

En geologisk screeningundersøgelse af potentielle energiø områder i Dansk Nordsø

Matthew Owen, Paul Knutz & Lasse Tésik Prins

En geologisk screeningundersøgelse af potentielle energiø områder i Dansk Nordsø

Rapport udført for Energistyrelsen

Matthew Owen, Paul Knutz & Lasse Tésik Prins

Indholdsfortegnelse

1.	Resumé	3
2.	Introduktion	5
2.1	Regional geologiske forhold.....	6
2.1.1	Geologiske rammer for området.....	6
2.1.2	Prækvartæret	7
2.1.3	Kvartæret	7
2.1.4	Analoge banke områder	9
3.	Metoder	10
3.1	Tilgængelige data	10
3.2	Seismiske data.....	11
3.2.1	Processering af single-kanals sparker data.....	11
3.2.2	Processering af chirp data.....	11
3.3	Vurdering af geologiske prøver	12
4.	Resultater	13
4.1	Seismisk data.....	13
4.1.1	Geologisk kontekst baseret på regionale seismiske profiler.....	14
4.1.2	Seismiske enheder og karakteristika baseret på sparker data	14
4.1.3	Indikationer på de overfladenære forhold fra Chirp data	20
4.2	Kerne data	21
5.	Diskussion	23
5.1	Områdets geologiske udvikling	23
5.2	Sammendrag af de geologiske hovedelementer	23
5.2.1	Saltdiapirer	24
5.2.2	Glaciale dannelser	24
5.2.3	Banke systemer	25
5.3	Geotekniske implikationer	27
5.4	Videnshuller i den geologiske forståelse af området.....	29
6.	Konklusioner og videre arbejdsprogram	30
6.1	Områdets geologiske egnethed til Energi-Ø udvikling	30
6.2	Forslag til fremtidigt arbejdsprogram.....	31
7.	Litteratur	32

Figurliste

Figur 1. Placering af foreslåede energiøer i den danske del af Nordsøen.....	5
Figur 2. Dybden til top kalk overfladen (fra Vejbæk et al. (2007)), med overfladenære forhøjninger som indikerer tilstedeværelse af diapirer.....	7
Figur 3. Oversigtsmodel af den kvartære geologi i den danske Nordsøen tæt på udpegningsområdet (Jensen et al., 2011).....	9
Figur 4. Tilrådighed værende data i undersøgelsesområdet.	10
Figur 5. Oversigt over seismiske profiler vist på de efterfølgende sider.	13
Figur 6. Oversigt over den regionale geologi ud fra UHR airgun seismik data. Se Appendix A for større format af figurer.	14
Figur 7. Nord til syd single kanal sparker seismik profil som krydser både den nordlige og den sydlige foreslåede energiø placering.....	16
Figur 8. Vest til øst single kanal sparker seismik profil som krydser den nordlige foreslåede energiø placering.	16
Figur 9. Vest til øst single kanal sparker seismik profil som krydser den sydlige foreslåede energiø placering.	17
Figur 10. Eksempel på glacialtektoniske deformationer 5 km øst for den foreslåede nordlige energiø placering	19
Figur 11. Eksempel på chirp data fra den sydlige (A.) og nordlige (B.) foreslåede placering.	20
Figur 12. Sedimentsammensætningen i kerner i nærheden af de foreslåede energiø placeringer.	22
Figur 13. Lokalisering af forventede områder med glacitektonisk aktivitet (A.) og kanal enheder (B.) baseret på foreløbig tolkning.	25

Tabelliste

Tabel 1. Sammenfatning af vibrationskerner i nærheden af foreslåede nordsø energiø placeringer (i ETRS 89 UTM 32N).	21
Tabel 2. Sammenfatning af nøgleparametre med potentiel indflydelse på funderbarhed. Fejl! Bogmærke er ikke defineret.	

Bilag

Bilag A – A3-format seismiske eksempler

Bilag B – 3D animation af seismiske og bathymetriske data

Bilag C – Kerne beskrivelser fra interesseområdet

1. Resumé

Energistyrelsen har anmodet GEUS om at foretage en geologisk screening af et relativt lavvandet bankeområde i Nordsøen ud for Thorsminde, med det formål at etablere kunstige energiøer der skal fungere som knudepunkter for havvindmøller.

Interesseområderne ligger på prækvartære geologiske formationer med en historie der går tilbage til Nordsøbassinets oprindelse. I hovedtræk kan nævnes (1) salt lag der blev afsat i et varmt klima under øvre Perm (257-254 Mill. år siden), (2) kalkstens-aflejringer afsat igennem Øvre Kridt (100-66 Mill. år siden) efterfulgt af (3) en marin lagpakke i form af lerede og sandede enheder. Herover, ligger kvartære aflejringer (sidste 2.7 Mill år) afsat under istider og mellemistider, der danner basis for de nuværende banke-formationer, formentlig bestående af Holocænt sand og grus. De dybere liggende lag, så som saltdiapirer kan have en stor effekt på nutidens geologi.

Vurderingen bygger på tilgængelige publikationer og tolkninger af udvalgte geologiske og geofysiske data. I den forbindelse er der udarbejdet en foreløbig database med seismiske data samt sedimentkerner fra interesseområdet. Data dækningen i området er sparsom, men der findes dog enkelte seismiske linjer, der krydser de potentielle ø-placeringer. De seismiske data blev processeret for at opnå optimal datakvalitet til støtte for den aktuelle undersøgelse. For udvalgte sedimentkerner er der foretaget en vurdering baseret på de eksisterende sedimentologiske logs.

Der er identificeret en række geologiske forhold, der har betydning for den foreslåede placering af energiøer. Disse inkluderer: (i) en salthorst beliggende nordøst for den nordlige placering samt en mulig afledt salt struktur umiddelbar syd herfor, (ii) glacialtektoniske påvirkninger af den yngre lagserie nord og øst for placeringerne, samt (iii) kvartære erosionskanaler der helt eller delvist gennemskærer de to områder. I forbindelse med de ovenstående forhold er der indikationer på sedimentmobilitet, forkastninger/frakturer og generel heterogenitet i de underliggende lag.

De geologiske forhold identificeret i vores screening af området kan have betydelige tekniske konsekvenser, i betragtning af sedimentbelastning, pilotering og øvrige processer forbundet med konstruktionen af energiøer.

Især kan der være en risiko for overtryk, sideværts væskestrømming, flydendegørelse af dybereliggende sedimenter og forsækning af undergrunden langs svaghedszoner (overfladenære forkastninger). Vi anbefaler at der foretages en grundig og kvalificeret analyse af disse geotekniske aspekter.

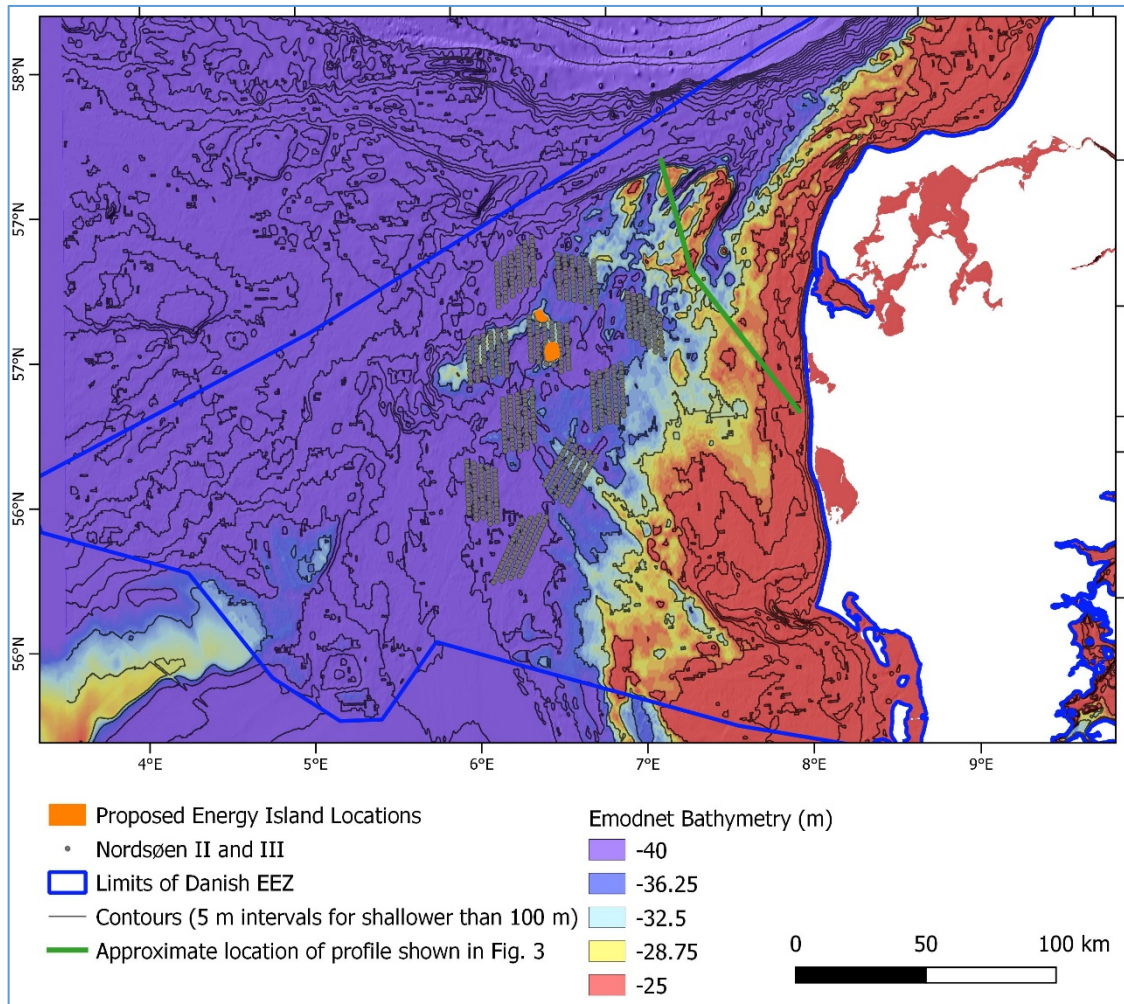
De sparsomme data i området medfører betydelige videnshuller, herunder manglende dækning af de dybere Kvartære og PræKvartære lag, baseret på højopløselig seismiske data og geotekniske informationer fra borer. Flere af de ovennævnte geologiske risiciemener kan således være placeret imellem de eksisterende seismiske profiler. Af denne årsag er det ikke på nuværende tidspunkt muligt at foretage en egentlig kortlægning af de geologiske og geotekniske forhold. Ud fra det begrænsede datasæt, der ligger til grund for denne rapport, virker den sydlige placering dog som værende bedre egnet til placering af en energiø, end den nordlige lokalitet, der er placeret umiddelbart over en udfyldt erosions kanal.

Vi er ikke af den opfattelse at de observerede geologiske forhold giver anledning til store problemer. Dog bør der foretages en dedikeret dataindsamling og kortlægning af de geologiske lag, fra toppen af kalk-overfladen til havbund, med henblik på de-risking af de geologiske og geotekniske forhold.

Vi anbefaler at der gennemføres en detaljeret havbundsundersøgelse baseret på højopløselig multikanal seismik, kombineret med enkelte dybe borer (80-200 m), der kan give oplysninger om alder, lithologi, og geotekniske egenskaber af især den kvartære lagserie. Yderligere bør der ske en screening af de tilstødende områder for at vurdere deres egnethed til udvikling af storskala offshore vindfarme.

2. Introduktion

GEUS er af Energistyrelsen blevet bedt om at give en geologisk vurdering af en mulige placering af en kunstig energiø i den danske del af Nordsøen (Figur 1). Øen skal fungere som knudepunkt for store havvindmølleparker i de tilstødende områder og muligvis konstrueres på basis af caissonmetoder. Konstruktionen af energiøer er planlagt til at stå færdig i 2030.



Figur 1. Foreslåede placeringer af en energiø i dansk Nordsø ca. 100 km vest for Thorsminde. Nordsøen II og III er områder til finscreening for placering af nye havvindmølleparker tilkøbet energiøer/hubs. Havbundsdybder baseret på Emodnet. Grønne linje angiver placering af profilet på figur 3.

2.1 Regional geologiske forhold

2.1.1 Geologiske rammer for området

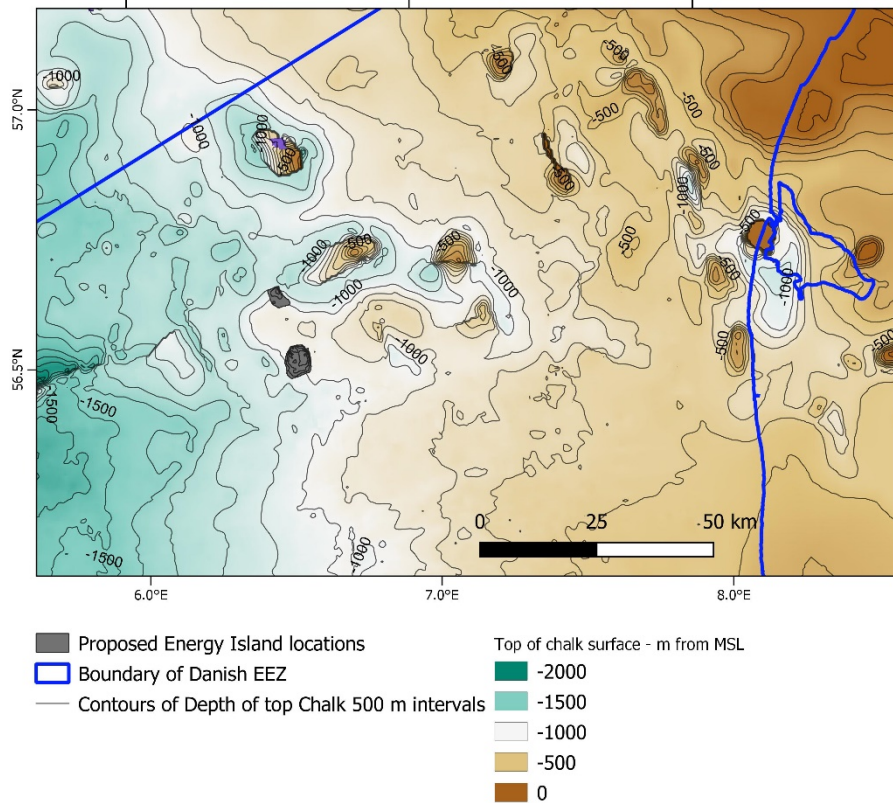
Området er beliggende over den nordlige rand af det Dansk-Norske Basin, der mod syd afgrænses af Ringkøbing-Fyn Højderyggen. De ældste aflejringer i området er formentlig af Nedre Perm alder (Rotliegendes sandsten, 263-258 Mill. år). Herpå følger en Øvre Perm lagserie (Zechstein, 257-254 Mill år), der er præget af salt aflejringer og som på grund af saltbevægelser viser store tykkelsesvariationer; 200 til >1800 m på salt horst lokaliteter (Peryt et al. 2010). I den øvre del af Kridttiden (100-66 Mill. år) var området dækket af hav med en rig produktion af kalkskallede organismer, der resulterede i dannelsen af vidt udbredte kalkstensformationer, også kendt fra blotninger på land.

I det tidlige del Kænozoikum (sidste 65 Mill år) ses et markant lithologisk skift fra kalkstensaflejringer til klastiske sediment, primært lerede enheder med sandede indslag afsat i marine og deltaiske aflejringsmiljøer (Huuse et al. 2001; Rasmussen et al., 2005). Igennem den tidlige til mellemste del af Kænozoikum foregår transporten af sediment ind i Nordsø basinet primært fra det skandinaviske område, dvs fra øst og nordøst. Under Neogen perioden, for ca. 5 Mill år siden, skifter sedimenttilførslen til sydligt beliggende kildeområder. Disse omfatter Eridanos deltasystemet, der udsprang fra det nuværende østersøområde, og det kvartære paleo-Elbe system (Overeem et al., 2001; Ottesen et al., 2018).

Den kvartære lagserie, der udgør den yngste geologiske enhed i Nordsøen, består mest af glaciale aflejringer afsat i pro- og subglaciale aflejringsmiljøer, vekslende med marine finkornede sediment dannet under perioder med stigende havspejl (interglaciationer). Afledning af smeltevand fra indlandsisen har ført til dannelsen af udbredte kanalsystemer i nordsøområdet, der ofte eroderer de underliggende prækvartære formationer (Huuse et al., 2001; Prins et al., 2020). Den heterogene sammensætning af de kvartære lag medfører en bred vifte af geotekniske egenskaber, afhængig af deres aflejrings- og begravelseshistorie. Efter tilbagetrækningen af den sidste iskappe for omkring 12.000 år siden (starten af Holocæn epoken) blev området gradvist landfast og der udvikledes et borealt landskab præget af marsk og moser, dræneret af udbredte flodsystemer (Cotterill et al., 2017b; Coughlan et al., 2018; Hepp et al., 2017; Jensen et al., 2011; Prins og Andresen, 2019). Igennem tidlig Holocæn steg det globale havniveau, så der mellem 9.000 og 8.000 tusinde år før nutid indtrådte marine forhold i den centrale del af Nordsøen (Sturt et al., 2013). Siden da har Nordsøområdet været under marine forhold, præget af havstrømme, bølgeenergi samt tidevand (især den sydlige del). Afsætning af sand forgår primært langs de kystnære revlesystemer og lavtliggende banker præget af strøm- og bølgeenergi. Den nordgående Jydske Strøm spiller i dag en afgørende rolle for den kystnære sediment-transport langs Jyllands vestkyst (Anthony og Leth, 2002). Aflejring af finkornet materiale forekommer primært i de dybere liggende centrale dele af Nordsøen (Bockelmann et al., 2018).

2.1.2 Prækvarteret

Toppen af Kridtpakken er blevet kortlagt i flere undersøgelser (Huuse, 1999; Vejbæk et al., 2007). Dybderne (1000-1200 m) antyder, at kridtoverfladen umiddelbart ikke vil påvirke konstruktionen af energiøer i de udpegede områder (Fig. 2). Imidlertid, har saltlegemer på nærliggende lokaliteter løftet kridtoverfladen betragteligt, hvilket muliggør forekomsten af dislokerede kalkflager i de kvartære enheder.



Figur 2. Dybde til kalkoverfladen (Vejbæk et al., 2007). Semicirkulære områder med store dybde forskelle repræsenterer salt horste.

Figur 2 viser et geologisk kort af kalkoverfladen, som mange steder er præget af salt diapirer der har forårsaget opløft og deformation af den overliggende lagserie. Densitetsbetingede saltbevægelser i Nordsøregion er associeret med flere tektoniske begivenheder siden Trias, men var især markant under mellem-sen Kænozoikum, formentlig betinget af vægten af klastiske sedimentpakker afsat på relativ kort tid (Rank-Friend and Elders, 2004; Knutz, 2010). Saltstrukturer kan have betydning for integriteten af den yngre lagpakke, herunder forkastninger/frakturer, vertikale væske bevægelser og erosionsdannelser.

2.1.3 Kvartæret

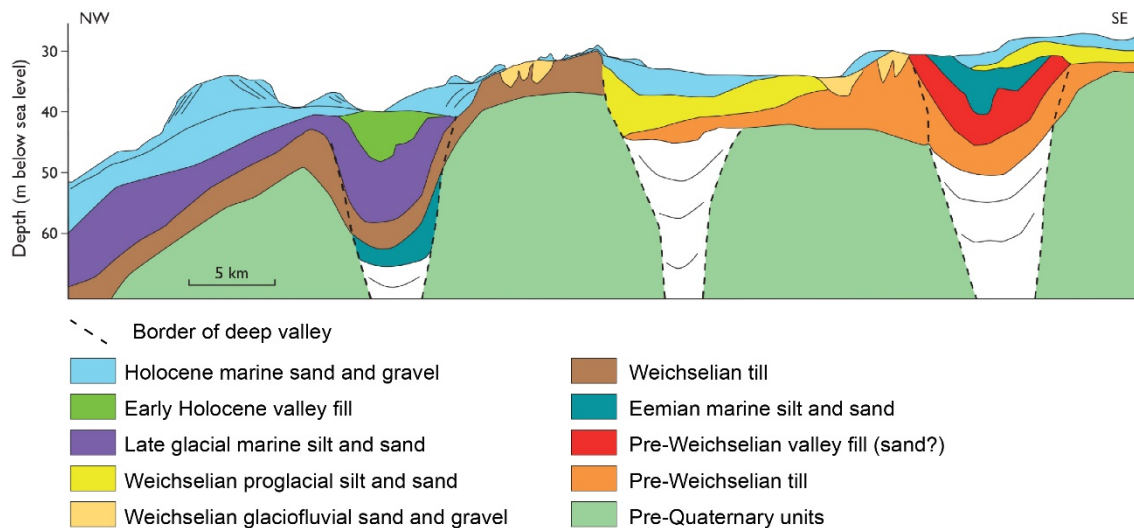
Den kvartære lagpakke er i området omkring de foreslåede energiø placeringer mellem 200-300 m tyk (Nielsen et al., 2008). I løbet af Kvartær perioden blev Nordsøen i flere perioder dækket af gletsjere (Houmark-Nielsen, 2011), der især under de seneste glaciationer (Elster, Saale, og Weichsel) påvirkede den geologiske lagserie i form af erosion, omlejring af sedimenter, dannelse af tunneldale og glacialtektonisk deformation (Pedersen, 2000; Pedersen

og Boldreel, 2017; Phillips et al., 2018). Således er der langs den jyske vestkyst registeret 3 istektoniske komplekser hvoraf de 2, ved Jammer Bugt og Holmslands Klit (Pedersen og Boldreel, 2017), kan have påvirket det potentielle energiø område. Ud over at påvirke sedimenternes geotekniske egenskaber (Cotterill et al., 2017a) kan de istektoniske lagforskydninger medføre ændringer i det postglaciale aflejningsmiljø, f.eks. gennem dannelsen af lokale sedimentationsbassiner (Pedersen og Boldreel, 2017).

Forekomsten af begravede og åbne tunneldale er blevet kortlagt både offshore og onshore (Andersen et al., 2012; Huuse og Lykke-Andersen, 2000; Jørgensen og Sandersen, 2006) og viser at tunneldalsdannelse generelt er associeret med områder der tidligere var dækket af den Skandinavisk Iskappe. Sedimenterne der udfylder tunneldalene, er generelt heterogene og kan variere fra moræne til velsorteret sand/grus og lakustrine-marine lerforekomster (O Cofaigh, 1996). Afsætninger indenfor fluviale kanaler er ligeledes meget variable, men indeholder ofte velsorterede grovklastiske sedimenter (Gibling, 2006) og kan stedvis være organiskrige i form af tørvedannelser (Coughlan et al., 2018; Hepp et al., 2017).

GEUS har gennemført adskillige overfladenære geofysiske og geologiske undersøgelser i den danske del af Nordsøen, især med fokus på de lavtliggende områder (Horns Rev, Jyske Rev, Lille Fisker Banke) (Jensen et al., 2008; Jensen et al., 2011). I forundersøgelser til Horns Rev II vindmøllepark blev der identificeret istektoniske deformationsstrukturer under havbunden, hvor Miocæne aflejringer sandsynligvis har fungeret som decollement overflade (Jensen et al., 2008). Her viser anvendelsen af Cone Penetrometer Tests den store variation i de geotekniske forhold forbundet med overskydningslag.

Længere mod nord, tættere på interesseområdet for energiø udvikling, har Jensen et al. (2011) fremlagt en geologisk model for de overfladenære lag (Fig. 3). De geologiske enheder omfatter prækvartære aflejringer, ældre istidsafsætninger, aflejringer fra Eem-havet (sidste interglacial), moræne samt fluviale og proglaciale sedimenter dannet under Weichsel-istiden, overlejret af senglaciale og Holocæne marine sedimenter. Området krydses af dybt indskårne dale, udfyldt af glaciale og interglaciale aflejringer. Ifølge modellen kan banke området, som er foreslået til placering af energiøer, muligvis være sammenfaldene med hovedopholdslinien for det sidste isfremstød under Weichsel-istiden. Som mekanisme for de recente bankedannelser (med udgangspunkt i Jyske Rev og Lille Fisker Banke) peges på hvirvelformede tidevandsstrømme der under tidlig Holocæn kan have fungeret som sedimentfælder.



Figur 3. Kvartærgeologisk oversigtsmodel for den danske del af Nordsøen (Jensen et al., 2011). For placering se figur 1.

2.1.4 Analoge banke områder

Nordsøområdet, i omegnen af de foreslåede energigø placeringer, er præget af en forholdsvis flad havbund, med banker af ukonsoliderede, mobile sedimenter, der hviler på istidsaflejringer (typisk moræne) stedvist indskåret af kanaler (Anthony og Leth, 2002; Huuse et al., 2001; Nielsen et al., 2008). Lithologien kan ydermere indeholde ler og sand, såvel som kalksten, i form af opskubbede flager.

Lignende fysiografiske miljøer findes andre steder i Nordsøregionen, dog uden at nøjagtige analoger kan udpeges. I den sydlige del af Nordsøen findes store sandbanker, der dækker over britisk, hollandsk og belgisk sokkel (Cameron et al., 1992; Hulscher og van den Brink, 2001). Disse bankesystemer påvirkes af nutidige kraftigere tidevandsstrømme, og lavere vanddybde end det er tilfældet for bankedannelser i den nordlige del af dansk sektor (f.eks. Jyske Rev og Lille Fisker Banke), og som sådan må en større sedimentmobilitet forventes for de sydlige bankeområder. De nordlige banker kan imidlertid være dannet tidligere i Holocæn af tidevandsstrømme, hvor havniveauet var lavere.

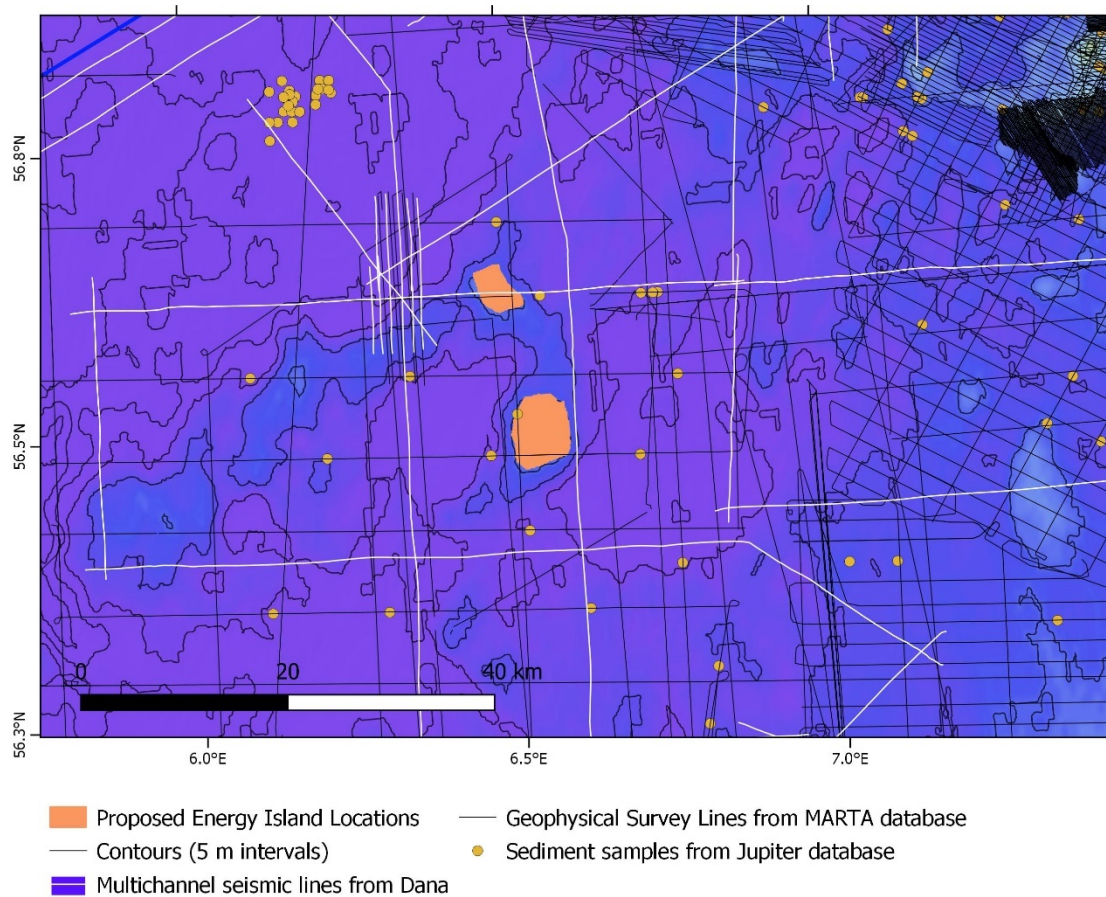
Havbundsundersøgelser i forbindelse med offshore vindmølleparker på Dogger Banke i Britisk sektor har givet detaljerede glacialtektoniske oplysninger (Cotterill et al., 2017b; Phillips et al., 2018). Deformationer i dette område er et resultat af sammenløbende isstrømme afledt af den fennoskandiske og den britisk-irske iskappe (Roberts et al., 2018), og er derfor ikke en direkte analog til paleo-is-dynamiske forhold i dansk Nordsø. Ikke desto mindre kan oplysninger, der vedrører de geotekniske implikationer for glacialtektoniske påvirkninger være af stor informationsværdi for større konstruktioner i andre havområder (Cotterill et al., 2017a).

3. Metoder

3.1 Tilgængelige data

Til denne vurdering har vi anvendt en kombination af offentliggjort litteratur, seismiske data og sedimentkerne beskrivelser. En oversigt over disse data er vist i Figur 4.

Data er generelt af god kvalitet, og der findes enkelte seismiske linjer og kerneprøver der krydser eller er placeret på de foreslåede placeringer. Det skal dog bemærkes, at der i det eksisterende grid er omkring 5-8 km mellem de seismiske linjer, og at der ikke findes stratigrafiske borer der kan verificere de seismiske tolkninger i umiddelbar nærhed af Energiø placeringerne. De efterfølgende tolkninger (se Resultater) er derfor behæftet med usikkerhed og skal betragtes som provisoriske.



Figur 4. Tilgængelige data indenfor interesseområdet.

3.2 Seismiske data

Denne vurdering anvender tre typer af seismiske/akustiske data: Ultra-High-Resolution (UHR) multikanal seismik m. luft-kanons kilde (1996), singlekanals sparker seismik (GEUS, 2012) og højfrekvent sedimentpenetrerende ekkolod af "chirp" typen (GEUS, 2012). Af disse datatyper sparker og chirp data processeret ved brug af GeoSuite Allworks som beskrevet nedenfor.

3.2.1 Processering af single-kanals sparker data

Data blev importeret til processerings-værktøjet og behandlet som angivet i nedenstående trin. Proceduren involverer tolkning af havbunden.

- Infinite Impulse Response (Bandpass) filter, low cut-off at 200 Hz, high cut-off 2000 Hz
- Median Filter
- Constant gain of 4 dB
- Trace equalisation from seabed with a Root Mean Squared (RMS) scaling base
- Normalisation
- Automated Gain Control (AGC)
- Trace mixing of adjacent traces with a weighting of 50, 100, 50 for the previous, current and next shot respectively
- A time varied gain from seabed, with 0 dB at seabed and 13.84 dB at end of trace (150 ms TWTT)
- Swell filter over 15 traces.

3.2.2 Processering af chirp data

Data blev importeret til processeringsværktøjet og behandlet som angivet i nedenstående trin. Proceduren involverer tolkning af havbunden.

- Median Filter
- Application of a constant gain at 5 dB
- Trace equalisation from seabed with a Root Mean Squared (RMS) scaling base
- A time varied gain from seabed, with 0 dB at seabed and 13.84 dB at end of trace (217 ms TWTT)
- Swell filter over 15 traces.

Efter processering blev datasættene eksporteret i SEG-Y format og importeret til IHS Kingdom (seismisk visualiserings- og tolkningsværktøj) til en seismisk stratigrafisk analyse.

Dybde skala (y-aksen) på de seismiske profiler er angivet i tovejs tid (den tid det tager for en seismisk puls at nå fra lyd kilden til den reflekterende overflade og tilbage til overfladen). Medmindre andet er angivet, er dybder i meter estimeret på basis af en konstant sedimenthastighed på 2000 m/s, dvs. et interval på 0.1 s ~ 100 m. Usikkerheden af denne simple omregning fra tovejs tid til meter stiger med dybden.

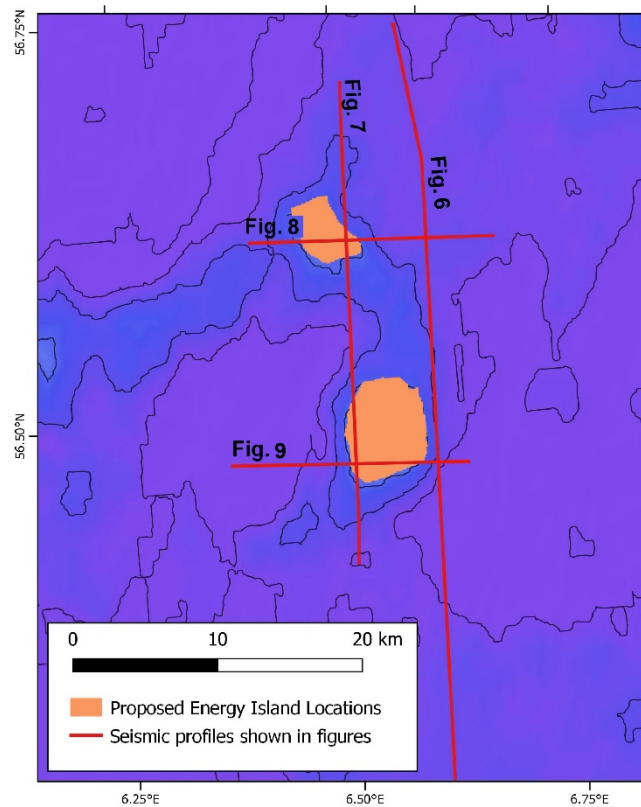
3.3 Vurdering af geologiske prøver

På basis af GEUS Jupiter-databasen blev tilgængelige sedimentprøver, kerner og borehuller identificeret indenfor interesseområdet. Der eksisterer ingen borehuls-information i området, men en del vibrationsboringer på op til 6 m længde, indsamlet i 2012, er tilgængelige (Fig. 4). Kernebeskrivelser, i form af sedimentologiske logfiler, blev downloadet og kategoriseret for relevante geologiske parametre (se afsnit 4.2).

4. Resultater

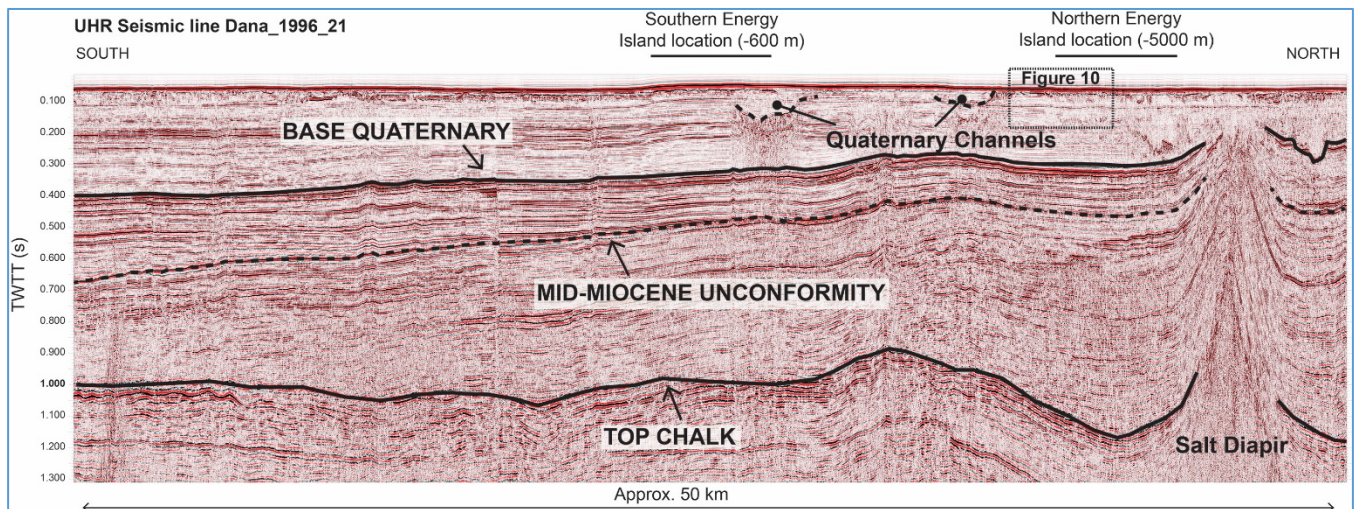
Her præsenteres et overblik af de seismiske informationer med fokus på bestemte geometriske karakterer og dernæst en vurdering af kerne-lithologiske informationer fra interesseområdet.

4.1 Seismisk data



Figur 5. Detaljekort der angiver positionen af seismiske profiler vist i de følgende figurer.

4.1.1 Geologisk kontekst baseret på regionale seismiske profiler



Figur 6. Regional seismisk profil (UHR) med tolkninger der viser den geologiske lagfølge. Se Bilag A for en højopløselig version af billedet.

Figur 6 vises et nord- til sydororienteret UHR-profil, der tangere de foreslåede energiø områder (se figur 5 for placering). På de foreslåede energiø lokationer udgør den kvartære lagserie de øverste 250-280 m under havbunden. Den kvartære lagserie indeholder mindst to erosionsdannelse, tolket som smeltevandskanaler, beliggende under eller i umiddelbar nærhed af energiø lokaliteterne.

Under kvartæret erkendes ældre Kænozoiske enheder, sandsynligvis overvejende Neogene marine sediment enheder (Huuse et al., 2001; Rasmussen et al., 2005). Toppen af Kridt-lagserien tolkes ved en diskordant flade der afgrænser en serie kraftige reflektorer i dybder på ca. 1 s twt (≥ 1000 m). I den nordlige ende af profilet ses tydeligt en diapir struktur relateret til salt bevægelser. Hen imod diapirens apex ses en tiltagende opad rettet deformation af de Kænozoiske/Neogene lagpakker. Det ses at den kvartære enhed tynder ud henover diapirstrukturen, men på apex lokaliteten er kvartærpakkens interne reflektioner ikke erkendbare (det seismiske signal fremstår kaotisk).

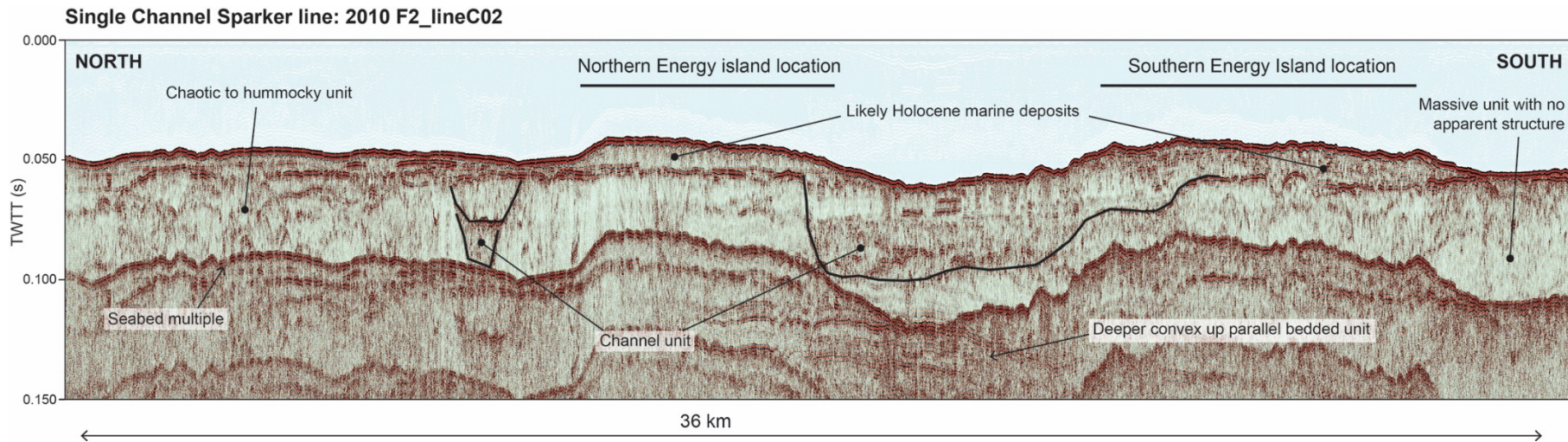
Syd for diapirstrukturen ses en opbuling på kalk-overfladen, og fra bulens toppunkt udspringer en vertikal forstyrrelse, en "skorsten", der påvirker den overliggende lagfølge (Fig. 6). Indenfor denne "skorsten" ses der tegn på "pull-up" på reflektorer i den Kænozoiske pakke, f.eks. Intra-Miocæn og Basis-Kvartær horisonten. Den form for seismiske karakteristika er typisk forbundet med lokale ændringer i seismiske hastigheder, der kan skyldes tilstedeværelsen af kompakte, lav-porøse sediment, f.eks. karbonat-cementeret sandsten, i de øvre lag (Løseth et al., 2009). Selve opbulingen kan muligvis skyldes saltbevægelser under diapirdannelse, i så fald benævnt som en "turtle" struktur. Disse fænomener kan medføre forkastninger og vertikal fluid migration i de overliggende lag (Morh et al., 2005; Peel, 2014).

4.1.2 Seismiske enheder og karakteristika baseret på sparker data

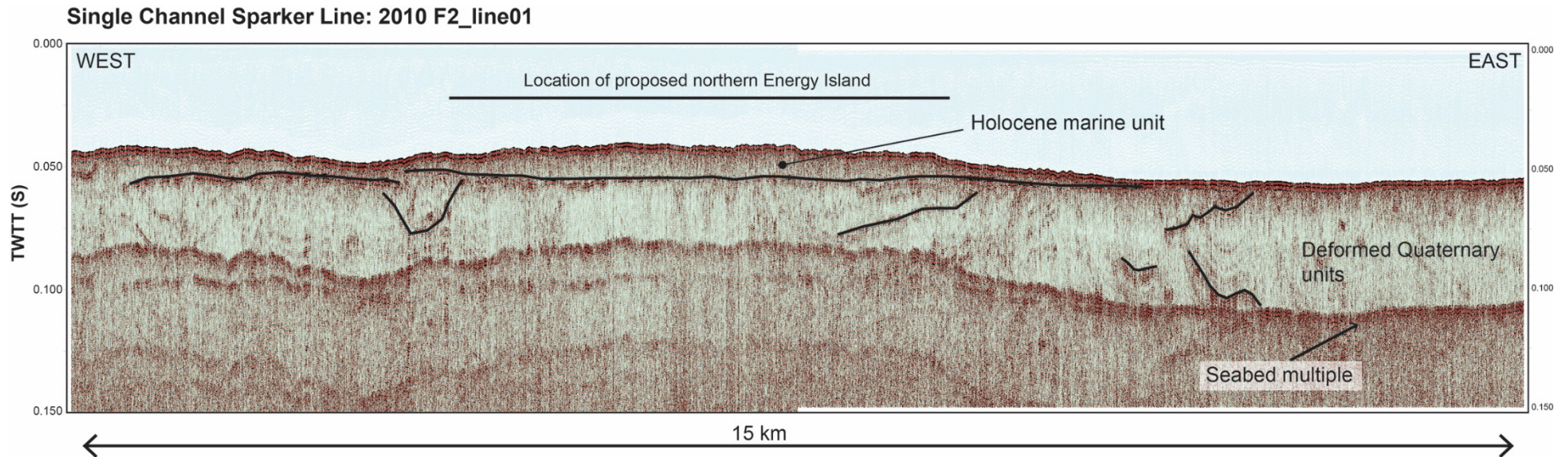
Figur 7-9 viser detaljerede seismiske profiler gennem de to foreslåede energiø placeringer. Da det er enkelt-kanal-data, påvirkes det seismiske billede af havbundsmultipler (fremstår

tydeligt i dybdeintervallet mellem 70-130 ms). Imidlertid, kan der mellem havbundsreflektionen og 1. multipel erkendes en række aflejningsformer og interne erosionsdannelse i den Kvartære lagpakke.

I de seismiske profiler fremstår den yngste lagpakke som en veldefineret, semitransparent enhed med linseformede geometrier der udgør bankedannelserne på havbunden (Fig. 7-9). De linseformede sedimentlegemerne viser maksimum tykkelse på mellem 12-20 m og tolkes som Holocæne aflejringer af overvejende sandet karakter (Jensen et al., 2011). Afgrænsningen mod de underliggende kvartære lagpakker er oftest tydelig og med en generel horisontal geometri (Fig. 9). Afvigelser fra denne ensartede karakter ses i områder med underliggende erosionsdannelse (se nedenstående), hvor basis for de Holocæne sedimentlegemer er dårligt defineret (Fig. 7).

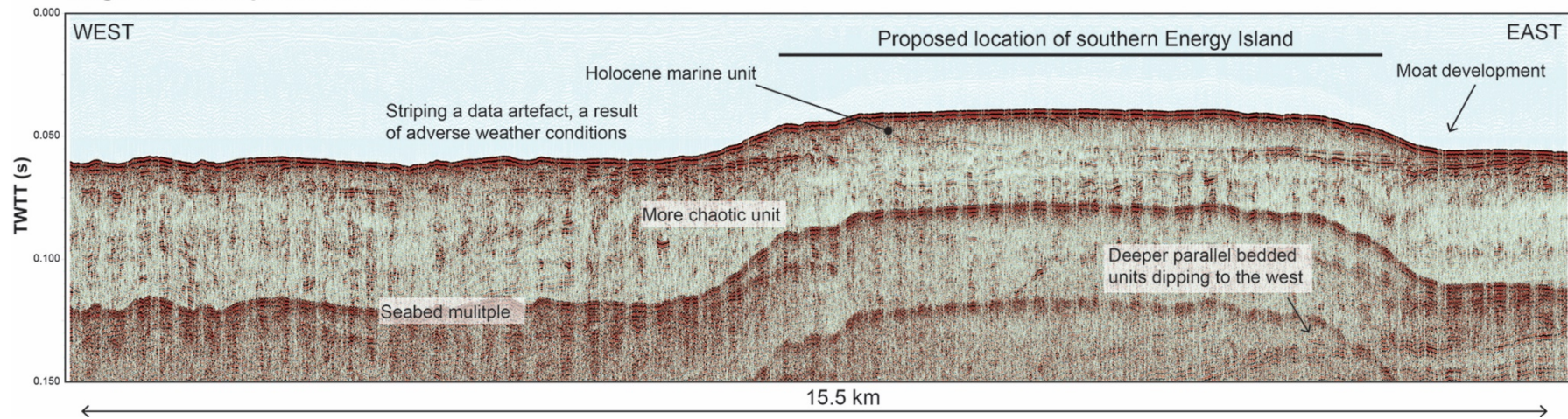


Figur 7. Nord-syd orienteret sparker profil der gennemskærer banke-systemet umiddelbart øst for de potentielle energiø lokaliteter.



Figur 8. Vest-Øst sparker profil der gennemskærer den nordlige energiø lokalitet.

Single Channel Sparker Line: 2010 F2_line02



Figur 9. Vest-Øst sparker profil der gennemskærer den sydlige energiø lokalitet

På basis af det nord-syd gående profil vist i Figur 7, kan der erkendes mindst to områder med erosionsdannelse tolket som glaciale smeltevandskanaler. Den seismiske tolkning viser et større, begravet kanalsystem med en tilsyneladende lateral dimension på mindst 5 km (dog baseret på kun et enkelt profil), der underlejrer området mellem de potentielle energiø lokaliteter. Kanalerne skærer sig ned i en kvartær enhed, der synes at have en større udbredelse i området. Enheden er karakteriseret ved et manglende til svagt refleksionsmønster, dog med laterale variationer. Således kan der i den nordlige sektion af Fig. 7 erkendes uregelmæssige mønstre, mens Kvartær enheden i den sydlige del fremstår som massiv.

Figur 8 viser et vest til øst tværsnit over den nordlige energiø position. Den øverste bankedannende enhed fremstår tydelig med en veldefineret nedre afgrænsning. En mulig kanalenhed kan svagt erkendes, der eroderer kvartær enheden under bankeformationens vestlige flanke. Umiddelbart øst for den foreslåede energiø placering er kvartær enheden præget af foldede og deformerede refleksionsmønstre.

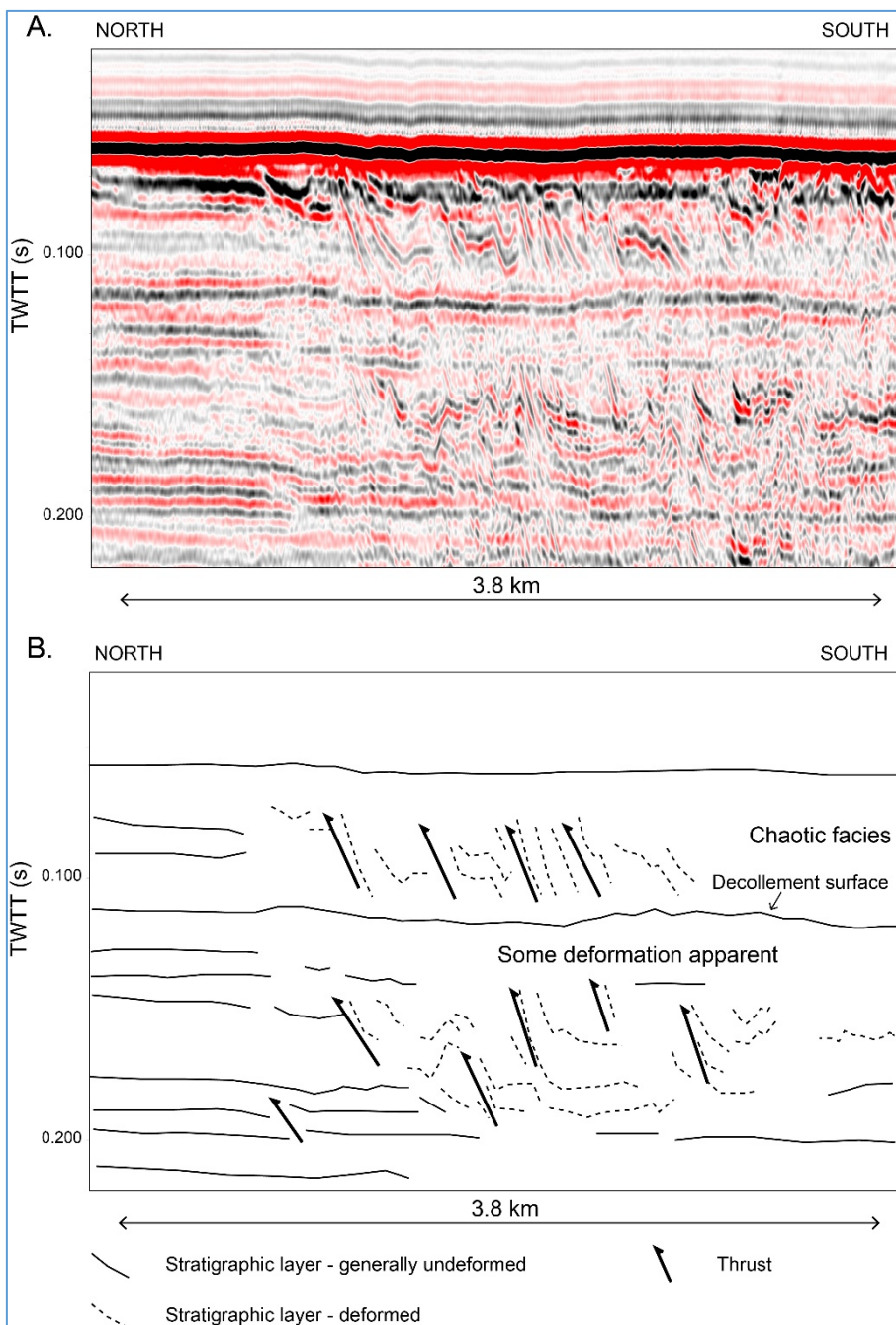
Figur 9 viser et vest til øst profil over den sydlige energiø position. Banke-formationen er her tydeligt defineret og fremstår med en relativ jævn og flad overflade, samt en tydelig basal refleksion under flankerne. Det noteres at havbunden fremtræder svagt konkav ind mod bankens østlige flanke, som kunne antyde et strøm-dannet trug. Den underliggende kvartære enhed optræder generelt med kaotiske refleksionsmønstre, dog erkendes i den østlige og dybere del af profilet (under havbundsmultiplen), en serie af paralleltorienterede hældende lag (se også bilag A).

Glacialtektonik påvirkninger

Det ses ofte at kvartærgeologien i Nordsøen er påvirket af glacialtektonik, dvs. at den sedimentære lagserie er deformeret forårsaget af flydende, og til dels bundfrosne, ismasser. Som beskrevet i kapitel 2.1, angiver regionale studier, at interesseområdet kan være påvirket af disse processer.

Figur 10 viser et detaljeret udsnit fra det nord-syd-gående UHR seismiske profilet (Fig. 6). På denne lokalitet, ca. 3 km øst for interesseområdet, ses deformerede og skråtstillede lag i den overfladenære geologiske lagserie, der tolkes som overskydninger forårsaget af istryk, tilsyneladende fra en nord eller nordøstlig retning. Dette deformationsområde kan også erkendes, omend mindre tydeligt, i den østlige del af sparker profilet, vist i figur 8.

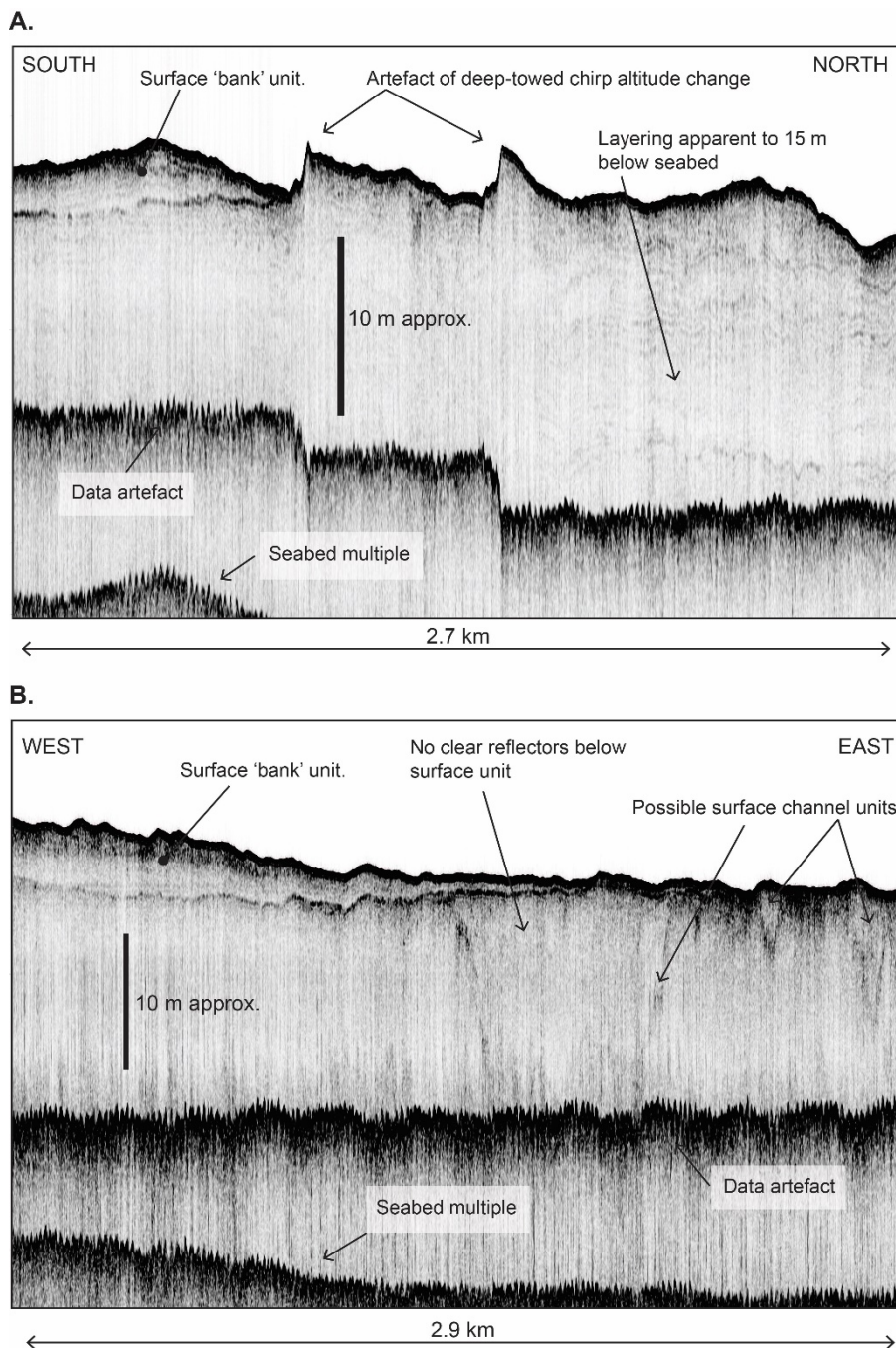
Den øvre grænse for deformationsområdet skjules af den kraftige havbundsrefleksion på UHR-profilet, og kan således ikke defineres præcist. I dybden strækker den glacial-tektoniske påvirkning sig til 0.2 s twt, svarende til omtrent 200 m, mens den laterale udstrækning er på mindst 2 km (Fig. 10). Den seismiske lagstilling indikerer at der formentlig er tale om to separate istektoniske hændelser. Udover det viste eksempel, indikere de seismiske data mulige glacialtektoniske komplekser længere mod nord (se figur 13 for et kort over placeringer).



Figur 10. Eksempel på glaciatektonisk deformation ca. 3 km øst for de forslåede energiø lokaliteter. Sektionen repræsenterer et detaljeret udsnit af UHR-profilet i Figur 6.

4.1.3 Indikationer på de overfladenære forhold fra Chirp data

Figur 11 viser to eksempler på højfrekvente chirp data, indsamlet af GEUS (2012) indenfor interesseområdet. Denne datatype indeholder detaljerede informationer om selve havbundens beskaffenhed (hård-blød) samt de mest overfladenære sedimenter (typisk de øverste 10 m).



Figur 11. Eksempel på chirp data fra henholdsvis (A) den sydlige og (B) nordlige lokalitet for Energi-Ø positioner.

Figur 11A viser et profil hen over den nordlige del af den sydlige energiø. Her ses den yngste bankedannende enhed tydeligt defineret. I den nordlige ende af profilet opnås en bedre penetration af den akustiske energi og der erkendes en serie af svage parallelle refleksioner i den kvartære enhed, i op til 15 m's dybde under havbunden. Figur 11B viser et profil hen over den østlige del af

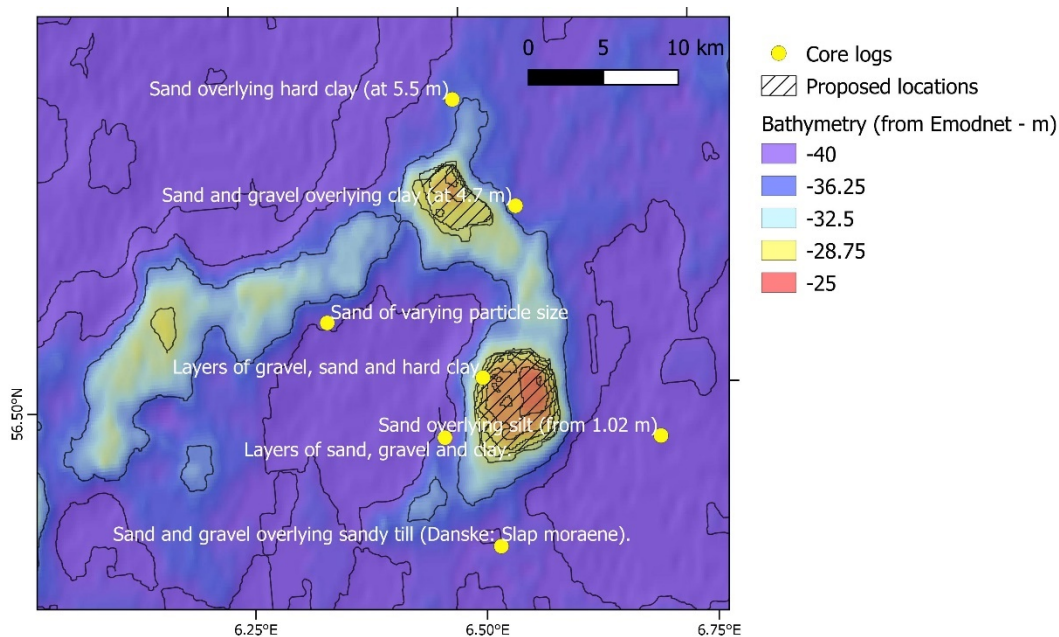
den nordlige energiø. Her ses ingen akustisk lagdeling i den kvartære enhed (fremstår massiv). Dog erkendes enkelte paraboliske refleksioner, der muligvis hidrører fra erosionsdannelse (kanaler?). En mulig tolkning er, at sedimenterne i den eroderede kvartære enhed er mindre kompakte, eller mere finkornede/blødere, ved den sydlige placering (sektion A), end ved den nordlige placering (sektion B).

4.2 Kerne data

I forbindelse med screeningen, undersøgte vi syv kernebeskrivelser fra vibrationsboringer beliggende i umiddelbar nærhed af de foreslåede energiø placeringer. Tabel 1 giver en oversigt over kernelokaliteter og lithologi. Se også kort i Figur 12.

Tabel 1. Tilgængelige vibrokerner indenfor interesseområdet (koordinater er baseret på ETRS 89 UTM 32N).

Kerne ID	Øst	Nord	Boreddybde (m)	Summeret lithologi
560610.1	346212	6284245	5.84	Sand over hård ler (ved 5.5 m)
560614.1	336596	6270112	5.65	Sand af variable kornstørrelse
560615.1	346633	6265572	5.40	Lag af grus, sand og hård ler
560615.5	349803	6276805	5.20	Sand og grus over ler (ved 4.7 m)
560618.1	343760	6261796	5.70	Lag af sand, grus og ler
560619.1	346883	6254254	5.82	Sand og grus over sandet moræne
560619.2	358147	6260680	2.47	Sand over silt (fra 1.02 m)



Figur 12. Generaliseret beskrivelse af eksisterende sedimentkerner indenfor interesseområdet.

Sedimentkernerne, der repræsenterer de øverste 6 m af lagserien under havbunden, domineres af: (1) sand af varierende kornstørrelse, (2) grus samt (3) mere lerede aflejringer mod bunden af kernerne.

Kerne 560615.1, der er indsamlet på den nordvestlige flanke af den sydlige lokalitet (Fig. 12), viser skiftende sand, grus og hård ler. Denne sammensætning rejser spørgsmål om oprindelsen af 'sandbanken', og dens dannelse som et resultat af havstrømme, hvor kompakt ler ikke skulle forventes. Det er dog muligt at lerlaget, observeret i 3,45 m dybde, tilhører den kvartære stratigrafi der underlejrer det Holocæne bankesystem (se afsnit 5.2 for yderligere diskussion).

5. Diskussion

5.1 Områdets geologiske udvikling

Som beskrevet i afsnit 2.1 har det undersøgte området en varieret geologisk historie, der omfatter salttektonik, dannelsen af de Mesozoiske og Kænozoiske sedimentbassiner, samt indflydelse fra gentagne glaciationer gennem de seneste par millioner år. Den geologiske udvikling er bestemmende for lagfølgens geotekniske egenskaber, med implikationer for konstruktionen af en energiø.

Tilstedeværelsen af saltrelaterede strukturer har vigtige implikationer med hensyn til halokinesis og dertil knyttede forkastninger, samt væskegennemstrømning i den overliggende lagfølge. Hvis saltlegemerne strækker sig til de foreslåede lokaliteter, kan de sandsynligvis forventes at have indflydelse på de lokale geotekniske egenskaber.

Geologien i den danske Nordsø er uomtvistelig under indflydelse af glaciale processer i løbet af kvartær perioden, men maksimumudbredelsen for den sidste (Weichsel) iskappe er dårlig kendt. I den forbindelse er det slående, at de foreslåede placeringer af energiøer ligger på den usikre marginale grænse for det sidste isfremstød (Hughes et al., 2016). Hvis området var isdækket under den sidste istid, har det vigtige implikationer for de geotekniske parametre i den øverste sedimentære lagsøjle, især på grund af kompaktion fra istrykket.

De observerede kanaldannelser kan indeholde forskellige sedimenttyper med meget anderledes geotekniske egenskaber end de tilstødende kvartære aflejringer. Det er vigtigt at kortlægge omfanget af kanaludfyldninger og tilvejebringe informationer om deres egenskaber. Ligeledes bør det undersøges om de glacialtektoniske strukturer kan have implikationer for større konstruktioner på havbunden, som bemærket i undersøgelser foretaget på Dogger Bank (Cotterill et al., 2017a; Phillips et al., 2018).

De mest recente sedimentenheder i området udgøres af bankeformerne, som vil danne basis for de foreslåede energiø konstruktioner. Bankerne formodes primært at være dannet under Holocæn (dvs. efter sidste istid), men deres beskaffenhed og aflejringshistorie kendes ikke med sikkerhed. Bankedannelsernes oprindelse kan muligvis forbindes med nordgående sandtransport af den Jyske Strøm, der startede for omkring 7.000 år siden (Nielsen og Johannessen, 2009). Studier af tilsvarende sandbanker offshore Jylland (Anthony og Leth, 2002) støtter hypotesen om at bankesystemet i interesseområdet er opbygget ved transport af sand under den sene del af Holocæn. Imidlertid, er der på basis af en enkelt eksisterende kernebeskrivelse fra den sydlige banke (tabel 1 og figur 12) tegn på en mere kompleks aflejringshistorie, der muligvis går tilbage til sidste istid (Phillips et al., 2018).

5.2 Sammendrag af de geologiske hovedelementer

I det dette afsnit diskuteres kort de geologiske hovedelementer og processer med henvisning til de beskrevne observationer på de foreslåede energiø lokaliteter. Dernæst følger et forslag til et

arbejdsprogram der kan belyse geologien i området yderligere og danne grundlag for en kvalificeret analyse af de geotekniske problemstillinger og mulige konsekvenser.

5.2.1 Saltdiapirer

Der findes adskillige henvisninger til tilstedeværelsen af saltdiapirer i den danske Nordsø (Huuse et al., 2001; Rank-Friend and Elders, 2004). Det undersøgte dybseismiske profil (Fig. 6) viser en markant diapirstruktur nordøst for placeringen af den nordlige energiø, som tilsyneladende påvirke sedimenten inden for 50 m fra havbunden. Yderligere bemærkes på samme profil en pukkel på Kridt overfladen, på en position umiddelbart øst for bankesystemet. Denne kan ligeledes tolkes som et resultat af saltbevægelser i området (en såkaldt "skilpade" struktur; Peel, 2014). Disse geologiske elementer som er genereret af saltbevægelser op igennem lagpakken, kan forårsage forkastninger og fokuseret migration af porevæsker herunder kulbrinter (Mohr et al., 2005; Knutz et al., 2010). I den forbindelse bemærkes det at Kridtpakken under det opbulede område, viser tegn på forkastninger og frakturer, der flere steder lader til at forsætte ind i den overliggende lagserie. Det er muligt at disse forskydninger også har indflydelse på den kvartære enhed, hvilket bør tages til efterretning i det videre arbejde med risikovurderingen af området.

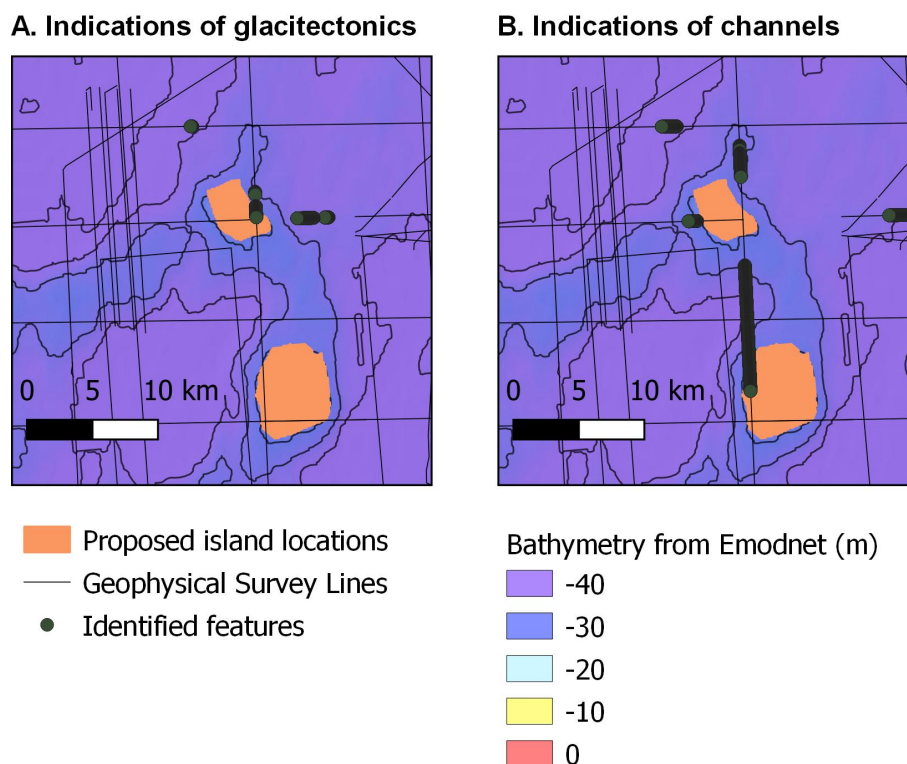
Uden multikanals seismik profilet (UHR) ville de saltrelaterede strukturer og afledte forkastninger ikke kunne identificeres, da singlekanal data ikke giver mulighed for væsentlig datatolkning i dybder der ligger under havbunds multiplen. Eftersom de regionale UHR linjer typiske ligger med afstande på 15 til 20 km (Fig. 4) er der store områder, hvor vi ikke er i stand til at udføre en geologisk tolkning mere end til 30 til 40 m under havbunden. Det kan derfor ikke udelukkes at den overfladenære geologi under energiø lokaliteterne kan påvirkes af dybtliggende strukturer og forsætninger. Da disse vertikale forstyrrelser i lagserien kan virke som adgangsruiter for geologiske væsker, bør de kvartære lag, og især de kanaludfyldende sedimenten, undersøges for seismiske anomalier der kan indikere lækager af gas/kulbrinter.

5.2.2 Glaciale dannelser

Sparker, og i mindre grad chirp profilerne, viser erosionsdannelser i den kvartære lagpakke under bankesystemet (Fig. 7-8, 11B). Det kan have store implikationer for jordbundsforholdene på og omkring de foreslåede energiø placeringer.

En veldefineret kanal med en bredde på 1 og 2 km er observeret ca. 6 m under havbunden i den nordlige ende af den nordlige energiø placering (Fig. 7). En mindre veldefineret, men potentielt større kanal ser ud til at eksistere i området mellem de to bankelokaliteter, og til dels underlejrende disse. Tilsyneladende er den sydlige del af den sydlige energiø placering ikke påvirket af begravede smeltevandskanaler (Fig. 7 og 9).

Som en del af vurderingen er der undersøgt supplerende singlekanal seismiske linjer, som ligeledes påviser kanaldannelser i den kvartære enhed (placeringen vist i figur 13B). Grundet afstanden mellem de seismiske data (typisk 8 km) er det ikke muligt at forbinde de observerede kanalforkomster. Det er højst sandsynligt at der indenfor interesseområdet eksisterer yderligere kanaldannelser i den kvartære enhed.



Figur 13. Placering af områder præget af glacialtektonik (A) og begravede kvartære kanaler (B) baseret på en foreløbig data tolkning.

Figur 8 og 10 viser eksempler på sedimentdeformation øst for den nordlige energiø placering: Disse tolkes som en glacialtektonisk påvirkning. Yderligere deformationsområder er identificeret nord herfor (Fig. 13A). Områderne præget af deformation strækker sig lateralt op til 5 km og kommer inden for 10 m fra havbunden (Fig. 8). Også i dette tilfælde betyder de store mellemrum mellem de eksisterende seismiske linjer, at udbredelsen af de glacialtektoniske komplekser efter al sandsynlighed er større end vist i Figur 13A. Baseret på tidligere studier (Cotterill et al., 2017a), kan en bedre forståelse af disse elementer, dvs. udbredelse og geotekniske egenskaber, stærkt anbefales.

5.2.3 Banke systemer

De to foreslåede energiø placeringer ligger i den nordlige og sydlige ende af et hestesko formet bankesystem (Fig. 12). Den nordlige lokalitet dækker et areal på 5x8 km med <30 m vanddybde, og banken hæver sig 9 m i forhold til den omkringliggende havbund. Den sydlige placering dækker et areal på 8x11 km, ligeledes på vanddybder <30 m, og banken hæver sig 14 m i forhold til den omkringliggende havbund.

En enkelt kerneprøve (560615.1) fra den vestlige flanke i det sydlige område viser en blandet litologi med lag af sand, grus og ler. Det seismiske profil vist i figur 7, antyder, at der kan være forskelle i sedimentets sammensætning mellem det nordlige og sydlige område. Det nordlige bankeområde fremstår med en veldefineret bundlinje over den kvartære enhed (Fig. 7-8), hvilket synes at støtte hypotesen om en Holocæn dannelseshistorie (kap. 5.1). Banken der danner basis for den sydlige

placering, afviger ved at dens nordlige margin er udefinerbar og ikke kan skelnes fra den udfyldte kanaldannelse (Fig. 7).

Med de tilgængelige informationer er vi ikke i stand til at drage konkrete konklusioner om årsager eller følgevirkninger af denne forskel. Men umiddelbart, ser det ud til, at de to områder kunne reagere meget forskelligt på den høje belastning der kan forventes fra en kunstig ø.

Sediment mobilitet

Den sydlige energiø placering flankeres mod øst af et svagt defineret trug (Fig. 9), der også er synligt på den lavopløselige Emodnet batymetri. Desuden noteres det at den nordlige flanke af den nordlige placering er markant stejlere end den sydlige flanke, hvormed den fremstår med et asymmetrisk udseende (Fig. 7).

Detaljerede kommentarer vedrørende sediment mobilitet i området kræver bathymetriske data med højere opløsning. Dog er det, i betragtning af udbredelsen af sådanne processer i Nordsøen (Anthony og Leth, 2002; Hulscher og van den Brink, 2001), sandsynligt at strømskuring i havbunden omkring bankerne, har potentiale til at påvirke større installationer.

5.3 Geotekniske implikationer

De geologiske elementer og faktorer vi har identificeret, vil kunne påvirke konstruktionen af kunstige øer, især i form af sediment- og tyngdebelastning. En sådan belastning kan føre til udvikling af overtryk, overskydende poretryk, lateral væskemigration samt flydendegørelse af visse sedimenttyper (Biscontin et al., 2004; Strout og Tjelta, 2005).

Det er vigtigt at overveje at forskellige sedimentenheder reagerer forskelligt på trykbelastningen fra en kunstig ø. Fra de begrænsede data, vi har til rådighed, ses at sedimentenhedsgrænser er placeret ved, og i nærheden, af de foreslåede energiø placeringer. Yderligere, kan responsen af de geologiske enheder variere som følge af svaghedszoner, f.eks. relateret til forkastninger og glaciale deformations strukturer. Som beskrevet ovenfor er der en høj sandsynlighed for forekomsten af disse geologiske risici elementer indenfor de forslåede energiø lokaliteter.

Tabel 2 opsummerer de identificerede geologiske elementer og de associerede implikationer, der efter vores mening har betydning for lokaliteternes geologiske egnethed til konstruktion af energiøer. Det er sandsynligt, at implikationerne og de dermed forbundene risici, kan afhjælpes med passende siteundersøgelser, kortlægning, analyse og tekniske løsninger.

GEUS har ikke ekspertise inden for offshore-konstruktion, og vi anbefaler kraftigt, at en passende kvalificeret og erfaren parter inddrages for at vurdere de tekniske konsekvenser af de geologiske faktorer.

Tabel 2. Sammendrag af de geologiske hovedelementer og deres potentielle ingeniørmæssige implikationer.

Hovedelementer	Sammenfatning af tilstedeværelse og usikkerheder	Eksempel på Figur	Potentielle konsekvenser
Kanal enheder	<p>Identificeret i hele interesseområdet, kortlægnings eksempel ses på figur 13, som viser kanaldybder fra <10m til 40m under havbunden</p> <p>Den store afstand mellem sejllinjerne betyder at kanalerne ikke kan kortlægges</p> <p>Vi kender ikke sedimentsammensætningen eller de geotekniske egenskaber.</p>	6, 7, 8	Forskellig reaktion på belastning (Større chance for sammenpresning), mulige adgangsveje for migration af gas og væske.
Glacialtektonisk kompleks	<p>Identificeret nord for og øst for det nordlige udpegningsområde. Hvor glacialtektonik er identificeret udbreder komplekset sig fra nær havbunden til dybder op til 150m under havbunden</p> <p>De store afstande mellem survey linjerne betyder at områderne kan være mere udbredt.</p>	8, 10	Tidligere arbejder har vist, at disse komplekser er forbundet med store forskelle i geotekniske parametre over korte afstande. Sådanne variationer kan have vigtige konsekvenser for energiø design og installationer

Hovedelementer	Sammenfatning af tilstedeværelse og usikkerheder	Eksempel på Figur	Potentielle konsekvenser
Salt (mulig skilpade struktur)	<p>Der er identificeret en diapir nordøst for det nordlige udpegningsområde, hvor sedimenter så tæt som 50m under overfladen er påvirket af deformationer.</p> <p>På grund af den store afstand mellem UHR linjerne, kan de identificerede elementer udbrede sig tættere på interesseområdet end vist (vil ikke være synlig på enkelt kanals data) og andre diapirer kan være tilstede imellem sejl-linjerne på grund af mangel på data.</p>	5	<p>Potentiel aktive for-kastninger og svækkede sedimenter nær ved diapirer.</p> <p>Mulighed for indsynkning hvis diapir struktur kollapseder på grund af vægten fra en kunstig ø</p>
Erosions lavninger	<p>Konkave hældende overflader er observeret på visse områder af banke-strukturerne, hvilket indikerer bundstrøms aktivitet.</p> <p>Vi har ingen højopløselig bathymetri data til at bekræfte havbunds mobilitet eller andre indikationer på bundstrøms aktivitet.</p>	9	Havbunds erosions strukturer omkring installerede kunstige øer kunne føre til ustabile hældende skrænter og eller erosion samt sedimentdække af nedgravede kabler.
Heterogenitet i bundforholdene	<p>Der er tydelige forskelle i karakteren af seismisk reflektivitet i forskellige lokaliteter af interesseområdet.</p> <p>F.eks. er der områder med kaotiske enheder og områder med transparente enheder. Chirp data viser varierende penetration fra ingen til 15 m.</p> <p>Der er meget få prøvetagninger fra området og dem der eksisterer, penetrerer mindre end 6m ned i havbunden.</p> <p>Store huller mellem de seismiske linjer betyder at vi ikke kan kortlægge den naturlige variation i området</p>	7, 8, 11	<p>Områder kan være sandede eller lerede, hårde eller bløde, med eller uden store sten.</p> <p>Sådanne forhold kræver forskellige ingeniørmæssige løsninger.</p>

5.4 Videnshuller i den geologiske forståelse af området

I dette aktuelle studie har vi foretaget en overordnet geologisk vurdering af det udpegede interesseområde for energiø udvikling i Nordsøen, baseret på tilgængelige data. Der er imidlertid betydelige videns huller i områdets geologi, som er præciseret nedenfor.

1. Mangler geofysiske data. Multikanal UHR seismisk linjerne optræder med en afstand på 15-20 km, mens enkeltkanals seismik typisk optræder med en afstand på 8 km. Det eksisterende seismiske grid er således for groft til en detaljeret geologisk tolkning i området. Dette medfører:
 - Utilstrækkelig visualisering af dybere strukturer, saltlegemer, forkastninger, samt potentielle gas/kulbrinte akkumulationer.
 - Tæt kortlægning af geologiske enheder og risiko-elementer, f.eks. begravede erosionskanaler og glacial-tektoniske komplekser, ikke er mulig med den aktuelle linjeafstand.
2. Der findes ingen tilgængelige geotekniske data for de geologiske enheder i området, og ingen prøver trænger mere end 6 m under havbunden. Som følge deraf:
 - Kender vi ikke bankernes sedimentære beskaffenhed og geotekniske egenskaber. Der forslås to dannelseshypoteser, der relaterer sig til enten en Holocæn udvikling af sandbanker (Jensen et al., 2011), eller en mere kompliceret udvikling, som observeret på det britiske Dogger Bank system.
 - Den generelle mangel på geotekniske data betyder, at det ikke er muligt at beregne, hvordan de geologiske enheder vil reagere på sedimentær belastning og andre processer, der er forbundet med konstruktion af en energiø.

6. Konklusioner og videre arbejdsprogram

6.1 Områdets geologiske egnethed til Energi-Ø udvikling

I denne undersøgelse har vi anvendt en kombination af offentliggjorte resultater, samt seismiske og sediment kerne data til at vurdere den geologiske egnethed til konstruktion af kunstige energi-øer, i et område i den danske del af Nordsøen.

Med de eksisterende informationer og data kan der dannes et billede af områdets geologiske opbygning og en identifikation af risikomomenter, der især forbindes med salt bevægelser, glacial-tektonik, begravede erosionskanaler, sedimentmobilitet samt forkastninger og områder med generel heterogenitet. GEUS er i besiddelse af en database der indeholder eksisterende seismiske surveys med linjeføringer, der passerer gennem begge potentielle energiø områder. Imidlertid er de tilgængelige data sparsomme og giver anledning til betydelige videns huller, der har indflydelse på den geologiske udvikling. Vi bemærker også, at et nøglekrav til energiø konceptet er, at der skal tilknyttes en storskala vindfarm udbygning (f.eks. 9 GW) i området omkring øen. En vurdering af de tilstødende områders egnethed til dette formål er ikke foretaget.

Kulbrinteudvinding og vindkraftproduktion viser at Nordsøens grundforhold generelt kan være egnet til storskala installationer på havbunden. Imidlertid, kan geologiske elementer og faktorer give ingeniørmæssige og geotekniske udfordringer. En række geologiske faktorer er identificeret i det udpegede område, der kan indvirke på energiø konstruktionen (Tabel 2), og som derfor bør overvejes før og under en gennemførelse af projektet.

Ud fra de begrænsede data, vi har vurderet, ser det ud til, at den sydlige del af den sydlige placering er bedre egnet end den nordlige lokalitet. Denne formodning begrundes med den manglende forekomst af begravede smeltevandkanaler i den sydlige ende af bankesystemet. Detaljerede site undersøgelser er imidlertid påkrævet for at bekræfte dette.

Selvom vi har identificeret en række geologiske risikofaktorer, forbundet med konstruktion og drift af en energiø, er vi af den opfattelse, at de potentielle vanskeligheder er overkommelige; så længe de afbødes korrekt.

Vi anbefaler især, at der foretages en detaljeret havbundsgeologisk undersøgelse for nøjagtigt at afgrænse områdets geologiske enheder og de potentielle risikomomenter. Desuden anbefaler vi at en passende kvalificeret partner inddrages til at vurdere de konstruktionstekniske implikationer forbundet med områdets geologiske opbygning og mulige risikofaktorer.

6.2 Forslag til fremtidigt arbejdsprogram

For at vurdere det pågældende områdes specifikke egnethed til udvikling af energiøer foreslår vi, at de følgende supplerende opgaver udføres:

1. Planlægning og gennemførelse af en marinegeologiske undersøgelse, der dækker interesseområdet med brug af geofysiske og geotekniske metoder.
 - En geofysisk undersøgelse, der anvender UHR-multikanals udstyr, for at opnå en detaljeret og højopløselig vurdering af den kvartære lagpakke. Der foreslås en linjeafstand i størrelsesordenen 500 m.
 - Udvælgelse af borepositioner der kan teste de dybere enheders geologi, dannelsesprocesser og geotekniske egenskaber (herunder porøsitet, Atterberggrænser, udrænet shear styrke).
2. Hvis en bestemt placering anses for egnet til energiø konstruktion, bør der efterfølgende foretages en højopløselig havbundsopmåling (ifølge industristandardspecifikationer) der kan underbygge og befordre design og konstruktionsmæssige udfordringer.

Det foreslåede arbejdsprogram kan bidrage til en mere nøjagtig forståelse af områdets geologi, herunder udfyldning af de beskrevne videns huller, og befordre en optimal placering af havbunds konstruktioner. Hermed kan udviklingsprocessen af en energiø i Nordsøen de-riskes og effektiviseres.

Desuden bør man overveje muligheden for en mere regional undersøgelse i den danske del af Nordsø, med fokus på de overfladenære lag. Formålet vil være at afdække muligheder for at gennemføre energiø konceptet i den øvrige del af Nordsøen.

Specifikt kan det foreslås:

- At foretage en geologisk screening af et større område for at bestemme, egnetheden til udvikling af storskala offshore vind (f.eks. 9 GW).
- At foretage en mere udbredt geologisk screening af dansk Nordsø for at identificere andre områder, der potentielt er egnet til konstruktion af kunstige øer og tilhørende vindkraftproduktion.

7. Litteratur

- Andersen, T.R., Huuse, M., Jørgensen, F., Christensen, S., 2012. Seismic investigations of buried tunnel valleys on- and offshore Denmark. Geological Society, London, Special Publications 368, 129-144.
- Anthony, D., Leth, J.O., 2002. Large-scale bedforms, sediment distribution and sand mobility in the eastern North Sea off the Danish west coast. *Marine Geology* 182, 247-263.
- Biscontin, G., Pestana, J., Nadim, F., 2004. Seismic triggering of submarine slides in soft cohesive soil deposits. *Marine Geology* 203, 341-354.
- Bockelmann, F.-D., Puls, W., Kleeberg, U., Müller, D., Emeis, K.-C., 2018. Mapping mud content and median grain-size of North Sea sediments – A geostatistical approach. *Marine Geology* 397, 60-71.
- Cameron, T.D.J., Crosby, A., Balson, P.S., Jeffrey, D.H., Lott, G.K., Bulat, J., Harrison, D.J., 1992. United Kingdom offshore regional report: the geology of the southern North Sea. British Geological Survey.
- Cotterill, C., Phillips, E., James, L., Forsberg, C.F., Tjelta, T.I., 2017a. How understanding past landscapes might inform present-day site investigations: a case study from Dogger Bank, southern central North Sea. 15, 403-414.
- Cotterill, C.J., Phillips, E., James, L., Forsberg, C.F., Tjelta, T.I., Carter, G., Dove, D., 2017b. The evolution of the Dogger Bank, North Sea: A complex history of terrestrial, glacial and marine environmental change. *Quaternary Science Reviews* 171, 136-153.
- Coughlan, M., Fleischer, M., Wheeler, A.J., Hepp, D.A., Hebbeln, D., Mörz, T., 2018. A revised stratigraphical framework for the Quaternary deposits of the German North Sea sector: a geological-geotechnical approach. *Boreas* 47, 80-105.
- Gibling, M.R., 2006. Width and Thickness of Fluvial Channel Bodies and Valley Fills in the Geological Record: A Literature Compilation and Classification. *Journal of Sedimentary Research* 76, 731-770.
- Hepp, D.A., Warnke, U., Hebbeln, D., Mörz, T., 2017. Tributaries of the Elbe Palaeovalley: Features of a Hidden Palaeolandscape in the German Bight, North Sea, Under the Sea: Archaeology and Palaeolandscapes of the Continental Shelf, pp. 211-222.
- Houmark-Nielsen, M., 2011. Chapter 5 - Pleistocene Glaciations in Denmark: A Closer Look at Chronology, Ice Dynamics and Landforms, in: Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D. (Eds.), *Developments in Quaternary Sciences*. Elsevier, pp. 47-58.
- Hughes, A.L.C., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø.S., Mangerud, J., Svendsen, J.I., 2016. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas* 45, 45.

- Hulscher, S.J.M.H., van den Brink, G.M., 2001. Comparison between predicted and observed sand waves and sand banks in the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 106, 9327-9338.
- Huuse, M., 1999. Detailed morphology of the Top Chalk surface in the eastern Danish North Sea. *Petroleum Geoscience* 5, 303-314.
- Huuse, M., Lykke-Andersen, H., 2000. Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. *Quaternary Science Reviews* 19, 1233-1253.
- Huuse, M., Lykke Andersen, H., Michelson, O., 2001. Cenozoic evolution of the eastern Danish North Sea. *Marine Geology* 177, 243-269.
- Jensen, J.B., Borre, S., Leth, J.O., Al-Hamdani, Z., Addington, L.G., 2011. Mapping of raw materials and habitats in the Danish sector of the North Sea. *GEUS Bulletin* 23, 33-36.
- Jensen, J.B., Gravesen, P., Lomholt, S., 2008. Geology of outer Horns Rev, Danish North Sea. *GEUS Bulletin* 15, 41-44.
- Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., 2006. Buried and open tunnel valleys in Denmark—erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews* 25, 1339-1363.
- Knutz, P.C. (2010). Channel structures formed by contour currents and fluid expulsion: significance for Late Neogene development of the central North Sea basin. In: Vinning, B.A., & Pickering, S.C. (Eds), *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers - Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*, 77-94, Geological Society, London. doi:10.1144/0070077.
- Løseth, H., Gading, M., Wensaas, L. (2009). Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology* 26, 1304–1319.
- Mohr, M., Kukla, P.A., Urai, J.L., Bresser, G., 2005. Multiphase salt tectonic evolution in NW Germany: seismic interpretation and retro-deformation. *International Journal Of Earth Science* 94, 917-940.
- Nielsen, L.H., Johannessen, P.N., 2009. Facies architecture and depositional processes of the Holocene-Recent accretionary forced regressive Skagen spit system, Denmark. *Sedimentology* 56, 935-968.
- Nielsen, T., Mathiesen, A., Bryde-Auken, M., 2008. Base Quaternary in the Danish parts of the North Sea and Skagerrak. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 15, 37-40.
- O Cofaigh, C., 1996. Tunnel valley genesis. *Progress in Physical Geography* 20, 1-19.
- Ottesen, D., Batchelor, C.L., Dowdeswell, J.A., Løseth, H., 2018. Morphology and pattern of Quaternary sedimentation in the North Sea Basin (52–62°N). *Marine and Petroleum Geology* 98, 836-859.
- Overeem, I., Weltje, G.J., Bishop-Kay, C., Kroonenberg, S.B., 2001. The Late Cenozoic Eridanos delta system in the Southern North Sea Basin: a climate signal in sediment supply? *BasinResearch* 13, 293-312.

- Pedersen, S.A.S., 2000. Superimposed deformation in glaciotectonics. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 46, 125-144.
- Pedersen, S.A.S., Boldreel, L.O., 2017. Glaciotectonic deformations in the Jammerbugt and glaciodynamic development in the eastern North Sea. *Journal of Quaternary Science* 32, 183-195.
- Peel, F.J., 2014. How do salt withdrawal minibasins form? Insights from forward modelling, and implications for hydrocarbon migration. *Tectonophysics* 630, 222-235.
- Peryt, T.M., Geluk, M.C., Mathiesen, A., Paul, J., Smith, K. 2010. Zechstein. In: Doornenbal, J.C., Stevenson, A.G., (Eds.), *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*, EAGE Publications, pp. 123-147
- Phillips, E., Cotterill, C., Johnson, K., Crombie, K., James, L., Carr, S., Ruiter, A., 2018. Large-scale glaciotectonic deformation in response to active ice sheet retreat across Dogger Bank (southern central North Sea) during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 179, 24-47.
- Prins, L.T., Andresen, K.J., 2019. Buried late Quaternary channel systems in the Danish North Sea – Genesis and geological evolution. *Quaternary Science Reviews* 223.
- Prins, L.T., Andresen, K.J., Clausen, O.R., Piotrowski, J.A., 2020. Formation and widening of a North Sea tunnel valley - The impact of slope processes on valley morphology. *Geomorphology* 368.
- Rank-Friend, M., Elders, C.F., 2004. The evolution and growth of Central Graben Salt structures, Salt Dome Province, Danish North Sea, 3D Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins. *Geological Society, London, Memoirs*, pp. 149-163.
- Rasmussen, E. S., Vejbæk, O. V., Bidstrup, T., Piasecki, S. & Dybkjær, K. 2005. Late Cenozoic petroleum systems. In: Doré, A. G. & Vinning, B. A. (Eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 1347–1358. Geological Society, London.
- Roberts, D.H., Evans, D.J.A., Callard, S.L., Clark, C.D., Bateman, M.D., Medialdea, A., Dove, D., Cotterill, C.J., Saher, M., Cofaigh, C.Ó., Chiverrell, R.C., Moreton, S.G., Fabel, D., Bradwell, T., 2018. Ice marginal dynamics of the last British-Irish Ice Sheet in the southern North Sea: Ice limits, timing and the influence of the Dogger Bank. *Quaternary Science Reviews* 198, 181-207.
- Strout, J.M., Tjelta, T.I., 2005. In situ pore pressures: what is their significance and how can they be reliably measured? *Marine and Petroleum Geology* 22, 275-285.
- Sturt, F., Garrow, D., Bradley, S., 2013. New models of North West European Holocene palaeogeography and inundation. *Journal of Archaeological Science* 40, 3963-3976.
- Vejbæk, O.V., Bidstrup, T., Britze, P., Erlström, M., Rasmussen, E.S., Sivhed, U., 2007. Chalk depth structure maps, Central to Eastern North Sea, Denmark. *GEUS Bulletin* 13, 9-12.

Bilag A

A3 format seismiske eksempler

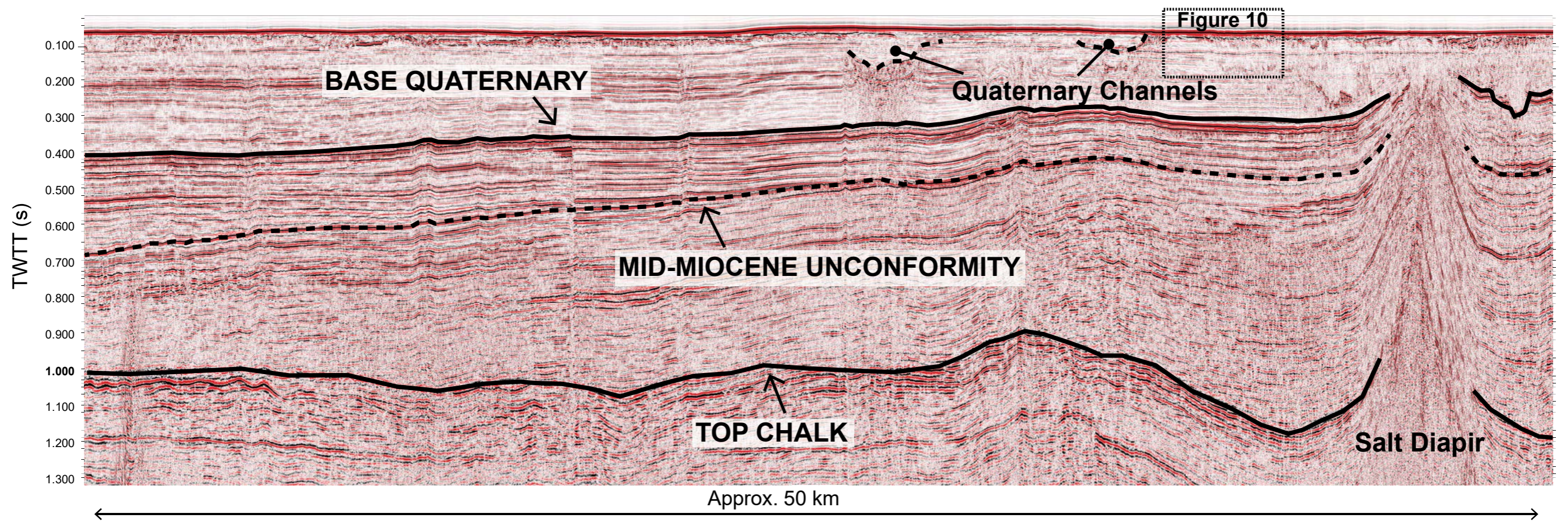
UHR Seismic line Dana_1996_21

SOUTH

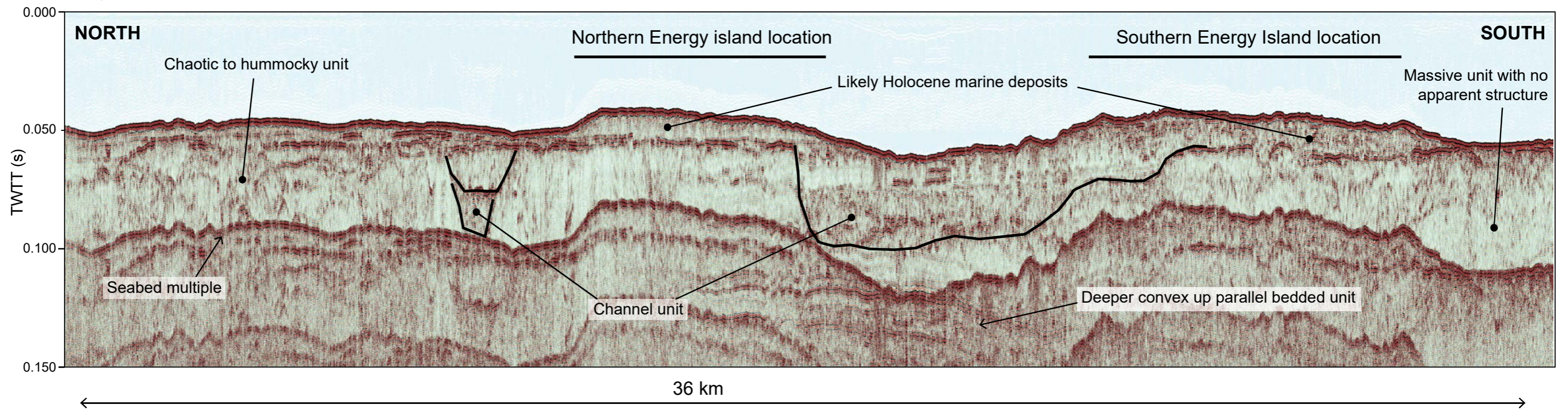
Southern Energy
Island location (-600 m)

Northern Energy
Island location (-5000 m)

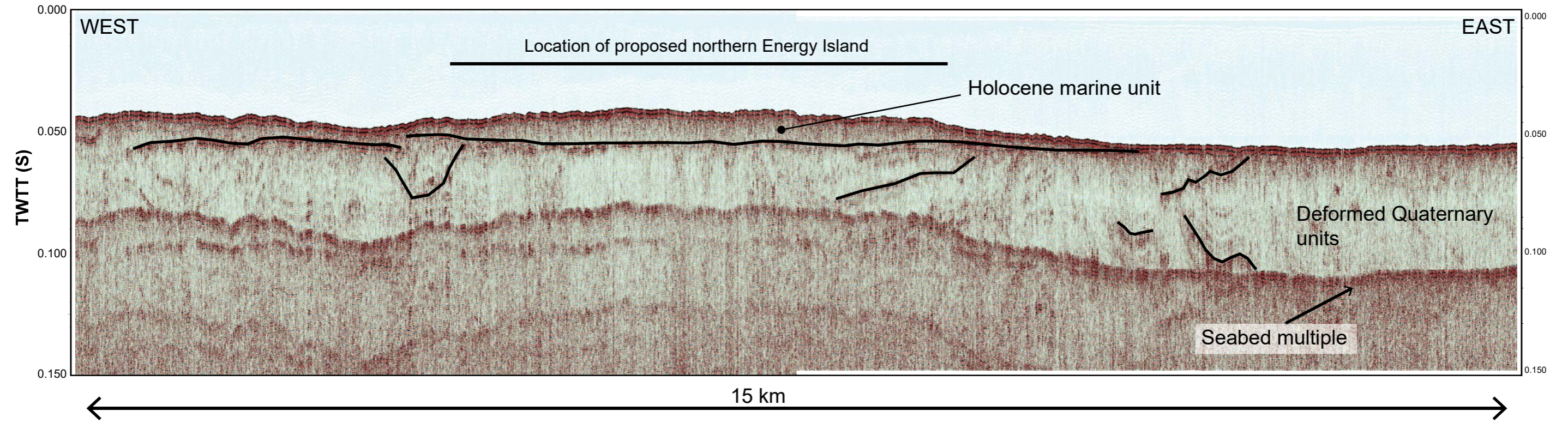
NORTH



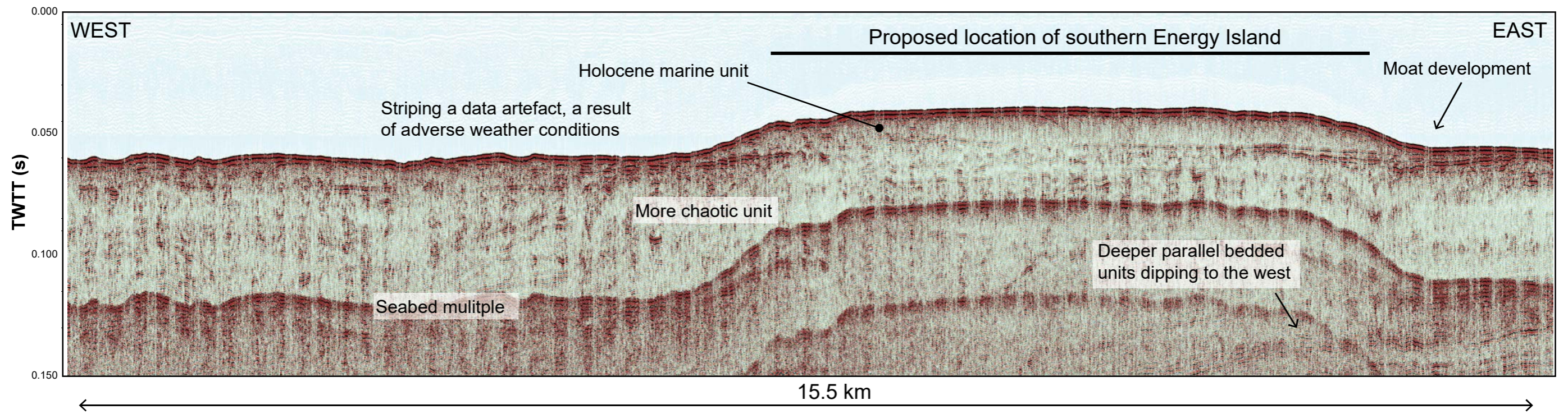
Single Channel Sparker line: 2010 F2_lineC02



Single Channel Sparker Line: 2010 F2_line01



Single Channel Sparker Line: 2010 F2_line02



Bilag B

3D Animation of seismic and bathymetry data

Link to video file:

[F2 Line C2 VuPAK.avi](#)

Note - Windows Media Player or VLC player required to play video.

Bilag C

Borekerner fra interesseområdet

BORERAPPORT

DGU arkivnr: 560610. 1

Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.84 meter

Terrænkote :

Brøndbore : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-19

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

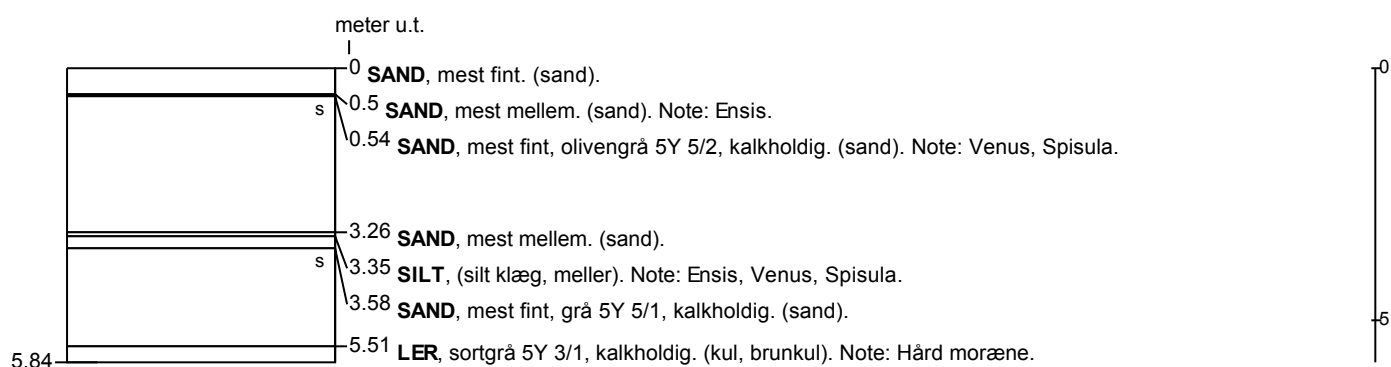
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 346212, 6284245

Koordinatmetode :


BORERAPPORT
DGU arkivnr: 560614. 1
Børested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.65 meter

Terrænkote :

Brøndborer : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-06

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

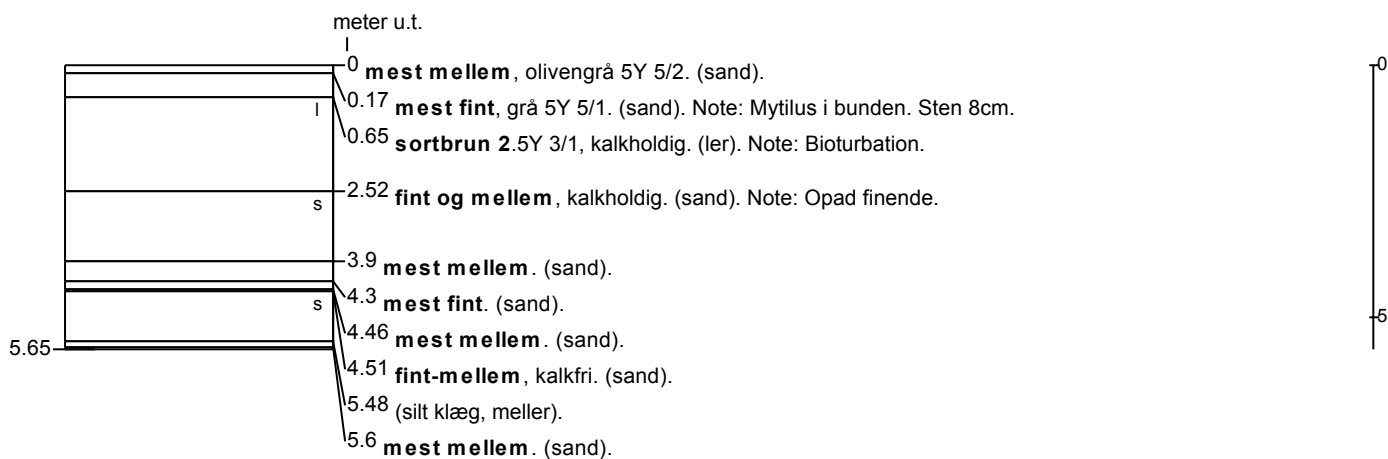
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremethode : Vibrocore

UTM-koord. : 336596, 6270112

Koordinatmetode :


BORERAPPORT
DGU arkivnr: 560615. 1
Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.4 meter

Terrænkote :

Børndborer : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-12

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

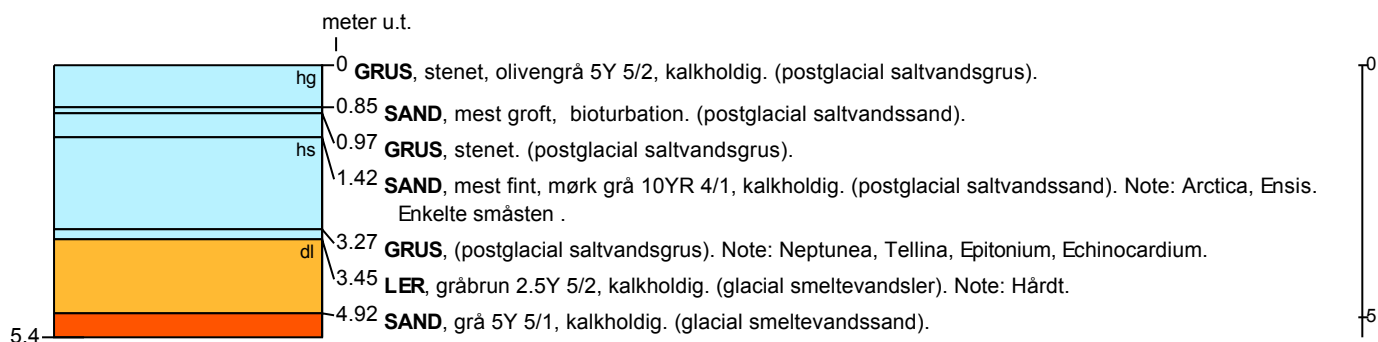
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 346633, 6265572

Koordinatmetode :


BORERAPPORT

DGU arkivnr: 560615. 5

Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.2 meter

Terrænkote :

Børndborer : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-04

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

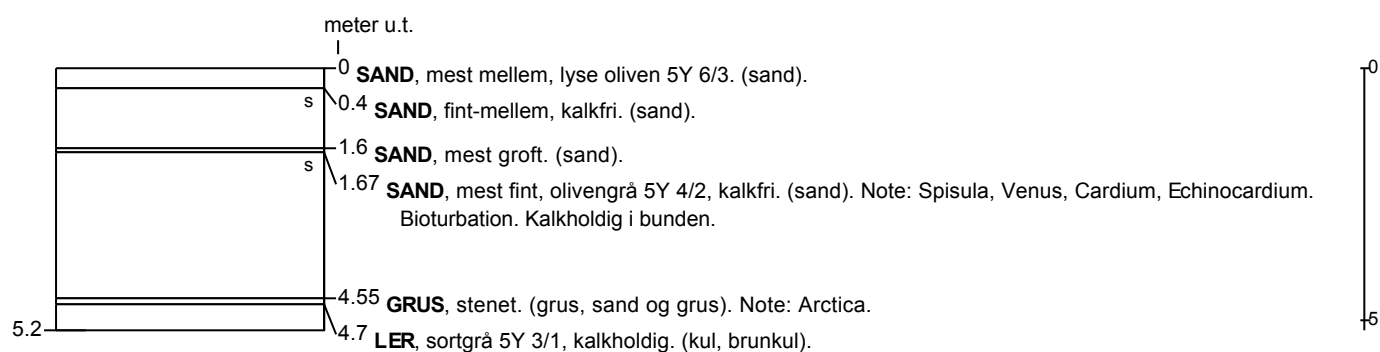
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 349803, 6276805

Koordinatmetode :


BORERAPPORT
DGU arkivnr: 560618. 1
Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.7 meter

Terrænkote :

Brøndbore : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-09

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

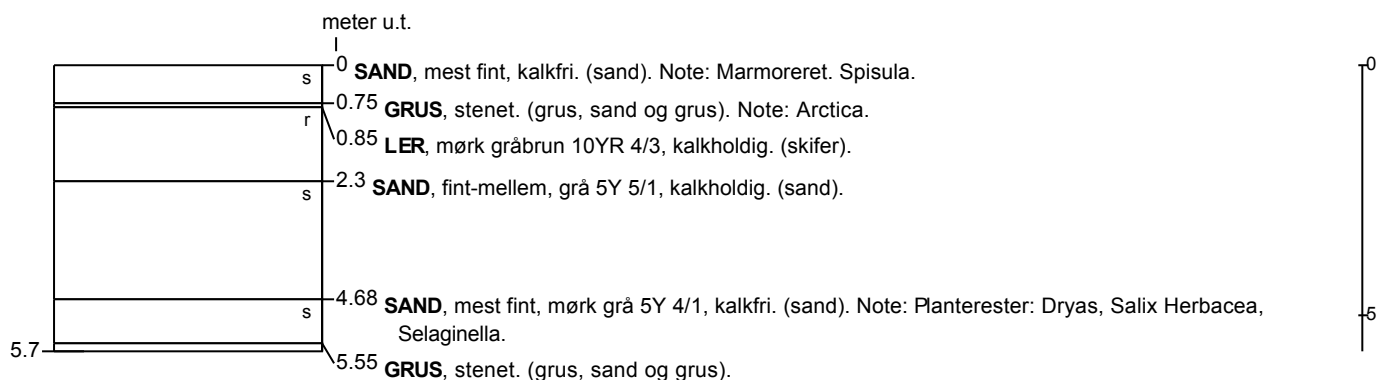
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 343760, 6261796

Koordinatmetode :


BORERAPPORT

DGU arkivnr: 560619. 1

Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 5.82 meter

Terrænkote :

Børndborer : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-11

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

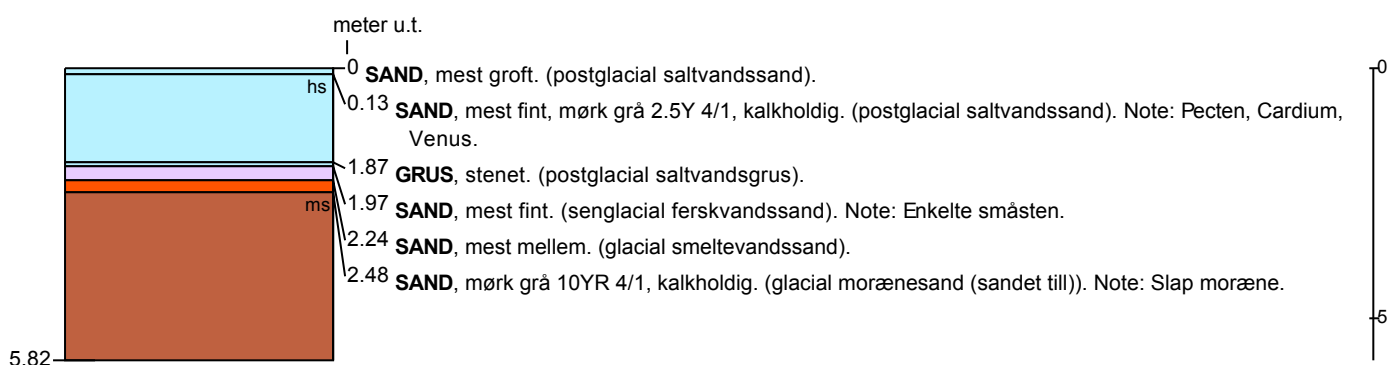
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 346883, 6254254

Koordinatmetode :


BORERAPPORT

DGU arkivnr: 560619. 2

Borested : Nordsøen

Kommune :

Region :

Boringsdato : 23/10 2012

Boringsdybde : 2.47 meter

Terrænkote :

Børndborer : Danmarks Geologiske Undersøgelse

Prøver
MOB-nr :

- modtaget : 23/10 2012

BB-journr :

- beskrevet :

BB-bornr : NS12-3-10

- antal gemt : 0

Formål : Råstofboring

Kortblad :

Datum : EUREF89

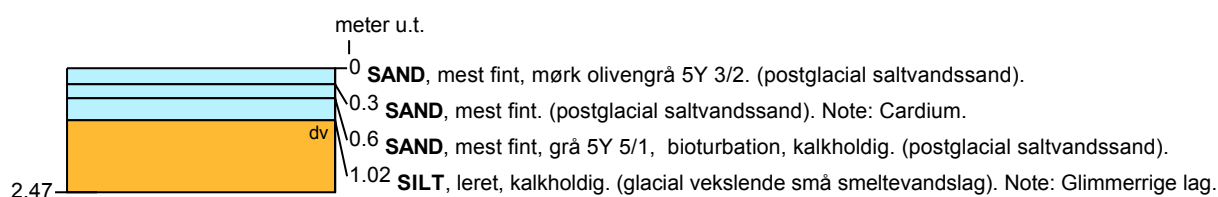
Anvendelse :

UTM-zone : 32

Koordinatkilde : GEUS

Boremetode : Vibrocore

UTM-koord. : 358147, 6260680

Koordinatmetode :




Klima-, Energi- og
Forsyningsministeriet

De Nationale Geologiske Undersøgelser
for Danmark og Grønland (GEUS)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Danmark

GEUS er en selvstændig og uafhængig
forsknings- og rådgivningsinstitution i
Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet