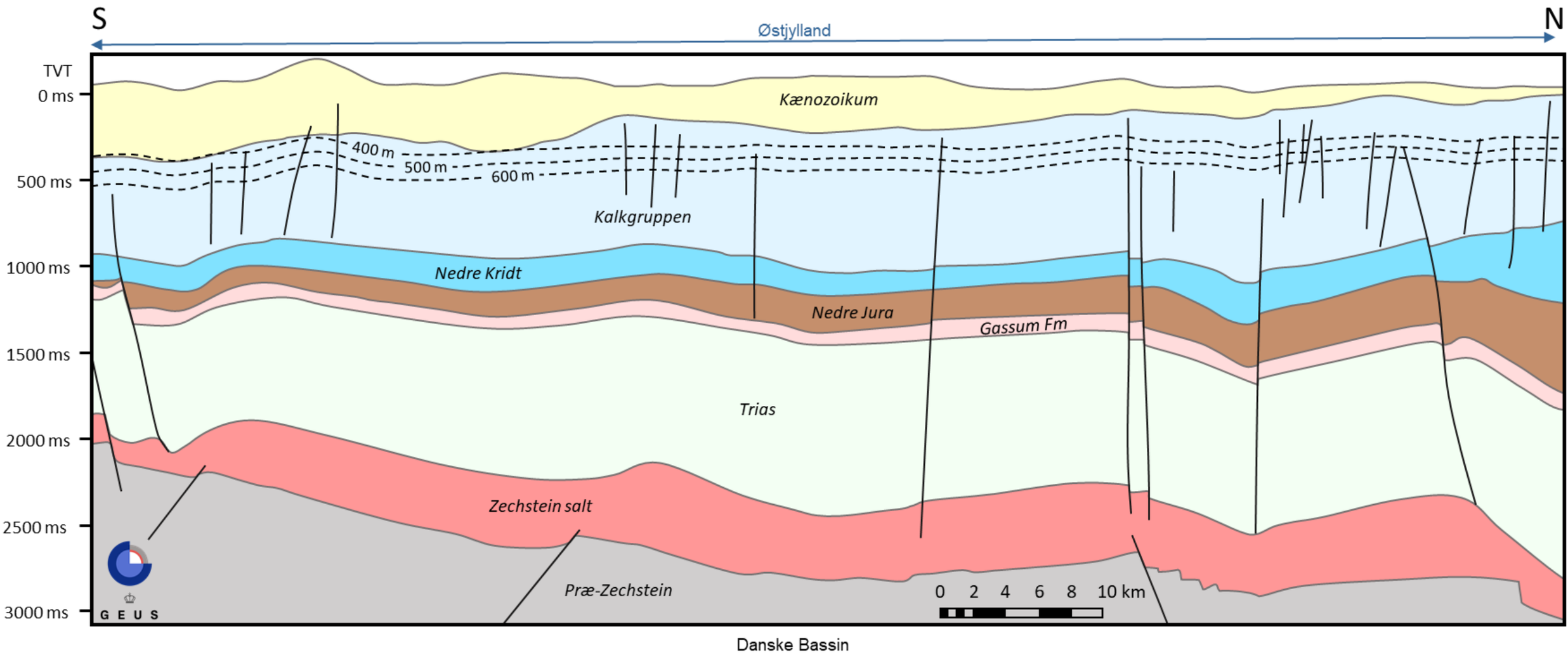
Profilet viser strukturel kompleksitet med mange store forkastninger, salt diapirer og vekslende tykkelser af de stratigrafiske intervaller, som afspejler de forskellige geotektoniske regioner. Mod sydvest ses den gradvise overgang fra det Danske Bassin op mod Ringkøbing-Fyn Højderyggen, der ligger umiddelbart syd for profilet. Denne overgang ses ved, at tykkelsen af lagserierne fra Trias til Øvre Kridt aftager i sydvestlig retning.

I profilets sydvestlige del findes toppen af Kalkgruppen i 500-600 meters dybde og overlejres af en tyk lagserie af kænozoiske sedimenter. I Limfjord Øst ses lagserien fra Mellem Jura – Nedre Kridt på cirka 500 meters dybde, og herover findes Kalkgruppen i intervallet fra omkring 500 meter til terræn. Den nordøstlige halvdel af profilet er karakteriseret ved store tykkelser af lagserierne fra både Nedre Jura og Mellem Jura – Nedre Kridt, som generelt findes i dybder langt under 500 meter.

I Sydvestjylland og den sydlige del af Midt-Vestjylland ses flere dybe forkastninger, der strækker sig fra toppen af Zechstein salt ind i Kalkgruppen og i flere tilfælde helt op i den kænozoiske lagserie. I størstedelen af Midt-Vestjylland ses de dybe forkastninger at terminere inde i Kalkgruppen. I Sorgenfrei-Tornquist Zonen (Limfjord Øst) findes relativt tætliggende forkastninger, hvoraf nogle fortsætter op i Kalkgruppen til et niveau nær terræn. En enkelt forkastning nær Haldager-1 boringen er kortlagt helt til terrænoverfladen. Den sydlige saltdiapir gennembryder Top Kalkgruppen, og trænger op i de kænozoiske sedimenter.



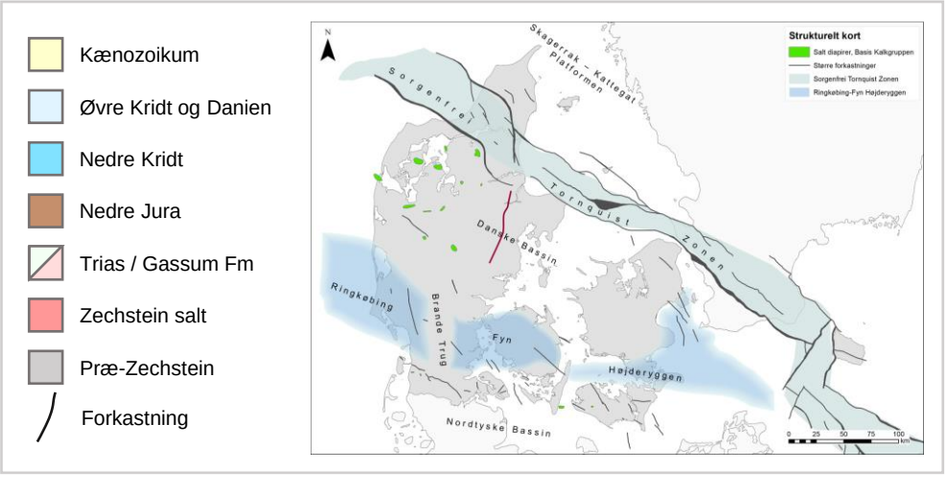
Figur 4.15



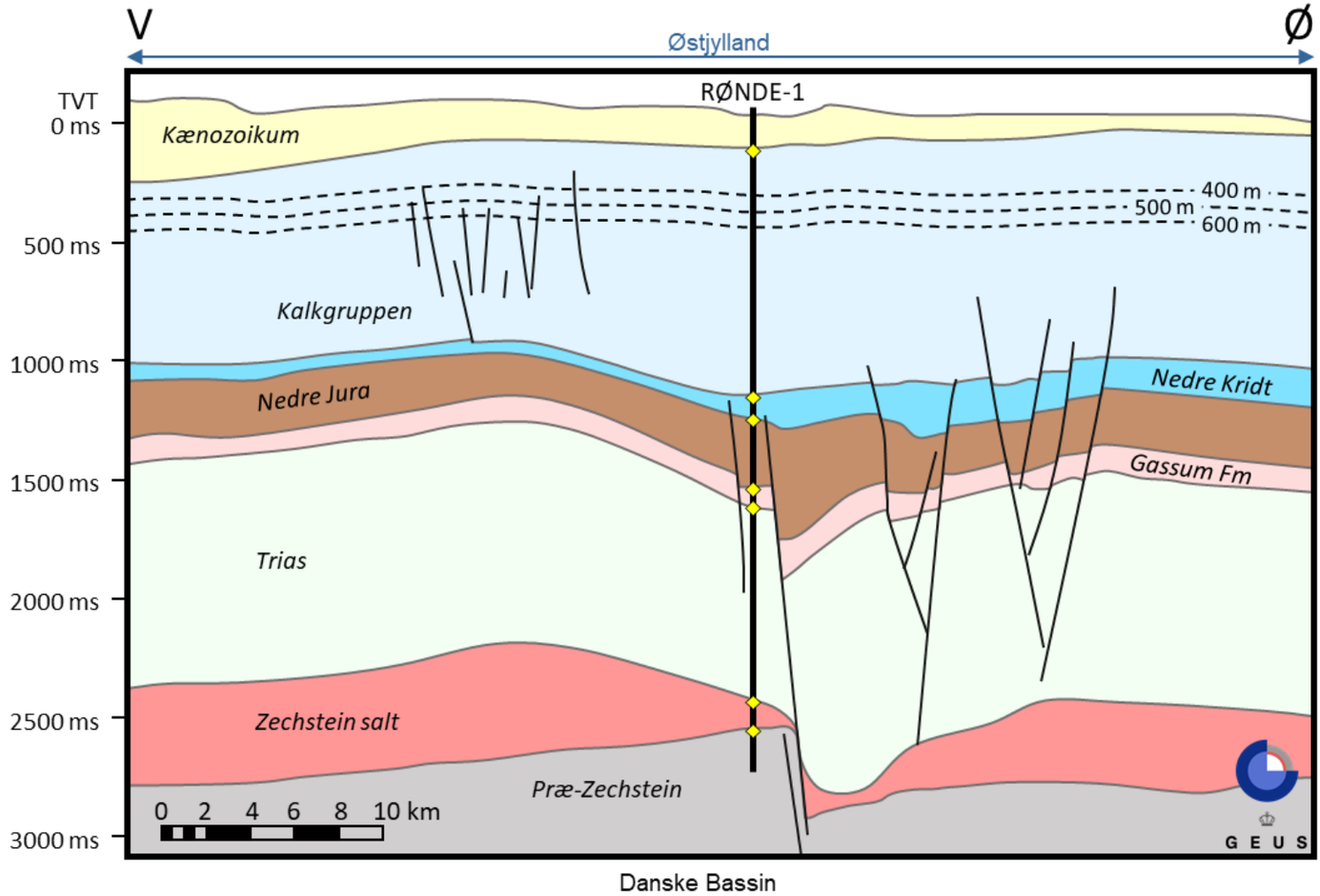
Figur 4.16. *Profil 3 er et cirka 90 kilometer langt geologisk snit orienteret fra syd til nord, der går gennem det Danske Bassin i retning mod Sorgenfrei-Tornquist Zonen nord for profilet.*

Karakteristisk for profilet er tykkelsesvariationen af den kænozoiske lagserie, der ændres fra 400 meter mod syd til 20-30 meter mod nord. Dermed findes toppen af Kalkgruppen i profilets nordlige ende kun nogle få tital af meter under terræn, mens den i den sydlige ende af profilet findes på 400 meters dybde. Kalkgruppens basis ligger langt dybere end 600 meter langs hele profilet.

Dybe forkastninger i præ-Zechstein er er associeret med dannelsen af pude-strukturer i de overliggende lag af Zechstein salt. Den bølgede top af Zechstein salt ses afspejlet i de overliggende lagserier fra Trias til Nedre Kridt og i mindre grad også i Kalkgruppen. En række store forkastninger ses at strække sig fra Zechstein salt til den øvre del af Kalkgruppen. I Kalkgruppen findes tætliggende forkastninger i de områder, hvor underliggende saltpuder findes på større dybder. De fleste af disse mindre forkastninger terminerer internt i Kalkgruppen, men enkelte fortsætter helt op i den kænozoiske lagserie.



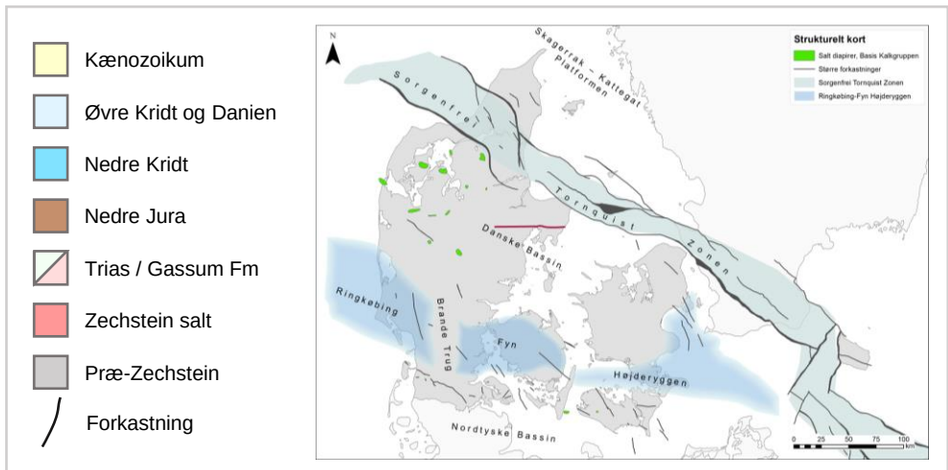
Figur 4.16



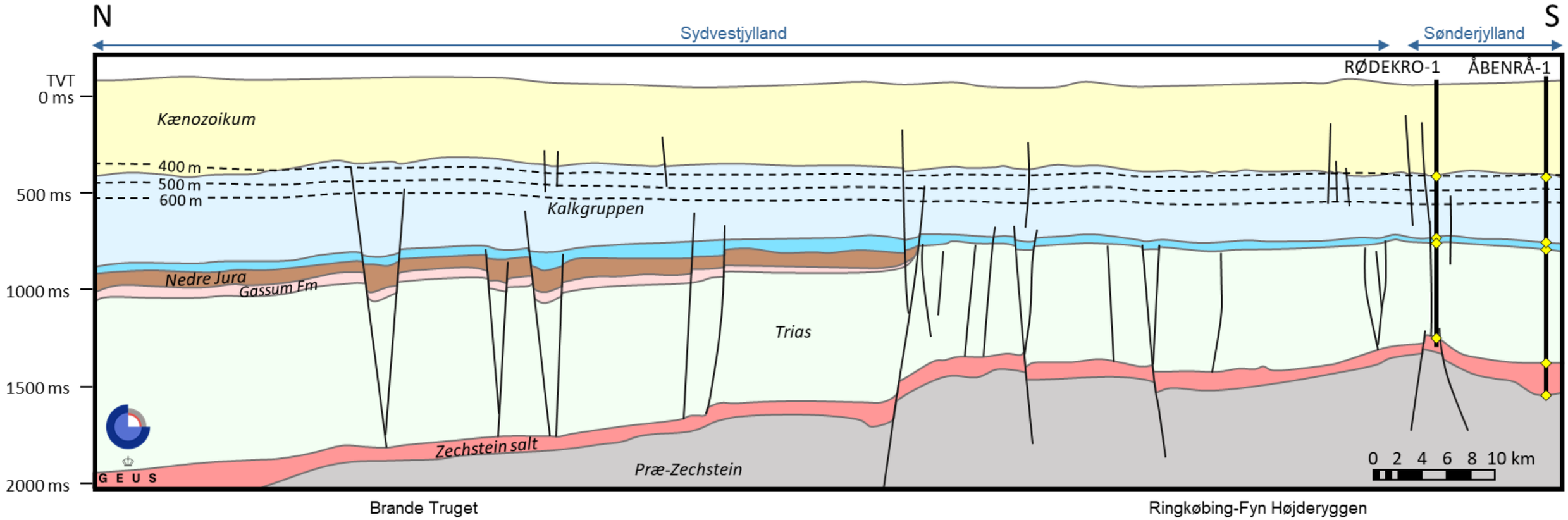
Figur 4.17. *Profil 4 er et cirka 50 kilometer langt snit gennem den centrale del af det Danske Bassin. Profilet går fra vest mod øst gennem Rønde-1 boringen.*

I dybdeintervallet fra 400 meter til 500 meter findes i hele profilets længde kalksten fra Kalkgruppen. Kalken er relativt tyk, og basis af Kalkgruppen findes i hele området langt under 600 meter. Langs størstedelen af profilet udgør Kalkgruppen hovedparten af det overliggende interval fra 400 meter til 100 meter under terræn (130 meter i Rønde-1), men længst mod vest er tykkelsen af den kænozoiske lagserie 300-400 meter.

Der ses en del dybe forkastninger og forkastningssystemer øst for Rønde-1, der fortsætter op i den nedre del af Kalkgruppen. Vest for Rønde-1 ses et område med tætliggende, mindre forkastninger, som kun findes internt i Kalkgruppen. De er formodentlig et resultat af salt-bevægelse, der har dannet en mindre pude-struktur i den dybereliggende Zechstein salt. Det har resulteret i strækning af de overliggende lag, der kan være associeret med sprækker i Kalkgruppen.



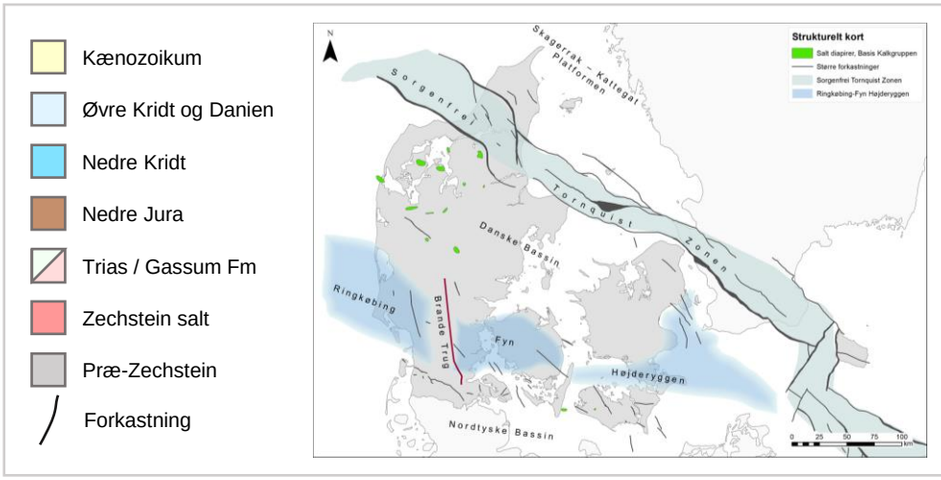
Figur 4.17



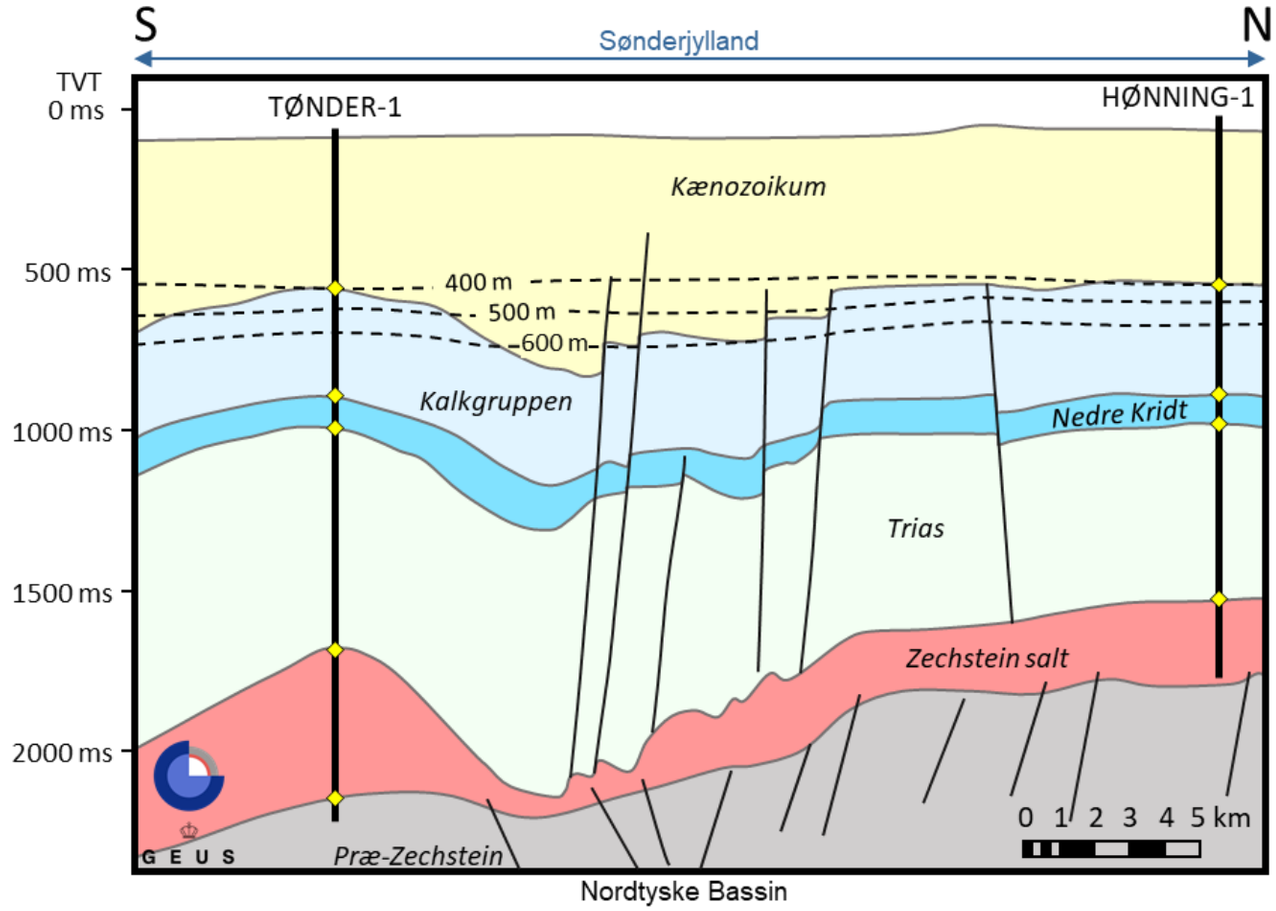
Figur 4.18. *Profil 5 er cirka 120 kilometer langt og strækker sig fra den sydlige del af det Danske Bassin, igennem Brande Truget, til marginen af det Nordtyske Bassin i syd.*

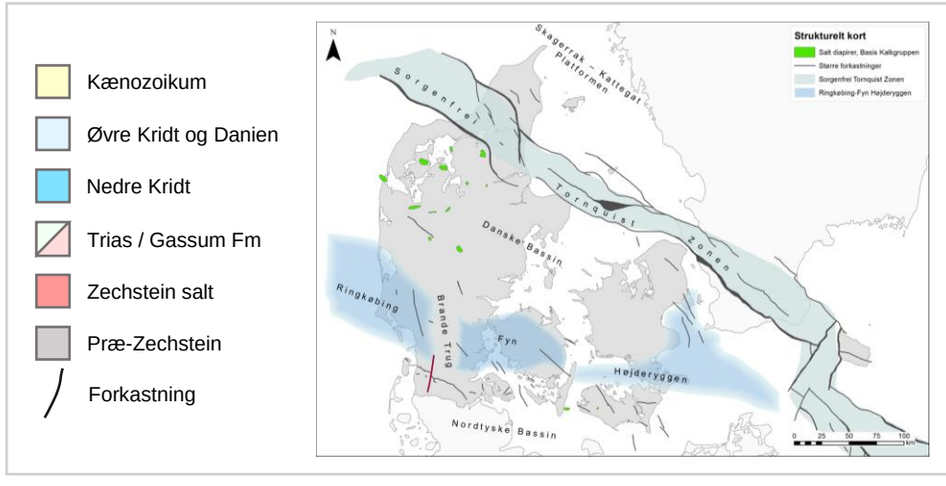
Karakteristisk for profilet er, at toppen af Kalkgruppen findes i 400 meters dybde, og at Kalkgruppen fortsætter til langt under 600 meters dybde med ensartet udbredelse og tykkelse langs hele profilet. Lagserien fra 400 meter og opefter består at kænozoiske sedimenter. Sedimenter fra Nedre Jura og Trias (Gassum Formationen) findes kun i Brande Truget i den nordlige del af profilet.

Strukturelt set er den øvre del af lagserien relativt uforstyrret. Der ses en række mindre forkastninger, der begynder internt i Kalkgruppen og fortsætter op i den nedre del af den kænozoiske lagserie. I de dybereliggende intervaller ses en lang række forkastninger, der starter ved toppen af Zechstein saltet. De fleste terminerer nær basis af Kalkgruppen, men nogle fortsætter ind i den nedre del af den kænozoiske lagserie.



Figur 4.18

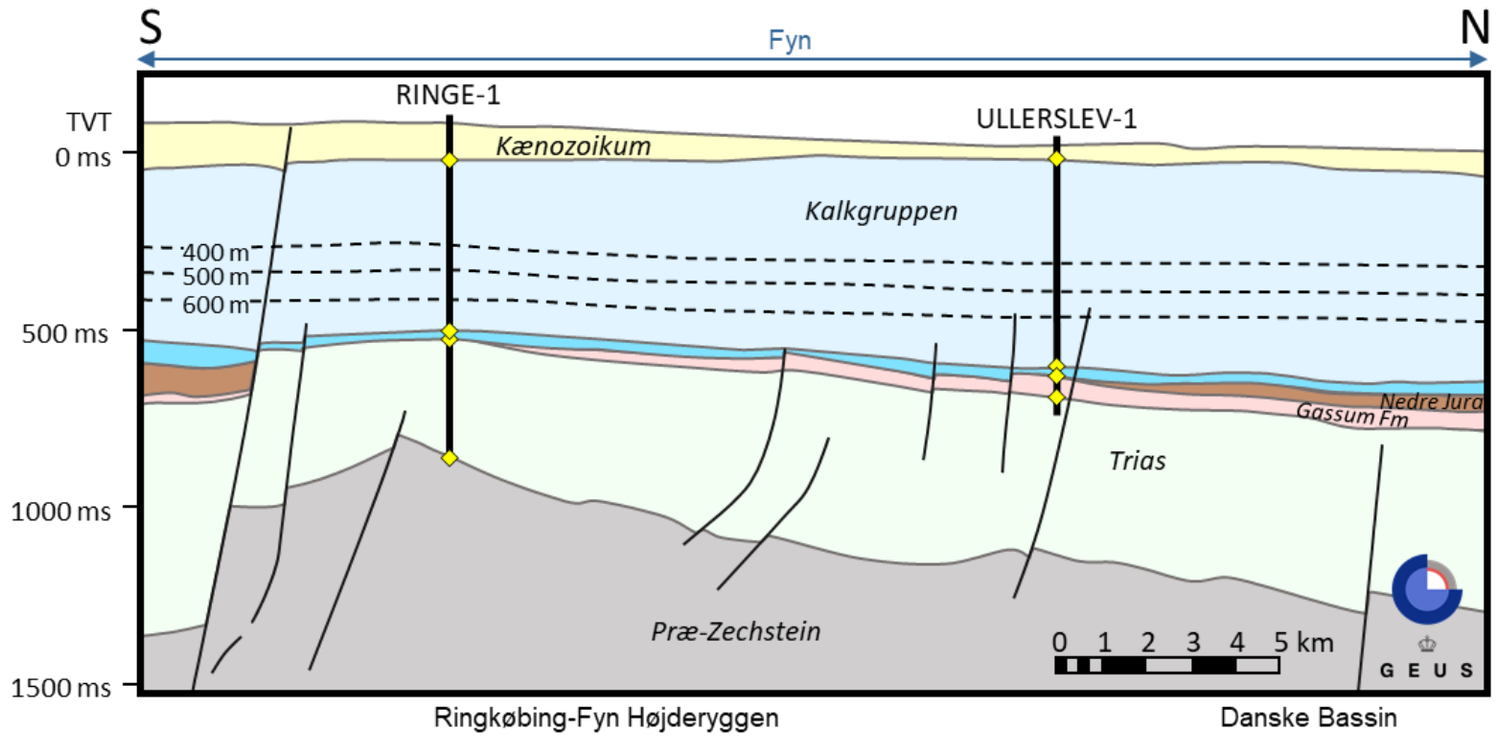


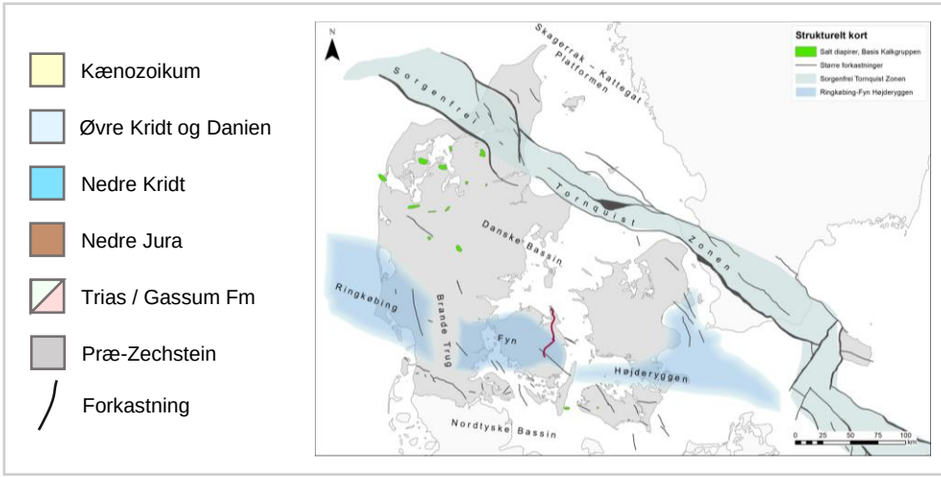


Figur 4.19. *Profil 6 er cirka 30 kilometer langt og strækker sig fra kanten af Ringkøbing-Fyn Højderyggen, som ligger nord for profilet, ud i det Nordtyske Bassin mod syd.*

Karakteristisk for profilet er, at den kænozoiske lagserie opnår tykkelser på mere end 600 meter, og at toppen af Kalkgruppen generelt ligger dybere end 400 meter. Basis af Kalkgruppen findes flere hundrede meter dybere.

Lagserierne fra Trias, Nedre Kridt og Øvre Kridt/Kalkgruppen har generelt ensartede tykkelser. Variationen af dybden til lagserierne afspejler topografien af den underliggende Zechstein saltoverflade, hvor remobilisering af saltet har resulteret i dannelsen af en saltryg, som Tønder-1 har gennemboret. På den nordlige side af saltryggen er saltlaget tyndt på grund af saltets bevægelse ind i saltryggen. Dette har resulteret i indsynkning af de overliggende formationer og dannelsen af en række forkastninger, hvoraf de fleste gennemskærer lagserien fra Trias til Kænozoikum.



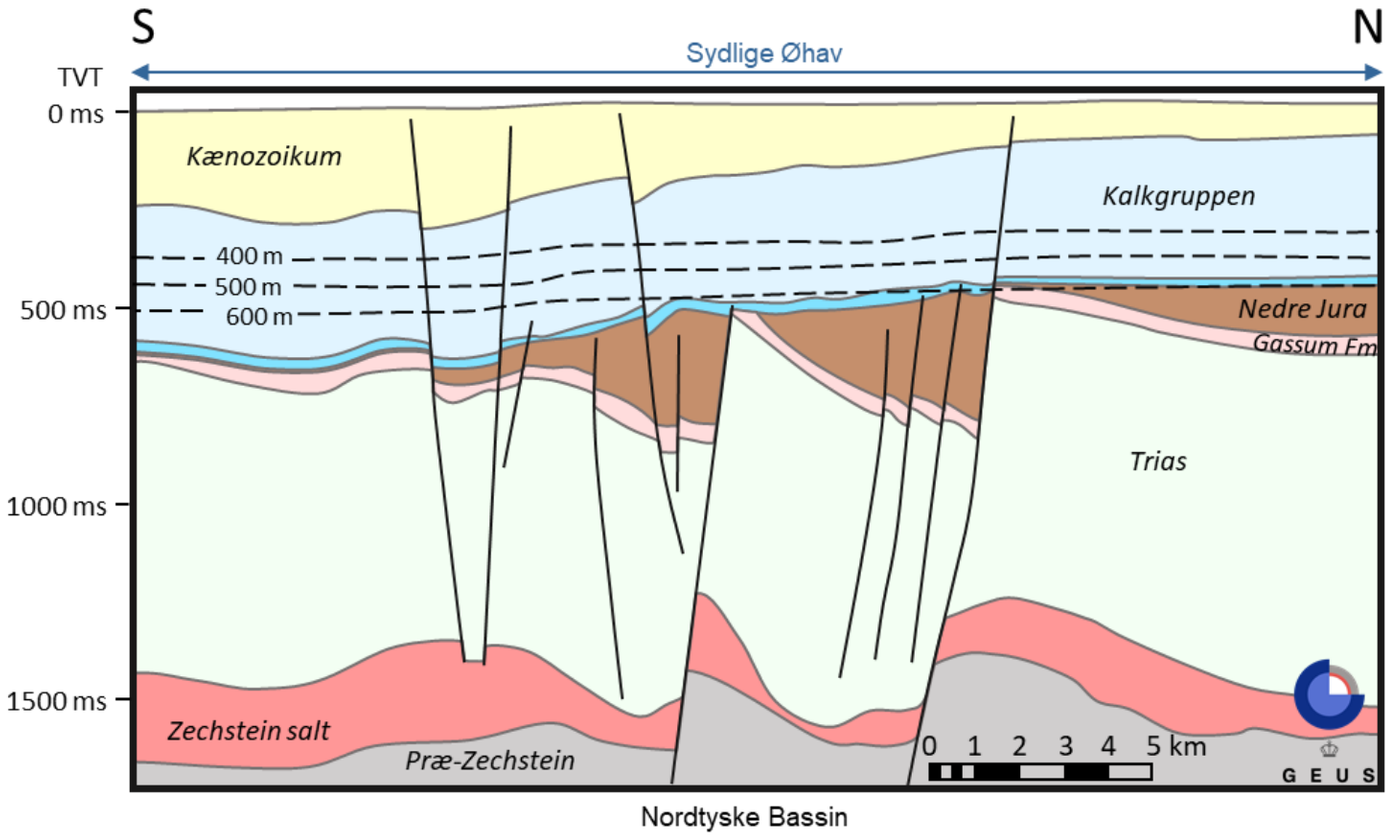


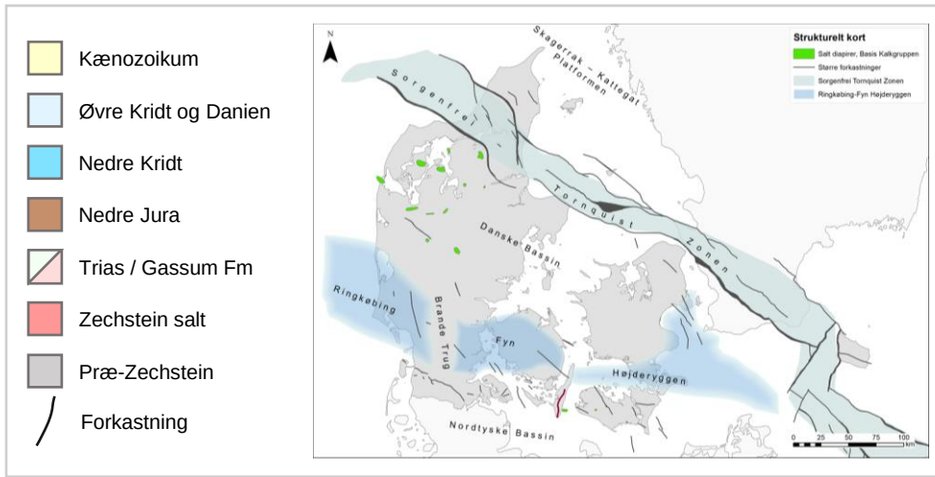
Figur 4.20. *Profil 7 er cirka 30 kilometer langt og strækker sig fra syd mod nord hen over Ringkøbing-Fyn Højderyggen.*

Karakteristisk for profilet er, at toppen af Kalkgruppen findes relativt tæt på terrænoverfladen, og basis af kalken findes dybere end 600 meter under terræn. Tykkelsen af Kalkgruppen stiger jævnt i nordlig retning.

Generelt er der ikke observeret forkastninger i den øvre del af Kalkgruppen eller i den kænozoiske lagserie. En undtagelse er den store forkastning syd for Ringe-1 boringen, som gennemskærer hele lagserien fra præ-Zechstein til terræn. Der er en stor forsætning af lagserien fra Trias til Nedre Jura hen over forkastningen, hvor formationerne findes på større dybder syd for forkastningen. Hele lagserien fra Trias til Kænozoikum er tykkere syd for forkastningen hvilket viser, at forkastningen har været aktiv helt frem til kænozoisk tid.

I de dybere dele af profilet ses en del forkastninger, der strækker sig fra stor dybde til den nedre del af Kalkgruppen.



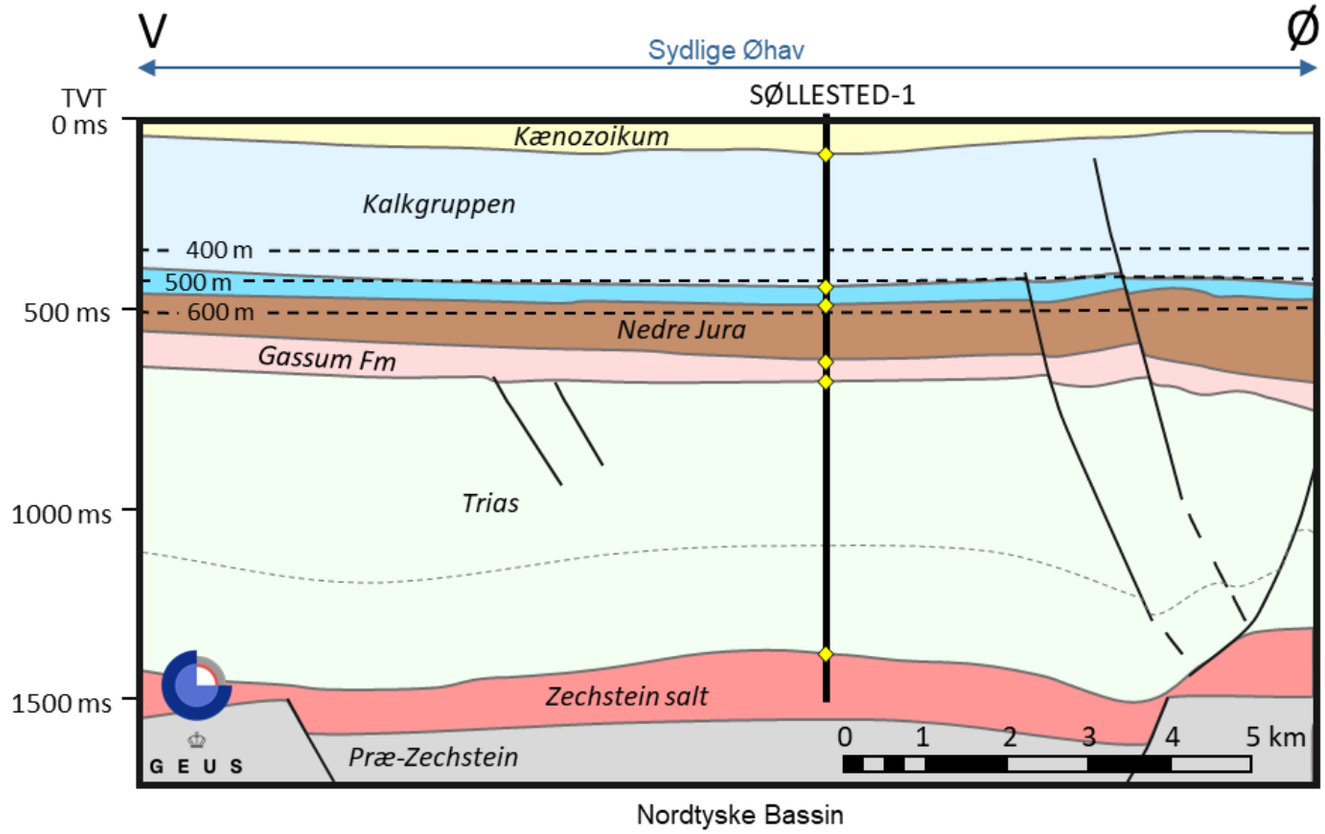


Figur 4.21. *Profil 8 er et cirka 30 kilometer langt, syd-nord orienteret profil, der strækker sig fra den nordlige margin af det Nordtyske Bassin til kanten af Ringkøbing-Fyn Højderyggen.*

Profilet er karakteriseret ved, at lagserierne fra Øvre Kridt/Kalkgruppen og Nedre Kridt i hele profilets længde har relativt ensartede tykkelser og ligger konformt med en let ondulerende nedre grænse til de nedre jurassiske og ældre formationer, der er stærkt tektonisk forstyrrede.

Langs hele profilet findes Kalkgruppen i dybdeintervallet 400-500 meter. Toppen af Kalkgruppen findes i 100 meters dybde i den nordlige ende af profilet og i 300 meters dybde i den sydlige ende. Nedre Kridt lagserien er meget tynd og findes generelt dybere end 600 meter. Undtaget herfra er området længst mod nord, hvor Nedre Kridt lokalt findes i dele af intervallet fra 500 til 600 meter. Aflejringer fra Nedre Jura findes i 600 meter og dybere. Kænozoiske sedimenter udgør den øverste del af lagserien med tykkelser fra cirka 100 meter og op til 300 meter.

I den midterste del af profilet ses en mere end 10 kilometer bred zone med flere store forkastninger, der gennemskærer lagserien fra præ-Zechstein eller Trias til nær terræn. Et resultat heraf er dannelsen af asymmetriske graben-strukturer, der er udfyldt af jurassiske sedimenter med tykkelser varierende fra 0 meter til flere hundrede meter over få kilometers afstand. En række lidt mindre forkastninger strækker sig fra de triassiske aflejringer til nær basis af Kalkgruppen.

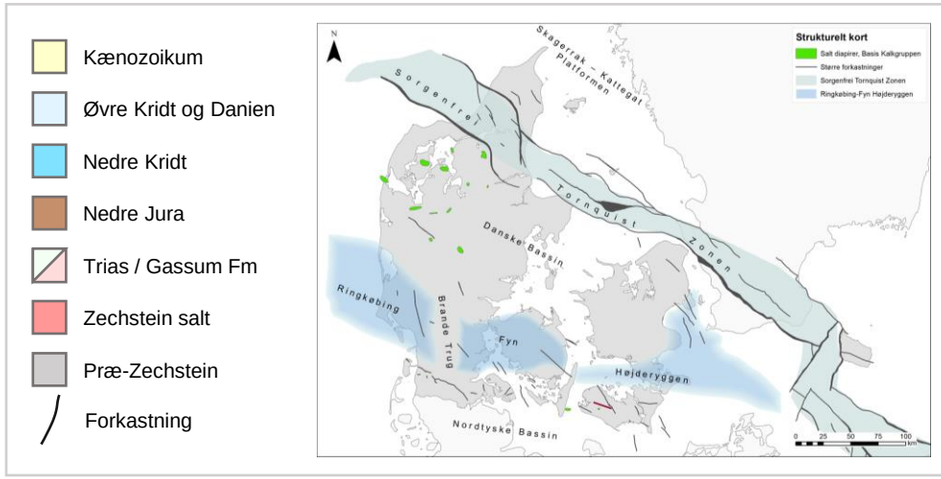


Figur 4.22. *Profil 9 er cirka 15 kilometer langt og orienteret fra vest mod øst langs den nordlige margin af det Nordtyske Bassin.*

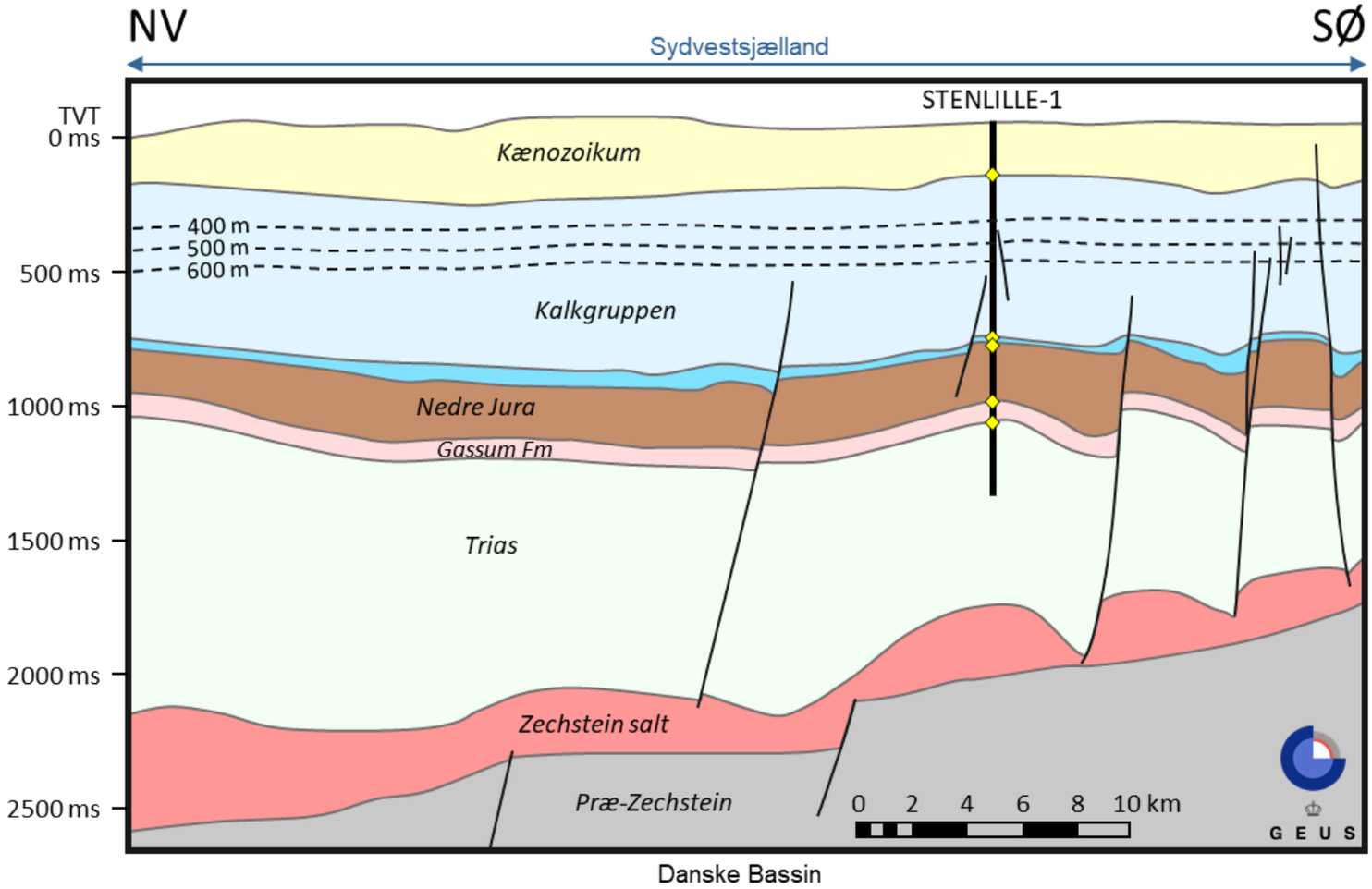
Kendetegnende for profilet er, at de øvre stratigrafiske intervaller fra Gassum Formationen til terræn har ensartede tykkelser og ligger nær-horisontalt uden større tektoniske forskydninger eller deformationer.

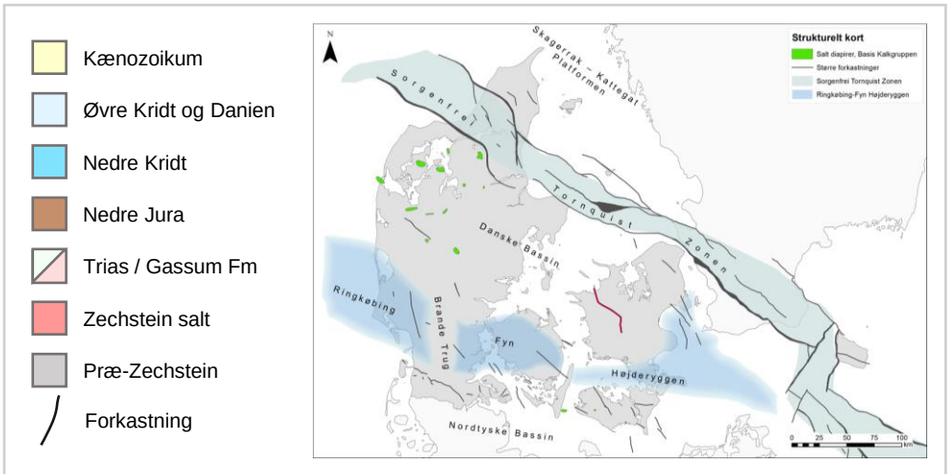
Toppen af Kalkgruppen findes terrænnært, og overordnet er kalken omkring 450 meter tyk. Den kænozoiske lagserie har en maksimal tykkelse midt i profilet (86 m i Søllested-1 boringen). Lagserien fra Nedre Kridt er 50 meter tyk, og toppen af Nedre Kridt findes i cirka 500 meters dybde. I 500-600 meters dybde under terræn findes derfor både aflejringer fra Nedre Kridt og fra den øverste del af Nedre Jura. Tykkelsen af den nedre jurassiske lagserie varierer fra omkring 100 meter mod vest til flere hundrede meter mod øst.

To større forkastninger forekommer i den østlige del af profilet, hvoraf den ene fortsætter til den øverste del af Kalkgruppen.



Figur 4.22

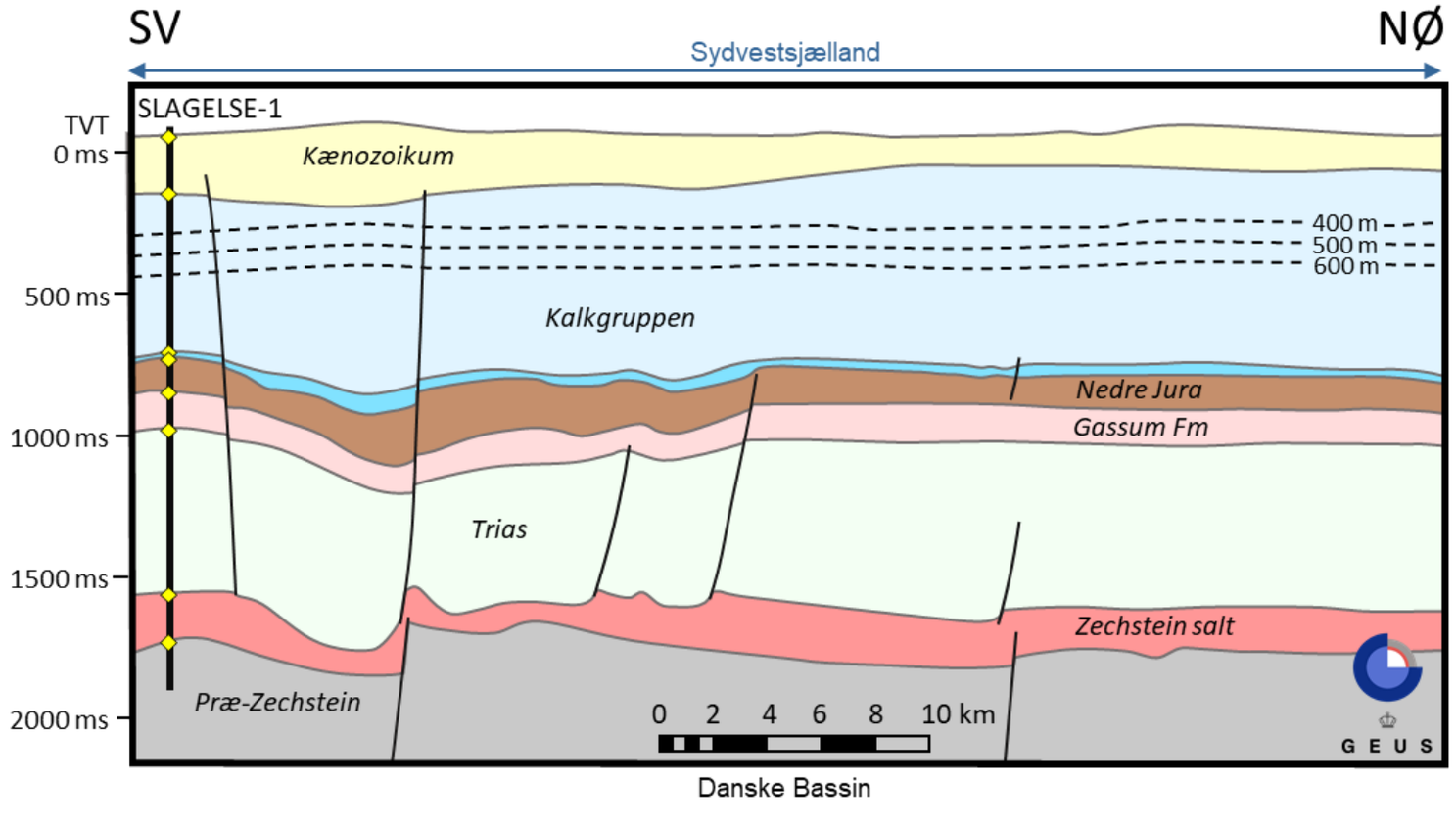




Figur 4.23. *Profil 10 er cirka 45 kilometer langt og orienteret i nordvest-sydøstlig retning igennem i den østlige del af det Danske Bassin.*

Det er karakteristisk for profilet, at Kalkgruppen har en relativt ensartet tykkelse på omkring 1000 meter (1008 meter i Stenlille-1) og overlejres af 200-300 meter kænozoiske sedimenter. Under Kalkgruppen findes en tynd nedre kretassisk lagserie og en noget tykkere nedre jurassisk lagserie.

I den sydøstlige del af profilet ses en række forkastninger, der strækker sig fra Zechstein saltet op til den nedre del af Kalkgruppen. Disse forkastninger er tydeligt relateret til remobilisering af salt, der har resulteret i tektoniske forstyrrelser op til basis af Kalkgruppen. Forkastningen længst mod sydøst er kortlagt helt op i den kænozoiske lagserie til nær terrænoverfladen og har altså været aktiv frem til sen Kænozoikum.

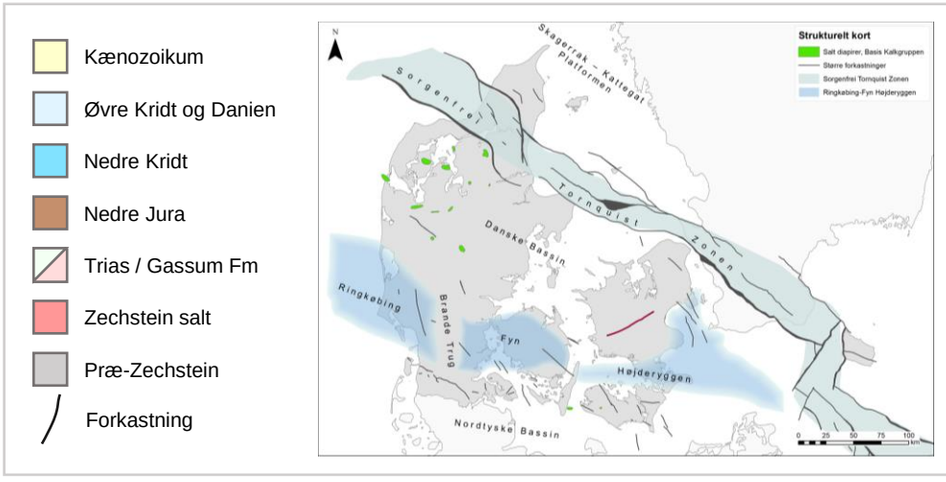


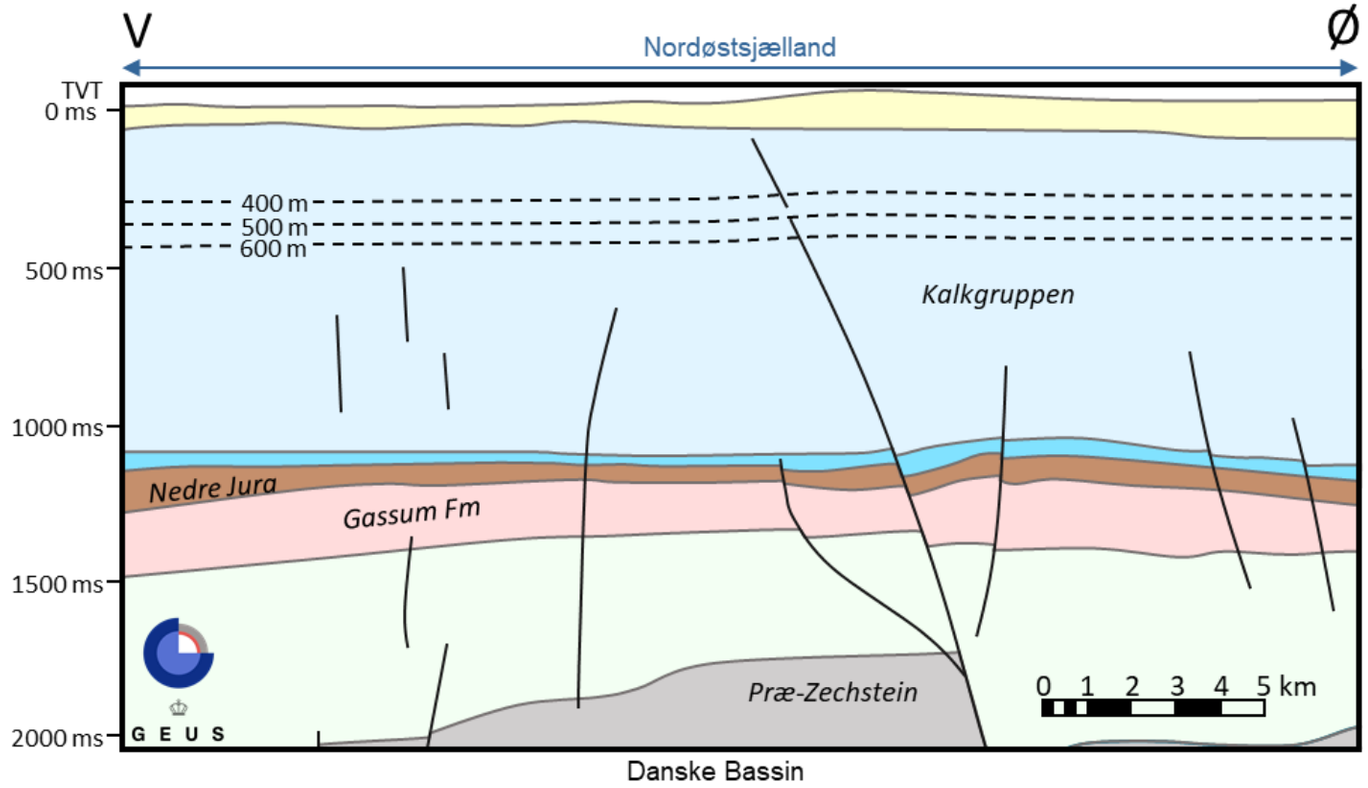
Figur 4.24. *Profil 11 er et cirka 50 kilometer langt geologisk snit gennem den østlige del af det Danske Bassin orienteret i sydvest-nordøstlig retning.*

Karakteristisk for profilet er det relativt store område i den centrale og nordlige del af profilet, hvor den øvre del af lagserien tektonisk set er uforstyrret, og hvor formationerne ligger horisontalt med relativt konstante tykkelser. Toppen af Kalkgruppen findes i 200 til 300 meters dybde, dybest nær Slagelse-1 boringen mod sydvest, og kalken har en forholdsvis ensartet tykkelse omkring på 1000 meter. Herunder findes en tynd sektion af sedimenter fra Nedre Kridt og en lidt tykkere sektion fra Nedre Jura.

I hele profilets længde findes Kalkgruppen i dybdeintervallet fra 400 meter til 500 meter, og basis af Kalkgruppen findes flere hundrede meter dybere. De øverste 200 til 300 meter af lagserien består af kænozoiske sedimenter.

To større forkastninger ses at gennemskære lagserien fra præ-Zechstein til Kænozoikum. Foruden forsætning af lagserien ses også en øget tykkelse af intervallet i området imellem de to forkastninger. Dette tyder på, at forkastningerne har været aktive frem til kænozoisk tid.

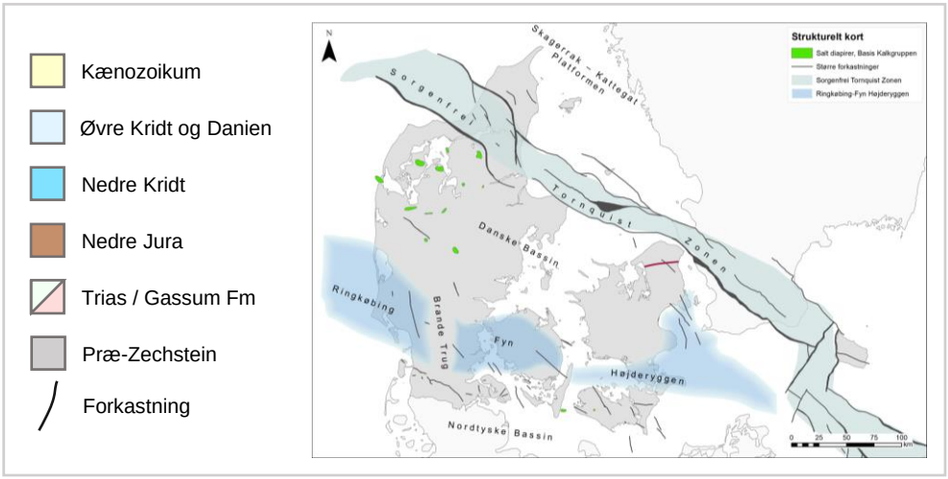




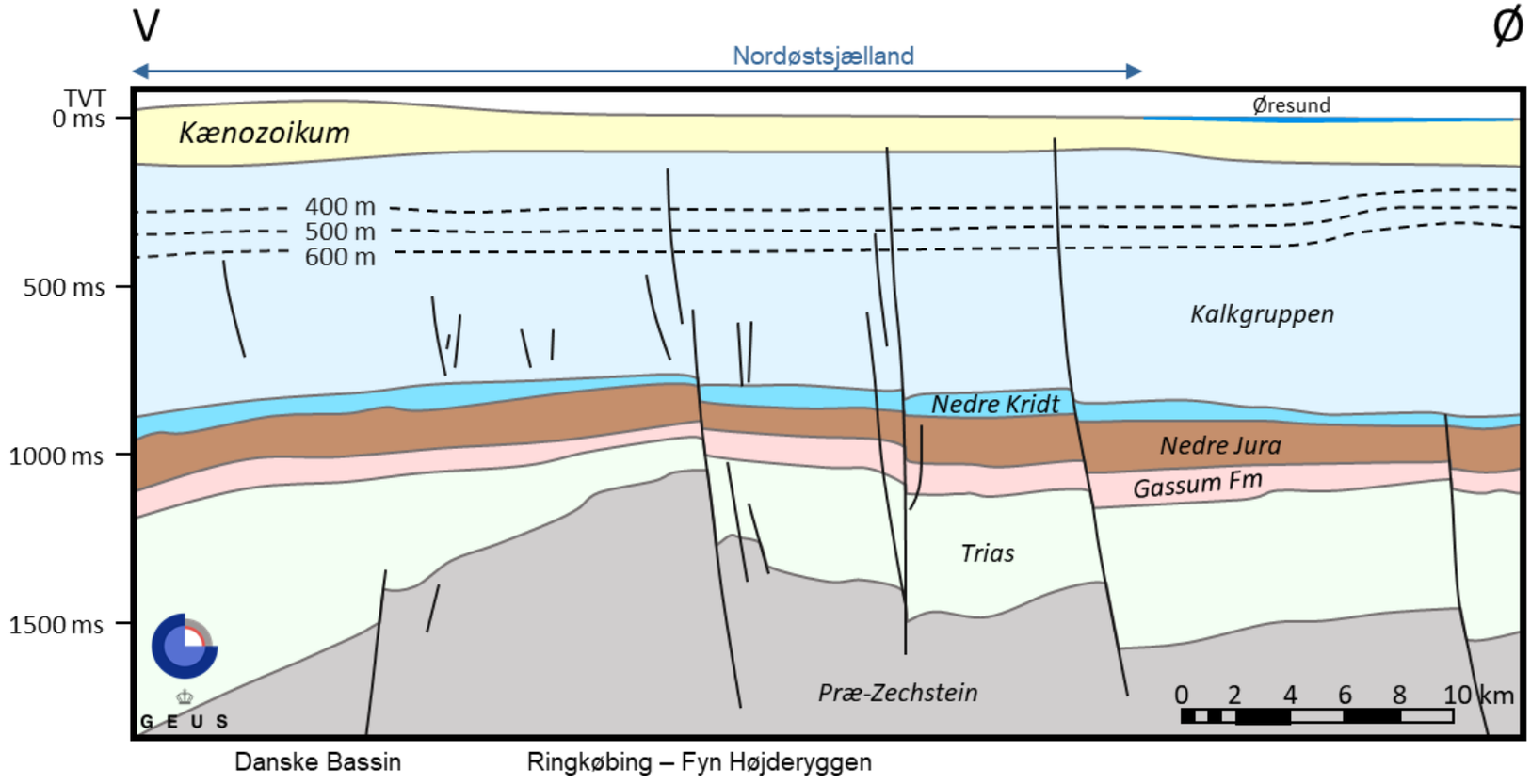
Figur 4.25. *Profil 12 viser et cirka 25 kilometer langt snit orienteret fra vest mod øst langs marginen af det Danske Bassin hen imod Sorgenfrei-Tornquist Zonen.*

Karakteristisk for det geologiske profil er, at toppen af Kalkgruppen er nær horisontal, og at Kalkgruppen har ensartet tykkelse i hele området. Toppen af Kalkgruppen findes i dybder fra 50 meter til 150 meter, og basis findes dybere end 1000 meter. I dybdeintervallet fra 400 meter til 500 meter findes kalksten fra den øvre del af Kalkgruppen i hele profilets længde.

I den dybere del af lagserien ses en række forkastninger, hvoraf de fleste strækker sig ind i den nedre del af Kalkgruppen. En stor, forgrenet forkastning midt i profilet gennemskærer lagserien fra præ-Zechstein til et niveau nær terræn. Det er derfor muligt, at den har været aktiv i nyere tid. Stejlheden af denne forkastning aftager i opadgående retning, og generelt er den mindre stejl end de øvrige forkastninger. Dette er typisk for transverse forkastninger med sideværts forskydning.



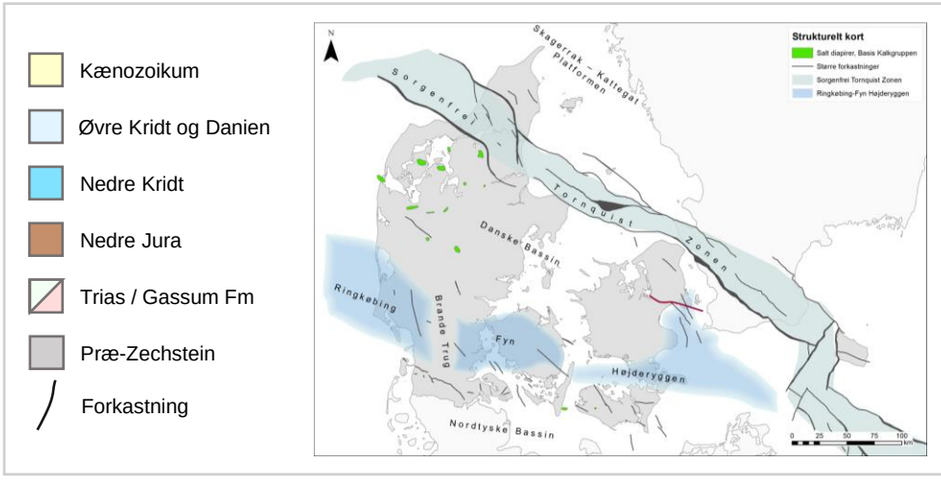
Figur 4.25



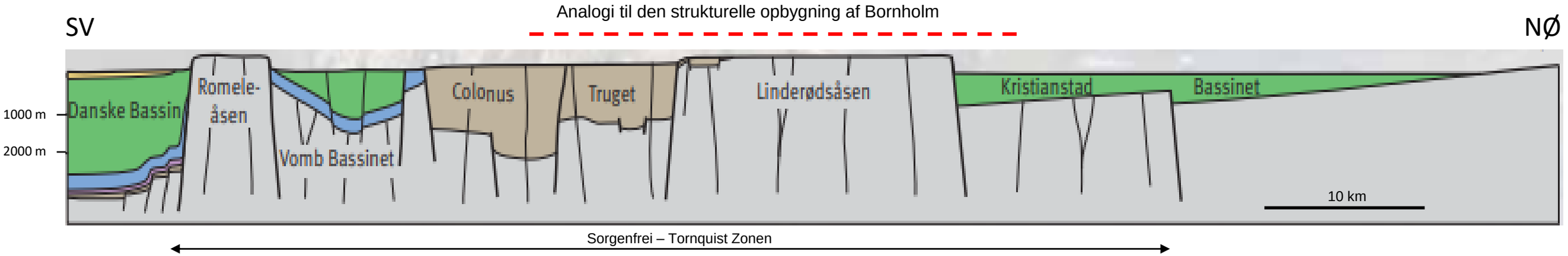
Figur 4.26. *Profil 13 viser et cirka 50 kilometer langt vest-øst orienteret snit, der strækker sig fra den østligste del af det Danske Bassin henover den nordligste del af Ringkøbing-Fyn Højderyggen.*

Karakteristisk er, at toppen af Kalkgruppen findes i dybder mellem 100 og 200 meter under terræn, og at Kalkgruppen har en relativt stor og ensartet tykkelse. Kalkgruppens basis findes på dybder langt under 600 meter, og i dybdeintervallet fra 400 meter til 500 meter findes kalksten fra den øvre del af Kalkgruppen i hele profilets længde.

I den centrale del af profilet, hen over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, ses 3 større forkastninger, der gennemskærer lagserien fra præ-Zechstein til basis af Kænozoikum. De kan derfor have været aktive i kænozoisk tid. Den midterste forkastning forgrener sig opefter til et system med en bredde på 2-3 kilometer, idet en række mindre forkastninger udgår fra hovedforkastningen. Dette er typisk for transverse forkastninger med sideværts forskydning. Desuden findes en række mindre forkastninger internt i Kalkgruppen.



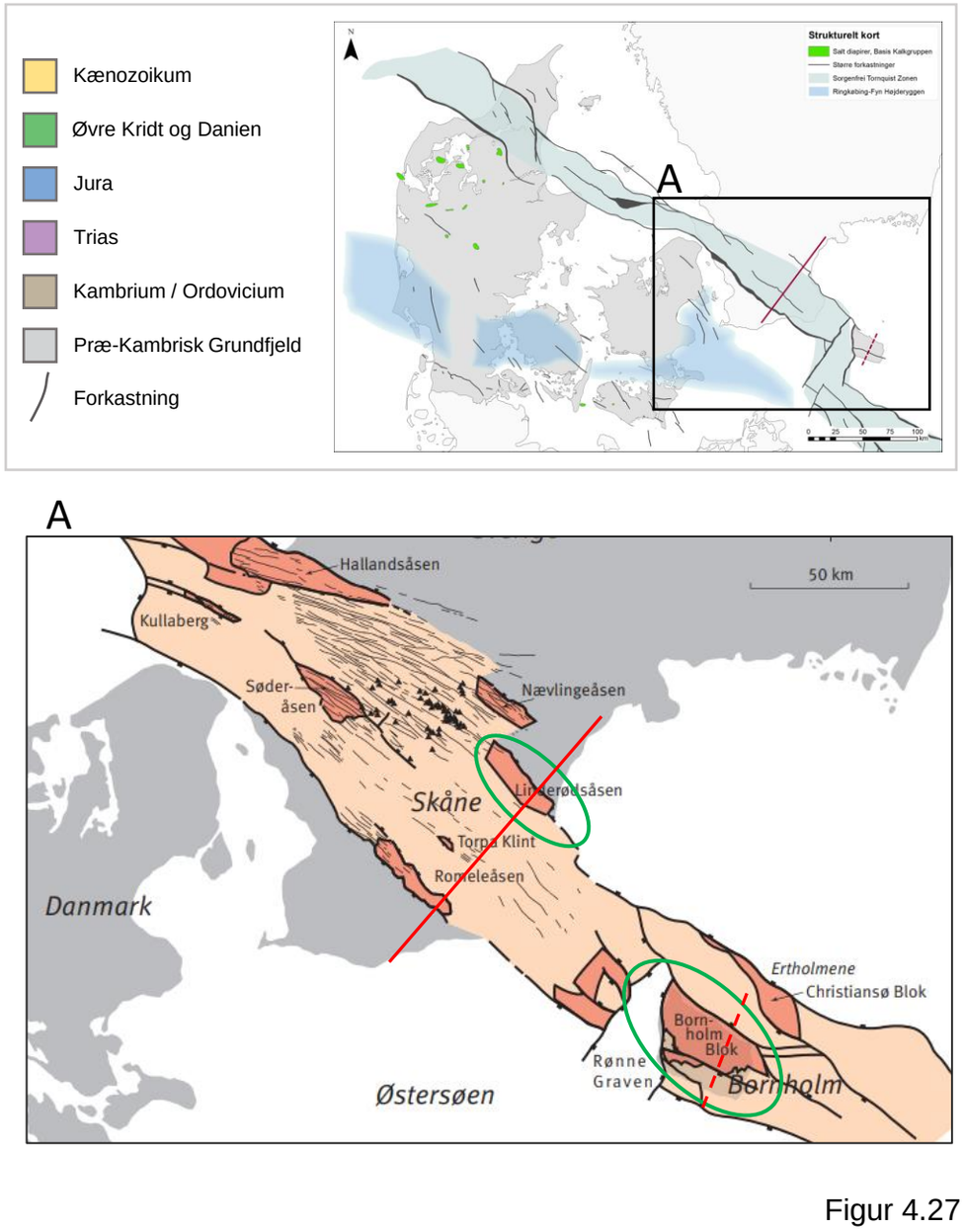
Figur 4.26



Figur 4.27. *Profil 14 er orienteret i sydvest-nordøstlig retning og beliggende i Skåne (Graversen & Holm, 2011). Det viser et snit på tværs af Sorgenfrei-Tornquist Zonen og illustrerer de strukturelle forskydninger, der er foregået i og omkring Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Det kan således anvendes som analogi til forholdene på Bornholm, som ikke er kortlagt seismisk.*

Kendetegnende for bjergarterne på profilet er, at de sedimentære aflejringer (farvet signatur) overlejrer grundfjeld (grå signatur). I områder uden sedimenter udgør grundfjeldet hele intervallet fra terrænoverfladen til meget store dybder.

Strukturelt set er profilet præget af mange forkastningsblokke, der er forskudt op i horste med mellemliggende trug. Midt i profilet ses Linderødsåsen af grundfjeld, og sydvest derfor findes Colonus Truget, der er fyldt op med sedimenter. Samme opbygning, med en horstblok og et sydligt trug, ses på Bornholm (kortsektion A herunder, Graversen & Holm, 2011), hvor øens nordlige del er en horstblok af grundfjeld, mens den sydlige del består af en række små forkastningsblokke i truget. Disse er udfyldt af sedimentære bjergarter af meget varierende alder og sammensætning.

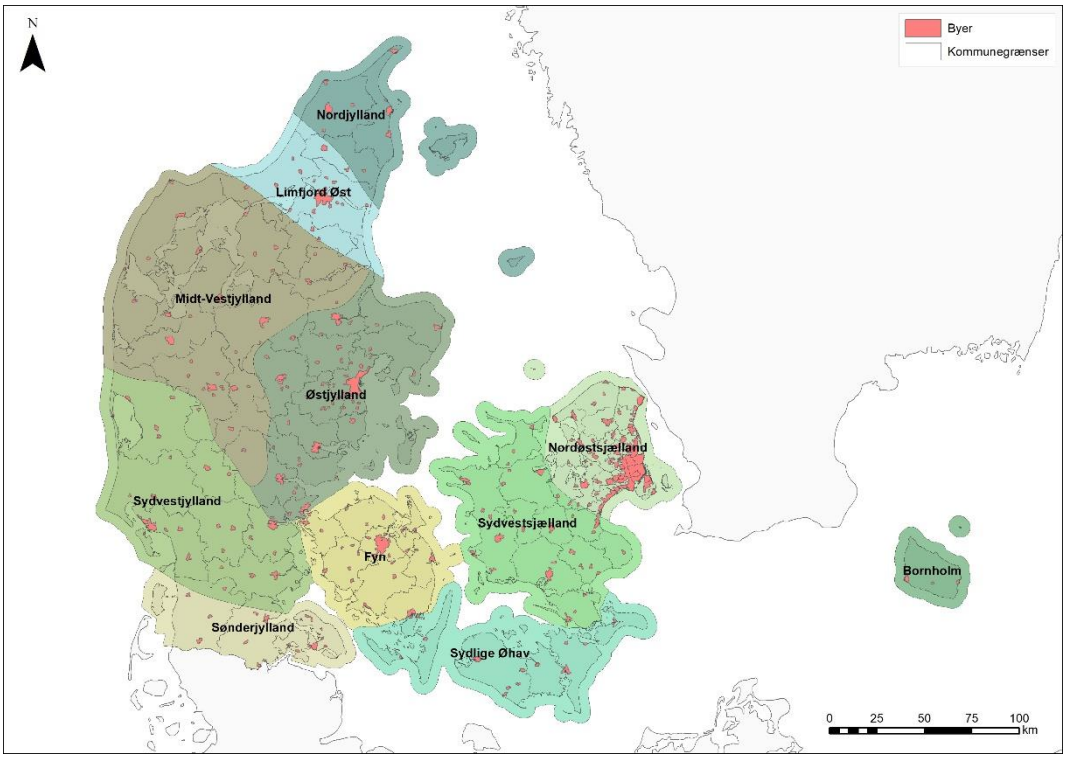


Figur 4.27

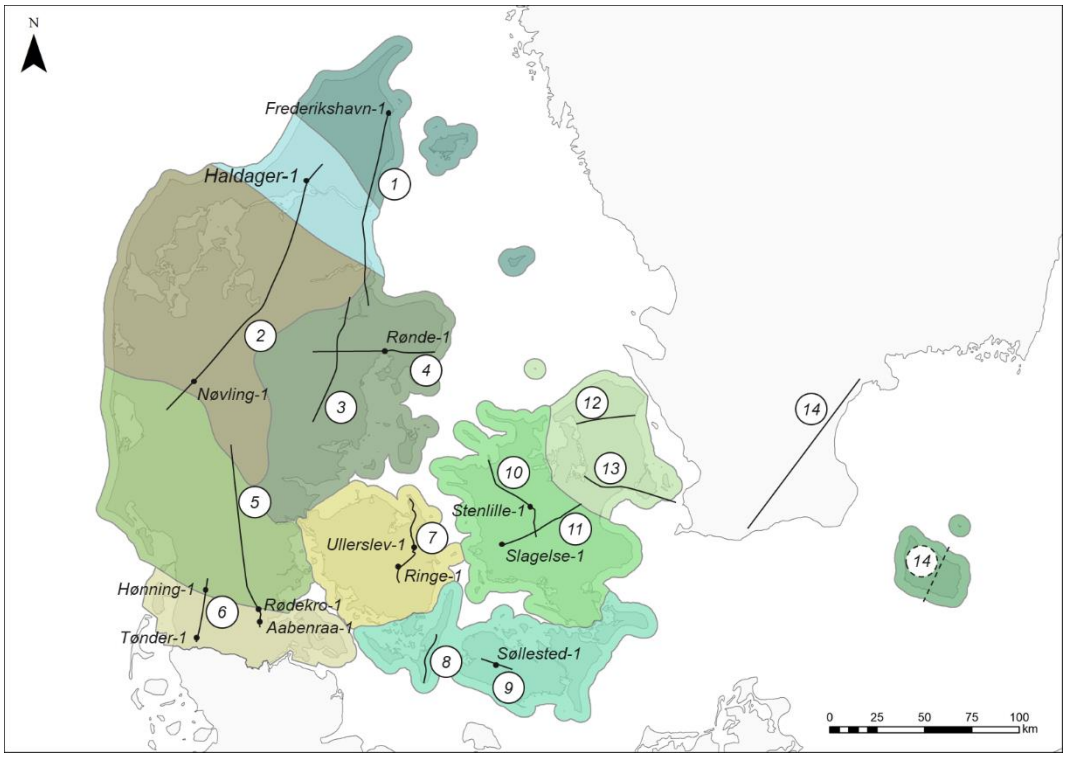
4.5 Geologisk områdeinddeling

De 11 geologiske områder, er vist med farvede polygoner på oversigtskortet i Figur 4.28, hvor også kommunegrænser og større byer er vist. Placeringen af de geologiske profiler i forhold til de geologiske områder er vist på Figur 4.29. De områder, som profilerne går igennem, er angivet ovenover de geologiske profiler i Figur 4.14-4.27, mens den strukturgeologiske ramme fremgår af se små kort indsat under profilerne. Profilerne illustrerer den typiske geologiske lagserie i områderne og den strukturelle kompleksitet. Detailkort over dybder og tykkelser for de geologiske enheder for hvert af de 11 områder, findes i Kapitel 6, og regionale oversigtskort findes i Figur 4.4 - 4.12.

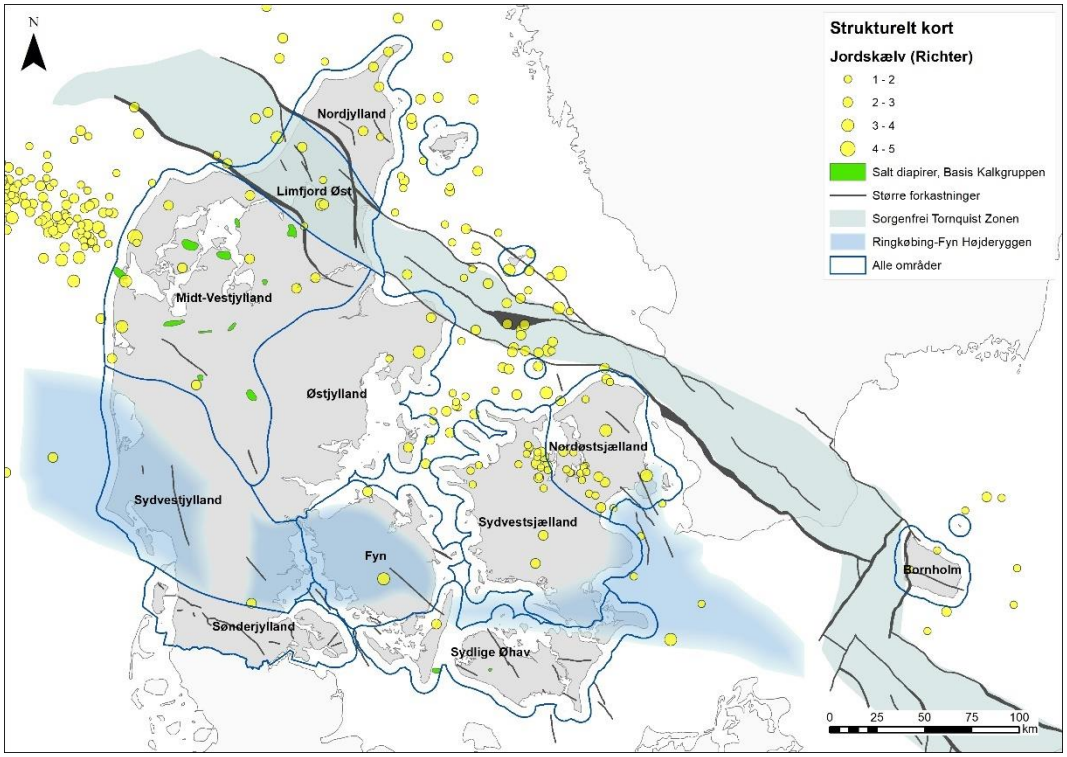
På Figur 4.30 er de definerede områder vist på det regionale strukturelle kort sammen med en markering af registrerede jordskælv. I områder med seismisk aktivitet, hvor der er identificeret større forkastninger, der fortsætter til nær terrænoverfladen, er det muligt at fremtidige bevægelser langs disse forkastninger, kan forårsage nye jordskælv. Det er derfor vigtigt at karakterisere forkastningerne baseret på de seismiske data og kortlægge deres udstrækning både vertikalt og horisontalt.



Figur 4.28. *Kortet viser de afgrænsede geologiske områder med forskellige farver sammen med kommunegrænser og større byer. Detaljerede kort for hvert område findes i Kapitel 6.*



Figur 4.29. *Lokalisering af geologiske profiler i de definerede områder. Profil nr. 14 er fra det svenske grundfjeld, der er anvendt som en illustration af, hvordan grundfjeldet på Bornholm ser ud i et geologisk profil, da seismiske data ikke findes på Bornholm.*



Figur 4.30. *Kortet viser de definerede områder på det strukturgeologisk kort med angivelse af registrerede jordskælv. Det skal bemærkes, at der kan være en usikkerhed på 20 til 30 kilometer i beregningerne af jordskælvenes epicentre (se Kapitel 2, Rapport nr. 7).*

I det følgende beskrives de geologiske karakteristika for hvert af de 11 områder.

Nordjylland
Området er karakteriseret ved en relativt tyk kænozoisk lagserie bestående af kvartære sedimenter og med mægtigheder op til 350 meter i den nordligste del af området (Figur 4.9). Dybdeintervallet 400-500 meter er domineret af kalksten fra Kalkgruppen og basis af Kalkgruppen findes i dybder ned til 700 meter. Kalkgruppen kiler ud og forsvinder mod nord som følge af opløft og erosion (Figur 4.10). På grund af tektonisk kompression findes Nedre Kridt lagserien lokalt i 400-500 meters dybde i den nordlige del af området i et smalt nordvest-sydøstligt orienteret bælte, og længere mod syd langs en større forkastning (Figur 4.5). I området findes flere dybe forkastninger, der strækker sig fra Præ-Zechstein aflejringerne ind i den øvre del af Kalkgruppen, og nær Frederikshavn-1 ses en forkastning, der strækker sig ind i den kænozoiske lagserie (Figur 4.14). Der er registreret jordskælv både på land og særligt i de nærliggende havområder.

Limfjord Øst
Området er præget af store, regionale forkastninger relateret til Sorgenfrei-Tornquist Zonen (Figur 4.14 og 4.15), hvilket kan begrænse den horisontale kontinuitet af de geologiske formationer. Kalkgruppen findes i størstedelen af området i dybdeintervallet fra 500 meter til nær terrænoverfladen, idet den kænozoiske lagserie varierer i tykkelse fra 0 til 100 meter (Figur 4.9, 4.10, 4.14 og 4.15). Nedre Kridt lagserien findes fra omkring 500 meters dybde og nedefter til dybder på 1000 meter eller mere (4.4 og 4.10). Der er registreret flere jordskælv i området, som kan være relateret til mindre bevægelser langs én eller flere af de dybe forkastninger.

Midt-Vestjylland
Midt-Vestjylland ligger i det Danske Bassin, hvor store mængder salt blev aflejret i Zechstein. Området er derfor præget af strukturel kompleksitet med mange forkastninger og saltdiapirer, hvilket resulterer i en høj grad af diskontinuitet af de geologiske formationer over korte afstande (få kilometer) både hvad angår formationernes tykkelser og dybder, og hældningen af lagene (Figur 4.14 og 4.15). Den dominerende bjergart i dybdeintervallet 400-500 meter er kalksten, og basis af Kalkgruppen findes generelt dybere end 1000 meter. Karakteristisk for Midt-Vestjylland er den generelt store tykkelse af de kænozoiske aflejringer, der i områdets sydvestlige del har tykkelser på mere end 600 meter, hvorfor der i denne del af området ikke findes kalksten i barrierezonen. Der er registreret flere jordskælv i området, som kan være forårsaget af bevægelse langs forkastninger, der strækker sig op i den kænozoiske lagserie.

Østjylland
Østjylland ligger i det Danske Bassin syd for Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Mod øst ligger toppen af Kalkgruppen enkelte steder i terrænoverfladen, hvorimod den mod sydvest findes i dybder på 200-400 meter. Tilsvarende er de kænozoiske aflejringer tynde til fraværende i områdets østlige del, og mens mægtigheder op til 400 meter forekommer mod vest (Figur 4.16 og 4.17). Kalkgruppen er generelt tykkere end 1000 meter, og dybdeintervallet 400-500 meter består således af kalksten fra Kalkgruppen. Der ses en del forkastninger i området, hvoraf nogle er associeret til dybereliggende saltstrukturer, mens andre sandsynligvis er relateret til Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Hovedparten af forkastningerne har meget lille eller

ingen forsætning og en udstrækning der stopper internt i Kalkgruppen. Enkelte forkastninger strækker sig do op i den kænozoiske lagserie. Enkelte jordskælv er registreret i området.

Sydvestjylland
Sydvestjylland området er kendetegnet ved en relativt simpel og ensartet geologisk opbygning (Figur 4.18). Den kænozoiske lagserie er i store dele af området forholdsvis tyk, særlig mod vest, hvor den lokalt har mægtigheder på mere end 600 meter. Toppen af Kalkgruppen findes i 400-500 meters dybde i stort set hele området, og kalken fortsætter nedefter til dybder under 800 meter. Enkelte dybe forkastninger ses at fortsætte helt op i den kænozoiske lagserie. Kun et enkelt jordskælv er registreret i området sydligste del.

Sønderjylland
Sønderjylland er karakteriseret ved en kænozoisk lagserie, der er mere end 400 meter tyk i størstedelen af området (Figur 4.18 og 4.19). En øst-vest orienteret saltryg findes syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Der er identificeret forholdsvis mange dybe forkastninger, der sandsynligvis er relateret til saltbevægelse, og som kan kortlægges op i den kænozoiske lagserie. De mange forkastninger resulterer i, at dybden til de forskellige formationer kan variere meget over korte afstande, samt at lagene har varierende hældninger. I et mindre område længst mod øst findes toppen af Kalkgruppen i 400 til 500 meters dybde, men i langt størstedelen af området er det den kænozoiske lagserie, der udgør intervallet fra 400-500 meter og opefter.

Fyn
Fyn er beliggende på Ringkøbing-Fyn Højderyggen og er karakteriseret ved en forholdsvis ensartet geologisk lagserie i området (Figur 4.20). Toppen af Kalkgruppen findes i dybder fra 50 til 200 meter, og kalksten findes i hele området til dybder på 700 meter eller mere. Den overliggende kænozoiske lagserie er 50-200 meter tyk, med de største mægtigheder mod sydvest. Området ligger tektonisk set stabilt på Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Der ses enkelte dybe forkastninger, der strækker sig op i den kænozoiske lagserie, og som er relateret til indsynkning i randzonen langs Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Der er registreret få jordskælv i området.

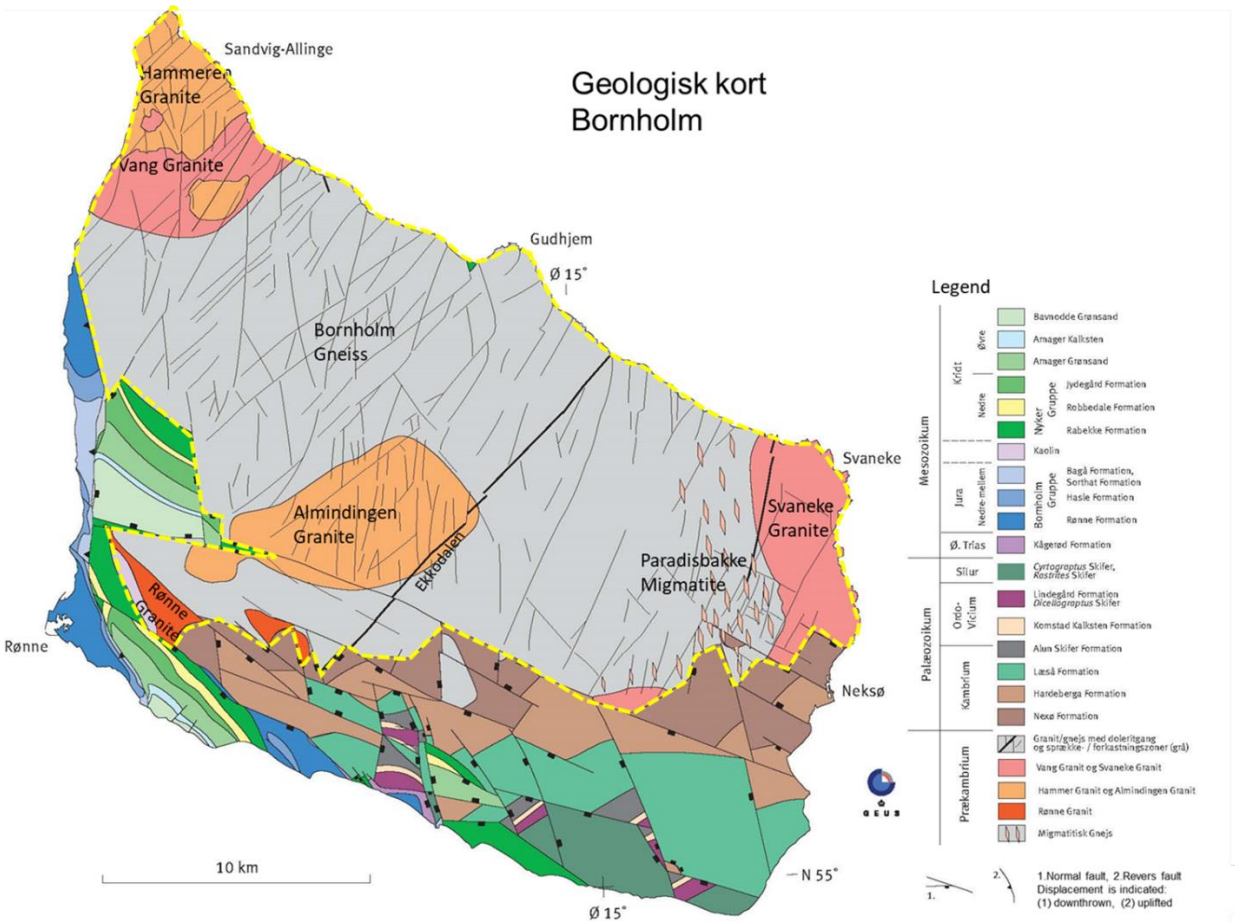
Sydlige Øhav
Det Sydlige Øhav ligger syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen i den nordligste del af det Nordtyske Bassin. Lagserien under basis af Nedre Kridt er tektonisk set kompleks, idet en række dybe forkastninger afgrænser flere smalle halv-grave, der er opfyldt af jurassiske sedimenter (Figur 4.21 og 4.22). Herudover findes dybe forkastninger, der er relateret til mobilisering af Zechstein salt. Karakteristisk for det Sydlige Øhav er, at toppen af Kalkgruppen i langt størstedelen af området findes overfladenært i dybder mellem 0 og 100 meter, og på Møn ses kalken i terrænoverfladen. I den centrale til sydlige del af området findes basis af Kalkgruppen i 400- 500 meters dybde, og Nedre Kridt samt Jura sedimenter udgør her intervallet fra 400 - 500 meter og dybere. Nedre Kridt lagserien er generelt mindre end 50metertyk, hvorimod den samlede Nedre Kridt og Jura lagserie varierer i tykkelse fra 50 meter til mere end 200 meter over relativt korte afstande (Figur 4.22). De fleste forkastninger ses at have en udstrækning, der stopper under, eller nær ved basis af Kalkgruppen, mens enkelte forkastninger fortsætter langt op i den kænozoiske lagserie og muligvis helt til terrænoverfladen. Der er registreret meget få jordskælv i området.

Sydvestsjælland
Sydvestsjælland ligger i den østlige del af det Danske Bassin nord for Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Dybden til toppen af Kalkgruppen varierer fra 0 til 400 meter, hvor de største dybder findes i områdets nordvestlige del. Toppen af Kalkgruppen findes i dybder mellem 0 og 200 meter i områdets sydøstlige del, og lokalt ligger kalken i terrænoverfladen som fx ved Stevns Klint. Mægtigheden af Kalkgruppen stiger fra omkring 700 meter i syd til mere end 1500 meter mod nord. Tykkelsen af den kænozoiske lagserie svarer til dybden til toppen af Kalkgruppen og varierer således fra 0 til 400 m. Forkastninger ses hyppigt i relation til remobilisering af underliggende salt (Figur 4.23 og 4.24). De fleste forkastninger strækker sig til umiddelbart under, eller i den nedre del af Kalkgruppen, men nogle kan kortlægges op i den kænozoiske lagserie. Der er registreret en del jordskælv i området særligt i området sydvest for Isefjord. Det er muligt, at jordskælvene er relateret til mindre bevægelser langs de eksisterende dybe forkastninger i området.

Nordøstsjælland
Nordøstsjælland området ligger i den østligste del af det Danske Bassin og grænser op til Sorgenfrei-Tornquist zonen mod øst. Toppen af Kalkgruppen ligger forholdsvis overfladenært i dybder på 50-150 meter, og kalken har i størstedelen af området mægtigheder på mere end 1500 meter. I området findes flere lateralt udbredte, dybe forkastningssystemer med sideværts forskydning, der kan kortlægges op til 50-100 meter under terræn, hvorfor de kan have været aktive i nyere tid (Figur 4.25 og 4.26). Der er registreret hyppige, mindre jordskælv i Nordøstsjælland, som sandsynligvis er relateret til områdets beliggenhed i randzonen af den aktive Sorgenfrei-Tornquist Zone. Det er muligt, at jordskælvene er forårsaget af bevægelser langs de eksisterende dybe forkastninger i området.

Bornholm
Bornholm kan geologisk set deles i to overordnede områder. Den nordlige og centrale del af område består af en horst af prækambrisk krystallinsk grundfjeld af granit og gnejs (Figur 4.31), der mange steder er blottet i terrænoverfladen og stedvist dækket af relativt tynde kvartære aflejringer. Som det fremgår at kortet med den seismiske database (Figur 4.3) er der ikke regionale seismiske data over Bornholm. En strukturel analogi til det bornholmske grundfjeld findes i Skåne (Figur 4.27), som illustrerer, hvordan det krystallinske grundfjeld normalt fortsætter til stor dybde. Grundfjeldet udgør således både den mulige værtsbjergart og den overliggende barrierebjergart.

Det sydlige område af øen er karakteriseret af sedimentære aflejringer af stærkt varierende alder og litologi, der er bevaret i en række mindre graben-strukturer (Figur 4.28 og 4.31). På grund af de mange forkastninger har de enkelte geologiske formationer typisk en meget begrænset lateral udbredelse på nogle få kilometer indenfor hver forkastningsblok, hvorfor de ikke er relevante for detaljerede geologiske undersøgelser med henblik på at afgrænse en værtsbjergart til et muligt dybt geologisk slutdepot. Enkelte større forkastninger er kortlagt i overfladen, ligesom talrige sprækker er kortlagt i grundfjeldsområdet. Der er observeret et enkelt jordskælv på Bornholm, og enkelte i Østersøen.



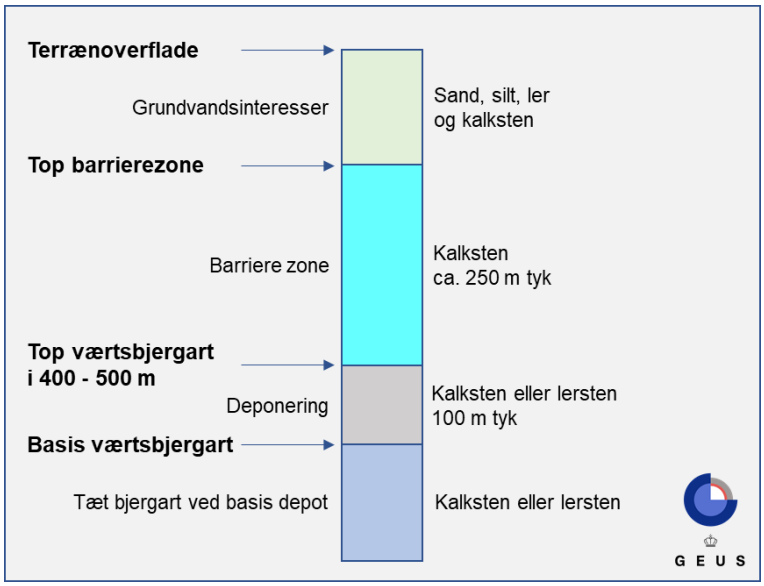
Figur 4.31. *Simplificeret geologisk kort over Bornholm ved basis af de kvartære aflejringer (modificeret efter Varv, 1977). Den gule polygon markerer udbredelsen af de krystallinske bjergarter, hvor granit og gnejs findes i, eller nær terrænoverfladen.*

5. Anvendelse af kriterier for område-evaluering

I det følgende er præsenteret en udførligbeskrivelse af forskellige geologiske parametre, der relaterer sig til de enkelte kriterier, der er anvendt ved evalueringen af de 11 geologiske områder. Herefter følger en beskrivelse af, hvordan de enkelte parametre og dernæst kriterierne er evalueret kvalitativt ud fra de geologiske egenskaber og forhold i hvert område. Evalueringen af kriterierne er præsenteret med en farvescoring. Der er generelt en begrænset datamængde og viden om de geologiske egenskaber i den danske undergrund i 500 meters dybde, og evalueringen af egenskaber og kriterier i denne fase af projektet er derfor kvalitativ.

I Figur 5.1 er som eksempel illustreret den geologiske opbygning med en værtsbjergart for deponering i 500 meters dybde og den overliggende barrierezone, hvor kalksten udgør barrierebjergarten. Det er med udgangspunkt i denne konceptuelle lagserie, at kriterier for dybder og tykkelser af værtsbjergarten og barrierebjergarten bliver evalueret.

I områder med krystallinsk grundfjeld er den vertikale lagserie mere simpel, idet både værtsbjergart og barrierebjergart består af grundfjeld, og grundvandsinteresser findes i den øverste del af grundfjeldet, hvor der er sprækker – og ellers i enkelte tilfælde kvartære aflejringer.



Figur 5.1. *Figuren viser som eksempel en konceptuel sedimentær geologisk lagserie, der illustrerer, at en værtsbjergart for dyb geologisk deponering findes i dybden omkring 500 meter med en yderligere barriere af ca. 250 meter kalksten i den overliggende barrierezone.*

5.1 Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

De af Folketingets beslutning B90 givne krav til værtsbjergarten, hvori deponering kan foregå, er en geologisk formation, der er homogen, lavpermeabel og mindst 100 meter tyk. Disse krav er givet for at sikre, at der er et ensartet og kontinuert bjergartsvolumen i

undergrunden, hvor det er muligt at etablere et depot. Bjergartens homogenitet og lave permeabilitet skal sikre at stoftransport overvejende er styret af diffusion som foregår ved ekstremt lave hastigheder. Den kortlagte formation skal være uden større forkastninger eller andre diskontinuiteter for at undgå stoftransport ved advektiv vandstrømning i fx sprækker. De overliggende formationer, der samlet refereres til som barrierebjergarten, skal også være homogene, lavpermeable og lateralt udbredte uden forkastninger, så de udgør en yderligere barriere. Den samlede geologiske barriere af værtsbjergarten og barrierebjergarten skal bidrage til at sikre retardation af radioaktive nuklider i undergrunden på både kort og lang sigt. Den kontinuerte udbredelse af formationerne over flere kilometer skal sikre, at der ikke er større zoner eller lag, hvor strømning kan foregå.

Da meget få permeabilitetsdata eksisterer fra 500 meters dybde i den danske undergrund, er evalueringen i denne første fase af slutdepotprojektet baseret på viden om tilstedeværelsen af ler og typen af lermineraler. Et højt indhold af ler og lermineraler vil være medvirkende til lave permeabiliteter i sedimentære bjergart og er derfor en favorabel egenskab. Lermineralet smectit kan medvirke til at tilbageholde radioaktive nuklider ved binding til lermineralet og dermed forsinke transporten (retardation).

Gruppen af specifikke geologiske egenskaber, der alle relaterer sig til kriterier, der har indflydelse på effektiviteten af den samlede barriere af værtsbjergarten og barrierebjergarten, er listet i Tabel 5.1 (Kriterium 1.1-1.4). Rapport nr.1 (jf. referencer i Kapitel 8.1) indeholder en detaljeret gennemgang af alle kriterier og deres relevans for sikkerhed på kort og lang sigt.

Tabel 5.1. *Liste over kriterier relateret til egenskaber af værts- og barrierebjergarten (gruppe 1) og relaterede favorable egenskaber og forhold.*

Kriterier	Favorable egenskaber
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 meter eller mere • Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 meter under terræn • Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 kilometer eller mere • Værtsbjergarten er litologisk homogen vertikalt og lateralt • Barrierebjergarten er 250 meter tyk • Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 kilometer eller mere • Barrierebjergarten er litologisk homogen vertikalt og lateralt
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport) • Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler • Værtsbjergarten indeholder smectit • Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler • Barrierebjergarten indeholder smectit
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten • Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 meter) • Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten • Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede

5.2 Naturlig stabilitet i området

En opsummering af egenskaber, der er relateret til naturlig stabilitet i et område, er angivet i Tabel 5.2. Den naturlige stabilitet på lang sigt er vigtig for at undgå at de geologiske barrierer i værts- og barrierebjergarterne bliver gennembrudt og mulige strømningsveje til overfladenære formationer bliver dannet. Strømningsveje kan dannes langs forkastningsplaner, ved dyb erosion eller ved dannelse af frakturer/mikrofrakturer i de geologiske formationer, der ligger over depotet

Stabiliteten af de geologiske barrierer og stabiliteten i området (kriterium 2.1, Tabel 5.2) evalueres på baggrund af den registrerede seismiske aktivitet i området sammenholdt med eventuel tilstedeværelse af større forkastninger, der har spor, som fortsætter til nær terrænoverfladen. Sådanne forkastninger kan muligvis re-aktiveres, hvorved midlertidige strømningsveje kan dannes langs forkastningsplanerne. Forkastninger kan identificeres og kortlægges baseret på seismiske data, hvorved man kan undgå at placere et depot nær ved eller over større forkastninger.

En anden mulig tektonisk deformationsproces, der kan bryde de geologiske barrierer på lang sigt, er glacialtektonik. Fra danske kystklinter og fra undergrunden kendes deformationer og forskydninger af sedimentpakker med mægtigheder på op til 300 meter, som er dannet under fremrykning af store isskjolde i perioder med nedisning (Rapport nr. 2 og nr. 7, jf. referencer i Kapitel 8.1). Det antages derfor, at fremtidige nedisninger vil kunne forårsage deformationer i de øverste 0-300 meter af den sedimentære lagserie, men sandsynligvis først på et tidspunkt hvor en stor del af det radioaktive materiale vil være henfaldet til ikke-radioaktive stoffer. Modeller af, hvornår næste nedisning vil forekomme med det nuværende CO_2 niveau, varierer fra 100.000 år til mere end 800.000 år (Rapport nr. 7, jf. referencer i Kapitel 8.1). Muligheden for, at der forekommer jordskælv, eksisterer kontinuert i områder med registreret seismisk aktivitet og/eller, hvor der er store forkastninger, med forkastningsplaner der strækker sig til nær terrænoverfladen. Ved scoringen af stabilitet vægter muligheden for nye jordskælv tungere end risikoen for fremtidig glacialtektonisk deformation i tilfælde af at de to egenskaber scorer forskelligt for kriterium 2.1, da jordskælv kan forekomme både i dag og i fremtiden.

Risikoen for fremtidig dyb erosion, der kan bryde de geologiske barrierer, og i værste fald blotlægge depotet, evalueres også for hvert område. Det danske landskab er præget af et småbakket terræn med små højdeforskelle, hvilket betyder, at overfladeerosion foregår relativt langsomt sammenlignet med andre dele af verden, hvor der f.eks. ses større tektonisk opløft og derfor høje erosionsrater. En proces, der lokalt kan erodere til flere hundrede meter under terræn, er glacial erosion. Dette ses i form af begravede dale, som kan indeholde varierende fyld af sand og ler. De begravede dale indeholder ofte sedimenter fra flere forskellige glaciale perioder. Dette viser, at mange af dalene har været aktive igennem flere perioder, og dermed, at erosion under nye istider vil ske fortrinsvis i de allerede etablerede dale. I områder, hvor TEM data viser, at der ikke eksisterer begravede dale, vurderes det derfor som mindre sandsynligt at dyb erosion vil forekomme ved fremtidige glaciationer. Områder med dybe fjorde eller nedskårne dale er også mere udsatte for fremtidig erosion, på samme måde som begravede dale.

Tabel 5.2. *Liste over kriterier relateret til naturlig stabilitet (gruppe 2) og relaterede favorable egenskaber og forhold.*

Kriterier	Favorable egenskaber
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 meter under terræn)
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten

5.3 Geoteknisk gennemførlighed

Evalueringen af undergrundens og bjergarternes geotekniske egenskaber og forhold er i denne fase af projektet baseret på generelle geologiske betragtninger. I projektets næste fase med dataindsamling, når et foreløbigt depotkoncept er identificeret, vil der være fokus på at undersøge og karakterisere de specifikke geotekniske egenskaber i undergrunden på de to lokaliteter i relation til depotkonceptet. En række specifikke geologiske egenskaber, der kan have indflydelse på de geotekniske egenskaber for konstruktion og effektiviteten af den samlede barriere af værtsbjergarten og barrierebjergarten, er listet i Tabel 5.3.

Erfaringer med større konstruktioner i Danmark er relateret hovedsagelig til råstofgrave, byggeri og konstruktion af broer, tunneller, metroer samt regnvandsbassiner. De dybeste konstruktioner går dog sjældent dybere end ca. 50 meter under terrænoverfladen. Et eksempel på en konstruktion, der er udført i den dybe undergrund i Danmark, er gaslagrene, der ved Stenlille er etableret i højpermeable sandsten på dybder omkring 1500 meter og ved Lille Thorup hvor kaverner til gaslagring er etableret i en tyk saltformation på ca. 2-2,5 kilometers dybde. Dette konstruktionsarbejde er foretaget igennem dybe borehuller.

En række forskellige geologiske forhold vil kunne komplicere udførelsen af konstruktioner i undergrunden, og det vurderes, at det vil være favorabelt at disse forhold ikke er til stede i området. Anisotrope stress-forhold kan forekomme i områder med tektonisk aktivitet (ses ved mange forkastninger, saltstrukturer og hældende lag), mens isotrope stressforhold vil kunne forventes i områder, hvor den geologiske lagdeling er nærhorisontal. Strømningsveje for vand findes typisk i horisontalt udbredte højporøse sandlag og i opsprækkede zoner i f.eks. kalk/granit/gnejs, og de kan udover at lede vand hen til en dyb konstruktion også føre til ustabilitet på grund af manglende styrke.

I tilfælde af at depotet kompakterer over tid, kan det resultere i dannelsen af mikro-frakturer i den omkringliggende bjergart, særligt i sedimentære bjergarter. Hvis mikrofrakturer opstår, vil tilstedeværelsen af smectit og/eller calcit potentielt kunne udfylde sprækkerne og dermed "selv-hele" bjergarten, så barriere-effektiviteten ikke kompromitteres.

Tabel 5.3. *Liste over kriterier relateret til geoteknisk gennemførlighed (gruppe 3) og relaterede favorable egenskaber og forhold.*

Kriterier	Favorable egenskaber
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling • Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker • Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker • Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag • Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag • Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet • Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 meter, er ikke til stede

5.4 Pålidelighed af nye geologiske data

Gruppen af kriterier, der vedrører nye geologiske data, er relateret til projektets næste fase med detaljerede geologiske undersøgelser. De er defineret med henblik på at vurdere om der eksisterer metoder til dataindsamling, om terrænet og de geologiske forhold er velegnede til de eksisterende metoder, og om data af god kvalitet, og nøjagtige, repræsentative værdier for egenskaber og forhold kan forventes (Tabel 5.4).

Bjergartskarakterisering er baseret på en detaljeret viden om homogeniteten/heterogenitet af både værts- og barrierebjergarten, den mineralogiske sammensætning, variationer i porøsitet og permeabilitet, samt at de indsamlede data både er pålidelige og repræsentative i en radius på flere kilometer fra et borehul. En forudsætning for at data er repræsentative indenfor en lokalitet er, at de enkelte bjergartsenheder er homogene bjergarter, ligger i samme dybde, og at der ikke er væsentlige tykkelsesvariationer over korte afstande.

Mulighederne for at kortlægge de enkelte formationers udbredelse i undergrunden afhænger dels af lagdelingen og litologiske kontraster i undergrunden samt lagenes arkitektur. Terrænoverfladens karakter har indflydelse både på hvilke geofysiske non-destruktive metoder der kan anvendes til dataindsamling og på kvaliteten og detaljegraden af de indsamlede data. Det vil f.eks. være mindre favorabelt, hvis seismiske data skal indsamles i et område med tykke umættede sandaflejringer og/eller områder, der indeholder stærkt varierende overfladelag f.eks. vekslende mellem land og søer/ vådområder, som vanskeliggør dataindsamlingen og kan påvirke kvaliteten af data.

Muligheden for at indsamle data, der kan bidrage til forudsigelser af mulige fremtidige ændringer, vurderes også. Ved at kende til geologiske processer, der tidligere har påvirket undergrunden, kan områder og geologiske strukturer, hvor fremtidige ændringer kan forekomme, kortlægges, og derved undgås som lokaliteter for slutdeponering.

Tabel 5.4 *Liste over kriterier relateret til pålidelighed af nye geologiske data (gruppe 4) og relaterede favorable egenskaber og forhold.*

Kriterier	Favorable egenskaber
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder • Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder • Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber • Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Litologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data • Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges • Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data

5.5 Scoring af de geologiske egenskaber baseret på kriterier

En kvalitativ evaluering af, i hvor høj grad de enkelte kriterier er opfyldt for hvert område, er foretaget baseret på eksisterende data og viden. Evalueringen er baseret på de generelle, gennemsnitlige forhold i et område, og tager ikke højde for variationer, der forekommer lokalt i mindre dele af området. Når et kriterium er scoret som favorabelt betyder det, at de relaterede egenskaber forventes at være overvejende favorable i størstedelen af området.

Evalueringen af kriterierne er foretaget i to trin. Det første trin er en evaluering af de specifikke geologiske egenskaber, der er relateret til kriteriet (Tabel 5.1-5.4), hvor hver egenskab bliver tildelt en del-score (Figur 5.2). Baseret på de samlede del-scoringer bliver hvert kriterium scoret på en skala med tre trin (Figur 5.3). Skalaen skelner mellem favorabel, forventet favorabel og mindre favorabel baseret på, i hvilken grad de relaterede geologiske egenskaber er opfyldt. Scoringen viser en samlet evaluering af de geologiske egenskaber og det nuværende konfidensniveau, som er bestemt ved mængden og kvaliteten (pålideligheden) af de eksisterende data. Den kvalitative evaluering af kriterierne med brug af en 3-trins farveskala udgør en relativt simpel måde at præsentere en samlet vurdering af hvilke geologiske egenskaber der er favorable eller mindre favorable i området sammenholdt med det generelle datagrundlag for evalueringen.

Evaluering af geologiske egenskaber og forhold relateret til kriterierne:

- \- Data eller data fra analoger viser overvejende ufavorable egenskaber eller forhold
- \+ Data viser delvist favorable forhold, eller data fra analoger tyder på favorable egenskaber og forhold
- ++ Data fra området viser overvejende farvorable forhold

Figur 5.2. *De specifikke geologiske egenskaber, der er listet for hvert kriterium i Tabel 5.1-5.4, er evalueret og tildelt en del-score ved anvendelse af skalaen vist herover. Del-scoringerne af hvert kriterium udgør grundlaget for den samlede scoring af kriteriet, der er præsenteret ved anvendelse af farveskalaen som vist i Figur 5.3. Del-scoringen af parametre og egenskaber for kriterier i alle områderne findes i Appendix A.*

Der er lagt stor vægt på at evalueringen af de enkelte kriterier er konsistent i alle områder med hensyn til hvordan del-scoringerne vægtes og hvor mange + og ++ der f.eks. resulterer i en gul eller grøn score. Alle område-evalueringer med del-scoringer og relevante kommentarer findes i Appendix A.

En grøn score af et kriterium indikerer, at de relaterede egenskaber overvejende er favorable, og at vurderingen er baseret på tilstedeværelsen af repræsentative data af høj troværdighed (kvalitet). Det betyder samtidig, at der er en relativt lille risiko for at indsamling af nye data i området vil påvise tilstedeværelsen af mindre favorable egenskaber. For en favorabel score af kriterium 1.1 om rumlig udbredelse kræves, at der i området både er en horisontalt udbredt 100 meter tyk værtsbjergart i dybden omkring 500 m, og en horisontalt udbredt overliggende barrierebjergart, da disse to tilsammen udgør den geologiske barriere. Generelt for evaluering af kriterier, der omfatter egenskaber relateret til både værtsbjergart og barrierebjergarter, vil scoren af værtsbjergarten være styrende for den samlede vurdering, idet de krav der er givet til geologien i B90 (Folketinget, 2018), alle er defineret for værtsbjergarten.

Score	Understøttende data
Favorabel	Pålidelige data viser at de nødvendige egenskaber er til stede. Lille usikkerhed.
Potentielt Favorabel	Data og/eller analoger indikerer at de nødvendige egenskaber kan forventes at være til stede, dog med en vis usikkerhed.
Mindre favorabel	Pålidelige data viser at de geologiske egenskaber generelt ikke opfylder de definerede kriterier.

Figur 5.3. *Oversigt over betydningen af farvescoringer anvendt for evaluering af kriterier.*

En gul score for et kriterium viser, at nogle af de nødvendige egenskaber vurderes at være favorable baseret på begrænsede data og/eller tvivlsom data kvalitet eller geologiske modeller og analogier (samme type bjergart og/eller geologisk ramme) præsenteret i litteraturen. Et eksempel på data af tvivlsom kvalitet kan være borehulslogs med lille opløselighed fra en dyb boring, eller data fra en boring i et specifikt område relevant stratigrafisk interval for det

specifikke område, men som er udført langt fra området. En gul score betyder således, at de tilgængelige data, der tyder på favorable egenskaber, er begrænsede, eller med betydelig usikkerhed, og dermed at evalueringen er mere usikker. Den gule score betyder også, at indsamling af nye data forventes at kunne bekræfte tilstedeværelsen af favorable egenskaber med kun lille risiko for, at favorable egenskaber ikke vil blive påvist ved indsamling af nye data.

Den orange score anvendes, når der eksisterer pålidelige og repræsentative data, som viser, at de geologiske forhold og egenskaber er mindre favorable og generelt ikke opfylder de definerede kriterier. Særligt for evalueringen af den rumlige udbredelse (kriterium 1.1) vil en mindre favorabel score af en kritisk egenskab føre til en orange score. Dette skyldes, at en lokalitet for et slutdepot i 500 meters dybde er afhængig af tilstedeværelsen af både en horisontal kontinuert værtsbjergart og en barriere bjergart. I områder hvor den horisontale kontinuitet er mindre favorabel på grund af mange forkastninger, vil det som eksempel være et tidskrævende og omfattende arbejde at identificere muligt egnede undersøgelseslokaliteter med en risiko for at de nødvendige geologiske egenskaber for et specifikt slutdepotkoncept, ikke kan påvises ved yderligere undersøgelser. Hvis der samtidig er registreret hyppige jordskælv i området, kan der være en risiko for en større reaktivering af forkastningerne, som betyder, at identificering og kortlægning af forkastninger på og omkring lokaliteten er meget vigtig i relation til den naturlige stabilitet.

En orange score af et eller flere kriterier betyder ikke nødvendigvis, at ingen lokaliteter i området kan anvendes til slutdeponering i 500 meters dybde. Men det betyder, at de egenskaber, der er mindre favorable, enten skal opvejes af andre egenskaber, der er favorable, eller at de mindre favorable egenskaber kan kompenseres for, og håndteres med tekniske løsninger i depotdesign og konstruktion. Et eksempel kunne være et område, hvor der kun findes 150 meter kalksten i barrierezonen, men hvor de geokemiske forhold i høj grad ville bidrage til retardation af radioaktive nuklider. Et andet eksempel kunne være, at en 120 meter tyk, tæt, homogen og lateral udbredt lersten findes i dybden 600 til 800 meter, hvilket er dybere end det definerede krav. På en sådan lokalitet kunne det eventuelt være en mulighed at vælge at deponere det radioaktive affald dybere end 500 m, afhængigt af om et design koncept og en teknisk løsning kan identificeres for en større dybde.

6. Område karakterisering og evaluering

For hvert område er der foretaget en kvalitativ evaluering af, i hvilken grad de definerede geologiske kriterier er favorable. For nogle områder er der foretaget evalueringer lavet for både lersten og kalksten, hvis begge bjergarter findes i dybdeintervallet omkring 500 meter. Evalueringen sker på baggrund af de generelle egenskaber for kalksten, lersten og grundfjeld, som er beskrevet i Kapitel 3, samt lokale geologiske forhold, som fremgår af kort og figurer, der er præsenteret for hvert område.

For hvert område gives en kort opsummering af hvilke geologiske egenskaber, der er favorable, hvilke der eventuelt er mindre favorable, og hvad det betyder for muligheden for at udvælge lokaliteter til geologiske detailundersøgelser i projektets næste fase.

Henvisninger er givet til relevante geologiske profiler, der illustrerer områdernes typiske stratigrafiske og strukturgeologiske opbygning, samt karakteren af forkastninger. Herefter følger for hvert område figurer og kort med forskellige geografiske og geologiske temaer, der er anvendt som baggrund for evalueringen. For fuldstændighedens skyld er detaljerede dybde- og tykkelseskort vist for alle de kortlagte intervaller i alle områder.

Indledningsvist præsenteres er et kort over områdets geografiske udstrækning i forhold til kommunegrænser og et kort, der viser den seismiske database og dybe boringer. Herefter følger litologiske tolkninger af borehulslogs og eventuelle borekernebeskrivelser fra repræsentative boringer af intervallet 0 til 800 meter. Disse figurer illustrerer litologien og homogeniteten (eller inhomogeniteten) af både den mulige værtsbjergart, der skal have en tykkelse på 100 meter i dybden omkring 500 meter, og den overliggende kalk, der er barrierebjergart i alle områder bortset fra grundfjeldet på Bornholm (som illustreret i Figur 2.3 og 5.1). Tolkede petrofysiske logs fra borehuller er anvendt til evaluering af kriterierne 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 2.3, 3.1, 3.2 og 4.2.

Detaljerede dybde og tykkelseskort er vist for de samme intervaller som for de regionale kort, der er præsenteret i Kapitel 4 (Figur 4.4-4.12), hvor der også er en generel introduktion til hvordan informationen på kortene læses. De geologiske kort og profiler bidrager til grundlaget for scoringen af de geologiske egenskaber og forhold relateret til kriterierne: 1.1, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1 og 4.3

Kort over registrerede jordskælv og kortlagte større strukturelle elementer samt TEM data og kortlagte begravede dale indgår i evalueringen af områdernes naturlige stabilitet og risiko for erosion. Endelig er der kort over arealanvendelse, hvor særligt større vanddækkede områder (søer, fjorde), eller områder, der strækker sig over meget forskellige typer af terrænoverflade, kan have betydning for fremtidig dataindsamling.

En detaljeret evaluering med del-scoringer af de geologiske egenskaber, der danner baggrund for den samlede evaluering af kriterierne i hvert område, findes i Appendix A. Lokale variationer indenfor de enkelte områder indgår ikke i scoringen, men i de tilfælde det skønnes relevant, er der inkluderet bemærkninger om variationer eller særlige forhold.

Ved evalueringen er der er lagt stor vægt på, at kriterierne er evalueret konsistent, så samme type viden og datagrundlag sammen med specifikke lokale egenskaber og forhold er vægtet ens i de forskellige områder.

6.1 Nordjylland

I størstedelen af området findes kalksten i dybdeintervallet 400 til 500 meter. Dog findes lersten fra Nedre Kridt intervallet også lokalt i denne dybde (Figur 4.14 og 6.6). Da der således er mulighed for både kalksten og lersten som værtsbjergarter, er der foretaget en evaluering af begge scenarier. Generelt for begge scenarier bemærkes det, at der ses en del forkastninger, både transverse og normale med vertikal forsætning, hvilket kan begrænse den horisontale kontinuitet af de geologiske formationer i området (Figur 4.14).

Lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart
Lersten findes i Nedre Kridt og Jura lagserien, der samlet set er mere end 500 meter tyk, og som i områdets nordligste del findes lokalt i dybdeintervallet 400 til 500 meter (Figur 6.6 og 6.7). Den orange score af kriterium 1.1 skyldes, at der ikke er påvist lerlag, med en tykkelse på 100 meter. Lagserien ikke er homogen, da den indeholder vekslende lag af ler, silt og finsand (Figur. 6.3 og 6.4, Nedre Kridt i Frederikshavn-1 boringen og Figur 6.19 i Børglum-1 boringen). Kalksten i barrierezonen er 0-200 meter tyk, dvs. mindre end 250 meter (typisk 0-200 m) og kalken bliver tyndere og kiler helt ud mod nord (Figur 4.14 og 6.10). Kvartære aflejringer findes med mægtigheder op til 350 meter i områdets nordlige del (Figur 6.9).

De jurassiske sedimenter, der findes umiddelbart under det potentielle værtsbjergartsinterval i Nedre Kridt lagserien, indeholder sandlag, der kan fungere som strømningsveje og derfor er kriterium 1.4 scoret som mindre favorabel (orange).

Den strukturelle kompleksitet i undergrunden er også årsagen til at området, scorer gul på mulighederne for bjergartskarakterisering fra nye data. Det skyldes, at det vil være forholdsvis vanskeligt at identificere lokaliteter, hvor nye boringer, der borer igennem den geologiske lagserie, kan forventes at være repræsentative for hele lokaliteten på grund af de store variationer i tykkelser og dybder over korte afstande.

Tabel 6.1. *Evaluering af lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart, Nordjylland.*

Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	

Kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart

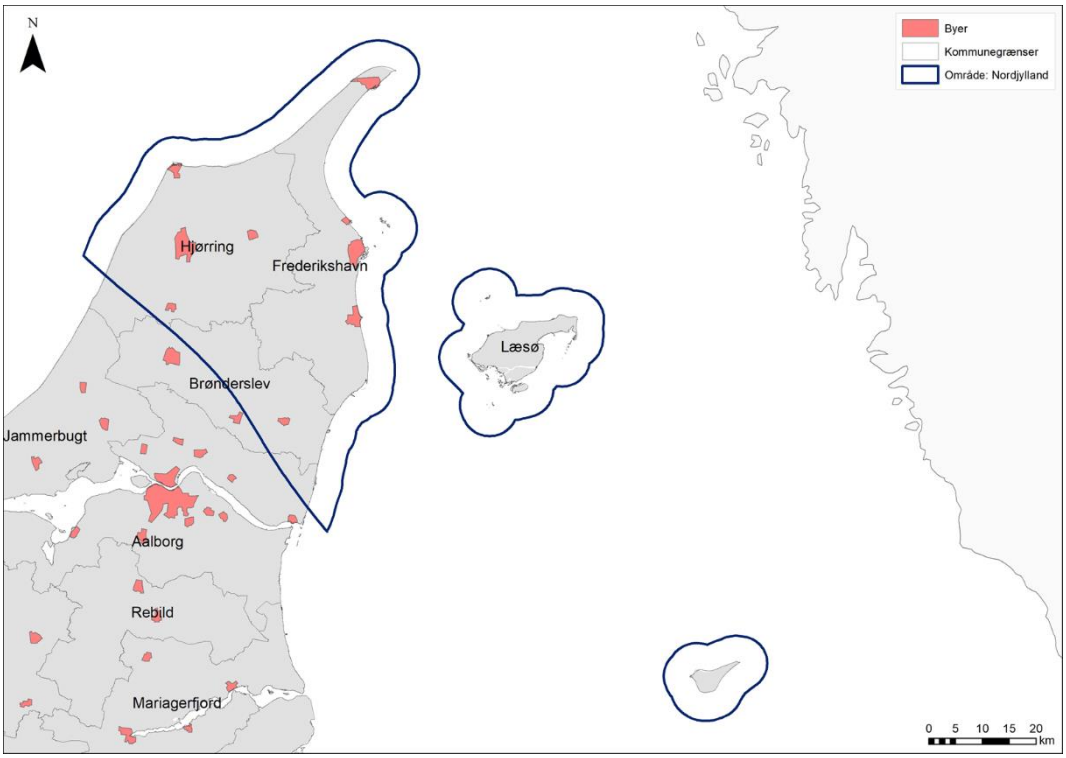
Kalksten findes i størstedelen af området i intervallet 200 – 400 meter under terræn, og længst mod nord er kalken kilet ud pga. erosion. Kalksten findes således kun i områdets sydligste del i dybder omkring 500 meter med mægtigheder, så den kan udgøre både barriere og værtsbjergart. Tykkelsen af kalken i barrierezonen varierer fra 0 til 200 meter.

Den rumlige udbredelse (kriterium 1.1) er derfor scoret som mindre favorabel (orange), da kalksten i størstedelen af området ikke findes i dybder omkring 500 meter, og heller ikke har den nødvendige tykkelse i den overliggende barrierezone. Kvartære aflejringer findes med mægtigheder op til 350 meter i områdets nordlige del og betragtes ikke som barrierebjergart. Ukonsolideret sand i den kænozoiske lagserie kan være en udfordring for den geotekniske gennemførlighed, hvis et depot etableres på større dybde end 500 meter i et område med store mægtigheder af kænozoiske (kvartære) sedimenter.

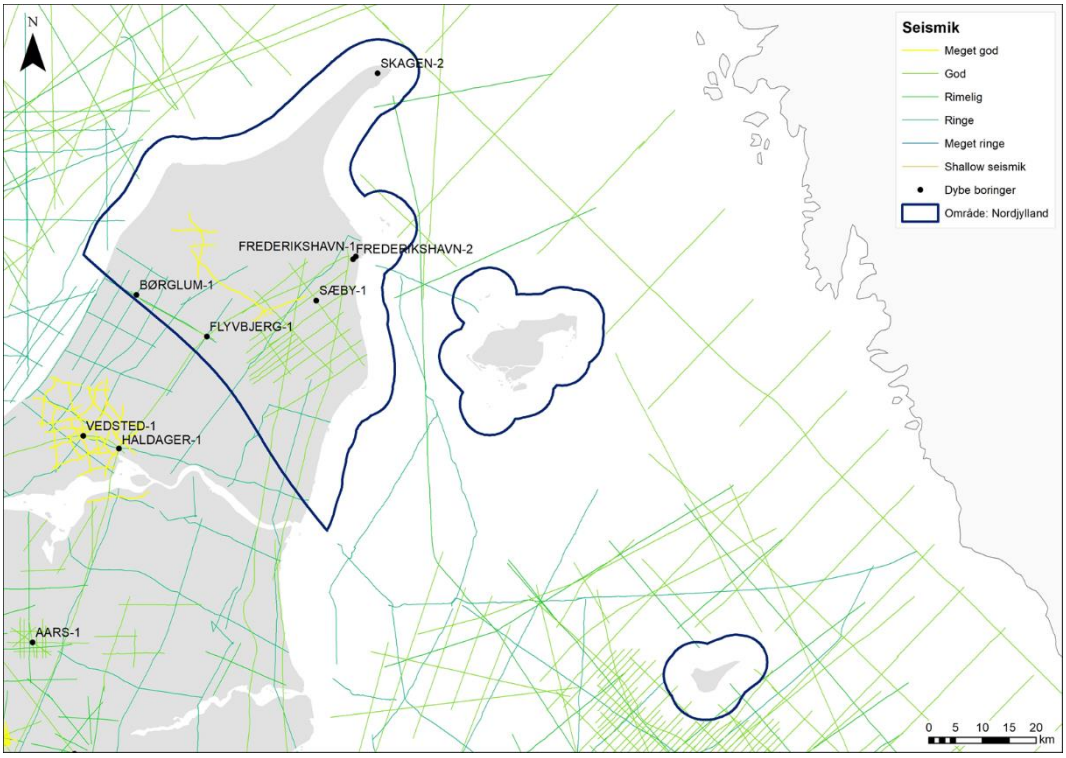
Den strukturelle kompleksitet i undergrunden er årsagen til, at området, scorer gul på mulighederne for bjergartskarakterisering fra nye data. Det skyldes, at det vil være forholdsvis vanskeligt at identificere lokaliteter, hvor nye boringer, der borer igennem den geologiske lagserie, kan forventes at være repræsentative for hele lokaliteten, på grund af de store variationer i tykkelser og dybder over korte afstande.

Tabel 6.2. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Nordjylland.*

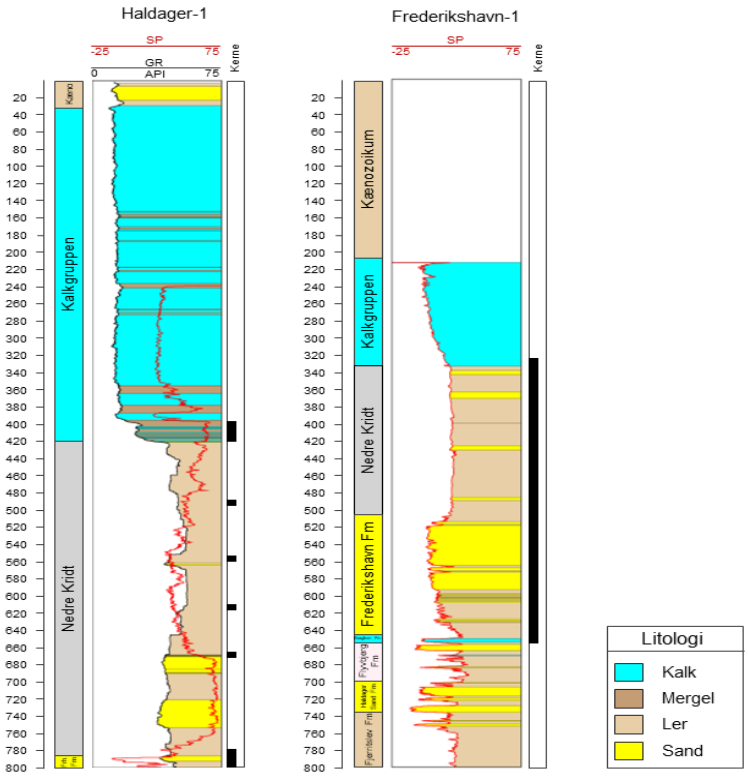
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



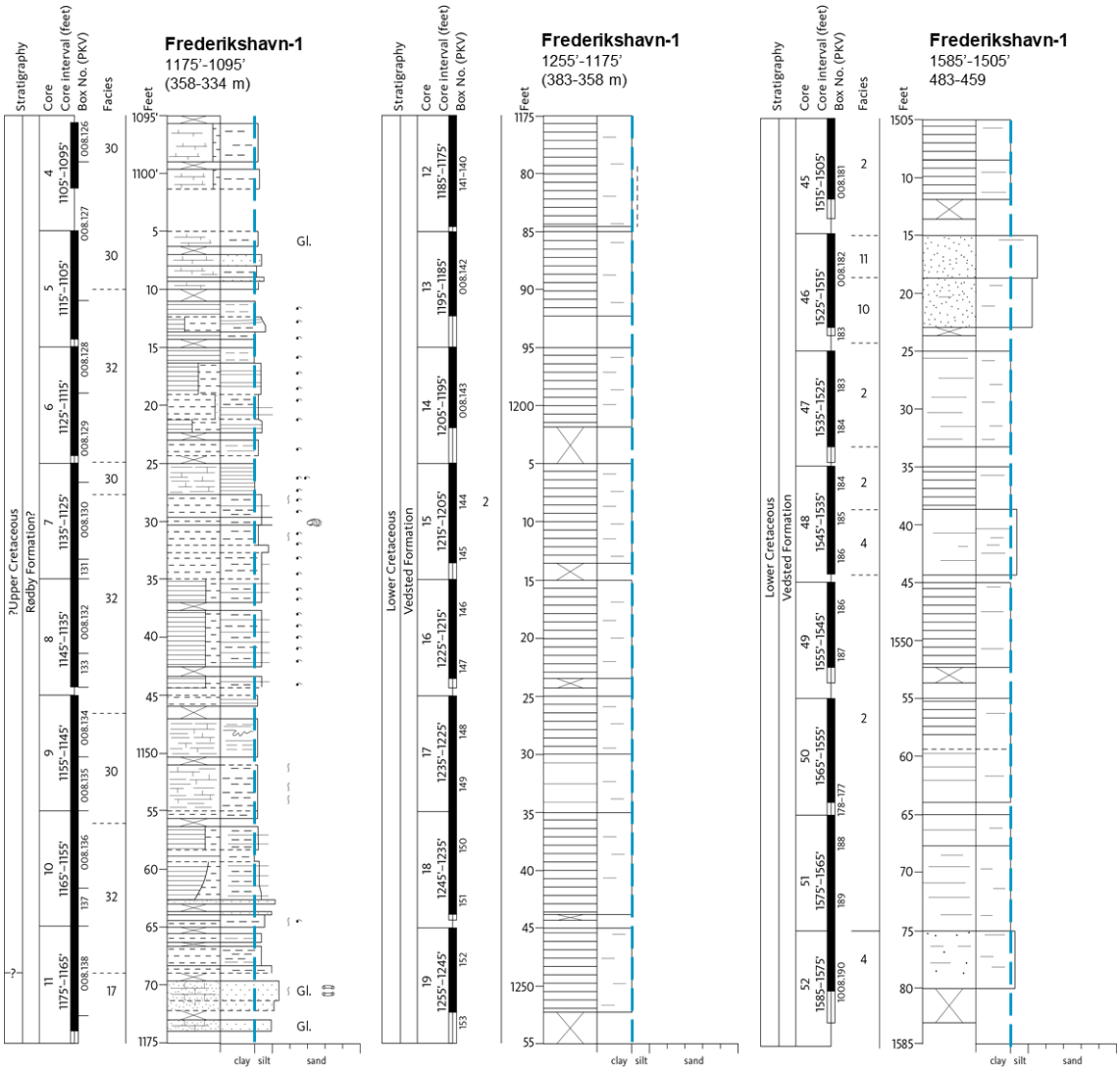
Figur 6.1 *Nordjylland (inkl. Læsø og Anholt) med kommunegrænser og større byer.*



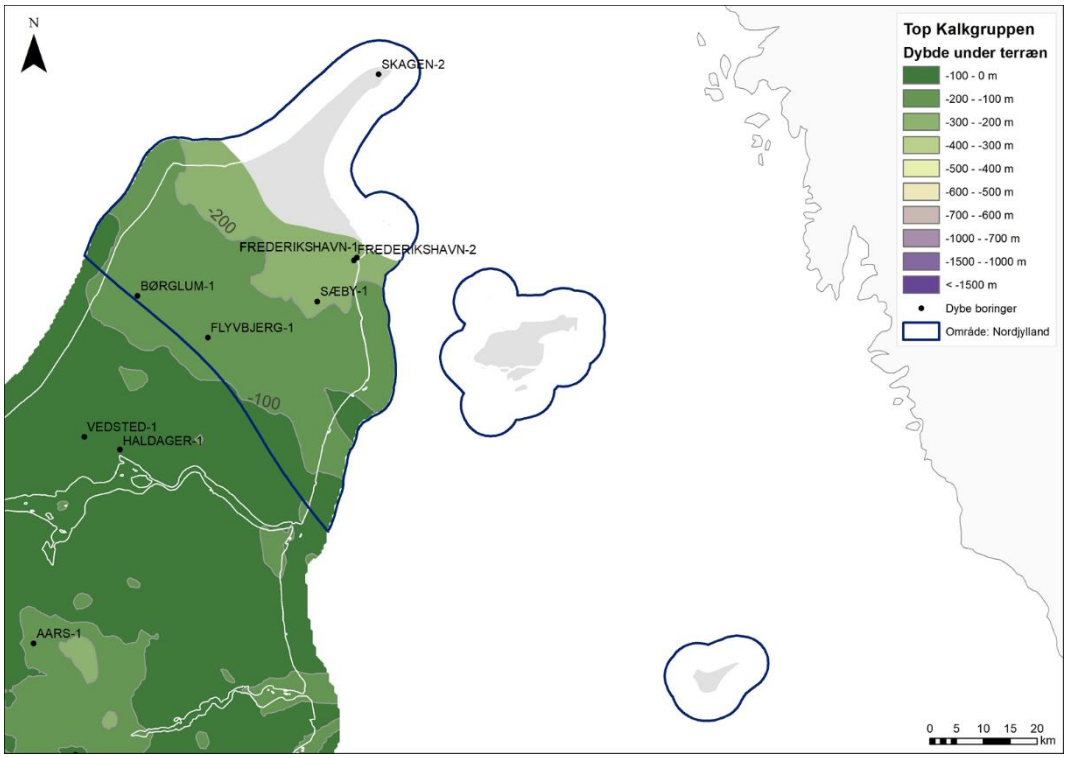
Figur 6.2. *Oversigt over seismiske linjer og deres kvalitet samt dybe boringer i Nordjylland.*



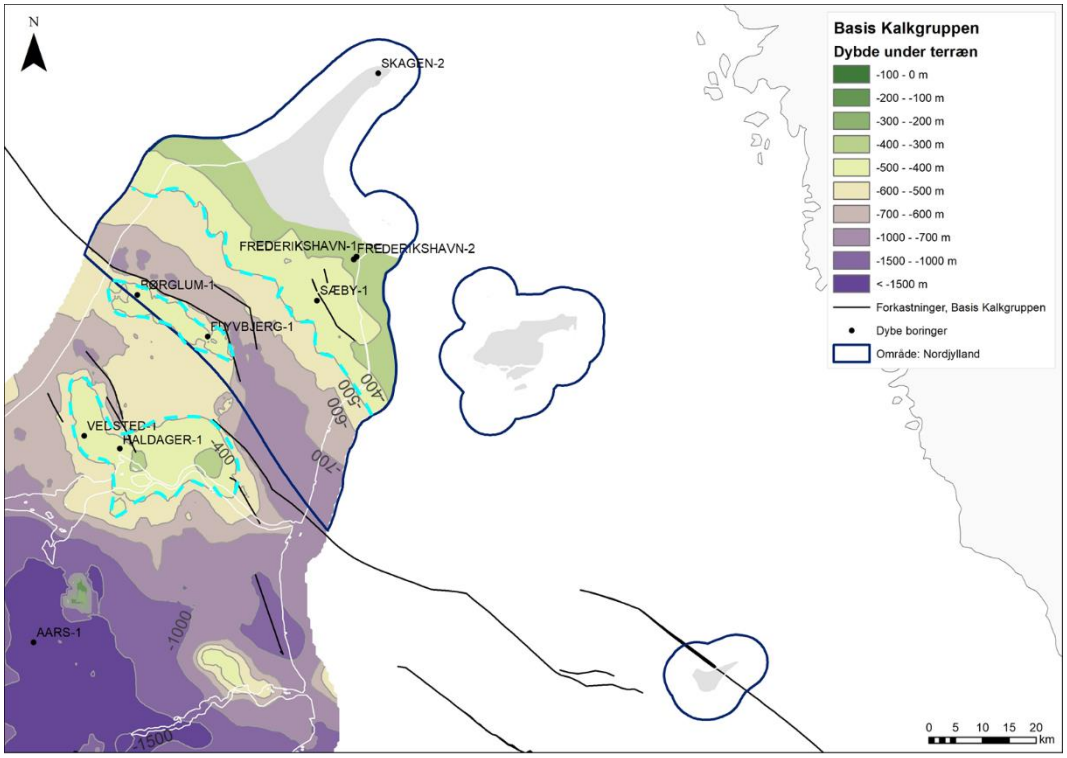
Figur 6.3. *Litologiske logtolkninger fra 0-800 meter i boringerne Haldager-1 (Limfjord Øst området) og Frederikshavn-1 (Nordjylland området). I Haldager-1 findes kalksten ned til ca. 400 meter og herunder et interval af Nedre kridt lersten med adskillige sandlag. I Frederikshavn-1 findes ca. 150 meter kalksten i barrierezonen og herover 200 meter kænozoiske sedimenter (Ikke logget). Nedre Kridt intervallet ses fra den petrofysiske tolkning at være domineret af lersten, men med gentagne intervaller med sand. Ved at sammenligne med den sedimentologiske log af dele af det kernede interval (Figur 6.4) ses, at det lerede interval indeholder mange siltede og sandede lag, og derfor ikke er litologisk homogent.*



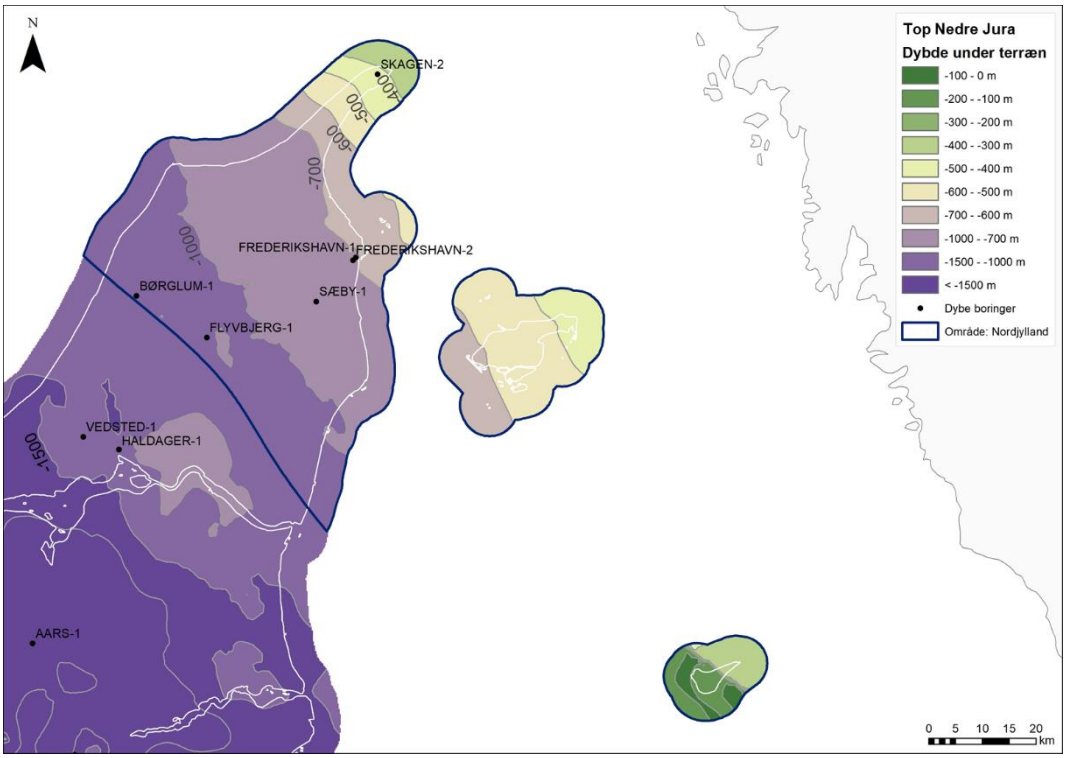
Figur 6.4 *Sedimentologiske logs fra Nedre Kridt (Rødby Fm, og Vedsted Fm), Frederikshavn-1 boringen. Grænsen mellem kornstørrelsen silt og ler er vist med en blå streg (ler på venstre side), for at tydeliggøre intervaller domineret af ler og intervaller med grovere kornstørrelser. Den midterste log viser 80 fod (ca. 26 m) af homogen lersten, hvor de to andre logs viser lagserier, der litologisk set er mindre homogene.*



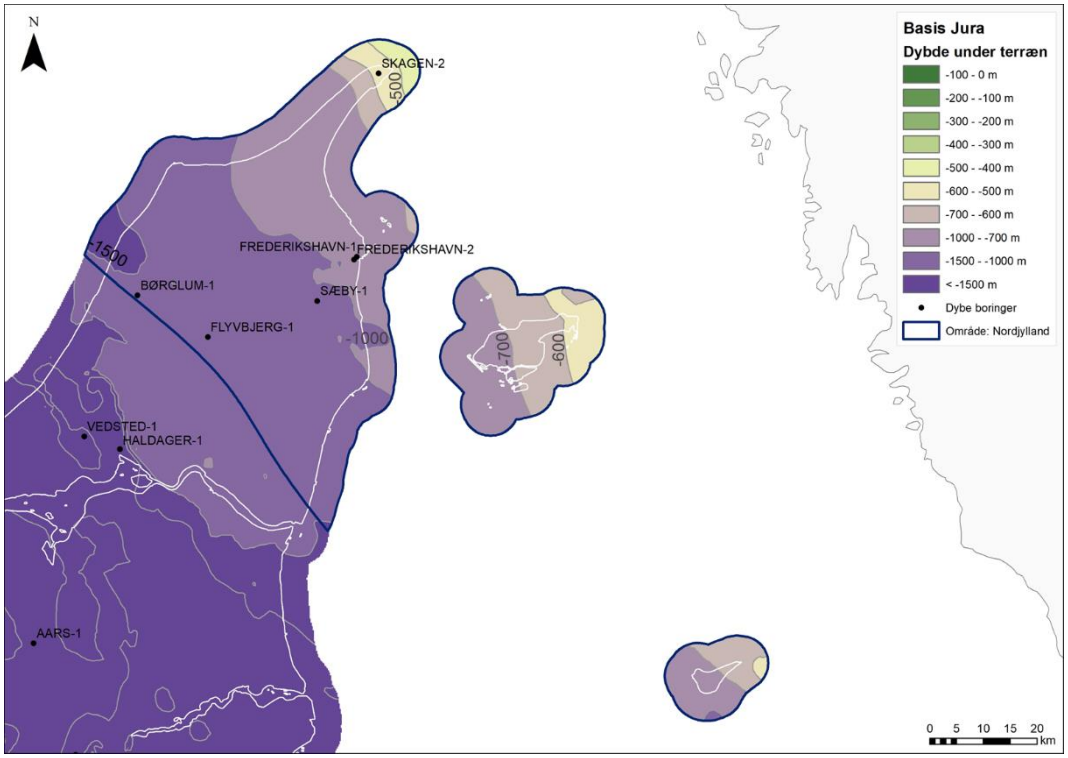
Figur 6.5. *Dybdekort Top Kalkgruppen, Nordjylland, Det ses, at dybden varierer mellem 100 og 200 meter.*



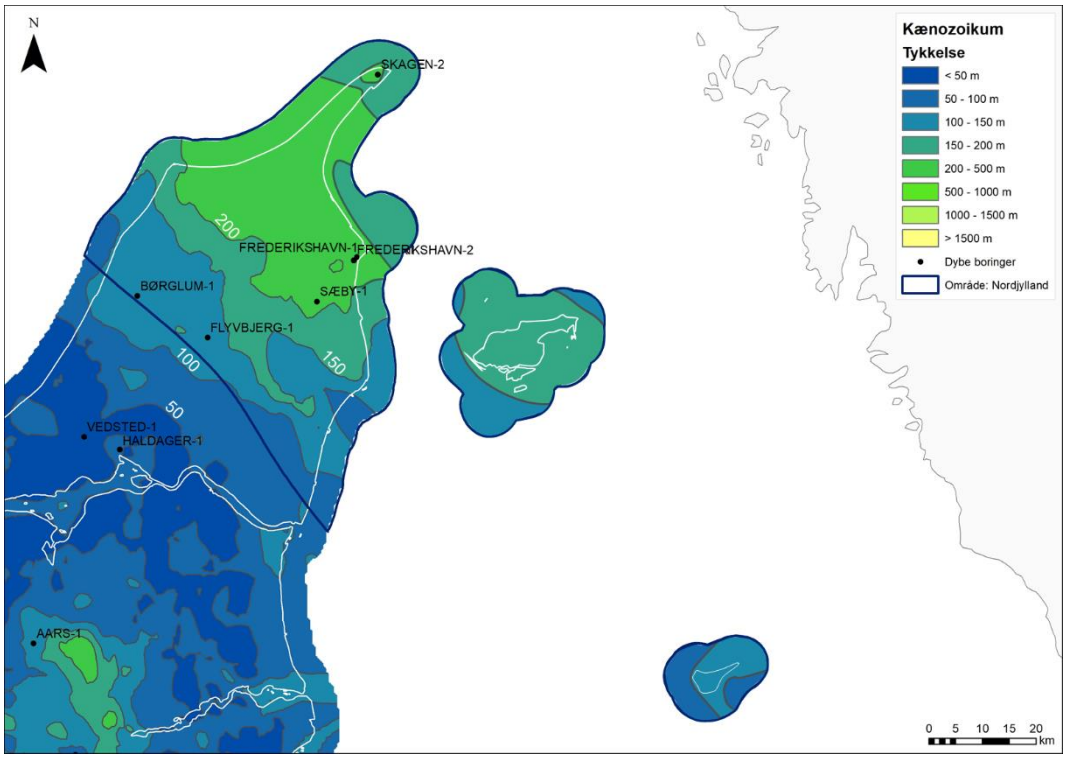
Figur 6.6. *Dybdekort Top Nedre Kridt (Basis Kalkgruppen), Nordjylland og større kortlagte forkastninger der gennemskærer Basis Kalkgruppen. I området nord for den stiplede linje, samt områder, der er afgrænset af linjen, findes Top Nedre Kridt i dybder på 300 - 500 meter.*



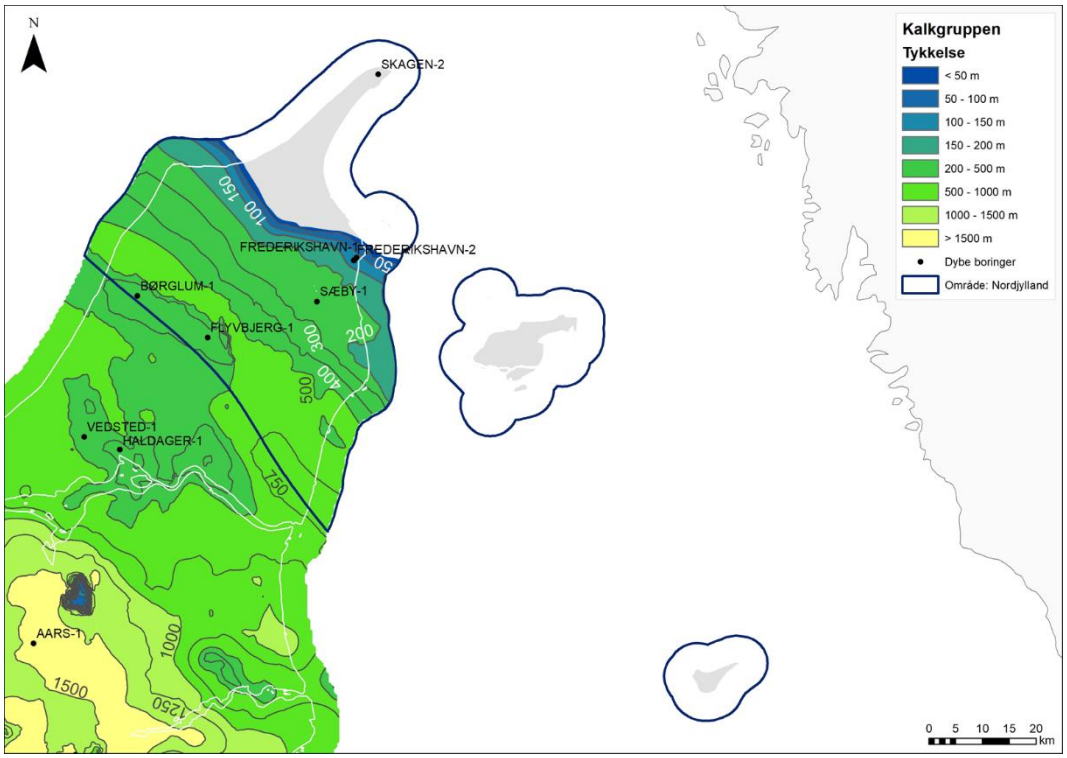
Figur 6.7. *Dybdekort Top Nedre Jura, Nordjylland. Det ses at Top Nedre Jura findes i dybder omkring 700 meter i nord stigende til mere end 1000 meter i områdets sydlige del.*



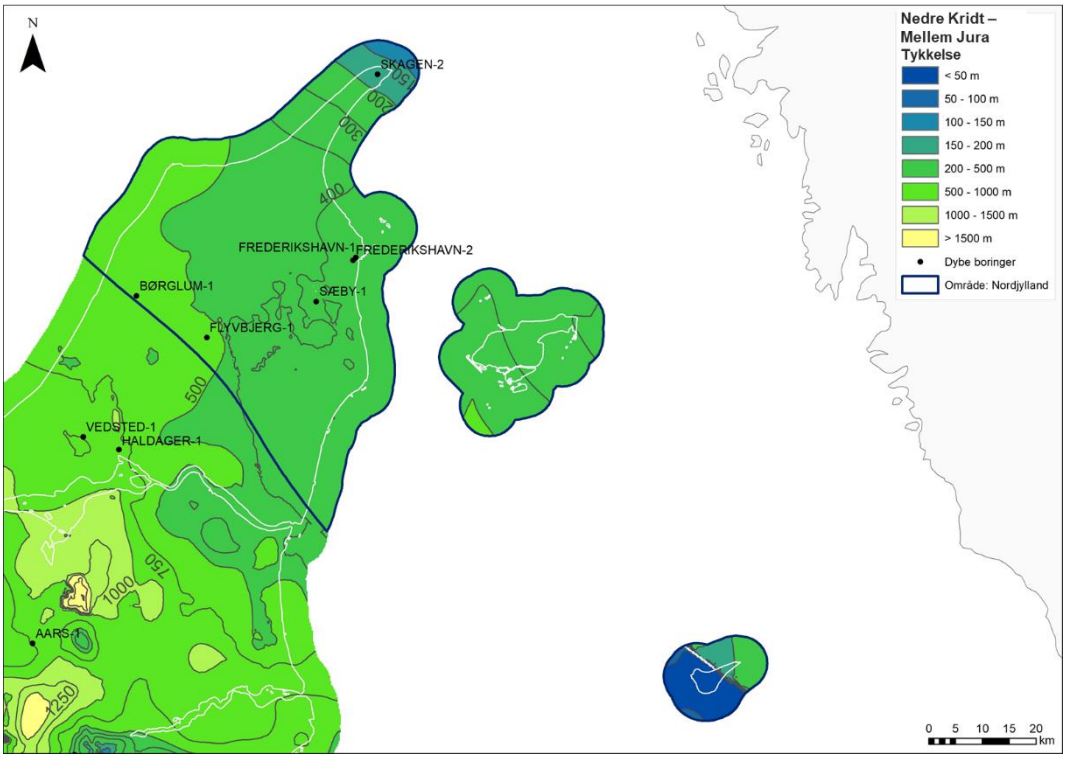
Figur 6.8. *Dybdekort Basis Jura, Nordjylland Basis. Basis Jura findes generelt dybere end 700 m.*



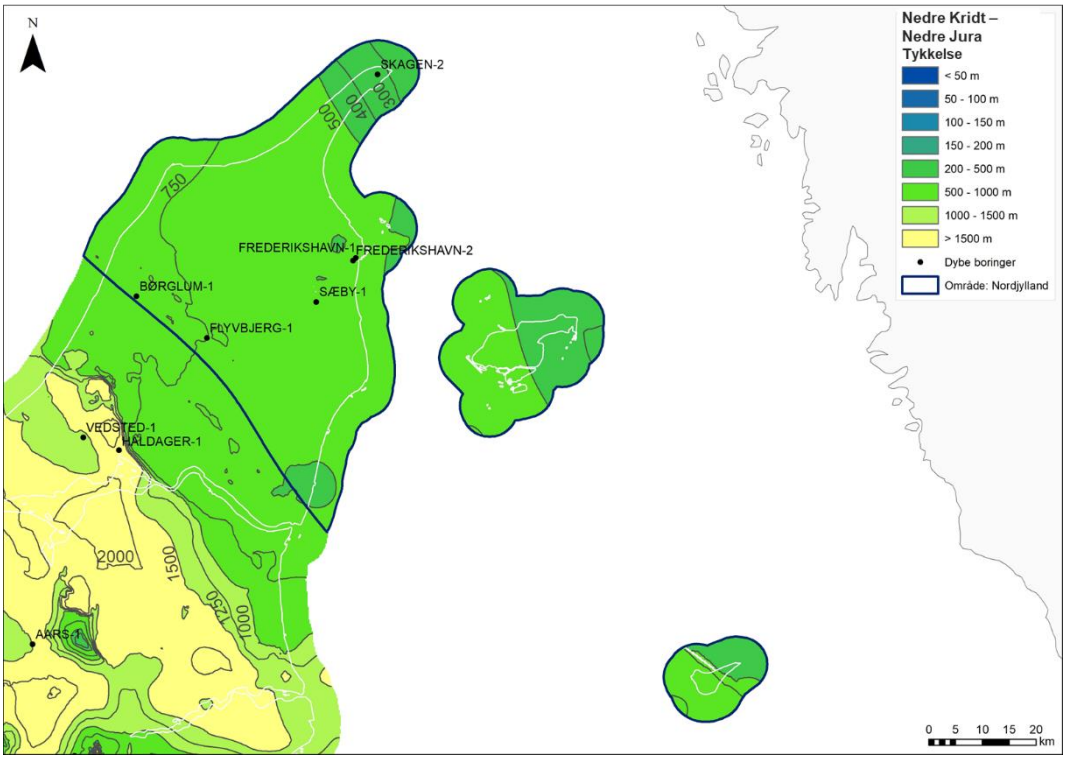
Figur 6.9. *Kort over tykkelsen af de kænozoiske aflejringer, Nordjylland. Tykkelsen er i størstedelen af området 150 meter eller mere, med mægtigheder op til 300 meter i den nordligste del.*



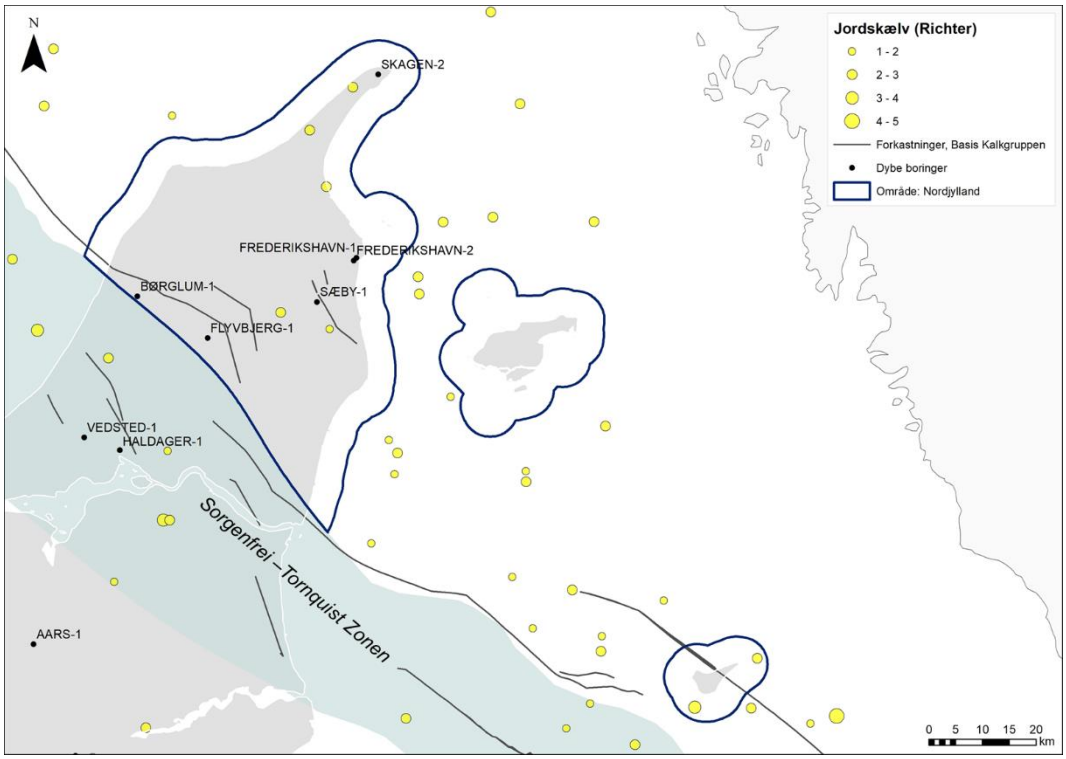
Figur 6.10. *Kort over tykkelsen af Kalkgruppen, Nordjylland. Det ses, at tykkelsen varierer betydeligt fra 500 meter i områdets sydlige del til 150 meter omkring Frederikshavn og Kalkgruppen kiler helt ud og forsvinder mod nord.*



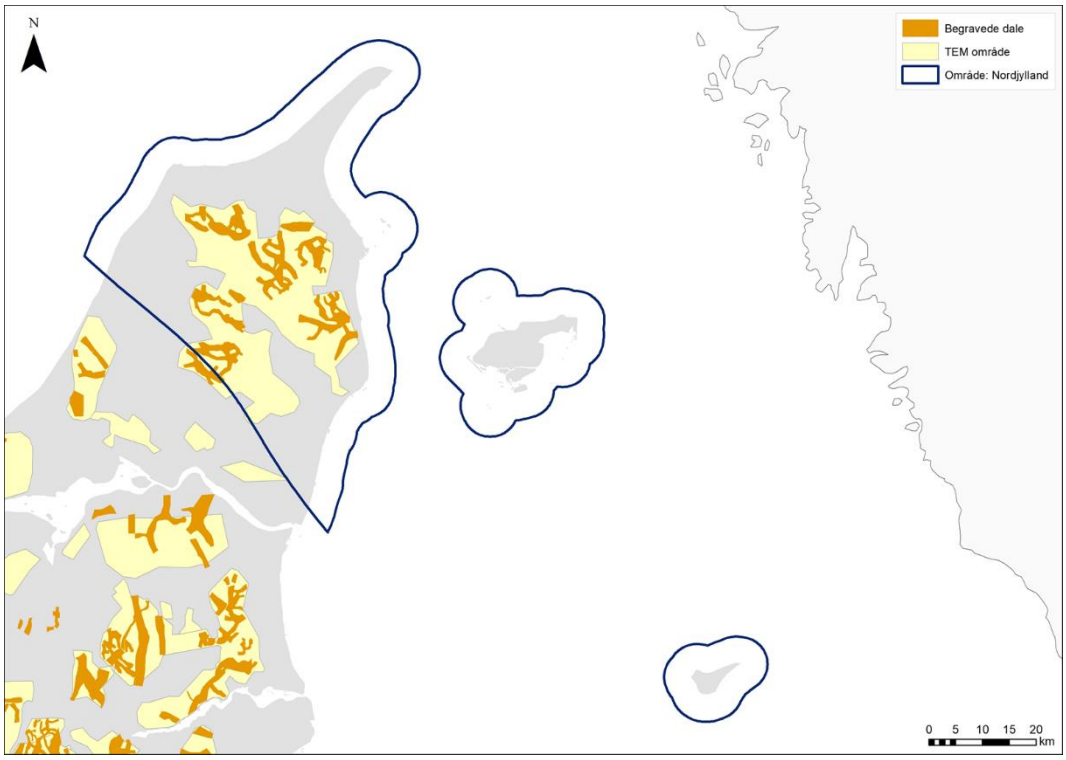
Figur 6.11. *Kort over tykkelsen af aflejringerne fra Nedre Kridt til Mellem Jura, Nordjylland. Det ses at tykkelsen generelt er 400 til 500 meter.*



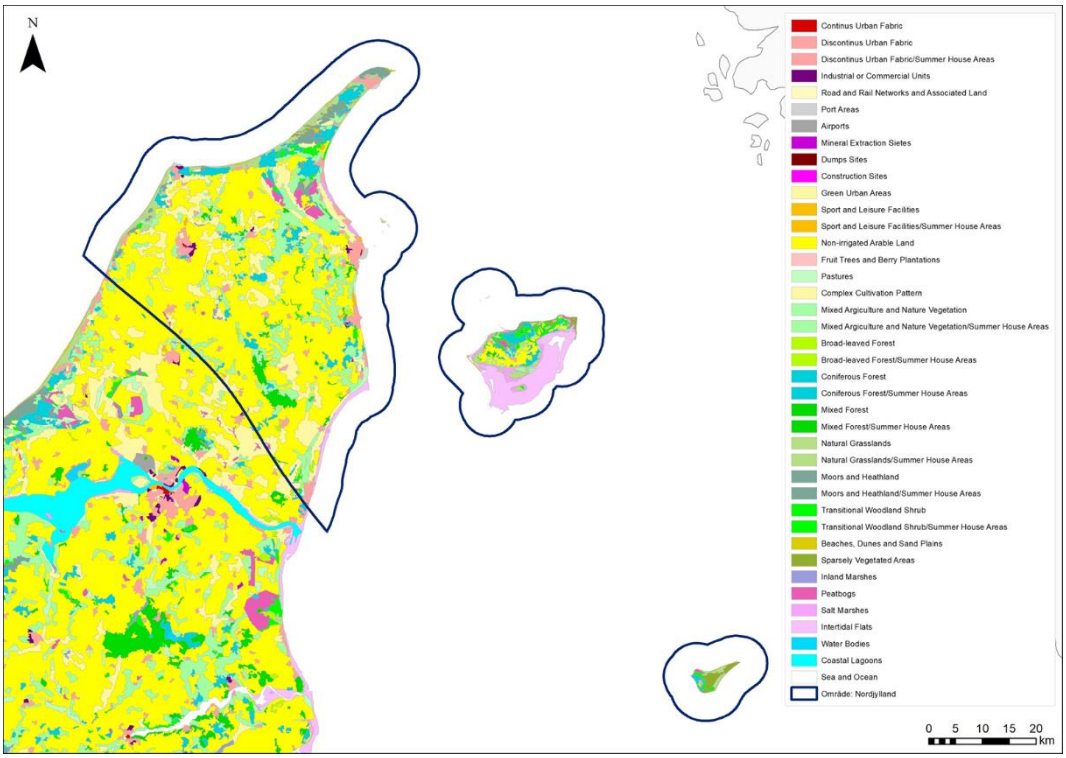
Figur 6.12. *Kort over den samlede tykkelse af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Nordjylland. Det ses at tykkelsen generelt er 500 til 700 meter.*



Figur 6.13. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Nordjylland. De registrerede jordskælv er alle af størrelsen 1-3 (Richter).*



Figur 6.14. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Nordjylland.*



Figur 6.15. *Arealanvendelse, Nordjylland. (MiljøGIS, 2021).*

6.2 Limfjord Øst

I størstedelen af området findes kalksten i dybdeintervallet 400 til 500 meter, mens lersten fra Nedre Kridt og Jura generelt findes fra 500 meter og dybere (Figur 6.20 og 6.21). Da der således er mulighed for både kalksten og lersten som værtsbjergarter, er der lavet en evaluering af begge scenarier. Der ses relativt mange forkastninger på de geologiske profiler, som afspejler områdets placering i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, hvilket begrænser den horisontale kontinuitet af de geologiske formationer i området (Figur 4.14 og 4.15).

Lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart

Lag af lersten med en tykkelse på 100 meter er ikke påvist i området i dybder omkring 500 meter. Tykkelsen af Nedre Kridt og Jura varierer fra 200 meter til mere end 1000 meter, men 100 meter homogene formationer af lersten forventes ikke i området, da Haldager-1 og Børglum-1 boringerne ses at indeholde flere sandlag i Nedre Kridt i intervallet 420-800 meter (Figur 6.18 og 6.19). Top Nedre Kridt findes i områdets centrale del i dybder omkring 500 meter, men ligger betydeligt dybere i størstedelen af området (Figur 6.21).

Den horisontale kontinuitet er generelt mindre favorabel pga. mange, relativt tætliggende forkastninger i området (Se Figur 4.15 omkring Haldager-1 boringen).

De mange sandlag betyder dels, at de ler-rige intervaller ikke er litologisk homogene, og at sandlag i dybder umiddelbart under 500 meter kan fungere som strømningsveje under et depot i 500 meters dybde, hvorfor kriterierne 1.1 og 1.4 er scoret mindre favorable (orange).

***Tabel 6.3**. Evaluering af lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart, Limfjord Øst.*

Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	

Kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart

Kalksten findes generelt i området i dybdeintervallet 400 til 500 meter og også i den overliggende barrierezone, hvor kalken fortsætter opefter til 100 meter under terræn og stedvis helt til terrænoverfladen (Figur 4.14 og 4.15). Basis af Kalkgruppen er i 500 meter eller dybere,

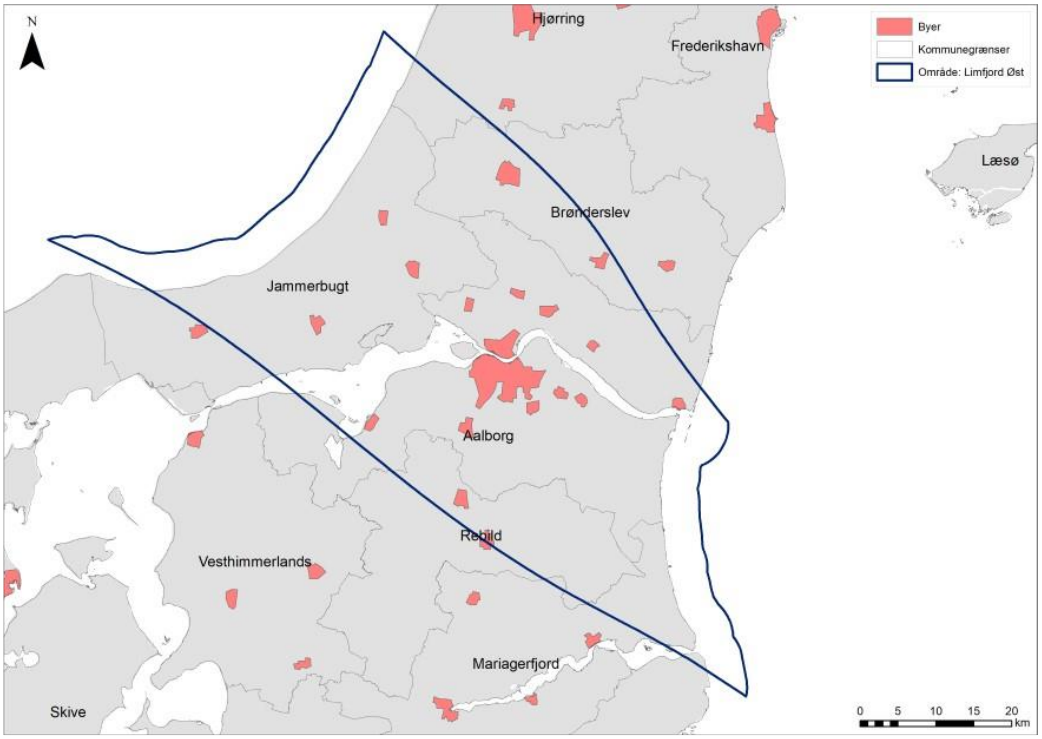
så kalksten har i hele området en tykkelse på mere end 100 meter (300 - 1000 meter (Figur 6.21 og 6.25)).

En del dybe forkastninger ses ved basis af Kalkgruppen, hvoraf nogle strækker sig ind i kalken (Figur 4.15), og de kan være en begrænsning for den horisontale kontinuitet. Kalken forekommer at være relativt uforstyrret over længere strækninger og uden større forsætninger langs de identificerede forkastninger.

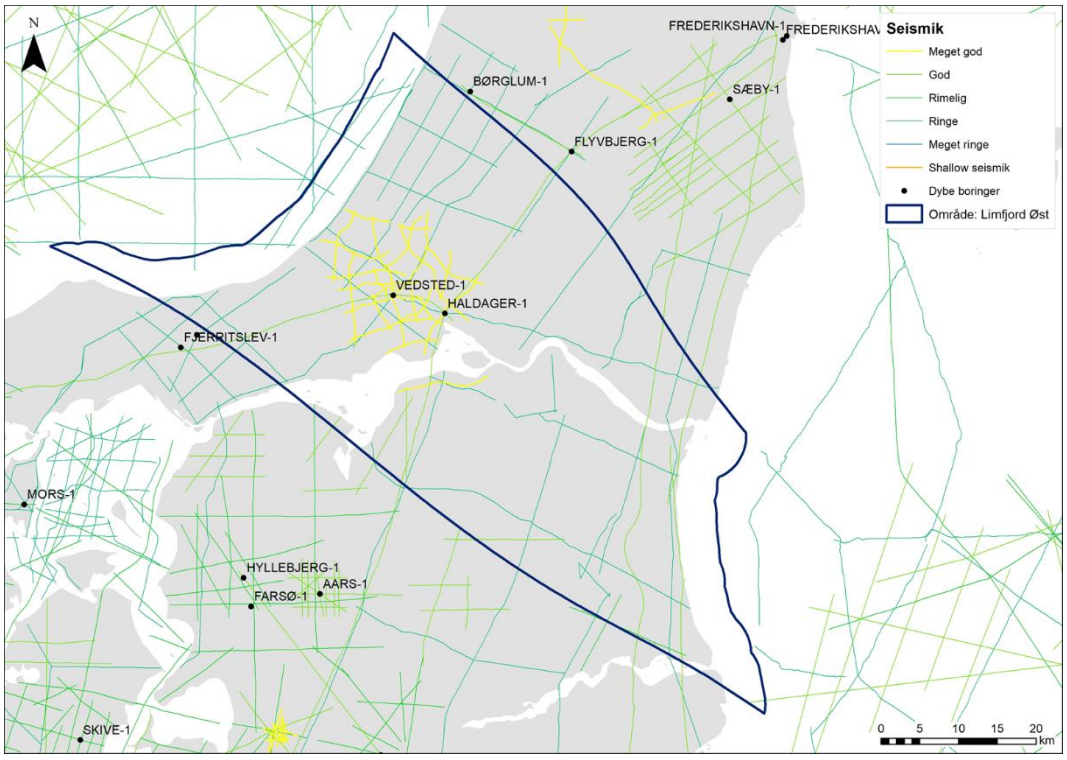
Formationer fra Nedre Kridt, som findes umiddelbart under basis af kalken, indeholder porøse sandlag (ses i Børglum-1 og Haldager-1 boringerne, Figur 6.18 og 6.19). I tilfælde af at en undersøgelseslokalitet vælges i et område, hvor basis kalk ligger nær 500 meter, bør det undersøges om sandlag findes umiddelbart under kalken således, at et evt. depot placeres i passende afstand fra mulige strømningsveje i sandlagene.

Tabel 6.4. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart*

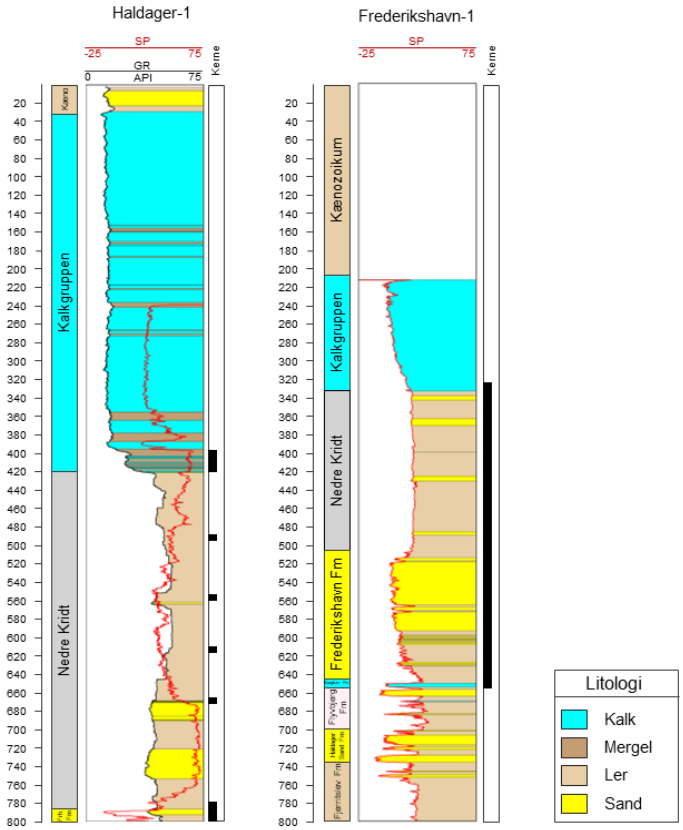
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



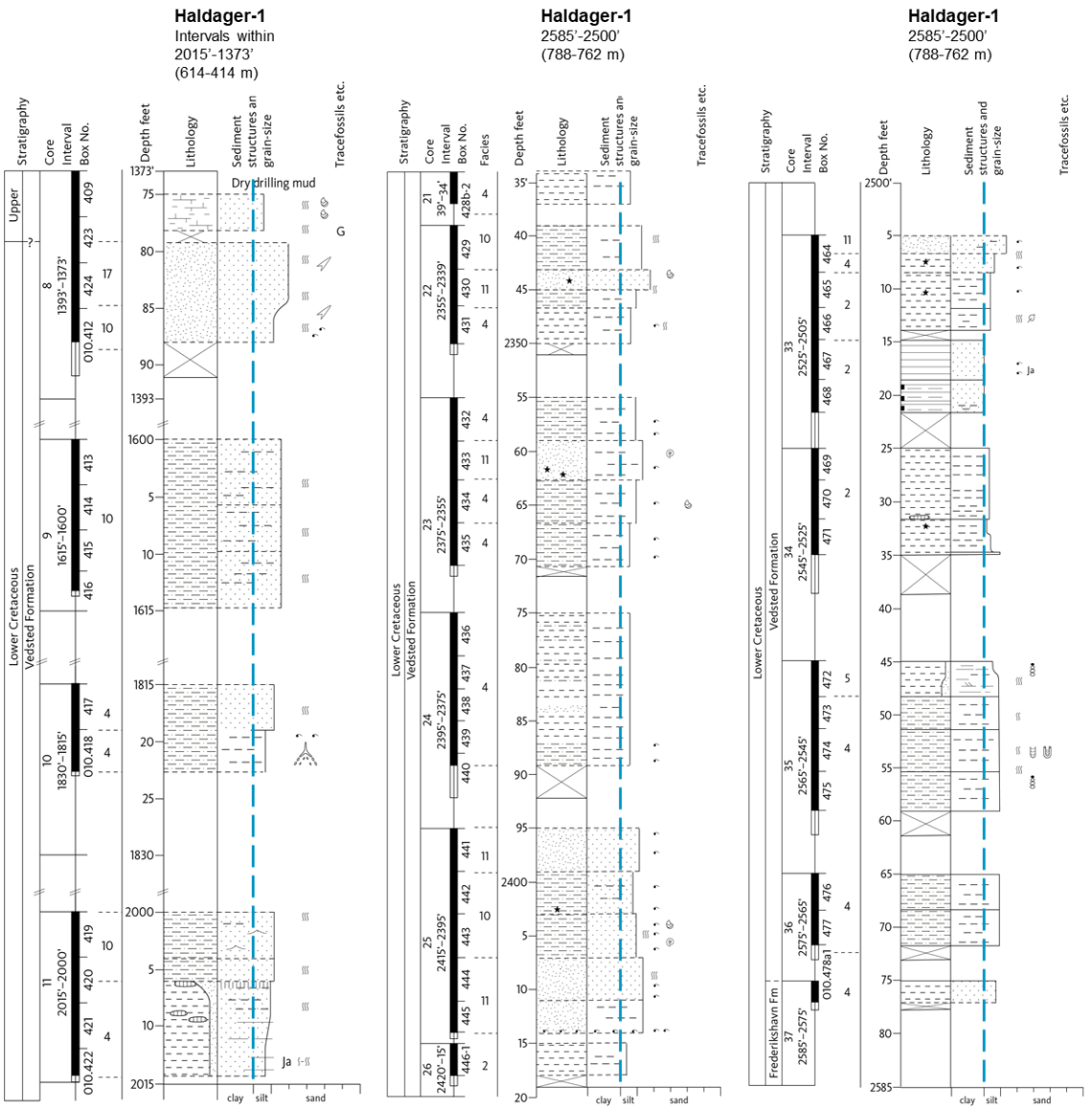
Figur 6.16. *Limfjord Øst området med kommunegrænser og større byer.*



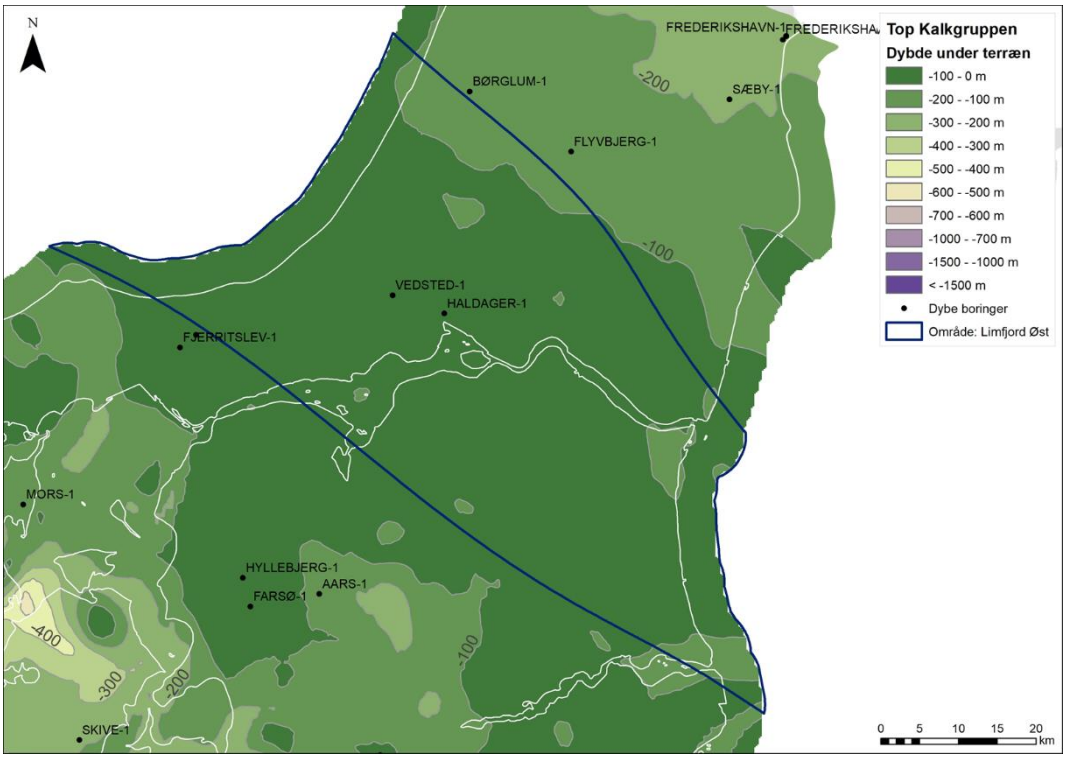
Figur 6.17. *Oversigt over seismiske linjer og deres kvalitet samt boringer i Limfjord Øst.*



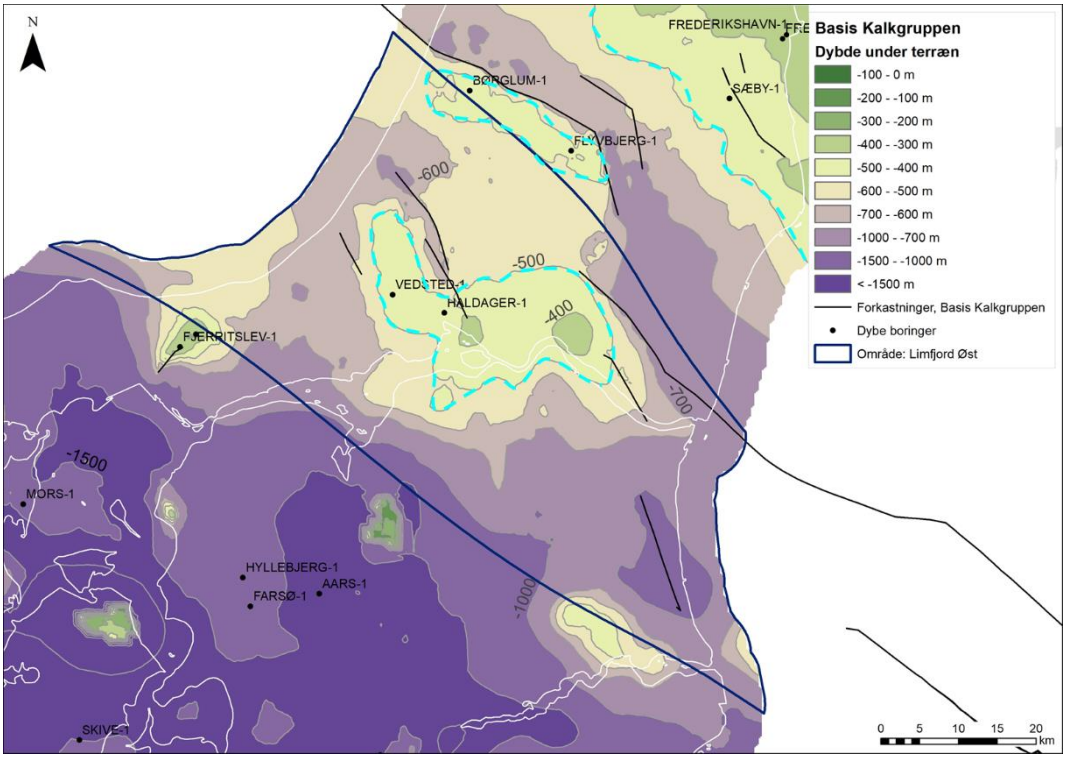
Figur 6.18. *Litologiske logtolkninger fra 0-800 meter af boringerne Haldager-1 (Limfjord Øst området) og Frederikshavn-1 (Nordjylland området). I Haldager-1 findes kalksten ned til ca. 400 meter og herunder et interval af Nedre kridt lersten med adskillige sandlag. I Frederikshavn-1 findes ca. 150 meter kalksten i barrierezonen og herover 200 meter kænozoiske sedimenter (Ikke logget). Nedre Kridt intervallet ses fra den petrofysiske tolkning at være domineret af lersten, men med gentagne intervaller med sand. Ved at sammenligne med den sedimentologiske log af dele af det kernede interval i Hldager-1 boringen (Figur 6.19) ses, at det lerede interval indeholder mange siltede og sandede lag, og derfor ikke er litologisk homogent. Figur 6.18 er identisk med Figur 6.3, men er relevant også for evalueringen af Limfjord Øst området, derfor er den vist her for fuldstændighedens skyld.*



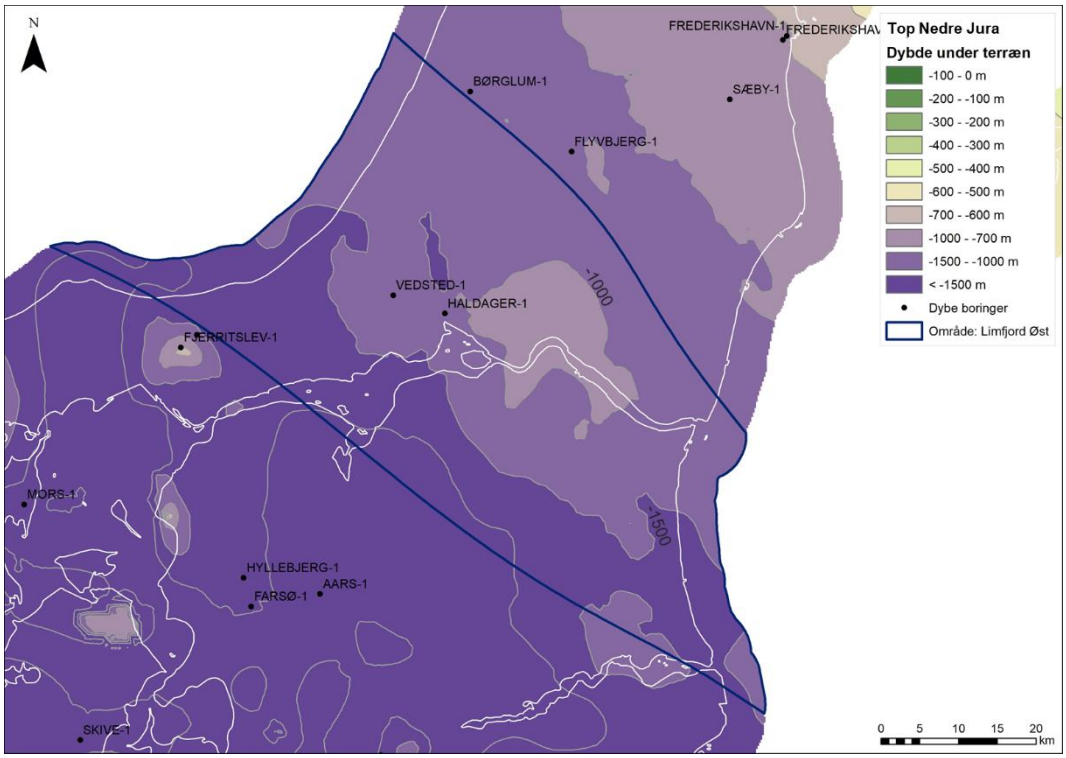
Figur 6.19. *Repræsentative sedimentologisk log af Vedsted Fm, Haldager-1 boringen. Grænsen mellem kornstørrelsen silt og ler er vist med en blå streg (ler på venstre side), for at tydeliggøre intervaller domineret af ler og intervaller med grovere kornstørrelser. Det ses, at der kun er meget få og tynde lag, der er domineret af ler, og at lagserien ikke er litologisk homogen. Figur 6.19 er identisk med Figur 6.4, men er relevant også for evalueringen af Limfjord Øst området, derfor er den vist her for fuldstændighedens skyld.*



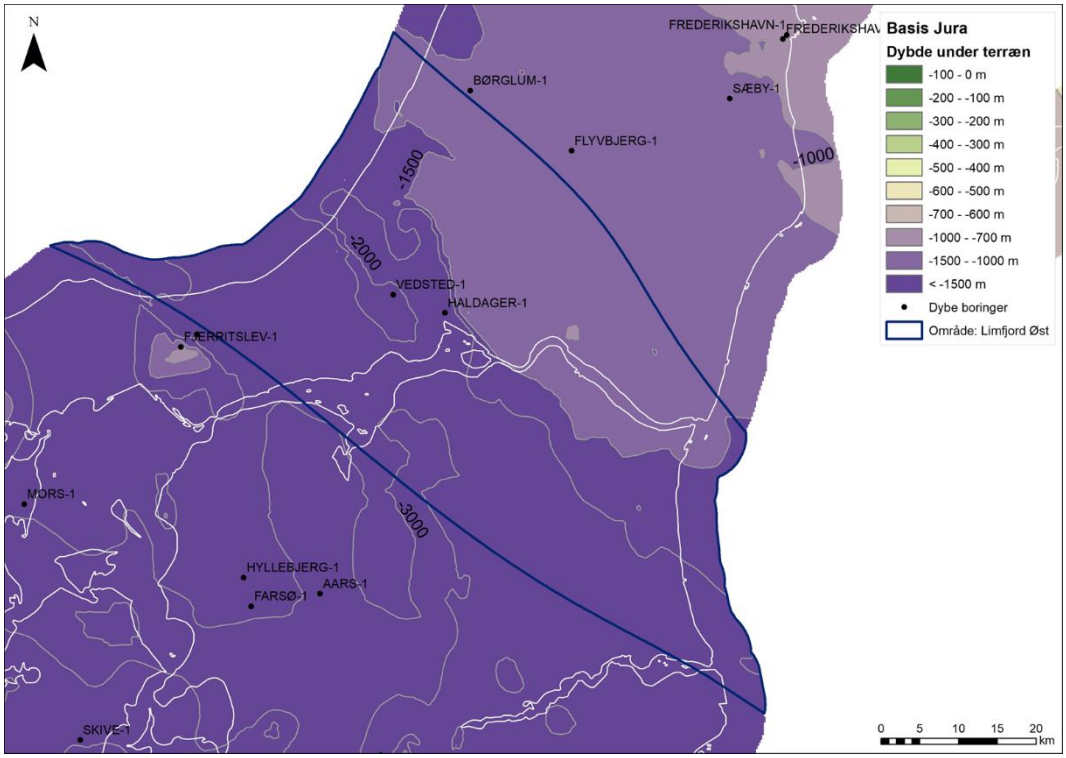
Figur 6.20. *Dybde Top Kalkgruppen, Limfjord Øst. Dybden er i hele området 0 til 100 meter.*



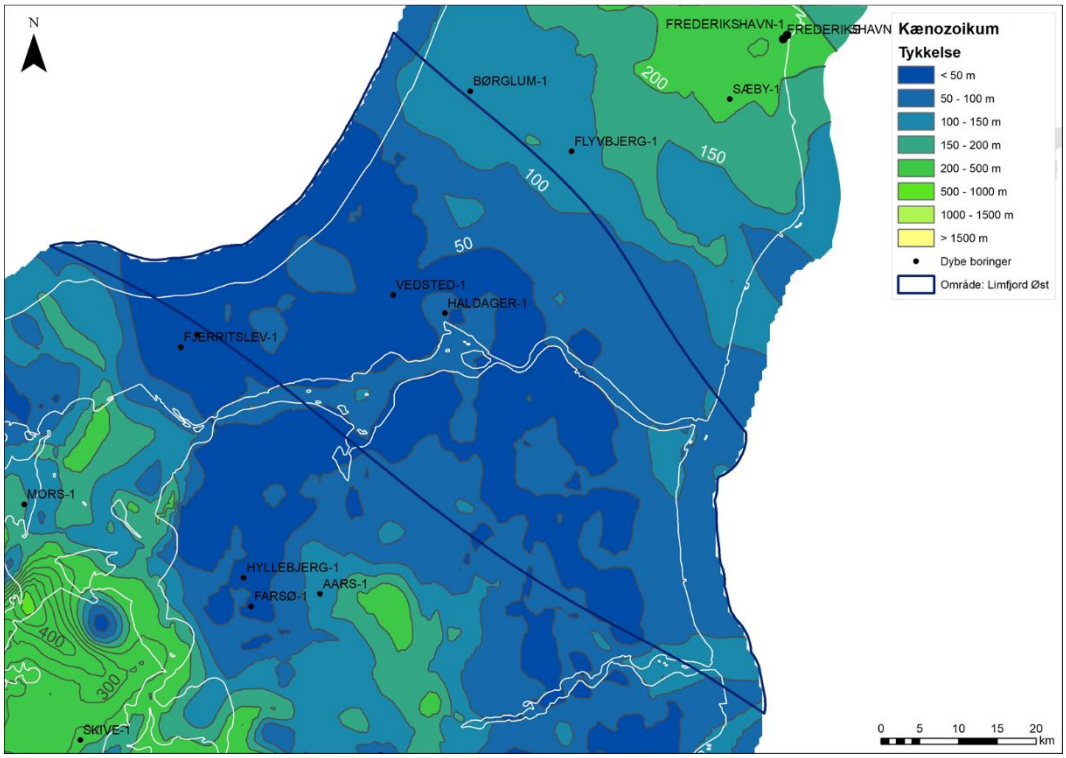
Figur 6.21. *Dybde Top Nedre Kridt (Basis Kalkgruppen), Limfjord Øst. Den stiplede linje markerer områder hvor Top Nedre Kridt ligger i dybder mellem 300 og 500 meter.*



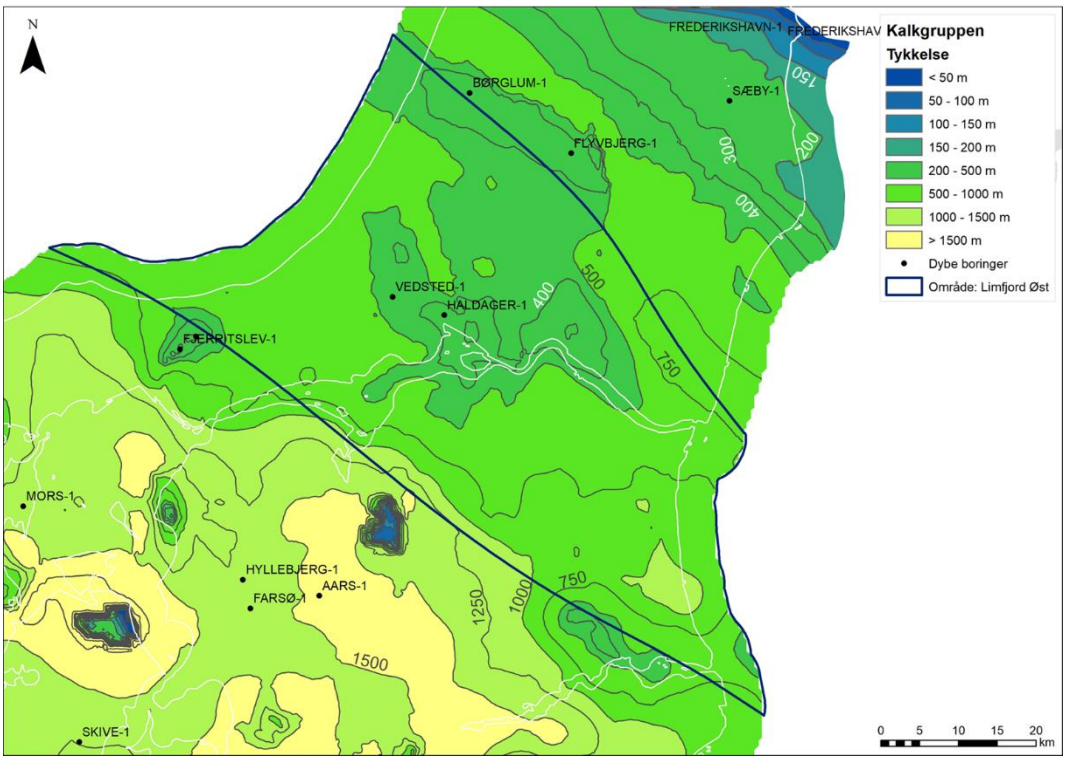
Figur 6.22. *Dybde til Top Nedre Jura, Limfjord Øst*.



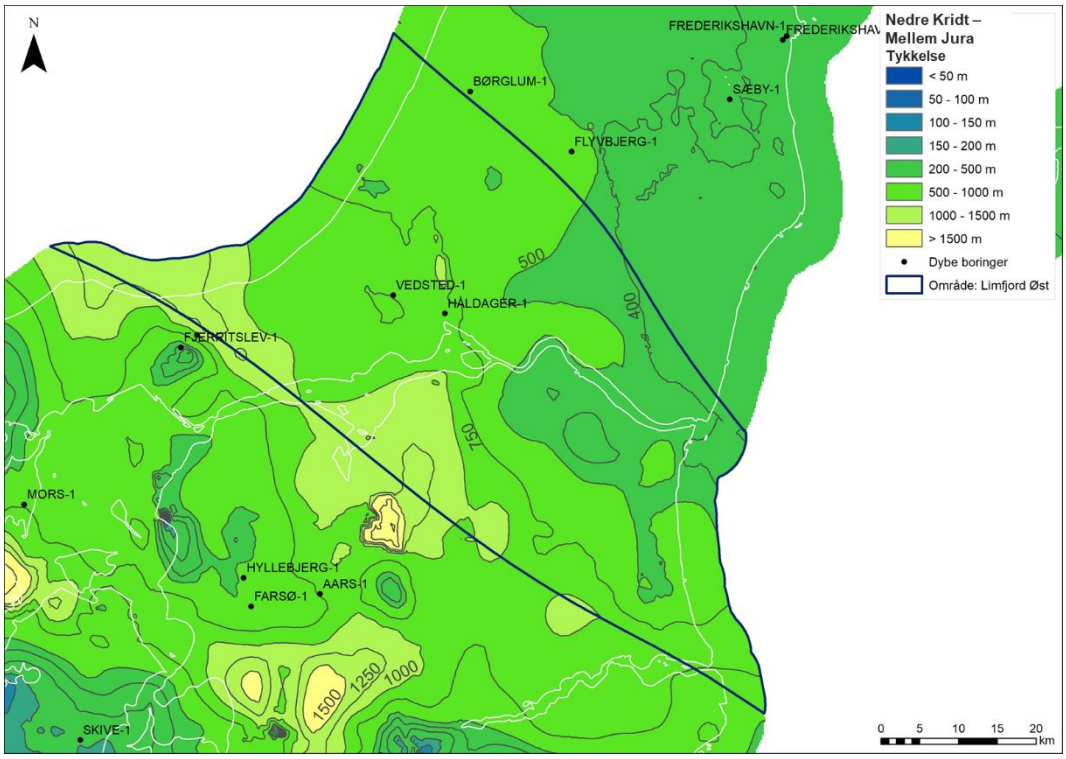
Figur 6.23. *Dybde til Basis Jura, Limfjord Øst. Basis Jura findes i hele området dybere end 1000 meter.*



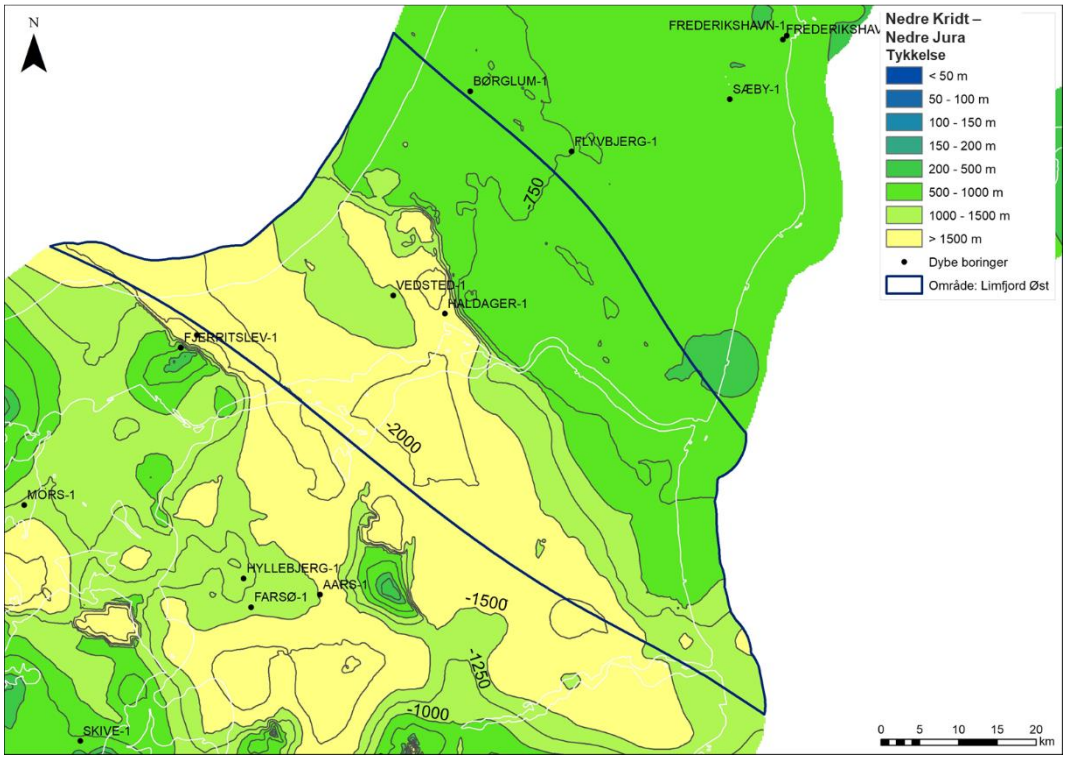
Figur 6.24. *Kort over tykkelsen af de kænozoiske aflejringer, Limfjord Øst. Tykkelsen varierer mellem 0 og 100 meter.*



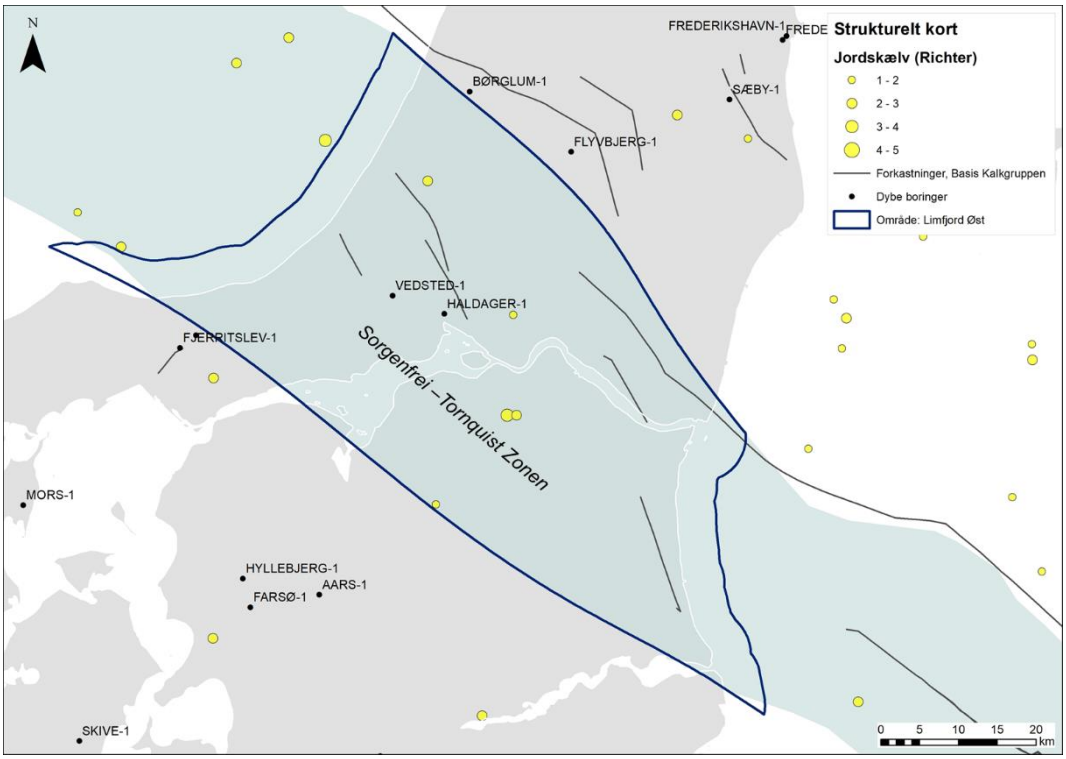
Figur 6.25. *Kort over tykkelsen af Kalkgruppen, Limfjord Øst. Tykkelsen er i størstedelen af området mellem 400 og 750 meter.*



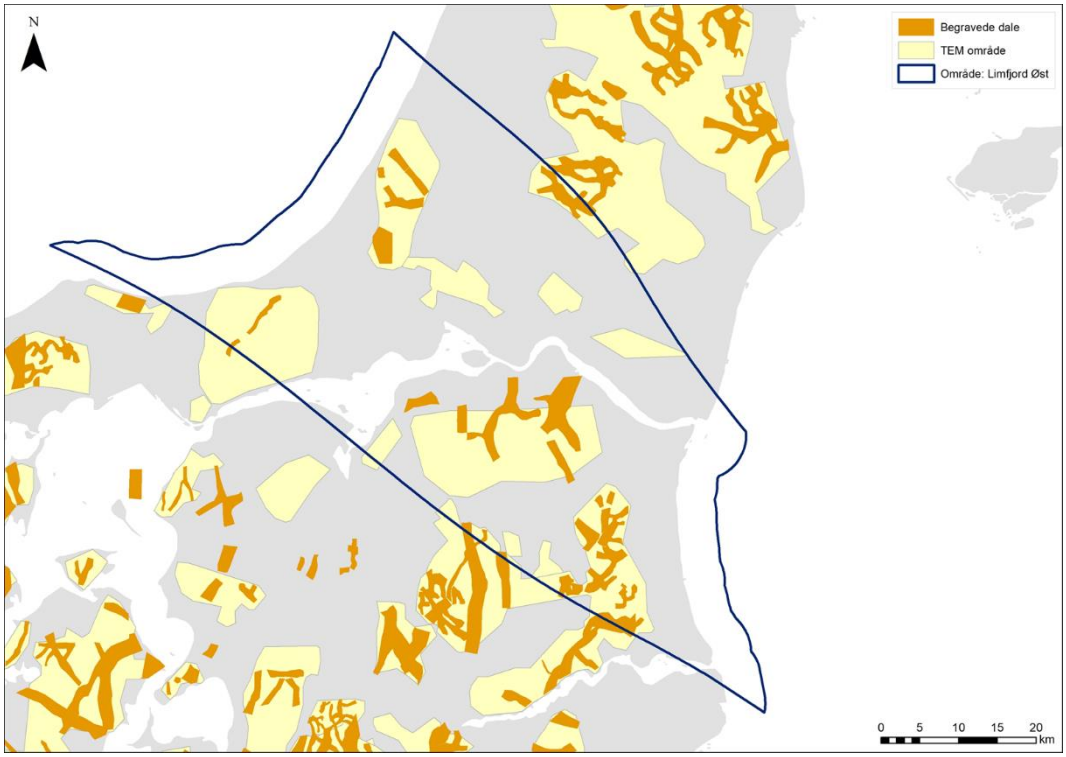
Figur 6.26. *Kort over tykkelsen af aflejringer fra Nedre Kridt til Mellem Jura, Limfjord Øst. Tykkelsen varierer fra ca. 400 meter i øst til lokalt mere end 1000 meter mod sydvest (lysegrønne områder).*



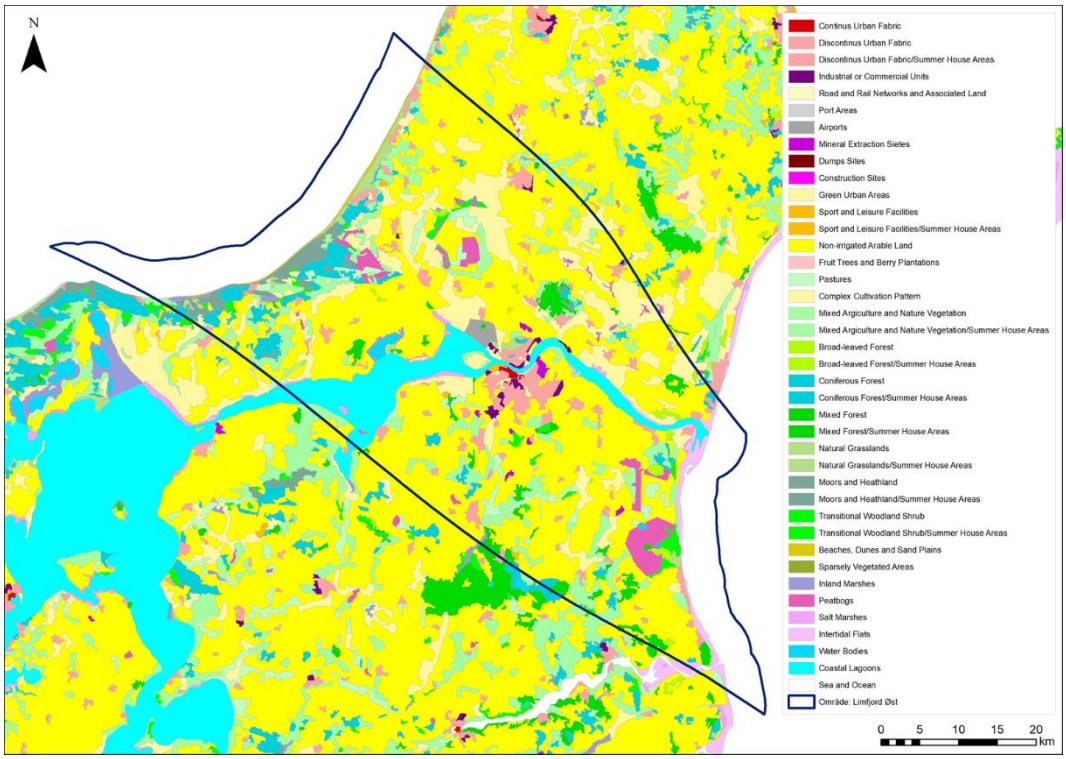
Figur 6.27. *Kort over den samlede tykkelse af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Limfjord Øst. Tykkelsen varierer fra 700 meter i nord og øst til lokalt mere end 2000 meter i sydvest og vest.*



Figur 6.28. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Limfjord Øst. Der er kun registreret få jordskælv i området.*



Figur 6.29. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Limfjord Øst.*



Figur 6.30. *Arealanvendelse, Limfjord Øst. Den turkisblå farve markerer en større fjord igennem området. (MiljøGIS, 2021).*

6.3 Midt-Vestjylland

Kalksten udgør værtsbjergarten i den østlige del af området, hvor den findes i intervallet 400 til 500 meter under terræn. Kalksten i barrierezonen har generelt en mægtighed mindre end 250 meter, da top Kalkgruppen findes i dybder fra 200 meter i den nordlige del af området til mere end 500 meter mod syd (Figur 6.34). I størstedelen af området ligger kalken således for dybt til at kunne udgøre 250 meter barriere i intervallet ned til 500 meter, bortset fra den nordligste del af området.

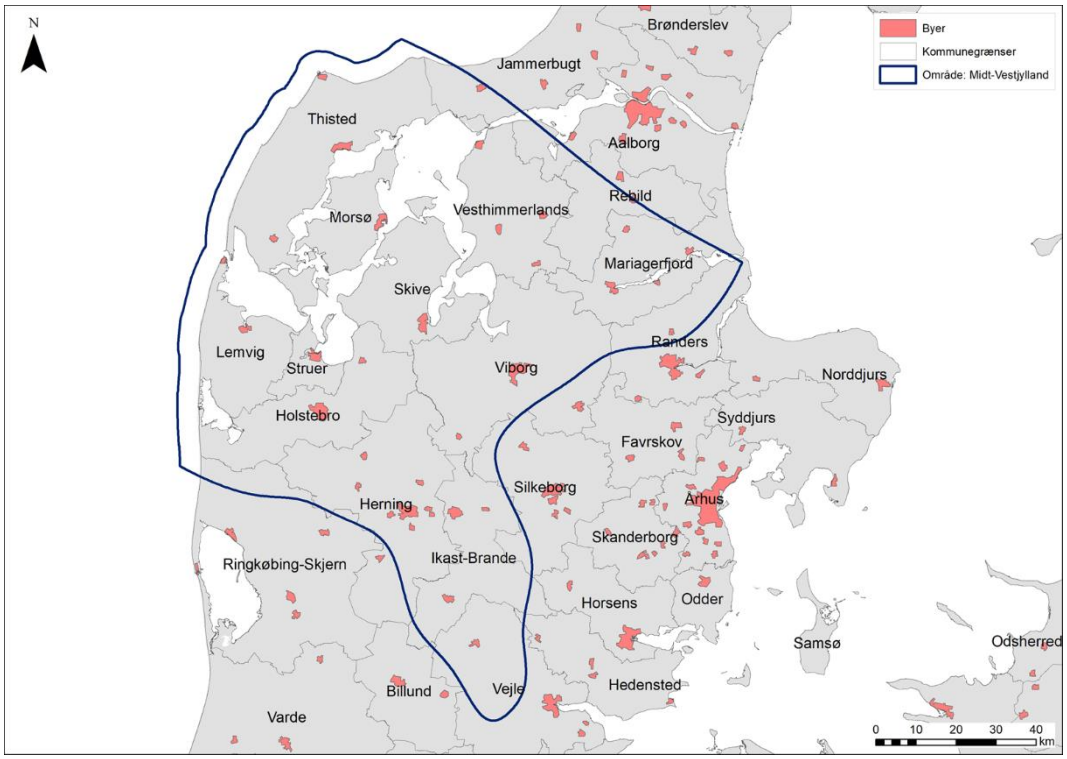
Området er tektonisk komplekst med saltdiapirer og saltrygge, og lagserierne er gennemskåret og forsat af mange forkastninger (Figur 4.14 og 4.15). Det betyder, at de geologiske formationer varierer i tykkelse og dybde over korte afstande (Figur 6.33), de hælder i forskellige retninger og er generelt af begrænset horisontal kontinuitet. Det resulterer i mindre favorable forhold (orange scoring) for bjergarternes rumlige udbredelse (kriterium 1.1). Den strukturelle kompleksitet i undergrunden er også årsagen til, at området scorer gul på mulighederne for bjergartskarakterisering fra nye data. Det skyldes, at det vil være forholdsvis vanskeligt at identificere lokaliteter, hvor data fra nye boringer, der bores igennem den geologiske lagserie, kan forventes at være repræsentative for hele lokaliteten på grund af de store variationer i tykkelser og dybder over korte afstande.

Den naturlige stabilitet er mindre favorabel (orange scoring) i området på grund af de mange saltstrukturer, som muligvis kan remobiliseres. Derudover er der i området relativt mange registrerede jordskælv, særligt i havområdet mod vest, som tyder på aktive forkastninger i nærheden.

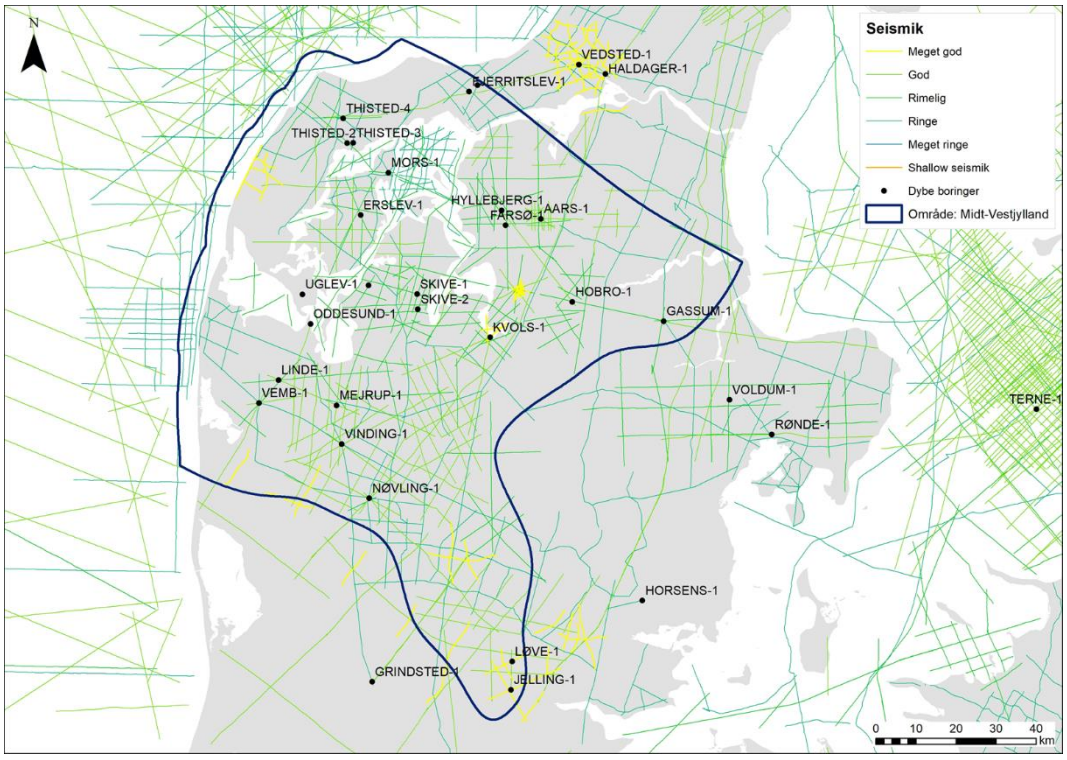
Da kalken generelt har stor mægtighed (500 – 1000 m) kan en tyk barriere af kalk opnås, hvis et depot lægges i kalksten som værtsbjergart på større dybde end 500 meter.

Tabel 6.5. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, område Midt-Vestjylland.*

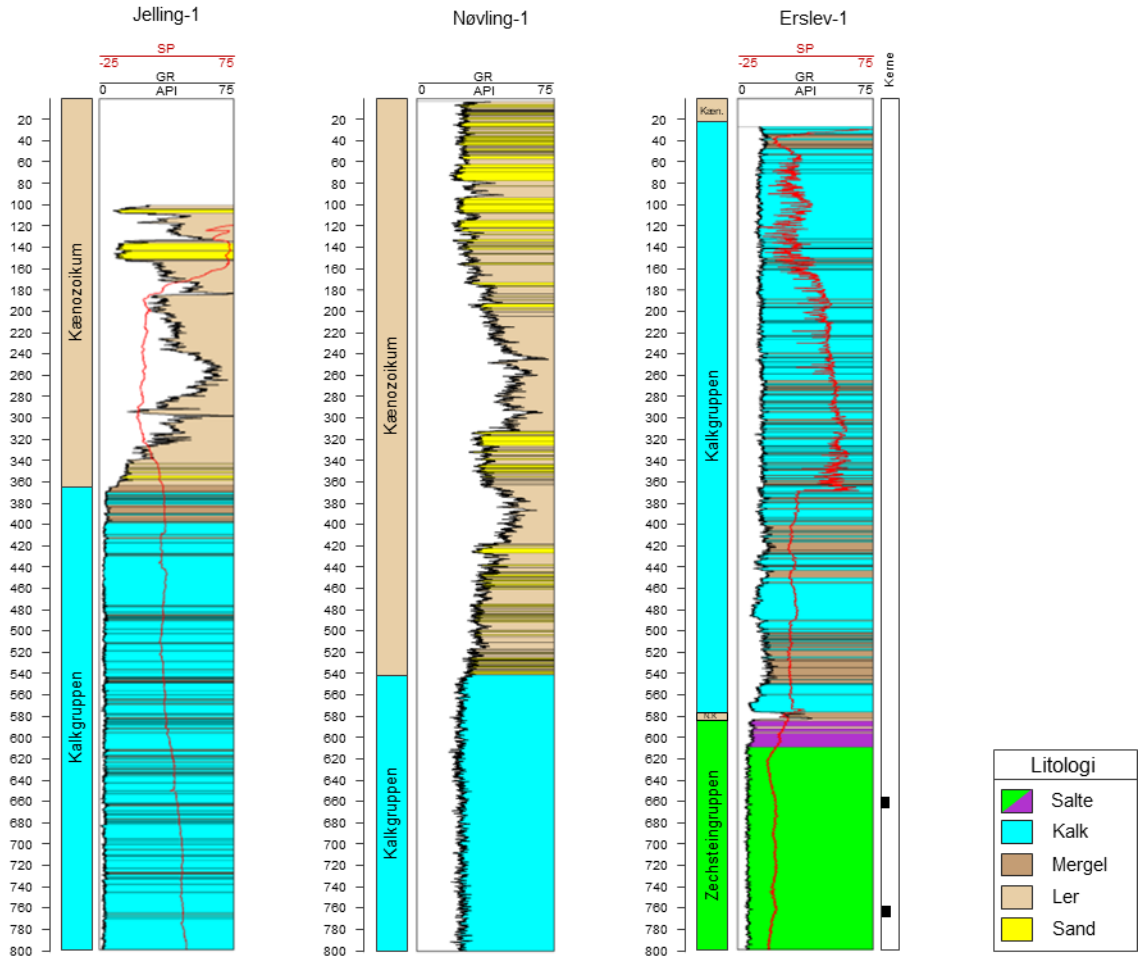
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



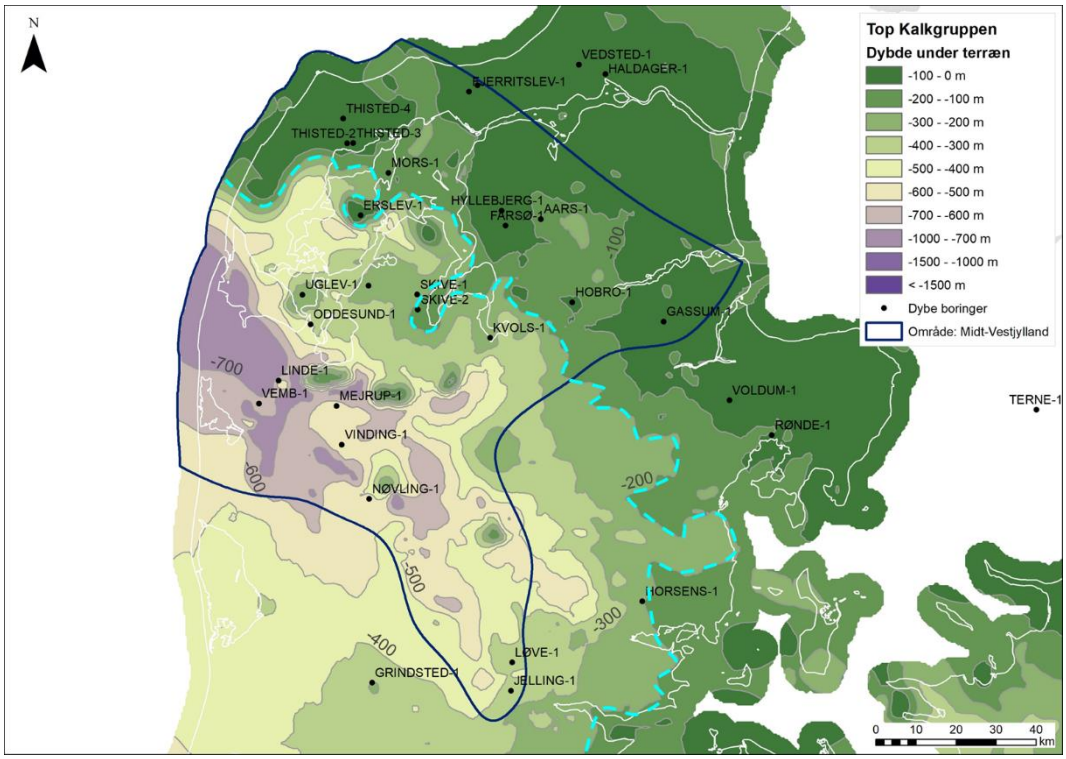
Figur 6.31. *Midt-Vestjylland området vist med kommunegrænser og større byer.*



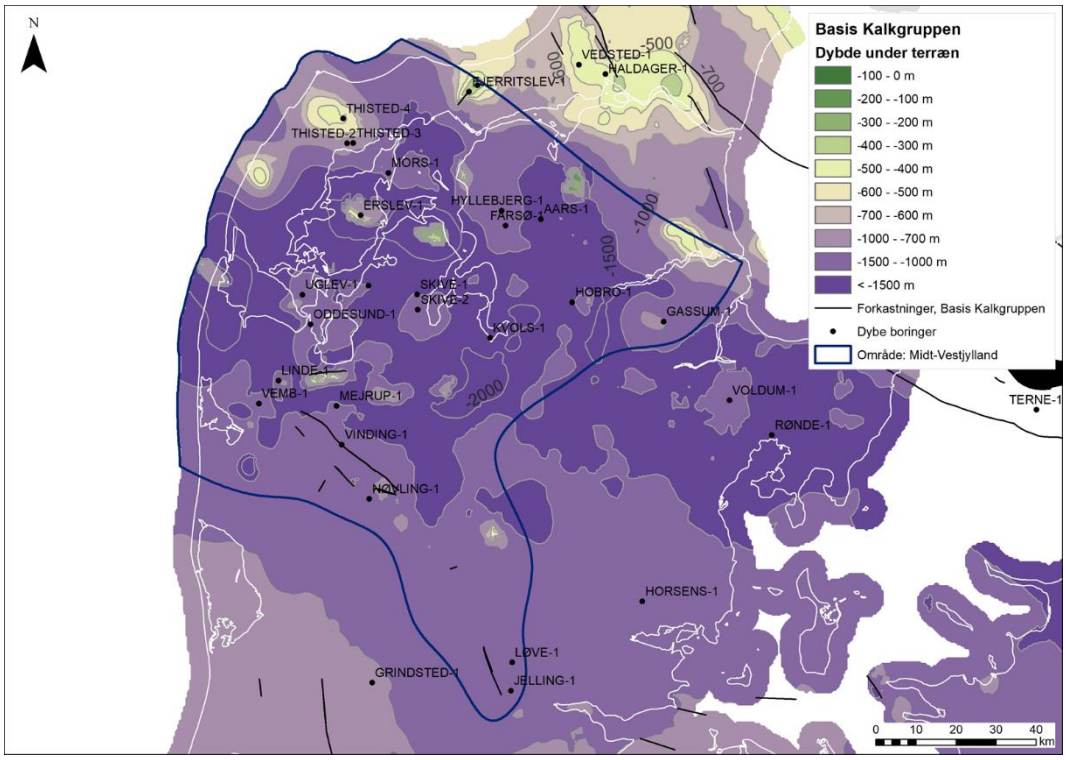
Figur 6.32. *Seismiske linjer og deres kvalitet samt boringer, Midt-Vestjylland.*



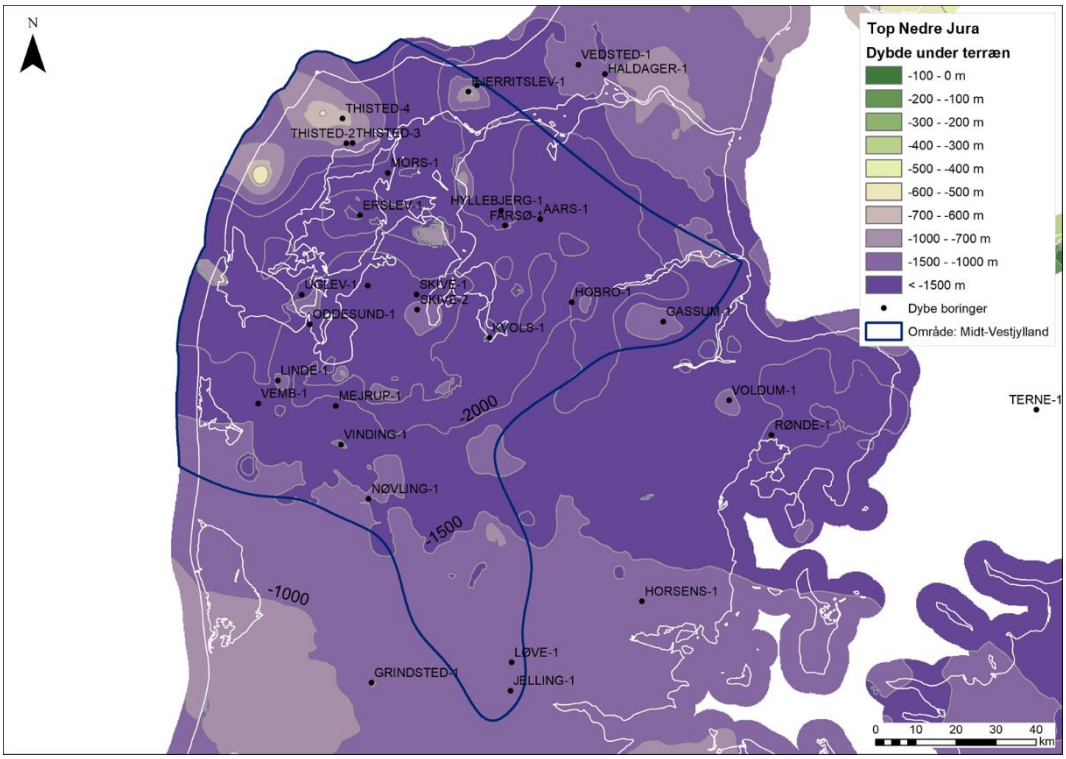
Figur 6.33. *Litologiske logtolkninger (0-800 m) fra Midt-Vestjylland der viser, at bjergarter i 500 meters dybde varierer fra kalksten (Jelling-1) til vekslende sand-lersten (Nøvling-1) og meget lerholdig kalksten (Erslev-1) som ligger oven på Zechstein salt.*



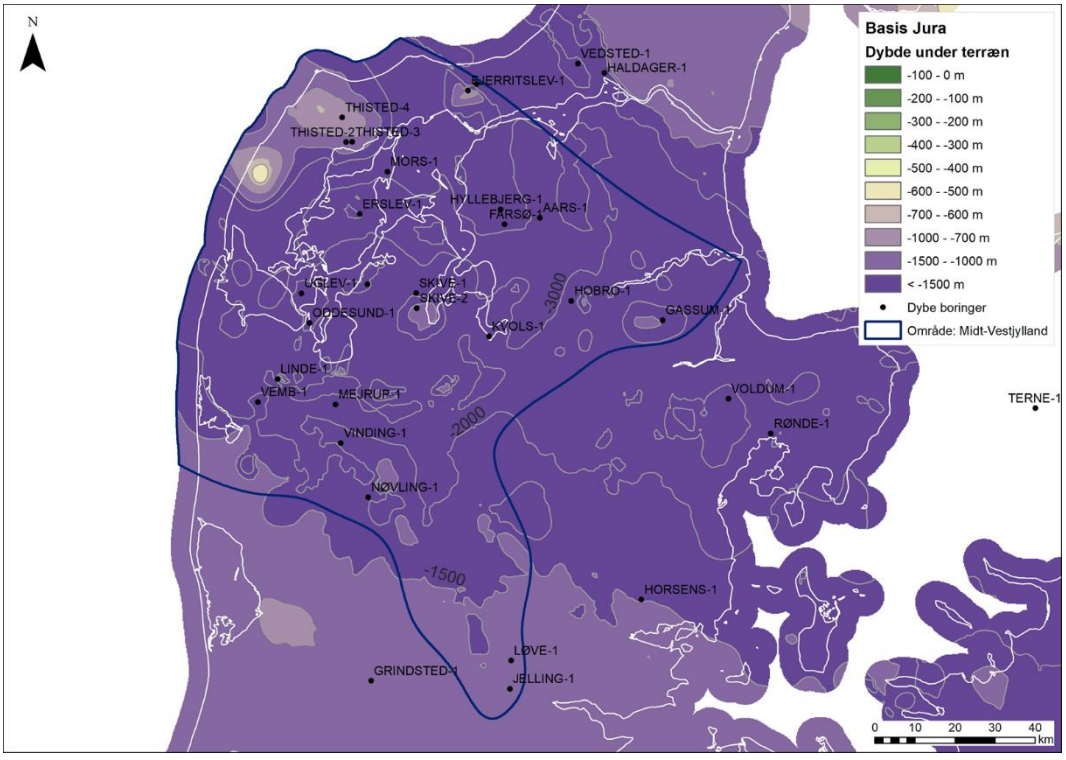
Figur 6.34. *Top Kalkgruppen dybdekort, Midt-Vestjylland. Den stiplede linje markerer hvor Top Kalkgruppen findes i 200 meters dybde, nord og øst herfor findes Top Kalkgruppen i 0 til 200 meter, mod syd findes toppen dybere end 200 meter og lokalt i 700 meters dybde.*



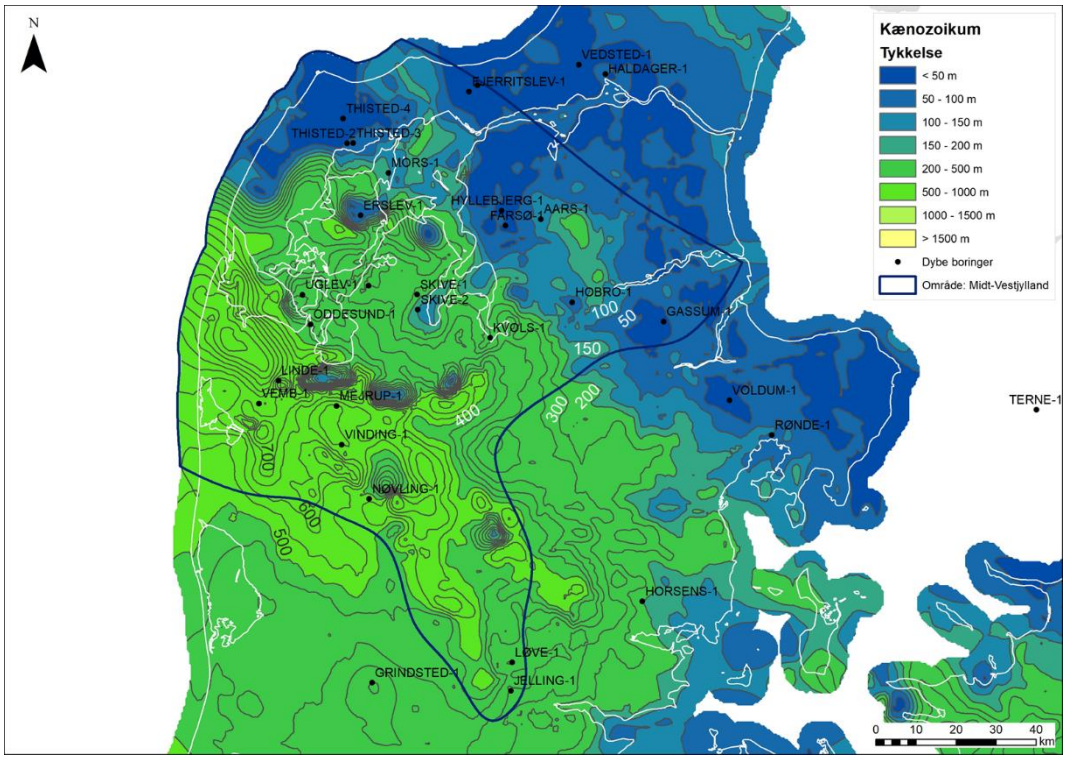
Figur 6.35. *Top Nedre Kridt (Basis Kalkgruppen) dybdekort, Midt-Vestjylland. Dybden varierer typisk mellem 1000 og 2000 meter, og det irregulære konturmønster skyldes underliggende saltstrukturer.*



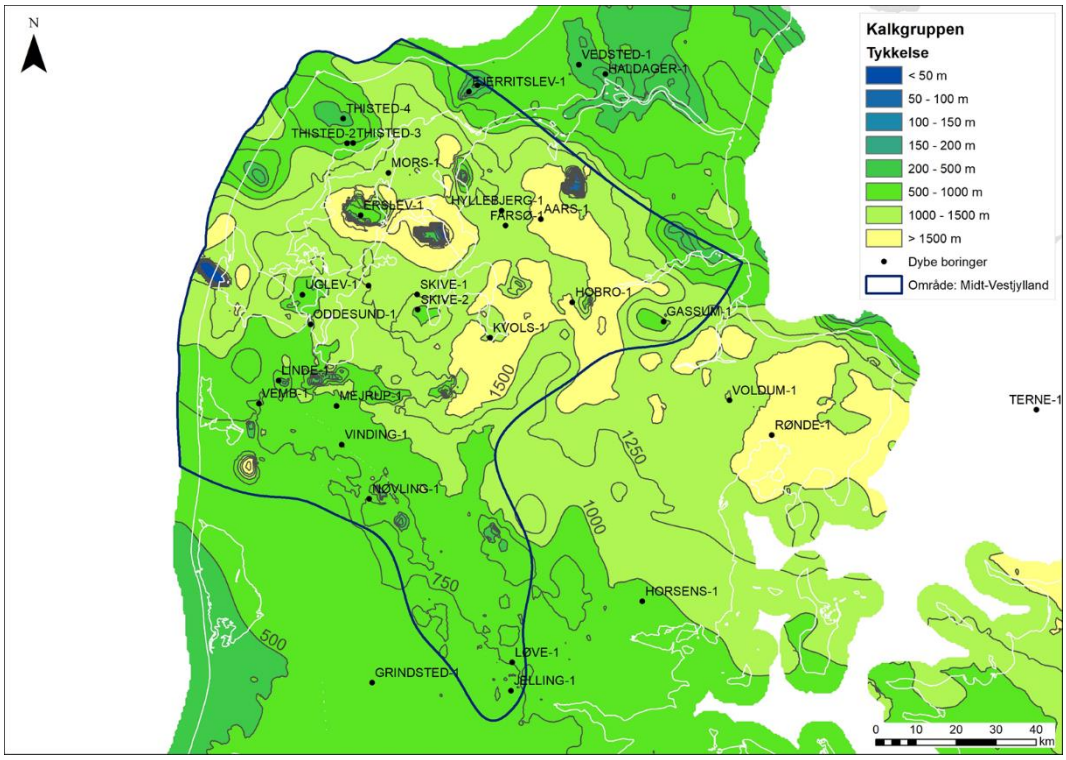
Figur 6.36. *Dybdekort for Top Nedre Jura, Midt – Vestjylland. Kortet viser, at dybden for Top Nedre Jura generelt er mere end 1500 meter og det irregulære konturmønster skyldes underliggende saltstrukturer.*



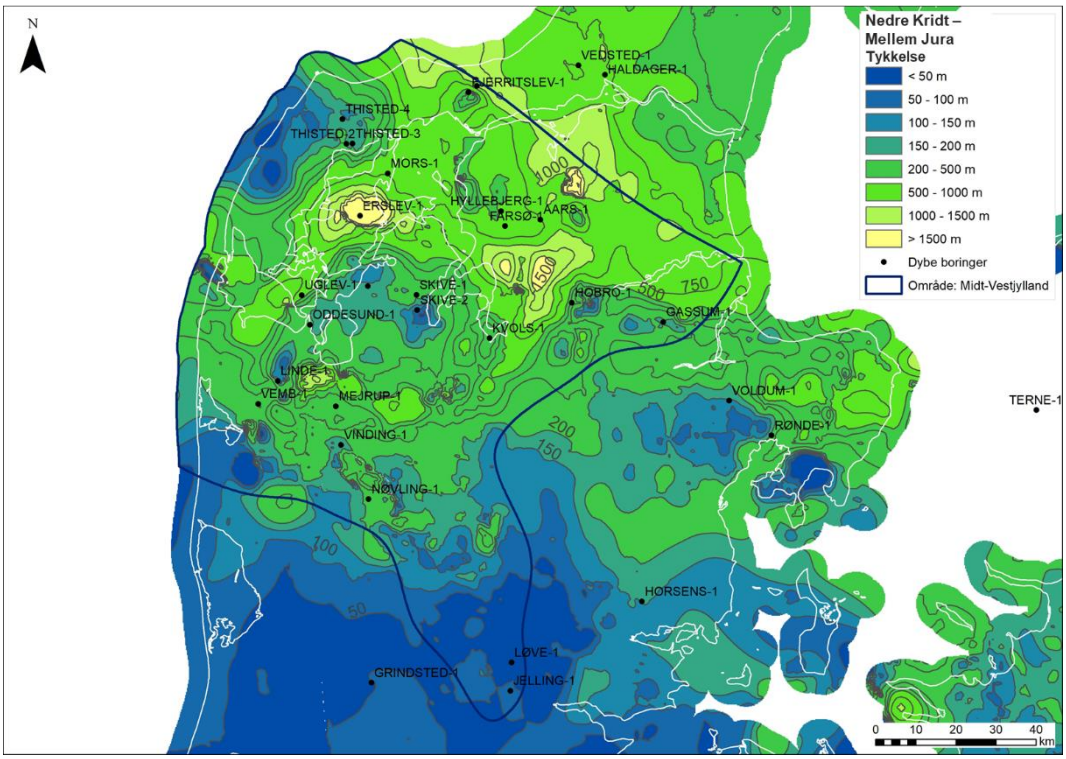
Figur 6.37. *Dybdekort for Basis Jura, Midt – Vestjylland. Kortet viser, at basis Jura generelt findes i dybder omkring 1500 meter og lokalt mere end 3000 meter.*



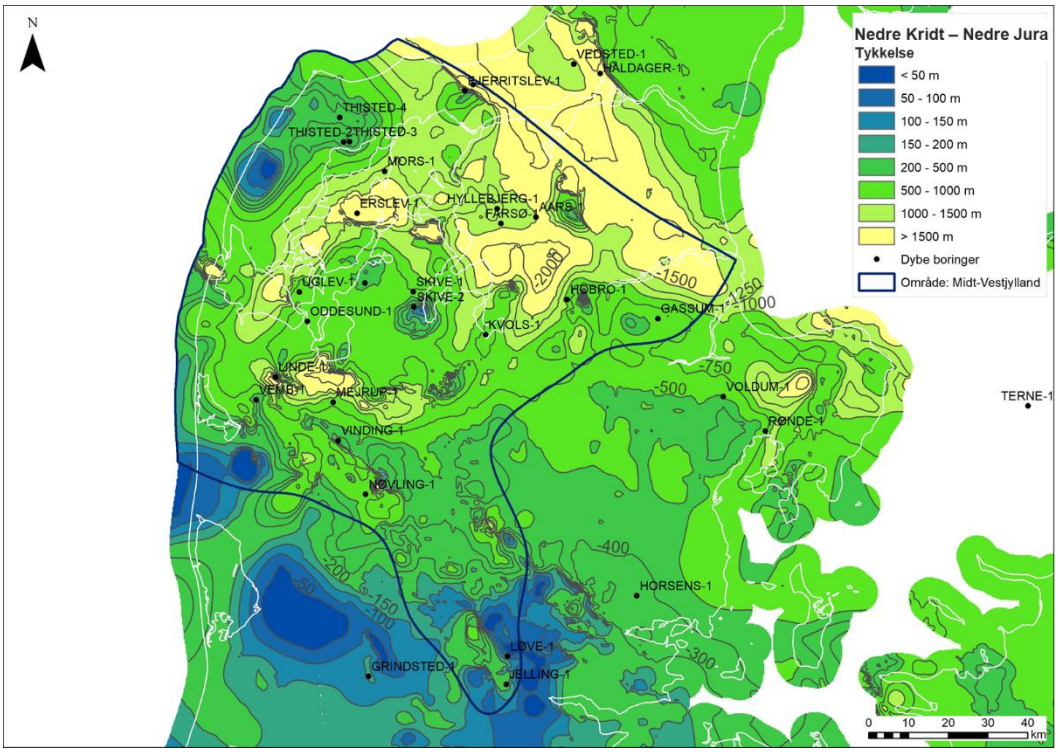
Figur 6.38. *Tykkelsen af aflejringer fra Kænozoikum, Midt-Vestjylland. I store dele af området er tykkelsen mere end 200 meter og lokalt mere end 700 meter.*



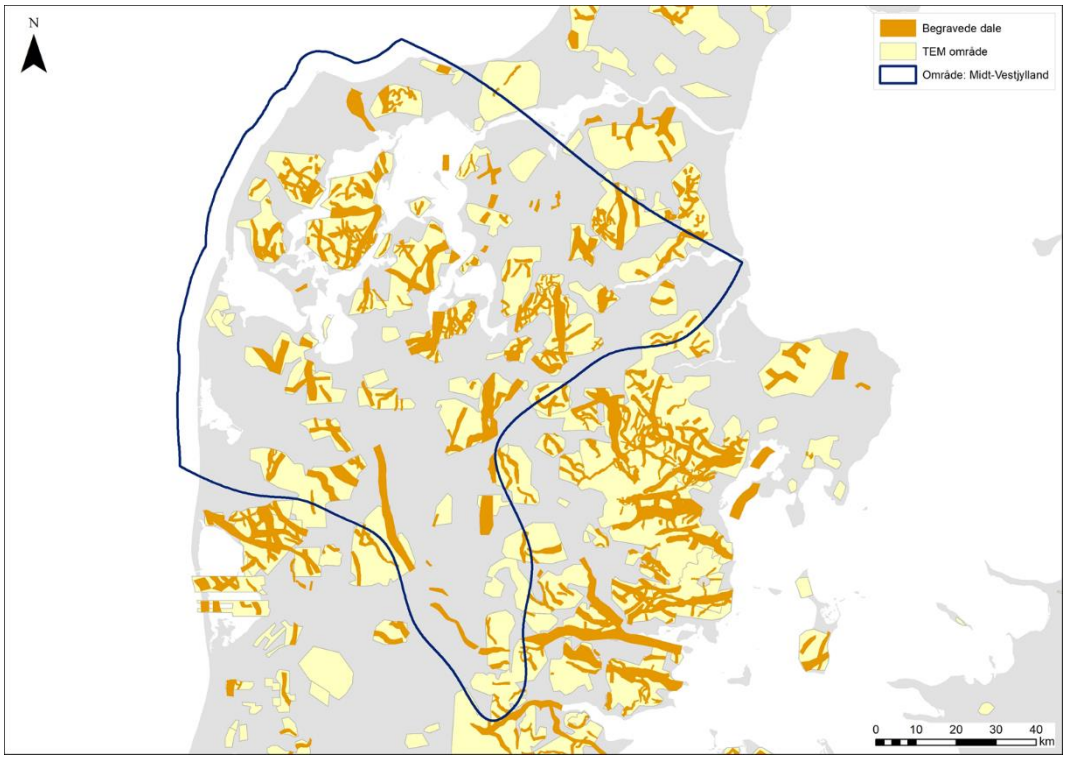
Figur 6.39. *Tykkelsen af Kalkgruppen, Midt-Vestjylland. Det irregulære konturmønster og tykkelser varierende mellem 700 og 1500 meter over korte afstande skyldes remobilisering af dybereliggende salt, der har dannet diapirer og puder.*



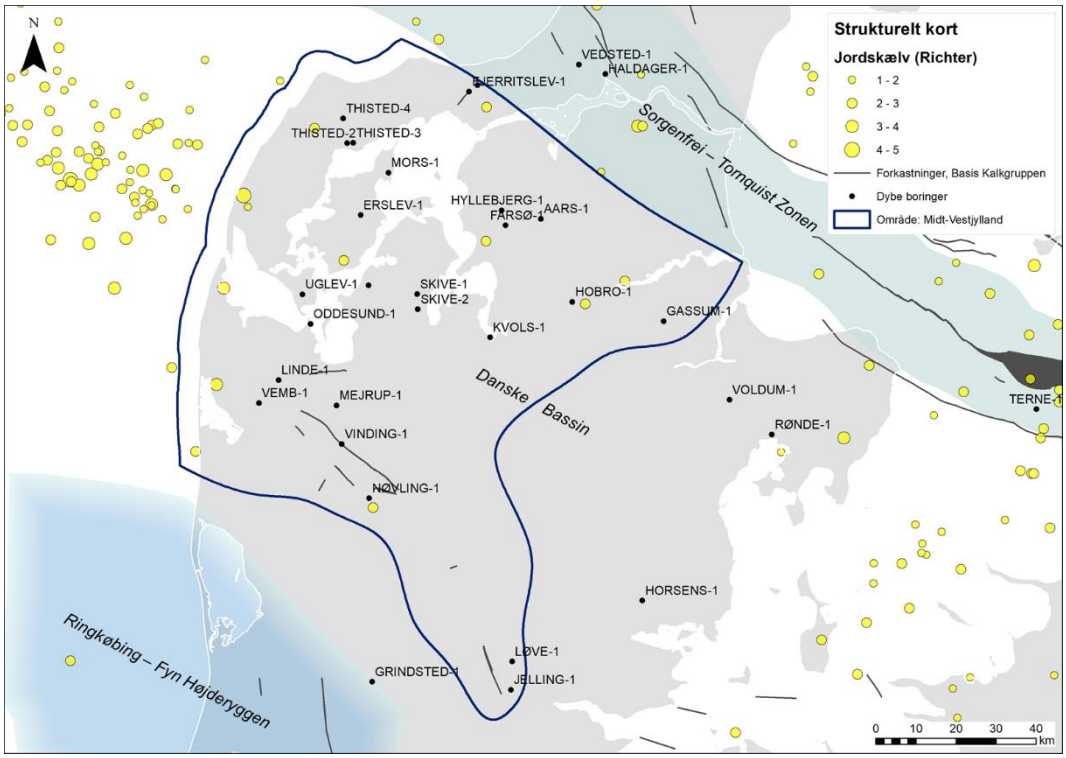
Figur 6.40. *Tykkelsen af aflejringerne fra Nedre Kridt til Mellem Jura i Midt-Vestjylland. Tykkelsen varierer fra 50 meter til mere end 1500 meter. Det irregulære konturmønster skyldes dybereliggende saltdiapirer og saltpuder.*



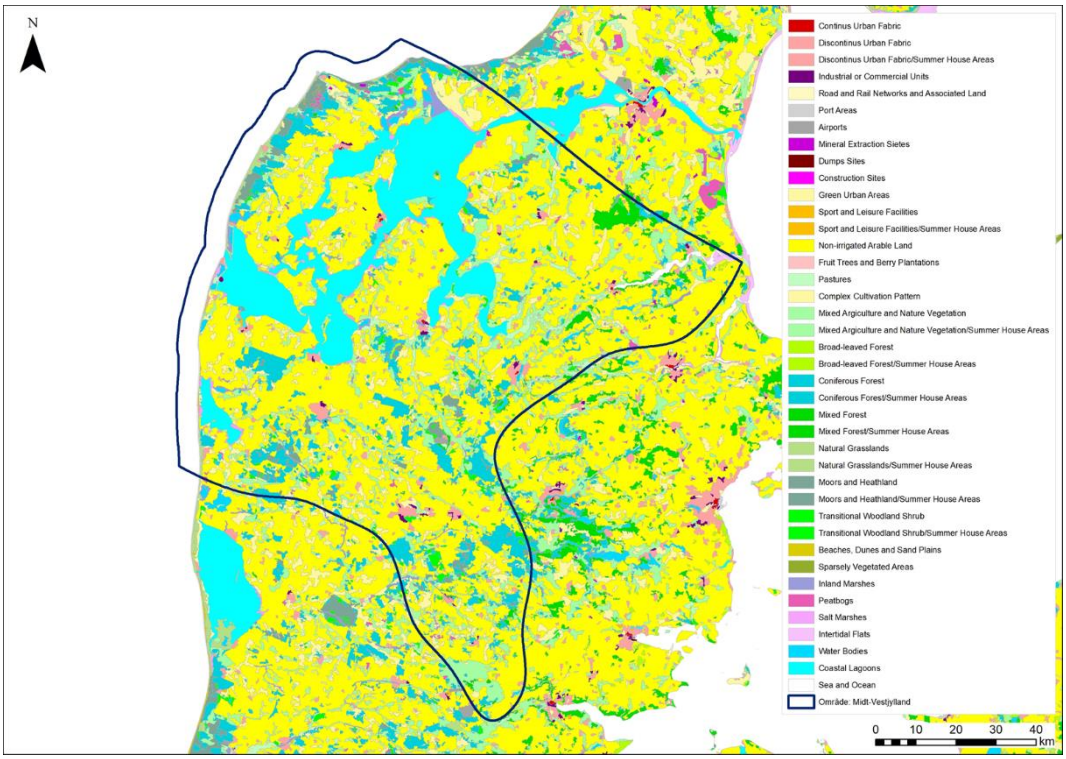
Figur 6.41. *Tykkelsen af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Midt-Vestjylland.*



Figur 6.42. *Kort over begravede dale og de TEM områder, der ligger til grund for deres kortlægning, Midt-Vestjylland.*



Figur 6.43. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Midt-Vestjylland. I farvandet vest for området ses mange registrerede jordskælv.*



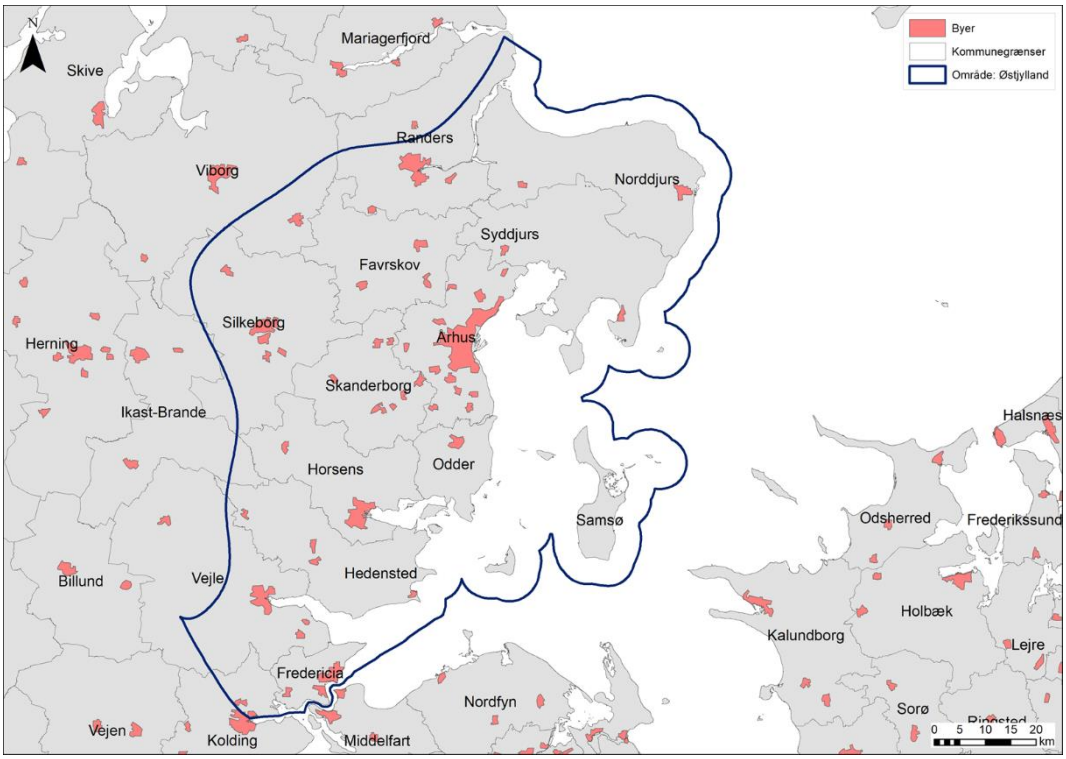
Figur 6.44. *Arealanvendelse, Midt-Vestjylland. Den turkisblå farve viser, at store dele af området er dækket af vand. (MiljøGIS, 2021).*

6.4 Østjylland

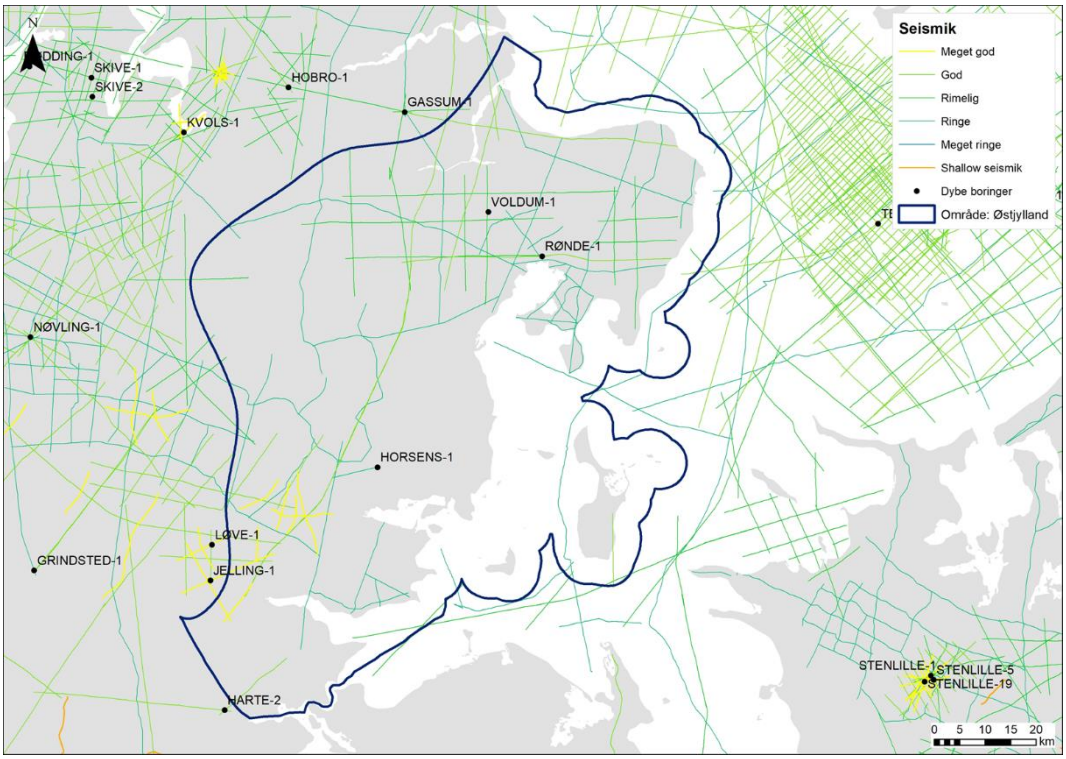
Kalksten udgør værtsbjergarten og findes i hele området i dybdeintervallet 400 til 500 meter og udbredelsen fortsætter generelt nedefter til dybder på 1000 meter eller mere (Figur 6.47, 6.48, 6.49 og 6.53). Kalksten udgør også barrierebjergarten i hele området og findes i områdets østligste del stedvis helt op i terrænoverfladen. Toppen af kalken findes på stigende dybder mod sydvest, hvor den ligger i 300 til 400 meters dybde (Figur 4.16, 4.17 og 6.48). I størstedelen af området findes kalken kontinuert udbredt i hele barrierezonen, hvorfor kriterium 1.1 scorer grøn. I den sydvestligste del af området er kalken dog ikke tyk nok til at udgøre en 250 meter tyk barriere for et depot i intervallet 400-500 meter (Figur 6.48). Hvis et depot i denne del af området placeres dybere end 500 meter, kan den samlede tykkelse af værtsbjergart og barriere i kalken opnå de krævede mægtigheder, da kalken har mægtigheder omkring 1000 meter (Figur 6.53).

Tabel 6.6. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Østjylland.*

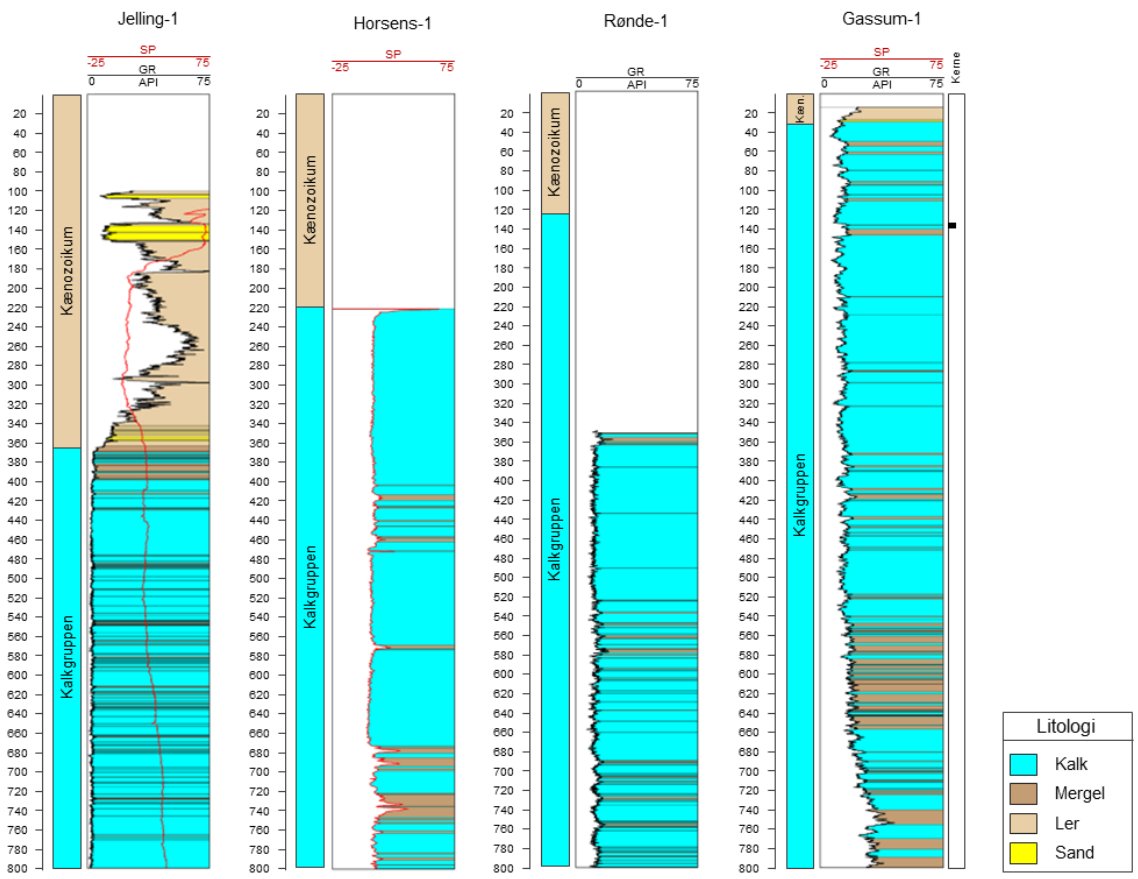
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



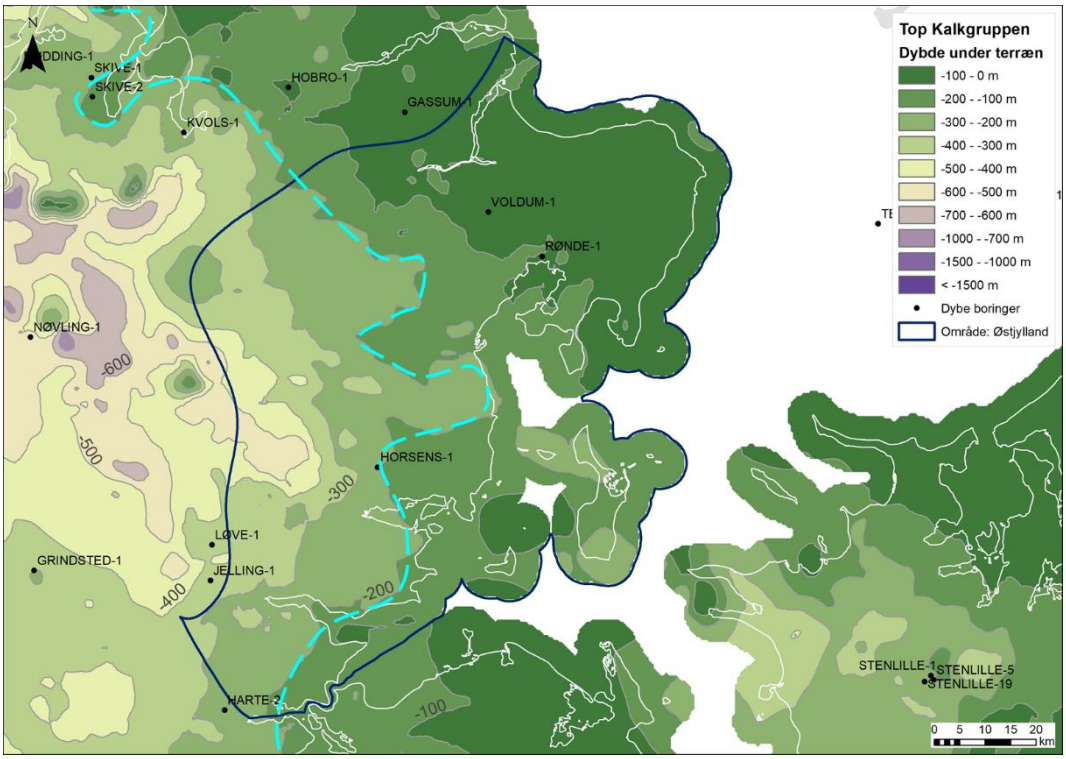
Figur 6.45. *Østjylland området vist med kommunegrænser og større byer.*



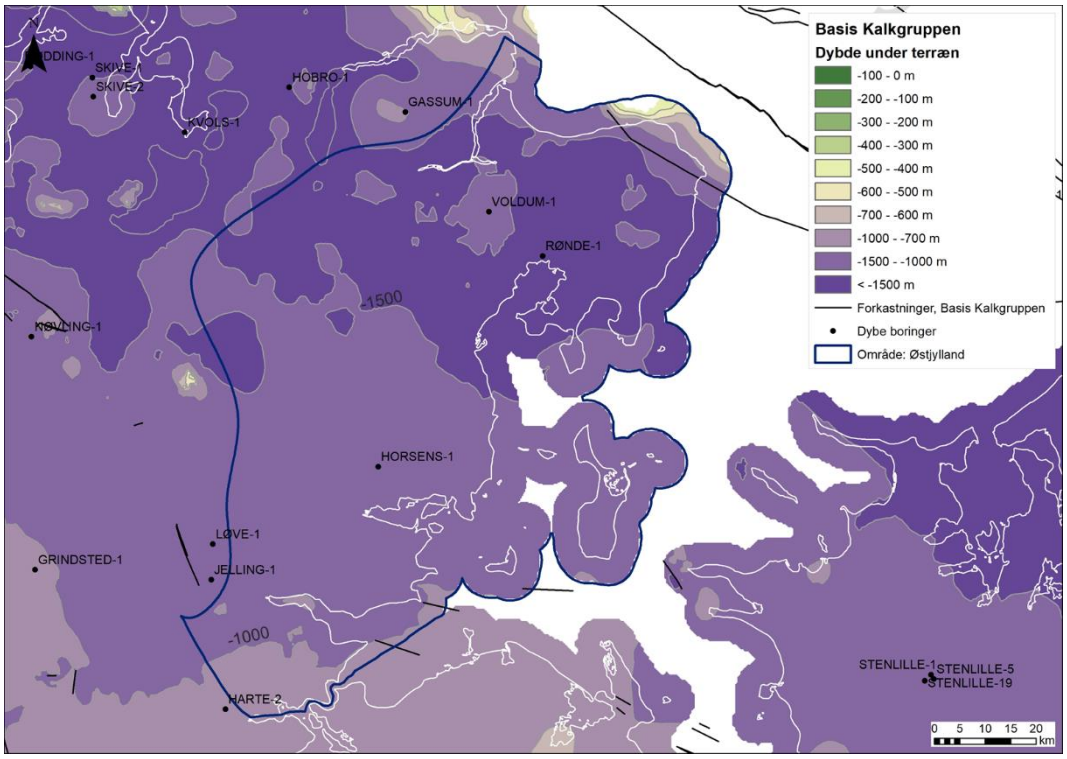
Figur 6.46. *Overblik over seismiske linjer og deres kvalitet samt dybe boringer i Østjylland.*



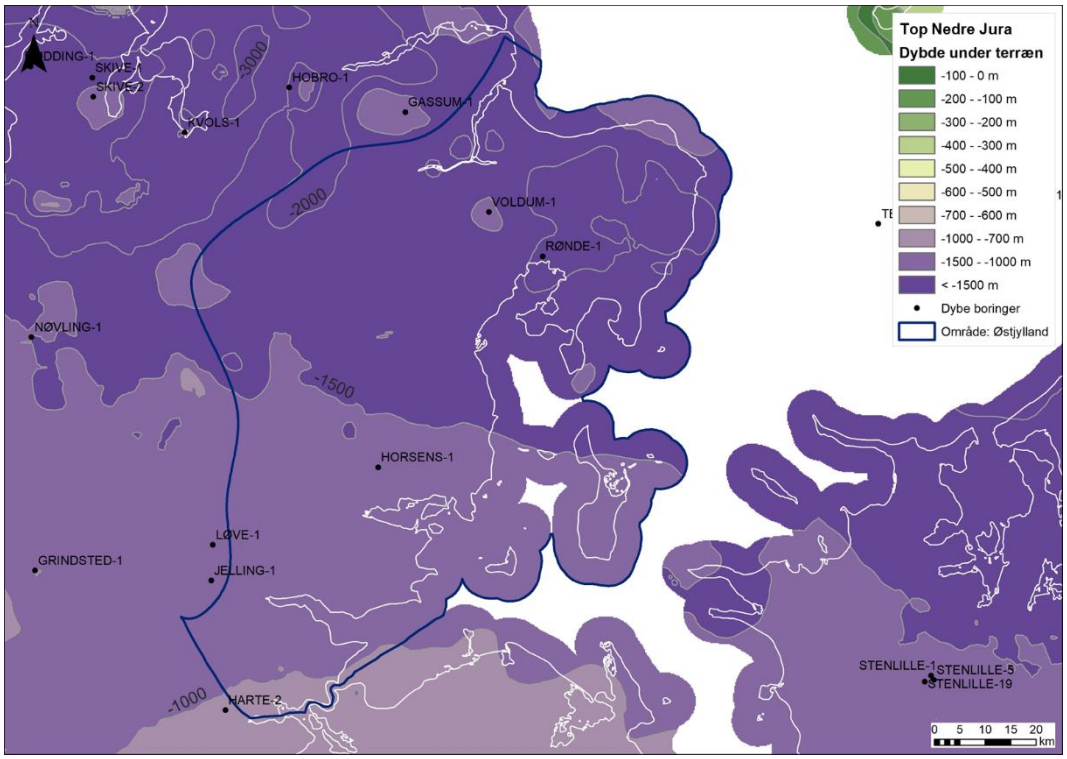
Figur 6.47. *Litologiske logtolkninger der illustrerer, at Toppen af Kalkgruppen findes på stigende dybder fra ca. 30 meter i Gassum-1 til 360 meter i Jelling-1 mod syd. Kalken ses at indeholde mange intervaller med mergel.*



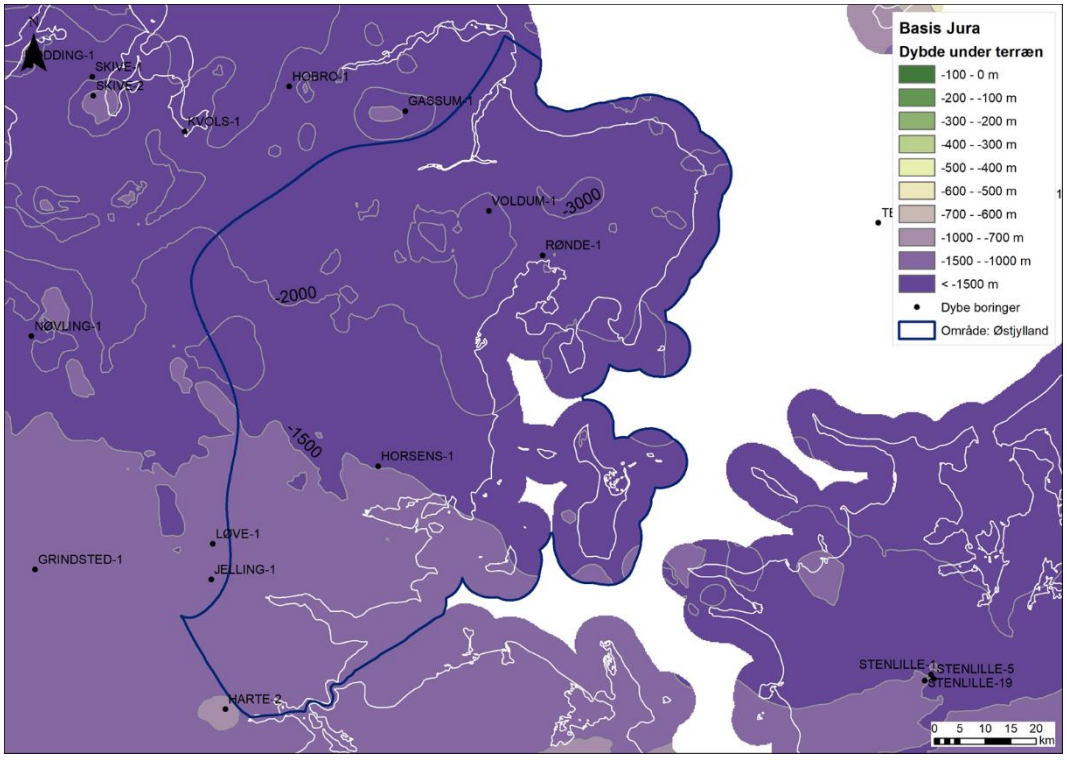
Figur 6.48. *Top Kalkgruppen dybdekort, Østjylland. Vest for den stiplede turkisblå linje ligger toppen af Kalkgruppen dybere end 200 meter.*



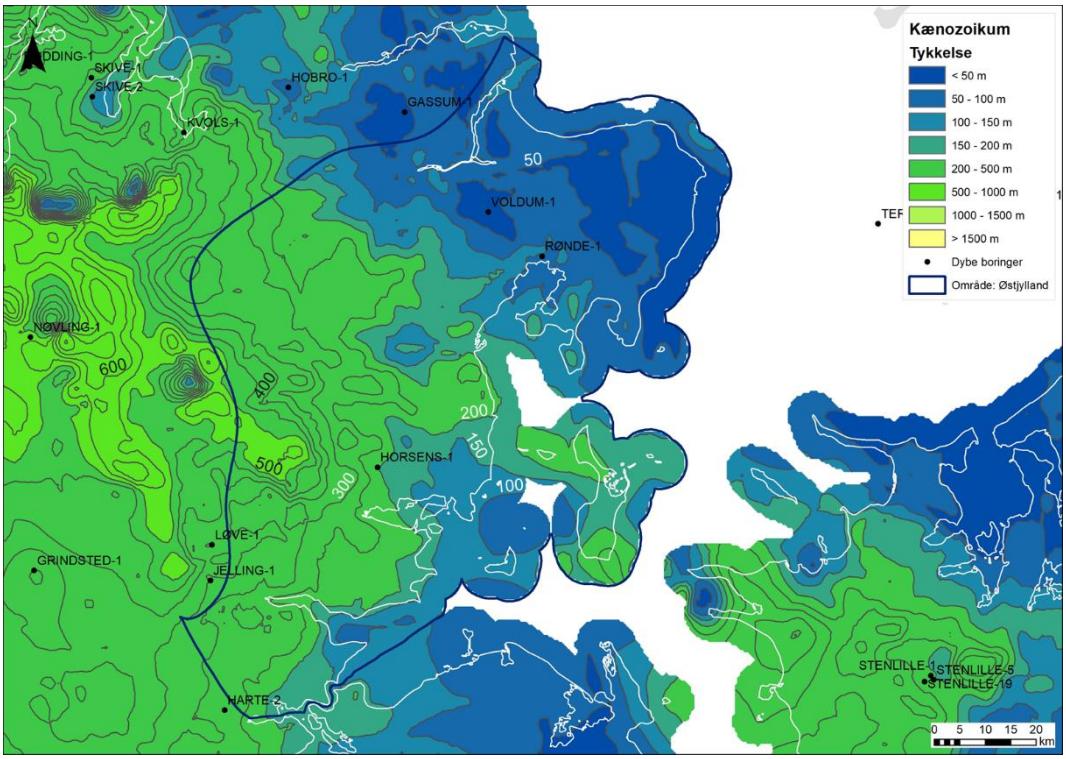
Figur 6.49. *Top Nedre Kridt dybdekort (Basis Kalkgruppen), Østjylland. Kortet viser, at basis af Kalkgruppen findes i dybder større end 1000 meter.*



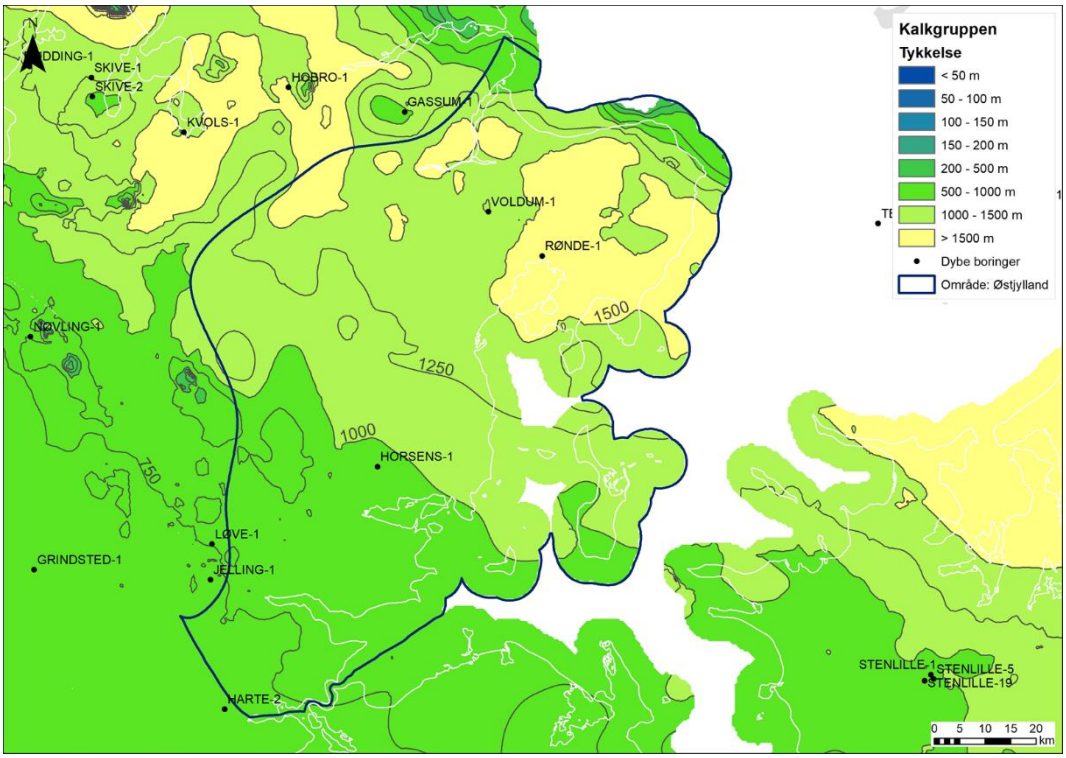
Figur 6.50. *Dybdekort Top Nedre Jura, Østjylland.*



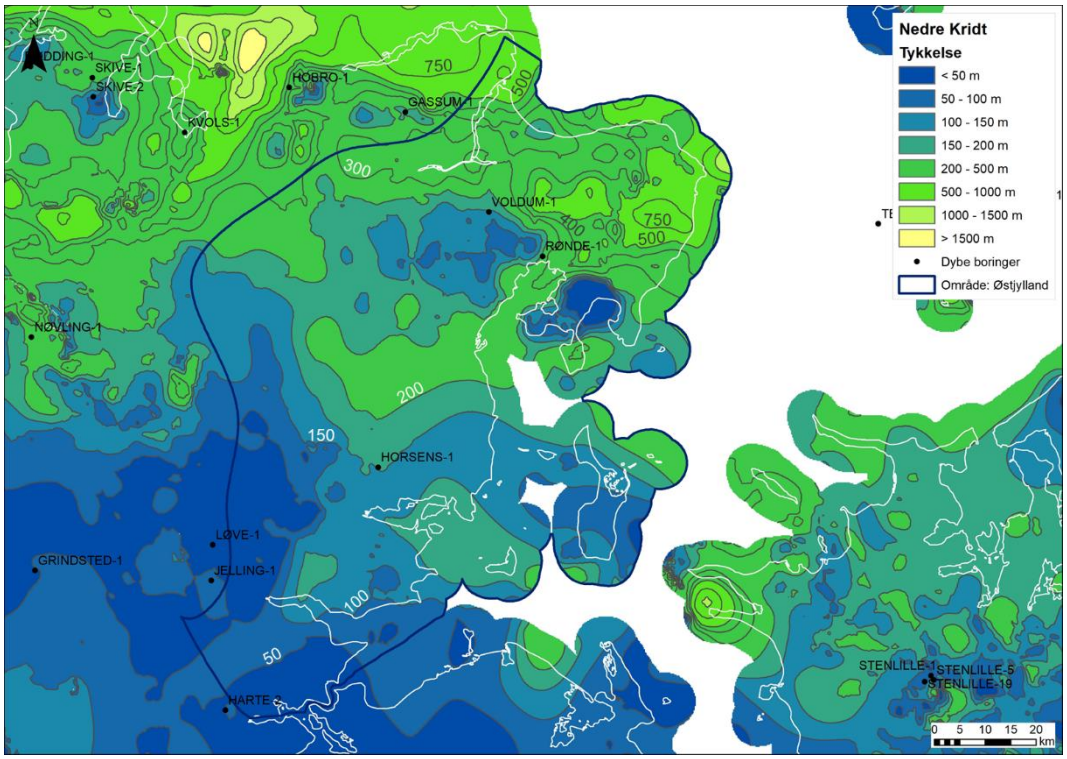
Figur 6.51. *Dybdekort Basis Jura, Østjylland.*



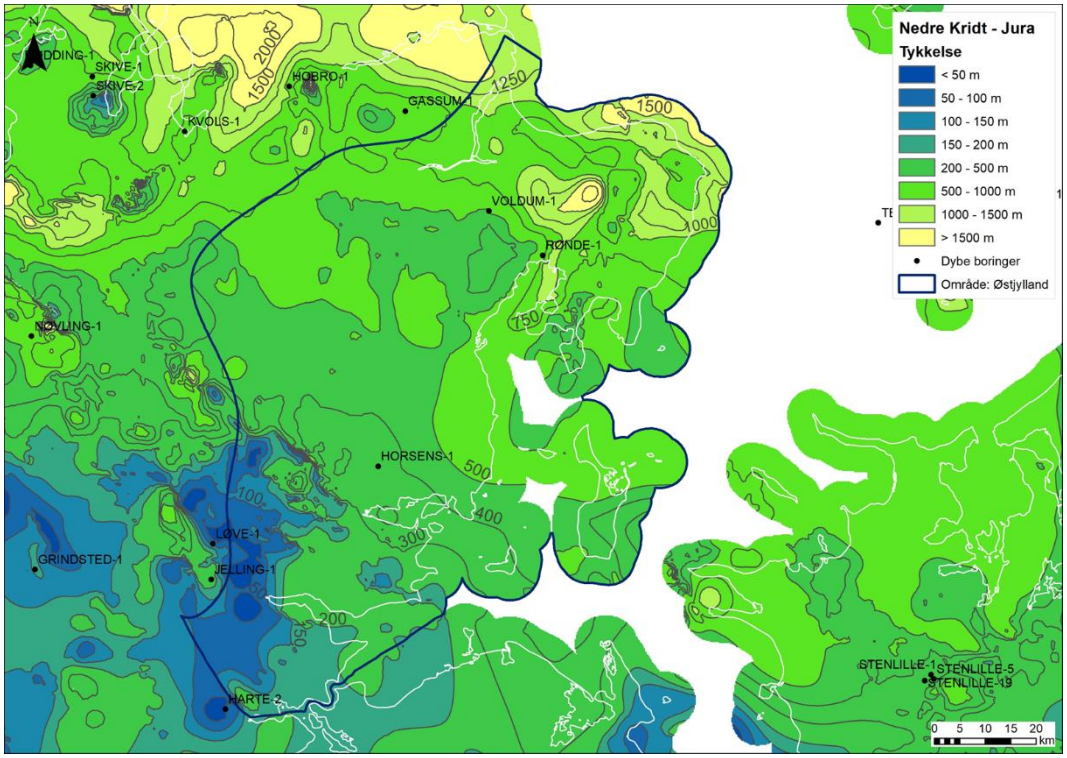
Figur 6.52. *Tykkelseskort af aflejringer fra Kænozoikum, Østjylland. Kortet viser at tykkelsen stiger mod sydvest, hvor den lokalt er mere end 500 meter.*



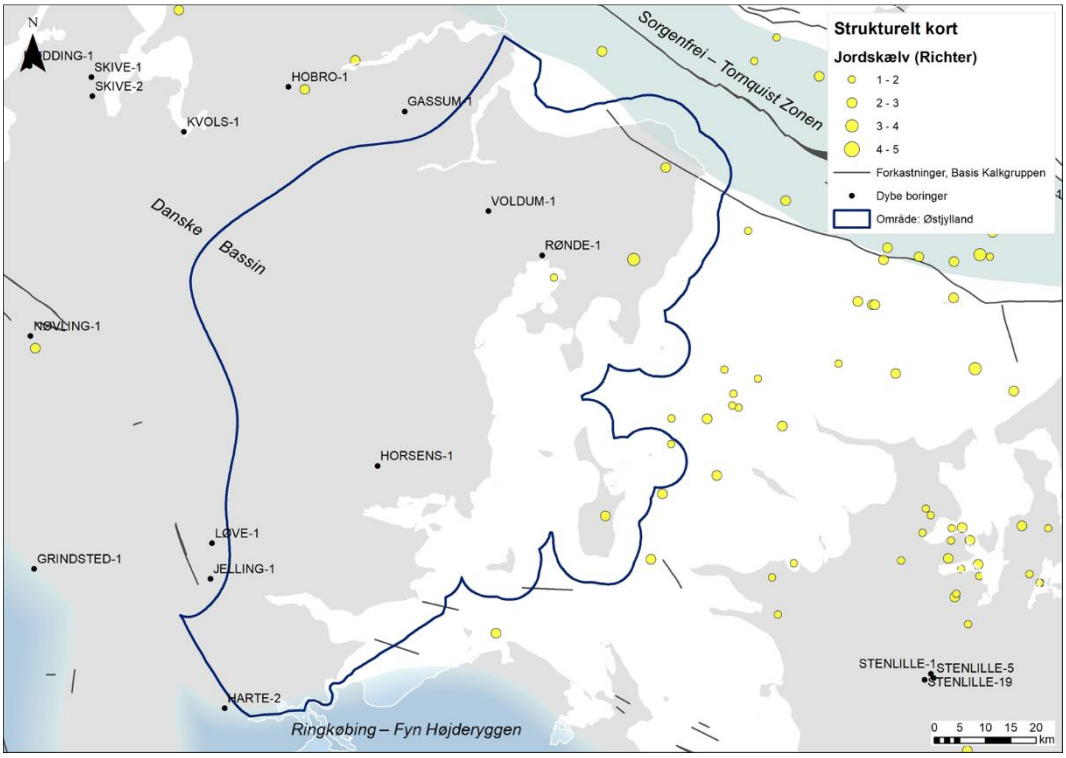
Figur 6.53. *Tykkelsen af Kalkgruppen, Østjylland. Kortet viser at tykkelsen stiger fra 750 meter i syd til mere en 1500 meter mod nord (gule områder).*



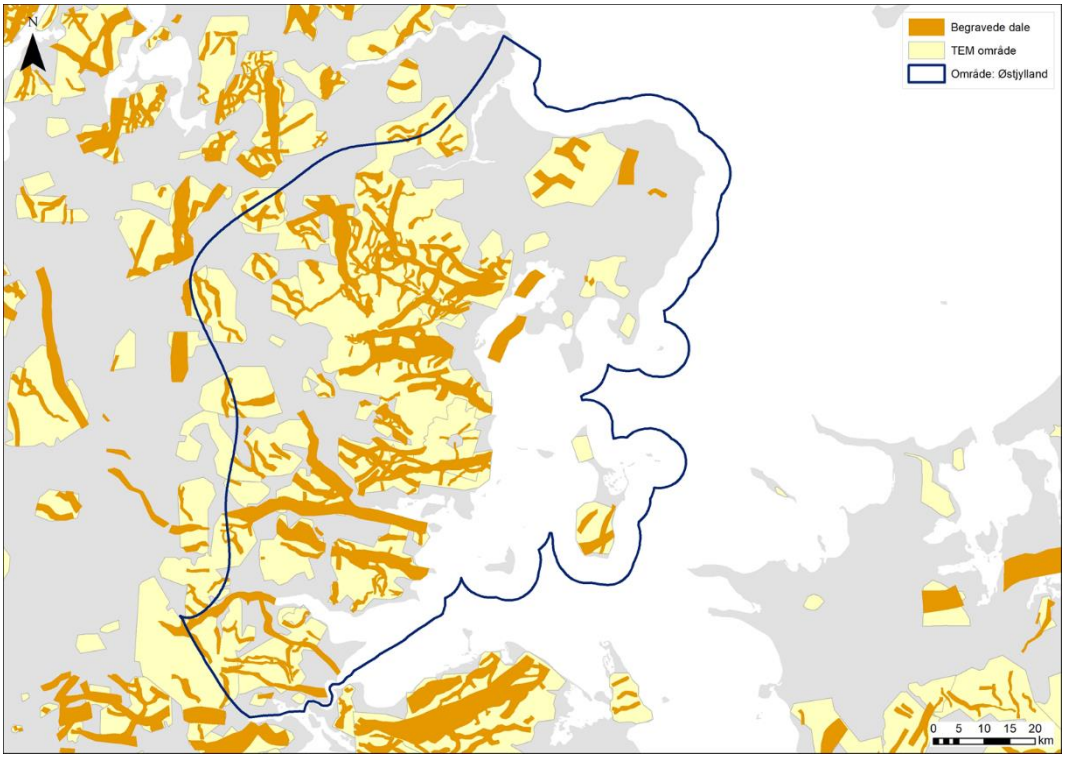
Figur 6.54. *Tykkelsen af aflejringer fra Nedre Kridt – Mellem Jura, Østjylland.*



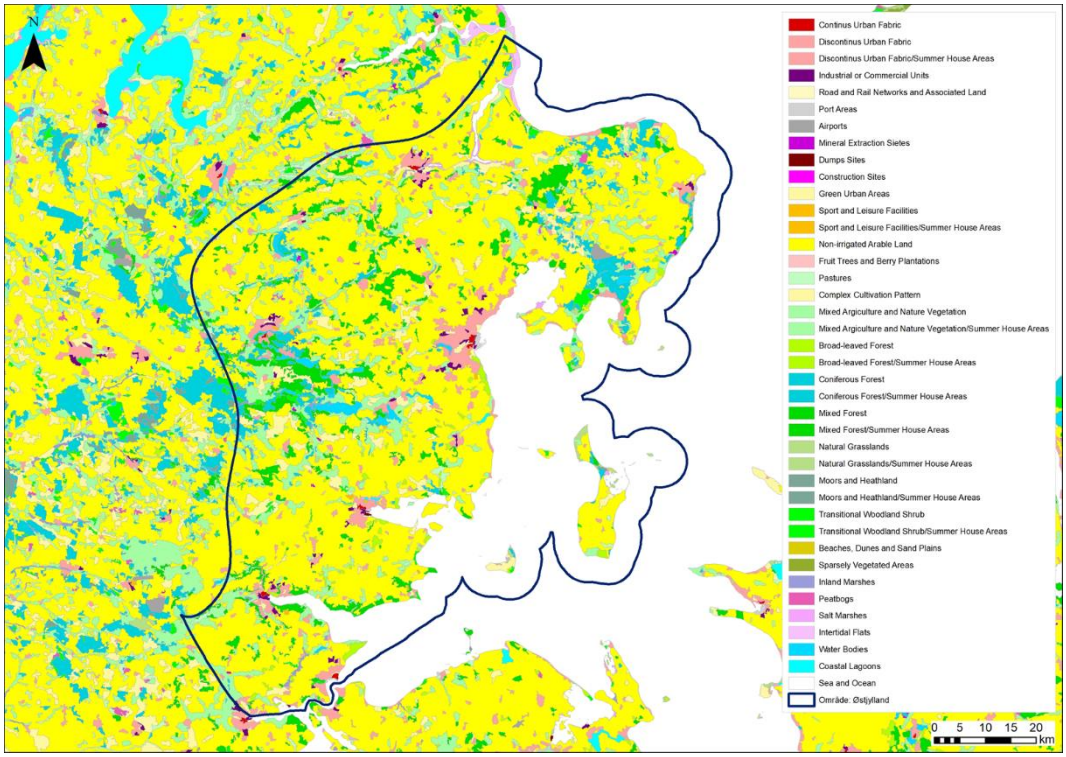
Figur 6.55. *Den samlede tykkelse af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Østjylland.*



Figur 6.56. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Østjylland.*



Figur 6.57. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Østjylland.*



Figur 6.58. *Arealanvendelse, Østjylland. (MiljøGIS, 2021).*

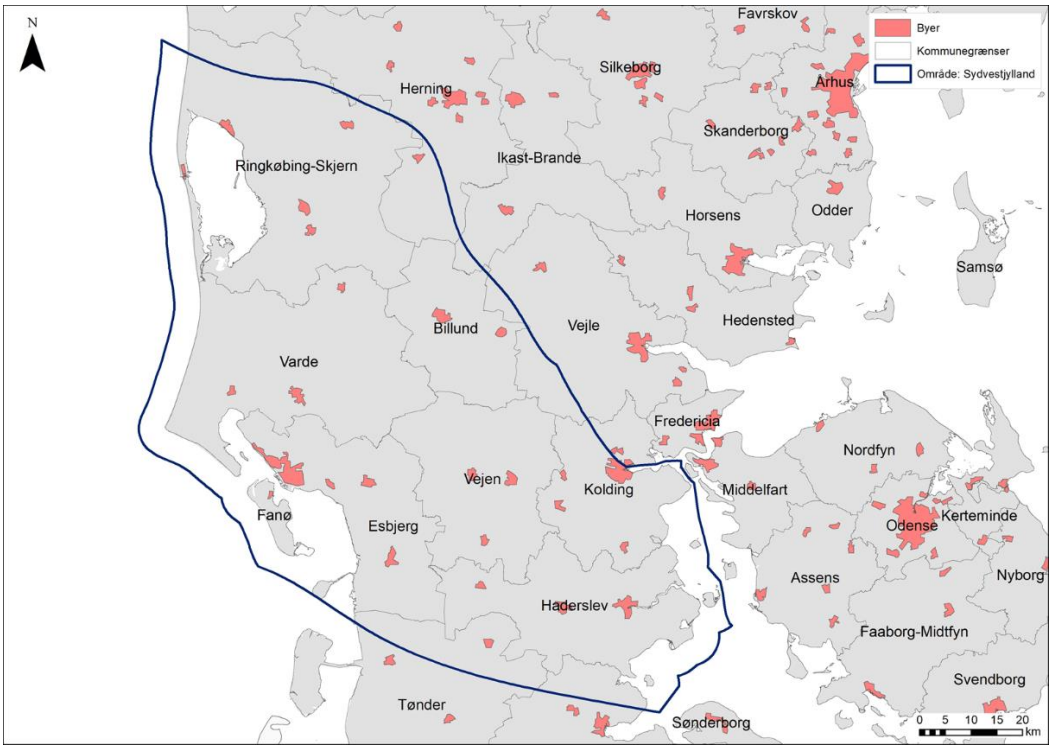
6.5 Sydvestjylland

Kalksten udgør værtsbjergarten og findes i hele området i dybdeintervallet 400 til 500 meter og fortsætter generelt nedefter til dybder under 1000meter (Figur 4.15, 4.18, og 6.62 og 6.67). Toppen af kalken findes i ca. 400 meter, hvor den overlejres af kænozoiske sedimenter, hvis udbredelse fortsætter helt til terrænoverfladen (Figur 6.61). Der er således maksimalt 100 meter kalksten i barrierezonen i intervallet ned til 500 m, hvorfor kriterium 1.1 scorer mindre favorabelt (orange).

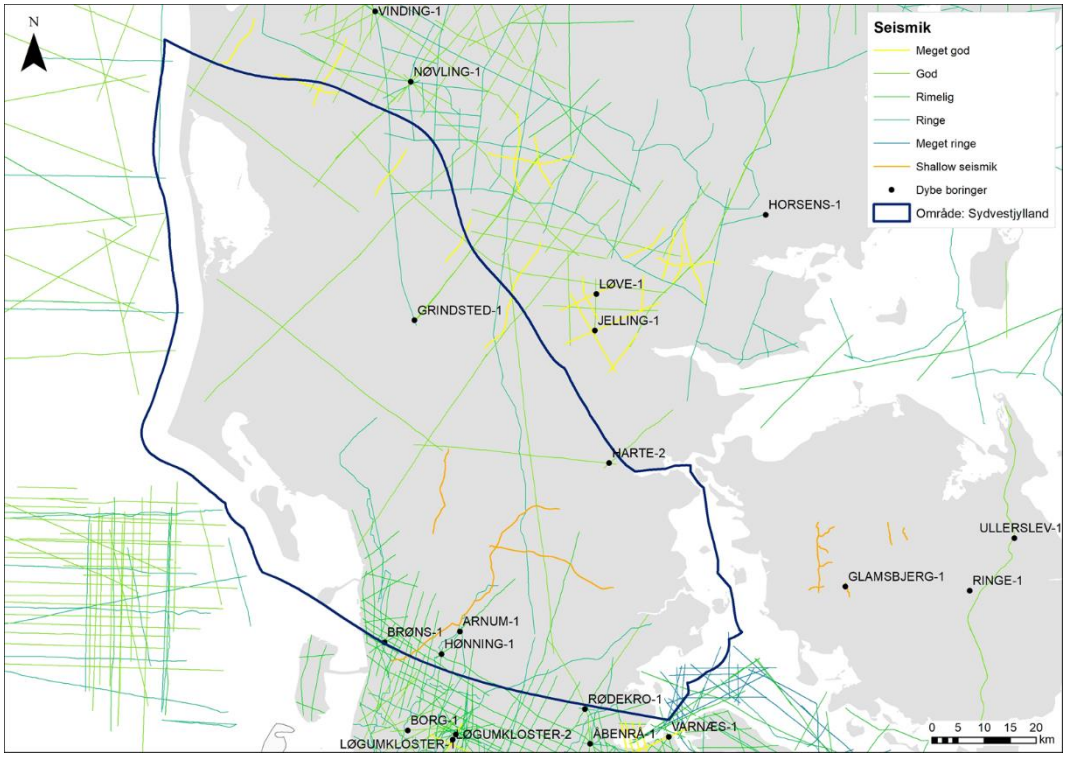
Da kalken generelt har en stor mægtighed i området (500 – 1000 meter, Figur 6.67) kan en tyk barriere af kalksten opnås, hvis et depot placeres i kalksten på større dybde end 500 meter.

Tabel 6.7. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Sydvestjylland.*

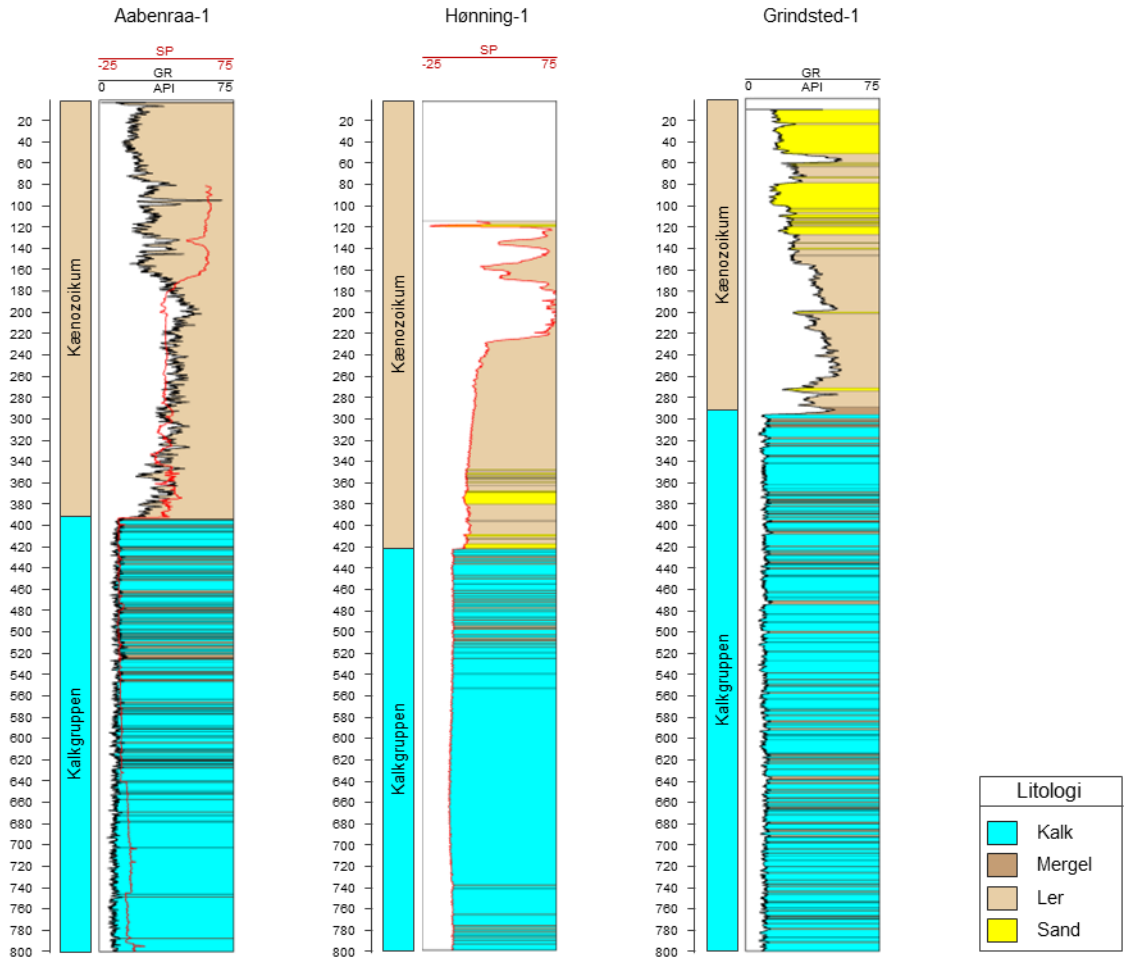
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



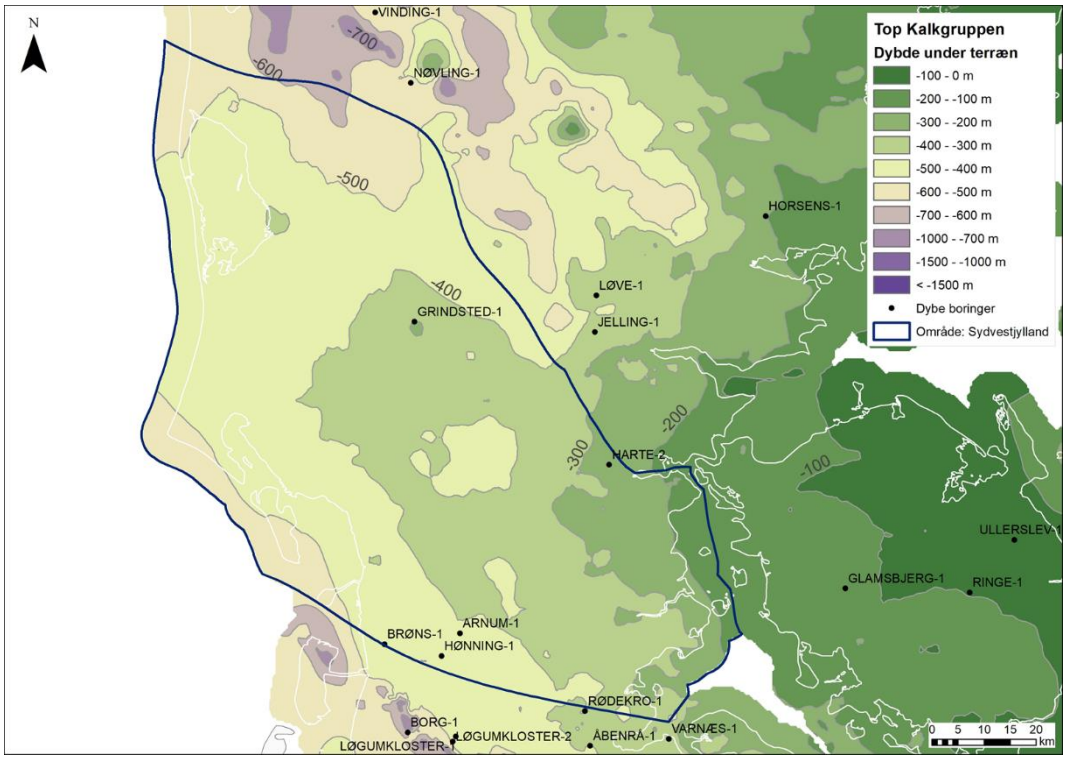
Figur 6.59. *Sydvestjylland området vist med kommunegrænser og større byer.*



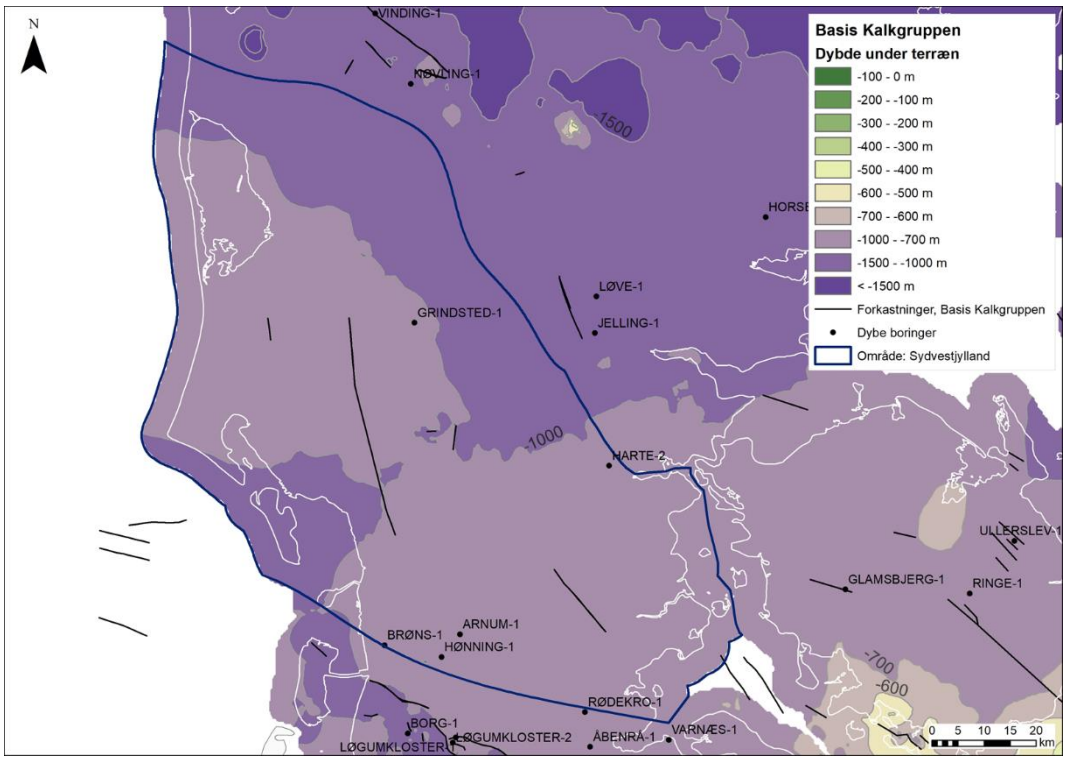
Figur 6.60. *Oversigt over seismiske linjer og deres kvalitet, samt placeringen af dybe boringer, Sydvestjylland. Det ses, at i store dele af området er der relativt stor afstand mellem de seismiske linjer.*



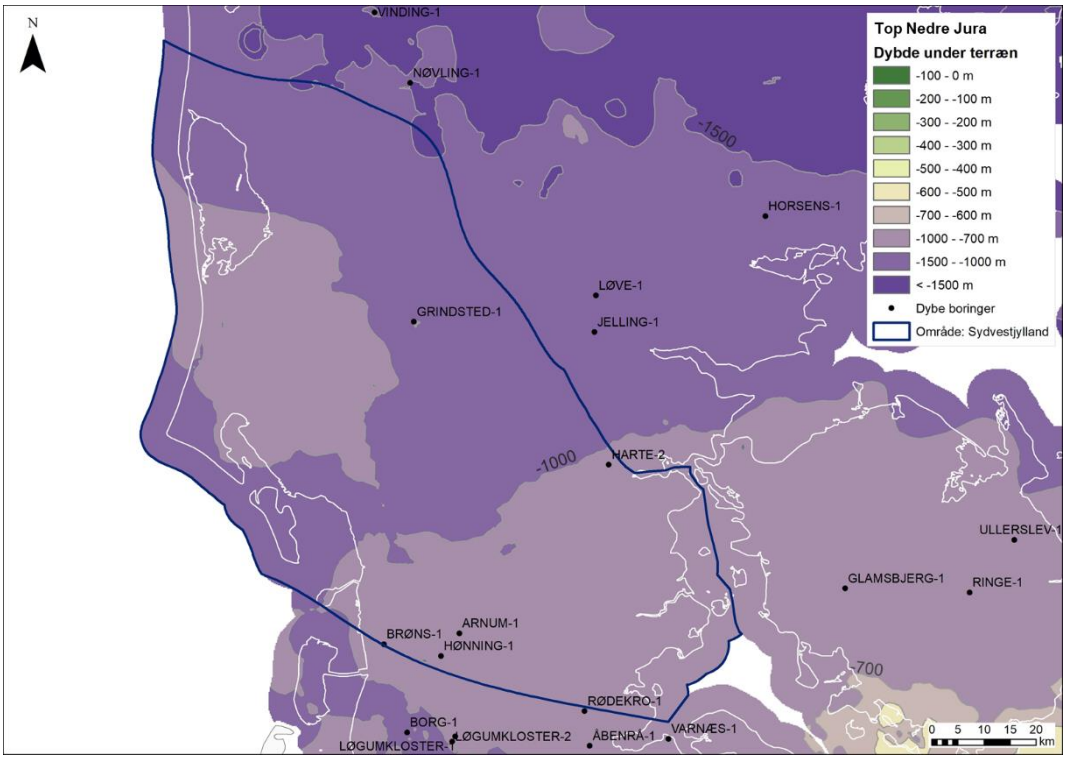
Figur 6.61. *Litologiske logtolkninger (0-800 m) repræsentative for Sydvestjylland området viser at kalksten udgør intervallet fra 300-400 meters dybde til mere end 800 meter. Lerrige interv,aller ses i kalken. Den overliggende kænozoiske lagserie består af vekslende ler- og sandlag.*



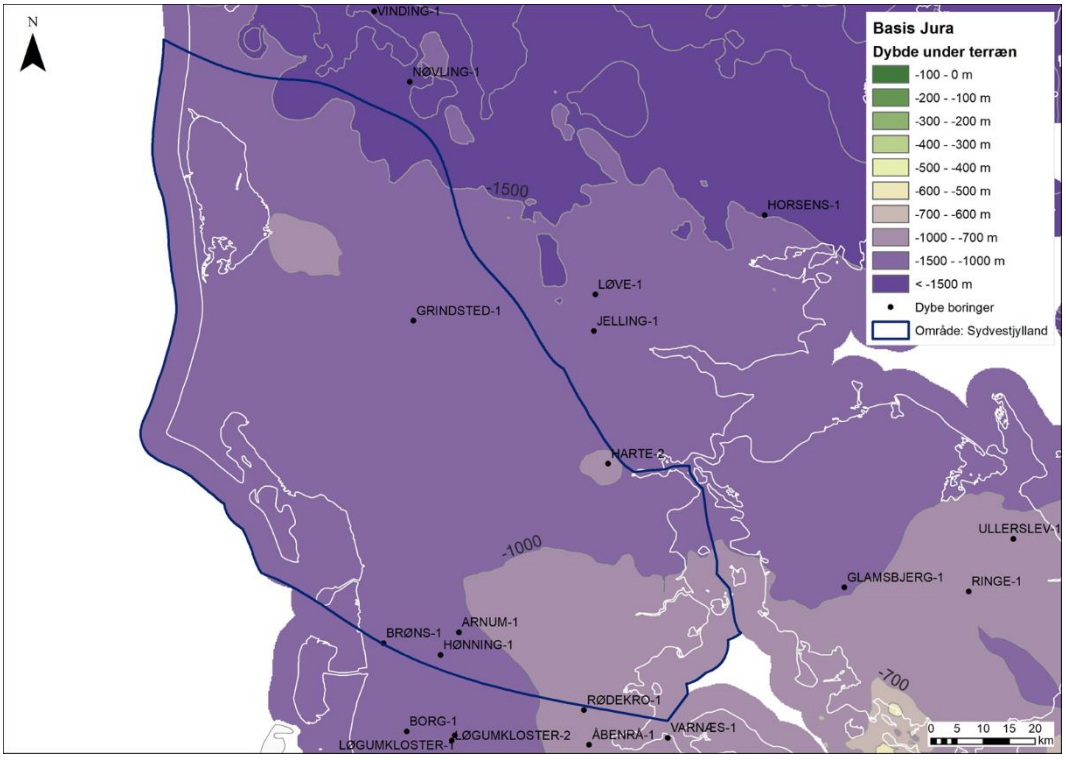
Figur 6.62. *Top Kalkgruppen dybdekort, Sydvestjylland. Kortet viser, at dybden til toppen af Kalkgruppen stiger fra 300 meter i øst til mere end 500 meter mod nordvest.*



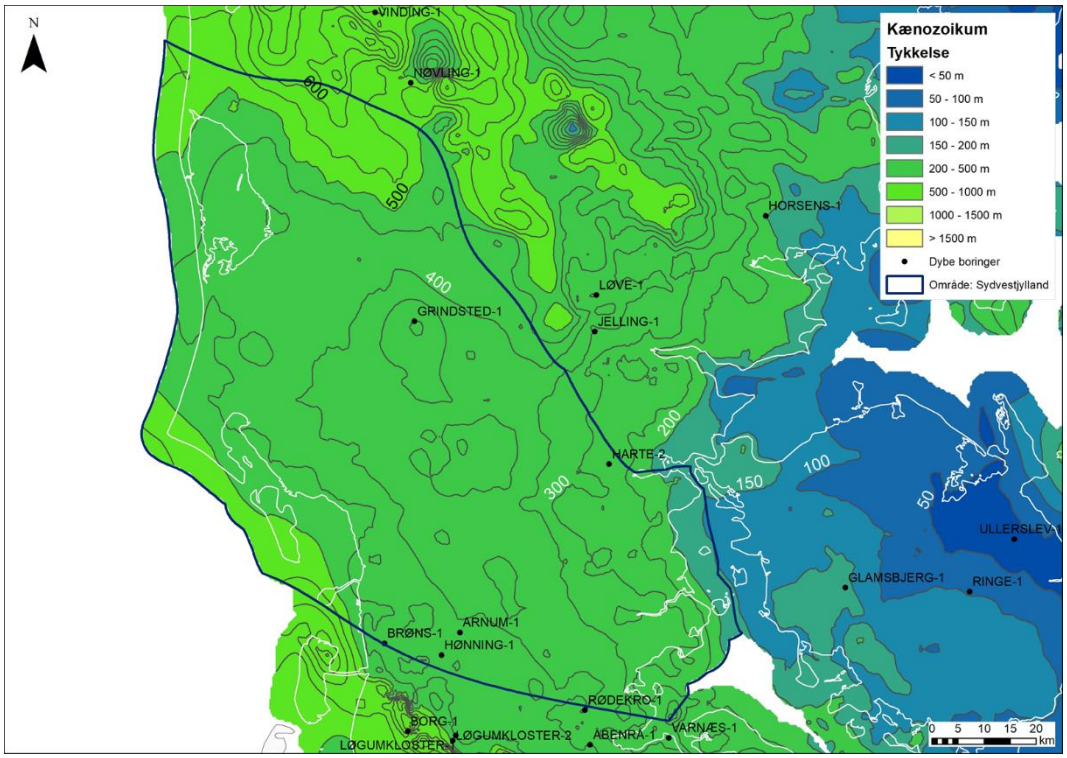
Figur 6.63. *Top Nedre Kridt dybdekort (Basis Kalkgruppen), Sydvestjylland. Kortet viser, at basis af Kalkgruppen findes i dybder fra 600 meter til mere end 1000 meter mod nord.*



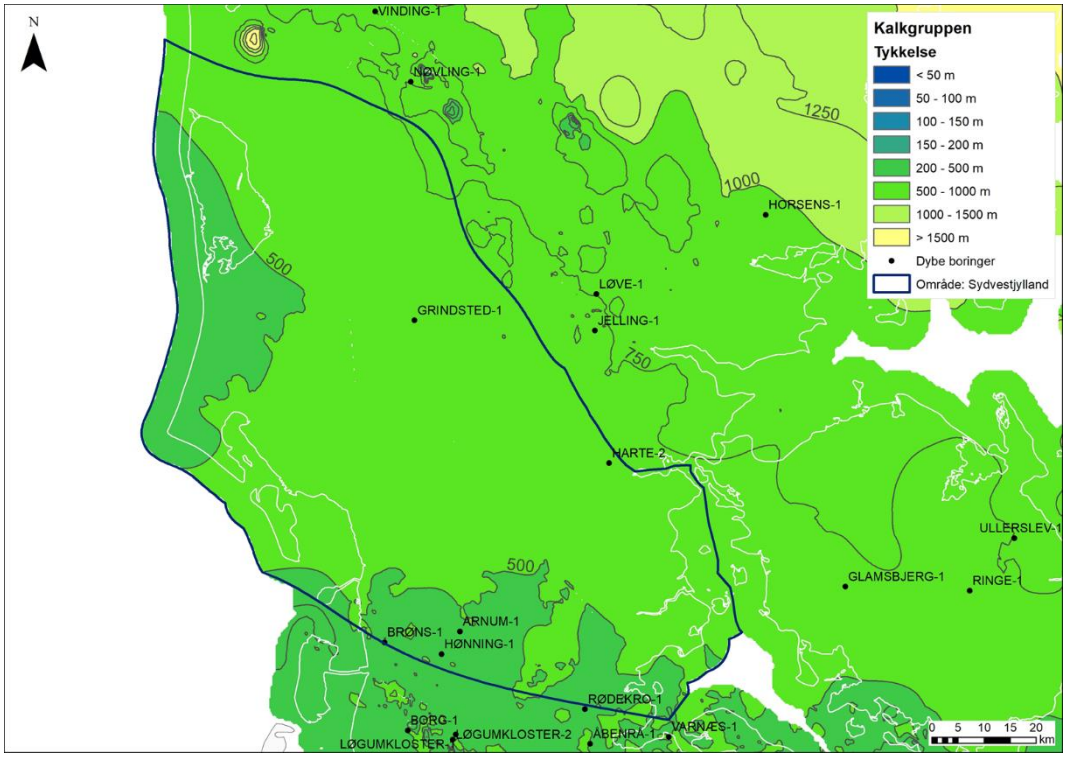
Figur 6.64. *Top Nedre Jura dybdekort, Sydvestjylland.*



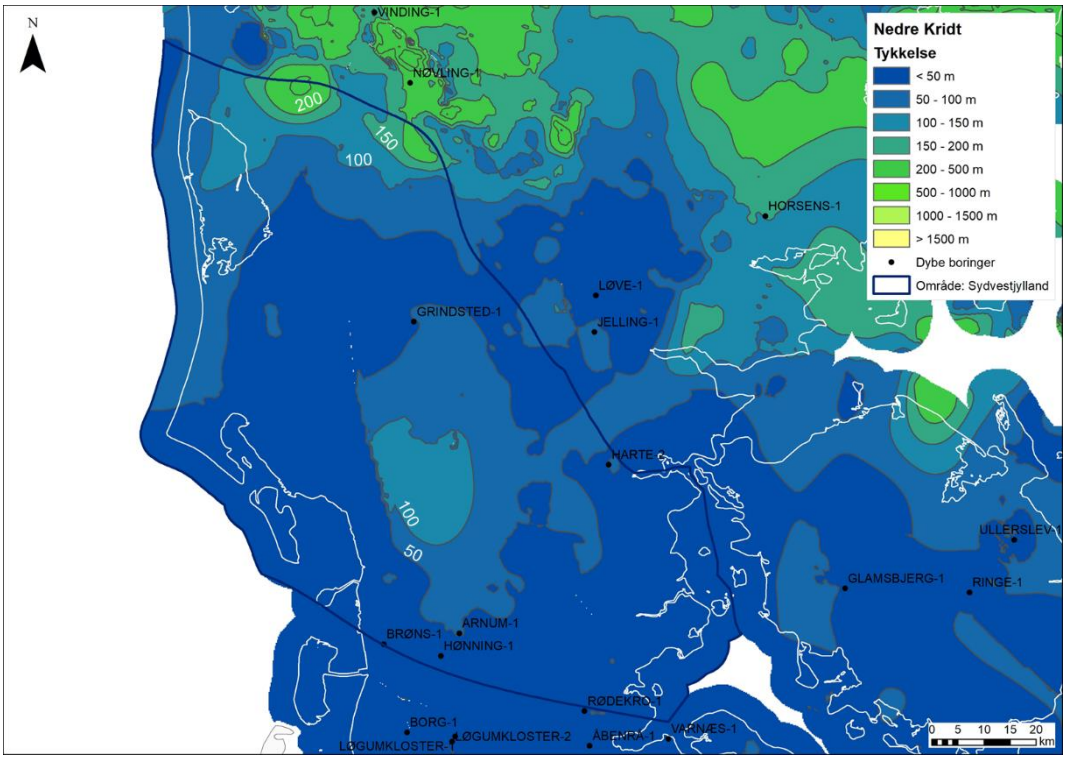
Figur 6.65. *Basis Jura dybdekort, Sydvestjylland.*



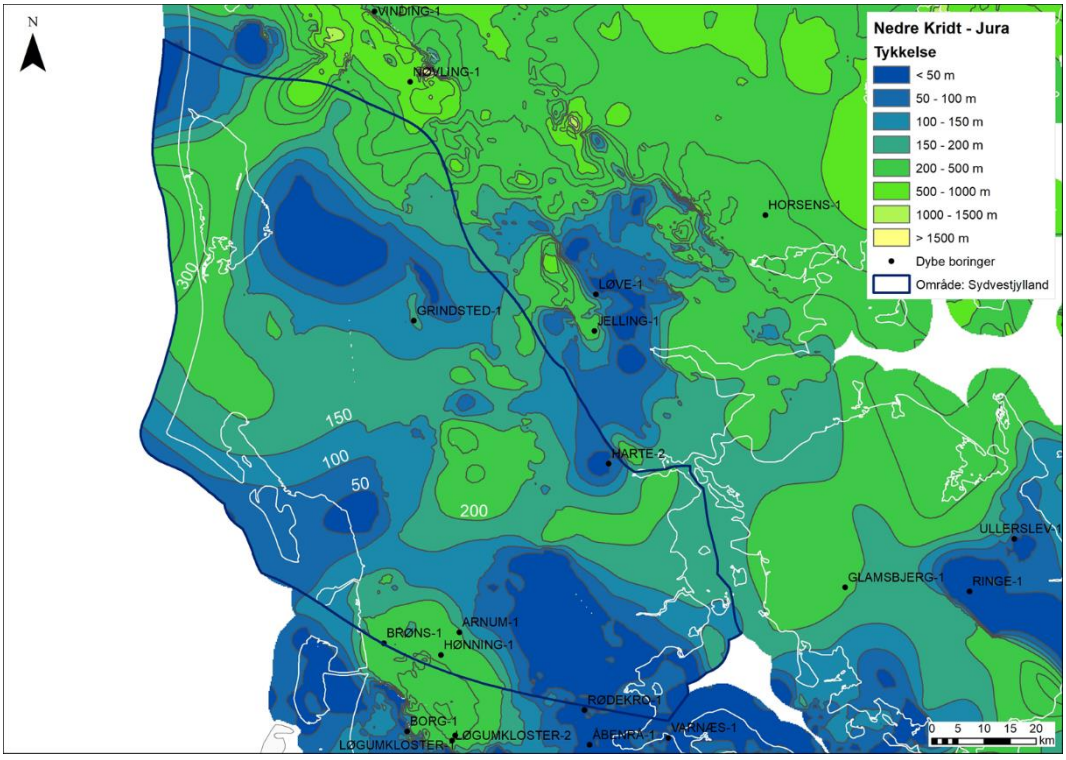
Figur 6.66. *Tykkelsen af aflejringer fra Kænozoikum, Sydvestjylland. Kortet viser, at tykkelsen stiger fra omkring 300 meter i øst til mere end 500 meter mod nordvest.*



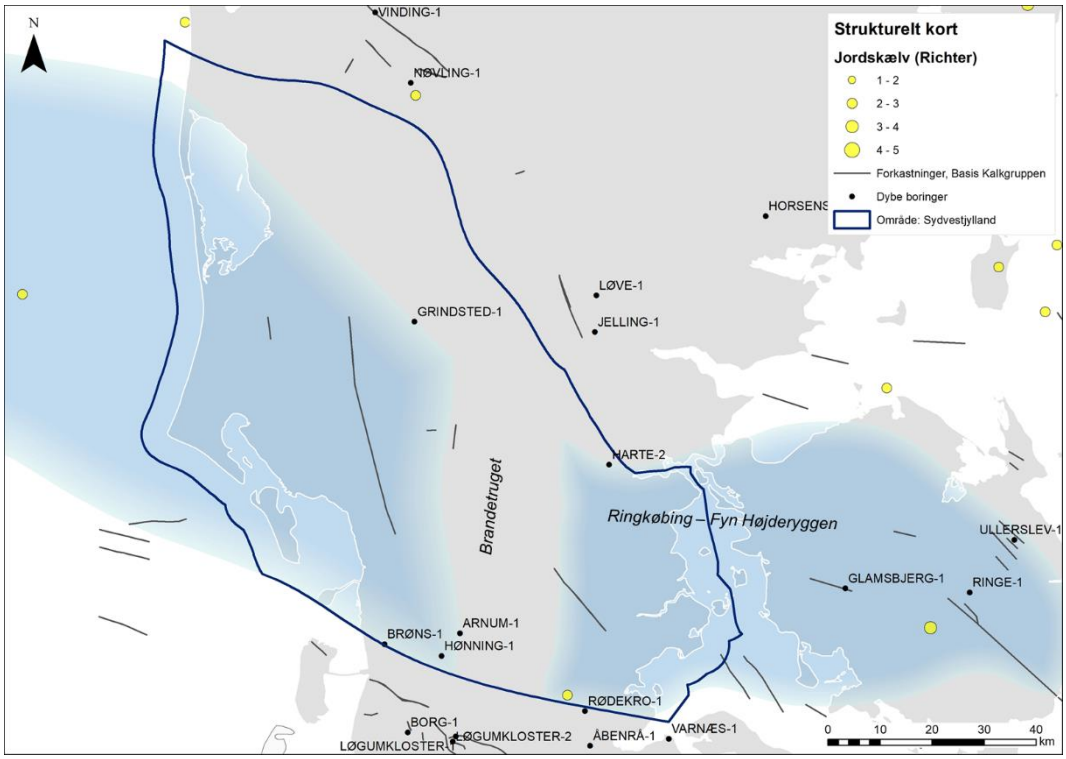
Figur 6.67. *Tykkelsen af Kalkgruppen, Sydvestjylland. Kortet viser, at i store dele af området er tykkelsen mere end 500 meter.*



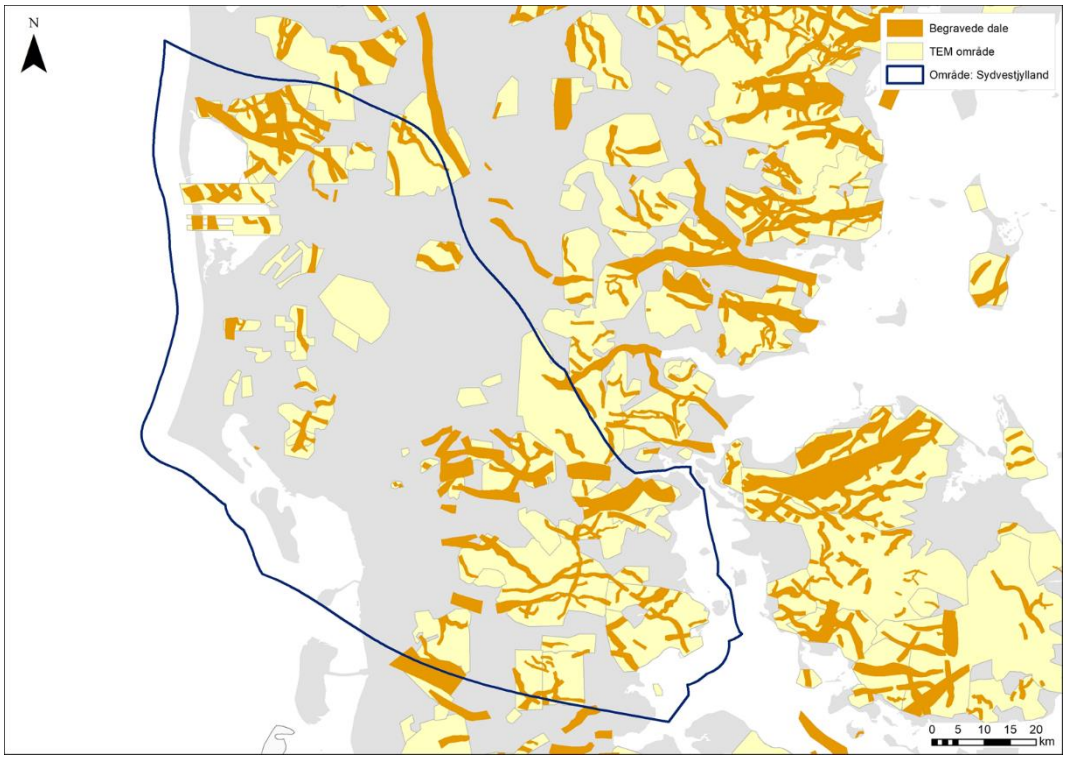
Figur 6.68. *Tykkelseskort af aflejringer fra Nedre Kridt, Sydvestjylland. Tykkelsen varierer mellem 0 og 150 meter.*



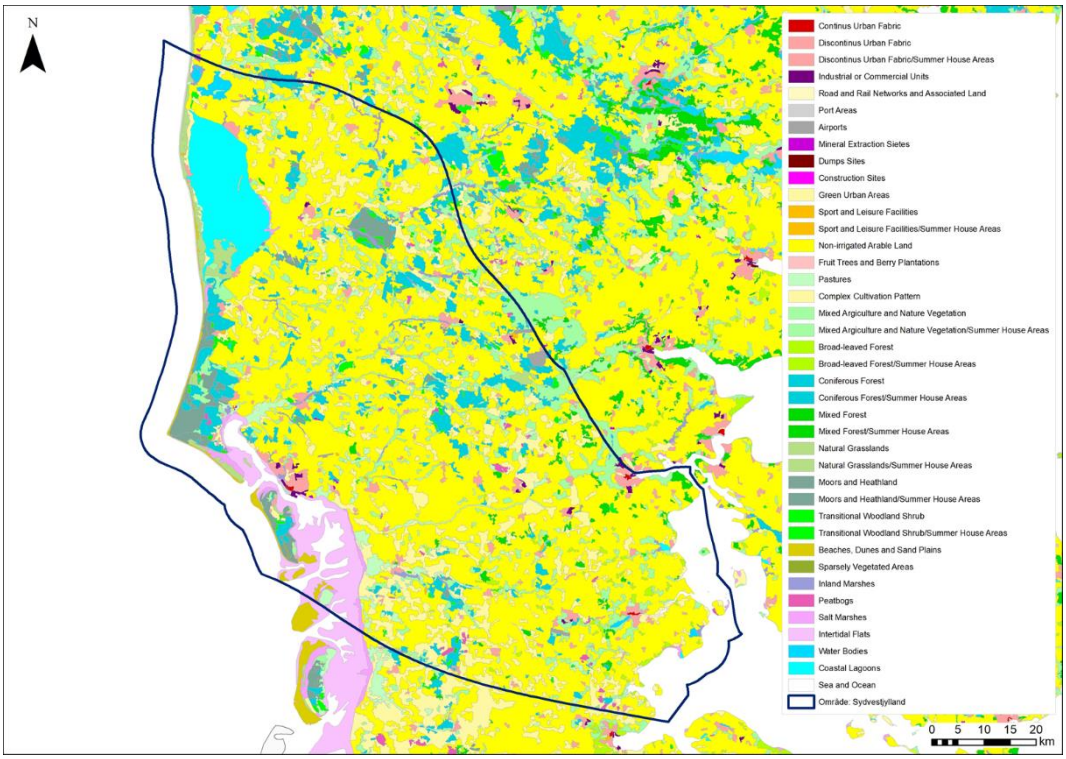
Figur 6.69. *Tykkelseskort af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Sydvestjylland. Kortet viser, at tykkelsen varierer mellem 50 og 200 meter.*



Figur 6.70. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Sydvestjylland.*



Figur 6.71. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Sydvestjylland.*



Figur 6.72. *Arealanvendelse, Sydvestjylland. (MiljøGIS, 2021).*

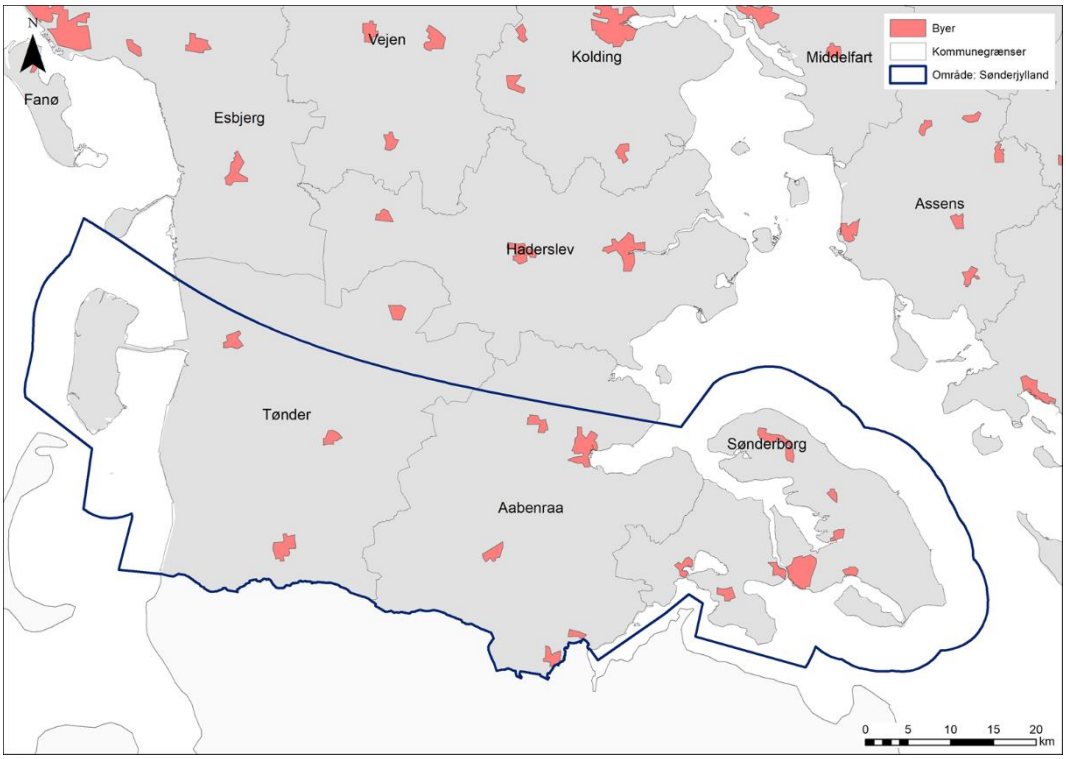
6.6 Sønderjylland

Kalksten udgør værtsbjergarten i intervallet 400-500 meter og findes i store dele af området i dette interval. I et VNV-ØSØ bælte igennem området findes toppen af kalken dog dybere end 500 meter (Figur 6.76).

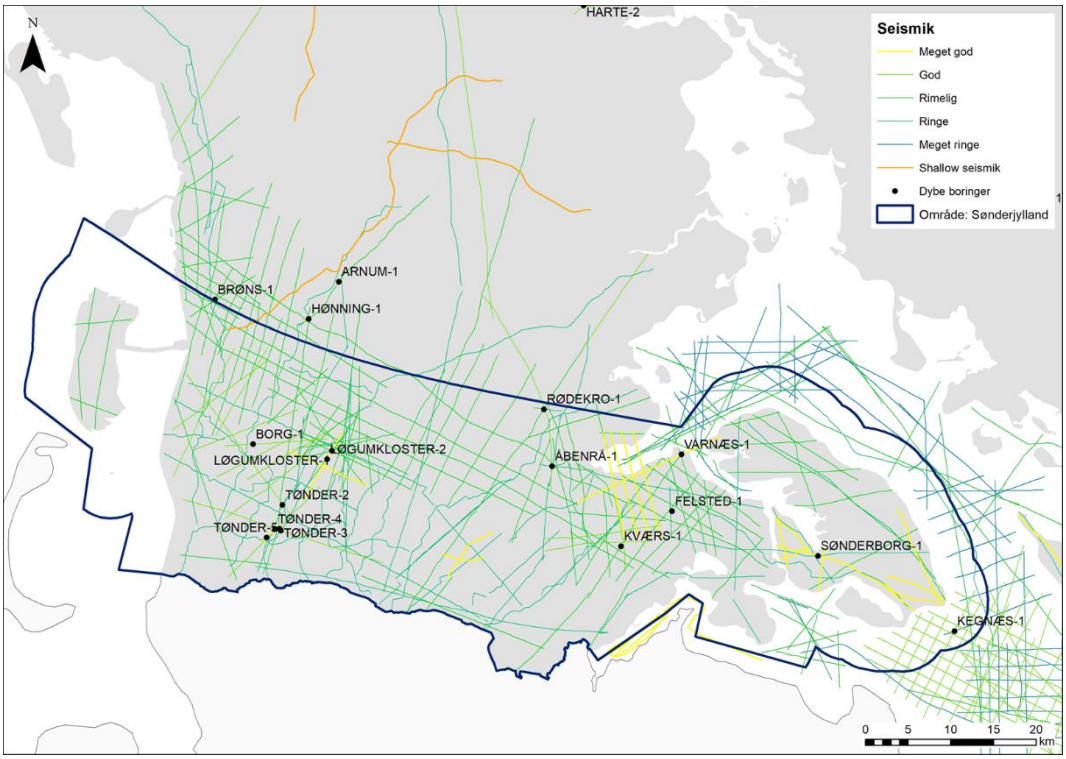
I størstedelen af området findes kalksten ikke i barrierezonen, da toppen af Kalkgruppen findes i 300 til 500 meter eller dybere, og den rumlige udbredelse af barrierebjergarten er derfor mindre favorabel (kriterium 1.1). Tykkelsen af kalken i barrierezonen er i størstedelen af området mellem 0 og 100 meter, lokalt 200 meter i den østligste del, så kriteriet om 250 meter barrierebjergart er ikke opfyldt. Basis af kalken ligger generelt dybere end 700 meter Den horisontale kontinuitet af kalken er generelt mindre favorabel, da der er observeret en del dybe forkastninger, hvis udstrækning forsætter ind i kalken til forskellige dybder (Figur 4.18 og 4.19).

Tabel 6.8. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Sønderjylland.*

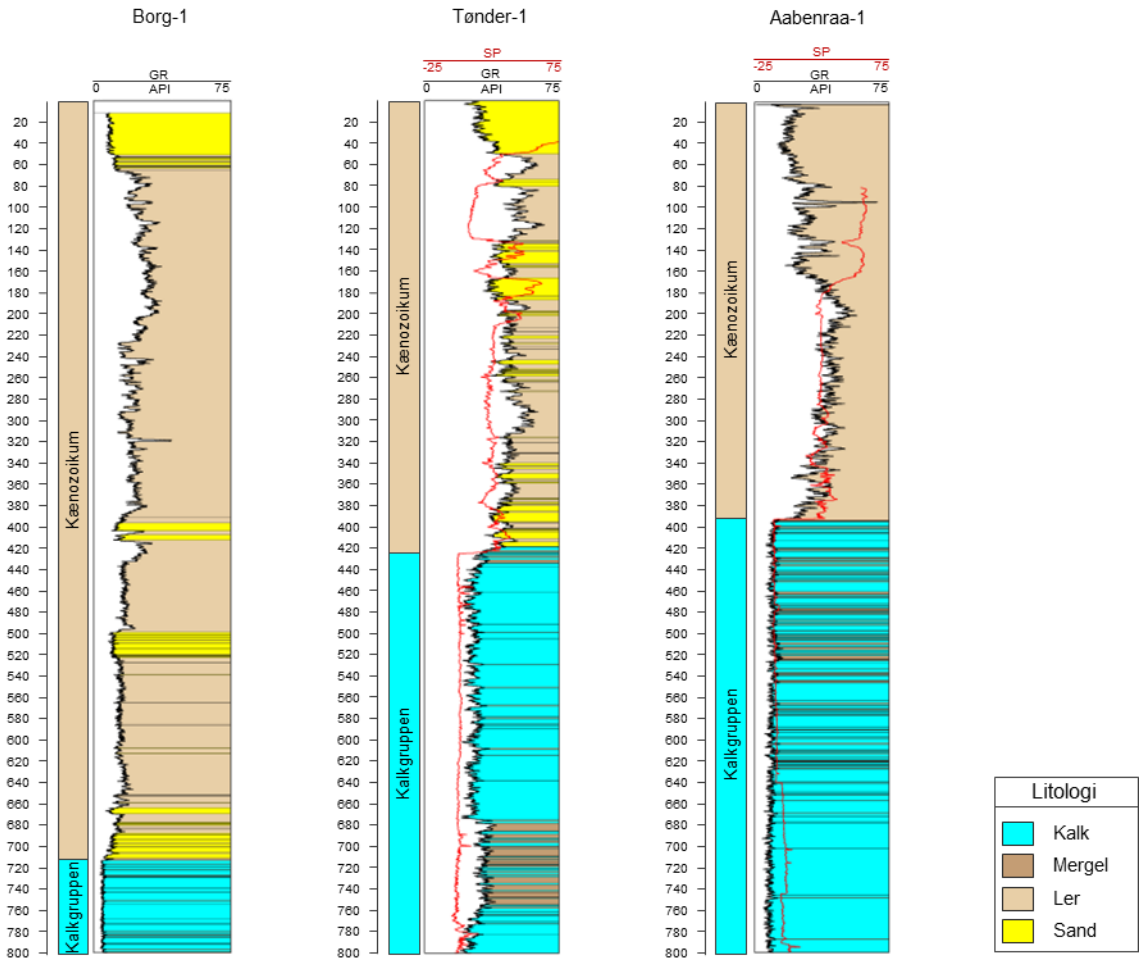
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



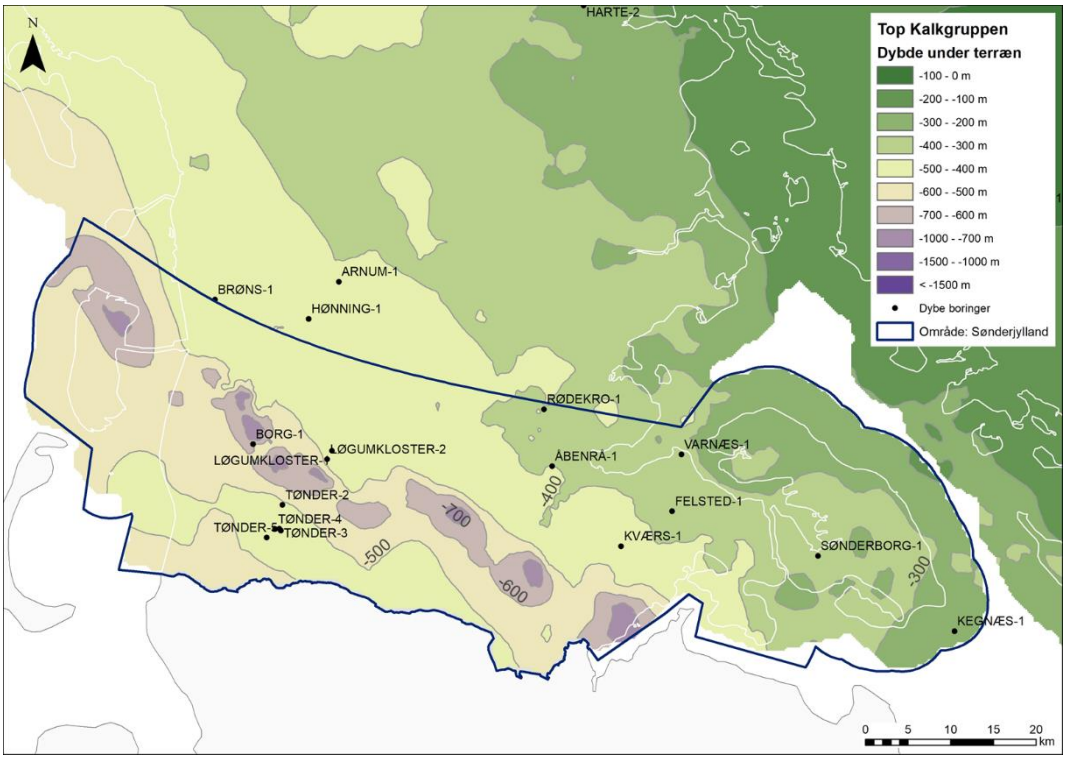
Figur 6.73. *Sønderjylland området vist med kommunegrænser og større byer.*



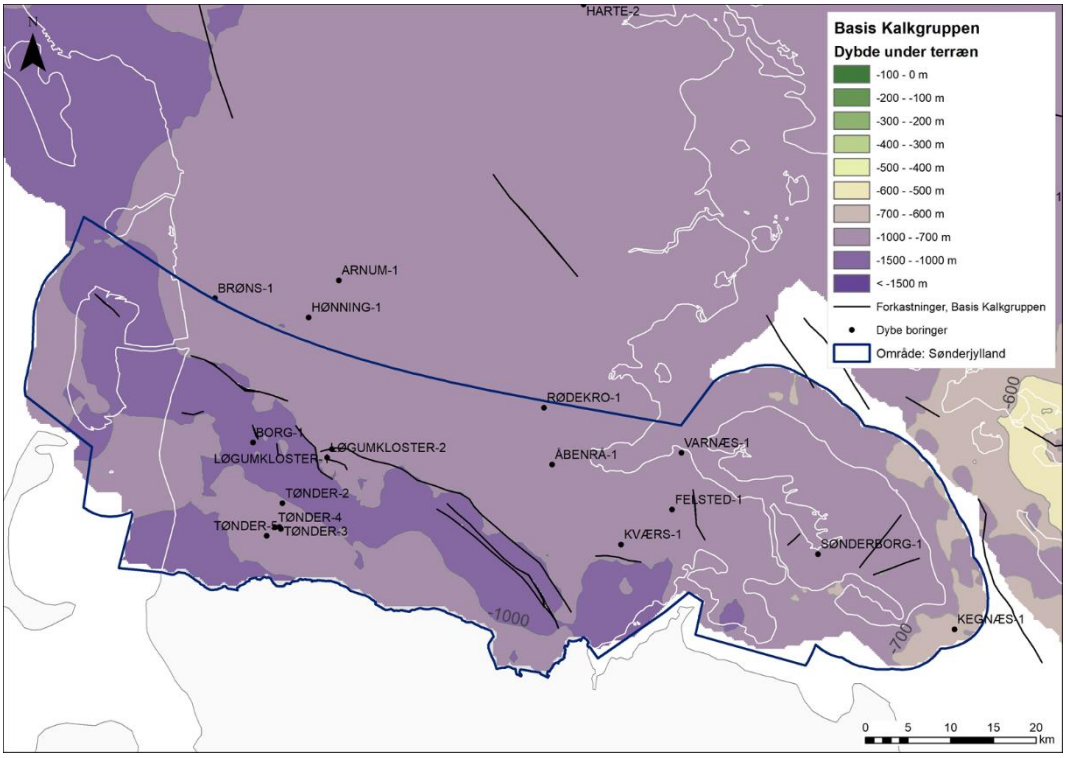
Figur 6.74. *Oversigtskort over seismiske linjer og deres kvalitet samt dybe boringer, Sønderjylland. Der er i området relativt mange seismiske data.*



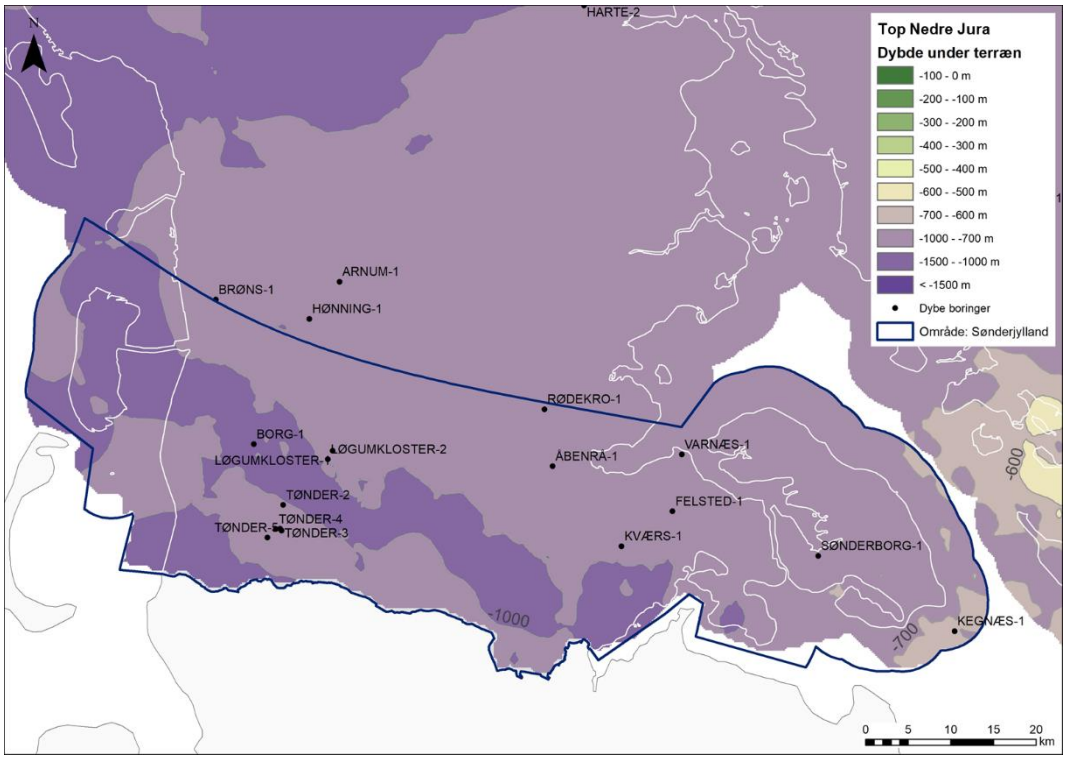
Figur 6.75. *Repræsentative boringer (0-800 meter) fra Sønderjylland som viser at toppen af Kalkgruppen findes i dybder fra 400 meter til mere end 700 meter og overlejres af kænozoiske sedimenter af vekslende ler- og sandlag.*



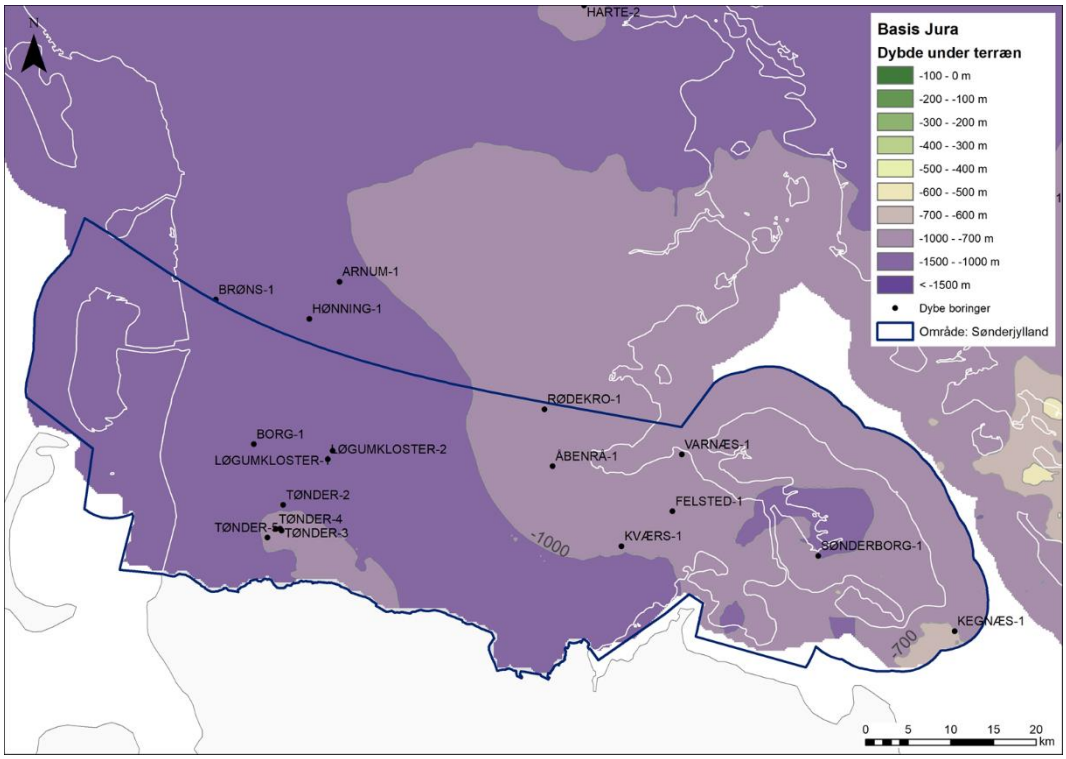
Figur 6.76. *Top Kalkgruppen dybdekort, Sønderjylland. Toppen findes i dybder varierende fra 300 meter til mere end 700 meter. Top Kalk ligger dybere end 500 meter i området med lilla og gule farver, hvilket skyldes remobilisering at underliggende salt (ses på Figur 4.19).*



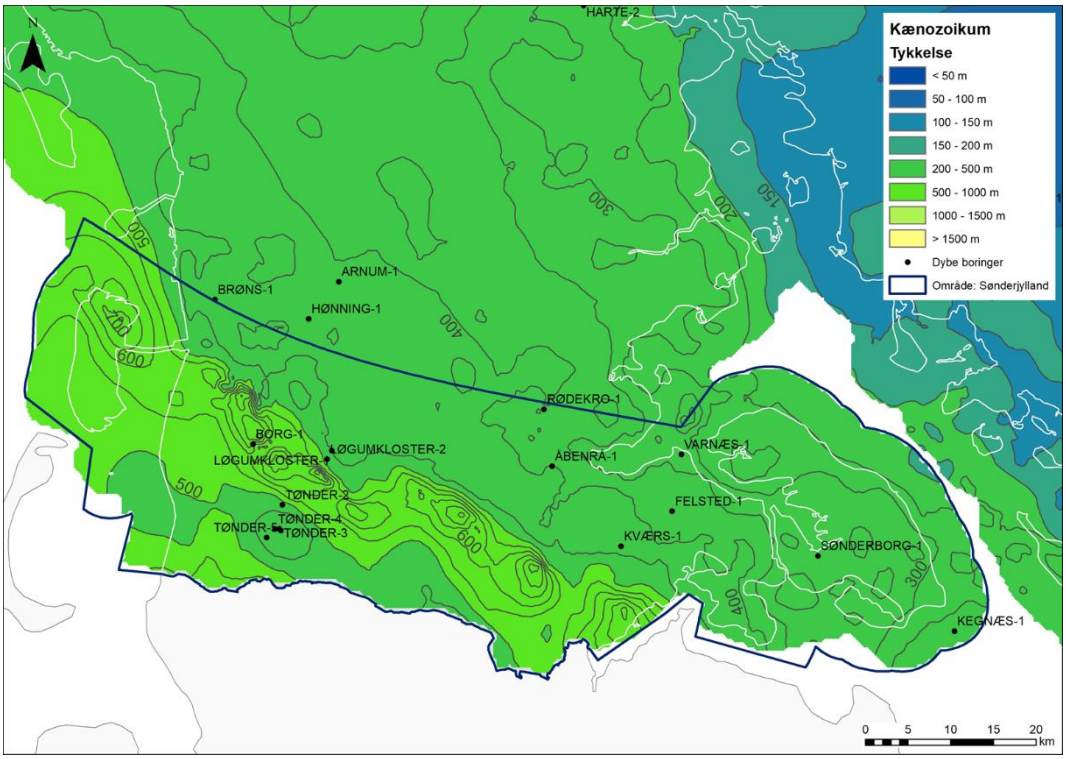
Figur 6.77. *Top Nedre Kridt dybdekort (Basis Kalkgruppen), Sønderjylland. Kortet viser, at basis af Kalkgruppen findes i dybder omkring 700 meter eller mere.*



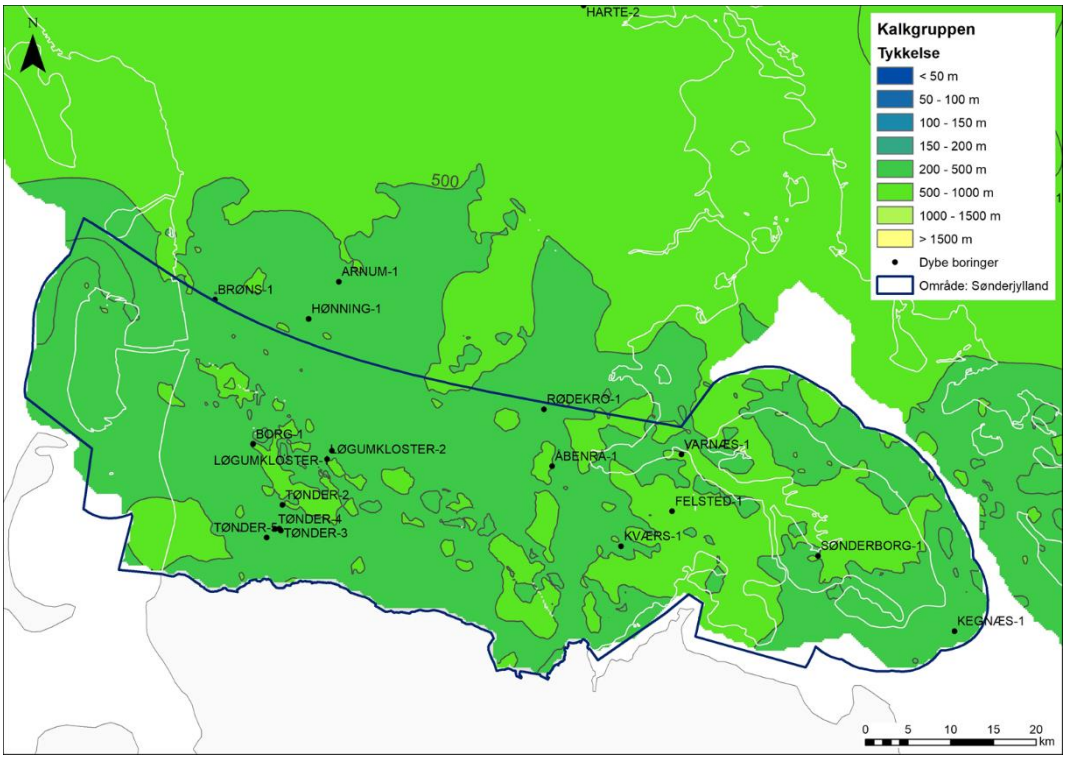
Figur 6.78. *Top Nedre Jura dybdekort, Sønderjylland.*



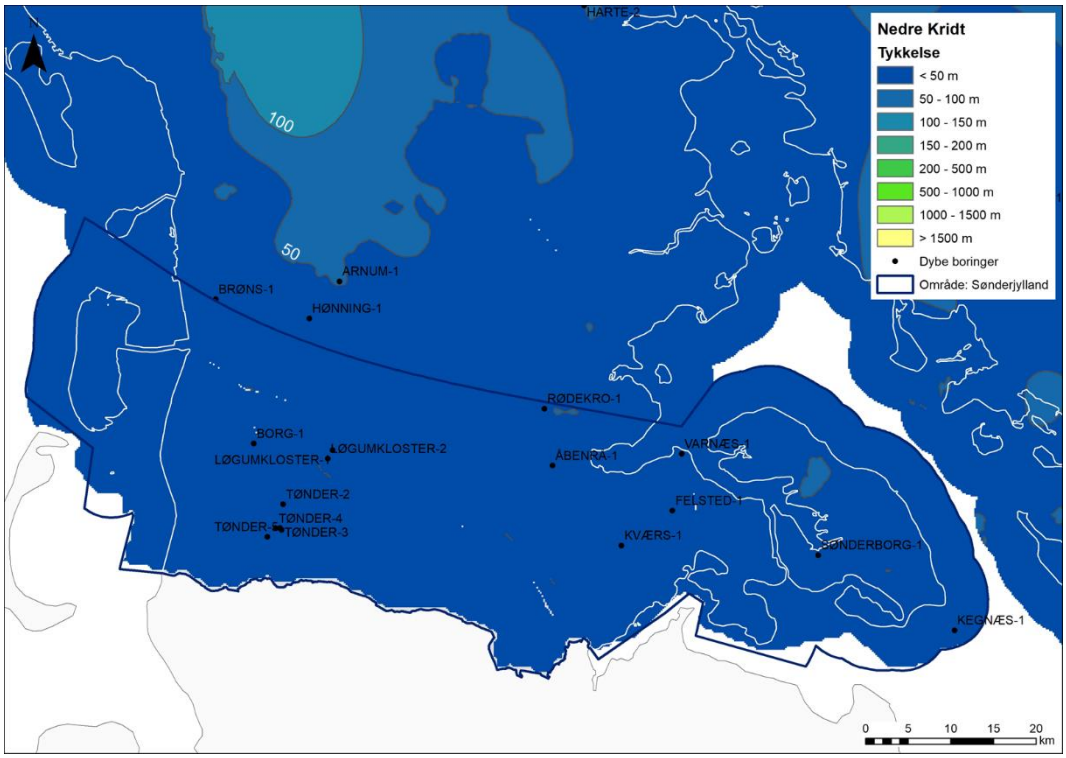
Figur 6.79. *Basis Jura dybdekort, Sønderjylland.*



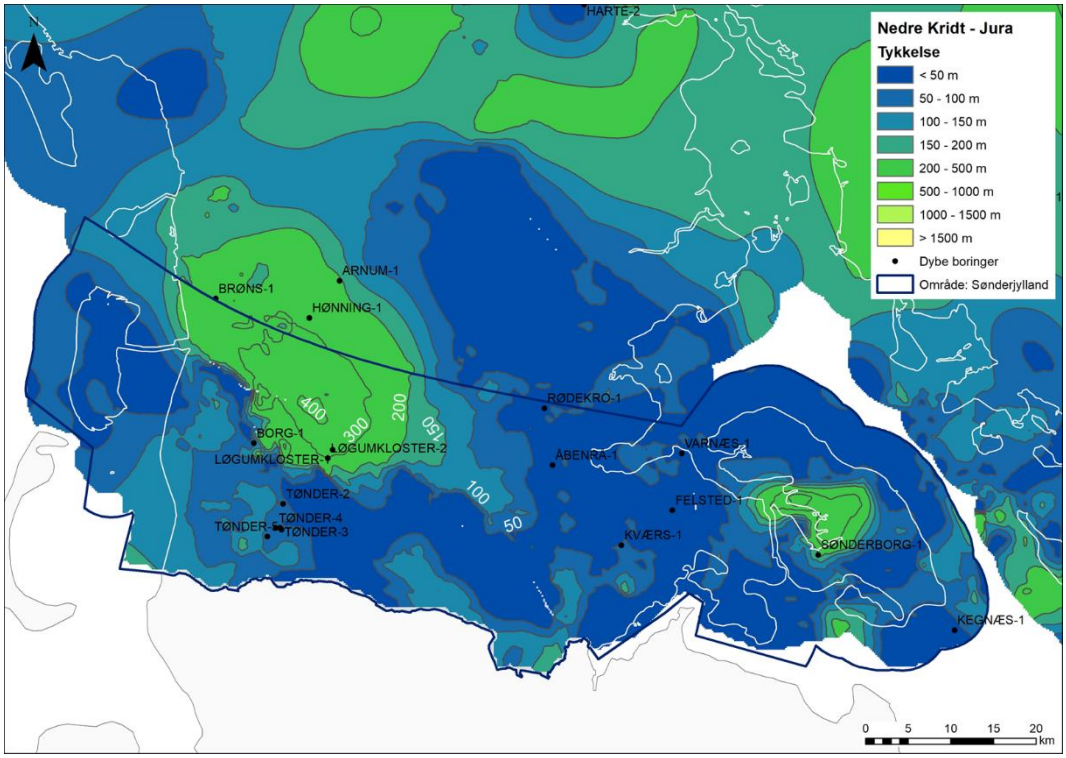
Figur 6.80. *Kort over tykkelsen af Kænozoikum, Sønderjylland. Kortet viser, at tykkelsen i store dele af området er 400 meter eller mere.*



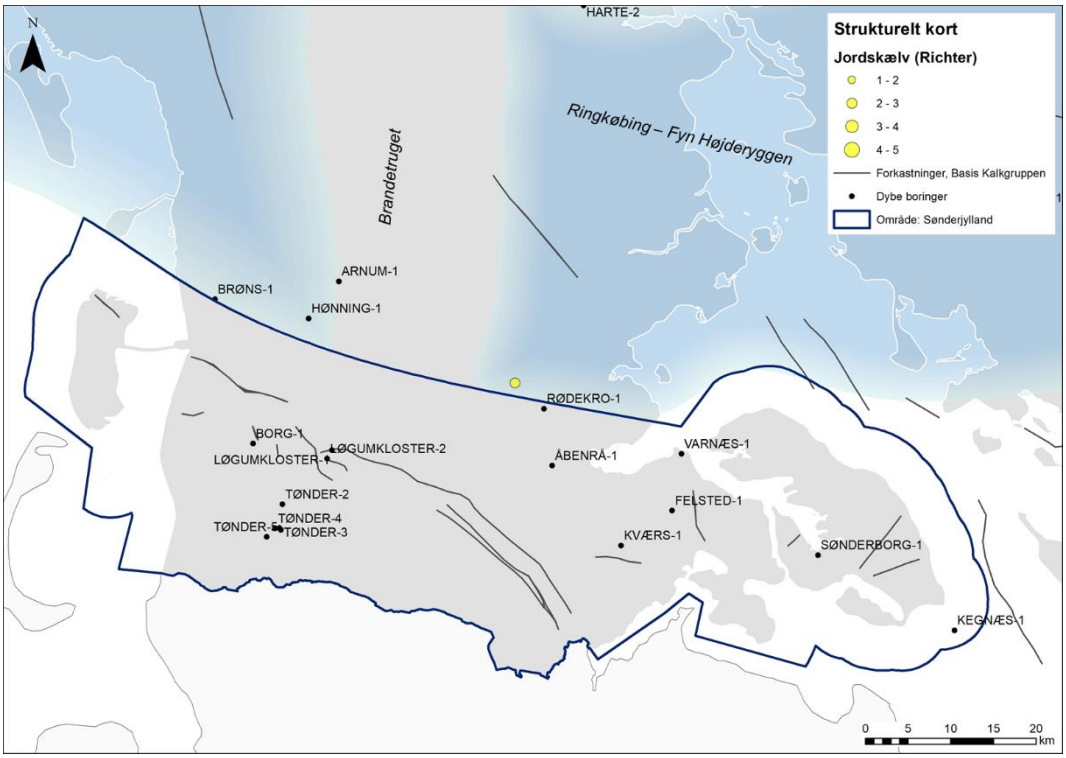
Figur 6.81. *Tykkelseskort af Kalkgruppen, Sønderjylland. Kortet viser, at tykkelsen generelt er mellem 200 og 500 meter.*



Figur 6.82. *Nedre Kridt tykkelseskort, Sønderjylland. Kortet viser, at tykkelsen generelt er mindre end 50 meter.*

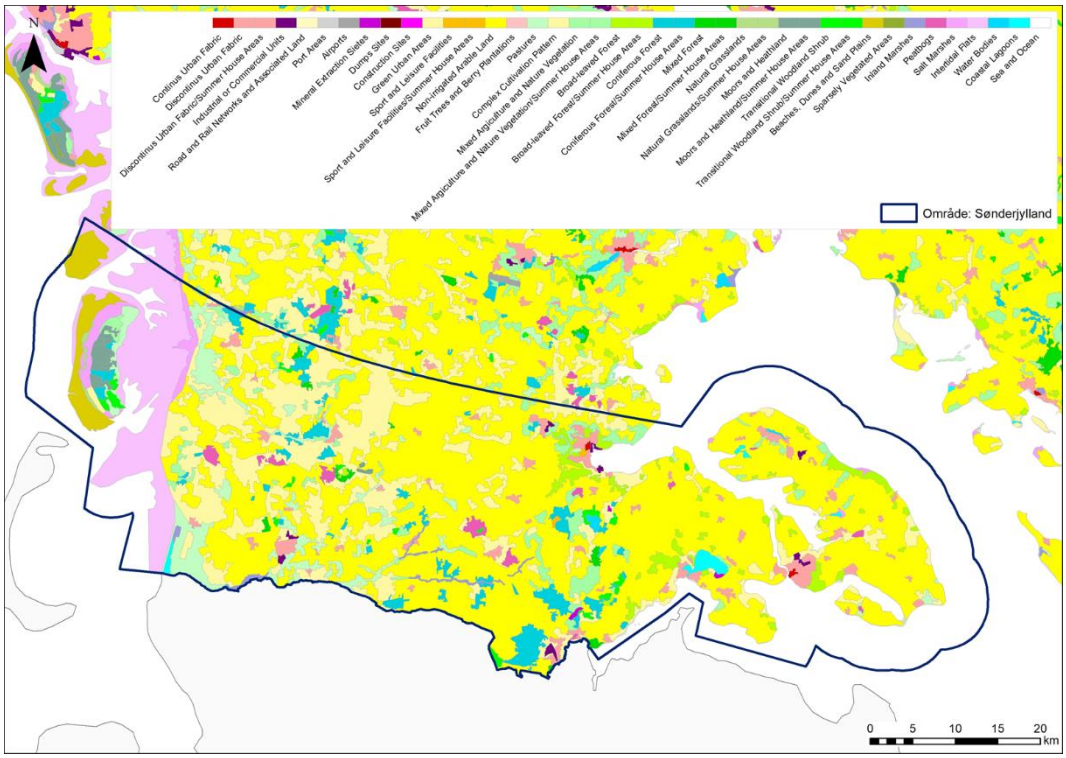


Figur 6.83. *Tykkelseskort af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura. Sønderjylland.*



Figur 6.84. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Sønderjylland. Kun et enkelt er registreret (nær Rødekro-1 boringen).*

Figur 6.85. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Sydvestjylland.*



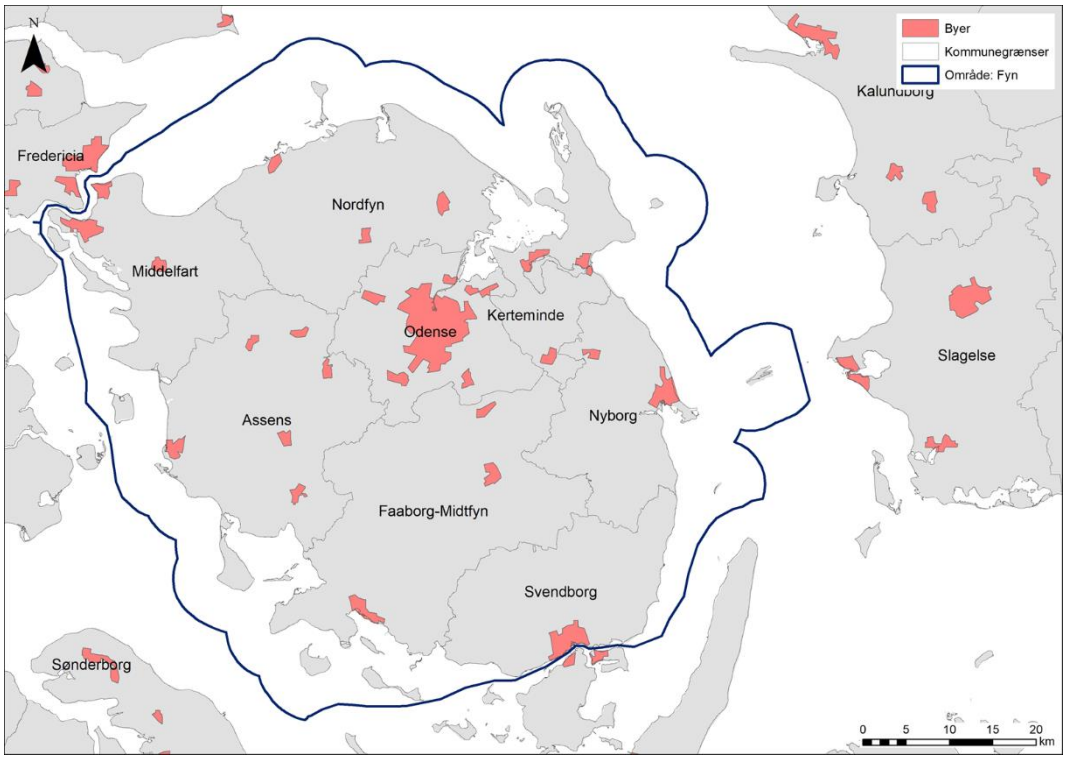
Figur 6.85A. *Arealanvendelse, Sønderjylland. (MiljøGIS, 2021).*

6.7 Fyn

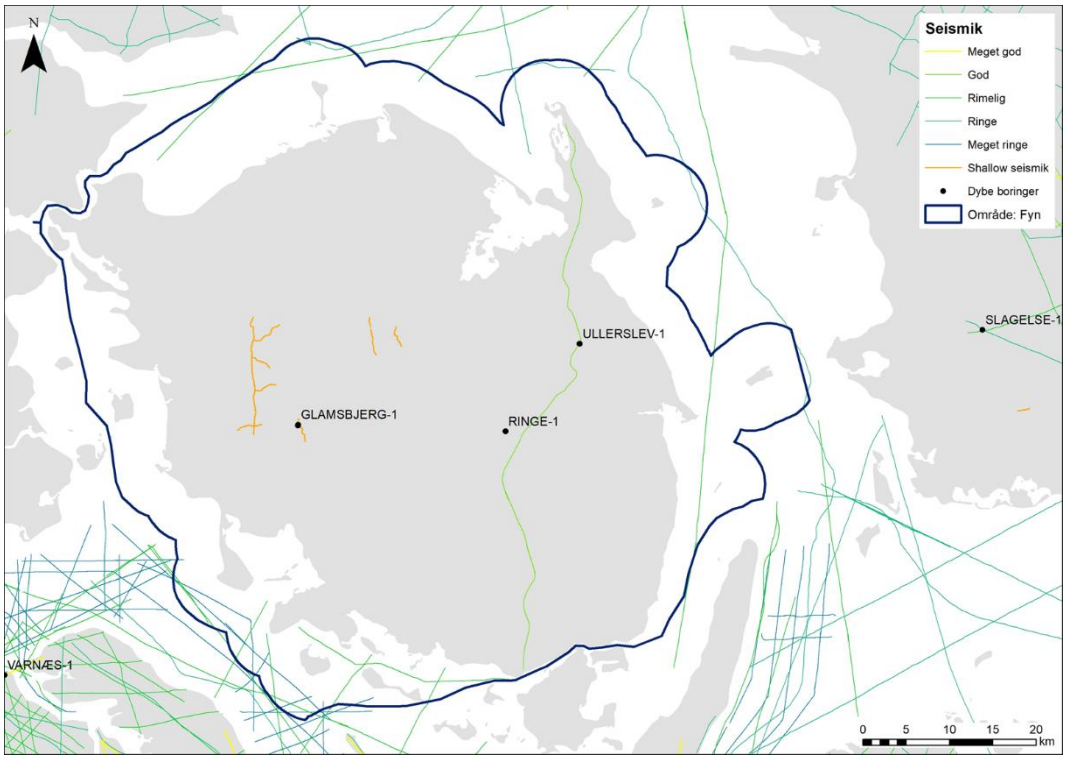
Kalksten udgør i hele området både værtsbjergarten og barrierebjergarten og kalken forekommer tektonisk relativt uforstyrret (Figur 4.20). Toppen af kalkstenen findes i ca. 50 – 200 meter (Figur 6.88 og 6.89) og basis findes i 700 meter eller dybere. Mægtigheden af kalken er generelt mere end 700 meter (Figur 6.94). Enkelte store forkastninger er identificeret langs kanten af Ringkøbing-Fyn Højderyggen. En række mindre forkastninger med meget lille forsætning ses ved basis af Øvre Kridt (Figur 6.90) og i profilet på Figur 4.20 ses, at de kun findes i den nederste del af Kalkgruppen. På grund af Fyns placering på den tektonisk stabile Ringkøbing-Fyn Højderyg forventes der ikke at være mange større forkastninger i de centrale dele af området, hvor den seismiske datadækning pt. er sparsom (Figur 6.97).

Tabel 6.9. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Fyn.*

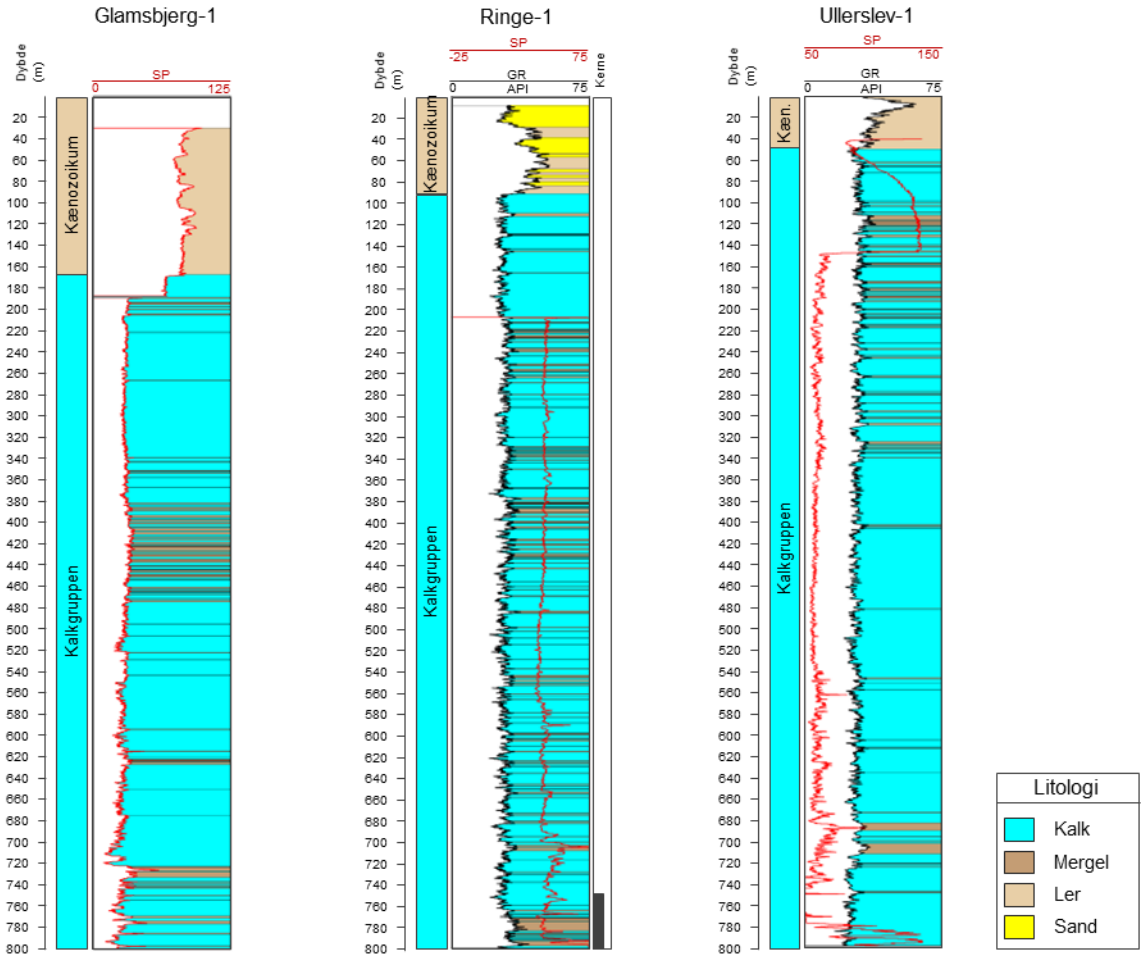
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



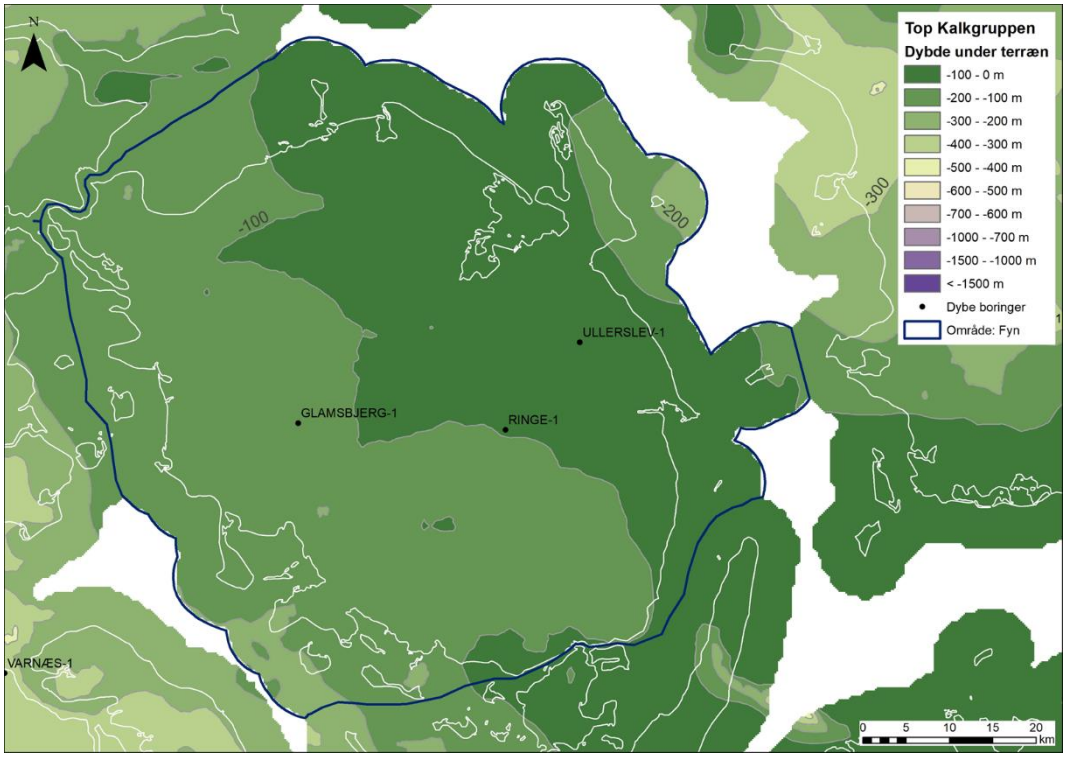
Figur 6.86. *Fyn området vist med kommunegrænser og større byer.*



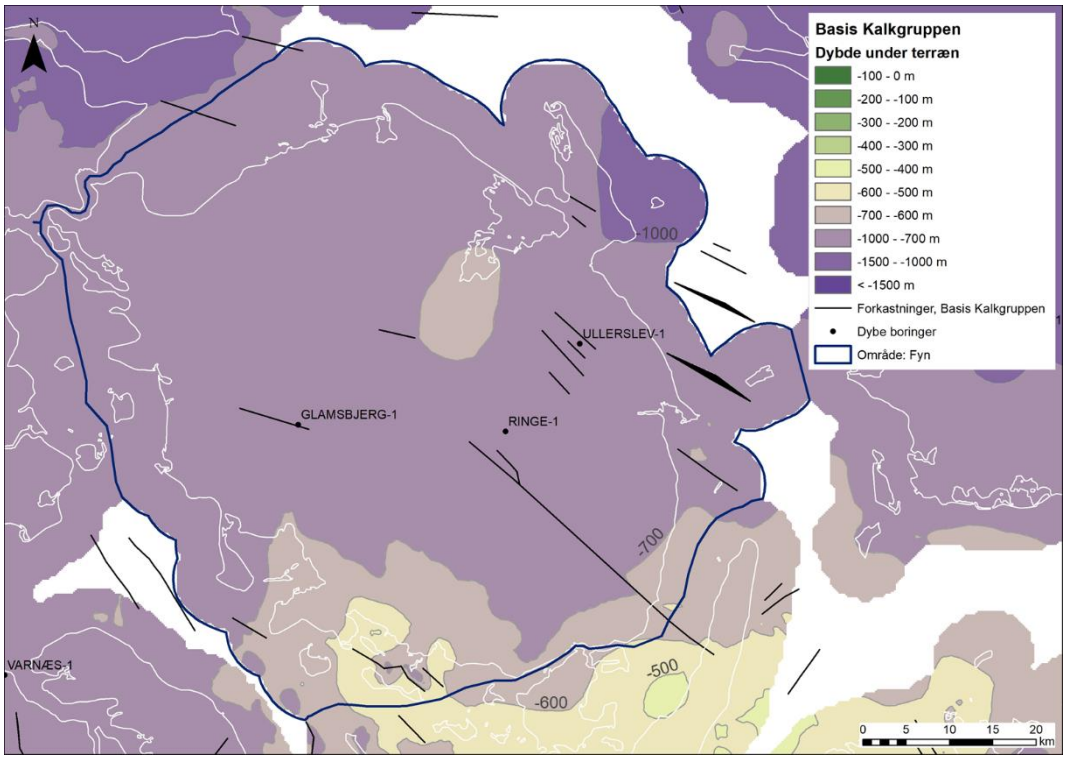
Figur 6.87. *Kort over seismiske linjer og deres kvalitet, samt dybe boringer på Fyn. Kun få seismiske linjer dækker Fyn, mens der er en del linjer i de indre farvande omkring Fyn. Data fra de tre boringer indgår i kortlægningen af dybden til de geologiske intervaller.*



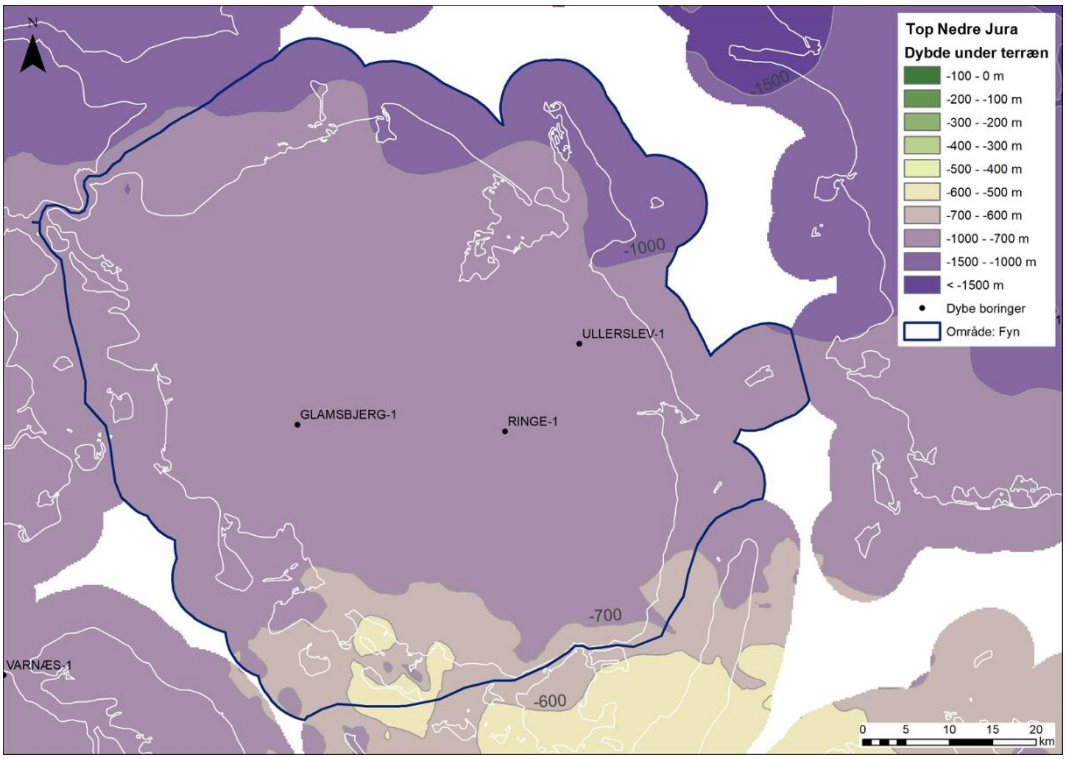
Figur 6.88. Litologiske logtolkninger af dybe boringer på Fyn. Det ses, at lagserien er domineret af kalksten og mergel fra Kalkgruppen, der fortsætter til dybder under 800 meter. Toppen af Kalkgruppen findes i dybden mellem ca. 50 meter og 110 meter, og data fra boringerne er anvendt tilr den seismiske kortlægning af toppen af Kalkgruppen.



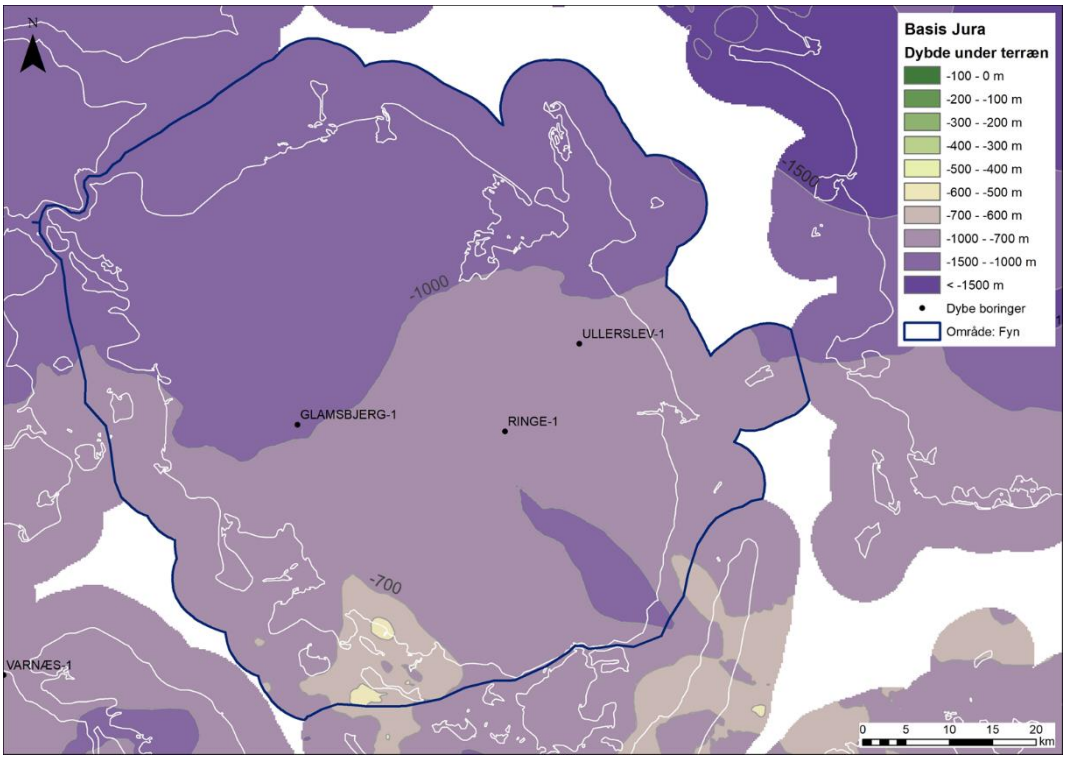
Figur 6.89. *Top Kalkgruppen dybdekort, Fyn. Kortet viser, at top Kalkgruppen findes i dybder mellem 0 og 200 meter.*



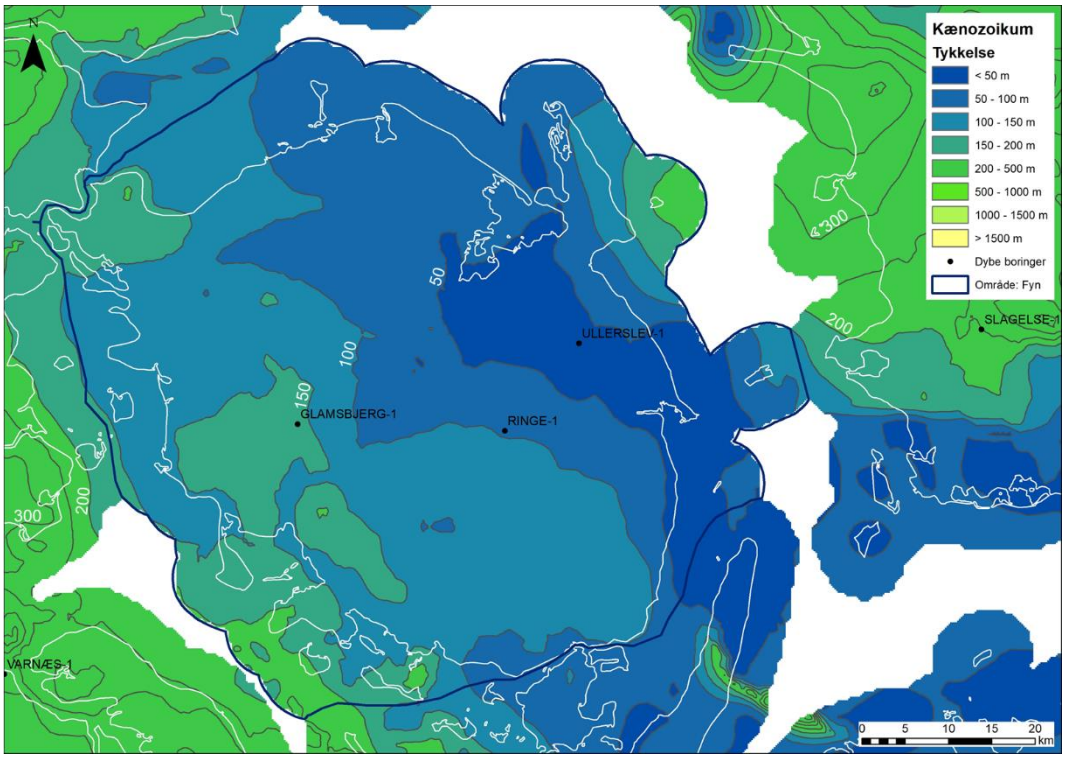
Figur 6.90. *Top Nedre Kridt dybdekort (Basis Kalkgruppen), Fyn. Kortet viser, at kalksten i størstedelen af området findes i dybder på mere end 700 meter.*



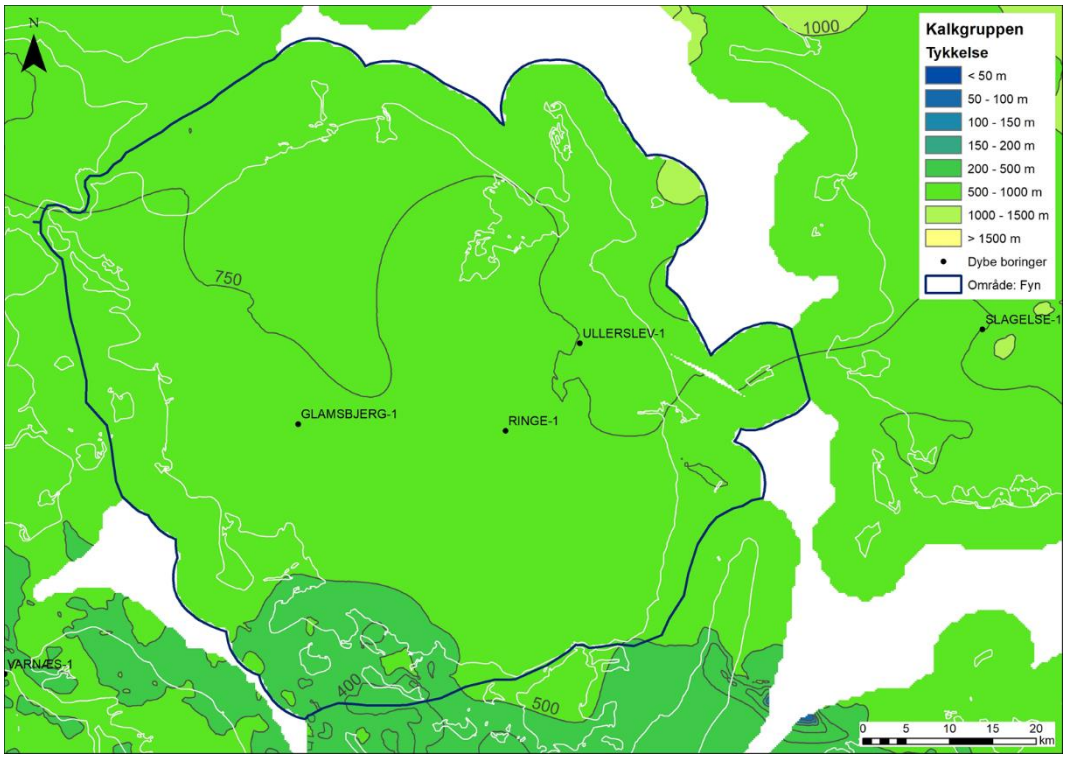
Figur 6.91. *Top Nedre Jura dybdekort, Fyn. Kortet viser, at Top Nedre Jura findes i dybder på mere end 700 meter i størstedelen af området.*



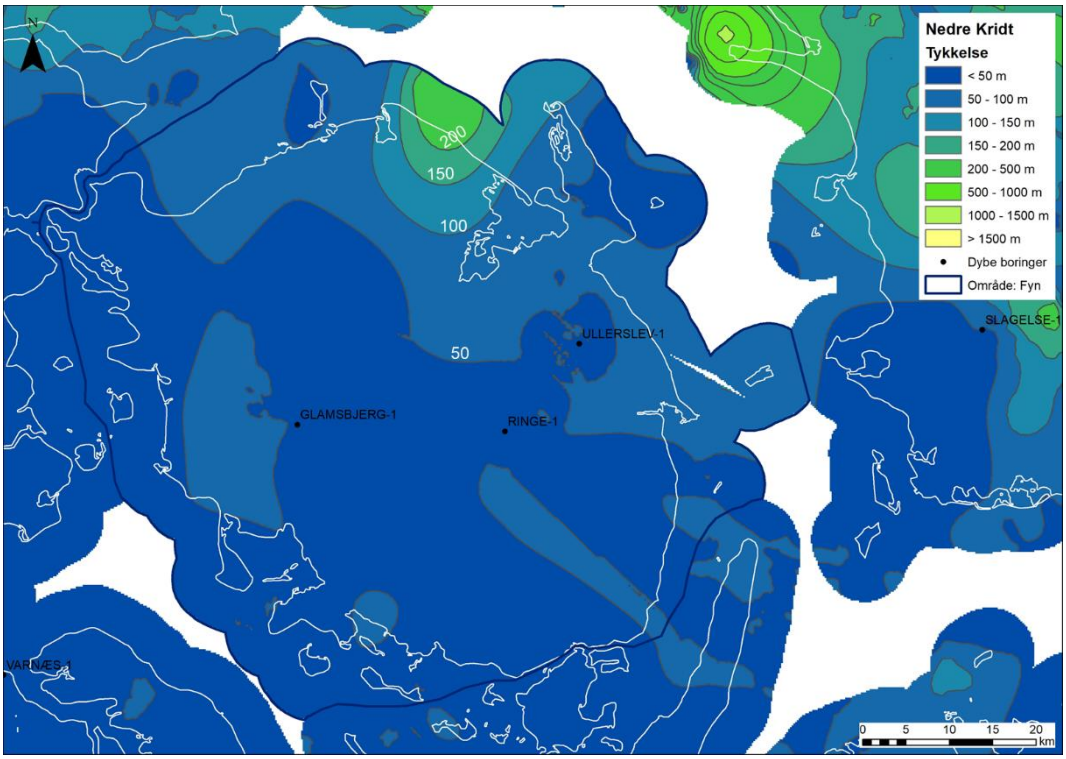
Figur 6.92. *Basis Jura dybdekort, Fyn.*



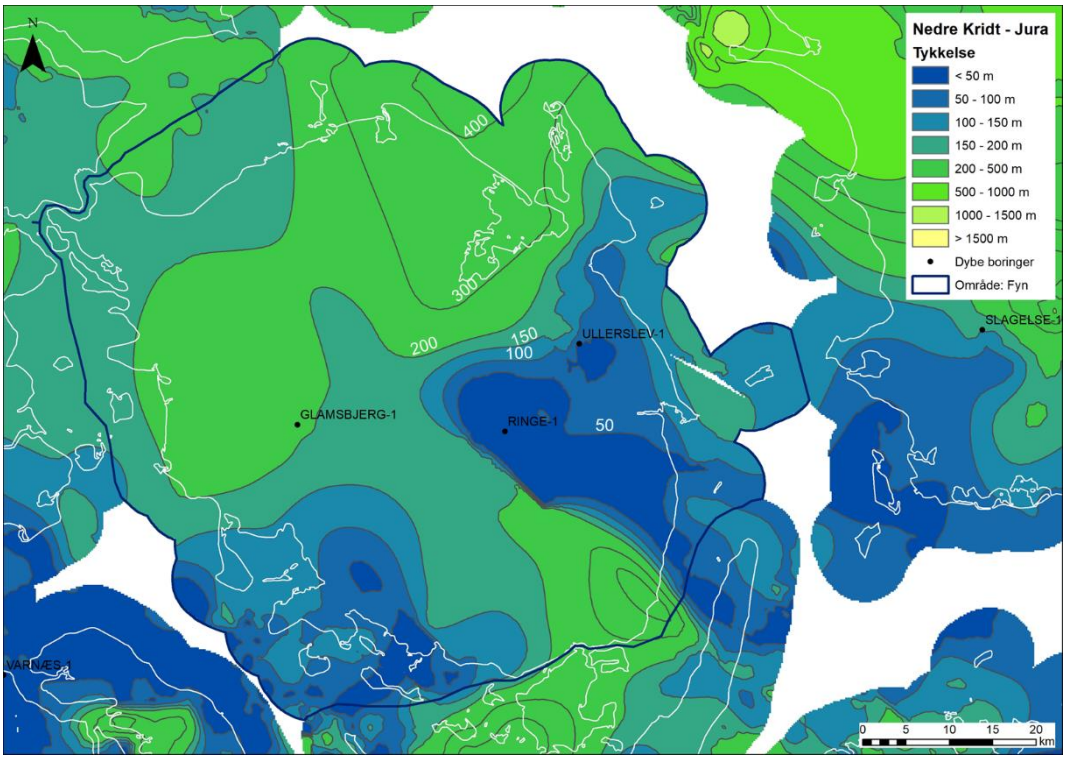
Figur 6.93. *Tykkelseskort af aflejringer fra Kænozoikum, Fyn. Kortet viser, at tykkelsen varierer fra mindre end 50 meter til omkring 150 meter.*



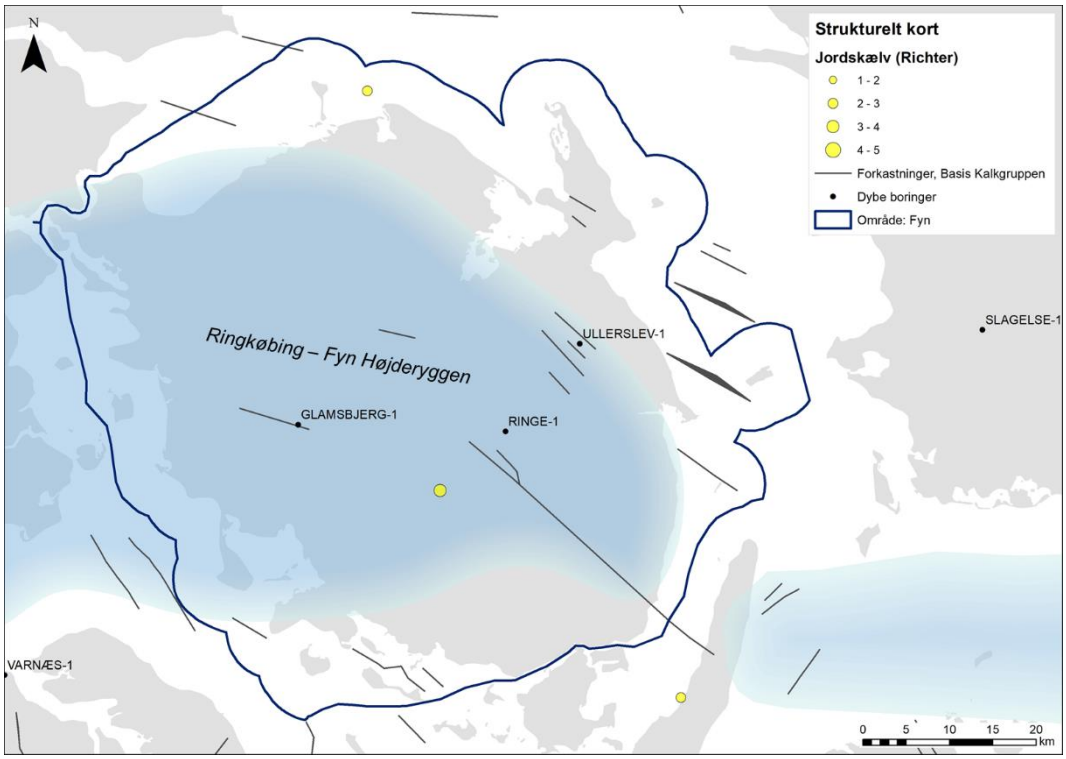
Figur 6.94. *Tykkelseskort af Kalkgruppen, Fyn. Kortet viser, at tykkelsen varierer fra 500 meter i den sydligste del af området til mere end 750 meter mod nord.*



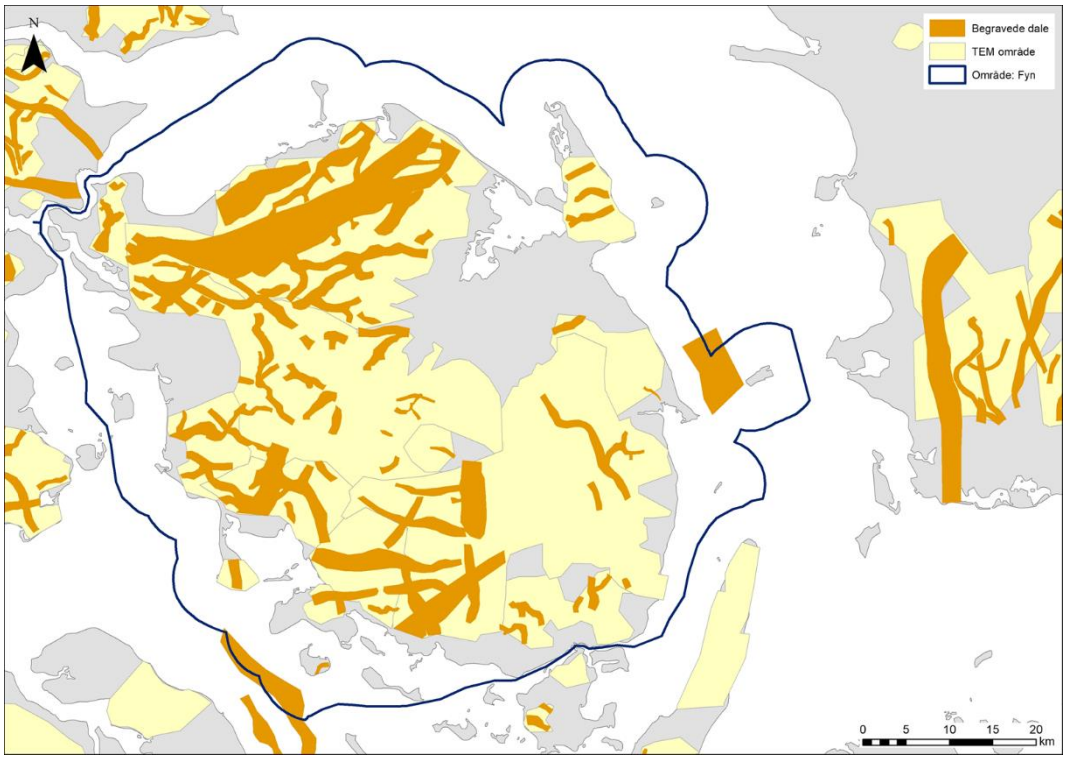
Figur 6.95. *Tykkelseskort af Nedre Kridt, Fyn. Kortet viser, at intervallet generelt har en mægtighed mindre end 100 meter.*



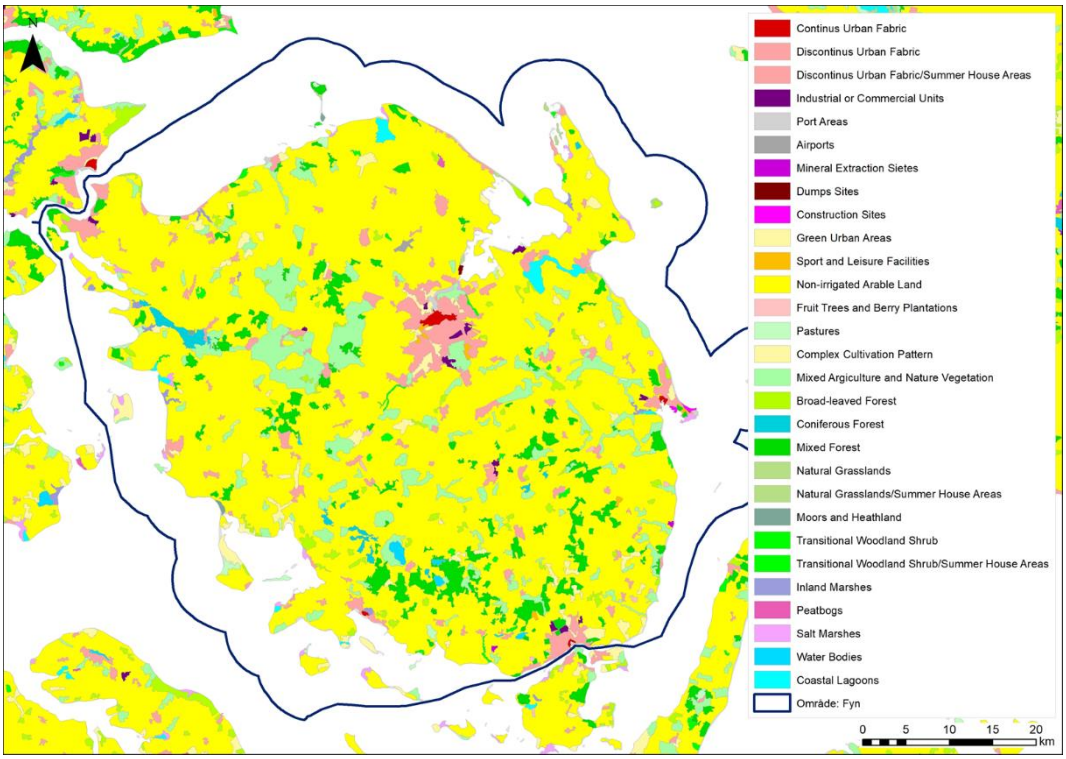
Figur 6.96. *Tykkelseskort af aflejringer fra Nedre Kridt og Jura, Fyn.*



Figur 6.97. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Fyn. Enkelte jordskælv er registreret i området.*



Figur 6.98. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Fyn*



Figur 6.99. *Arealanvendelse, Fyn. (MiljøGIS, 2021).*

6.8 Sydlige Øhav

Kalksten findes i størstedelen af området fra nær terræn til dybder på 400 – 500 meter. Kalksten kan således udgøre både værtsbjergart og barrierebjergarten i området. Lersten i Nedre Kridt og Jura lagserierne findes generelt i dybden fra 500 meter og dybere, lokalt i 400 meters dybde. Da der således er mulighed for at både lersten og kalksten som værtsbjergart i området, er der lavet en evaluering for hvert scenarie. Den geologiske opbygning er illustreret på profiler i Figur 4.21 og 4.22. Det skal bemærkes, at på det vest-øst orienterede profil i Figur 4.22, ser den geologiske opbygning meget ensartet ud. Dette skyldes, at profilet er orienteret parallelt med forkastninger, der afgrænser halv-grave, som kan ses på profilet i Figur4.21, der er orienteret vinkelret på profilet i Figur 4.22. I nogle retninger er der således store variationer af lagenes tykkelser over korte afstande, som også ses på tykkelseskortet for aflejringerne fra Nedre Kridt og Jura i Figur 6.11 illustrerer.

Lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart

Toppen af lersten findes generelt i 500 meters dybde eller dybere. Lokalt findes lersten dog i 400 meters dybde og i området ses der generelt relativt store forskelle i dybden til lerstenen over få kilometers afstand (Figur 6.105, 6.106 og 6.111). Den horisontale kontinuitet af lersten er mindre favorabel (orange score), da den samlede tykkelse af intervallet med lersten varierer over korte afstande fra 50 meter til mere end 1000 meter, hovedsageligt på grund af store tykkelsesvariationer i de jurassiske formationer (Figur 6.110). Værtsbjergarten er ikke litologisk homogen, da intervallet indeholder mange sandlag (ses både i Nedre Kridt og Jura intervallerne i Figur 6.102 og 6.103) og der er ikke påvist homogene lersten med en tykkelse omkring 100 meter. Der er mulige strømningsveje i tykke sandlag, der findes i Gassum Formationen umiddelbart under lerstensintervallet (Figur 6.102), hvilket er et mindre favorabelt forhold.

Tabel 6.10 *Evaluering af lersten (Nedre Kridt og Jura) som værtsbjergart, Sydlige Øhav.*

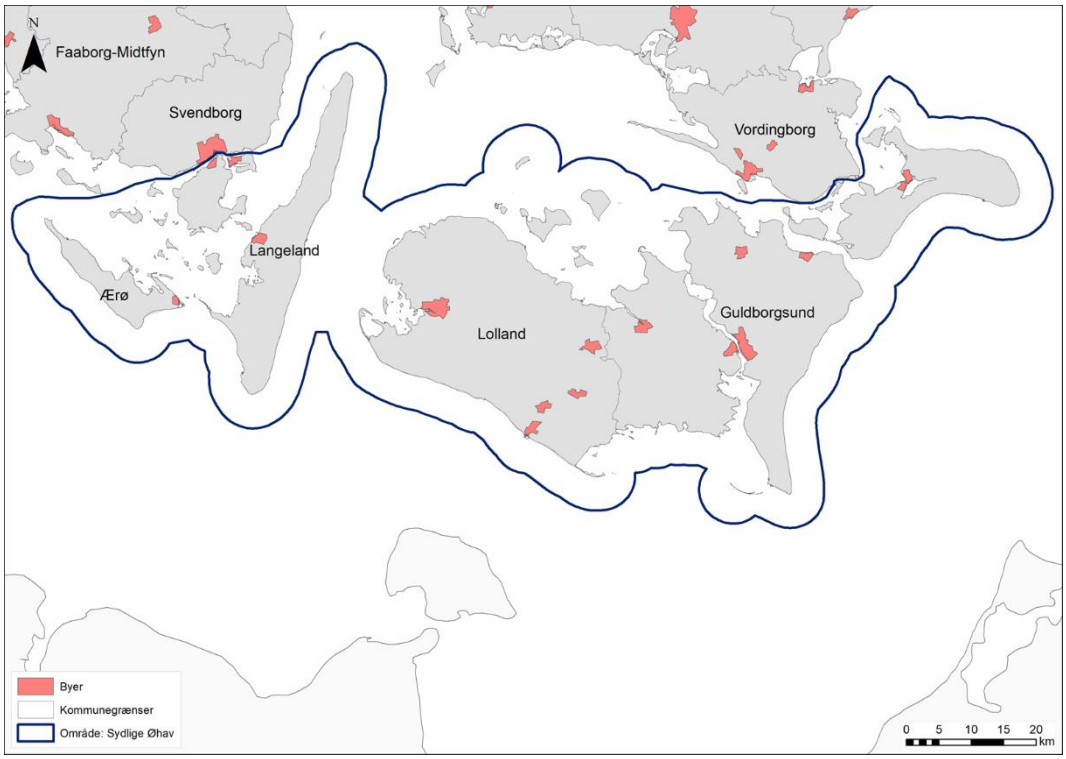
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	

Kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart

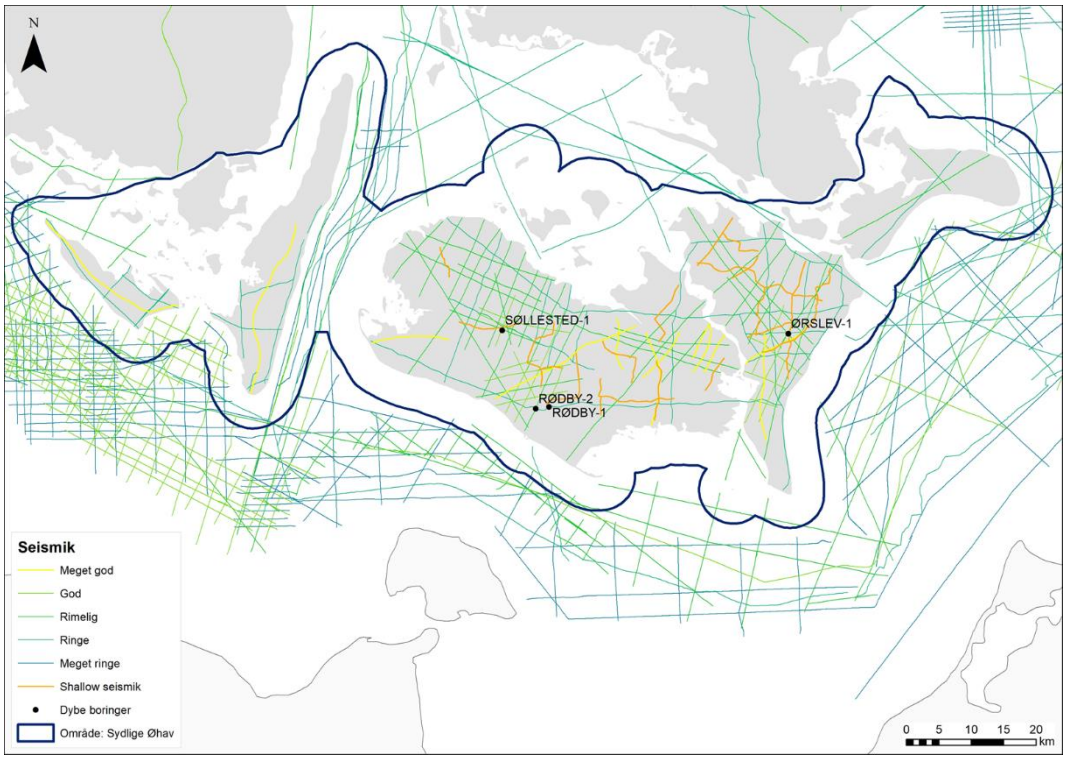
Kalksten findes i store dele af området i dybdeintervallet 400 til 500 meter (Figur 6.105), og udgør bjergarten i den overliggende barrierezone. Den horisontale kontinuitet er i dele af området begrænset pga. mange forkastninger (Figur 6.112), men der ses også områder uden forkastninger (Figur 4.21 og 4.22). Den generelt begrænsede horisontale kontinuitet i området af kalkstenen både som værts- og som barrierebjergart er årsagen til, at kriterium 1.1 (rumlig udbredelse) får en gul score som potentielt egnet. Basis af kalken findes i dybder omkring 500 meter og ned til maksimalt 600 meter. Herunder findes sandlag i Nedre Kridt og Jura aflejringerne, der kan fungere som strømningsveje, hvis de findes nær basis af et evt. depot. Det er derfor vigtigt at undersøge dybden til sand under basis af kalken, hvis en lokalitet i området udvælges til detaljerede geologiske undersøgelser, for at sikre, at et evt. depot placeres i passende afstand fra mulige strømningsveje.

Tabel 6.11. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Sydlige Øhav.*

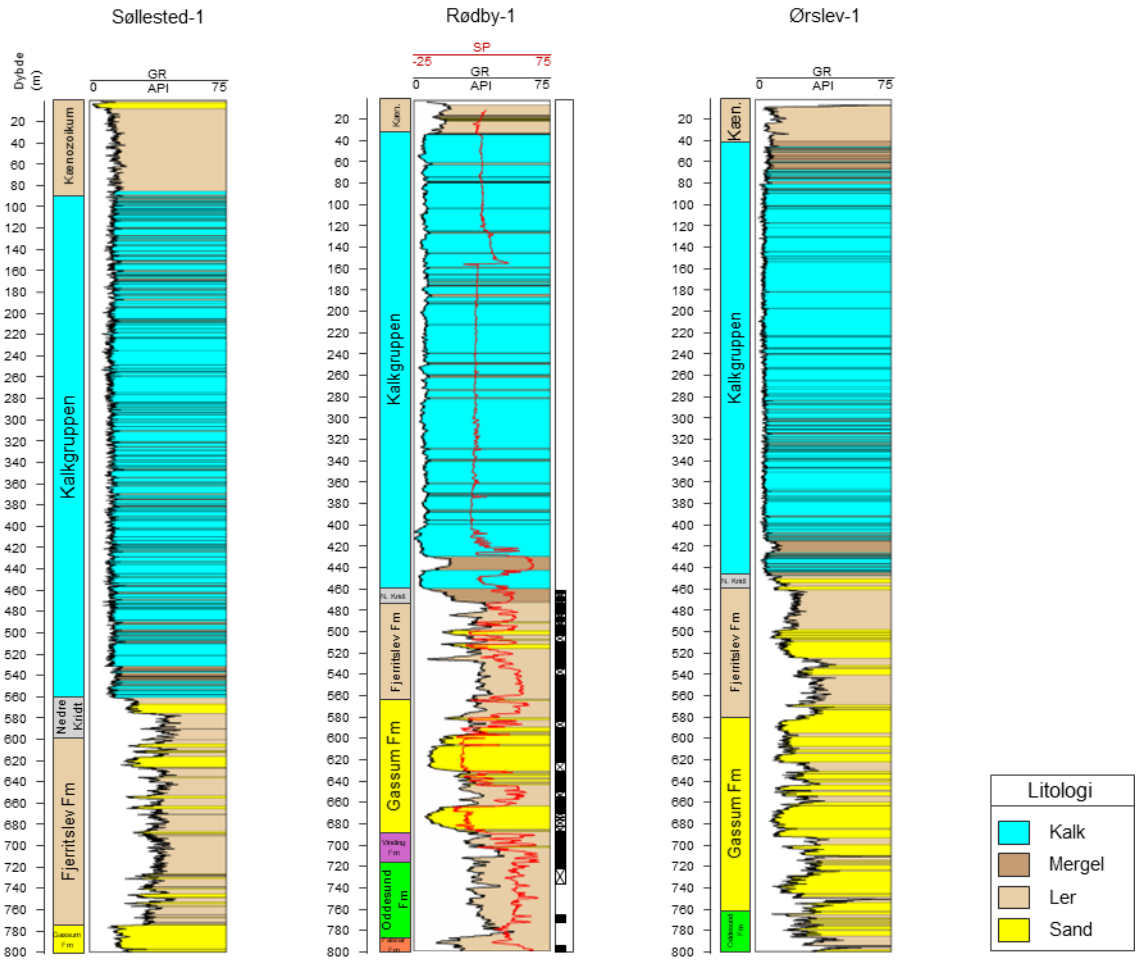
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



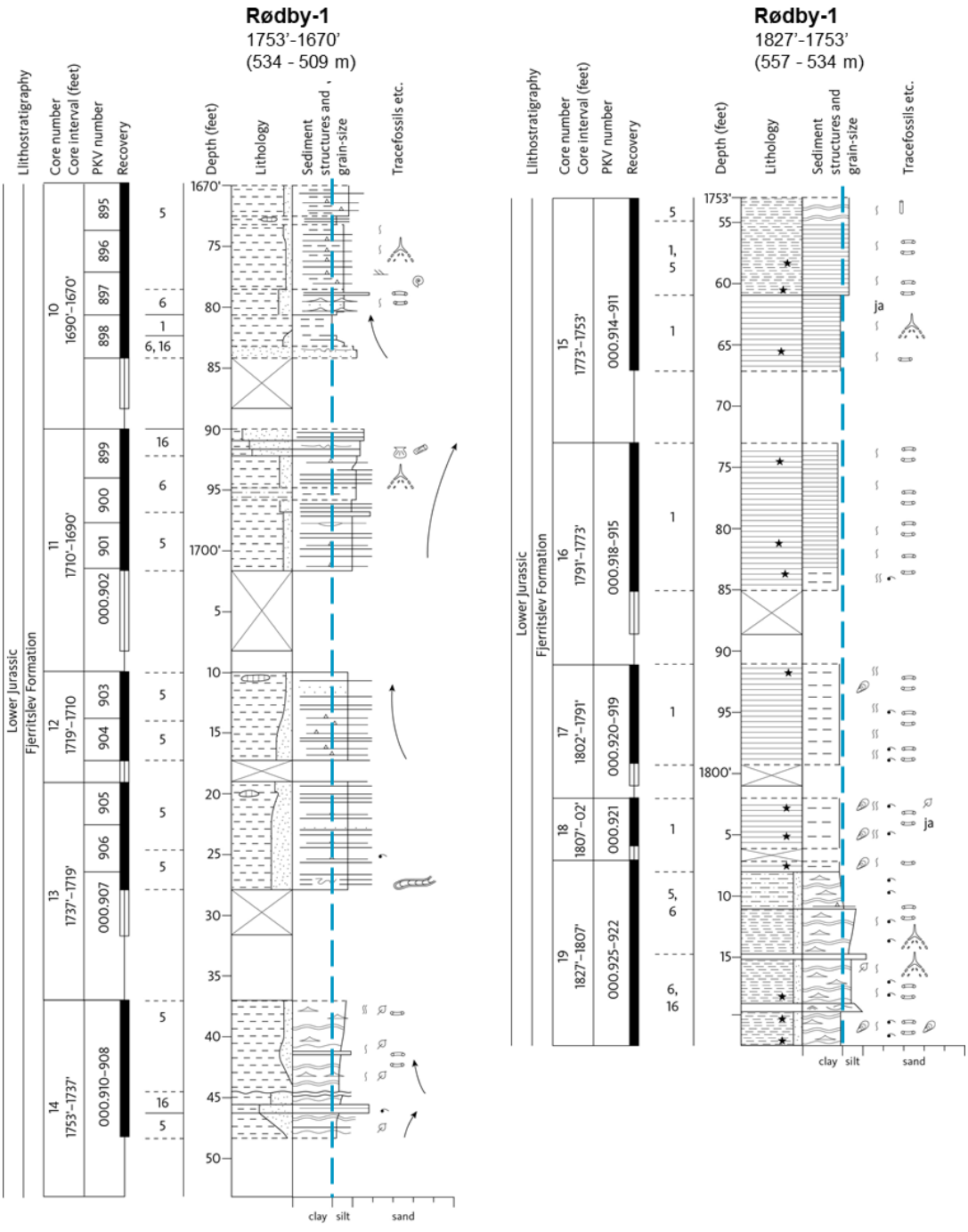
Figur 6.100. *Sydlige Øhav området vist med kommunegrænser og større byer.*



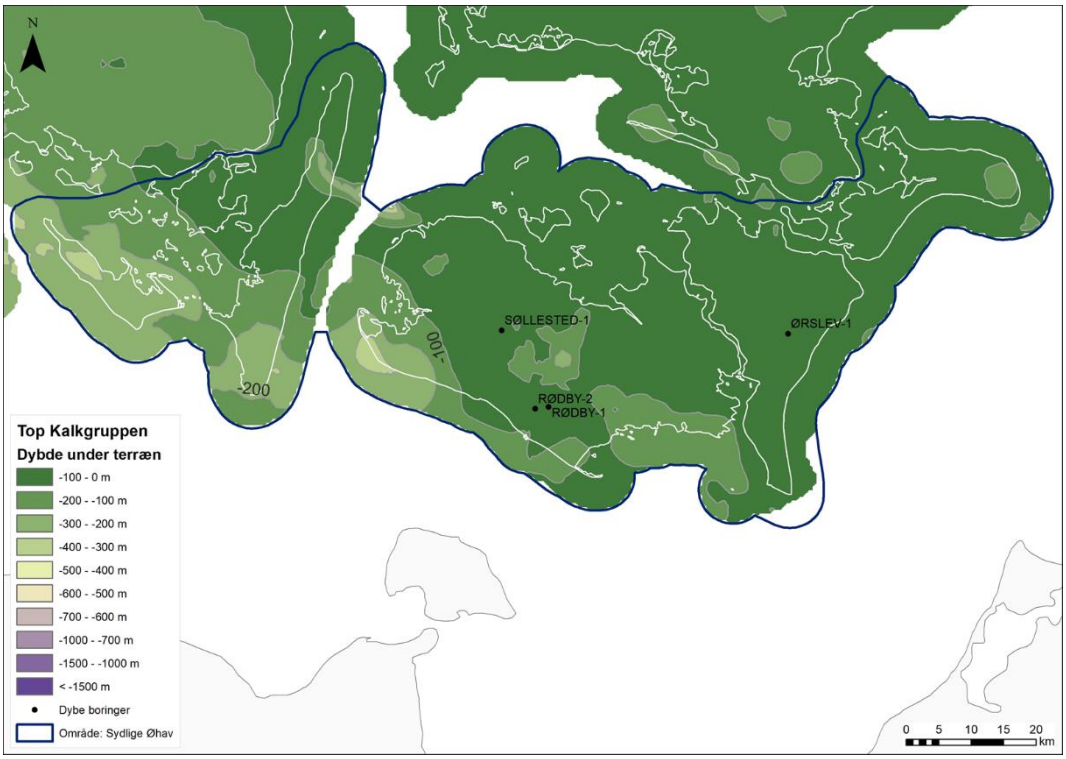
Figur 6.101. *Seismiske linjer og deres kvalitet samt dybe boringer, Sydlige Øhav. Det ses, at der er relativt mange seismiske linjer indsamlet i området og i de omkringliggende farvande.*



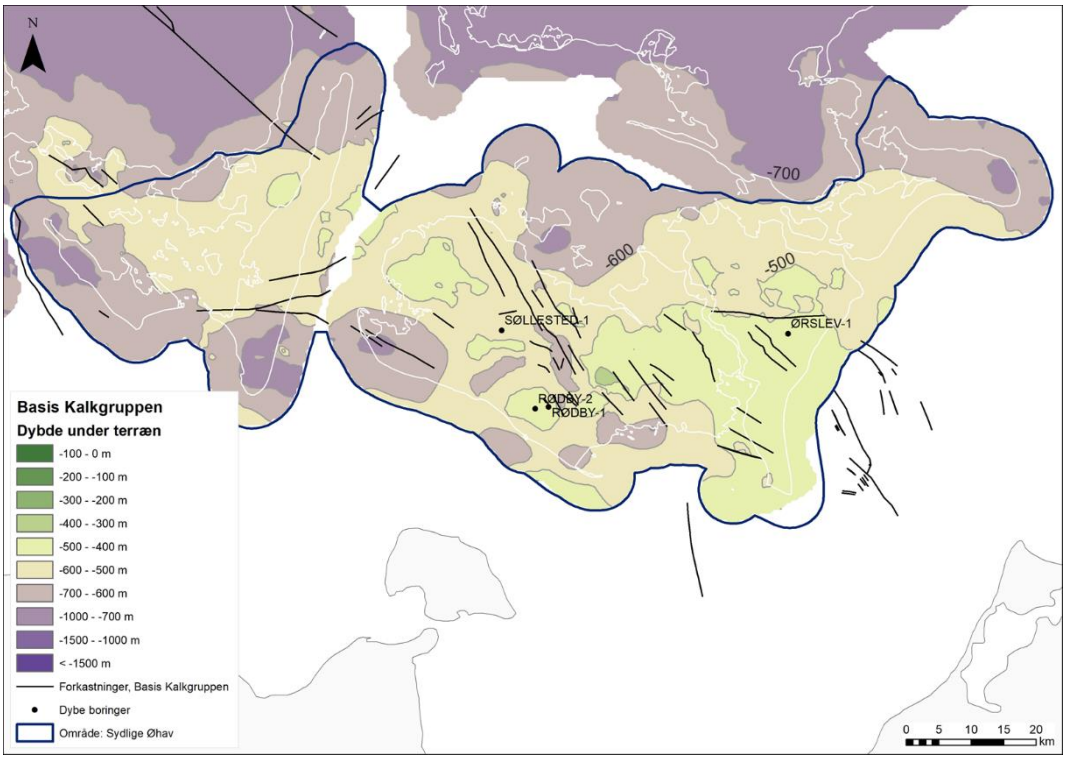
Figur 6.102. *Litologiske logtolkninger (0-800 meter) fra dybe boringer i det Sydlige Øhav. Logs viser, at kalksten fra Kalkgruppen udgør intervallet fra nær terræn (30-80 meter), og ned til dybder varierende fra 440 meter til 550 meter. Herunder findes Nedre Kridt og Nedre Jura sedimenter der indeholder vekslende lag af sand og ler. De tykkeste lerintervaller (uden sand) er omkring 30-40 meter tykke. Bemærk, at der er tykke sandlag i den underliggende Gassum Formation, og at grænsen til de mere lerede intervaller er gradvis med aftagende indhold af sandlag opefter. Det betyder, at den seismiske kortlægning af basis Jura (Basis Fjerritslev Formationen), vil være behæftet med en relativt stor usikkerhed.*



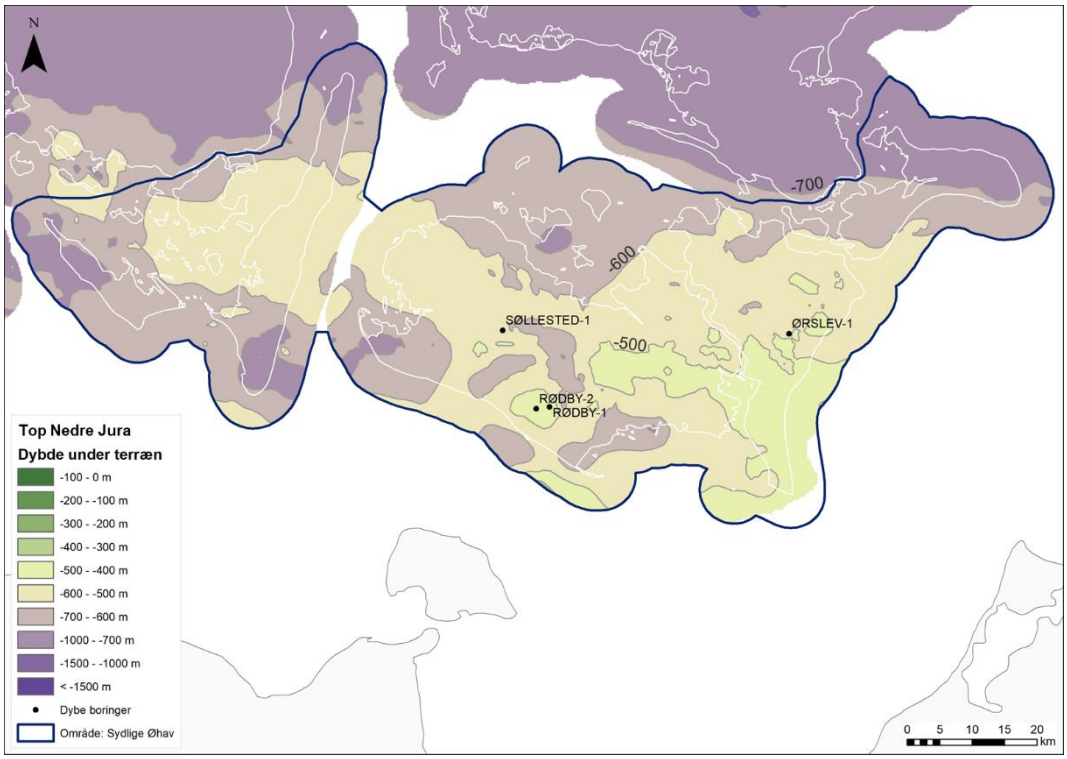
Figur 6.103. *Repræsentative sedimentologiske logs fra Rødby-1 boringen. Det ses, at litologien og kornstørrelsen varierer igennem de viste intervaller af Nedre Jura, Fjerritslev Fm. Den blå linje viser grænsen for kornstørrelsen ler, hvor lag, der findes til venstre for linjen, består af ler. På loggen til højre ses et homogent lerlag i intervallet 1762' til 1808', dvs. cirka 15 meter tykt.*



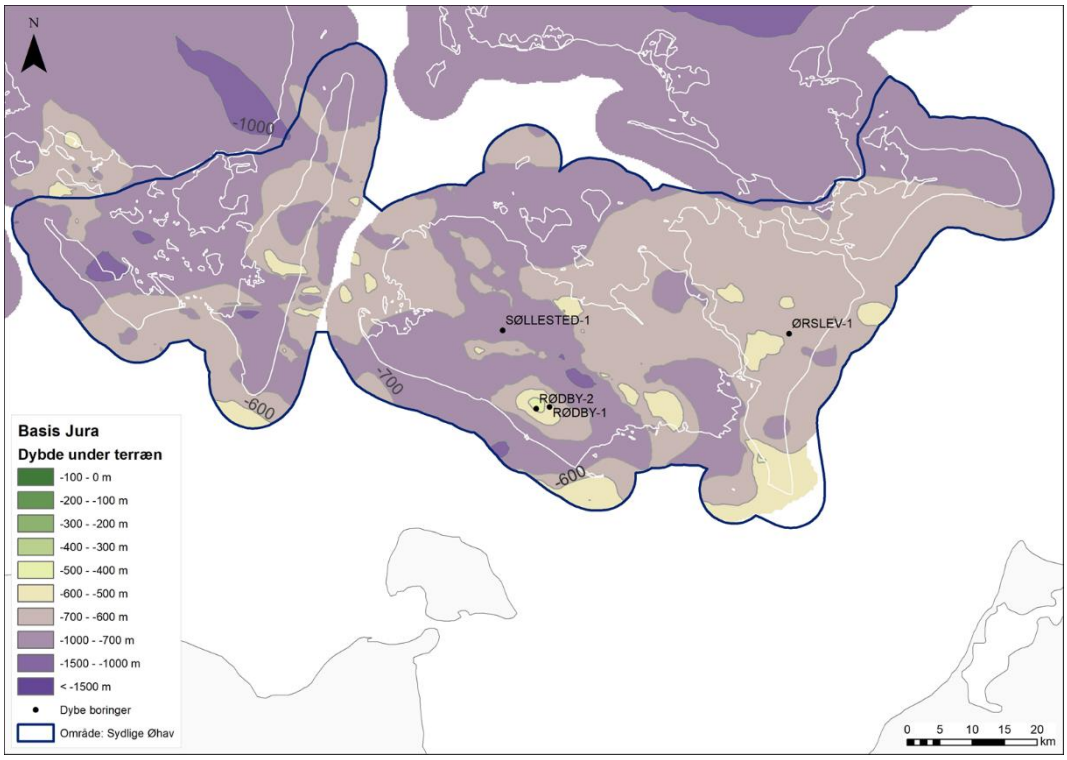
Figur 6.104*.Top Kalkgruppen dybdekort, Sydlige Øhav. Kortet viser, at Top Kalkgruppen generelt findes i dybder mindre end 100 meter under terræn.*



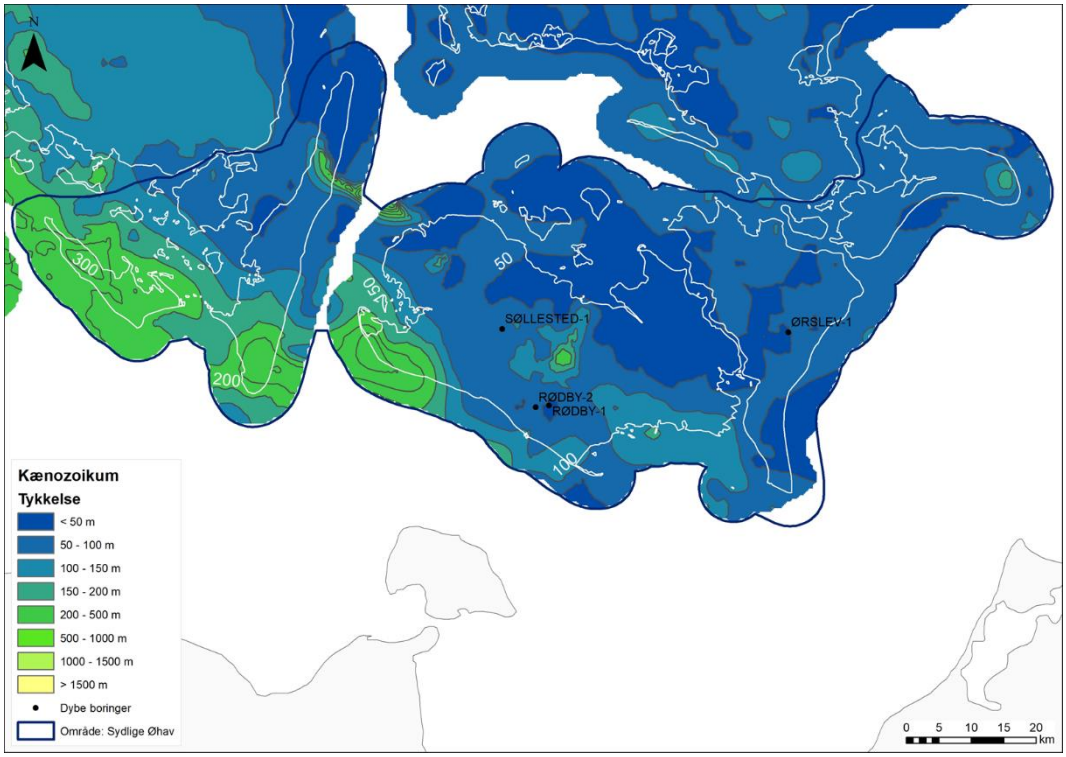
Figur 6.105*. Top Nedre Kridt (Basis Kalkgruppen) dybdekort, hvor kortlagte forkastninger ved Basis Kalkgruppen er vist, Sydlige Øhav. Dybden varierer mellem 400 og 600 meter over relativt korte afstande. Dette skyldes dybereliggende saltstrukturer.*



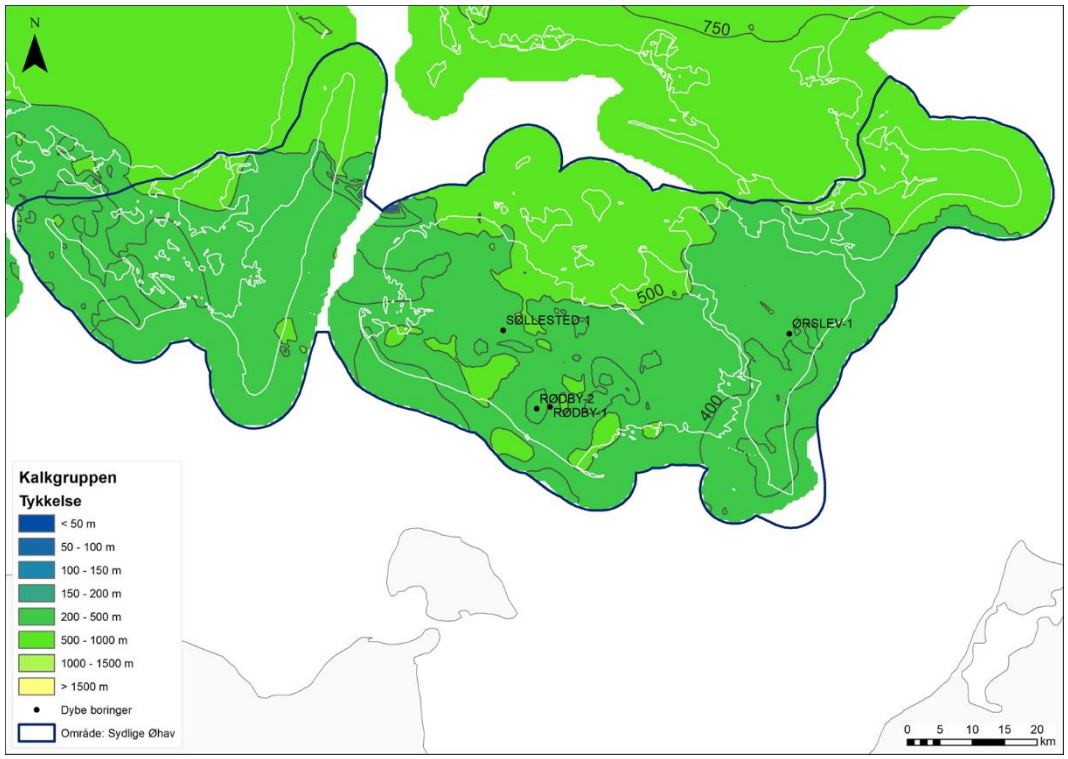
Figur 6.106. *Top Nedre Jura dybdekort, Sydlige Øhav. Kortet viser, at dybden i størstedelen af området er 500-600 meter, varierende fra 400 meter til lokalt 700 meter.*



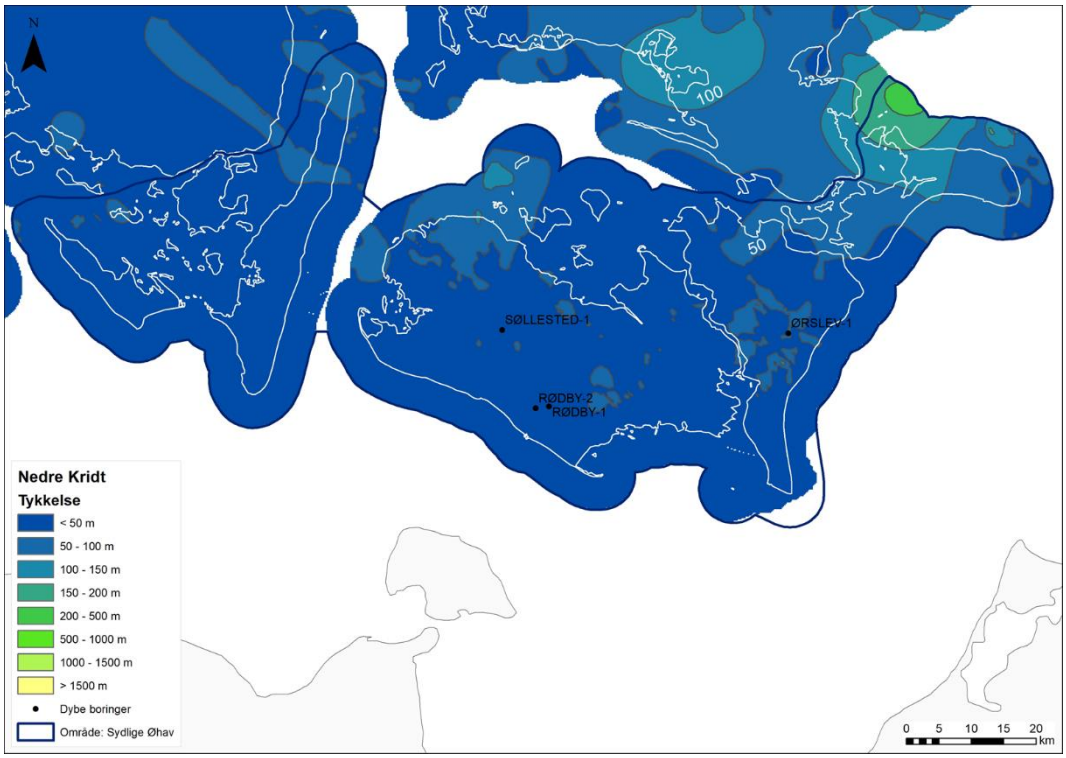
Figur 6.107. *Basis Jura dybdekort, Sydlige Øhav. Kortet viser, at dybden varierer fra 500 meter til lokalt 1000 meter. Det irregulære konturmønster skyldes, at der er mange forkastningsafgrænsede halv-grave i den dybere del af lagserien.*



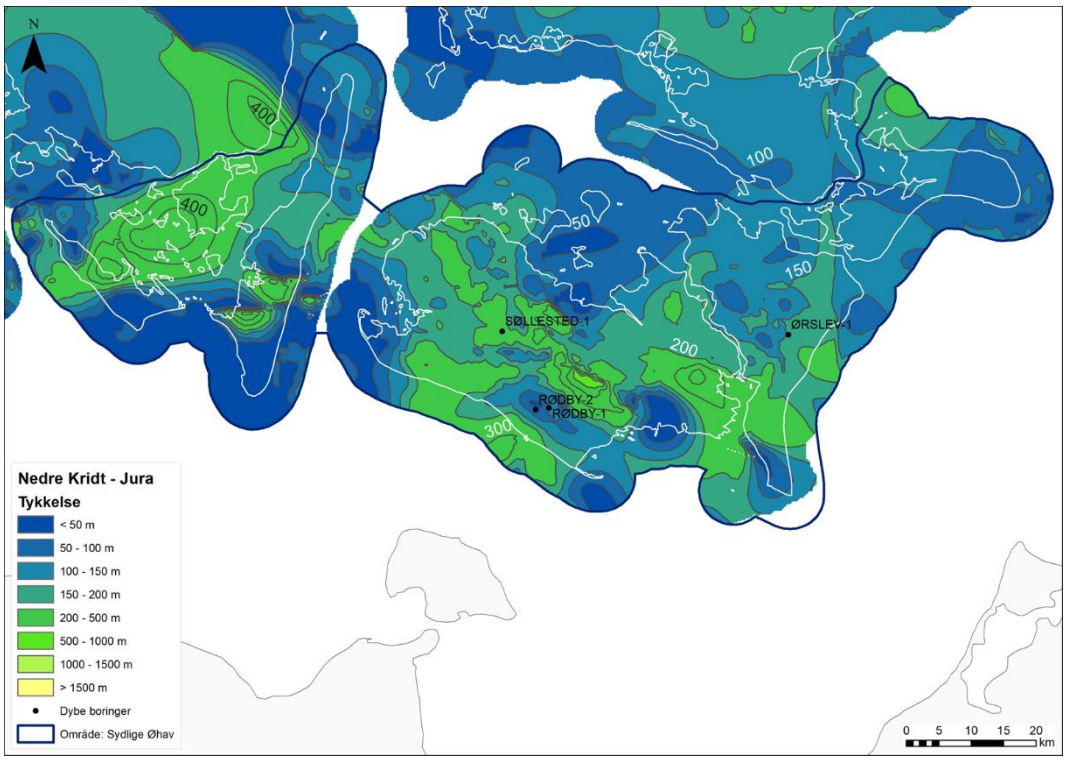
Figur 6.108. *Tykkelse af aflejringerne fra Kænozoikum, Sydlige Øhav. Kortet viser, at den kænozoiske lagserie generelt er 0-100 meter tyk.*



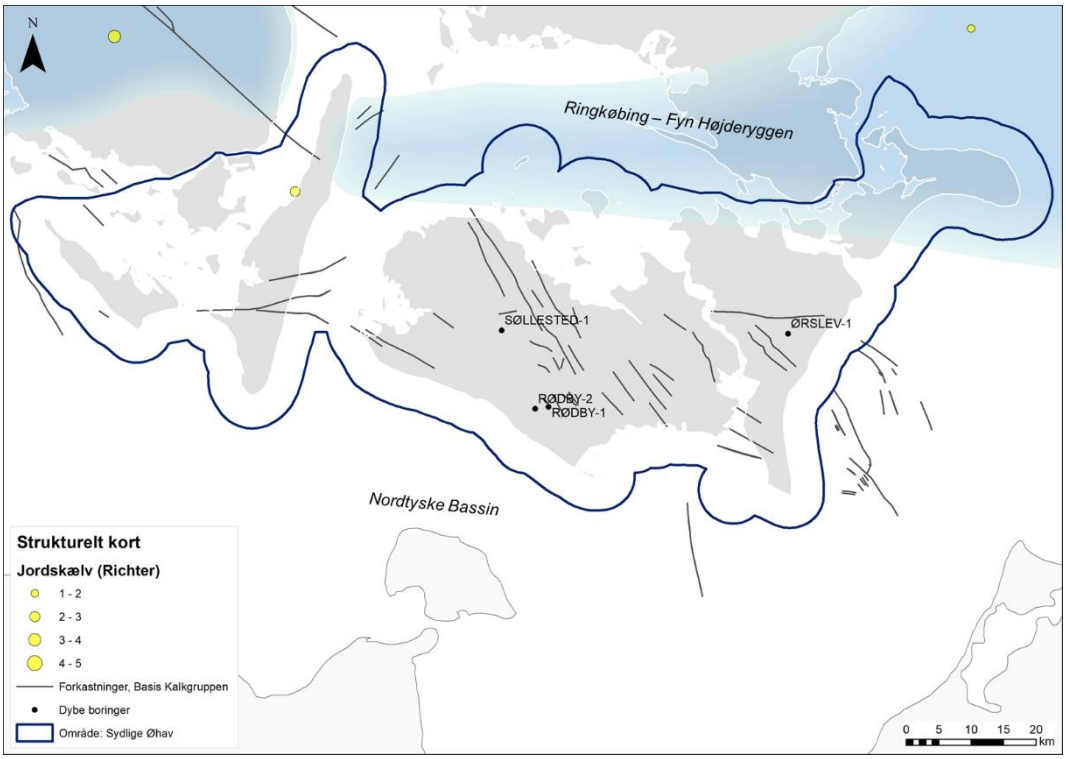
Figur 6.109. *Tykkelse af Kalkgruppen, Sydlige Øhav. Kortet viser, at tykkelsen generelt er 400 til 500 meter i området.*



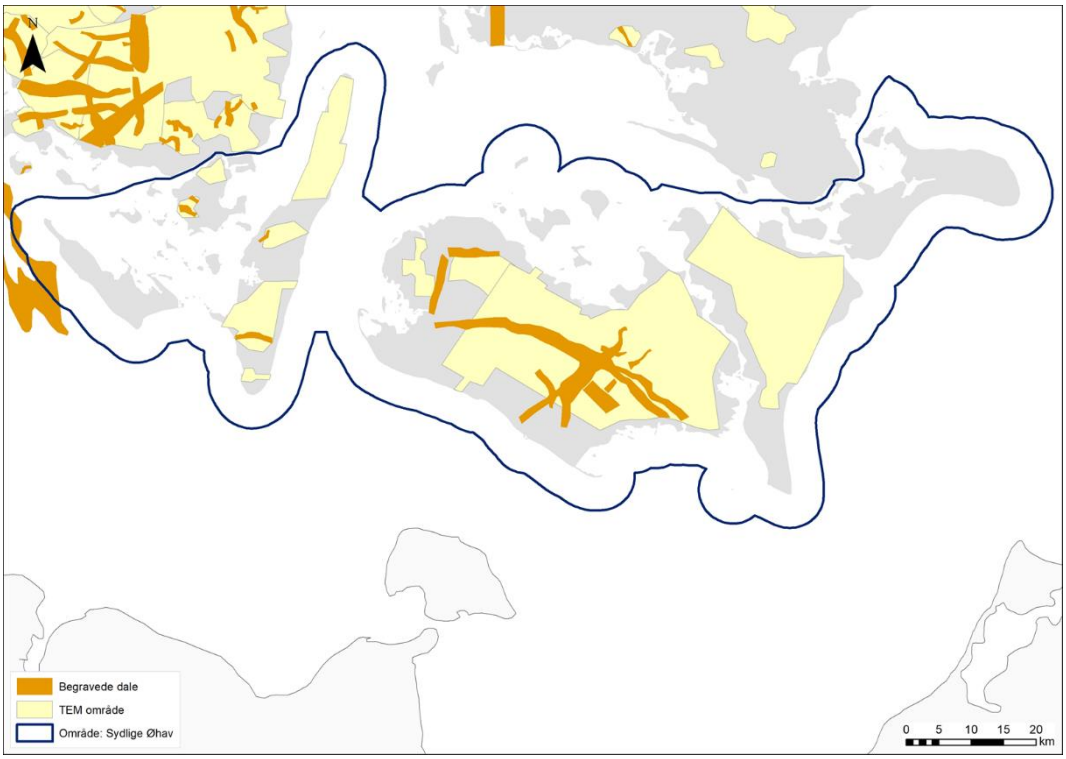
Figur 6.110. *Kort over tykkelsen af Nedre Kridt aflejringerne, Sydlige Øhav.*



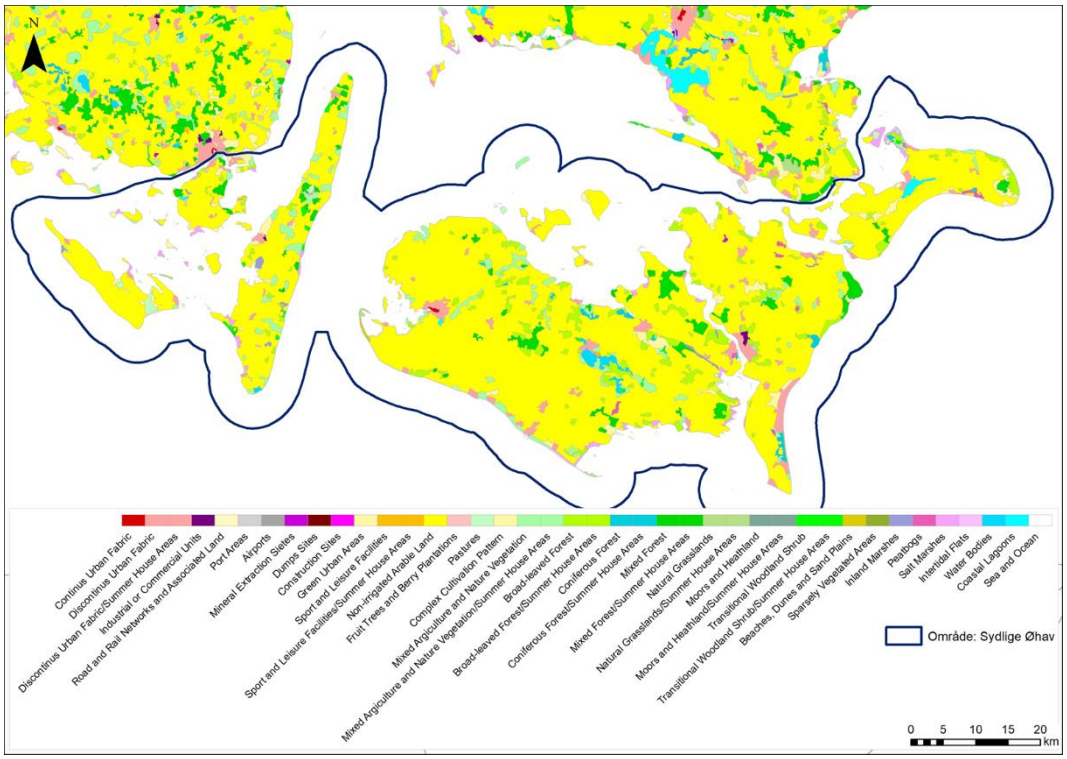
Figur 6.111. *Kort over tykkelsen af Nedre Kridt – Jura, Sydlige Øhav. Tykkelsen varierer mellem 0 og 500 meter over korte afstande. Det skyldes, at Nedre Jura lagserien lokalt har store mægtigheder i forkastningsafgrænsede halv-grave (ses på Figur 4.21).*



Figur 6.112. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Sydlige Øhav. Der er få registrerede jordskælv i området.*



Figur 6.113. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Sydlige Øhav. Det ses, at store dele af området er dækket af TEM og at der er større områder med data (lys gul), hvor begravede dale ikke er identificeret.*



Figur 6.114. *Arealanvendelse, Sydlige Øhav. (MiljøGIS, 2021).*

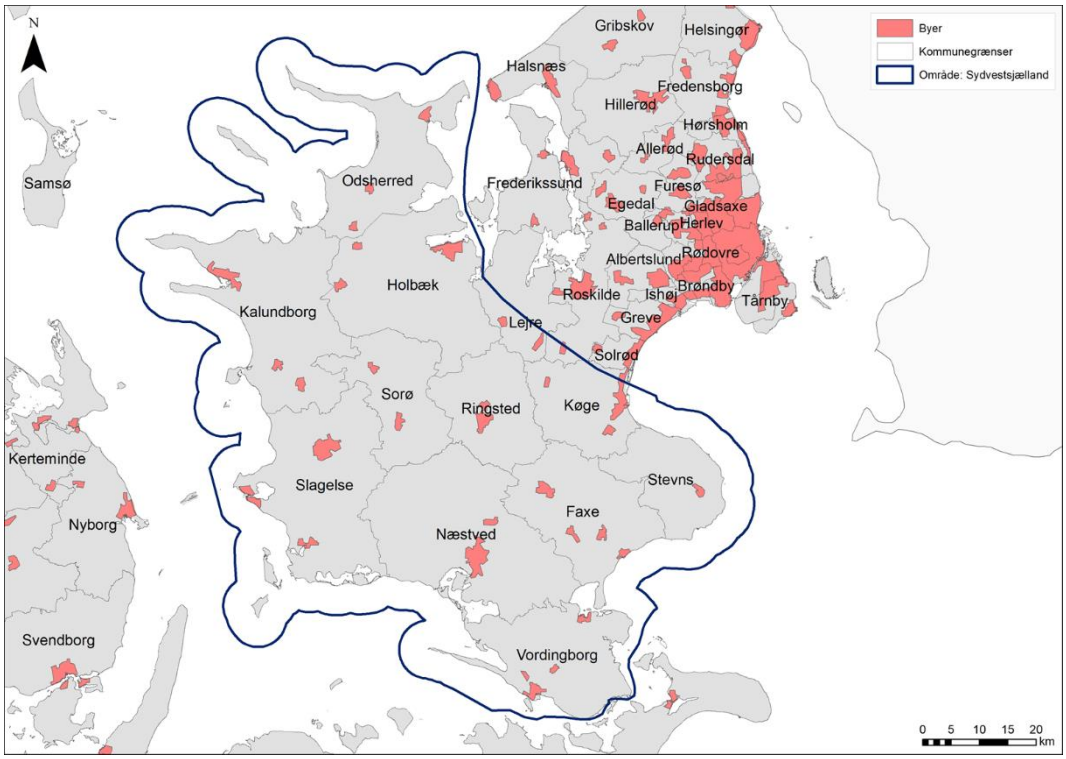
6.9 Sydvestsjælland

Kalksten udgør værtsbjergarten i dybdeintervallet 400 - 500 meter under terræn og findes udbredt i hele området med tykkelser fra 500 meter til mere end 1000 meter (Figur 4.23, 4.24, 6.118 og 6.124). Kalken udgør således både værtsbjergarten og barrierebjergarten i området. Tykkelsen af kalken i barrierezonen er overvejende favorabel, da den i store dele af området er 250 meter eller mere. I områdets nordvestlige del er tykkelsen af kalken mindre favorabel, da tykkelsen af kalken i barrierezonen aftager til mindre end 100 meter, idet toppen af kalken i dette område findes så dybt som 450 meter under terræn (Figur 6.117, 6.119 og 6.123) og her overlejres af kænozoiske sedimenter. Lokalt i områdets nordøstlige del (omkring Isefjorden) er der registreret relativt mange jordskælv (Figur 6.126), hvilket lokalt kan påvirke stabiliteten, hvis der sker forskydninger langs forkastninger i området. Størstedelen af området er dog uden større seismisk aktivitet.

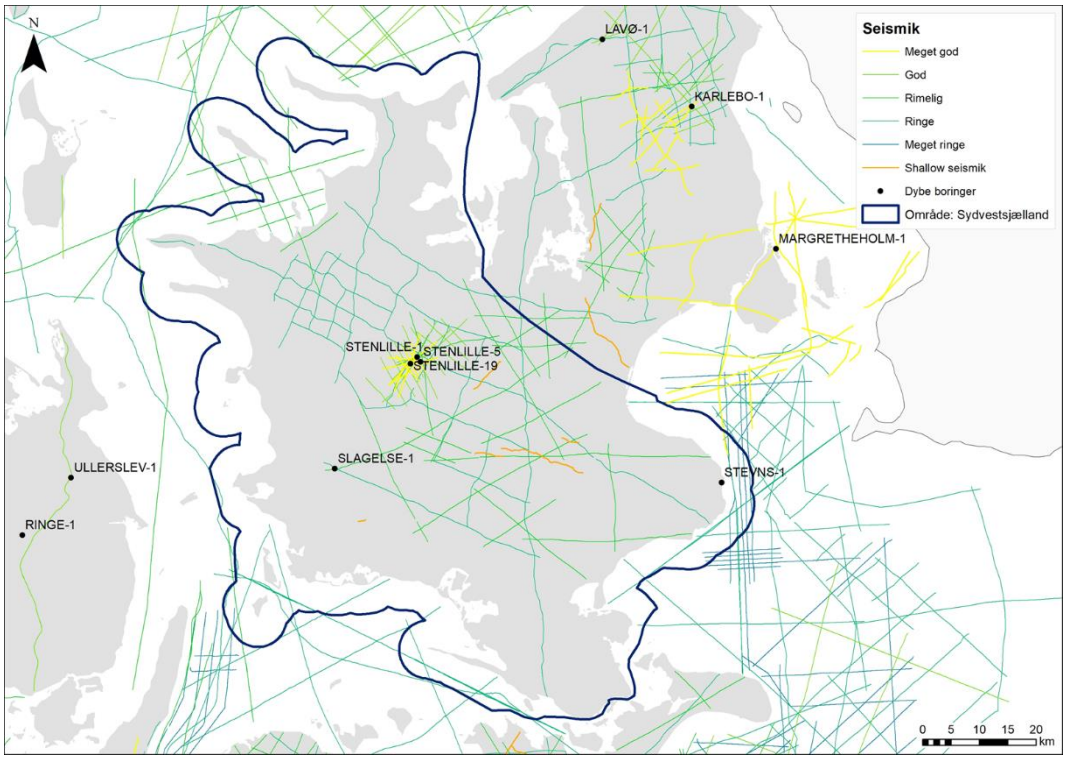
Da basis af kalken findes på stor dybde (Figur 6.119), vil der i områder hvor toppen af Kalkgruppen ligger dybt være mulighed for at en 250 meter tk kalkstensbarriere kan opnås, hvis et depot placeres på dybder større end 500 meter under terræn.

Tabel 6.12. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Sydvestsjælland.*

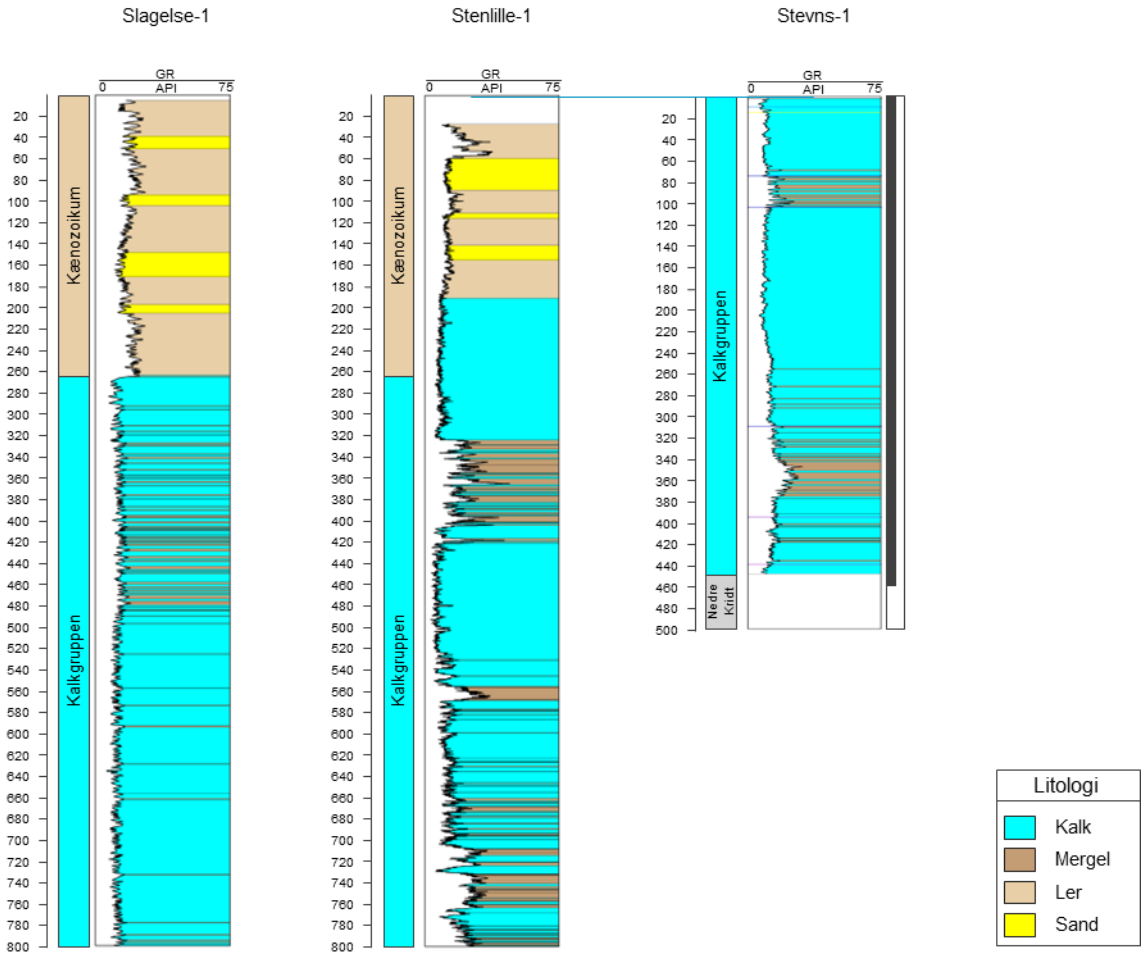
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



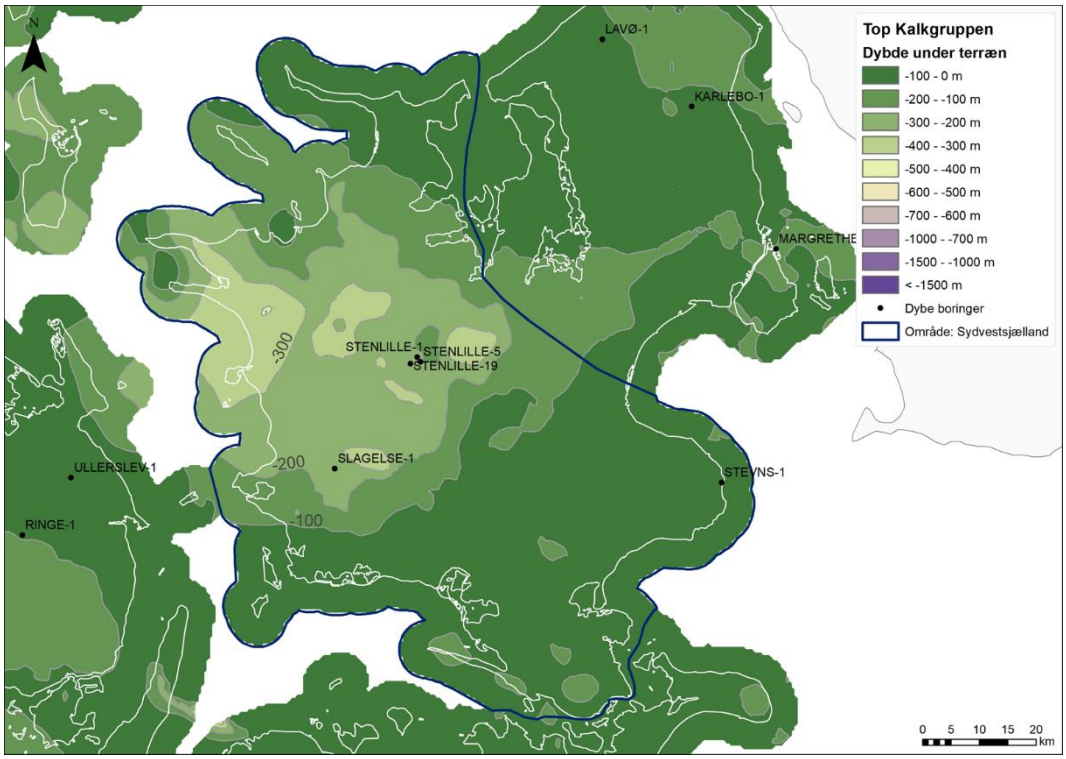
Figur 6.115. *Sydvestsjælland området vist med kommunegrænser og større byer.*



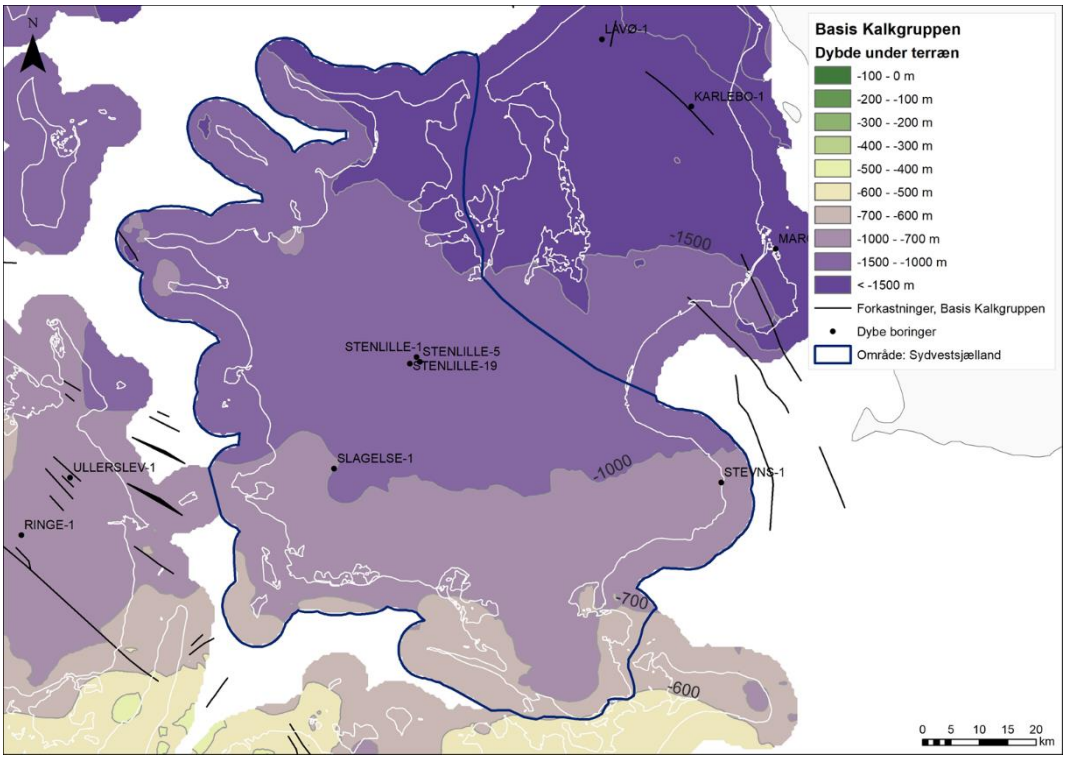
Figur 6.116. *Seismiske linjer og deres kvalitet samt dybe boringer, Sydvestsjælland. I den centrale del af området er relativt mange seismiske linjer, der er indsamlet i forbindelse med undersøgelser og kortlægning forud for gaslagring i Stenlille-området.*



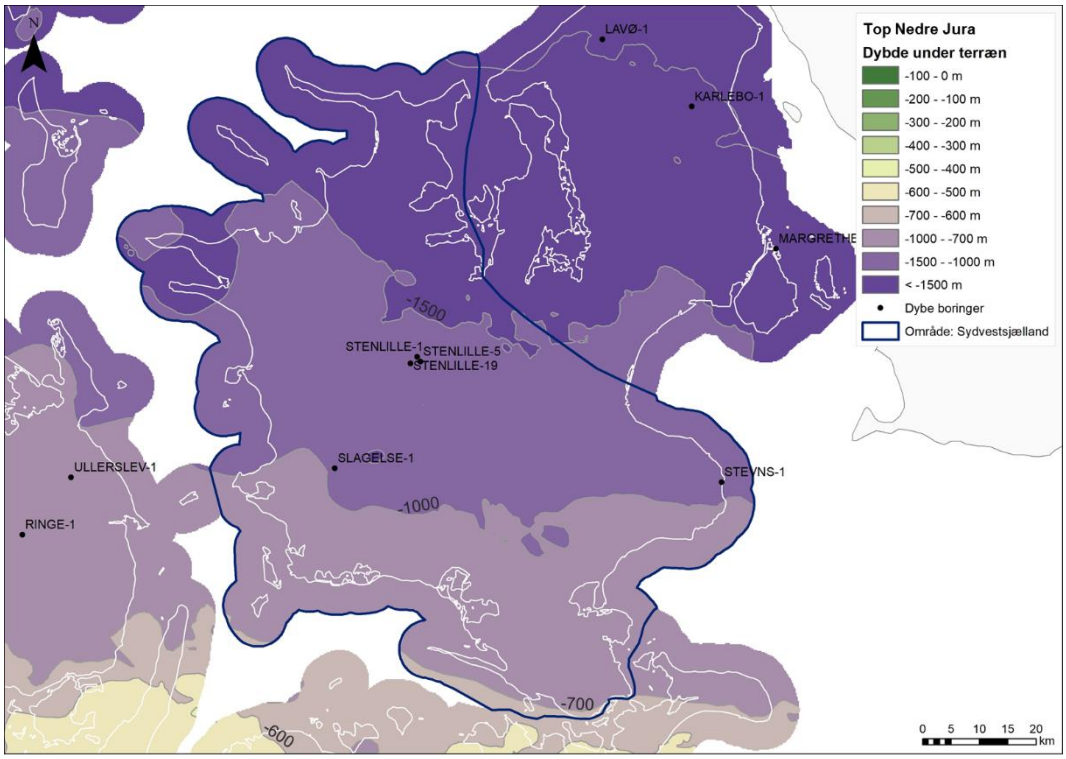
Figur 6.117. *Litologiske logtolkninger (0-800 meter) fra dybe boringer i Vestsjælland. Figuren illustrerer, at toppen af kalksten fra Kalkgruppen findes i dybder varierende fra terræn til ca. 260 meter. Kalkens udbredelse fortsætter til dybder på mere end 800 meter og indeholder mange intervaller af mergel med varierende tykkelser.*



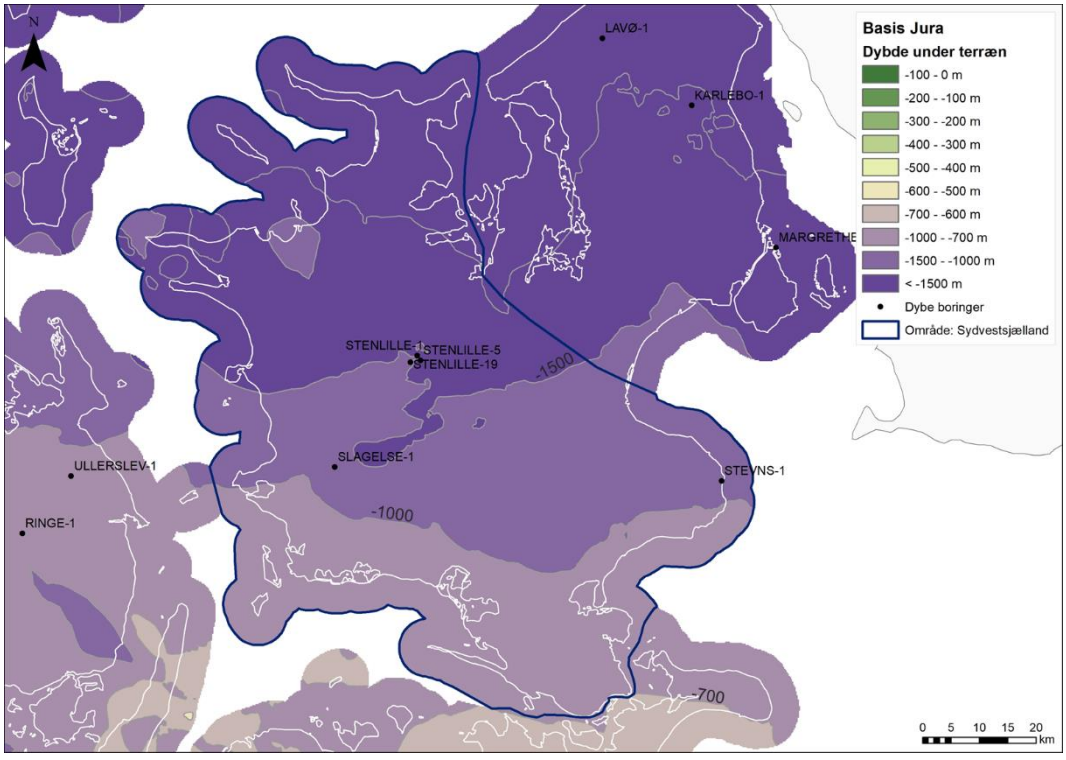
Figur 6.118. *Top Kalkgruppen dybdekort, Sydvestsjælland. Top Kalkgruppen findes på størst dybde omkring 300 meter (lysegrønne områder) i den vestlige del af området.*



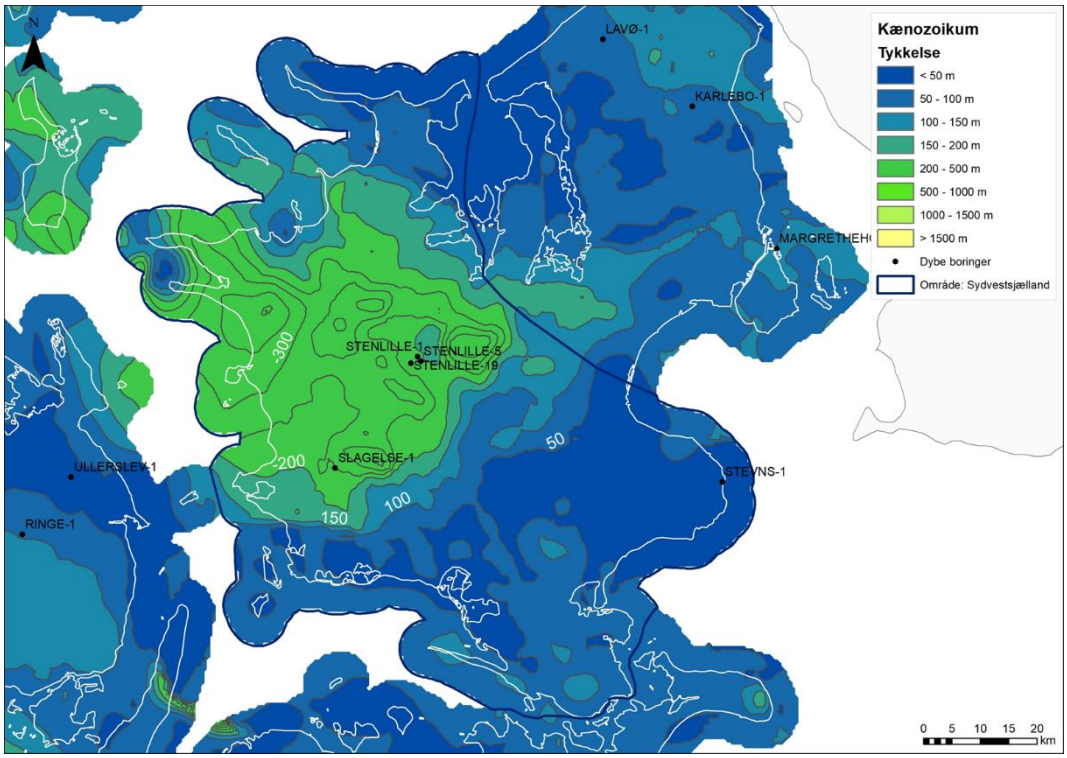
Figur 6.119. *Top Nedre Kridt (Basis Kalkgruppen) dybdekort, Sydvestsjælland. Kortet viser, at basis af Kalkgruppen i den sydlige del af området findes i dybder omkring 700 meter stigende til mere end 1500 meter i den nordligste del af området.*



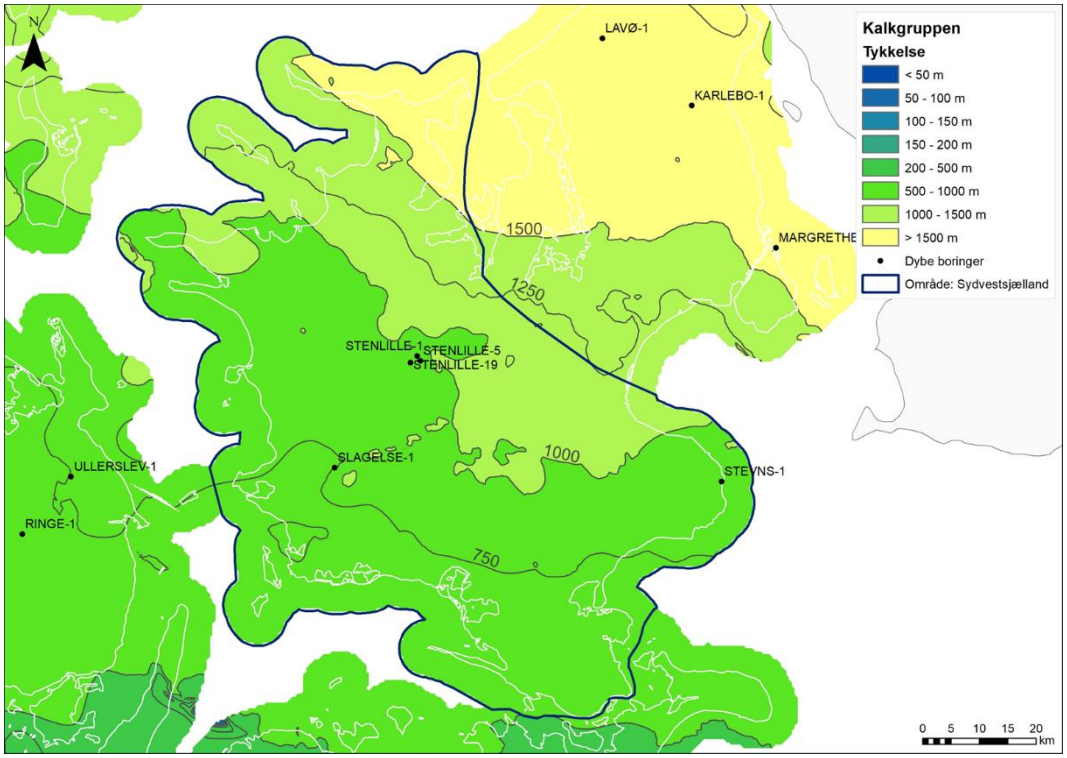
Figur 6.120. *Top Nedre Jura dybdekort, Sydvestsjælland.*



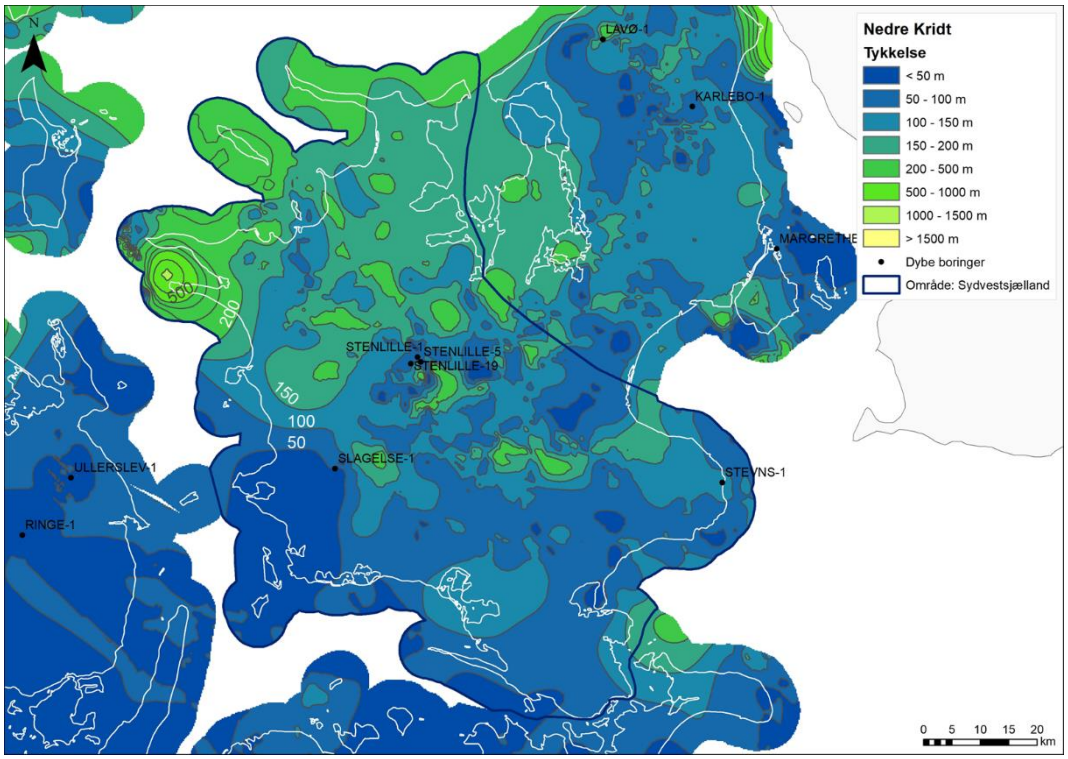
Figur 6.121 *Basis Jura dybdekort, Sydvestsjælland.*



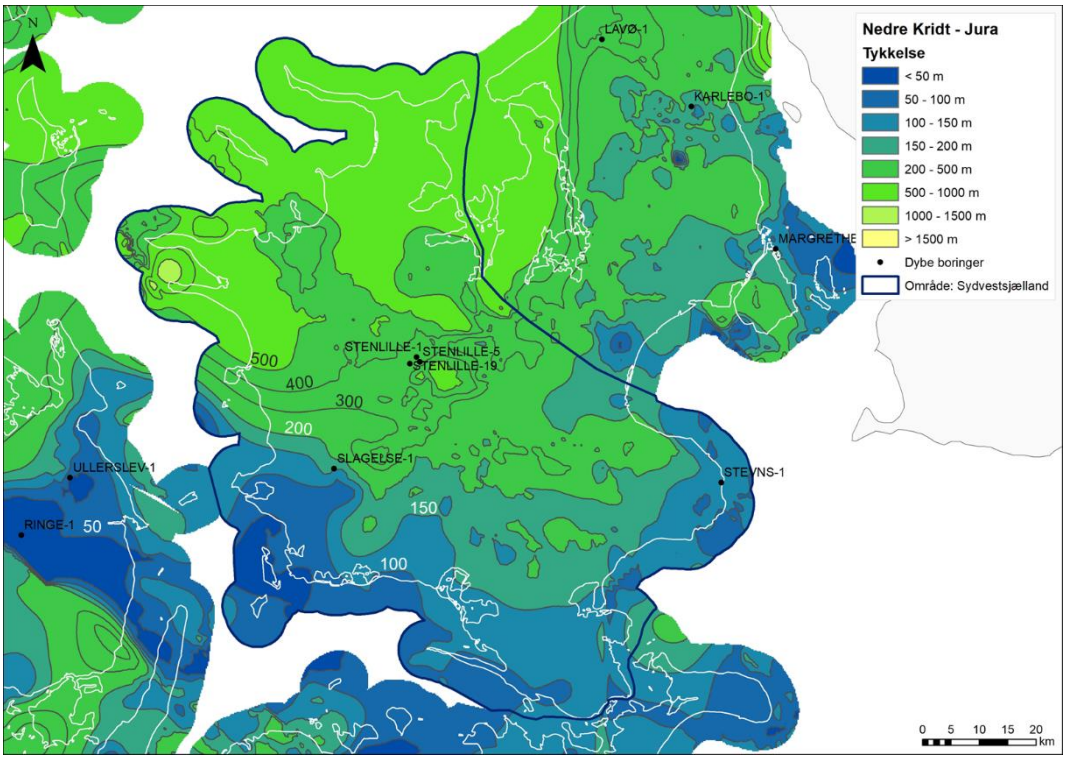
Figur 6.122. *Tykkelsen af aflejringer fra Kænozoikum, Sydvestsjælland. Kortet viser, at tykkelsen i store dele af området er 0-150 meter. De største tykkelser findes i den vestlige del af området, lokalt mere end 300 meter.*



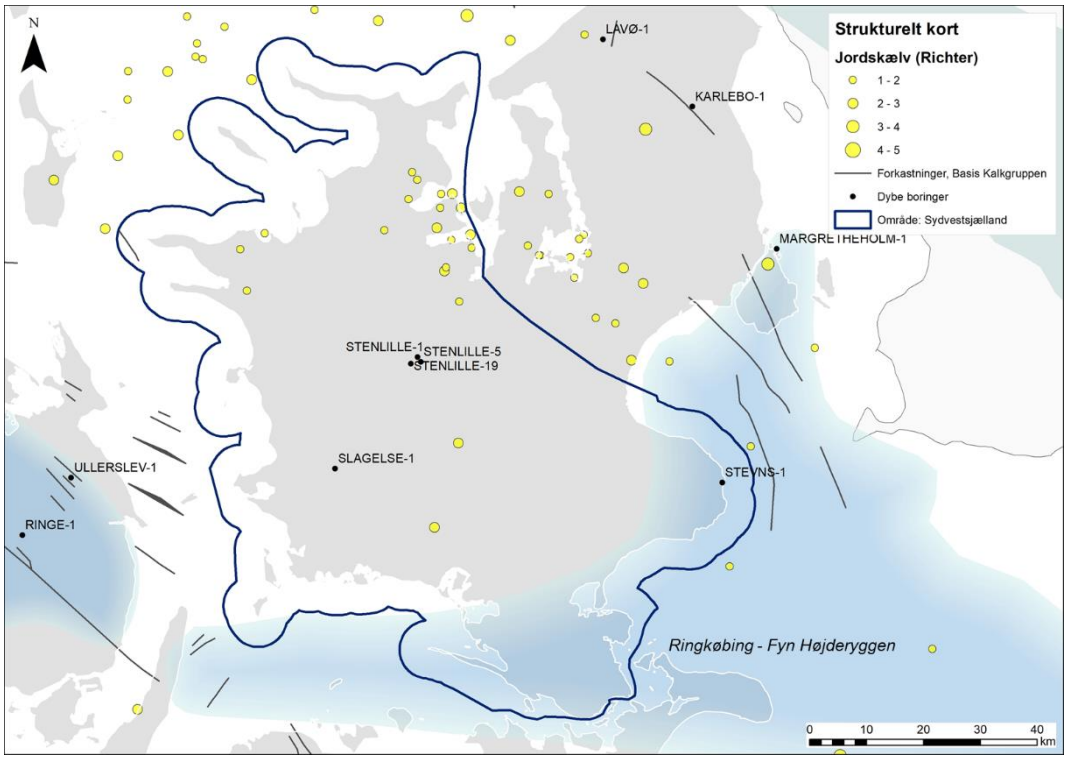
Figur 6.123. *Tykkelseskort, Kalkgruppen, Sydvestsjælland. Kortet viser, at Kalkgruppen har tykkelser omkring 700 meter mod syd stigende til 1500 meter i områdets nordligste del.*



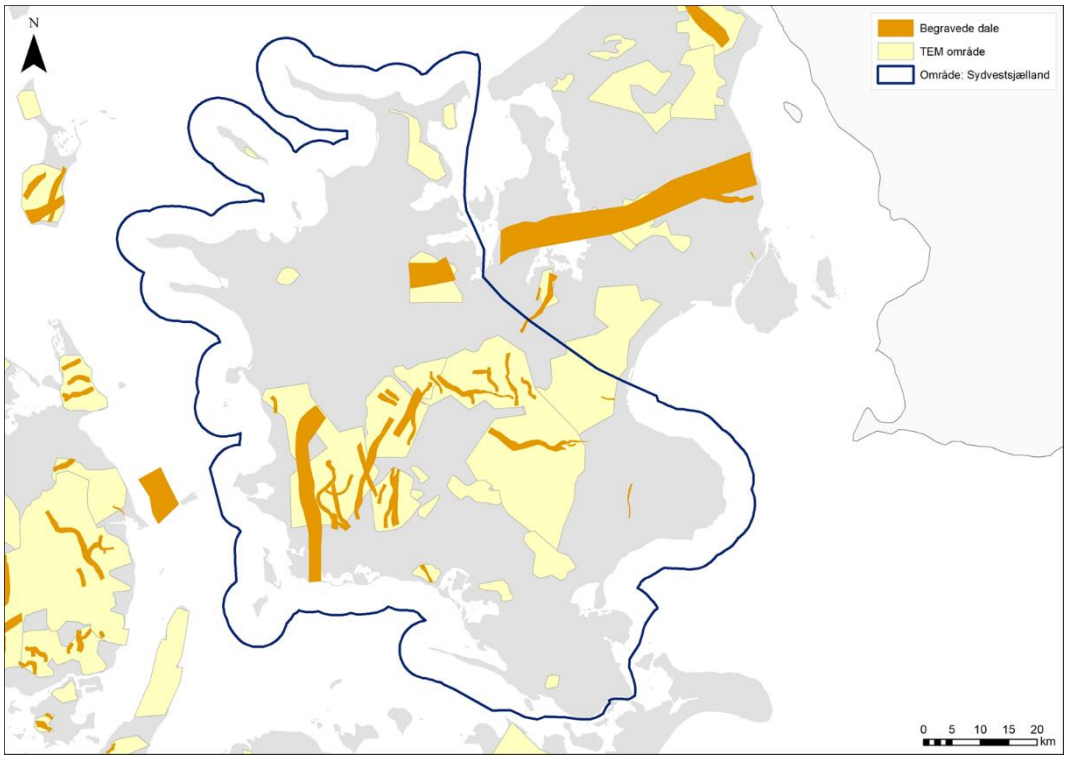
Figur 6.124. *Tykkelseskort af aflejringerne fra Nedre Kridt, Sydvestsjælland. Kortet viser, at tykkelsen generelt varierer mellem 0 og 200 meter.*



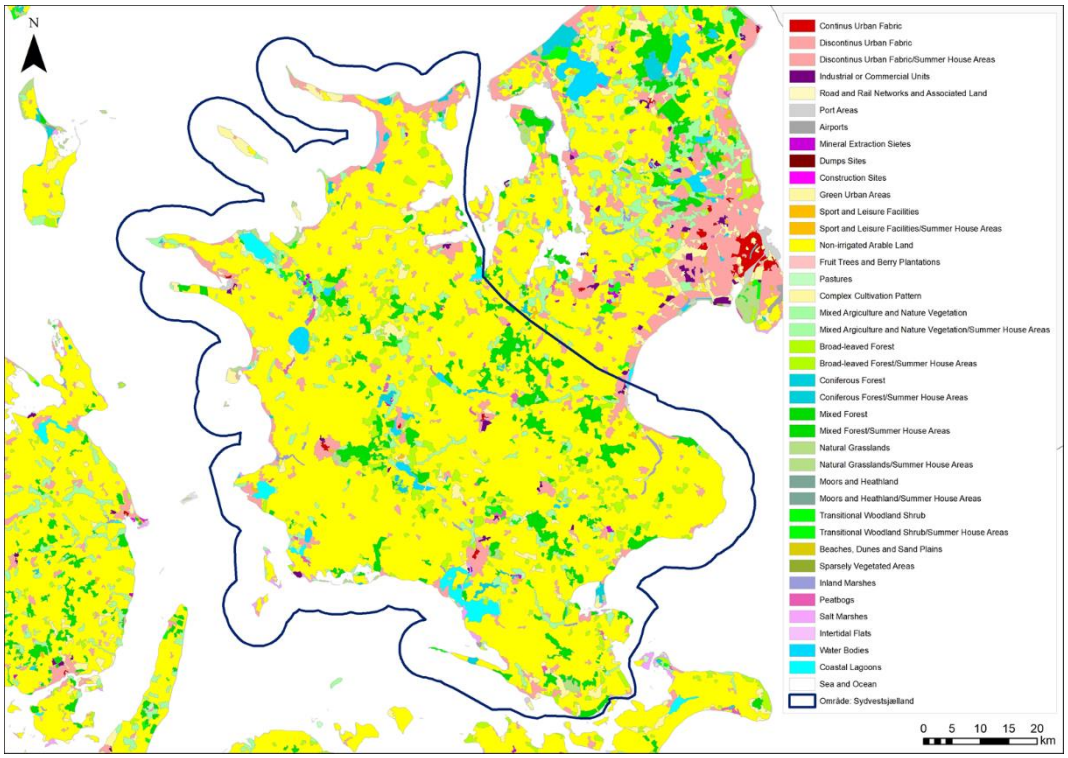
Figur 6.125. *Tykkelse af aflejringerne fra Nedre Kridt og Jura, Sydvestsjælland.*



Figur 6.126. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Sydvestsjælland. En del jordskælv er registreret i områdets nordlige del og i farvandet nord for området.*



Figur 6.127. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Sydvestsjælland.*



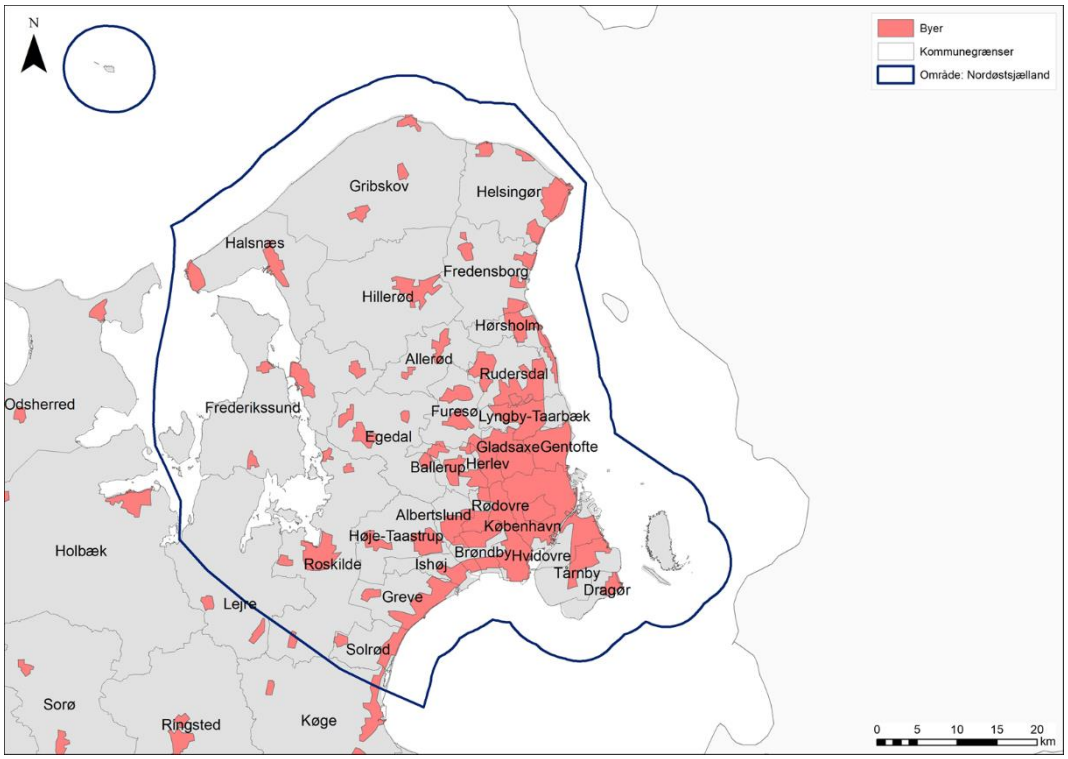
Figur 6.128. *Arealanvendelse, Sydvestsjælland. (MiljøGIS, 2021).*

6.10 Nordøstsjælland

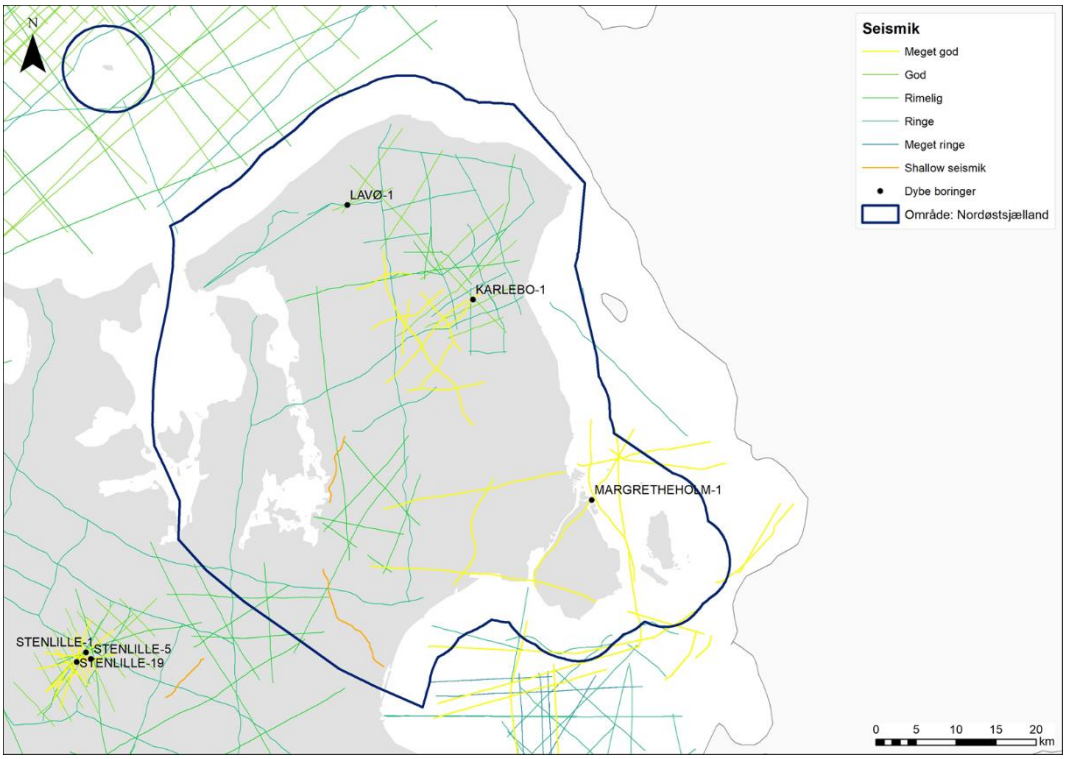
Kalksten udgør geologien i intervallet 400 - 500 meter under terræn og findes udbredt i hele området med tykkelser fra 750 meter til mere 1500 meter (Figur 6.131-6.133). Kalken udgør således både værtsbjergarten og barrierebjergarten i området. Tykkelsen af kalken i barrierezonen er favorabel, da toppen af kalken findes fra nær terræn til dybder på mere end 1000 meter. Den laterale kontinuitet er overvejende favorabel, idet større områder synes at være uforstyrrede af forkastninger (Figur 4.25 og 4.26). Der findes en del større forkastninger i området, som er kortlagt seismisk (Figur 6.133 og 6.140), men det forventes, at lokaliteter uden større forkastninger, hvor kalken er horisontalt kontinuert, kan identificeres. Den naturlige stabilitet i området scorer mindre favorabel (orange), da en del jordskælv er registreret i området (Figur 6.140) sammenholdt med, at de større forkastninger ses at fortsætte langt op i den kænozoiske lagserie til nær terrænoverfladen (Figur 4.26). Den seismiske aktivitet i området kombineret med den vertikale udstrækning af forkastninger betyder, at det vil være vigtigt at kortlægge større forkastninger med stor nøjagtighed for at sikre en lokalitet med stor afstand til forkastninger, der eventuelt kan forårsage jordskælv ved reaktivering.

Tabel 6.13. *Evaluering af kalksten (Kalkgruppen, Øvre Kridt) som værtsbjergart, Nordøstsjælland.*

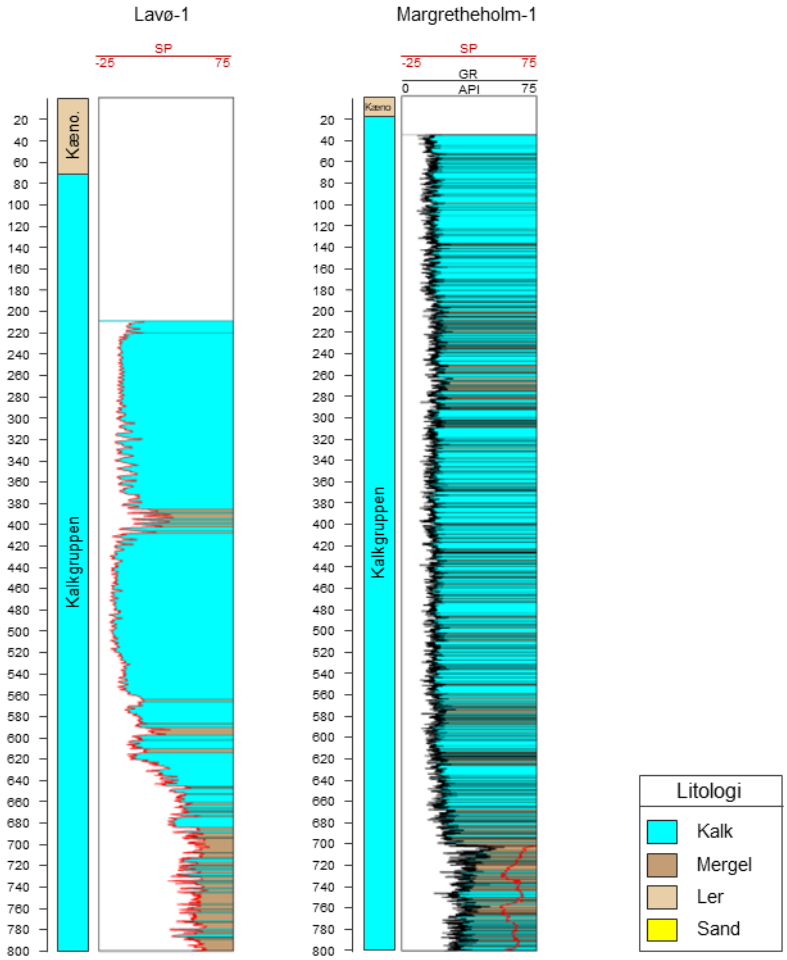
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



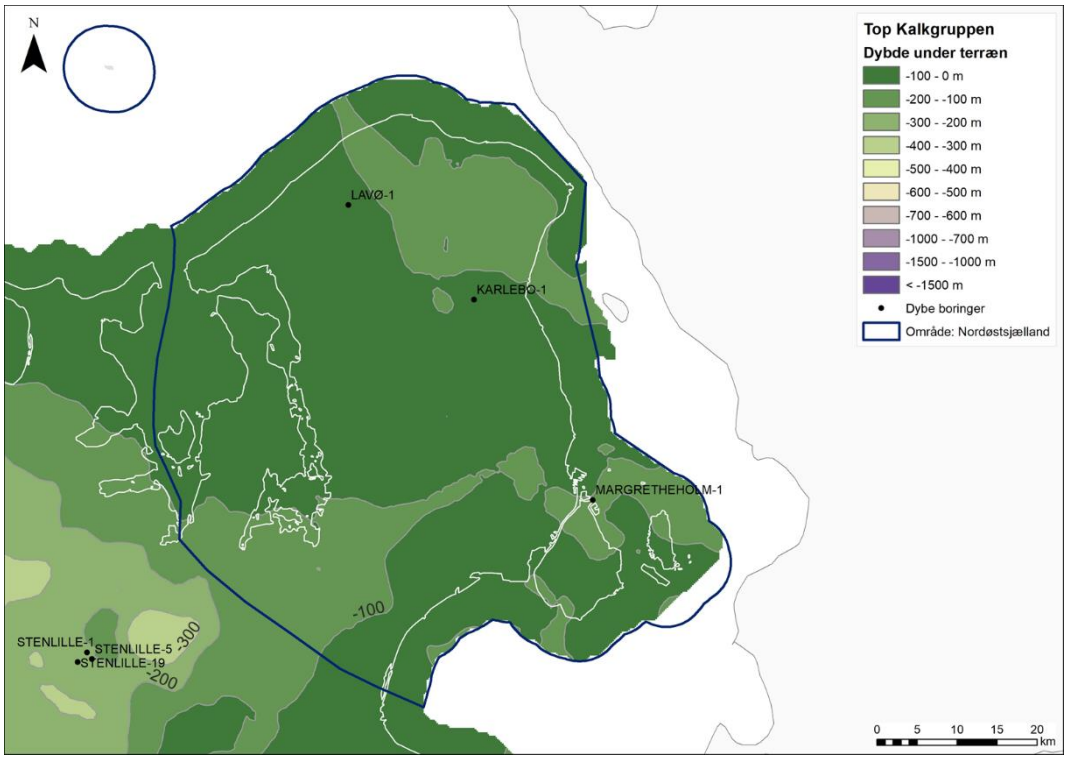
Figur 6.129. *Nordøstsjælland området vist med kommunegrænser og større byer.*



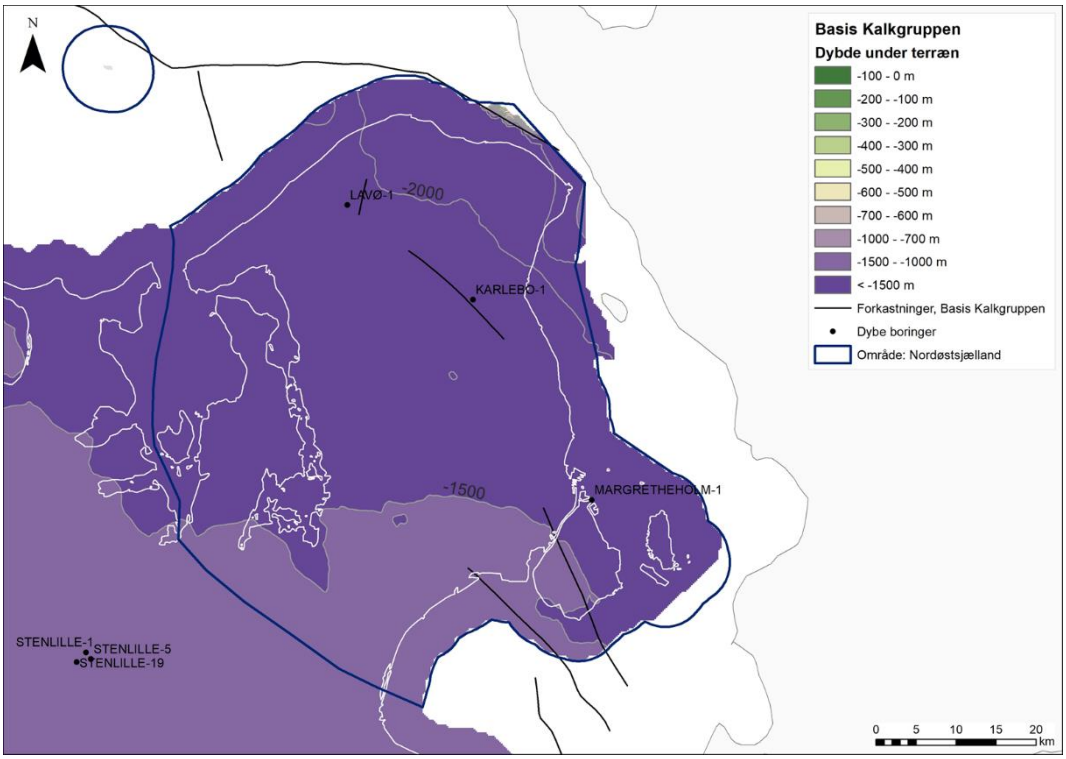
Figur 6.130. *Kort over seismiske linjer og deres kvalitet, samt dybe boringer, Nordøstsjælland.*



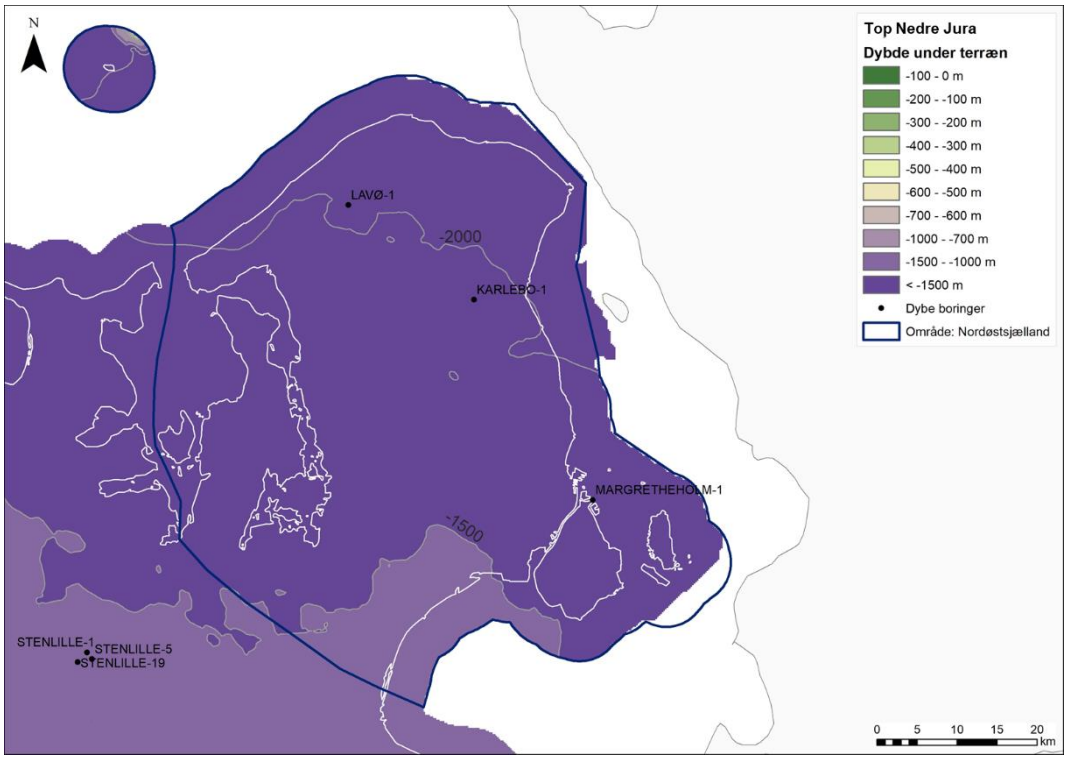
Figur 6.131. *Litologiske logtolkninger fra boringer i Nordøstsjælland viser, at kalksten fra Kalkgruppen findes fra nær terræn til dybder på mere end 800 meter. Mergellag af varierende tykkelser ses igennem hele kalk-intervallet.*



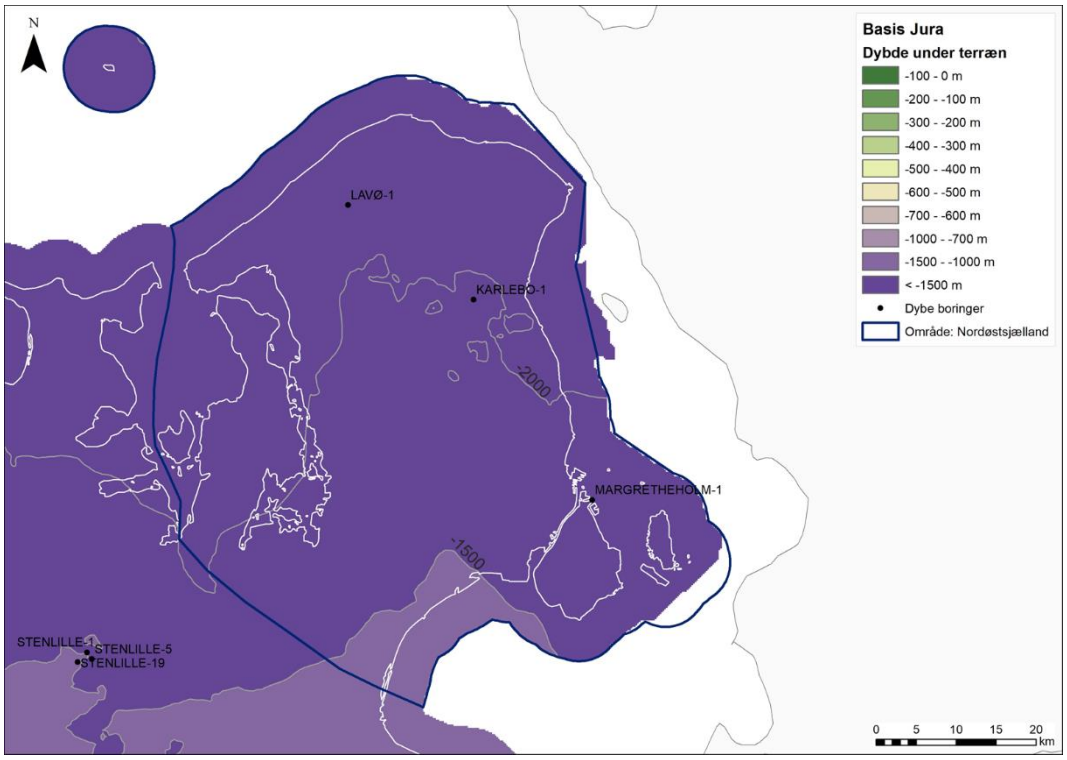
Figur 6.132. *Top Kalkgruppen dybdekort, Nordøstsjælland. Kortet viser, at topppen af Kalkgruppen generelt findes i dybder mellem 0 og 200 meter.*



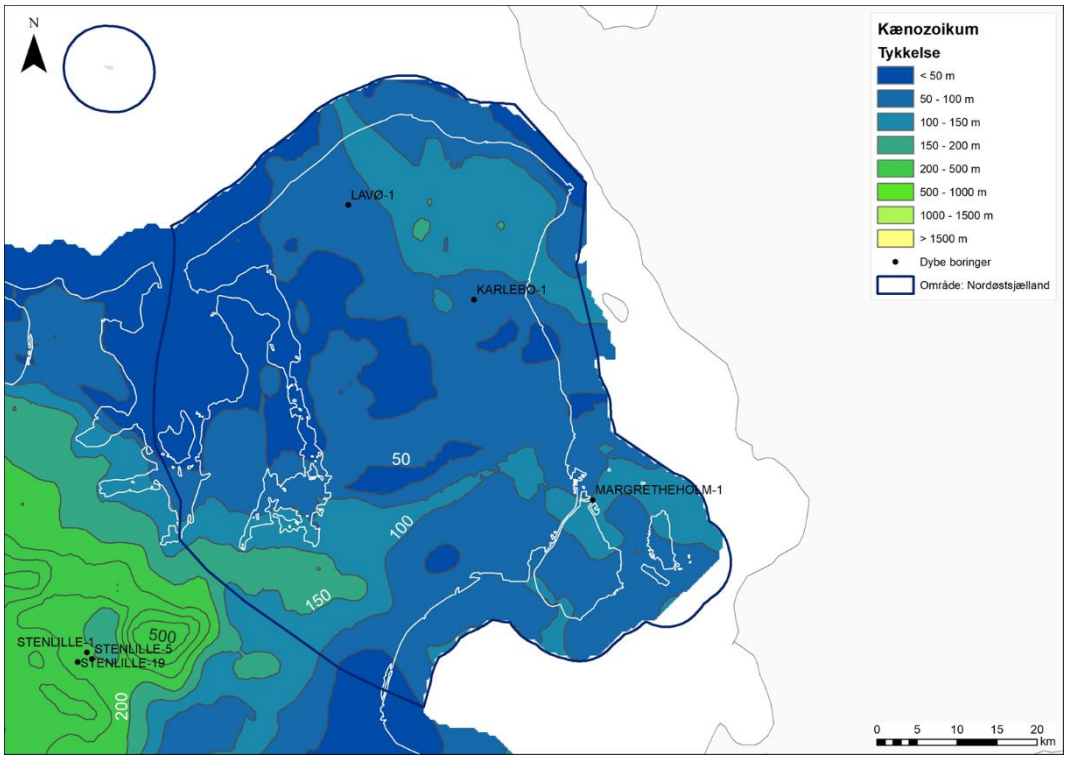
Figur 6.133. *Top Nedre Kridt dybdekort (Basis Kalkgruppen), Nordøstsjælland. Kortet viser, at basis Kalkgruppen findes i dybder fra 1000 meter til mere end 2000 meter.*



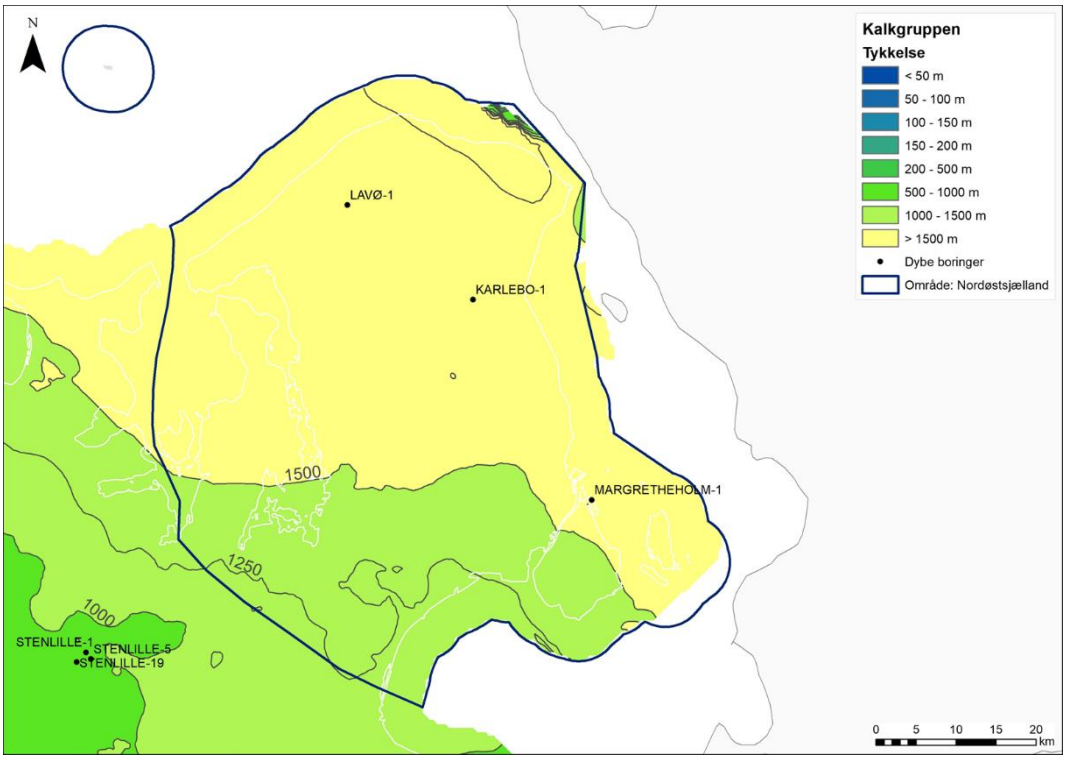
Figur 6.134. *Top Nedre Jura dybdekort, Nordsjælland.*



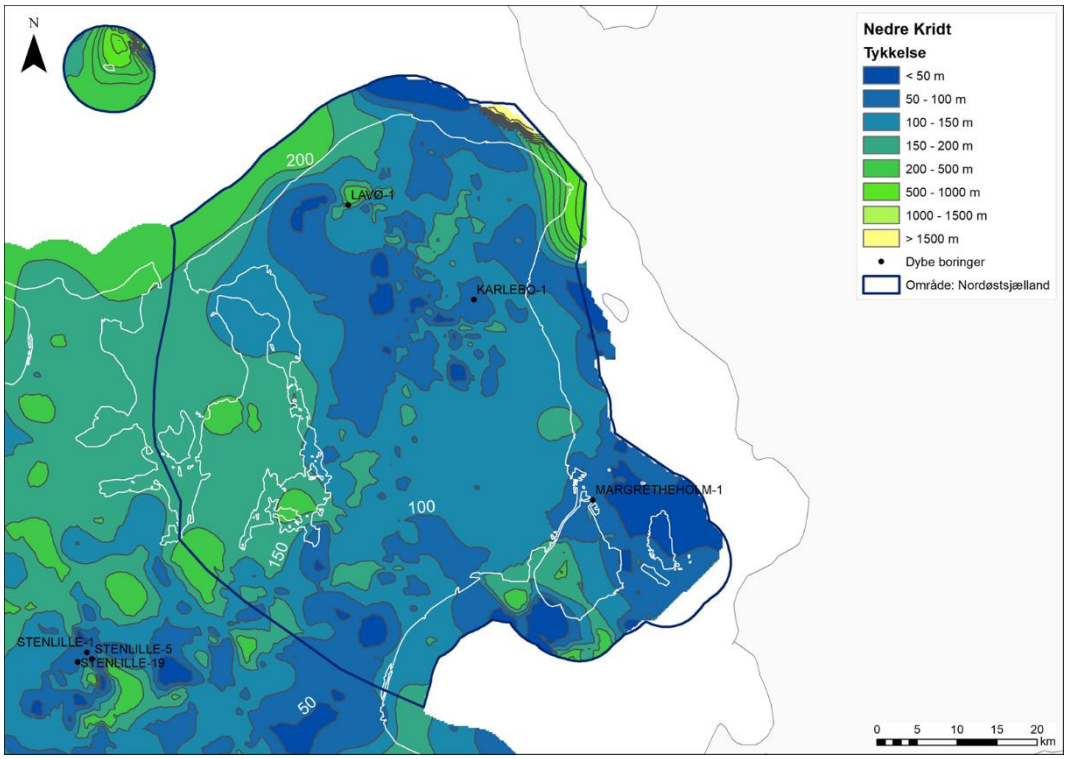
Figur 6.135. *Basis Jura dybdekort, Nordøstsjælland.*



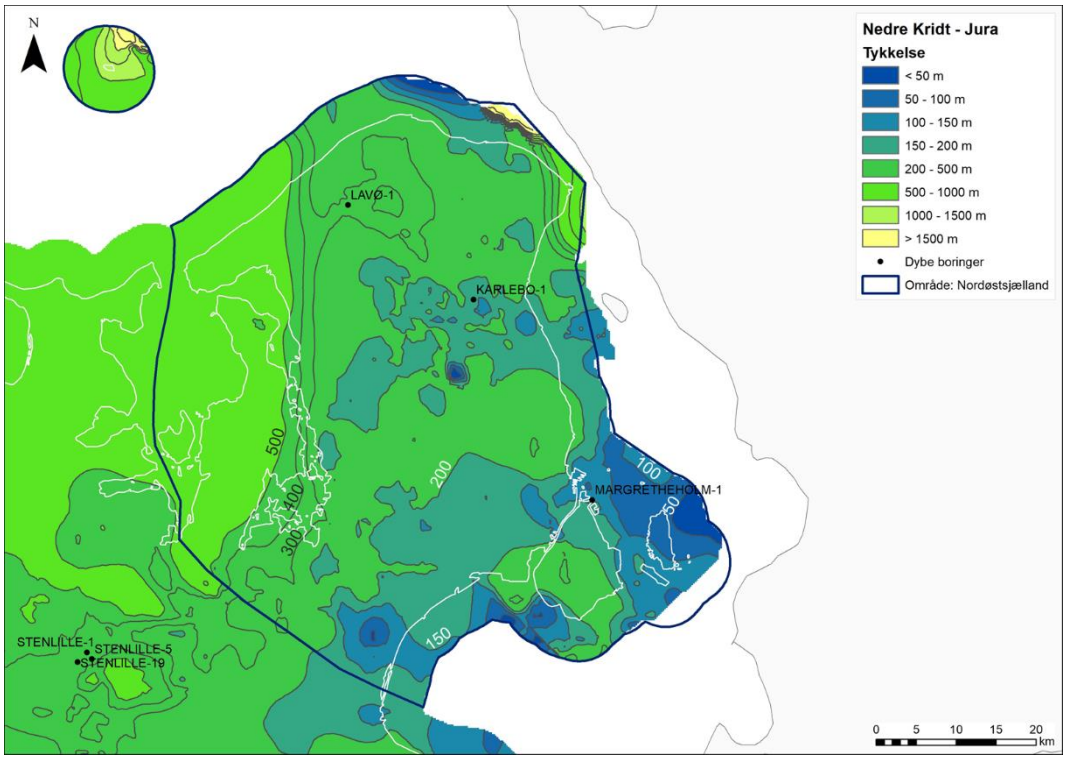
Figur 6.136. *Tykkelseskort over aflejringerne fra, Kænozoikum, Nordøstsjælland. Kortet viser, at tykkelsen varierer mellem 0 og 150 meter.*



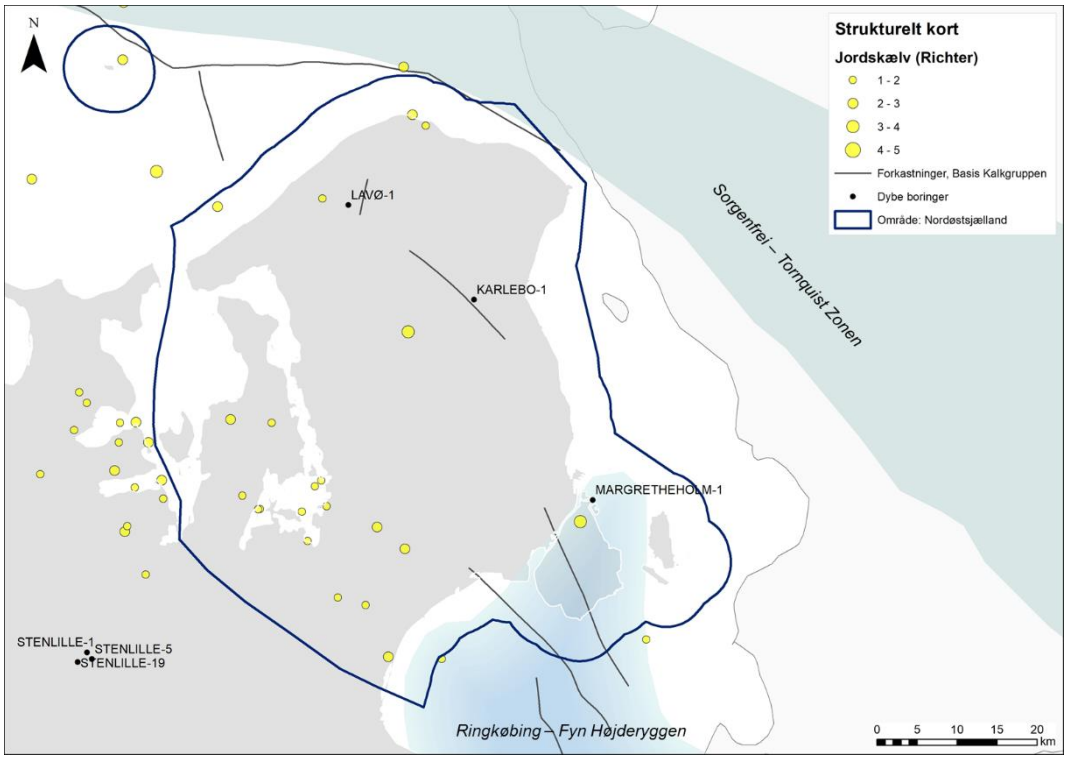
Figur 6.137. *Tykkelsen af Kalkgruppen, Nordøstsjælland. Kortet viser, at tykkelsen er 1200 meter eller mere i området.*



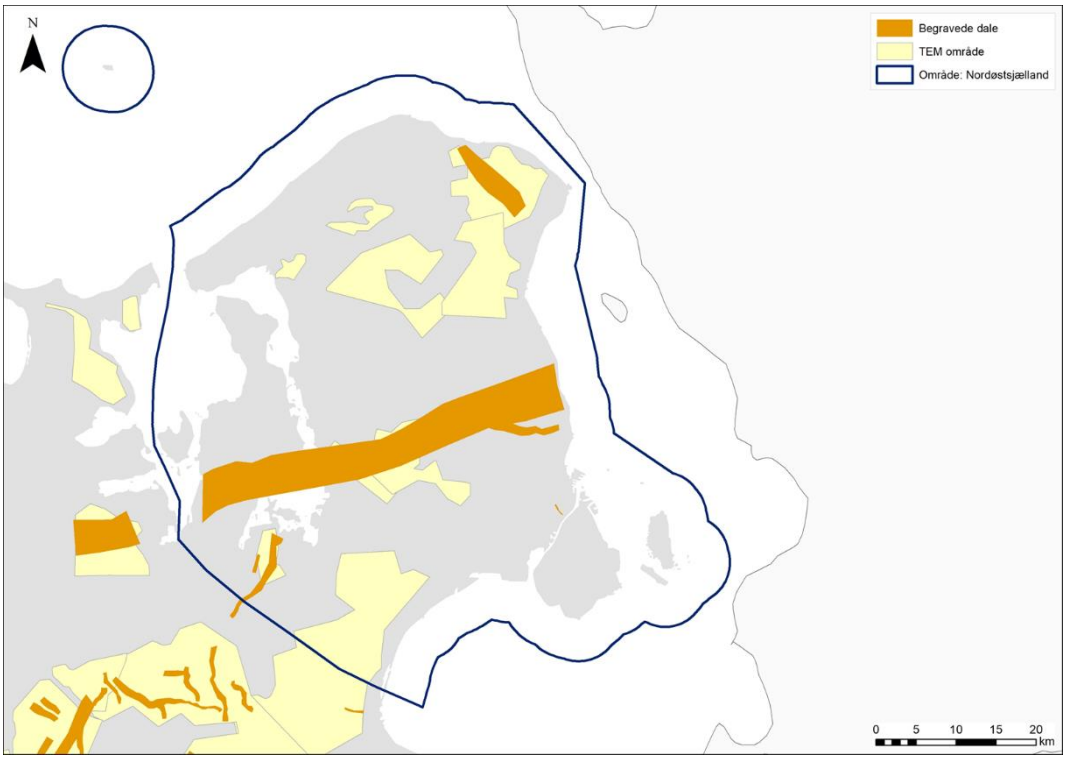
Figur 6.138. *Tykkelseskort af aflejringer fra Nedre Kridt, Nordøstsjælland.*



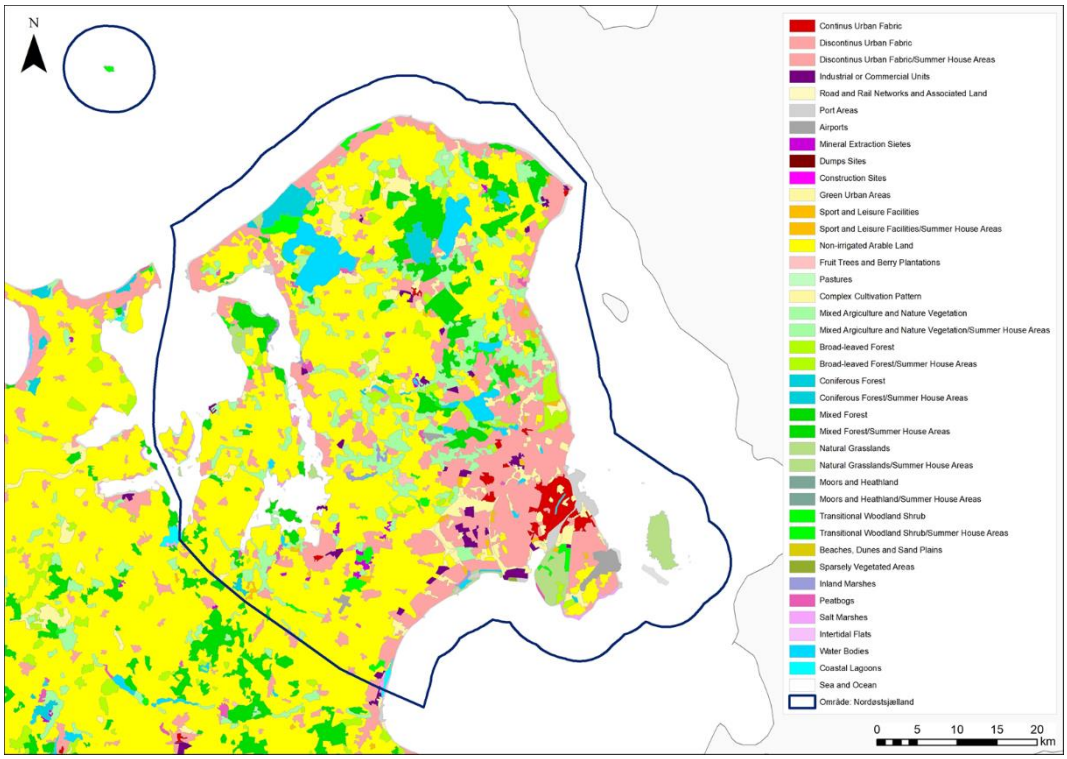
Figur 6.139. *Samlet tykkelse af Nedre Kridt og Jura aflejringerne, Nordøstsjælland.*



Figur 6.140. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Nordøstsjælland. Der ses en del jordskælv i området.*



Figur 6.141. *Kortlagte begravede dale og udbredelsen af TEM data, der danner grundlaget for kortlægningen, Nordøstsjælland.*



Figur 6.142. *Arealanvendelse, Nordøstsjælland. Større søer findes i den nordlige del af området, og fjorde i den vestlige del. (MiljøGIS, 2021).*

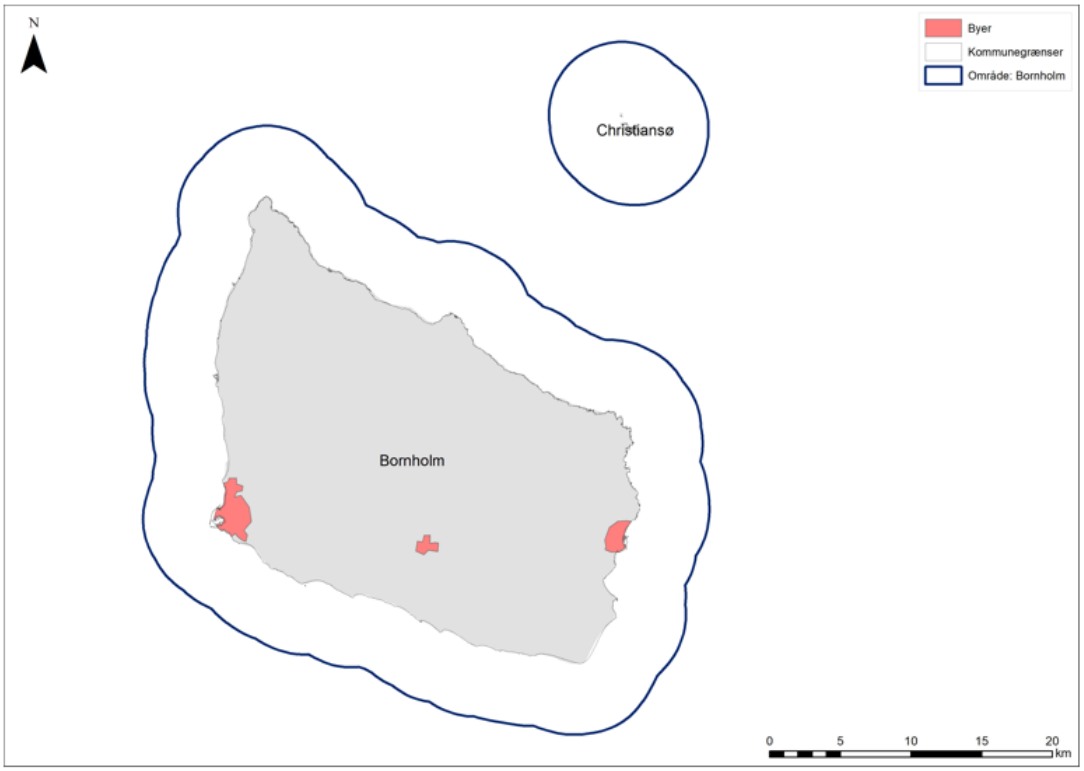
6.11 Bornholm

Krystallinsk grundfjeld af granit og gnejs findes i den centrale og nordlige del af området og udgør både værtsbjergart og barrierebjergart, da grundfjeldet findes i hele intervallet fra nær terræn til langt under 500 meter (Figur 4.27 og 4.31). Grundfjeldet som bjergart er horisontalt kontinuert i området. Lokalt forekommer større vertikale sprækker, der kan kortlægges i overfladen, og talrige mindre sprækker ses i overfladen og den terrænnære del af grundfjeldet (Figur 4.31).

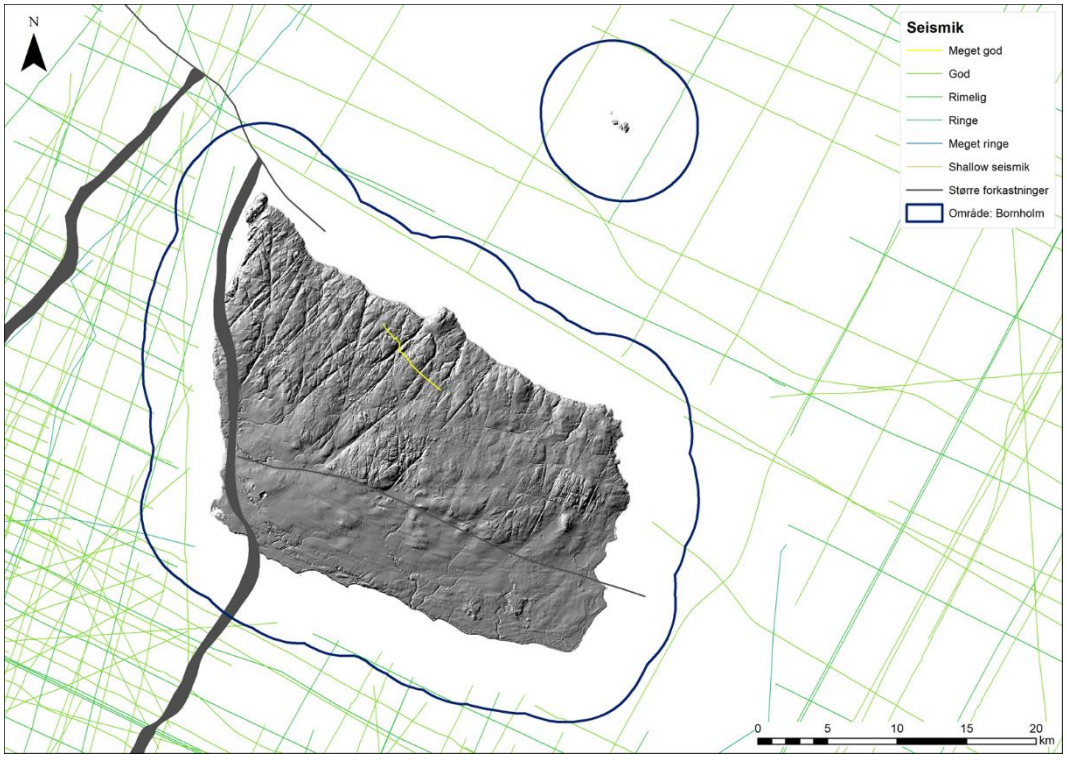
De geokemiske forhold for retardation er scoret mindre favorabel, da granit og gnejs, og deres forvitringsprodukter ikke indeholder smectit, der er kendt for at fremme retardation af radioaktive nuklider. Det er muligt, at de konstruerede barrierer i et eventuelt depot kan designes til at kompensere for dette, hvilket bør undersøges fremadrettet hvis en lokalitet i grundfjeld udvælges til detaljerede geologiske undersøgelser. Den mindre favorable score af værtsbjergartens selv-helende egenskaber (kriterium 2.3) skyldes tilstedeværelsen ikke er påvist hverken af smectit eller calcit, der begge kan udfældes i eventuelt dannede mikrofrakturer i værtsbjergarten og dermed sikre effektiviteten af de geologiske barrierer. Dette kriterium har muligvis ikke stor relevans for krystallinske bjergarter, da sandsynligheden for at et depot vil kompaktere og dermed forårsage dannelse af mikrofrakturer i de omkringliggende formationer formentlig er meget lille på grund af bjergartens store styrke. Dette kan undersøges nærmere, f.eks. baseret på erfaringer fra depoter, der er under konstruktion i grundfjeld i Sverige og Finland (SKB, 2021; POSIVA, 2021).

Tabel 6.14. *Evaluering af granit og gnejs (Prækambrium) som værtsbjergart og barrierebjergart*

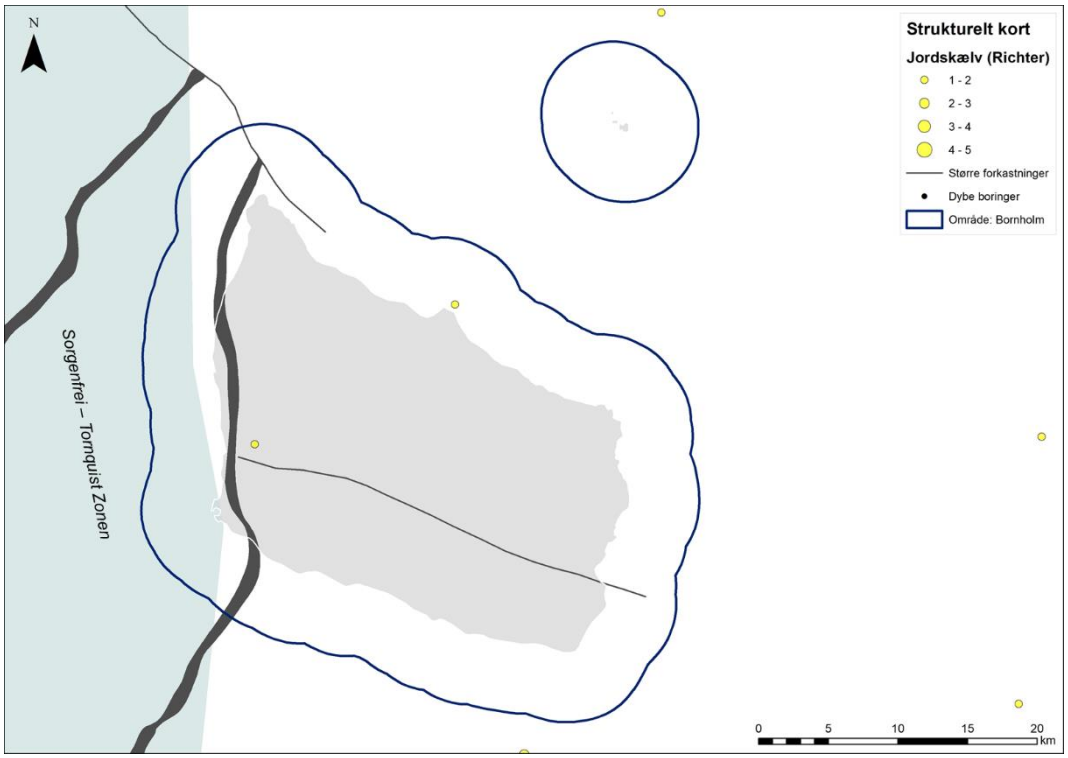
Kriteriegruppe	Kriterier	Score
1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen	1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	
	1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	
	1.3 Geokemiske forhold for retardation	
	1.4 Strømningsveje	
2. Naturlig stabilitet	2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	
	2.2 Erosion	
	2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	
3. Geoteknisk gennemførlighed	3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	
	3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	
4. Pålidelighed af nye geologiske data	4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	
	4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	
	4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	



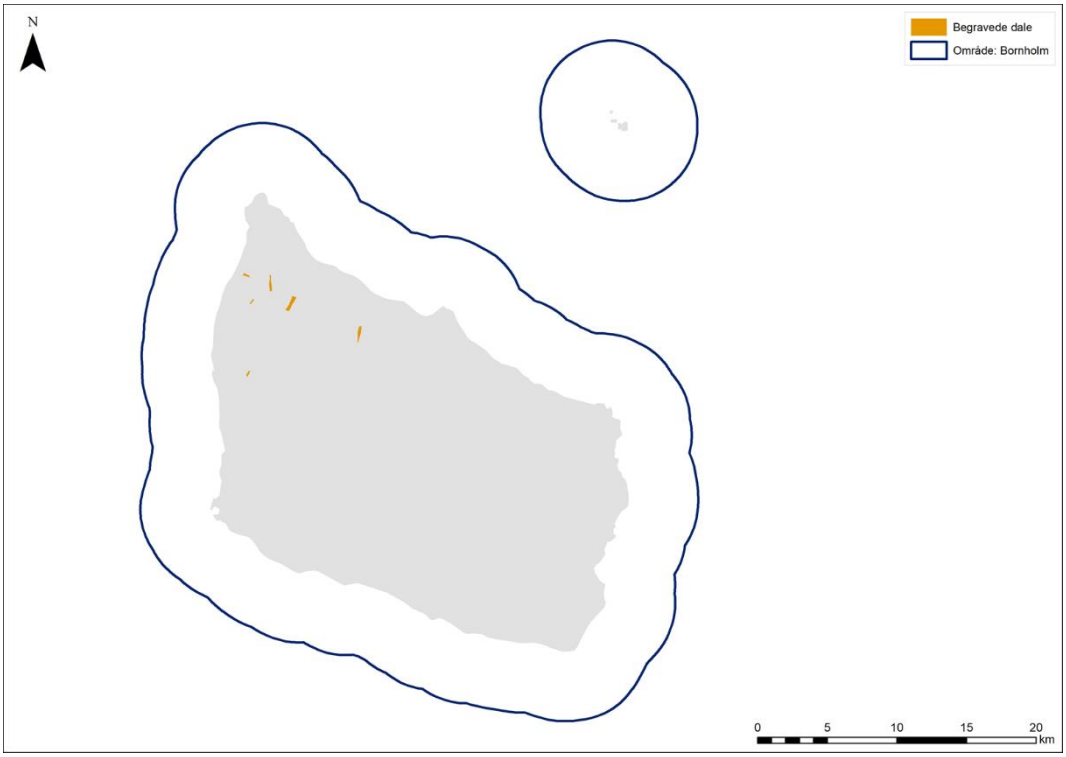
Figur 6.143. *Området Bornholm med større byer vist.*



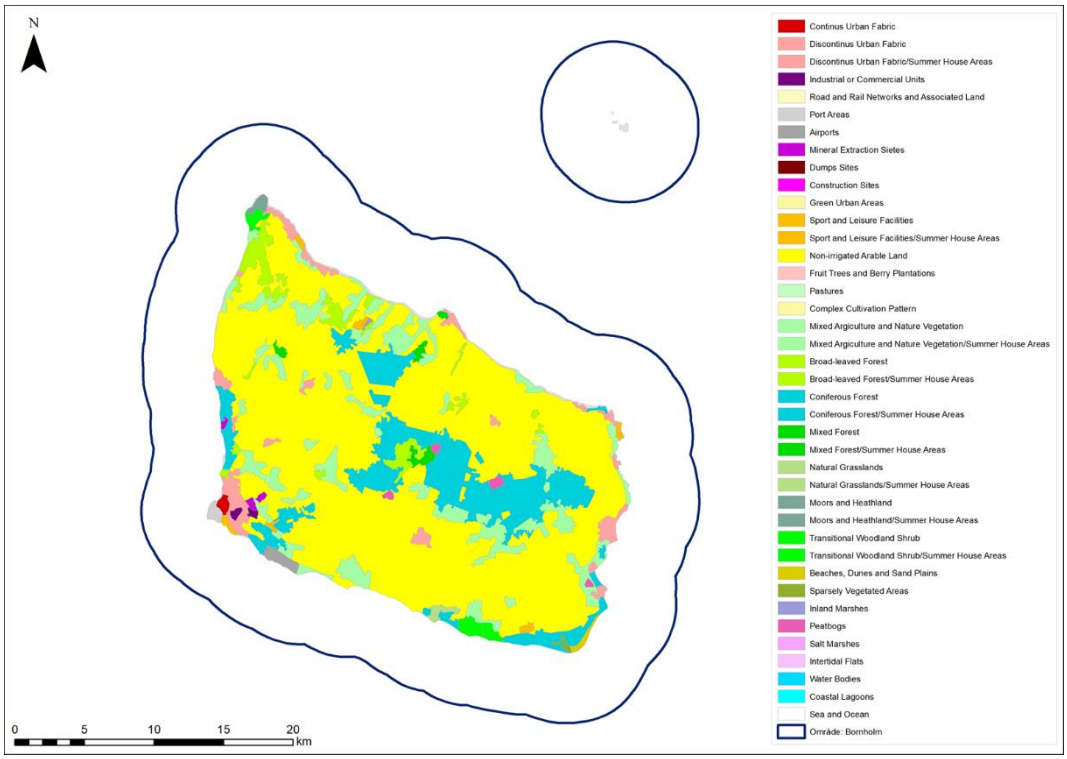
Figur 6.144. *Oversigt over seismiske linjer og deres kvalitet, Bornholm. Kortet viser overfladetopografien på Bornholm og de mange sprækkesystemer, der særligt findes i grundfjeldet i øens centrale og nordlige områder.*



Figur 6.145. *Jordskælv registreret inden for de seneste 50 år er plottet på kort over strukturelle elementer, Bornholm. Meget få jordskælv er registreret.*



Figur 6.146. *Kortet over begravede kvartære dale på Bornholm viser, at kun få dale er kortlagt. Der er ingen TEM data.*

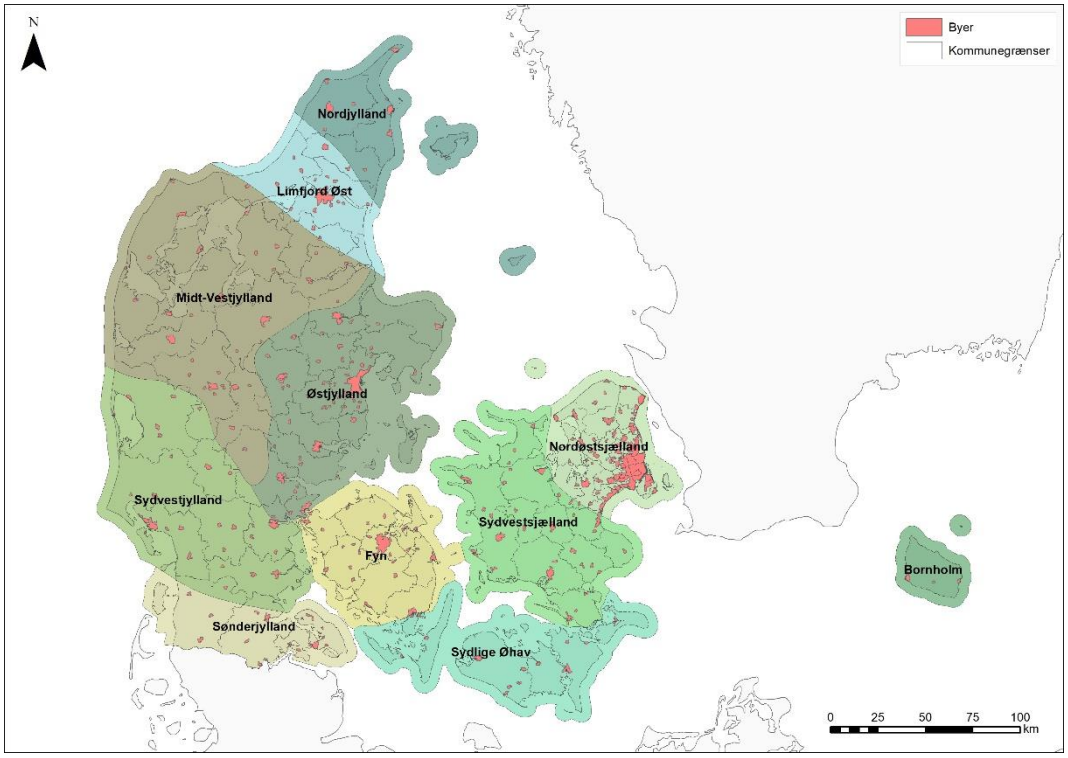


Figur 6.147. *Arealanvendelse, Bornholm. (MiljøGIS, 2021).*

7. Opsummering af områdeevalueringerne

De geologiske egenskaber af den danske undergrund i dybder ned til 500 meter er evalueret for 11 geologisk set forskellige områder (Figur 7.1) baseret på eksisterende data og generel geologisk viden. De 11 områder dækker samlet hele Danmark. Den detaljerede viden om de geologiske egenskaber i dybder omkring 500 meter i den danske undergrund er for mange parametre meget begrænset, og for nogle områder er der ingen data. Evalueringen, der afslutter første fase af det geologiske slutdepotprojekt, er derfor kvalitativ.

Evalueringen udgør det geologiske grundlag for at udvælge to lokaliteter til detaljerede geologiske undersøgelser i projektets næste fase, og den er foretaget som en evaluering af en række konkrete geologiske kriterier, der ønskes opfyldt for etablering, drift og sikring af et endeligt slutdepot. Formålet med de detaljerede undersøgelser i projektets næste fase er at indsamle specifikke data i området med henblik på at vurdere mulighederne for at etablere et geologisk slutdepot for det danske radioaktive affald i en dybde omkring 500 meter. Det overordnede formål med det geologiske slutdepotprojekt er at identificere områder, hvor de geologiske egenskaber og forhold kan bidrage til, at radioaktive nuklider tilbageholdes dybt i undergrunden. Det er således ikke hensigten at identificere "det bedste område", hvilket ikke er muligt på grund af de mange forskellige faktorer, der har indflydelse på sikkerheden på kort og lang sigt, herunder depotkoncept og -design, der er i en indledende fase med generiske konceptovervejelser (Dansk Dekommissionering, 2021).



Figur 7.1. *Oversigtskort der viser udbredelsen af de (geologiske) områder, der er evalueret.*

I Tabel 7.1 er vist en oversigt over resultatet af evalueringen af de geologiske kriterier for hvert område. Oversigten viser, at de fleste geologiske egenskaber og forhold er overvejende favorable eller forventes at være favorable i forhold til at kunne etablere et slutdepot i omkring 500 meters dybde (grønne og gule scorer i Tabel 7.1). De mange kriterier, der scorer gul, afspejler i høj grad den begrænsede mængde af detaljerede data, der findes for dybder omkring 500 meter. I områder, hvor kriterium 1.1 scorer gul eller grøn, vurderes det, at der generelt er gode muligheder for at vælge lokaliteter til detaljerede geologiske undersøgelser, og hvor nye data kan forventes at bekræfte, at favorable geologiske egenskaber og forhold for kriterium 1.1 er til stede. De grønne og gule scorer af kriterier i gruppe 4 viser, at der generelt forventes at være gode muligheder for at indsamle nye data af høj kvalitet i projektets næste fase. Data, som kan bidrage til en detaljeret geologisk karakterisering af undergrunden på specifikke lokaliteter.

Tabel 7.1 *Oversigt over scoringen af kriterier i områderne (samme rækkefølge som beskrivelsen i rapporten). Der er i teksten givet en kort forklaring til hvorfor nogle kriterier scorer orange (med reference til nummeret i tabellen).*

	Nordjylland	Nordjylland	Limfjord Øst	Limfjord Øst	Midt-Vestjylland	Østjylland	Sydvestjylland	Sønderjylland	Fyn	Sydlige Østhav	Sydlige Østhav	Sydvestsjælland	Nordøstsjælland	Bornholm
Kriterier	Kalk	Ler	Kalk	Ler	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Ler	Kalk	Kalk	Granit
1.1 Rumlig udbredelse	1)	2)		4)	6)		8)	9)			10)			
1.2 Hydraulisk barriere-effektivitet														
1.3 Geokemiske forhold for retardation														13)
1.4 Strømningsveje		3)		5)							11)			
2.1 Stabilitet i området og af bja. egenskaber					7)								12)	
2.2 Erosion														
2.3 Selv-helende egenskaber for frakturer														14)
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold														
3.2 Adgangsforhold og drænering af vand														
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering														
4.2 Potentiale kortlægning af log/diskontinuiteter														
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i omr.														

Kommentarer til kriterier der er scoret mindre favorable

Tabel 7.1 viser, at der i flere områder er et eller flere kriterier, der scorer orange, hvilket betyder, at de geologiske egenskaber generelt ikke er favorable i forhold til at opfylde de definerede kriterier. Herunder er givet en kort beskrivelse af årsagen til den mindre favorable score for hvert af de i alt 14 kriterier, der er scoret orange. For illustration af konceptet med værtsbjergart og barrierebjergart i den geologiske lagserie henvises til Figur 2.3 og 5.1.

1. I Nordjylland er kalken i barriezonen generelt 0 til 200 meter tyk, kriteriet om en barrierebjergart med tykkelse på 250 meter og en værtsbjergart med en tykkelse på 100 meter er således generelt ikke opfyldt i området, hvis kalk skal udgøre værtsbjergarten. Dette resulterer i, at kriterium 1.1 scorer mindre favorabel. I områdets sydligste del kan kalken lokalt være 250 meter tyk og udgøre en barriere i intervallet over værtsbjergarten.

2. I Nordjylland er værtsbjergarten lersten ikke påvist at være homogen med en tykkelse på mindst 100 meter, da Nedre Kridt intervallet indeholder talrige sandlag. Kriteriet om mindst 100 meter værtsbjergart er således ikke opfyldt. Kalksten i barrierezonen varierer i tykkelse fra 0 til 200 meter, og opfylder ikke kriteriet om 250 meter barrierebjergart. Kriterium 1.1 om den rumlige udbredelse er derfor scoret mindre favorabel.

3. I Nordjylland kan sandlag udgøre strømningsveje - både i intervallet med værtsbjergarten og i de formationer, der ligger umiddelbart under 500 meter, dvs. umiddelbart under et evt. dybt depot. Sandlag er observeret i både Kridt og Jura lagserierne.

4. I Limfjord Øst området er værtsbjergarten lersten ikke påvist med en tykkelse på mindst 100 meter, og Nedre Kridt intervallet indeholder talrige sandlag. Værtsbjergarten lersten opfylder derfor ikke kriteriet om mindst 100 meter homogen lersten, hvorfor kriterium 1.1 er scoret mindre favorabelt. Den horisontale kontinuitet af både værts- og barrierebjergarten er begrænset pga. mange forkastninger, hvilket også resulterer i, at kriterium 1.1 scorer mindre favorabelt. Det er således både manglende homogenitet og manglende horisontal kontinuitet, der er mindre favorabelt for lersten som værtsbjergart i Limfjord Øst.

5. I Limfjord Øst området indeholder lagserien mange sandlag, der kan fungere som strømningsveje, både i Nedre Kridt intervallet med værtsbjergarten og de underliggende jurassiske sedimenter i dybder ned til 800 meter. Kriterium 1.4 scorer derfor mindre favorabel.

6. I Midt-Vestjylland er tykkelsen af kalksten i barrierezonen mellem 0 og 200 meter, og kalksten opfylder dermed ikke kriteriet om mindst 250 meter barrierebjergart for kriterium 1.1. Toppen af Kalkgruppen findes generelt i dybder mellem 300 og 500 meter, og den samlede tykkelse af kalken er 500-1000 meter. Hvis et depot placeres i dybder på mere end 500 meter, kan den samlede tykkelse af kalksten som værts- og barrierebjergart udgøre de nødvendige mægtigheder.

7. I Midt-Vestjylland er der mange saltstrukturer, hvoraf nogle muligvis er aktive eller kan re-aktiveres og resultere i bevægelse langs forkastninger i undergrunden. Der er registreret en del jordskælv, også i farvandet mod vest, som viser, at der har været bevægelse ved nogle forkastninger i nyere tid. Den naturlige stabilitet i området er derfor scoret mindre favorabel for kriterium 2.1, selv om der muligvis kan kortlægges mindre områder uden forkastninger og dermed med lille risiko for jordskælv.

8. I Sydvest-Jylland er tykkelsen af kalksten i barriezonen mellem 0 og 200 meter, og den opfylder dermed ikke kriteriet om en tykkelse på mindst 250 meter for barrierebjergarten (kriterium 1.1). Toppen af Kalkgruppen findes generelt i dybder mellem 300 og 500 meter, og den samlede tykkelse af kalken er 500-1000 meter. Hvis et depot placeres i dybder på mere end 500 meter, kan den samlede tykkelse af kalksten som værts- og barrierebjergart udgøre de nødvendige mægtigheder.

9. I Sønderjylland er tykkelsen af kalksten i barriezonen mellem 0 og 200 meter og opfylder dermed ikke kriteriet om en tykkelse på mindst 250 meter under (kriterium 1.1). Den horisontale kontinuitet er begrænset på grund af mange forkastninger og opfylder generelt ikke kriteriet om horisontal kontinuitet under kriterium 1.1.

10. I det Sydlige Øhav er værtsbjergarten lersten ikke påvist med en tykkelse på mindst 100 meter. Lersten findes vekslende med lag af silt og sand i Nedre Kridt og Jura intervallerne, så lerstenen er ikke litologisk homogen, hverken vertikalt eller horisontalt, hvorfor kriterium 1.1 er scoret mindre favorabel.

11. I det Sydlige Øhav findes sandlag, der kan fungere som strømningsveje i værtsbjergarten lersten. Strømningsveje findes også i sandsten i den underliggende Gassum Formation, der har en gradvis overgang til Jura intervallet. Denne overgang er derfor vanskelig at kortlægge præcist med seismiske data (giver usikkerhed på dybden til sandet). Kriterium 1.4 om strømningsveje scorer derfor mindre favorabel.

12. I Nordøstsjælland er kriterium 2.1 om naturlig stabilitet i store dele af området scoret mindre favorabel på grund af mange registrerede jordskælv og forekomsten af forkastninger, der ses at fortsætte deres udbredelse til nær terrænoverfladen. Hvis disse forkastninger aktiveres, kan forkastningsplanerne fungere som (midlertidige) strømningsveje igennem de geologiske barrierer. I tilfælde af at det overvejes at etablere et dybt sludepot i området, bør de mulige påvirkninger af undergrunden ved jordskælv vurderes, så en konstruktion kan designes til at modstå eventuelle påvirkninger, hvis nødvendigt.

13. På Bornholm er kriterium 1.3 om de geokemiske forhold for retardation scoret mindre favorable, da de krystallinske bjergarter granit og gnejs ikke indeholder lermineraler i form af smectit. Til gengæld er matrix-permeabiliteten i de uforvitrede bjergarter ekstremt lille, hvorfor de geokemiske forhold for retardation i krystallinske bjergarter formodentlig er mindre vigtige for den samlede barriereeffektivitet end i sedimentære bjergarter.

14. På Bornholm er kriterium 2.3 om de geokemiske selv-helende egenskaber scoret mindre favorabel, da de krystallinske bjergarter granit og gnejs, og deres forvitringsprodukter, ikke indeholder smectit eller calcit, der kan ”hele” mikrofrakturer. Det forventes dog ikke, at affaldet i et dybt depot vil kunne påvirke værts- eller barrierebjergarten af granit og gnejs til at danne mikrofrakturer, hvorfor dette kriterium er mindre relevant for lokaliteter i grundfjeld.

Overvejelser ved udvælgelsen af de specifikke undersøgelseslokaliteter til fase 2

Områdekarakteriseringen og evalueringen udgør det geologiske grundlag for at udvælge to undersøgelseslokaliteter igennem en dialogproces med kommunerne, der varetages af Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (UFS). I denne proces vil andre kriterier end de rent geologiske blive adresseret.

Når de specifikke undersøgelseslokaliteter og deres arealmæssige udstrækning skal besluttes, er det vigtigt at genbesøge det seismiske projekt med data og tolkning i det relevante

detailområde for at vurdere, om det indeholder yderligere relevant information om forhold i undergrunden. Der kan evt. være behov for forundersøgelser med henblik på at sikre, at der ikke er større diskontinuiteter i detailområdet som f.eks. forkastninger, eller dybe begravede dale, hvis der er stor afstand mellem de eksisterende seismiske linjer.

Ved udvælgelsen af de to undersøgelseslokaliteter er det nødvendigt at kende de mere specifikke geologiske krav og kriterier relateret til depotkonceptet. Denne viden skal sikre, at det samlede kortlagte volumen af værtsbjergart og barrierebjergart har den nødvendige størrelse, både hvad angår tykkelse og horisontal udbredelse. Kravene skal inkludere volumen af værtsbjergart, der er nødvendig for deponering af affaldet samt volumen af den overliggende barrierebjergart, der skal anvendes til konstruktion af skakte, tunneller eller afbøjede borehuller, der skal give adgang til at placere affaldet i det dybe depot. Identificering af et depotkoncept er også vigtigt, for at sikre at relevante og nødvendige data bliver indsamlet som en del programmet for de detaljerede geologiske undersøgelser.

På lokaliteter, der udvælges til detailundersøgelser, skal både værts- og barrierebjergarten kunne forventes at være homogen og lateralt udbredt over flere kilometer (minimum 5x5 kilometer) afhængig af depotkonceptet. Dette for at sikre at:

- Der er fleksibilitet indenfor lokaliteten mht. den eventuelle endelige placering af et slutdepot, i tilfælde af at de detaljerede geologiske undersøgelser identificerer betydelige diskontinuiteter i undergrunden.
- Positionen af forkastninger identificeret på en seismiske linje er ofte relativt upræcis, hvor skæringen af forkastningen kan afvige med op til 1 kilometer og udbredelsen/forløbet af forkastningsplanet kan være betydeligt større, hvis der er stor afstand mellem de seismiske linjer. Hvis der er identificeret større forkastninger i udkanten af lokaliteten, er det vigtigt at erkende denne usikkerhed, så man kan afgrænse et område uden forkastninger og derved undgå at gennembore en forkastning under de detaljerede undersøgelser på lokaliteten.
- De dybe boringer skal udføres i udkanten af undersøgelseslokaliteten for ikke at kompromittere de geologiske barrierer i den centrale del af området, hvor et depot evt. skal kunne etableres. Det er derfor vigtigt, at de dybe huller bliver boret igennem geologiske lagserier, hvor egenskaberne af både værts- og barrierebjergarten kan forventes at være identiske med (repræsentative for) egenskaberne i den centrale del af lokaliteten.

Afsluttende kommentarer til udvælgelse af undersøgelseslokaliteter

Formålet med nærværende geologiske slutdepotprojekt er at kortlægge undergrunden i dybder ned til 500 meter med henblik på at identificere egnede områder for dyb geologiske slutdeponering af det radioaktive affald. Resultaterne af den afsluttede fase 1 viser, at der er store områder i Danmark, der vil være egnede til udvælgelse af lokaliteter, hvor detaljerede geologiske undersøgelser kan udføres som en del af projektets næste fase. I disse områder forventes det, at favorable geologiske egenskaber, som opfylder de krav, der er givet i B90 (Folketinget 2018) og de generelle internationale retningslinjer, kan påvises ved yderligere undersøgelser.

Hvis undersøgelseslokaliteter skal udvælges i områder, hvor den horisontale kontinuitet (egenskab for kriterium 1.1) og naturlig stabilitet (kriterium 2.1) er mindre favorabel, vil det være nødvendigt med yderligere tidskrævende detailundersøgelser for at identificere lokaliteter til detaljerede geologiske undersøgelser, hvor favorable egenskaber kan forventes. I disse områder vil der være en sandsynlighed for, at de nødvendige geologiske egenskaber ikke vil blive påvist ved de geologiske detailundersøgelser på en specifik lokalitet.

I områder, hvor der er identificeret mulige strømningsveje i form af sandlag i den geologiske lagserie i dybder omkring 500 meter (kriterium 1.4 scorer mindre favorabel), vil det være vanskeligt at identificere lokaliteter uden sandlag, da lagene på grund af deres ringe tykkelser og fysiske egenskaber ikke kan identificeres og kortlægges seismisk. Tilstedeværelsen af strømningsveje i sandlag udgør derfor en risiko i disse områder. Tilstedeværelsen af tynde sandlag kan undersøges ved boringer, som dog er en både ressource- og tidskrævende metode. Betydningen af sandlag og deres geometri for lækage fra et slutdepot til biosfæren kan kvalificeres yderligere ved anvendelse af 2D og 3D stoftransportmodeller i projektets fase 2.

Hvis der ønskes detaljerede geologiske undersøgelser af en lokalitet i et område, hvor kalken i barrierezonen ikke har en tykkelse omkring 250 meter eller mere, kan det indledningsvist undersøges med konceptuel 3D modellering, om det er muligt, at kombinationen af lav permeabilitet og geokemisk retardation kan forventes at bidrage med den nødvendige barriereeffektivitet. Derudover kan det overvejes, om det er muligt at deponere affaldet dybere end 500 meter, hvilket kan give mulighed for en tykkere kalkpakke i barrierezonen, hvis Kalkgruppens udbredelse fortsætter til store dybder.

De geologiske kriterier, der er evalueret for dette projekt, er defineret ud fra antagelsen om, at alt det radioaktive affald skal deponeres samlet i et dybt depot for at sikre, at de geologiske egenskaber og forhold på lokaliteterne, der skal undersøges i fase 2, er egnede for alle koncepter. Et specifikt designkoncept for et dybt geologisk slutdepot er ikke besluttet af DD, men en række konceptuelle design er identificeret (Dansk Dekommissionering 2021). De mulige koncepter spænder fra et dybt, vertikalt borehul til deponering af en mindre del af affaldet (det særlige affald) kombineret med et depot på lavere dybde til det øvrige affald, til en underjordisk konstruktion med et depot i 500 meters dybde, der kan indeholde alt det radioaktive affald. Det endelige koncept vil afhænge af både undergrundens geologiske forhold og mængden af affald, hvor løsningen bør afspejle affaldets karakter (Blechschmidt et al., 2021, Appendix B). Inden de detaljerede geologiske undersøgelser af to lokaliteter sættes i gang, vil det være nødvendigt at kende det foreløbige depotkoncept, for at sikre at de relevante og nødvendige data bliver indsamlet.

Det er muligt, at nogle geologiske egenskaber, der scorer mindre favorabelt (orange) for deponering i 500 meters dybde, kan være egnede til andre løsninger for dyb slutdeponering som for eksempel en (dybere) borehulsløsning for det særlige affald. I nogle områder vil deponering på større dybde end 500 meter give mulighed for at mindst 250 meter barrierebjergart er til stede i barrierezonen over toppen af værtsbjergarten. Dette kunne være en mulighed, hvis deponering sker i et borehul. Hvis et samlet depot for al affaldet skal placeres på større dybde end 500 meter, vil projektet geoteknisk set blive mere kompliceret, ikke mindst hvis intervallet 0 til 500 meter er domineret af vekslende sand- og lerlag.

De geologiske undersøgelser af to lokaliteter i projektets næste fase skal bidrage med detaljeret viden og data om undergrundens egenskaber. De indsamlede data og analyser vil på et senere tidspunkt indgå i en sikkerhedsvurdering af det samlede koncept for dyb geologisk slutdeponering for at undersøge, om de designede barrierer og de geologiske barrierer tilsammen kan forventes at levere den nødvendige sikkerhed på kort og lang sigt. For nogle geologiske egenskaber og parametre er det muligt, at mindre favorable egenskaber kan opvejes af depotkonceptet og de konstruerede barrierer. For andre kritiske egenskaber kan den mulige konklusion af de detaljerede undersøgelser blive, at lokaliteten ikke kan bidrage med de nødvendige egenskaber for sikker geologiske deponering.

8. Referencer

ANDRA, 2005: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. The geological medium: the Meuse/Haute-Mare site. Dossier 2005 Argile, 57-105.

Blechschmidt, I., Frieg, B., Vomvoris, S., Turner, J. & Tweed, C. 2021: Geological siting project on disposal of the Danish radioactive waste. Review of: Phase 1, report no. 8. Criteria and requirements for identification of suitable disposal sites 17pp.

COVRA, 2017: Opera Safety Case. Covra, 146 pp.

Dansk Dekommissionering, 2021: Generiske depotkoncepter – indledende overvejelser. Notat 6 sider. https://dekom.dk/publikationer/

EU, 2011: Rådets Direktiv 2011/70/EURATOM af 19. juli 2011 om fastsættelse af en fællesramme for ansvarlig og sikker håndtering af brugt nukleart brændsel og radioaktivt affald, L 199, 48-56.

Folketinget, 2018: Beslutningsforslag nr. B 90: Forslag til folketingsbeslutning om en langsigtet løsning for Danmarks radioaktive affald, 11 pp.

Gravesen, P., 2016: De geologiske forhold i ca. 500 m´s dybde. Foreløbig redegørelse udarbejdet på eksisterende data. GEUS-NOTAT nr. 05-VA-16-08. Til: Uddannelses- og Forskningsministeriet V/ Merete Storr-Hansen og Ole Kastbjerg Nielsen, 24 pp.

Graversen, G. & Holm, P. M., 2011: Bornholm – Skåne regionens Tektoniske udvikling. Geoviden Geologi og Geografi Nr. 1, 2011, s. 2-7.

IAEA, 2011: Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide No. SSG-14, 101 pp.

IAEA, 2018a: Roadmap for Developing a Geological Disposal Programme, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES; Draft, 83 pp.

IAEA, 2018b: The Management of Site Investigations for Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES; Draft, 263 pp.

Kristensen, L., Hjuler, M. L., Frykman, P., Olivarius, M., Weibel, R., Nielsen, L. H. & Mathiesen, A. (2016): Pre-drilling assessment of average porosity and permeability in the geothermal reservoirs of the Danish area, Geothermal Energy 4:6, 1–27.DOI 10.1186/s40517-016-0048-6.

NAGRA, 2017: Technical Reports. www.nagra.ch/en/cat/publikationen. (Switzerland).

NEA (Nuclear Energy Agency, OECD), 2005: Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks, No. 4436, 71 pp.

NEA, 2008: Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive waste. A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC). OECD, NEA No. 6433, 21 pp.

NEA, 2012: Geological Disposal of Radioactive Wastes: National Commitment, Local and Regional Involvement. A collective Statement of the OECD Nuclear Energy Agency" Radioactive Waste Management Committee", Adopted March 2011, NEA/RWM (2011)16, 17 pp.

MiljøGIS, 2021: MiljøGIS portalen, Miljøstyrelsen. https://mst.dk/service/miljoegis/

Mortensen, J., Engstrøm, F. & Lind, I., 1998: The relation among porosity, permeability, and specific surface of chalk from the Gorm field, Danish North Sea. SPE 31062, SPE Reservoir Evaluation & Engineering 1, 245-251.

Nielsen, L.H., 2003: Late Triassic – Jurassic development of the Danish Basin and the Fennoscandian Border Zone, Southern Scandinavia. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 439-458.

Nielsen, L., Boldreel, L. O., Hansen, T.M., Lykke-Andersen, H., Stemmerik, L., Surlyk, F., Thybo, H., 2011: Integrated seismic analysis of the Chalk Group in eastern Denmark — Implications for estimates of maximum palaeo-burial in southwest Scandinavia. Tectono-physics, v. 511, No. 1-2, 17.10.2011, 14-26.

Norris, 2012: An introduction to geosphere research studies for the UK geological disposal program. Mineralogical Magazine vol.76 (8), 3105-3114.

Olsen, D. & Jørgensen, M. 2008: Conventional core analysis data from 10 Danish onshore wells. Wells Børglum-1, Fjerritslev-2, Frederikshavn-2, Gassum-1, Haldager-1, Horsens-1, Mors-1, Rødby-1, Skagen-2, Vedsted-2. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2008/62, 8 p.

ONDRAF/NIRAS & ANDRA (eds.) 2015: Clays in geological disposal systems. Brochure published on occasion of the 6th international conference “Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements”, Brussels, Belgium, 8 pages. (Belgium).

POSIVA, 2017a: Final Disposal. Selecting the Site: The Final Disposal at Olkiluoto. www.posiva.fi/en/final_Disposal. (Finland).

POSIVA, 2017b: Geologic disposal of spent nuclear fuel in Olkiluoto, 12 pp.

POSIVA 2021: https://www.posiva.fi/en/index/finaldisposal.html

Rasmussen, E. S., Dybkjær, K., and Piasecki, S. 2010: Lithostratigraphy of the Upper Oligocene-Miocene succession of Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 22, 92 pages + appendices.

RWM, 2020: Site evaluation. How will we evaluate sites in England. Radioactive Waste Management. RWM - Site Evaluation - How we will evaluate sites in England (publishing.service.gov.uk)

SFOE, 2008: Sectoral plan for deep geological repositories. Conceptual Part. Department of the Environment, Transport, Energy and Communications DETEC. Swiss Federal Office of Energy SFOE, 89 pages.

SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB), 2007: RD&D Programme 2007. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, 510 pp.

SKB, 2021: https://www.skb.com

Tucker, M.E. 2001: Sedimentary Petrology. 3rd Ed. Blackwell Science, Oxford., 262 p.

UFM, 2021: Ansvars- og rollefordeling for lokalisering af områder til geologiske undersøgelser vedrørende et slutdepot for radioaktivt affald. Uddannelses- of Forskningsstyrelsen, notat 2 pp.

VARV, 1977: Geologi på Bornholm. Varv ekskursionsfører nr. 1, 96 pages.

8.1 Rapporter fra projektet om dybt geologisk slutdepot

Titel på rapportserien:

Studies of geological properties and conditions for deep disposal of radioactive waste, Denmark

1. Requirements and criteria for initial evaluation of geological properties and conditions (Midtgaard, H.H., Hjelm, L., Jakobsen, R., Karan, S., Kjøller, C., Nilsson, B. & Poulsen, M.L.K.). GEUS Report no. 2021/52 51 pp.

2. Geological setting and structural framework of Danish onshore areas (Gravesen, P., Pedersen, S. A. S. & Midtgaard, H. H.). GEUS Report no. 2021/53, 72 pp.

3. Upper Cretaceous chalk and Paleocene limestone distribution and properties (Jakobsen, P.R., Frykman, P. & Jakobsen, R.) GEUS Report no. 2021/54, 76 pp.

4. Jurassic and Lower Cretaceous claystone distribution, sedimentology, and properties (Pedersen, G. K, Lauridsen, B., Sheldon, E. & Midtgaard, H. H.) GEUS Report no. 2021/55, 107 pp.

5. Precambrian crystalline basement distribution and properties (Gravesen, P., Jakobsen, P. R., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Midtgaard, H. H.) GEUS Report no. 2021/56, 97 pp.

6. Subsurface distribution of Jurassic and Cretaceous fine-grained formations based on seismic mapping (Mathiesen, A., Midtgaard, H. H. & Hjelm, L.) GEUS Report no. 2021/57, 48 pp.

7. Evaluation of long-term stability related to glaciations, climate and sea level, groundwater, and earthquakes (Sandersen, P., Binderup, M., Larsen, T. & Nilsson, B.). GEUS Report no. 2021/58, 113 pp.

8. Conceptual 1D modeling of nuclides transport in low permeable formations (Kazmierczak, J., Karan, S. & Jakobsen, R.) GEUS Report no. 2021/59, 99 pp.

9. *Karakterisering og evaluering af geologiske egenskaber og forhold i 500 meters dybde (Midtgaard, H.H., Hjelm, L., Jakobsen, R., Karan, S., Kjøller, C., Nilsson, B. & Poulsen, M.L.K.)* GEUS Report no. 2021/60, 186 pp

10. *(Translation of report no. 9): Characterization and evaluation of geological properties and conditions at 500 meters depth (Midtgaard, H.H., Hjelm, L., Jakobsen, R., Karan, S., Kjøller, C., Nilsson, B. & Poulsen, M.L.K.) GEUS Report no. 2021/61, in prep.*

8.2 Rapporter fra tidligere geologiske studier om deponering af det danske radioaktive affald

Low- and intermediate level radioactive waste from Risø, Denmark. Location studies for potential disposal areas. Published in GEUS Report Series.

Report No. 1. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2010: Data, maps, models and methods used for selection of potential areas. GEUS Report no. 2010/122, 47 pages.

Report No. 2. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2010: Characterization of low permeable and fractured sediments and rocks in Denmark. GEUS Report no. 2010/123, 78 pages.

Report No. 3. Pedersen, S.A.S. & Gravesen, P.., 2010: Geological setting and tectonic framework in Denmark. GEUS Report no. 2010/124, 51 pages.

Report No. 4. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Bornholm. GEUS Report no. 2011/44, 85 pages.

Report No. 5. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Falster and Lolland. GEUS Report no, 2011/45, 76 pages.

Report No. 6. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Sjælland. GEUS Report no. 2011/46, 85 pages.

Report No. 7. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Langeland, Tåsinge and Fyn. GEUS Report no. 2011/47, 119 pages.

Report No. 8. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of Areas. Eastern Jylland. GEUS Report no. 2011/ 48, 117 pages.

Report No. 9. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Limfjorden. GEUS Report 2011/49, 138 pages.

Report No. 10. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Characterization and description of areas. Nordjylland. GEUS Report 2011/50, 51 pages.

Report No. 11. Gravesen, P., Nilsson, B., Pedersen, S.A.S. & Binderup, M., 2011: Dansk og engelsk resume. Danish and English resume. GEUS Report no. 2011/51, 64 pages.

Low- and intermediate level radioactive waste from Risø, Denmark. Studies of the six sites (Omegnsstudier). Published in GEUS Report Series.

Rapport nr. 1. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 1. Område Østermarie-Paradisbakkerne, Bornholms Regionskommune, GEUS Rapport 2012/123, 100 pages.

Rapport nr. 2. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 2. Område Rødbyhavn, Lolland Kommune, GEUS Rapport 2012/124, 55 pages.

Rapport nr. 3. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 3. Område Kertinge Mark, Kerteminde Kommune, GEUS Rapport 2012/125, 68 pages.

Rapport nr. 4. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 4. Område Hvidbjerg, Thyholm, Struer Kommune, GEUS Rapport 2012/126, 61 pages.

Rapport nr. 5. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 5. Område Thise, Skive Kommune, GEUS Rapport 2012/127, 83 pages.

Rapport nr. 6. Gravesen, P., Nilsson, B., Binderup, M. Larsen, T. & Pedersen, S.A.S., 2012: Lav- og mellem radioaktivt affald fra Risø, Danmark. Omegnsstudier. Rapport nr. 6. Område Skive vest, Skive Kommune, GEUS Rapport 2012/128, 91 pages.

Low- and intermediate level radioactive waste from Risø, Denmark. Studies of interim storage (Mellemlagerstudier).

DD & GEUS, 2016: Supplerende mellemlagerstudier-sammenfatning. Udarbejdet af Dansk Dekommissionering og de Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland for en tværministeriel arbejdsgruppe under Uddannelses- og Forskningsministeriet, 30 pages.

GEUS og DD, 2015: BESLUTNINGSGRUNDLAG for et dansk mellemlager for lav- og mellemaktivt affald. Udarbejdet af GEUS og DD for en Tværministeriel arbejdsgruppe under Ministeriet for Sundhed og Forebyggelse, februar 2015, 128 pages.

Gravesen, P., Binderup, M., Nilsson, B. & Pedersen, S.A.S., 2016: Kriterier og proces for lokalisering af et mellemlager for det lav – og mellemaktive affald fra Risø. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), 99 pages.

Hjemmesider

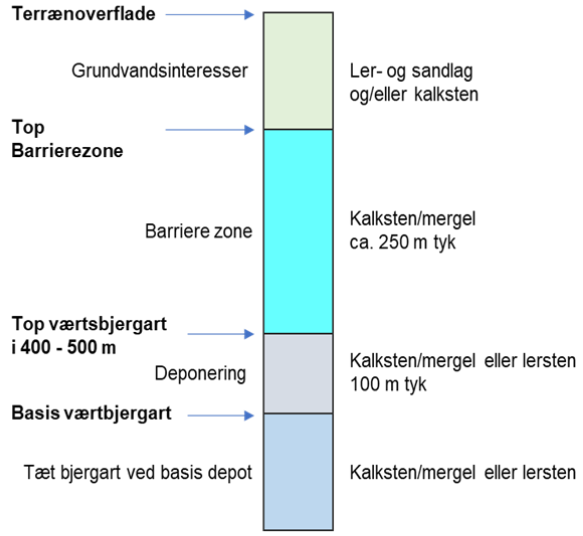
www.dd.dk
www.dmi.dk
www.geus.dk
www.ufm.dk
https://mst.dk/service/miljoegis/

Appendix A: Detaljeret evaluering af områder

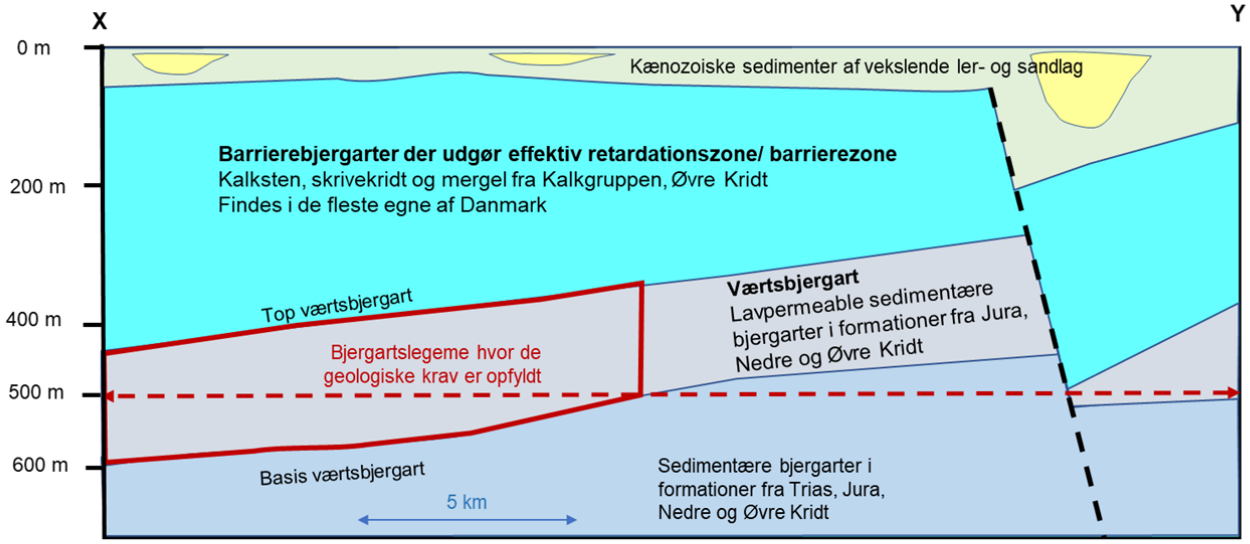
Indholdsfortegnelse	1
Koncepter for scoring af egenskaber og kriterier	2
Nordjylland, kalk	5
Nordjylland, ler	9
Limfjord Øst, kalk	13
Limfjord Øst, ler	17
Midt-Vestjylland, kalk	21
Østjylland, kalk	25
Sydvestjylland, kalk	29
Sønderjylland, kalk	33
Fyn, kalk	37
Sydlige Øhav, kalk	41
Sydlige Øhav, ler	45
Sydvestsjælland, kalk	49
Nordøstsjælland, kalk	53
Bornholm, granit/gnejs	57
Sammenstilling af områdescoringer	61

Koncepter for scoring af egenskaber og kriterier - I

Definitioner:	Værtsbjergart (min 100 m tyk)	Barrierebjergart (ca. 250 m tyk)
	• Lersten (N. Kridt og Jura) • Kalksten (Øvre Kridt) • Granit/gnejs (Prækambrium	• Kalksten (Ø. Kridt) Fra top værtsbjergart og opefter



Konceptuel lagserie baseret på gennemsnitlige forhold i den danske undergrund (grundfjeldet undtaget)



Konceptuelt geologisk tværsnit der viser en kortlagt mulig værtsbjergart i 500 meters dybde

Koncepter for scoring af egenskaber og kriterier - II

Scoring af egenskaber relateret til kriterier:

- \- Data viser ufavorable egenskaber eller forhold
- \+ Data viser delvist favorable forhold, eller data fra analoger tyder på favorable egenskaber og forhold
- ++ Data fra området viser overvejende favorable forhold

Kommentarer:

- Den totale score af et kriterium er en samlet kvalitativ vurdering af scoringen af sub-kriterierne (ikke en matematisk beregning)
- Scoringen af nogle kriterier kan vægtes højere end andre f.eks. vægtes egenskaber for værtsbjergarten højere end barrierezonen (da de given krav i B90 alle relaterer sig til værtsbjergarten). Den samlede scoring af Kriterie 1.1 vil være afhængig af at både en lavpermeabel værtsbjergart (100 m tyk) og en lavpermeable bjergart i barrierre zonen er til stede i den krævede tykkelse og dybde med kontinuert udbredelse over et større område. Hvis en af de parametre, der tilsammen udgør den geologiske barriere er ufarvorabel, vil kriteriet få en orange score, uanset at nogle af de andre parameter (feks. tykkelsen af værtsbjergarten) kan være farvorable.
- Generelle geologiske forhold med indflydelse på de geotekniske egenskaber bliver evalueret, men parametre som geoteknisk styrke, kompressibilitet, og andre, hvor data generelt ikke eksisterer fra 500 meters dybde i den danske undergrund vil ikke blive forsøgt evalueret i denne fase. De forhold der beskrives er relateret til et slutdepot hvor alt det radioaktive affald skal placeres i et depot i 500 m, som kræver et stort område og en geoteknisk set kompetent geologisk lagserie. En borehulsløsning vurderes at være en mere simple konstruktion, som vil betyde færre krav til den geotekniske kompetence i undergrunden, samt et betydeligt mindre arelbehov i området, hvorfor det kan overvejes at revurdere de relaterede parameter i tilfælde af at en borehulsløsning vælges for deponering.
- Ved scoringen af hver parameter for kriterierne tilføjes relevante kommentarer, feks. datagrundlaget for vurderingen, om der er større områder, der afviger fra det generelle billede i området eller anden relevant info.

Koncepter for scoring af egenskaber og kriterier - III

Score	Understøttende data
Favorabel	Pålidelige data viser at de nødvendige egenskaber er til stede. Lille usikkerhed.
Potentielt Favorabel	Data og/eller analoger indikerer at de nødvendige egenskaber kan forventes at være til stede, dog med en vis usikkerhed.
Mindre favorabel	Pålidelige data viser at de geologiske egenskaber generelt ikke opfylder de definerede kriterier.

En grøn score af et kriterie indikerer at de relaterede egenskaber overvejende er favorable og at vurderingen er baseret på tilstedeværelsen af repræsentative, pålidelige data (god kvalitet). Det betyder at de favorable egenskaber er udbredt i størstedelen af området, således at det er muligt at finde undersøgelseslokaliteter med favorable egenskaber. Endelig så vil der være en relativt lille risiko for at indsamling af nye data i området vil påvise tilstedeværelsen af mindre favorable egenskaber.

En gul score af et kriterie viser, at nogle af de nødvendige egenskaber vurderes at være favorable i størstedelen af området baseret på begrænsede data og/eller tvivlsom data kvalitet eller geologiske modeller og analoger (samme type bjergart og/eller geologisk ramme) præsenteret i litteraturen. En gul score betyder at evalueringen generelt er mere usikker. Indsamling af nye data forventes at kunne bekræfte tilstedeværelsen af favorable egenskaber, men der er en vis risiko for at favorable egenskaber ikke vil blive påvist ved indsamling af nye data.

En orange score betyder at de egenskaber der er relateret til kriteriet generelt vurderes at være mindre favorable. Den er baseret på pålidelige og repræsentative data, som viser, at de geologiske forhold og egenskaber er mindre favorable og generelt ikke opfylder de definerede sub-kriterier. I hvilket omfang egenskaberne er ufavorable afhænger af, hvilket koncept for deponering der besluttes.

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barriere zonen

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Kalktykkelsen er over 100 m, bortset lokalt fra området nord for Frederikshavn-1 boringen, hvor den kiler ud
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+		
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Relativt mange forkastninger, både med sideværts og vertikal forsætning
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Kalken i 400-500 m dybde har forskellige stratigrafiske intervaller grundet hældning
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	-		*1) Kalken er 0-200 m tyk i dybdeintervallet 150-400 m
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Relativt mange forkastninger identificeret
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Varierende lerindhold i lag eller horisonter
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		Kalken indeholder ler (petrofysiske logs)
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		Kalken indeholder ler (petrofysiske logs)
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Kalken indeholder ler (petrofysiske logs)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	++		Smectit målt i kerne (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Kalken indeholder ler (petrofysiske logs)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	++		Smectit målt i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		Øverst i Nedre Kridt lagserien i Frederikshavn-1 findes vekslende lag af silt, ler og sand
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		

*1) Kun i den sydligste bræmme findes Kalk på dybder og med tykkelser, så den kan være både barriere og værtsbjergart. Længst mod nord er kalken kilet ud pga. erosion.

2. Naturlig stabilitet

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger	+		Nogle forkastninger fortsætter op i Kænozoikum, en del jordskælv registreret, grænser op mod Sorgenfrei-Tornquist Zonen
	• Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, størstedelen af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten	++		
	• Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten	++		
	• Calcit er til stede i værtsbjergarten	++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	+		Lagserien hælder cirka 100 m pr 4-5 km (op til 2%)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Vandførende sandlag ikke observeret i Kalkgruppen.
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	-		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande grundet hældning
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	-		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande grundet hældning
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barriere zonen

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		N. Kridt + Jura er > 500 m tyk
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+		Findes i områdets centrale og sydligste del i 400-500 m
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Relativt mange forkastninger, både sideværts og vertikal forsætning
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	-		Vekslende ler, silt og finsand (ex. Børglum-1, N. Kridt)
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	-		*1) Kalken er 0-200 m tyk i dybdeintervallet 150-400 m
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateral	+		Varierende lerindhold i lag eller horisonter
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	++		Smectit ses i N. Kridt og Jura (kerne)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	++		Smectit målt i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	-		*3) Sandlag ses på kerne og logs (Frederikshavn-1), men lateral udbredelse ukendt
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	-		Under N. Kridt lersten findes omkring 100 m sandsten fra Frederikshavn Fm. (Frederikshavn-1)
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		

*1) Kun i den sydligste bræmme findes kalk på dybder og med tykkelser, hvor den kan være barrierebjergart. Længst mod nord er kalken kilet ud pga. erosion.

2. Naturlig stabilitet

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+ ++		Enkelte kortlagte forkastninger fortsætter op i Kænozoikum, en del jordskælv registreret, grænser op mod Sorgenfrei-Tornquist Zonen
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, store dele af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	++ ++ +		Calcit målt i N. Kridt (cuttings, Fjerritslev-2), men ikke I Jura

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	-		Lagserien hælder cirka 100 m pr 4-5 km (op til 2%)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Vandførende sandlag ikke observeret i Kalkgruppen
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Nordjylland
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	-		N. Kridt stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	-		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Gradvis lithologisk overgang fra N. til Ø. Kridt, usikkerhed på kortlægning af formationsgrænse
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Tykkelse 300 – 1000 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		Top kalk i 0 – 100 m, basis kalk 500 m eller dybere
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Flere forkastninger og forkastningssystemer
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Flere forkastninger og forkastningssystemer
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		Mulighed for karst i overfladenære lag, hvor top kalk ligger nær terræn
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	-		*1) Øverst i N. Kridt lagserien i Haldager-1 og Børglum-1 findes vekslende lag af silt, ler og sand
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Hvor Basis Kalkgruppen ligger nær 500 m, er der risiko for underliggende sand i N. Kridt, ses i Haldager-1 og Børglum-1

2. Naturlig stabilitet

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+ ++		En del forkastninger og en del registrerede jordskælv, området ligger i Sorgenfrei – Tornquist Zonen
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, store dele af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	++ ++ ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Mulighed for karst hvor top kalk ligger nær terræn, hvor dybt vides ikke
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande grundet hældning
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande grundet hældning
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed Gradvis lithologisk overgang fra N. til Ø. Kridt giver usikkerhed på kortlægning af Basis Kalkgruppen
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	+		Området gennemskæres af Limfjorden. Karst lokalt i kalkoverfladen kan forringe kvalitet af nye seismiske data
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges • Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++ ++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Tykkelsen er 200-1000 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+		Kun i centrale del af området
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	-		Mange forkastninger
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	-		Meget sandet og siltet (kernedata, Haldager-1)
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	-		*1) Mange forkastninger
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Kalk med vekslende lerindhold (logs)
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		N. Kridt/Jura indeholder ler (petrofysiske logs)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	++		Smectit i Rødby Fm og Fjerritslev Fm (Fjerritslev-2)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	++		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	-		*2) Talrige sandlag ses i N. Kridt, kan forventes at være højpermeable med mulig vandstrømning. Mulighed for karst i overfladenære lag, hvor top kalk ligger nær terræn
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	-		Sandlag forventes gennem hele N. Kridt, også i 500 m
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Forkastninger i kalken ses særligt i områder, hvor værtsbjergarten er ler fra N. Kridt og Jura
*2) Haldager-1 har sandlag i Nedre Kridt i intervallet 420-800 m. Det kræver således en meget detaljeret tolkning og kortlægning at undgå sand ved basis af værtsbjergartsintervallet

2. Naturlig stabilitet

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger	+		En del forkastninger og en del registrerede jordskælv, området ligger i Sorgenfrei – Tornquist Zonen
	• Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, store dele af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten	++		
	• Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten	++		
	• Calcit er til stede i værtsbjergarten	+		Calcit målt i N. Kridt (cuttings, Fjerritslev-2), men ikke I Jura

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	+		Varierende hældning, særligt over inversionsstrukturer
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Vandførende sandlag ikke observeret i Kalkgruppen Hvor kalk ligger i terrænoverfladen, kan der være karst, dog forventes ikke dyb karst
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Limfjord Øst
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		N. Kridt stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		Kalkens stratigrafi i 500 m varierer over relativt korte afstande
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Gradvis lithologisk overgang fra N. til Ø. Kridt, usikkerhed på kortlægning af formationsgrænse
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	+		Området gennemskæres af Limfjorden. Karst lokalt i kalkoverfladen kan forringe kvalitet af nye seismiske data.
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Midt-Vestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Kalkgruppen er 500-1000 m tyk
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		*1) I størstedelen af området findes kalk i 500 m dybde
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Præget af salttektonik
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Kalken i 400-500 m dybde bestå af forskellige stratigrafiske intervaller grundet hældning
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	-		*2) Top Kalkgruppen ligger i størstedelen af området i 300-500 m (for dybt)
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		En del forkastninger
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Kalken vil i specifikke dybder i barrierezonen bestå af forskellige stratigrafiske intervaller grundet hældning
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) I størstedelen af Midt-Vestjylland findes Top Kalk i dybder fra 200 m (nordligst) til 500 m (centralt i området). Mod sydvest ligger Top Kalkgruppen i 500 m eller dybere
*2) Da Kalkgruppen er meget tyk, kan 250 m barriere af kalk opnås, hvis depot lægges i kalksten dybere end 500 m

2. Naturlig stabilitet

Område: Midt-Vestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	- ++		*1) Mange jordskælv off-shore, nogle på land, tæt på STZ, saltdiapirer
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Størstedelen af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

*1) Relativt mange jordskælv i området og off-shore. Ikke mange forkastninger er tolket til at gå op i Kænozoikum (sammenlignet med for eksempel Østjylland, hvor der er ses relativt mange). Det er derfor vanskeligt at vurdere om, eller hvor, forkastninger reaktiveres. Der er mange saltdiapirer, nogle muligvis med aktiv remobilisering af salt. I områdets østligste del ses ikke saltdiapirer, og det er tektonisk set mere roligt med mere kontinuerte formationer og lag.

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Midt-Vestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	-		Tykkelser og dybder varierer signifikant over relative korte afstande på omkring saltdiapirer, generelt tektonisk forstyrret
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker, smectit registreret (kerne,Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker, smectit registreret (kerne,Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		*1)
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Mulighed for karst i overfladenære lag, hvor top kalk ligger nær terræn
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Hvor Kænozoikum er meget tyk, kan der være risiko for plastisk ler

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Midt-Vestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		*1) Stor variation af tykkelse og stratigrafi i 500 m dybde over relativt korte afstande
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		*1) Stor variation af tykkelse og stratigrafi over relativt korte afstande
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	+		Området gennemskæres af Limfjorden. Karst lokalt i kalkoverfladen kan forringe kvalitet af nye seismiske data
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

*1) På grund af store tykkelsesvariationer og forskelle i dybde kan det være vanskeligt at finde områder hvor ensartet lithologi kan forventes indenfor en undersøgelseslokalitet, en undtagelse er den østligste del af området.

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Østjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		>750 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		0-500 m
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Mange små forkastninger uden synlige forsætninger internt i kalken, påvirker ikke den kontinuerte horisontale udbredelse
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	+		OK mod NØ, men Top Kalkgruppen ligger under 200 m i SV, hvilket gør kalken for tynd som barrierebjergart
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Enkelte store forkastninger til Kænozoikum, kan undgås via detailundersøgelser
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen (logs)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen (logs)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

2. Naturlig stabilitet

Område: Østjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+ ++		En del forkastninger når til Top Kalk (nær terræn)
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale kan findes, dele af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Østjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	+		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker, smectit registreret (kerne,Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker, smectit registreret (kerne,Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		*1) Ikke plastisk ler i kalken
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Basis Kænozoikum i områdets sydlige del varierer fra 200 m til 400 m og det kænozoiske interval indeholder sandlag
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Plastisk ler kan forekomme i Kænozoikum, som er 200-400 m tyk i områdets sydlige del.

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Østjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber		Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Sydvestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		Top Kalk findes i 200 til 500 m, herover kænozoisk sand og ler
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Små forkastninger, men lille eller ingen forsætning
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	-		*1) og *2) Top Kalkgruppen ligger i 300-500 m (for dybt)
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen (logs)
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen (logs)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i kerne (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Det kan undersøges om der lokalt er mulighed for at Kænozoikum kan fungere som barriere, hvis tykke, kænozoiske lerformationer kan påvises med få eller ingen interne sandlag
*2) Deponering med kalk som værtsbjergart og som barrierebjergart er muligt, hvis deponering kan være på større dybde end 500 m.

2. Naturlig stabilitet

Område: Sydvestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++ ++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, størstedelen af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Sydvestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	+		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		*1) Ikke plastisk ler i kalken
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Basis Kænozoikum i områdets sydlige del varierer fra 200 m til 500 m, og det kænozoiske interval indeholder sandlag
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Plastisk ler kan forekomme i Kænozoikum, som er 200-500 m tyk i området.

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Sydvestjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges • Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++ ++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Sønderjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Omkring 500 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+		Top Kalk i 200-600 m eller dybere
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	-		Mange forkastninger
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	-		*1) og *2) Kalk som barriere er max 100 m tyk
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	-		Mange forkastninger
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Det kan undersøges om der lokalt er mulighed for at Kænozoikum kan fungere som barriere, hvis tykke, kænozoiske lerformationer kan påvises med få eller ingen interne sandlag
*2) Deponering med kalk som værtsbjergart og som barrierebjergart er muligt, hvis deponering kan være på større dybde end 500 m.

2. Naturlig stabilitet

Område: Sønderjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++ ++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Dataområder uden indikation på dale forefindes, størstedelen af området er uden data
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Sønderjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	-		Hældende lag associeret med forkastninger, særligt omkring saltryg
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i cuttings (Sæby-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		*1) Ikke plastisk ler i kalken
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Basis Kænozoikum i områdets sydlige del varierer fra 200 m til 500 m, og det kænozoiske interval indeholder sandlag
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) Plastisk ler kan forekomme i Kænozoikum, som er 200-500 m tyk i området.

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Sønderjylland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		Horisontale kontinuitet er stedvist begrænset grundet hældende lag
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+		Horisontale kontinuitet er stedvist begrænset grundet hældende lag
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Fyn
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	+ +		>500 tyk
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+ +		Top Kalkgruppen ligger i dybder fra 200-100 m
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+ +		Få forkastninger kortlagt
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	+ +		Top Kalkgruppen ligger i dybder fra 200-100 m, dermed >250 m til depotdybde
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+ +		Få forkastninger kortlagt
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

2. Naturlig stabilitet

Område: Fyn
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+ + + +		Meget få jordskælv registreret, Fyn ligger i tektonisk stabilt område på Ringkøbing-Fyn Højderyggen
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Stor datadækning indikerer, at der er dale i store dele af området
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + + +		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Fyn
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		Lagserien hælder meget svagt
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Fyn
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	+ +		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	+ +		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	+ +		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	+ +		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	+ +		Større forkastninger kan kortlægges, salt findes ikke i undergrunden i området
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	+ +		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		400-500 m eller mere
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	+		*1)
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		*2) Mange forkastninger, men også områder uden
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		Dybde til Top Kalkgruppen er omkring 100 m, dermed >250 m til dybde for depot
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		*2) Mange forkastninger, men også områder uden
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	-		Sandlag i N. Kridt og Top N. Kridt (Basis Kalkgruppen) i 400-600 m
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Dybe forkastninger fortsætter til nær terræn

*1) I betydelige dele af området (særligt mod øst) findes Basis Kalkgruppen i 400-500 m, hvor der således er mulighed for ler fra N. Kridt og Jura som værtsbjergart.
*2) I områder, hvor Basis Kalkgruppen ligger dybest (500-600 m), er færrest forkastninger.

2. Naturlig stabilitet

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+ ++		Forkastninger til nær terræn, dog kun registreret meget få jordskælv
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	++		Data indikerer, at størstedelen af området er uden begravede dale
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		Lokalt større hældning nær forkastninger
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		En del forkastninger går til nær terræn, men åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet. Hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser.

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed. Desuden gradvis lithologisk overgang fra N. til Ø. Kridt, usikkerhed på kortlægning af formationsgrænse
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		*1) N. Kridt er < 50 m, men samlet tykkelse af Jura og N. Kridt er 100-1000 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		Top N. Kridt (Basis Kalkgruppen) i 400 –600 m
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Mange forkastninger, men også områder uden. Jura lokalt begrænset af forkastninger (som definerer halfgrabens)
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	-		*2) Jura – N. Kridt indeholder mergel, sand, silt, ler
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		Top Kalkgruppen omkring 100 m, dermed >250 m til dybde for depot
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	+		Mange forkastninger, men også områder uden
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Vekslende lithologier
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	++		Hvor ler, er der meget smectit i Jura (Fjerritslev Fm), varierende i N. Kridt (Rødby-1, Ørslev-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	-		Sandlag af varierende tykkelse, op til >10 m
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	-		Gassum Fm sandsten ved basis Jura, gradvis overgang
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) N.Kridt er meget tynd, men lateralt udbredt. Jura findes i flere half-grabens 5-10 km (eller mere) brede. Samlet set stor variation af tykkelse
*2) N. Kridt sedimenter: Vekslende lag af sand, silt, mergel, ler 10-40 m (logs og kerne). Jura Fjerritslev Fm: Vekslende lag af ler, silt og sand (logs og kerner). Store tykkelsesvariationer i Jura, derfor forventes stor variation af mængde og tykkelse af forskellige lithologier.

2. Naturlig stabilitet

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger	+		Store forkastninger til nær To Kænozoikum/nær terræn. Kun et jordskælv registreret
	• Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	++		Data indikerer, at størstedelen af området er uden begravede dale
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten	++		Smectit målt på kerne (Rødby-1, Ørslev-1)
	• Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
	• Calcit er til stede i værtsbjergarten	-		Analyserede prøver (begrænset antal) viser ingen calcit

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	-		N. Kridt ja, Jura nej – findes i små forkastningsblokke
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		En del forkastninger til nær terræn. Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet. Hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser.

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Sydlige Øhav
Værtsbjergart: Ler, N. Kridt og Jura

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	-		N. Jura varierer over relativt korte afstande grundet forkastningsblokke
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af N. Kridt kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed. Gradvis lithologisk overgang fra N. til Ø. Kridt, usikkerhed på kortlægning af formationsgrænse
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Sydvestsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		500-1250 m
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		Top Kalkgruppen i 100-300m dybde
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Meget få forkastninger kortlagt
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	+		1*) Mod sydøst er Top Kalk i 0-150 m, dermed >250 m til omtrentlig deponeringsdybde
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Meget få forkastninger kortlagt
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		Kalk findes til stor dybde > 500 m
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) I NV er Top Kalk i 200-450 m, og dermed er Kænozoikum 200-450 m tyk og kalken <250 m tyk. Kalken i NV er dermed for tynd som barrierebjergart.

2. Naturlig stabilitet

Område: Sydvestsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger	+		Forkastninger ses fra Top Trias ind i Kænozoikum, mange jordskælv i nordligste del af området
	• Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	++		
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Størstedelen af område er uden data, men områder uden indikation på dale er kortlagt
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten	++		Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten	++		Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Calcit er til stede i værtsbjergarten	++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Sydvestsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit registreret i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		Plastisk ler kan forekomme i Kænozoikum (Lillebæltsler)
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Enkelte store forkastninger kortlagt, men store dele af området har ringe seismisk datadækning. Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet. Hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Sydvestsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Nordøstsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		750-1500 m tyk
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		Top Kalkgruppen 0-100 m
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Få forkastninger kortlagt
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		*1) Logs viser varierende lerindhold i kalken
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		Top Kalkgruppen ligger fra nær terræn til 100 m dybde
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		Få forkastninger kortlagt
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	+		*1) Logs viser varierende lerindhold i kalken
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	+		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	+		Ler i variable mængder gennem Kalkgruppen
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	+		Smectit målt på kerne (Stevns-1)
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	+		
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Åbne sprækker eller forkastninger er ikke kortlagt eller forventet, men hvis tilstede kan de undgås ved detailundersøgelser

*1) I Lavø-1 findes et over 100 meter lerdomineret interval i 700-800 m dybde midt i Kalkgruppen

2. Naturlig stabilitet

Område: Nordøstsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger • Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	- ++		Mange jordskælv, også off-shore, og en del af de kortlagte forkastninger, går til nær terrænoverfladen
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	+		Størstedelen af området er uden data, men større områder med data findes uden indikation på dale
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten • Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten • Calcit er til stede i værtsbjergarten	+ + ++		

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Nordøstsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	+		Kerner fra Erslev-boringer viser calcitudfyldte sprækker Smectit målt i kerne (Stevns-1)
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Forkastninger fra stor dybde til nær terræn
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Nordøstsjælland
Værtsbjergart: Kalk, Kalkgruppen

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Horisontal til nær-horisontal, forholdsvis god lateral forudsigelse af stratigrafiske variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Punktdata (boringer) vil give pålidelige data om vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Tykkelsen af og lithologisk kontrast mellem forskellige enheder internt i kalken kan være nær eller under grænsen for seismisk opløselighed
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		Vanddækket i Roskilde Fjord, Arre Sø, Esrum Sø
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges • Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++ ++		

1. Egenskaber af værtsbjergarten og barrierezonen

Område: Bornholm
Værtsbjergart: Granit/gnejs, Prækambrium

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
1.1 Rumlig udbredelse af værtsbjergarten og barrierebjergarten	• Tykkelsen af værtsbjergarten er 100 m eller mere	++		Krystallint grundfjeld, der findes nær terrænoverfladen fortsætter til stor dybde.
	• Værtsbjergarten findes i dybder omkring 500 m under terræn	++		
	• Værtsbjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		
	• Værtsbjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	++		
	• Barrierebjergarten er 250 m tyk	++		
	• Barrierebjergarten er lateral udbredt over 5x5 km eller mere	++		
	• Barrierebjergarten er lithologisk homogen vertikalt og lateralt	++		
1.2 Effektivitet af hydrauliske barrierer	• Værtsbjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	++		Krystallinske bjergarter som granit og gnejs har ekstremt lille permeabilitet hvor de er homogene uden sprækker
	• Barrierebjergarten har en meget lav permeabilitet (fordrer diffusionsdomineret stof-transport)	++		
1.3 Geokemiske forhold for retardation	• Matrix af værtsbjergarten har et højt indhold af ler	-		Granit og gnejs er relativt grovkornet uden ler
	• Værtsbjergarten indeholder smectit	-		Smectit er ikke rapporteret fra granit, gnejs eller i forvitringsprodukter
	• Matrix af barrierebjergarten har et højt indhold af ler	-		Granit og gnejs er relativt grovkornet uden ler
	• Barrierebjergarten indeholder smectit	-		Smectit ikke rapporteret fra granit, gnejs eller forvitringsprodukter eller dikes
1.4 Strømningsveje	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i værtsbjergarten	+		Ingen data fra 500 m, horisontale sprækker i dybden 0-100 m med øget afstand nedefter. Langsom strømning, som er afhængig af lokale gradienter
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede umiddelbart under værtsbjergarten (i dybder omkring 500 m)	++		Krystalline bjergarter fortætter til >>500 meters dybde
	• Lateralt udbredte, høj-permeable lag er ikke til stede i barrierebjergarten	+		Ingen data fra 500 m, horisontale sprækker i dybden 0-100 m har øget afstand nedefter.
	• Store åbne sprækker, der strækker sig fra værtsbjergarten til toppen af barrierebjergarten er ikke til stede	+		Store åbne sprækker ikke dokumenteret, hvis store sprækker forekommer, kan de identificeres i overfladen og dermed undgås på depotlokaliteten

2. Naturlig stabilitet

Område: Bornholm
Værtsbjergart: Granit/gnejs, Prækambrium

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaberne	• Frekvensen og størrelsen af registrerede jordskælv er meget lille, og der forventes ikke reaktivering af eventuelle dybe forkastninger	++		Meget få jordskælv registreret. Bornholm ligger på horst-blok, eventuel forkastningsaktivitet vil sandsynligvis være langs grænseforkastninger
	• Glacio-tektonisk deformation og vertikal opsprækning ved en fremtidig glaciation kan forventes kun at påvirke terrænnære formationer og de øverste dele af barrierezonen (dybder ned til max. 300 m under terræn)	+		Vertikale, glaciale sprækker observeret, typisk 0-50 m dybe
2.2 Erosion	• Dybe, begravede, sandfyldte kvartære dale er fraværende	++		Sand findes lokalt i enkelte store sprækker over diabasgange, kan identificeres og kortlægges
2.3 Selv-helende egenskaber overfor depot-genererede mikrofrakturer	• Smectit og /eller montmorillonit er til stede i værtsbjergarten	-		*1) Ikke identificeret i frisk eller forvitret granit/gnejs
	• Smectit og/eller montmorillonit er til stede i barrierebjergarten	-		*1) Ikke identificeret i frisk eller forvitret granit/gnejs
	• Calcit er til stede i værtsbjergarten	-		*1) Ikke identificeret i frisk eller forvitret granit/gnejs

*1) Det forventes ikke at affaldet vil påvirke værts- eller barrierebjergarten, hvorfor dette kriterie er mindre relevant for grundfjeld. Deponering i grundfjeld er besluttet for andre projekter, så erfaringer findes (for eksempel fra Sverige og Finland).

3. Geoteknisk gennemførlighed

Område: Bornholm
Værtsbjergart: Granit/gnejs, Prækambrium

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold	• De geologiske formationer har horisontal eller nær-horisontal lagdeling	++		Granit / gnejs ikke lagdelt, sprækker følger ikke strukturer i granit og gnejs
	• Værtsbjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	-		Smectit og calcit er ikke rapporteret fra hverken frisk eller forvitret granit og gnejs
	• Barrierebjergarten indeholder smectit eller calcitudfældning i lokalt dannede sprækker	-		Smectit og calcit er ikke rapporteret fra hverken frisk eller forvitret granit og gnejs
	• Barrierebjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		Sprækker ses i overfladen med varierende tæthed, færre sprækker i dybden, ingen data fra >100 m
	• Værtsbjergarten indeholder ikke lag af ukonsolideret sand eller opsprækkede lag	+		Sprækker ses i overfladen med varierende tæthed, færre sprækker i dybden, ingen data fra >100 m
	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke lag af plastisk ler	++		
3.2 Adgangsforhold i undergrunden og drænering af vand	• Barrierebjergarten indeholder ikke tykke og lateralt udbredte vandførende sandlag eller opsprækkede zoner med høj permeabilitet	+		Information fra vandboringer 0-100 m viser meget langsom vandstrømning i horisontale sprækker
	• Store åbne sprækker eller forkastninger, der strækker sig fra terrænoverfladen til mere end 500 m, er ikke til stede	+		Store åbne sprækker ikke rapporteret, kan identificeres og kortlægges, hvis de forekommer

4. Pålidelighed af nye geologiske data

Område: Bornholm
Værtsbjergart: Granit/gnejs, Prækambrium

Kriterier	Egenskaber	Sub-score	Score	Kommentarer
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering	• Værtsbjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		Fordeling af forskellige granit/gnejs-typer i undergrunden er ukendt, forventes ikke at have nogen betydning
	• Barrierebjergarten har ensartet tykkelse og stratigrafi, så sammenlignelige egenskaber kan forventes over større områder	++		
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af værtsbjergartens egenskaber	++		Pålidelige data kan indsamles fra boring i 1D (vanskeligt at extrapolere i 3D)
	• Data fra borekerner og borehulslogging i nye borehuller vil resultere i detaljerede og pålidelige informationer om homogenitet og variabilitet af barrierebjergartens egenskaber	++		Pålidelige data kan indsamles fra boring i 1D (vanskeligt at extrapolere i 3D) Borekerner og logs vil vise eventuelle vertikale variationer
4.2 Potentiale for kortlægning af lag og diskontinuiteter i undergrunden	• Lithologiske kontraster i undergrunden gør det muligt at kortlægge lag og laggrænser, arkitektur og forkastninger med stor nøjagtighed baseret på seismiske og/eller andre geofysiske data	+		Større vertikale forkastninger kan kortlægges i terrænoverfladen
	• Overfladeforhold, topografi og dybden til det frie vandspejl tillader indsamling af høj-opløselige geofysiske data	++		Terræn ok, lokalt stejlt
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området	• Større forkastninger og salt diapirer kan identificeres og kortlægges	++		
	• Dybe sandfyldte kvartære begravede dale kan kortlægges baseret på nye geologiske og geofysiske data	++		

Sammenstilling af områdescoringer

Kriterier	Nordjylland	Nordjylland	Limfjord Øst	Limfjord Øst	Midt-Vestjylland	Østjylland	Sydvestjylland	Sønderjylland	Fyn	Sydlige Øhav	Sydlige Øhav	Sydvestsjælland	Nordøstsjælland	Bornholm
	Kalk	Ler	Kalk	Ler	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Kalk	Ler	Kalk	Kalk	Granit
1.1 Rumlig udbredelse	1)	2)		4)	6)		8)	9)			10)			
1.2 Hydraulisk barriere-effektivitet														
1.3 Geokemiske forhold for retardation														13)
1.4 Strømningsveje		3)		5)							11)			
2.1 Stabilitet i området og af bjergartsegenskaber					7)								12)	
2.2 Erosion														
2.3 Selv-helende egenskaber for frakturer														14)
3.1 Bjergartsmekaniske egenskaber og forhold														
3.2 Adgangsforhold og drænering af vand														
4.1 Muligheder for bjergartskarakterisering														
4.2 Potentiale for kortlægning af lag/diskontinuiteter														
4.3 Forudsigelighed af naturlige ændringer i området														

Appendix B

Rapporten, der er reviewet, har ændret rapportnummer til nr. 1

Geological siting project on deep disposal of the Danish radioactive waste

Review of: Phase 1, report no. 8.

Criteria and requirements for identification of suitable disposal sites

Ingo Blechschmidt, Bernd Frieg, and Stratis Vomvoris, Nagra, Switzerland

Jonathan Turner and Cherry Tweed, Radioactive Waste Management, UK

June 9th, 2021

Contents

1. Introduction 1
2. Siting process 2
2.1 National context 2
2.2 Policy 2
2.3 Roles and responsibilities 3
2.4 Inventory 3
2.5 Safety concept and safety analysis 4
2.6 Schedule 5
3. Geological studies 6
3.1 GEUS task 6
3.2 Disposal depth 6
3.3 Host rock 7
3.4 Data sources 7
3.5 Evaluation approach - Criteria and requirements 8
3.6 Criteria- wording 9
3.7 Narrowing-down process and exclusion criteria 9
3.8 On the application of the traffic-light approach 10
4. Concluding remarks 11
References 12
Appendix 13
A1. Criteria and indicators- example 13
A2. Application of the criteria by different stakeholders – example 15
A3. Application of the traffic-light system at the indicator level – example 16

1. Introduction

This report summarises the findings of an external panel of work being undertaken by the Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) in support of the siting of a deep geological disposal facility for radioactive waste in Denmark.

GEUS has been tasked by the Danish Parliament with identifying areas where the geological properties are potentially suitable for the safe disposal of radioactive waste. The task is being carried out in collaboration with the Danish Ministry of Higher Education and Science (MHES), the project owner, and Danish Decommissioning (DD), the organisation responsible for storing the radioactive waste until final disposal. The first phase of the work comprises a review of available in geological information in order to map and describe various properties of the rock types identified at depths around 500 metres and understand the natural processes which have the potential to influence the long-term geological stability.

In the first stage of the project GEUS developed geological requirements and defined criteria largely based on recommendations from IAEA and experiences from similar international projects. These criteria are to be used for identification and initial evaluation of geological settings and rock types suitable for a deep geological repository of the Danish radioactive waste. They have been documented in a draft report 'Geological siting project on deep disposal of the Danish radioactive waste, Phase 1, report no. 8: Criteria and requirements for identification of suitable disposal sites', dated 10th May 2021[1].

In order to build confidence in its approach GEUS has sought external scientific review of the procedure for the scientific evaluations as presented in the criteria report. By seeking review at this early stage, GEUS wanted to take the opportunity to refine, as appropriate, their approach to reflect international good practice in the field. In turn this would help build stakeholder support for the approach in Denmark.

The review has been carried out by a team of international experts from the organisations responsible for scientific aspects of the geological disposal programmes in Switzerland and the United Kingdom, herein referred to as the "review team". In presenting their findings, the review team has made a number of recommendations for GEUS to consider as they develop the process further.

The review considered the draft criteria report and the review team also held virtual workshops with GEUS, Danish Ministry of Higher Education and Science (MHES), and Danish Decommissioning (DD) on May 17th and 18th, 2021.

The remainder of the review is structured in two main parts. The first considers aspects of the siting process which need to be considered in the geological exercise. The second part focused on the detail of the GEUS proposals as set out in the report.

[1] Hereinafter referred to as "the Report"

2. Siting process

2.1 National context

Denmark has no nuclear power plants but has operated three research reactors at the Risø site which are now being decommissioned. Radioactive waste is in interim storage at Risø, where the storage facilities are being expanded and enhanced to increase capacity and improve robustness against flooding etc.

In line with international best practice, and to meet the requirements of EC Directive 2011/70, Denmark is currently planning for the disposal of Danish radioactive waste. The final disposal solution will need to accommodate up to 10,000m^3 waste with various inventory.

2.2 Policy

The policy position on the long-term management for Denmark's radioactive waste is described in Parliamentary resolution **B 90.** The policy states that the solution must be implemented observing fundamental principles for radiation protection and safety, including protection of people and the environment, protection outside of national borders, and protection for future generations. It also states that the health effects on future generations as a result of the long-term solution must not exceed current acceptable levels in Denmark.

In response to stakeholder comment about previous proposals, the Government defines the long-term management solution could be a deep geological repository and recognises a similar solution to those being implemented in Sweden, Finland and France.

The policy defines a number of requirements for the host rock (bedrock)

- depth of up to 500 metres
- low permeability
- sufficient thickness (more than 100 metres)
- horizontal continuous expanse (several kilometres) across the whole survey area.
- sufficiently homogeneous without physical discontinuities such as fissures and faults.
- as mineralogically homogeneous and uniform as possible.

In addition, the geological conditions must be geologically stable in the short and long term.

The policy also sets out the safety standards and the principal steps in the siting process. The first stage in the siting process will be a review of existing geological information to a depth of 500 metres and that the final localisation should be determined from a precise analysis of a number of criteria; geological, physical and socio-economic. It also states safety will be the most significant component for the selection of the final localisation.

Whilst these clear policy requirements are helpful in providing direction for the programme, by drawing on the solutions adopted in other countries without the underpinning justification, it provides some constraints on the siting process which exclude some potential options.

These points will be considered in more detail in the subsequent sections.

2.3 Roles and responsibilities

An observation of the review team was that, whilst the close cooperation between the organisations involved in waste disposal was apparent, the specific responsibilities of the various actors in the siting process had not been defined. In the past decades, most countries undertaking this important exercise have clearly allocated responsibilities and tasks among the various stakeholders (e.g. authorities, government and ministries, geological service, research institutes, implementer). For the currently very successful process in Switzerland, for example, it was very important for Nagra (as implementer) to concentrate only on the scientific and technical aspects of developing repository concepts suitable for Switzerland, aspects of long-term safety and site selection.

Therefore, the review team recommends that the various responsibilities in the siting process are defined and documented, so that the actors themselves are clear and the approach can be clearly communicated to other stakeholders. The siting process is being led by the Government department MHES who are leading on the engagement process. GEUS are providing technical support. Whilst, geological input is rightly the domain of GEUS, inputs on facility design and safety analysis should be the responsibility of DD. Furthermore responsibility needs assigning for 'other' siting factors e.g. environment, habitats, infrastructure, transport.

2.4 Inventory

The radioactive waste in Denmark stems from the decommissioning of nuclear research facilities at Risø National Laboratory and the use of nuclear radiation sources in research, industrial production and the health sector. It is currently being stored by the Danish Decommissioning (DD) on the Risø peninsula. The majority of the waste is low-level. There is a small amount of used fuel from the DR-1 reactor, for which the government leaves open the option to dispose of in an international repository, if such an option becomes available, but is currently included in the inventory for disposal in Denmark.

The inventory also includes a volume of uranium tailings (NORM waste) which may also be managed separately.

The volume of waste and the associated radioactivity to be managed in Denmark is small. Certainly with the exception of the research reactor fuel, it would be expected that a disposal facility at a depth of 100m or less would provide sufficient isolation and containment for a safety case to be made. The relatively low hazard of the waste and its physical form means that long-lived radionuclides are present in a form which would mean that any long-term release would be controlled by the slow dissolution rate of the waste matrix. Similar near-surface facilities for this type of low-and intermediate level waste have been successfully implemented elsewhere (e.g. the SFR facility at Forsmark in Sweden, which has been operating since the late 1980s, or the Wolseong Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Centre (WLDC) at Gyeongju in South Korea, in operation since 2013 etc.).

The chosen depth of disposal is frequently influenced by societal as well as technical factors. The policy document B90 recognises the societal desire for a greater level of isolation from the surface environment for the waste inventory than would be required based on purely technical and safety considerations. The parliamentary resolution B90 records that a facility at a depth of a few tens of metres could potentially satisfy the safety requirements established by regulatory authorities, even when this research reactor fuel was included.

The review team was satisfied that the proposed solution of geological disposal at a depth of a few hundred metres provides a potential solution for the wastes that would meet both technical (safety and engineering) as well as stakeholder needs. However, they recognised the significant cost associated with this disposal solution, particularly given the relatively small volumes and radioactive hazard of the waste inventory. The review team also recognised that much of the drive for facility depth was due to the presence of used fuel in the inventory and that other options for the management of this material were still under consideration. Therefore, it is recommended that the possibility of disposal at shallower depth is not excluded, in the case that an alternative solution for the used reactor fuel could be realised before a final siting decision is made.

2.5 Safety concept and safety analysis

As set out in Policy document B90 and in line with international best practice, a multi-barrier disposal concept is proposed for Danish waste with the main barriers comprising:

– waste containers with waste and filling material

– repository building with waste containers and filling material

– the surrounding geology.

Figure 1 of the GEUS Report illustrates the DGR concept, the emphasis being on the depth. However, no detail is provided on the choice of barrier materials, design features such as vault size and any plans to segregate different waste types, e.g. different types of decommissioning waste or decommissioning waste from spent fuel. This information will be required to inform design requirements such as facility footprint, which in turn will inform geological requirements such as the required rock volume. Given the approach to siting, starting from a 'blank map', the tailoring of safety concepts to different geological settings will also be important.

The review team therefore recommends that preliminary development of the safety concept and facility design for the purposes of supporting the siting process and, in particular any early geological requirements, such as the required volume of potential host rock. These concepts and designs will need to be developed for, or adaptable to, all potential host rock types under consideration in the siting process. The safety concept is also a key input to safety analysis. International experience can be a useful resource in developing these preliminary facility concept designs.

The role of safety analysis in site selection needs to be clearly defined, including the stages at which safety analysis will be considered and the approach and type of output that would be expected. Assumptions may be required, particularly at the early stages when limited data will be available. These assumptions and their rationale would need to be clearly documented. Again, international experience[2] would provide a useful source of data. For a safety analysis to be carried out, the safety-relevant requirements (defined by the regulator), a preliminary disposal concept (based on the

[2] In terms of the practical consideration of safety analysis in evaluating different sites, one example would be the approach proposed by the Swiss regulator (ENSI, 2010: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich - Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, (In German – informal translation of the title: Requirements on the provisional safety analyses and the safety-based comparison – Sectoral Plan for Deep Geological Repositories Stage 2), ENSI 33/075, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, www.ensi.ch

expected waste inventory) and assuming potential host rocks must be available (based on international best practices). These outputs are important, for example, in the evaluation of technical criteria at a site, leading to exclusion or acceptance of a site. In the course of the site selection procedure, it is important to regularly repeat the safety analysis on the basis of new data and findings and to confirm the corresponding safety case.

2.6 Schedule

The timescale proposed in Document B90 indicates that site selection activities will be complete in some six years. This appears to be very optimistic compared to other waste management programmes (e.g. SKB, POSIVA, ANDRA, Nagra) in terms of planned resources (time, costs, available manpower and know-how) and time schedule especially for the site selection activities. The review team recommends a careful consideration on what should be expected to be achievable under the given timescales. In particular with respect to the communication with other stakeholders, the preparatory steps for the communication and the required time, should not be underestimated.

As discussed above, the overall programme planning as presented in B90, the review team also recommend a whole-lifecycle cost analysis based on known facts and concepts (waste inventory, disposal concept, etc.) and considering different scenarios. This cost analysis should be part of a periodic review of the Radiation Waste Management Programme. Examples of this are provided in the advanced programmes as well.

3. Geological studies

3.1 GEUS task

Document B90 sets out the specific task which has been allocated to GEUS:

> *"The Government proposes that studies of Denmark's geology to depths of 500 metres be carried out with the aim of identifying potential locations (= areas) for a deep geological final repository. After which, the final localisation (= site) should be determined from a precise analysis of a number of criteria including geological, physical and socio-economic, with weight given to safety as a significant component for the final localisation."*

The review team considers that the use of the terms locations and localisations in policy is helpful in directing the scope of the task to be undertaken by GEUS. Locations can be considered as siting 'areas' – volumes of the geological environment that are potentially suitable for disposal based on technical and safety criteria. Localisations can be considered as equivalent to 'sites' and are decided based on additional non-geological criteria including physical, environmental and socio-economic factors.

The review team advises that the activity of GEUS in Phase 1 is restricted to recommending underground areas which are potentially suitable for geological disposal. Site selection, which will include wider considerations, should be a separate step in the siting process. The identification of potential areas for a DGR, based on a national geological evaluation ('blank map of Denmark'), can then be used to inform the factors that will be applied to identify specific DGR sites. The UK programme used six such 'siting factors', none of which are specifically geological, but three of which are heavily influenced by geology (safety, engineering feasibility, value for money; see: RWM, 2020).

The review team also noted that siting of surface facilities and associated infrastructure (tunnels, bridges, roads, railway tracks, etc.) is a sensitive aspect of the siting process, as demonstrated in the Swiss programme. It can play an important role in involving other stakeholders in the decision-making process, such as local communities, thereby also increasing the acceptance of the project. This is particularly important as the location of surface facilities and the design and function of these facilities are usually not relevant to the long-term safety of a DGR.

It should be noted that the selection of the location for surface infrastructure can strongly influence the development of a region, e.g. from a socio-economic point of view, or focus on environmentally relevant aspects, such as potential influence on aquifers for drinking water supply or nature conservation areas. Here again it will be important to define the process and the distribution of roles clearly and openly.

In terms of methods of analysis the review team suggests that a qualitative approach may be preferred whilst application of semi-quantitative methods such as multi-attribute decision analysis (MADA) can be problematic, particularly due to the difficulty in defining early on in the siting process the interdependencies and relative weightings of attributes.

3.2 Disposal depth

Document B90 defines 500m as the "target" depth for disposal. In interpreting the policy for the geological exercise, GEUS have defined a depth range for consideration in Phase 1 as 400 – 600m. The review team supports this approach of identifying a range and the depth range selected by GEUS.

However the team notes that, from Phase 2 of the site investigation, the depth of investigations will extend beyond the target depth in order to fully characterise the geology of the underburden.

The review team recommends that some consideration be given to the geological environment at shallower depth. In addition to informing potential groundwater return pathways, safety assessments and engineering feasibility, such information might become more significant if spent fuel can be managed by another route other than disposal in a DGR (see Section 2.4) and an option for a shallower depth repository is considered. The review team recognises that this is beyond the current mandate of GEUS and this point is mentioned here for completeness and consistency with statements in Section 2.4.

3.3 Host rock

At the depth of 500 metres specified in document B90, there are four potential host rocks for geological disposal in Denmark:

- Chalk
- Mudstone
- Granite
- Salt diapirs .

Given the blanket of Chalk that covers much of mainland Denmark to depths in excess of 500m the review team questions whether the target depth would need to be increased if mudstone host rocks are prioritised. In addition, it is not clear if for all host rocks identified above the same disposal concept would be considered (see also remarks in Section 2.5) and hence the same requirements would be valid for the criteria, sub-criteria (and indicators) used. The review team recommends clarifying this point.

3.4 Data sources

The approach presented by GEUS in its Report is primarily based on "hard" data from wells/boreholes and seismic investigation. Understandably it is not expected that the entire Danish territory will be covered by such hard data. The review team would encourage GEUS to use all additional information, for example geological sections in the literature or in university textbooks, information available from private sector (construction companies, geothermal investigations etc.), properties of formations from similar formations in other areas (Denmark or neighbouring countries) etc. It is recognised that there may be large uncertainty associated with such interpolations of data, but at this stage of the screening process, where large areas of 25 km^2 (or more) are sought it is appropriate.

The UK National Geological Screening undertook such an exercise in which public domain data were used to describe, in layperson's language, the geology of the entire area of England and Wales in terms of its relevance for DGR safety (see RWM, 2016). Providing it is made clear that these descriptions are based on a mostly sparse and sometimes quite old dataset, the UK experience was that this open sharing of available information worked well with stakeholders benefitting from the greater understanding it gave them.

Such a formulation could also be included in Step 1 shown in Figure 4 of the Report.

3.5 Evaluation approach - Criteria and requirements

GEUS has proposed a number of geological criteria in Table 1 of the Report. The review team supports this approach and considers that these criteria and sub-criteria capture the main issues to be evaluated for the geological part of the repository system. The review team noted, however, that these criteria and sub-criteria correspond to a high level of consolidated information. For their evaluation it would be easier to systematically define underpinning information that can be used for their evaluation. A possible term, used in other programmes, for example in Switzerland, could be "indicators", which represent factors that can be evaluated (quantitatively or qualitatively) to assess the degree of suitability of an area or a site with respect to this indicator. An example of indicators is given in the Appendix A.1 (from Zuidema and Vomvoris, 2017).

The review team noted that in the report GEUS has already used such indicators to a certain degree. For example, in: i) Section 4.1.1 under the sub-criterion "Spatial extent" four such indicators are identified, or ii) Section 4.1.2 "Hydraulic barrier effect", also four indicators are identified etc. These indicators should be complemented (if needed) and should be given more "visibility", because at the end the evaluation of a criterion builds on the assessment of each of these indicators.

Associated with the indicators are the requirements that an indicator should fulfill and how these requirements are "mapped" to the traffic light system. An example of such requirements is shown below (from NTB 08-03, unofficial translation) and corresponds to the sub-criterion 1.4 Release Pathways applied for a site evaluated as a potential host for L/ILW repository.

Criterion: Release Pathways	
Indicator	**Requirements for the L/ILW repository**
Type of transport pathways and structure of pore space	*Very favourable:* (equivalent) porous medium *Favourable:* Water flow in discontinuities with restricted channelling and favourable conditions for matrix diffusion *Less favourable*: Water flow in discontinuities with marked channelling and average conditions for matrix diffusion *Unfavourable*: Water flow in discontinuities with marked channelling and unfavourable conditions for matrix diffusion
Transmissivity of preferential release pathways	Minimum requirement: $T \leq 10^{-8}$ m^2/s If no empirical values available for transmissivity: average clay content ≥ 25% (for sediments, except evaporites) or geological description of rock units and general experience
	Very favourable: $T \leq 10^{-10}$ m^2/s *Favourable*: $10^{-10} < T \leq 10^{-9}$ m^2/s *Unfavourable to less favourable* (gradual scaling): $10^{-9} < T \leq 10^{-8}$ m^2/s Uncertainty and tectonic overprinting considered in the evaluation
Clay content	Minimum requirement: If no empirical values available for transmissivity (indicator 'Transmissivity of preferential release pathways'): average clay content ≥ 25% (for sediments, except evaporites) or geological description of rock units and general experience
Self-sealing capacity	Self-sealing capacity taking into account the processes to be expected under the in-situ conditions in the underground disposal zone (closing of fractures / discontinuities due to plastic/elastic deformation and swelling and disintegration of the rock matrix): *Very favourable:* Marked self-sealing capacity *Favourable:* Significant self-sealing capacity *Unfavourable to less favourable* (gradual scaling): no or only small self-sealing capacity

Such an approach may facilitate the communication with other stakeholders, for example the regulatory authority or review commissions. An example of such an application in Switzerland is shown in the Appendix, A2. In Appendix A3, a detailed application of the traffic-light system on the criteria and the relevant indicators is show. This application was made by Nagra, as part of Stage 2 of the site selection in Switzerland.

Note, that the intention of the review team is not to recommend that the exact same approach should be followed by GEUS, rather to better illustrate the potential uses of this traffic-light approach in the site selection process in Denmark.

3.6 Criteria- wording

The review team proposes that the wording of a criterion or sub-criterion is such that it identifies the issue to be addressed and evaluated, for example, "spatial extent", rather than the requirement for that particular issue. The latter should be part of the indicators used and the requirements for each of these indicators. GEUS has used this approach for most of the sub-criteria, with one minor exception, namely, "2.2 Free of erosion" should be rephrased to "Erosion" and then it should be defined for the assessment of this criterion under which conditions a site would be very suitable or suitable etc.

With respect to the sub-criterion 5.1 Conflicts of land/area/subsurface use and its classification under socio-economic conditions the review team would propose to include in the geological criteria a sub-criterion on expected conflicts of use from the geological point of view, for example resources in an area or site being evaluated. The socio-economic aspects include a variety of other criteria that are beyond the scope of "geological" evaluation.

3.7 Narrowing-down process and exclusion criteria

The criteria defined by GEUS could also be used to define exclusion regions. These can be at the large scale, as an example (not an exhaustive list):

- certain respect distance from known regional faults,
- approach to onshore environments
- natural resources – are these areas excluded under future conflict of use, exploitation of future resources
- earthquakes

With respect to earthquakes, the review team notes that this is an example of a criterion that may not help to exclude or distinguish among different areas. However, its inclusion underpins the completeness of the approach proposed by GEUS and that the relevant geological aspects have been considered.

The exclusion criteria and their application in the process, including the requirements that need to be fulfilled for an area not to be excluded, should be defined and should be applied at the initial first stage of the site selection process, i.e. the current Phase 1. It was not clear to the review team if exclusion criteria (with the exception of depth) have been or will be used in the narrowing-down process leading to the definition of suitable areas.

.

3.8 On the application of the traffic-light approach

The review team finds the introduction of the traffic light system a very useful tool to help in this screening process. The basis for its application should be the requirements that have been defined for the various criteria/sub-criteria and, if adopted, the indicators and the respective requirements as discussed in Section 3.5. The two examples mentioned in Section 3.5 and shown in the Appendix (A2 and A3) illustrate such applications.

The review team would recommend having a trial run of the traffic light system application to assess if the approach can be applied as is or aspects than can be approved.

4. Concluding remarks

The approach proposed by GEUS contains the required elements for an effective siting programme in Denmark. The review team has identified a number of potential improvements which could increase flexibility and transparency and help optimise the site selection process.

In addition to geological criteria considered in detail here, the review team noted that a number of other aspects would also need to be considered.

Finally, the review team would like to thank our Danish counterparts for their time in effective preparation for the review and their active and constructive participation in all the review meetings and wish them every success in their search for a disposal site.

References

Ernst, T., M. Fritschi, S. Vomvoris (2010): Stepwise site selection in Switzerland – Sectoral Plan: Status and outlook, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.

NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Proposals for geological siting regions for the L/ILW and HLW repositories – requirements, procedure and results), Nagra Technical Report, October 2008.

RWM (2016): National Geological Screening Guidance, Nuclear Decommissioning Authority, available at National Geological Screening Guidance - GOV.UK (www.gov.uk)

RWM (2020): Site Evaluation: How we will evaluate site in England, Nuclear Decommissioning Authority, U.K, available at https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/866407/RWM_Site_Evaluation_for_England_2020.pdf

Zuidema P., Vomvoris S. (2017): Site selection in Switzerland: Stepwise narrowing-down methodology and its application. 19720.- International High-Level Radioactive Waste Management IHLRWM 2017, "Creating a Safe and Secure Energy Future for Generations to Come—Driving Toward Long-Term Storage and Disposal Now", Charlotte NC, April 9 - 12, 2017, 632-638.

Appendix

This Appendix includes more detailed information on references made in the main report.

A1. Criteria and indicators- example

Criteria and indicators used in the site selection process in Switzerland (from Zuidema and Vomvoris, 2017)

TABLE I. Criteria for site evaluation from the viewpoint of safety and engineering feasibility

Criteria group	**Criteria**
1. Properties of host rock and of surrounding formations contributing to waste isolation	▪ Spatial extent ▪ Hydraulic barrier effectiveness ▪ Geochemical conditions ▪ Release pathways
2. Long-term stability	▪ Geologic / tectonic stability ▪ Erosion ▪ Repository-induced effects ▪ Resource conflicts
3. Reliability of geological information / conclusions	▪ Ability to characterize the host rock ▪ Explorability of the spatial conditions ▪ Predictability of the long-term changes
4. Engineering suitability	▪ Geomechanical properties and conditions ▪ Underground access and management of inflowing water

For the application of the criteria, Nagra has further defined for each criterion corresponding indicators and, for each indicator, the minimum (indispensable) requirements that have to be met as well as, in many cases, more stringent ones, which if they were met would have a further favourable impact on long-term safety and engineering feasibility. Table II summarises these indicators. Note that each indicator is presented only once, even if it was used several times in the narrowing-down process.

TABLE II. List of criteria and corresponding indicators used in the assessment process

Sectoral Plan criteria Indicators used
1.1 Spatial extent
Depth below terrain with respect to engineering feasibility*
Depth below terrain with respect to rock decompaction*
Depth below terrain with respect to erosion*
Depth below rock surface with respect to glacial scouring*
Thickness*
Distance to regional fault zones and to disturbed zones*
Lateral extent
Space available underground*

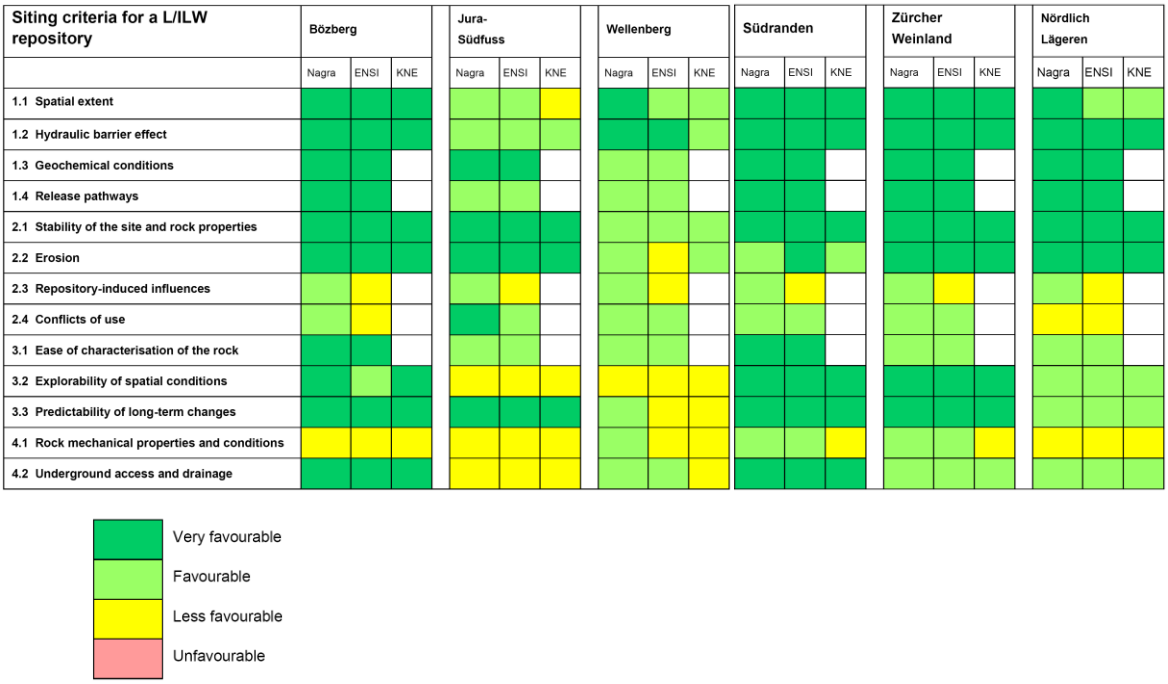
1.2 Hydraulic barrier effect
Hydraulic conductivity*
Groundwater systems
1.3 Geochemical conditions
Mineralogy
pH
Redox conditions
Salinity
Microbial processes
Colloids*
1.4 Release pathways
Type of transport pathways and structure of pore space*
Homogeneity of rock structure*
Length of release pathways*
Transmissivity of preferential release pathways*
Clay content
Self-sealing capacity*
2.1 Stability of site and rock properties
Conceptual models of geodynamics, tectonics, other processes*
Seismicity*
Conceptual models of geochemical processes
Rare geological events (volcanism)
Potential for formation of new water flowpaths (karstification)*
2.2 Erosion
Large-scale erosion over the time period being considered*
2.3 Repository-induced effects
Excavation damaged zone adjacent to underground structures
Chemical interactions
Host rock behaviour with respect to gas
Host rock behaviour with respect to temperature
2.4 Resource conflicts
Natural resources within the host rock
Natural resources beneath the host rock
Natural resources above the host rock
Mineral and thermal springs
Geothermal resources
3.1 Ease of rock characterisation
Disturbed zones
Variability of rock properties with respect to ease of characterisation*
Experience
3.2 Explorability of spatial conditions
Regional fault pattern and bedding conditions
Continuity of strata of interest
Exploration conditions underground*
Exploration conditions at the surface
3.3 Predictability of long-term changes
Tectonic regime (zones to be avoided conceptually)*
Independent evidence of long-term isolation
4.1 Rock mechanical properties and conditions
Rock strengths and deformation properties
4.2 Underground access and drainage
Geotechnical and hydrogeological conditions in overlying rock formations*
Natural gas transport (in host rock)

*: indicators of special importance to safety and engineering feasibility for the host rocks and siting regions chosen in Stage 1. These indicators play an important role in the narrowing-down process in Stage 2.

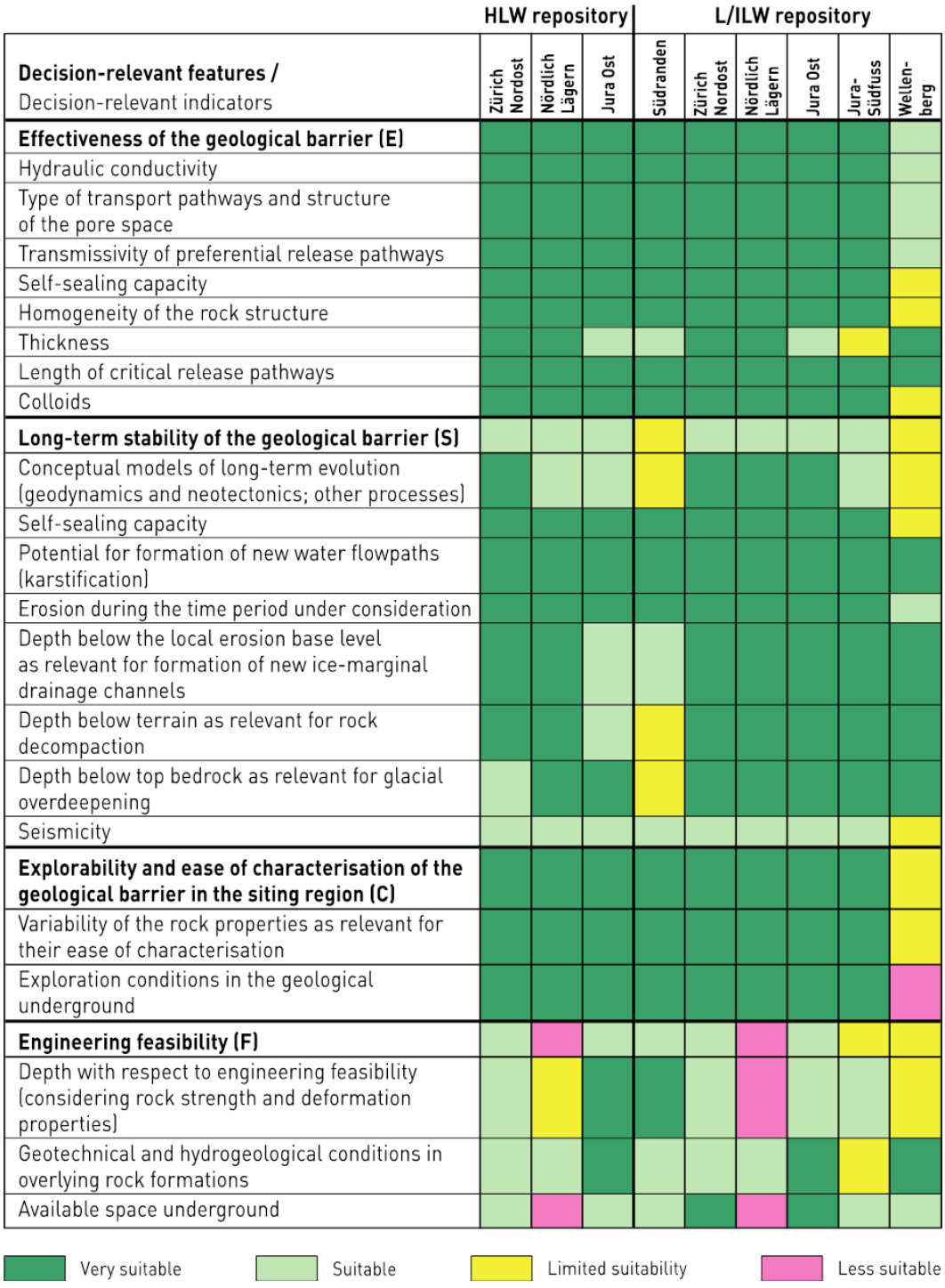
A2. Application of the criteria by different stakeholders – example

An example of the application of the criteria and the use of the traffic-light system by different stakeholders is shown in the figure below. The example is from the Swiss site selection process (siting regions, equivalent to "areas" in the Danish approach).

Nagra, ENSI (Swiss regulator) and KNE (Commission on Nuclear Waste Disposal) evaluation of the siting regions proposed by Nagra for the L/ILW geological repository. The evaluation is shown against the safety and technical criteria in the Sectoral Plan (from Ernst et al, 2010).



A3. Application of the traffic-light system at the indicator level – example

The example here shows the application of the traffic-light system at the level of the relevant indicators in the site selection in Switzerland at Stage 2 (narrowing down to at least two sites.

The figure below shows the safety-based evaluation of the siting regions according to the criteria and decision-relevant features and indicators (Zuidema and Vomvoris 2017, Fig 4).