

Bedre geologiske data til udbygning af havvind - Overordnet geologisk kortlægning af det danske havområde for Energistyrelsen

Hovedrapport

Thomas Vangkilde-Pedersen, Niklas Christensen, Niels Nørgaard-Pedersen, Lis
Allaart, Ole Bennike, Jørgen O. Leth, Luna H. Winther, Peter B.E. Sandersen,
Lasse T. Prins, Sunny Singhroha & Lara F. Pérez

Bedre geologiske data til udbygning af havvind - Overordnet geologisk kortlægning af det danske havområde for Energistyrelsen

Hovedrapport

Følgende kolleger har yderligere bidraget til arbejdet: Jørn Bo Jensen (etablering af projektet og gode råd); Rasmus Ørnekol Stenshøj (dataindsamling og processering); Lars-Georg Rödel, Sigurd Bøgelund Andersen, Lars Øbro Hansen, Mikkel Skovgaard Andersen, Katrine Elnegaard Hansen, Henrik Jønsson Granat, Lisbeth Lyngkjær Pedersen (dataindsamling).

Thomas Vangkilde-Pedersen, Niklas Christensen, Niels Nørgaard-Pedersen, Lis Allaart, Ole Bennike, Jørgen O. Leth, Luna H. Winther, Peter B.E. Sandersen, Lasse T. Prins, Sunny Singhroha & Lara F. Pérez

Indhold

1.	Forord/Baggrund	7
2.	Indledning	8
3.	Geologiske forhold med betydning for havvind	9
3.1	Geotekniske implikationer.....	10
3.2	Kortlægning af geologiske enheder	12
4.	Datagrundlag	14
4.1	Marta databasen.....	15
4.2	Vurdering af behov for nye data	15
4.2.1	Udvælgelseskriterier og planlagt dataindsamling	15
5.	Nye geofysiske undersøgelser og borer	19
5.1	Geofysiske undersøgelser i indre danske farvande	21
5.2	Geofysiske undersøgelser i Nordsøen	22
5.3	Indsamling af korte kerneboringer	22
5.4	Indsamling af CPT-sonderinger	23
6.	Bearbejdning og tolkning af nye og gamle data	26
6.1	Processering af nye seismiske data	26
6.1.1	Processering af multikanal seismiske data	26
6.1.2	Processering af enkeltkanal seismiske data	30
6.2	Beskrivelse og analyse af nye borer	31
6.2.1	Beskrivelse af vibrocore kerner	31
6.2.2	Sigteanalyser.....	32
6.2.3	Dateringer.....	32
6.3	Bearbejdning af ældre seismiske data.....	34
6.3.1	Re-processering af eksisterende seismiske data	34
6.3.2	Skanning og geo-referering af analoge seismiske data	34
6.4	Seismisk tolkning og kortproduktion	34
6.4.1	Datadækning	35
6.4.2	Overfladenær gas.....	35
6.4.3	Digitalisering af ældre kort.....	36
6.4.4	Interpolationsparametre.....	36
7.	Regionalgeologisk udvikling	38
7.1	Indre danske farvande	38
7.1.1	Prækvarteret.....	38
7.1.2	Kvarteret.....	39
7.1.3	Recente forkastninger	42
7.1.4	Begravede dale	44

7.2	Nordsøen.....	47
7.2.1	Prækvarteret.....	48
7.2.2	Kvarteret.....	49
7.2.3	Recente forkastninger	52
7.2.4	Begravede dale	53
8.	Nordlige Kattegat	55
8.1	Seismiske enheder	55
8.1.1	Prækvarter strata.....	55
8.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	60
8.1.3	Smeltevandssedimenter	61
8.1.4	Issøsedimenter	61
8.1.5	Senglaciale lerede og siltede, marine sedimenter	61
8.1.6	Holocæne ferskvandssedimenter	62
8.1.7	Holocæne, fluviale sedimenter	62
8.1.8	Holocæne, sandede, marine sedimenter	62
8.1.9	Holocæne, dyndede, marine sedimenter.....	62
8.2	Konceptuel geologisk model.....	64
8.3	Tykkelse af senlaciale aflejringer.....	66
8.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	69
8.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	72
9.	Sydlig Kattegat	75
9.1	Seismiske enheder	75
9.1.1	Prækvarter strata.....	81
9.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	81
9.1.3	Smeltevandssedimenter	81
9.1.4	Senglaciale, lerede og siltede, marine sedimenter	81
9.1.5	Senglacial smeltevandssedimenter og fluviale sedimenter	82
9.1.6	Holocæne, lerede og siltede, ferskvands- og brakvandssedimenter	83
9.1.7	Tidlig Holocæn, sandede, marine- og lagunesedimenter	83
9.1.8	Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser.....	83
9.1.9	Holocæne, dyndede, marine sedimenter.....	83
9.2	Konceptuel geologisk model.....	85
9.3	Tykkelse af senlaciale aflejringer.....	86
9.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	88
9.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	89
10.	Sydlig Lillebælt	92
10.1	Seismiske enheder	92
10.1.1	Prækvarter strata.....	97
10.1.2	Interglaciale sedimenter	97
10.1.3	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	97
10.1.4	Glaciale smeltevandssedimenter.....	97
10.1.5	Senglaciale, sandede ferskvandssedimenter	98
10.1.6	Senglacial, Baltisk Issøler.....	98

10.1.7	Sen senglacial ferskvandssedimenter	99
10.1.8	Tidlig Holocæn, lerede og siltede, ferskvandssedimenter	99
10.1.9	Holocæne, sandede, marine sedimenter	99
10.1.10	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	99
10.2	Konceptuel geologisk model	102
10.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	104
10.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	105
10.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	107
11.	Nordlige Storebælt	110
11.1	Seismiske enheder	110
11.1.1	Prækvarter strata	114
11.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	115
11.1.3	Slap moræne	115
11.1.4	Tidlig senglacial smeltevandsler	115
11.1.5	Mellem senglacial smeltevandsler	115
11.1.6	Senglaciale fluviale sedimenter	116
11.1.7	Holocæne ferskvandssedimenter	116
11.1.8	Holocæne dyndede, marine sedimenter	116
11.1.9	Holocæne sandede kyst- og flakdannelser	116
11.2	Konceptuel geologisk model	118
11.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	119
11.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	121
11.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	123
12.	Sydlig Storebælt og Femern Bælt	126
12.1	Seismiske enheder	126
12.1.1	Prækvarter strata	126
12.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	133
12.1.3	Slap moræne	133
12.1.4	Smeltevandssedimenter	133
12.1.5	Tidlig senglacial smeltevandsler	133
12.1.6	Senglacial, Baltisk Issøler	134
12.1.7	Mellem senglacial smeltevandsler	134
12.1.8	Senglaciale deltasedimenter	134
12.1.9	Senglaciale, fluviale sedimenter	134
12.1.10	Holocæne, fluviale sedimenter	134
12.1.11	Holocæne ferskvandssedimenter/ Ancylus Sø-ler	135
12.1.12	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	135
12.1.13	Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser	135
12.2	Konceptuel geologisk model	137
12.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	139
12.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	142
12.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	145

13.	Øresund til Gedser	148
13.1	Seismiske enheder	148
13.1.1	Prækvartære strata.....	154
13.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	154
13.1.3	Slap moræne	155
13.1.4	Smeltevandssedimenter	155
13.1.5	Senglaciale, Baltiske issøsedimenter	156
13.1.6	Holocæne ferskvandssedimenter	156
13.1.7	Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser.....	157
13.1.8	Holocæne, sandede og dyndede, marine sedimenter	157
13.2	Konceptuel geologisk model.....	160
13.2.1	Øresund.....	160
13.2.2	Faxe Bugt	161
13.2.3	Kriegers Flak	162
13.2.4	Øst for Falster	163
13.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	165
13.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	169
13.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	172
14.	Bornholm	176
14.1	Seismiske enheder	176
14.1.1	Prækvartære strata.....	180
14.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	180
14.1.3	Smeltevandssedimenter	180
14.1.4	Senglaciale, lerede ferskvandssedimenter (Baltisk Issø-fase)	181
14.1.5	Tidlig Holocæn ferskvandssedimenter (Ancylus Sø-fase)	181
14.1.6	Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter	181
14.2	Konceptuel geologisk model.....	184
14.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	186
14.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	187
14.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	189
15.	Jammerbugt og Skagerrak	193
15.1	Seismiske enheder	194
15.1.1	Prækvartære strata.....	194
15.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	194
15.1.3	Senglaciale, lerede til siltede, glaciomarine sedimenter	199
15.1.4	Senglaciale, finsandede til lerede ferskvandssedimenter	199
15.1.5	Tidlig Holocæn, marine sedimenter	199
15.1.6	Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter	199
15.2	Konceptuel geologisk model.....	202
15.3	Tykkelse af senglaciale aflejringer	204
15.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	205
15.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	207

16.	Østlige Nordsø	210
16.1	Seismiske enheder	210
16.1.1	Prækvarter strata.....	210
16.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter.....	216
16.1.3	Smeltevandssedimenter	216
16.1.4	Interglaciale, lerede og siltede, marine sedimenter	217
16.1.5	Senglaciale, finsandede til lerede ferskvandssedimenter	217
16.1.6	Senglaciale, lerede til siltede glaciomarine sedimenter	217
16.1.7	Tidlig Holocæn, marine sedimenter	217
16.1.8	Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter	218
16.2	Konceptuel geologisk model.....	218
16.3	Tykkelse af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer	223
16.4	Tykkelse af Holocæne aflejringer	226
16.5	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	229
17.	Vestlige Nordsø	234
17.1	Seismiske enheder	234
17.1.1	Prækvarter strata.....	234
17.1.2	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, præ-Weichsel	235
17.1.3	Smeltevandssedimenter, præ-Weichsel	235
17.1.4	Interglaciale sedimenter	243
17.1.5	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, Weichsel	243
17.1.6	Weichsel Issøsedimenter	244
17.1.7	Glaciale smeltevandssedimenter, Weichsel	244
17.1.8	Senglaciale, fluviale sedimenter	244
17.1.9	Senglaciale, glaciomarine sedimenter	244
17.1.10	Holocæn tørv og gytje	245
17.1.11	Holocæne fluviale sedimenter	245
17.1.12	Holocæne sandede, marine sedimenter.....	245
17.1.13	Holocæne dyndede, estuarine-marine sedimenter.....	245
17.1.14	Holocæne marine sedimenter	245
17.2	Konceptuel geologisk model.....	247
17.3	Tykkelse af Ikke-isoverskredne Weichsel issøsedimenter	251
17.4	Tykkelse af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer	253
17.5	Tykkelse af Holocæne aflejringer	256
17.6	Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold	258
18.	Vurdering af tykkelsen af bløde sedimenter	262
19.	Marinarkæologiske interesser	268
19.1	Havniveauændringer og fordelingen af land / hav	268
19.1.1	Palæogeografiske kort.....	268
19.1.2	Strandforskydningskurver	270
19.2	Vurdering af arkæologiske interesser	273
19.2.1	Arkæologiske interesser i Nordsøen.....	274
19.2.2	Arkæologiske interesser i indre danske farvande	276

20.	Konklusion og perspektivering	278
20.1	Den geologiske kortlægning	278
20.2	Konklusion og perspektivering.....	280
21.	Referencer	283

Bilag i særskilt bilagsrapport

Bilag 1: Foto af vibrocore kerner

Bilag 2: Sedimentologiske logs for vibrocore borer

Bilag 3: Kornstørrelsesanalyser

1. Forord/Baggrund

I den politiske delaftale til Finanslov 2022 "Investeringer i et fortsat grønnere Danmark" blev der for perioden 2022-2025 afsat midler til at sikre det nødvendige datagrundlag og understøtte den langsigtede planlægning af ny storskala udbygning af havvind. I den forbindelse indgik Energistyrelsen et samarbejde med NIRAS, DCE (Aarhus Universitet) samt DTU Vind om en screening, der blandt andet skal kortlægge hvilke dele af det danske havområde, der potentielt kan være særligt sårbare over for storskalaudbygning af havvind.

Som en del af screeningen indgik Energistyrelsen samtidig et samarbejde med GEUS om en overordnet geologisk kortlægning af den danske havbund med henblik på at etablere et bedre datagrundlag til havvindudbygning. Den nye kortlægning vil være afgørende for vurdering af, hvorvidt områder er egnede til opstilling af havvindmøller og vil være central for den samlede screening af potentialet for storskala udbygning af havvind i Danmark.

Det samlede projekt skal således bidrage til at efterkomme den forventede massive efterspørgsel på udbygning af havvind i de kommende år og ligeledes søge at afdække de kumulative miljøeffekter, der kan være forbundet hermed.

Mere specifikt er formålet med screeningen:

- At planlægge havvind smartere,
- At kortlægge egnede områder til opstilling af havvind,
- At opnå tidligt kendskab til miljø- og naturforhold, så man undgår væsentlige og uhenigtsmæssige overraskelser, der kan fordyre eller besværliggøre opstilling af havvind i udbudsområder, og at kortlægge muligheden for sameksistens mellem havvindmøller og andre arealinteresser bedst.

På den måde forventes screeningen og den geologiske kortlægning at levere et samlet overblik over Danmarks havareal og at identificere de områder, hvor der forventes færrest miljø- og interessekonflikter og også at identificere, de områder, hvor der kan forventes behov for særlige undersøgelser, afværgetiltag eller projektilpasninger.

2. Indledning

GEUS har fået til opgave af Energistyrelsen at gennemføre en geologisk screening af det danske havområde med henblik på at etablere et bedre geologisk datagrundlag for havvind-udbygning. Projektets formål er at opnå større sikkerhed for, at et givent område, ved fremtidige udpegninger af havvindområder, geologisk set er egnet til havvind. Resultaterne fra projektet skal sammen med en følsomhedskortlægning af natur- og miljøparametre, igangsat af Energistyrelsen, indgå i en samlet vurdering af egnede områder til havvind i Danmark.

Gennem en overordnet geologisk kortlægning af hele det danske havareal er der således etableret en helhedsforståelse af de overfladenære geologiske forhold under havbunden, som kan bruges af beslutningstagere til at vurdere både de enkelte områders egnethed i forhold til opstilling af havvindmøller og graden af geologisk kompleksitet samt et første forventet omkostningsniveau i relation til fundering.

I denne rapport beskrives således det arbejde der er udført og resultaterne af kortlægningen præsenteres. Rapporten er opbygget med en række fælles indledende beskrivelser i kapitel 3-7, efterfulgt af separate beskrivelser af resultater fra de forskellige delområder i kapitel 8-17 og igen nogle fælles afsluttende beskrivelser i kapitel 18-20.

I kapitel 3 gives en generel beskrivelse af geologiske forhold med betydning for fundering af havvind, de mulige geotekniske implikationer samt en beskrivelse af principperne for den geologiske kortlægning af potentielt bløde sedimenter der er foretaget.

I kapitel 4 beskrives datagrundlaget for kortlægningen, mens kapitel 5 beskriver indsamlingen af nye data. I kapitel 6 gives en beskrivelse af den bearbejdning og tolkning af data, der er foretaget.

I kapitel 7 præsenteres først den regionalgeologiske udvikling i de indre danske farvande og dernæst den geologiske udvikling i Nordsøen, mens resultaterne af kortlægningen af de enkelte dele af det danske havområde beskrives i kapitel 8-17. Der er i kortlægningen og beskrivelserne fokuseret på mægtigheden af de ukonsoliderede (potentielt bløde) sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde, og som ligger over de ældre, og typisk mere hårde, glacial lag.

I kapitel 18 sammenfattes den geologiske kortlægning til en inddeling af det danske havområde i forhold til, i hvilket omfang bløde sedimenter forventes at udgøre en udfordring i forbindelse med fundering af havvindmøller. I kapitel 19 gives en overordnet vurdering af muligheden for marinarkæologiske interesser i henholdsvis Nordsøen og indre danske farvande og i kapitel 20 en kort konklusion og perspektivering.

3. Geologiske forhold med betydning for havvind

Den geologiske udvikling i et område samt de geologiske lags dannelsesmiljø, egenskaber og beskaffenhed har betydning for lagenes geotekniske parametre og de geotekniske parametre har stor betydning for muligheden for fundering af havvindmøller og de forbundne omkostninger.

I forhold til fundering af havvindmøller kan både bløde og hårde sedimenter være problematiske. De bløde sedimenter i forhold til lave geotekniske styrkeparametre og de hårde sedimenter i forhold til at drive fundamenterne ned i havbunden. De glaciale aflejringer har været isbelastede og er dermed konsoliderede. De udgør derfor typisk ikke et problem i forhold til lave geotekniske styrker, men kan potentielt/lokalt være problematiske i forhold til at drive fundamenter i havbunden. Det er derfor vigtigt i forhold til fundering at kende tykkelsen af de bløde sedimenter og dermed dybden til mere hårde og geoteknisk kompetente aflejringer.

I Tabel 3.1 er vist en oversigt over en række typisk forekommende sedimenter og generelle geologiske forhold i det danske havområde og de mulige geotekniske implikationer (Velenturf et al., 2021; Prins et al., 2025) og i det følgende er deres betydning i forhold til fundering af havvindmøller nærmere beskrevet.

Tabel 3.1 Oversigt over generelle geologiske forhold og forskellige sedimenttypers betydning i forhold til fundering af havvindmøller (modificeret efter Velenturf et al., 2021).

Sediment type	Kritiske geotekniske forhold/udfordringer	Egnethed ift. fundering
Marint sand	Typisk ingen	Velegnet
Marint ler/blødt mudder/dynd	Lav geoteknisk styrke	Ikke velegnet ved større tykkelser
Tørv	Lav geoteknisk styrke, høj kompakteringsevne	Ikke velegnet
Smeltevandssand	Typisk ingen	Velegnet
Issøler	Lav geoteknisk styrke medmindre det er overkonsolideret (tidligere isbelastet)	Ikke velegnet ved større tykkelser
Moræneler	Potentielt overkonsolideret (tidligere isbelastet) og stor heterogenitet, kan indeholde lag af grove materialer, og store sten samt dislokerede flager af ældre sedimenter	Potentielt problematiske
Sedimenter i begravede dale	Potentielt heterogene med både glaciale og ikke-glaciale aflejringer og skarpe overgange mellem sedimenttyper på tværs af dalflankerne og internt i dalfyllet med abrupte forskelle i geotekniske egenskaber	Potentielt problematiske
Glacialtektoniske deformationer	Mulighed for stærkt hældende lag og meget veksellende lagdeling samt forekomster af dislokerede flager f.eks. bløde sedimenter og abrupte forskelle i geotekniske egenskaber	Potentielt problematiske
Gas eller porevæske med overtryk i sedimenterne	Kan medføre gasudslip i forbindelse med boringer og konstruktionsarbejde og kan medføre akustisk dæmpning/sløring af seismiske data så underliggende lag ikke kan tolkes	Potentielt problematiske
Overkonsoliderede sedimenter	Isbelastning eller tidligere eksponering ved overfladen og udtørring kan medføre overkonsolidering og problemer med hårde materialer	Potentielt problematiske
Overfladenære hårde bjergarter	Typisk høj geoteknisk styrke og hårdheden kan være et problem, men de kan være forvitrede og bløde	Potentielt problematiske

3.1 Geotekniske implikationer

I den geologiske screening af det danske havområde er der kortlagt geologiske forhold og aflejringstyper som kan have betydning for egnetheden af et område i forhold til fundering af havvindmøller:

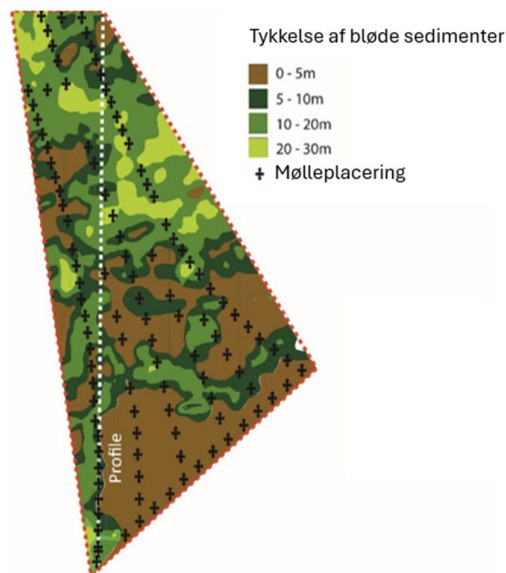
- Bløde sedimenter (silt, ler, mudder, dynd og tørv)
- Marint sand og smeltevandssand
- Marine dynamiske sandaflejringer
- Overkonsoliderede glaciale sedimenter
- Glacialtektoniske deformationer
- Begravede Kvartære tunneldale /palæo-kanaler
- Overfladenær gas i sedimenterne
- Overfladenære hårde (Prækvartære) bjergarter

Med reference til Velenturf et al. (2021), beskrives her nogle af de mulige geotekniske implikationer af disse geologiske forhold.

Bløde sedimenter

Bløde sedimenter som f.eks. blødt ler, silt, mudder, dynd og tørv kan have lave eller meget lave geotekniske styrkeparametre. Det kan have stor betydning for design og længde af fundamenter og medføre øgede omkostninger. Ringe bæreevne af sedimenterne kan desuden være et problem i forhold til for stor nedtrængning af benene på et evt. jack-up fartøj i installationsfasen og medføre behov for en anden type installationsfartøj.

I Figur 3.1 er vist et kort over tykkelsen af bløde sedimenter i den eksisterende Anholt havvindmøllepark, og det kan ses, hvordan de enkelte møller tilsyneladende er placeret, hvor tykkelsen af bløde sedimenter er mindst mulig.



Figur 3.1 Figuren viser, hvordan placeringen af de enkelte vindmøller i den eksisterende Anholt havvindmøllepark tilsyneladende er tilpasset tykkelsen af de bløde sedimenter i området.

Sandaflejringer

Aflejringer af marint sand og smeltevandssand, herunder ældre smeltevandsaflejringer som har været isbelastede i forbindelse med Kvartærtidens isoverskridelser, vil typisk have relativt høje geotekniske styrkeparametre og ikke give anledning til problemer i forhold til fundering af havvindmøller.

Recente marine sandaflejringer kan dog være dynamiske med bundformer der flytter sig som følge af varierende erosion og omlægning af materialet. Det kan medføre ændringer af havbundens topografi, som kan have betydning set over den operative levetid for havvindmøller, hvis der opstår blotlægning (scouring) eller tilsanding af transmissionskabler og fundamenter.

Glaciale aflejringer

Glaciale moræneler aflejringer vil typisk være overkonsoliderede som følge af isbelastningen fra Kvartærtidens isoverskridelser og have høje geotekniske styrkeparametre velegnet til fundering. Moræneaflejringer kan dog også være så hårde, at det kan medføre udfordringer i konstruktionsfasen i forbindelse med f.eks. nedramning af fundamenter. De kan også være meget heterogene og f.eks. indeholde hårde lag, hvor det finkornede materiale er transporteret væk og hvor den dynamiske sortering har medført en op-koncentrering af grove materialer som grus og sten (lag deposits). Sådanne lag kan potentielt give udfordringer i forbindelse med nedramning af fundamenter og give skader på fundament eller udstyr. I det hele taget kan store variationer i tykkelse, lithologi og egenskaber i glaciale aflejringer og Kvartære aflejringer generelt, gøre både udvælgelse af de enkelte møllepositioner og kabelruter og funderingsdesign mere kompliceret. En hård og meget heterogen overflade tæt på havbunden kan desuden gøre det sværere at forudsige erosion som kan blotlægge installationer.

Glacialtektoniske deformationer

I områder med glacialtektoniske deformationer (forstyrrelser, folder, forskydninger i lagene forårsaget af gletsjerisens bevægelse under istiderne) kan der forekomme stejlt hældende og alternerende lagdeling, dislokerede flager af hårde eller bløde sedimenter og abrupte ændringer i de geotekniske forhold over korte afstande.

Begravede dale/palæo-kanaler

Tilstedeværelsen af begravede Kvartære tunneldale og/eller palæo-kanaler (dale eller kanaler eroderet ned i underlaget og senere udfyldt med nye sedimenter) kan også betyde bratte ændringer i sammensætningen af sedimenterne og deres egenskaber på tværs af flankerne, ligesom fyldet i dalene/kanalerne kan være mere komplekst og heterogent end de omgivende geologiske lag de er nedskåret i.

Overfladenær gas

Gas i de overfladenære sedimenter kan dæmpe de seismiske lydbølger og sløre billedet af de underliggende lag og på den måde besværliggøre eller umuliggøre tolkningen. Gas (eller porevæske med overtryk) i sedimenterne kan potentielt også medføre en risiko for såkaldt blow-out i forbindelse med borearbejde eller konstruktionsarbejde. Typisk vil der være tale om gas dannet i Holocæne dyndlag. Hvis overfladenær gas siver ud fra havbunden, vil det ofte kunne ses som pockmarks på havbunden. Sådanne områder kan være ustabile og problematiske i forhold til møllefundamenter og kabellægning.

Overfladenære hårde bjergarter

Overfladenære, hårde Prækvartære bjergarter vil typisk have meget høje geotekniske styrkeparametre. Det kan som udgangspunkt være en fordel i forhold til fundering, men kan potentielt også være problematisk i forhold til nedramning af fundamenter. De øvre dele af ellers hårde ældre bjergarter kan desuden være forvitrede ved overgangen til de Kvartære aflejringer og derfor have lavere eller mere varierende geotekniske styrkeparametre end forventet. Meget varierende dybder til toppen af de hårde bjergarter kan have betydning for valg af fundamenttyper.

3.2 Kortlægning af geologiske enheder

Den kortlægning der er foretaget i forbindelse med den geologiske screening for havvind er en geologisk/stratigrafisk kortlægning og ikke en kortlægning af lithologi eller geotekniske egenskaber. Der er således fokuseret på kortlægning i forhold til den geologiske udvikling, lagernes alder og dannelsesmiljø og ikke specifikt forekomsten af f.eks. sand, ler, dynd m.m.

Som beskrevet ovenfor kan både bløde og hårde sedimenter være problematiske i forhold til fundering af havvindmøller. Mens de bløde sedimenter kan være problematiske i forhold til lave geotekniske styrkeparametre, kan de hårde sedimenter være fordelagtige i forhold til de geotekniske styrkeparametre, men potentielt også problematiske i forhold til at drive fundamenterne ned i havbunden. Det er derfor vigtigt at kende tykkelsen af de bløde sedimenter og dybden til de mere hårde og geoteknisk kompetente aflejringer. I den geologiske screening er der således fokuseret på at kortlægge tykkelsen af potentielt bløde senglaciale og Holocæne sedimenter over de underliggende mere hårde glacial aflejringer.

De senglaciale og Holocæne aflejringer har ikke været påvirkede af Kvartærtidens isoverskridelser og opfattes derfor i geoteknisk sammenhæng som ukonsoliderede eller bløde sedimenter. De udgøres ofte i høj grad af marint dynd, mudder, ler og silt eller ferskvandsler som kan have lave geotekniske styrker og dermed være problematiske i forhold til fundering af havvindmøller når de optræder i store mængtigheder. Men store dele af aflejringerne kan også bestå af marint sand eller ferskvandssand som ikke udgør et funderingsmæssigt problem.

I en overordnet storskala kortlægning som den aktuelle geologiske screening for havvind er det ikke muligt at foretage en generel inddeling i henholdsvis ler/dynd og sand af de senglaciale og Holocæne aflejringer. Dels er der generelt meget store afstande mellem de enkelte seismiske linjer i forhold til hvordan vi, fra mere detaljerede kortlægninger med korte linjeafstande, ved, at lithologien kan variere indenfor selv små områder. Dels har der kun været meget korte borer til rådighed (op til 6 m) og i meget begrænset antal i forhold til størrelsen af hele det danske havområde. Endelig giver de seismiske data ikke direkte information om lithologien (f.eks. ler og dynd kontra sand). De seismiske data kan dog give indirekte oplysninger om lithologien baseret på det interne refleksionsmønster i de seismiske enheder, og det er selvfølgelig benyttet til overordnede vurderinger af, om de kortlagte senglaciale og Holocæne aflejringer primært domineres af ler og dynd eller af sand. Hvor det har været muligt, er det således forsøgt indarbejdet i kortlægningen af de enkelte områder. Men

generelt er datagrundlaget for sparsomt og geologien for kompleks til en fuldstændig kortlægning af udbredelsen af henholdsvis ler/dynd og sand.

De tykkelseskort der er udarbejdede for de senglaciale og Holocæne sedimenter repræsenterer således uspecificerede ukonsoliderede aflejringer og dermed *potentielt* bløde sedimenter. Hvis en stor del af den kortlagte mægtighed består af sandede aflejringer, behøver en stor tykkelse derfor ikke at være problematisk, men hvis der er tale om bløde lerede og dyndede aflejringer kan det være et problem. Små tykkelser af bløde, lerede og dyndede aflejringer behøver heller ikke nødvendigvis at være et problem, men det er noget som mere lokale og detaljerede undersøgelser må vise. I første omgang, formentlig i form af skrivebordsstudier som inddrager alle relevante data, herunder eventuelle geotekniske data, og dernæst i form af detaljerede geofysiske, geologiske og geotekniske undersøgelser med dybe kerneboringer, geotekniske forsøg og laboratorieanalyser.

De steder der har været information til det, er der indtegnet polygoner på kortene som f.eks. kan vise, at de kortlagte tykkelser primært består af sandede aflejringer, blødt issøler mv. De forskellige polygoner relaterer sig kun til det kort de er indtegnet på. Så hvis en polygon angiver sandede aflejringer på et kort over tykkelsen af de Holocæne aflejringer siger det kun noget om en del af de Holocæne sedimenter og ikke noget om resten eller om de senglaciale aflejringer.

Endelig er der i de enkelte områder vist kort med en række andre vigtige geologiske elementer som f.eks. begravede dale, kendte dybe forkastninger, israndslinjer m.m. som kan have betydning for den overordnede vurdering af egnetheden af et område.

I forhold til begravede dale er der ikke i projektet foretaget en systematisk kortlægning af deres forekomst i områderne. Dels er datagrundlaget mange steder for sparsomt til at det er muligt med rimelig sikkerhed at forbinde formodede begravede dale fra seismisk linje til seismisk linje og dels er forekomsten af eroderede kanaler og begravede dale så hyppig, at det vil være et større studie i sig selv at foretage en decideret systematisk kortlægning. Dog er der i mange områder, de steder det har været muligt, kortlagt større og markante begravede dale som kan have betydning for tykkelserne af potentielt bløde sedimenter og deres egenskaber (se også afsnit 3.1, 7.1.4 og 7.2.4). I andre områder er det ikke den samlede mægtighed af dalfyld der er medregnet i tykkelserne af ukonsoliderede sedimenter, når de nederste og ældre dele af dalfyldet formodes at have været overskredet af Kvartærtidens isskjolde.

4. Datagrundlag

Den geologiske screening af det danske havområde er primært baseret på overfladenære seismiske data, som giver detaljerede informationer om de øverste geologiske lag. Afhængig af de lokale geologiske forhold og typen af aflejringer kan overfladenære seismiske data give detaljerede informationer ned til mellem nogle titalsmeter og hundrede meter eller mere under havbunden. De overfladenære seismiske data er derfor et godt værktøj til kortlægning og bestemmelse af tykkelse og udbredelse af sedimentære aflejringer i de danske farvande med betydning for etablering af f.eks. havvind. Derimod er opløseligheden af konventionelle, dybere seismiske data typisk ikke høj nok til formålet (jo mere energi, jo større nedtrængning, men samtidig lavere frekvensindhold og dermed væsentlig mindre opløselighed).

Den geologiske kortlægning er således baseret på nye multikanal overfladenære sparker seismiske data og borer indsamlet som en del af opgaven (Pérez et al., 2023; Vangkilde-Pedersen et al., 2023a, 2023b), suppleret med eksisterende overfladenære seismiske data og borer i den nationale marine råstofdatabase [Marta](#), som drives af GEUS (se Figur 12.1 og Afsnit 4.1). En række fortrolige datasæt i Marta databasen indgår dog ikke i datagrundlaget. Herudover er der anvendt en række ældre, forskningsbaserede datasæt samt konventionelle dybere seismiske data, som ikke fremgår af Marta databasen samt data fra sitespecifikke havvindundersøgelser stillet til rådighed for projektet. Flere af de ældre forskningsbaserede og konventionelle dybere datasæt er tilgængelige via [Undergrundsportalen](#), som også drives af GEUS. I alt er der tolket 56.388 km seismiske data, hvoraf 7.781 km er nye multikanal sparker data indsamlet som en del af projektet.

I kapitel 8-17, hvor resultaterne af arbejdet i de forskellige dele af det danske havområde beskrives, er der i hvert kapitel vist en figur med de seismiske linjer der har været tilgængelige for arbejdet. Det fremgår af disse figurer, at der både er områder med meget stor afstand mellem de enkelte seismiske linjer og områder med meget stor datatæthed. Men dels er det ikke alle data der har været relevant/nødvendigt at anvende og dels har det tidsmæssigt ikke været muligt at inddrage samtlige seismiske linjer i tolkningen i områder med meget stor linjetæthed. En del af det indledende arbejde har således været at udvælge hvilke tilgængelige data, der var relevante/nødvendige at benytte ud fra en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder.

Som en del af projektet er mange ældre analoge seismiske data, blevet gjort digitalt tilgængelige gennem skanninger af papirudskrifter af de seismiske profiler. Efterfølgende er de skannede profiler blevet geo-refereret og konverteret til SEG-Y format (standardformat for seismiske data; Barry et al., 1975). De ældre data er af varierende kvalitet og kan være behæftet med større usikkerhed på f.eks. positionering end moderne data, men de udgør ikke desto mindre en vigtig del af datagrundlaget. De ældre analoge data har således i dele af det danske havområde udgjort den eneste datadækning og nyttiggørelsen af dem har derfor været helt central i forhold til at dække disse områder.

I en række områder er datatætheden stadig meget lav, eller data mangler helt. I sådanne områder er der i stedet anvendt resultater af ældre kortlægninger, dvs. kortlægningsresultater baseret på seismiske data som af den ene eller den anden grund er gået tabt og ikke

længere findes, hverken analogt eller digitalt. I de tilfælde, hvor den geologiske screening er baseret på ældre kortlægningsresultater, er det beskrevet i de enkelte kapitler.

4.1 Marta databasen

Den nationale marine råstofdatabase [Marta](#) er udviklet af GEUS i samarbejde med Miljøstyrelsen og indeholder blandt andet indberetningspligtige data fra råstofundersøgelser i danske farvande. Databasen omfatter således overfladenære marine seismiske data, marine råstofboringer og relevante, geologiske rapporter fra råstofundersøgelser fra 1980 og frem til i dag. Herudover indeholder databasen også data fra andre undersøgelser samt sedimentanalyser foretaget af GEUS.

De seismiske data inkluderer både ældre, analoge data samt nyere data i digitalt format. I databasen fremgår en række seismiske data som konfidentielle, men gradvist gøres flere offentligt tilgængelige og kan downloades direkte fra databasen i SEG-Y format.

Marta databasen indeholder desuden information om alle overfladenære råstofressourceområder fra Miljøstyrelsens råstofkortlægning. Denne information er også anvendt i den geologiske screening.

4.2 Vurdering af behov for nye data

En del af det indledende arbejde i forbindelse med den geologiske screening for havvind har været at etablere et overblik over dækningsgrad og kvalitet af eksisterende seismiske data i det danske havområde med henblik på at vurdere og dokumentere, hvor der var behov for at indsamle nye data.

Vurderingen af behovet for indsamling af nye data er beskrevet i to separate rapporter for henholdsvis indre danske farvande og Nordsøen (Allaart et al., 2023a, 2023b), som har dannet baggrund for, hvor der blev indsamlet nye data i form af seismik og vibrocore boringer. Processen er kort beskrevet i det følgende.

4.2.1 Udvalgelseskriterier og planlagt dataindsamling

For at kunne vurdere den eksisterende dækningsgrad med seismiske data og behovet for nye data blev der gennemført en analyse af seismiske data, som var til rådighed. Formålet med analysen var at identificere områder med lav dækningsgrad, andre indikationer på et mangelfuldt datagrundlag og behov for nye, længere sammenhængende linjer til at knytte forståelsen af to eller flere områder med eksisterende data bedre sammen.

Analysen bestod således i indsamling og sammenstilling af eksisterende seismiske data og en vurdering af deres konfidens, herunder dokumentation af datatype og penetrationsgrad, kvalitet samt linjetæthed.

Som en del af analysen blev der opstillet tre kriterier for behov for nye data i forbindelse med den geologiske screening:

- a) Der findes ikke eksisterende eller brugbare seismiske data i området.
- b) Der er behov for lange seismiske linjer, som binder områder sammen.
- c) Nye multikanal seismiske data vil forbedre robustheden af den geologiske tolkning.

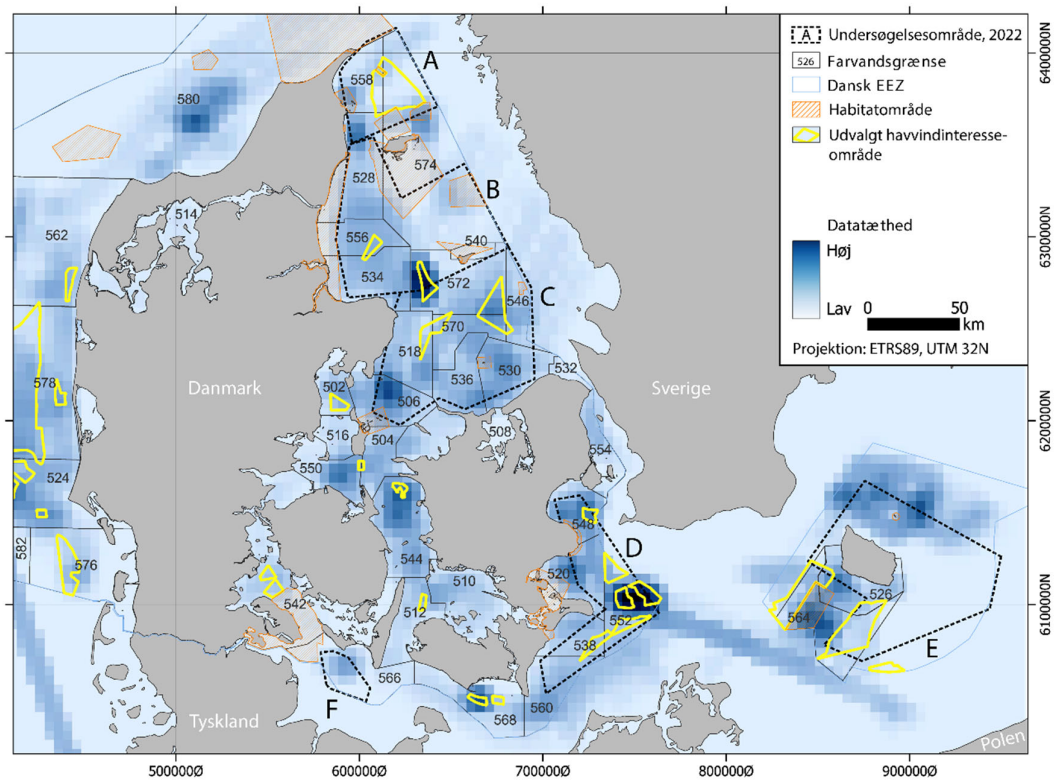
På baggrund af kriterier og analyse blev der efterfølgende udpeget områder, hvor der var behov for nye data, ansøgt om efterforskningstilladelse og planlagt linjer.

I Figur 4.1 og Figur 4.2 herunder er vist kort som illustrerer tætheden af eksisterende data i henholdsvis indre danske farvande og Nordsøen og i Figur 4.3 og Figur 4.4 er vist de nye seismiske linjer som blev planlagt på baggrund af ovenstående analyse og som dannede grundlag for ansøgning om tilladelse til undersøgelserne.

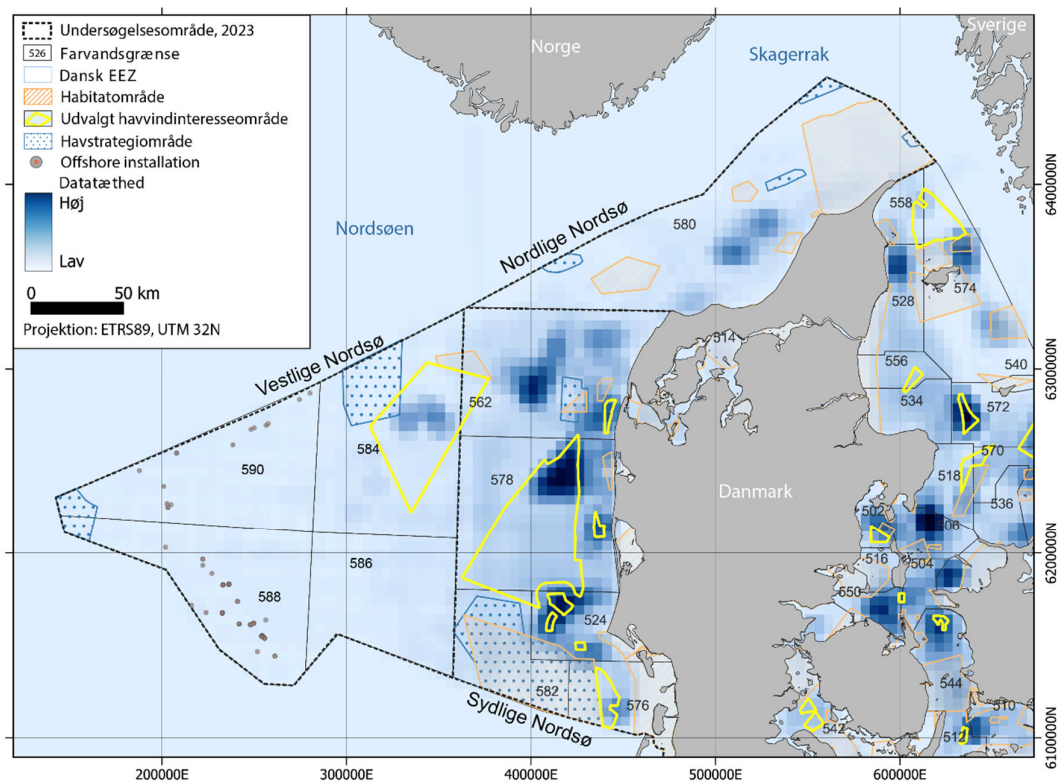
På figurene er vist en række områder, som på et tidspunkt har været udpeget som havvind-interesseområder. Flere af disse fremgår også af [Danmarks Havplan](#) og i nogle af dem er der for nylig gennemført dataindsamling og derfor ikke planlagt indsamling af nye data i forbindelse med den geologiske screening.

På de to figurer er også vist en række habitatområder og havstrategiområder. I habitatområder med havpattedyr som udpegningsgrundlag og havstrategiområderne blev det vurderet, at sandsynligheden for at opnå tilladelse til seismiske undersøgelser var lille, og at det ville tage uforholdsmæssigt lang tid at forsøge at opnå tilladelsen. Selvom den eksisterende seismiske datadækning typisk er lav/manglende i disse områder blev det derfor vurderet, at indsamling af nye data ikke var muligt indenfor rammerne af screeningsprojektet, og at de må dækkes baseret på eksisterende viden i det omfang, det er muligt.

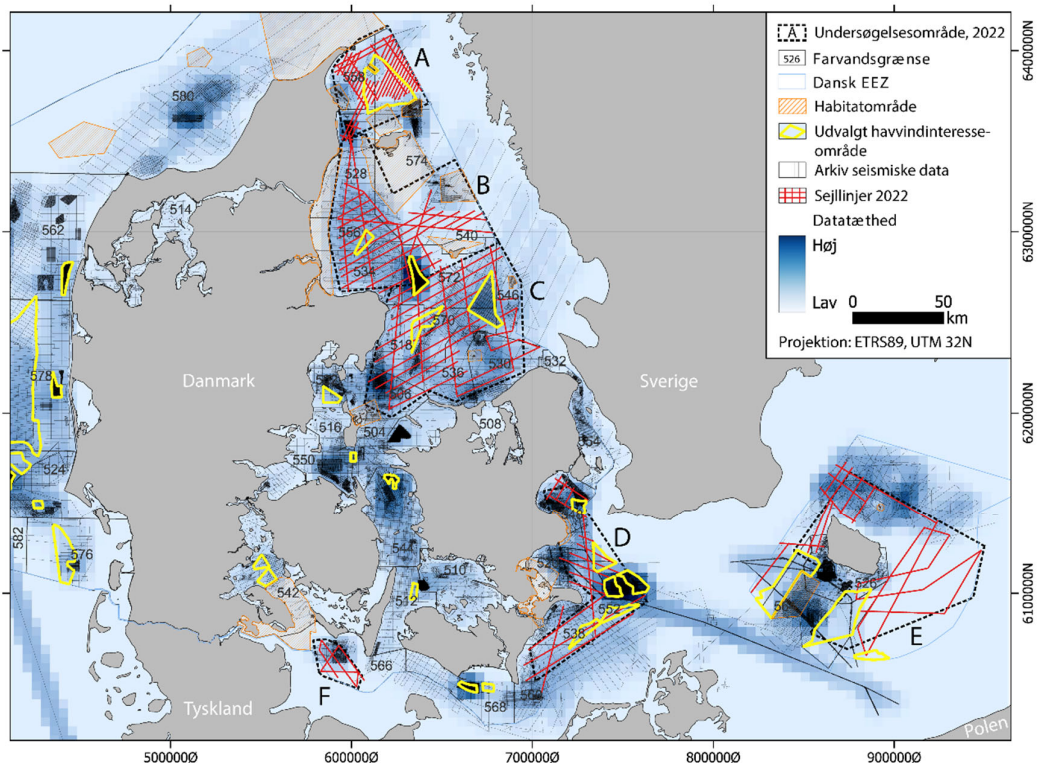
For yderligere at begrænse eventuelle gener fra undersøgelserne for havpattedyr mest muligt, blev alle sejlinjer og borer udpeget med en afstand til habitatområder med havpattedyr som udpegningsgrundlag på mindst 5 km.



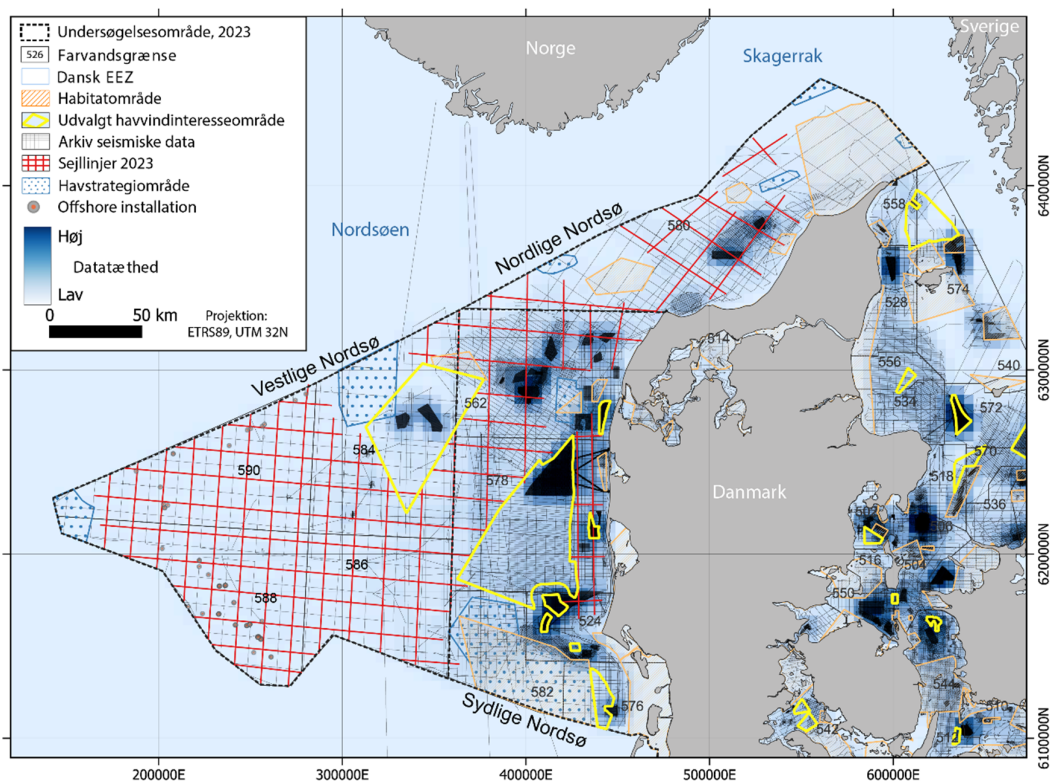
Figur 4.1 Dataæthedskort for de indre danske farvande. Mørk blå farve indikerer høj dataæthed (mange km seismiske data pr km²) og lys blå farve indikerer lav dataæthed (få km seismiske data pr km²).



Figur 4.2 Dataæthedskort for Nordsøen. Mørk blå farve indikerer høj dataæthed (mange km seismiske data pr km²) og lys blå farve indikerer lav dataæthed (få km seismiske data pr km²).



Figur 4.3 Kort over de indre danske farvande, som viser eksisterende seismiske data, datatæthed og med røde streger planlagte nye seismiske linjer som grundlag for ansøgning om efterforskningsstilladelse.



Figur 4.4 Kort over Nordsøen, som viser eksisterende seismiske data, datatæthed og med røde streger planlagte nye seismiske linjer som grundlag for ansøgning om efterforskningsstilladelse.

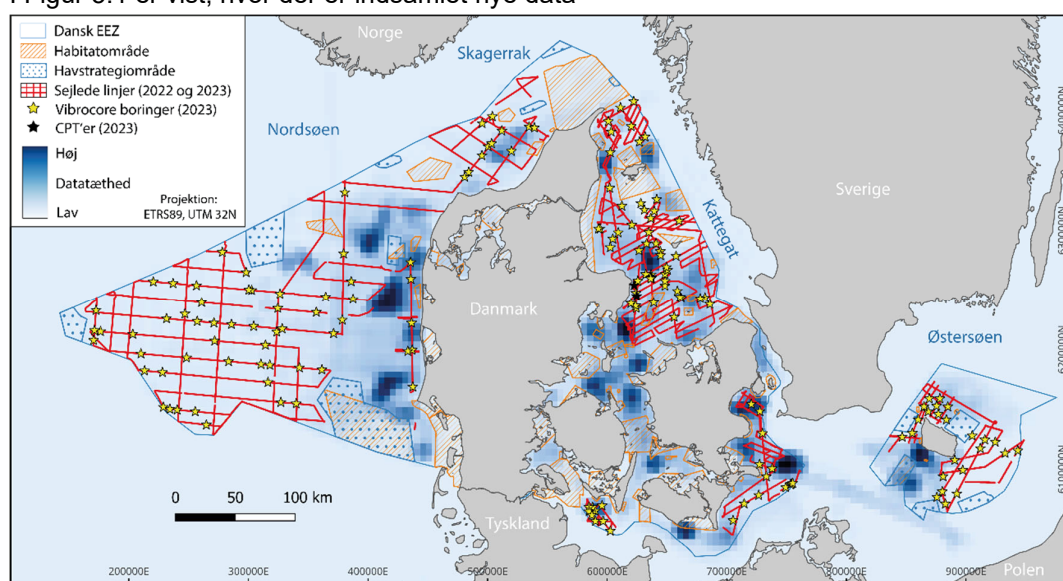
5. Nye geofysiske undersøgelser og boringer

Baseret på den forudgående analyse af behovet for nye data blev der i 2022 og 2023 gennemført tre survey-kampagner med indsamling af 7.781 km nye ultra-high resolution seismiske data (UHRS), 168 vibrocore boringer og 2 CPT.

Formålet med dataindsamlingen var således at indsamle nye og bedre data i områder med mangelfuld datadækning og/eller områder med behov for yderligere geologisk viden.

Den seismiske dataindsamling omfattede enkeltkanal- og multikanal sparker seismik (UHRS), Innomar sub-bottom profiler, side scan sonar og multibeam ekkolod.

I Figur 5.1 er vist, hvor der er indsamlet nye data

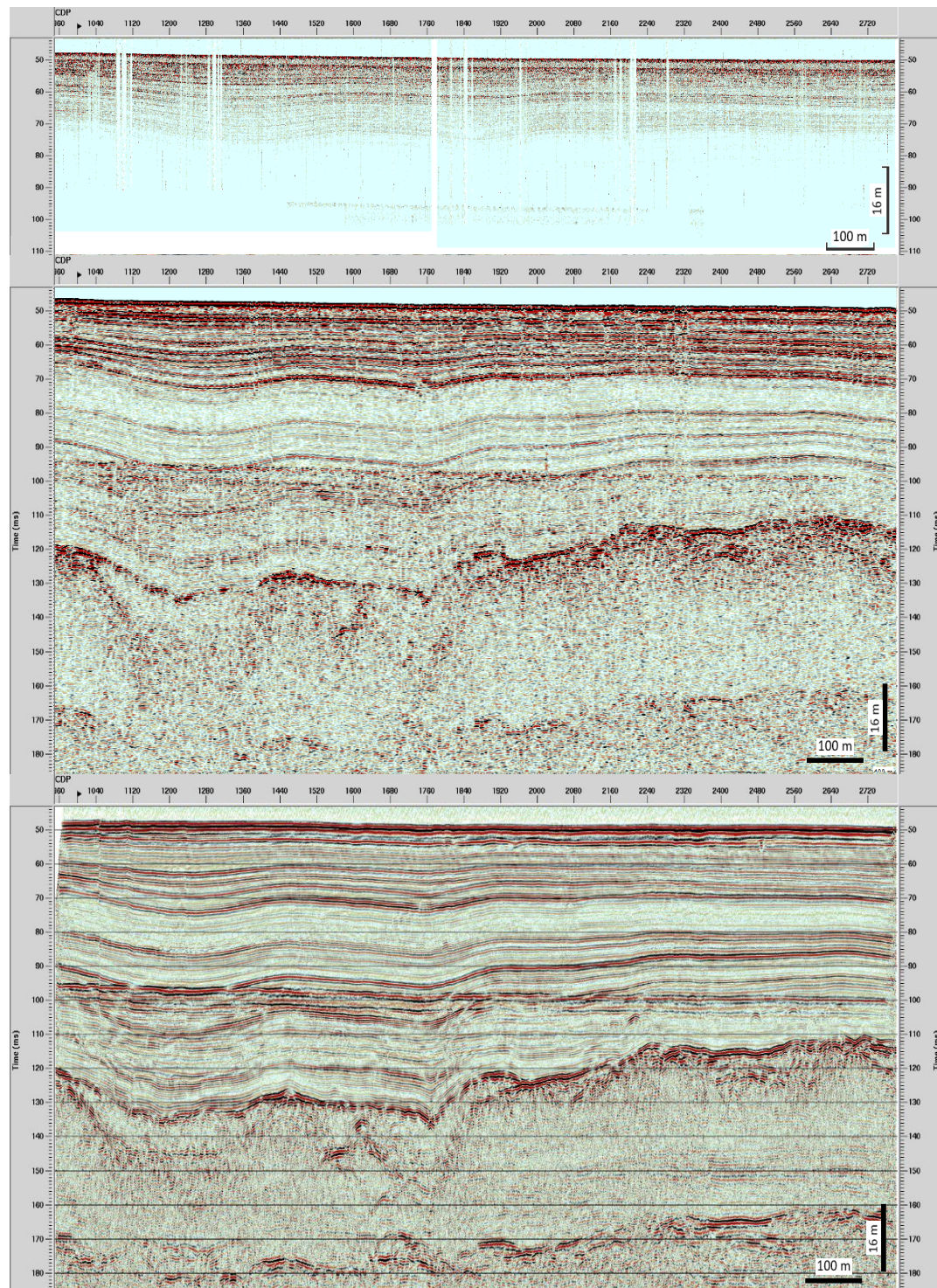


Figur 5.1 Kort som viser, hvor der er indsamlet nye data som en del af den geologiske screening.

Som nævnt er der indsamlet både enkeltkanal og multikanal sparker seismik. Data er optaget med den samme energikilde, men med hver sin hydrofonstreamer og optagesystem. Enkeltkanal seismik kan anvendes mere eller mindre direkte, med behov for kun en relativ enkel og hurtig processering af data. I modsætning hertil kræver UHRS multikanal sparker seismik en relativt avanceret og tidskrævende seismisk processering før data kan anvendes. Under processeringen forstærkes og forbedres signalet i kraft af de mange optagekanaler som giver en flerfoldig repræsentation af de samme refleksionspunkter i undergrunden. På den måde øges signal/støj forholdet gennem databehandlingen og der opnås en væsentligt bedre datakvalitet i forhold til både opløselighed og nedtrængning af det seismiske signal.

Fordelen ved at indsamle både UHRS multikanal og enkeltkanal sparker seismik har således været, at det var muligt hurtigt at påbegynde den geologiske tolkning baseret på enkeltkanal data uden at skulle vente på processering af data og efterfølgende fortsætte arbejdet på et datasæt af bedre kvalitet når UHRS multikanal data var færdigprocesserede.

I Figur 5.2 er vist et eksempel fra Kattegat med henholdsvis enkeltkanal (midterst) og multikanal (nederst) seismiske data fra den samme linje. Her ses det tydeligt, hvordan processeringen af multikanal data forbedrer signal/støj forholdet og giver både bedre opløsning af geologiske strukturer og mulighed for at kortlægge geologien mere sikkert og til større dybde.



Figur 5.2 Eksempel på datakvaliteten fra henholdsvis Innomar sub-bottom profiler (øverst), enkeltkanal sparker seismik (midterst) og UHRS multikanal sparker seismik (nederst). De tre profiler er fra den samme seismiske linje i Kattegat.

Hvor sparker data er mere lavfrekvente og har større nedtrængning, er sub-bottom profiler data mere højfrekvente og har mindre nedtrængning, men bedre opløselighed. Selvom sparker seismikken har været de primære data i undersøgelserne og det videre arbejde med den geologiske tolkning, har Innomar sub-bottom profiler data været et vigtigt supplement til tolkningen af sparker data i forhold til kortlægningen af de øverste lag lige under havbunden. Øverst i Figur 5.2 ses sub-bottom profiler data for den samme strækning som de to sparker eksempler midterst og nederst på figuren og det ses tydeligt, hvordan den øverste lagpakke er kortlagt i større detaljeringsgrad end med sparker data. Til gengæld er det også tydeligt, at den seismiske energi ikke er trængt længere ned end til bunden af netop den øverste lagpakke.

Mens sub-bottom profiler data og sparker data giver mulighed for at kortlægge de geologiske lag under havbunden giver multibeam ekkolod og side scan sonar data mulighed for at kortlægge selve havbunden. Med multibeam ekkolod kortlægges således vanddybden i et bredere bælte langs den sejlede linje (havbundens batymetri, eller topografi) og med side scan sonar kortlægges havbundens reflektivitet, også i et bredere bælte. Baseret på side scan sonar data er det således muligt at tolke om havbunden er stenet eller består af sand eller mere finkornede og bløde sedimenter, ligesom det kan være muligt at se kabler og rørledninger, trawl-spor, vrag, sandbølger, større sten eller andre objekter på havbunden.

Tolkning af multikanal ekkolod og side scan sonar data har ikke været en del af projektet, men side scan sonar data har været anvendt som støtte til tolkning af de seismiske data med hensyn til sedimenttyper i havbunden.

De indsamlede multibeam ekkolod data vil på et senere tidspunkt kunne anvendes til mere detaljerede undersøgelser langs de seismiske linjer af havbundens morfometri og morfologi (havbundens form og de processer, der ligger bag dannelsen af denne form). Tilsvarende vil de indsamlede side scan sonar data kunne anvendes til at udarbejde substratkort og habitatkort langs de seismiske linjer, dvs. kort som viser, hvilken type materiale havbunden består af (det fysiske underlag, som marine organismer lever på) og kort, som viser fordelingen af forskellige typer levesteder (habitater) på havbunden (områder, hvor bestemte biologiske og fysiske forhold gør det muligt for specifikke marine arter eller samfund at eksistere).

5.1 Geofysiske undersøgelser i indre danske farvande

I november og december 2022 blev der indsamlet seismiske data i seks større områder i indre danske farvande og Østersøen omkring Bornholm. Dataindsamlingen er nærmere beskrevet i Pérez et al. (2023).

Der blev optaget både enkeltkanal og UHRS multikanal sparker seismik og multikanal seismikken blev optaget med en 100 m lang streamer med 96 kanaler.

De seks områder, hvor der blev indsamlet data, var området nord for Læsø, mellem Læsø og Anholt, fra Anholt til syd for Djursland/Sjællands Odde, syd for Ærø og Langeland, i Køge Bugt og øst for Sjælland, Møn og Falster samt i Østersøen omkring Bornholm. De seismiske undersøgelser havde en varighed på 32 dage og der blev indsamlet i alt 3.739 km seismik.

5.2 Geofysiske undersøgelser i Nordsøen

I maj 2023 blev der indsamlet seismiske data i hele den danske del af Nordsøen og Jammertbugt og Skagerrak. Dataindsamlingen er nærmere beskrevet i Vangkilde-Pedersen et al. (2023a).

Der blev optaget både enkeltkanal og UHRS multikanal sparker seismik og multikanal seismikken blev optaget med en 50 m lang streamer med 48 kanaler. De seismiske undersøgelser havde en varighed på 30 dage og der blev indsamlet i alt 4.042 km seismik.

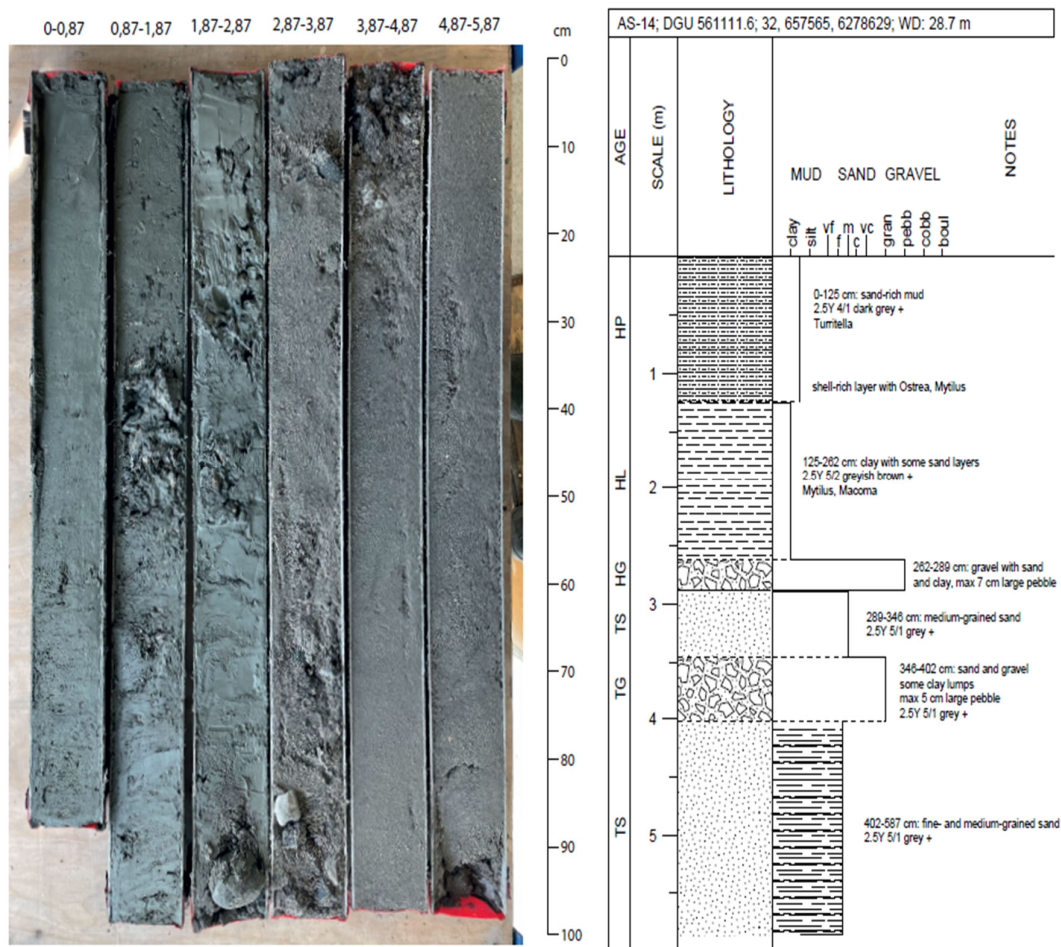
5.3 Indsamling af korte kerneboringer

Information fra boringer bruges til at verificere tolkningen af de seismiske data og afklare sedimentsammensætningen. Det er dog både meget dyrt og tidskrævende at udføre dybere boringer til havs og var ikke muligt indenfor rammerne af den geologiske screening og det meget store område som skulle dækkes. Derfor blev der i stedet udført et stort antal relativt korte vibrocore boringer, hvor der tages op til 6 m lange borekerner fra havbunden og ned efter. For at få mest mulig information ud af boringerne blev borepositionerne først planlagt efter indsamling og en første vurdering af de seismiske data. På den måde kunne vibrocore boringerne udføres på steder, hvor ellers dybereliggende lag ligger så tæt på havbunden, at de kan nås med vibrocore udstyret.

I GEUS' marine råstofdatabase Marta findes data for omkring 8.000 korte vibrocore råstofboringer, som typisk er placeret i områder, hvor der også foreligger seismiske data, mens der i områder med sparsomme eller ingen seismiske data, typisk også kun er meget få, eller slet ingen, boringsoplysninger. Den eksisterende dækning med vibrocore boringer har således i høj grad været styret af, hvor der har været råstofinteresser og udgør et væsentligt input til tolkningerne i disse områder. I forbindelse med den geologiske screening er der fokuseret på at udføre vibrocore boringer langs de nye seismiske linjer i områder med få data og i områder, hvor der var behov for supplerende viden i forhold til den geologiske forståelse.

I august og september 2023 blev der indsamlet vibrocore boringer i både Nordsøen og indre danske farvande samt i Østersøen omkring Bornholm. Dataindsamlingen er nærmere beskrevet i Vangkilde-Pedersen et al. (2023b). Boretogtet havde en varighed på 30 dage og der blev indsamlet i alt 168 vibrocore boringer.

I Figur 5.3 herunder er vist kernefoto fra en vibrocore boring samt den tolkede sedimentologiske log for boringen baseret på en detaljeret geologisk analyse og beskrivelse af kernestykkerne.

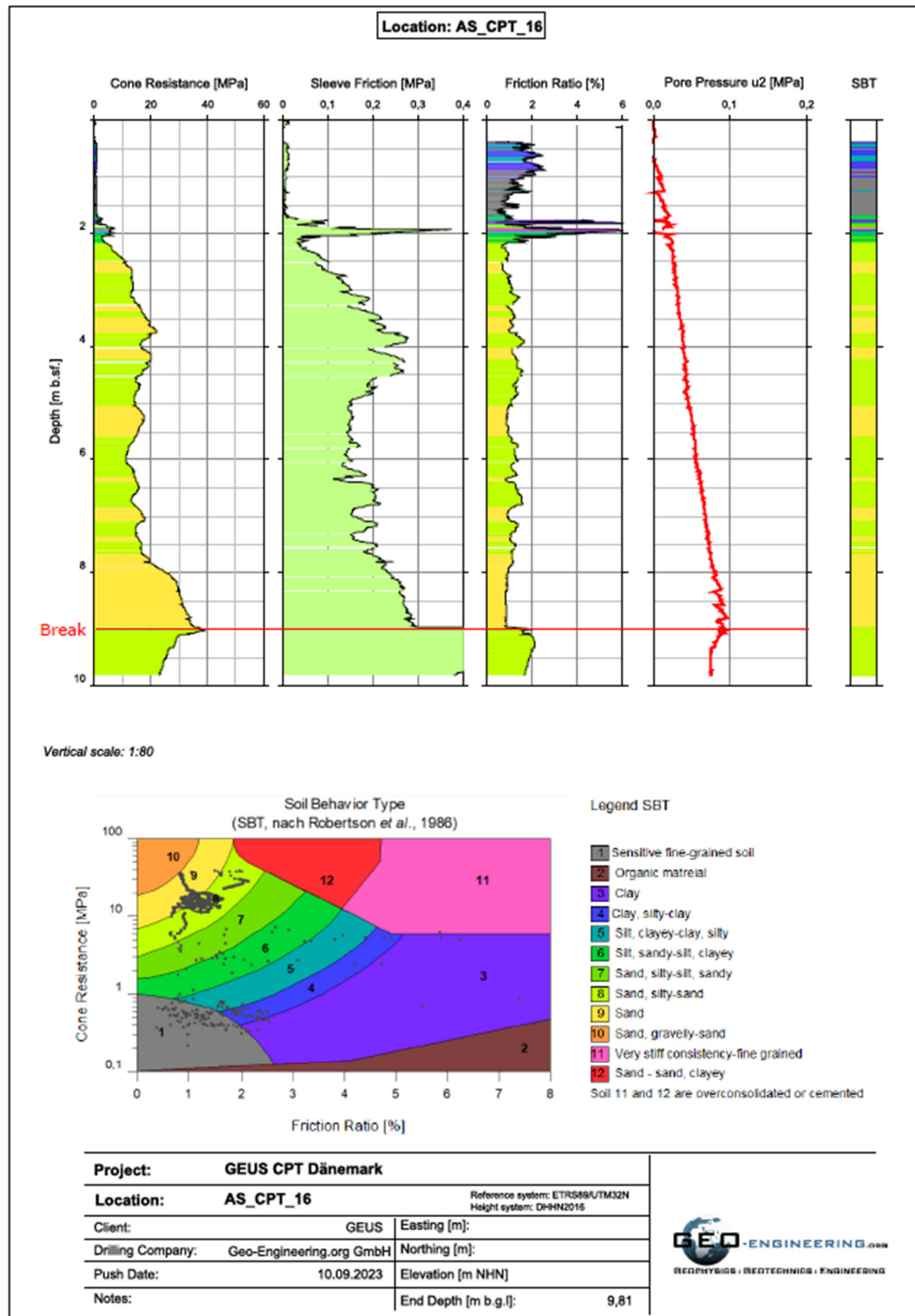


Figur 5.3 Kernefoto og tolket sedimentologisk log for vibrocore boring 561111.6 (AS-14).

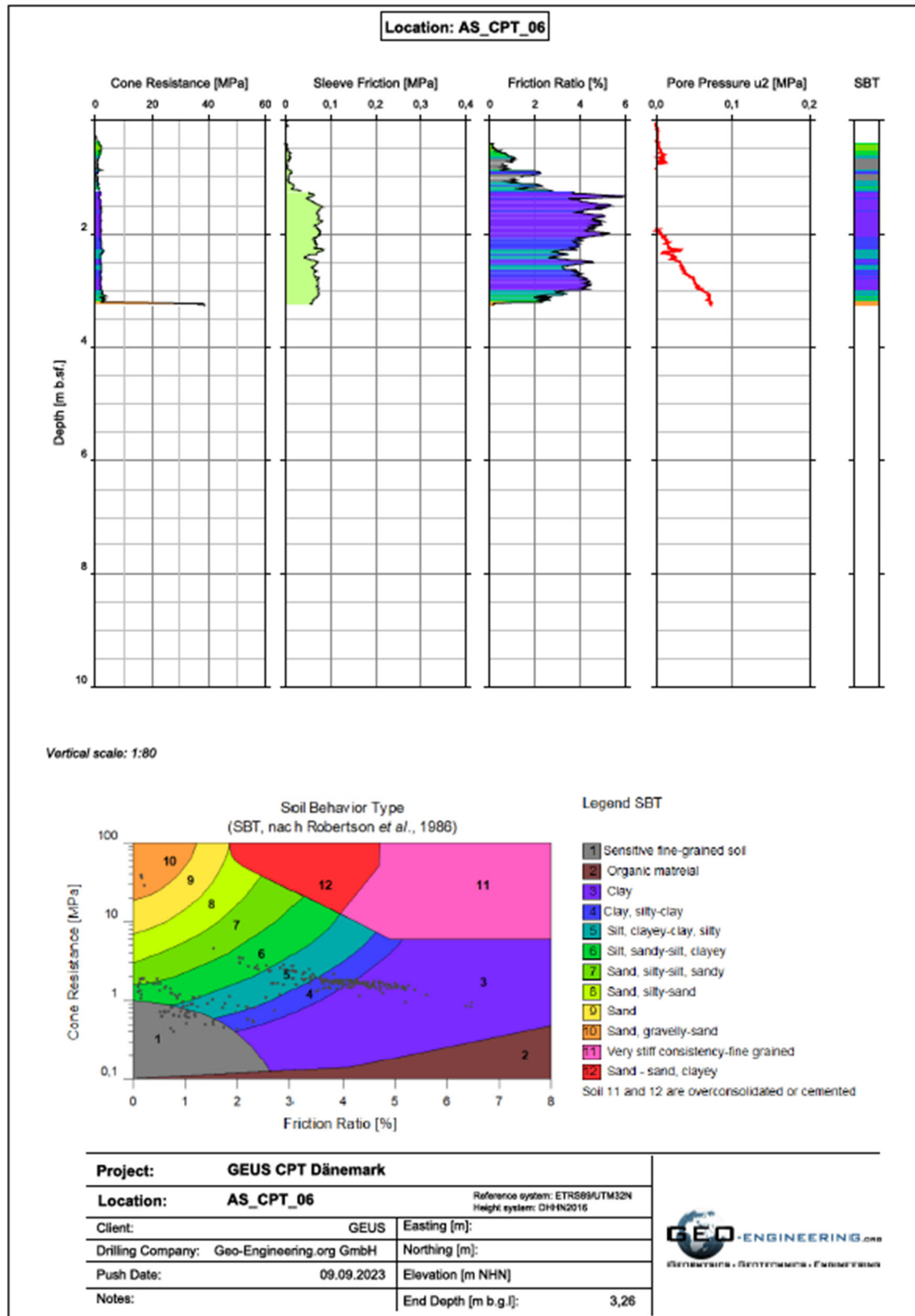
5.4 Indsamling af CPT-sonderinger

CPT-sonderinger giver information om lagernes geotekniske egenskaber, bidrager til verifikation af den seismiske tolkning, giver information om sedimentsammensætningen og benyttes til korrelation mellem borer og seismik samt mellem seismik og geotekniske parametre. Det er dog meget dyrt at udføre CPT-sonderinger til havs og derfor var der i forbindelse med den geologiske screening udelukkende planlagt en mindre testkampagne.

CPT-kampagnen forløb over 4 dage i september 2023 og udover mobilisering og test af udstyret blev der udført CPT-sonderinger på to lokaliteter ud for Grenå. Undersøgelserne er nærmere beskrevet i Vangkilde-Pedersen et al. (2023b). De to CPT-sonderinger blev kortere end planlagt, hvilket dels skyldtes beskadigelse af en CPT-sonde ved gennemførelsen af den første CPT og dels tab af en CPT-sonde ved gennemførelsen af den anden CPT-sondering. Men testkampagnen har bidraget med værdifuld erfaring til fremtidig planlægning og udførelse af CPT og resultaterne af de to CPT-sonderinger har en høj kvalitet og giver meget detaljerede oplysninger om de øverste lag under havbunden, se Figur 5.4 og Figur 5.5.



Figur 5.4 Resultater fra CPT-sondering AS_CPT_16.



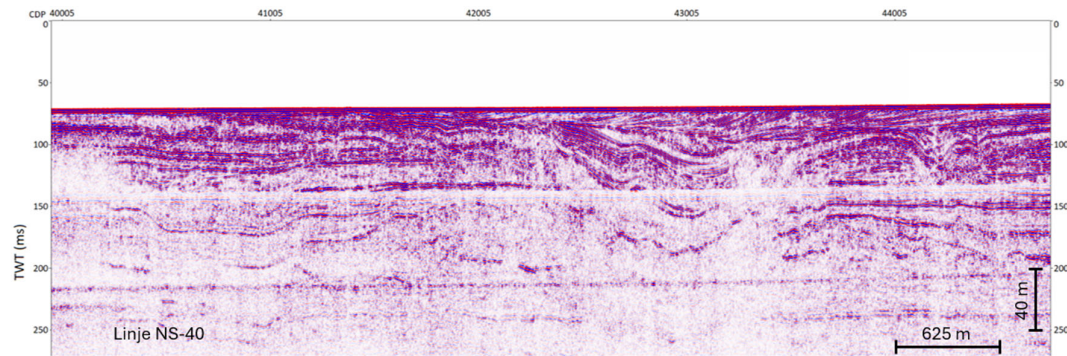
Figur 5.5 Resultater fra CPT-sondering AS_CPT_06.

6. Bearbejdning og tolkning af nye og gamle data

6.1 Processering af nye seismiske data

6.1.1 Processering af multikanal seismiske data

Den seismiske processering blev udført i softwaren RadExPro som inkluderer dedikerede processeringsmoduler til ultra-high resolution seismiske data (UHRs). Afhængig af datakvalitet og specifikke udfordringer for de forskellige seismiske linjer kan de faktisk anvendte processeringstrin variere fra linje til linje. Herunder er angivet en samlet kort oversigt over de processeringstrin der er påført UHRs multikanal data. I Figur 6.1 ses et eksempel på en processeret multikanal seismisk linje.



Figur 6.1 Udsnit af en processeret multikanal seismisk linje fra Nordsøen.

Tildeling af optagegeometri

Tildeling af optagegeometri er det første og grundlæggende trin i seismisk processering og indebærer en præcis tildeling af rumlige koordinater til hver seismisk trace ved at definere både kilde- og modtagerpositioner. For data indsamlet i Nordsøen i 2023 var der præcis kontrol over kilde- og modtagerpositioner gennem brugen af fire GPS-enheder placeret på skibet, ved kilden samt ved både starten og enden af streameren. Denne konfiguration resulterede i en positionsnøjagtighed inden for ca. én meter.

I modsætning hertil blev der ved dataindsamlingen i indre danske farvande i 2022 kun benyttet to operationelle GPS-enheder, placeret på skibet og ved kilden. Det har betydet en lidt større usikkerhed i modtagerpositionerne. For at optimere tildelingen af optagegeometri er der efterfølgende foretaget en analyse af ankomsttider for det direkte seismiske signal ved modtagerne og deres variation med stigende offset. Baseret på analysen er modtagerpositionerne estimeret mere præcist ud fra ankomsttiderne.

Derudover har strømmen af GPS-data lejlighedsvist indeholdt huller, der varierede fra få sekunder til flere minutter og med varierende omfang mellem de enkelte linjer. I sådanne

perioder uden GPS-data er de manglende data blevet interpoleret for at opretholde rumlig kontinuitet.

Kvalitetskontrol af data (QC) og binning

Den indledende kvalitetskontrol af de seismiske data omfatter blandt andet analyse af polaritet og amplitudeniveau på tværs af kanaler og skud. Før yderligere databehandling blev eventuelle dårlige kanaler (f.eks. på grund af en defekt hydrofon) fjernet og eventuelle kanaler med omvendt polaritet blev reverserede. Denne indledende kvalitetskontrol sikrer, at støjende eller upålidelige traces ikke forringer kvaliteten af de endelige stackede seismiske profiler.

Efter kontrol blev data sorteret baseret på kilde-modtager geometri i såkaldte CMP-gathers (common mid-point). Afhængig af linjespecifikke optageparametre og datatæthed blev data samlet i CMP-gathers med Bin-størrelser på 0,75-1,25 m.

Frekvensfiltrering

Frekvensfiltrering forbedrer signalkvaliteten ved at dæmpe uønskede frekvenskomponenter og koherent eller inkoherent støj. De primære filtreringsmetoder har omfattet:

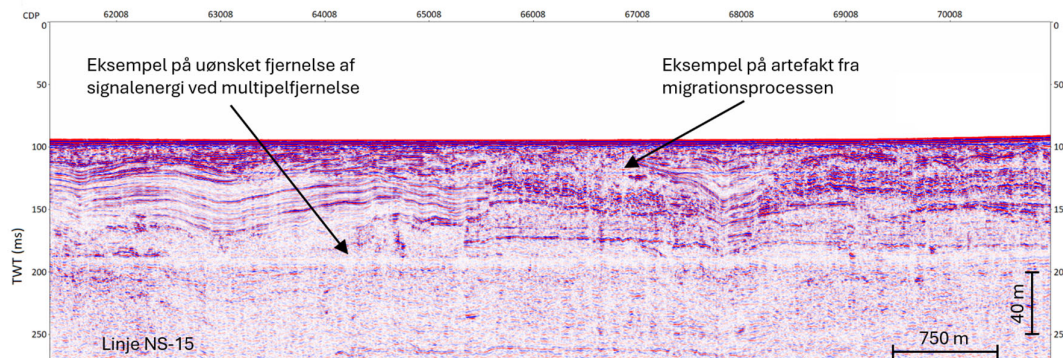
- Båndpasfiltrering: Der blev anvendt et standard båndpasfilter på 50–100–1500–2000 Hz på de fleste linjer. Afhængig af støjkarakteristika blev de præcise filterparametre justeret for hver enkelt linje. Data indsamlet i Nordsøen i 2023 indeholdt generelt nyttige signalfrekvenser op til ~1200 Hz, mens data indsamlet i de indre danske farvande i 2022 viste signalenergi op til 1500 Hz.
- Notch-filter: Data indsamlet i de indre danske farvande i 2022 indeholdt støj i et smalt frekvensbånd på 380-400 Hz, som blev fjernet ved hjælp af et såkaldt notch-filter.
- F-K filter (Frekvens-Bølgetal): Denne metode blev anvendt på NMO-korrigerede skud-gathers for at fjerne koherent lineær støj ved at skelne signaler baseret på deres tilsyneladende hældning i frekvens-bølgetalsdomænet.
- Burst-støjfjernelse: Høj-amplitude, kortvarige støjpeaks blev identificeret og undertrykt ved hjælp af burst-detekteringsalgoritmer, der erstattede de berørte samples med interpolerede eller udglattede værdier.
- TFD (Tids-Frekvens Domæne) støjdemping: Tids-Frekvens Domæne (TFD) støjdemping i RadExPro har været afgørende for at fjerne ikke-stationær, tidsvarierende støj uden at forvrænge det seismiske signal. Metoden fremhæver svage refleksioner og forbedrer det overordnede signal/støj forhold, især i seismiske data påvirket af komplek støj.

Fjernelse af multipler

Ved indsamling af seismiske data til havs opstår der havbundsmultipler som er lydbølger der bliver reflekteret mellem havbunden og havoverfladen og som kan overlejre billedet af lagene under havbunden som ønskes kortlagt. Vanddybden i et givent område er afgørende for, hvor den første multipel fremkommer. Når dataindsamlingen foregår på lavt vand, vil multiplen ligge relativt højt i datasættet og forstyrre tolkningen af data. Især de indre danske farvande, men også Nordsøen, er præget af relativt lave vanddybder og kraftige havbundsmultipler kan skjule de bagvedliggende seismiske refleksioner fra lagene under havbunden. For at fjerne multipelenergi er der anvendt en række forskellige zero-offset demultiple-teknikker

i flere stadier af processeringen: Før frekvens-filtrering, efter F-K filtrering, efter burst-støj-fjernelse og under senere processingstrin.

Den iterative anvendelse af forskellige værktøjer til multipelfjernelse viste sig at være meget effektiv til at dæmpe havbundsmultiplerne. Dog resulterede det for nogle linjer også i utilsigtet fjernelse af signalenergi nær den første havbundsmultipel (Figur 6.2). Der har således været tale om en nøje afvejning, hvor effekten af at fjerne multipelenergien er blevet holdt op imod dæmpningen af nyttesignal, og multipelfjernelsen tilpasset behovene for den enkelte linje.



Figur 6.2 Udsnit af et seismisk profil, hvor der dels ses et artefakt fra migrationsprocessen 10-15 m under havbunden og dels ses, hvordan multipelfjernelse samtidig har medført uønsket fjernelse af signalenergi.

Statisk korrektion for bølgebevægelser

Bølger og dønninger får det seismiske udstyr til at bevæge sig i vandet. Når det kommer til UHRS multikanal seismiske data kan disse bevægelser være særligt problematiske på grund af det høje frekvensindhold i data og den korte bølgelængde (~1-1,5 m) af signalet. Det skyldes, at bølgebevægelserne introducerer små variationer i ankomsten af de seismiske signaler (static variations), som er sammenlignelige med den seismiske bølgelængde og dermed kan resultere i destruktiv interferens når de seismiske signaler stackes i de enkelte CMP-gathers.

For at kompensere for denne effekt blev der på linjer med stor bølgepåvirkning foretaget en detektion af refleksionen fra havbunden (seabed picking) på pre-stack data og udglatning af denne. For linjer med minimal bølgepåvirkning (mindre end en kvart bølgelængde) blev der ikke foretaget korrektion. Ligeledes blev den statiske korrektion af bølgebevægelser udeladt i områder af mindre strategisk betydning på grund af den meget arbejdskrævende karakter af den manuelle seabed picking.

Deghosting og dekonvolution

Refleksioner fra havoverfladen kaldes ghost-refleksioner og har omvendt polaritet i forhold til det primære signal, hvorfor de kan medføre destruktiv interferens mellem signaler og ændring af fasen. For at kompensere for denne effekt er der anvendt en såkaldt deghosting proces, som bidrager til at bevare den oprindelige kilde-signatur (source-signature, wavelet) og forbedrer signalets frekvensindhold. For yderligere at forbedre den vertikale opløselighed blev der desuden anvendt spiking dekonvolution, som komprimerer den seismiske wavelet og undertrykker ringning (gentagelse) af signalet.

Disse to processeringstrin blev oprindeligt påført i post-stack domænet på grund af de computerressourcer, det ville kræve i pre-stack domænet. En senere væsentlig opgradering af den tilgængelige computerkraft muliggjorde efterfølgende anvendelse i pre-stack domænet, hvilket medførte endnu større forbedring af opløseligheden i data. Omkring 90-95% af data blev gen-processeret efter opgraderingen af processeringscomputer.

NMO-korrektion (Normal Moveout), hastighedsanalyse og stacking

En refleksion fra en geologisk laggrænse vil i de seismiske data fremstå som en hyperbel som funktion af tid, kilde-modtager offset og seismisk hastighed. Det vil sige, at jo større afstand der er mellem kilde og modtager, des længere løbetid vil der observeres til en reflektor i en given dybde. Ved Normal Moveout (NMO) korrektion kompenseres for dette ved at rette refleksionerne op til horisontal indenfor de enkelte CMP-gathers. Forud for NMO-korrektion gennemføres således en hastighedsanalyse for at bestemme den fordeling af seismiske hastigheder i dybden som medfører den mest optimale NMO-korrektion og efterfølgende stacking af signalet. Ved store offset og tidlige tider medfører NMO-korrektion en uønsket udstrækning af signalet som kompenseres ved at påføre en såkaldt stretch-mute der fjerner den del af signalet som er forvrænget over en valgt grænse.

Efter NMO-korrektion summeres de enkelte traces i hvert CMP-gather (stacking), hvorved de ønskede signaler forstærkes og tilfældig støj dæmpes. Det medfører en væsentlig forbedring af signal/støj forholdet og resulterer i et seismisk profil af betydelig bedre kvalitet end enkeltkanal seismik og dermed et bedre grundlag for den geologiske tolkning.

Migration

På et umigreret seismisk profil afbildes en given refleksion vertikalt under det enkelte CMP-punkt uden hensyntagen til den reflekterende overflades sande beliggenhed, men ved en ujævn reflektorgeometri svarer det registrerede signal til den korteste afstand mellem reflektor og CMP-punkt (dvs. en strålegang fra CMP-punktet og vinkelret på den reflekterende overflade). Ved migrationen af de seismiske data flyttes en given reflektor således til sin rette position i tid og sted (ved plane horisontale laggrænser sker ingen flytning), effekter af laterale hastighedsvariationer korrigeres og diffraktionshyperbler kollapses, hvorved den strukturelle nøjagtighed forbedres. Der er anvendt Kirchhoff-tidsmigration til at migrere datasættet. På ganske få linjer (<5%) introducerer migrationen et artefakt i form af en svag refleksion parallelt med havbunden og 10-15 m under denne (Figur 6.2).

Amplitudekorrektioner

For at forstærke refleksioner fra den dybere undergrund påføres data amplitude-korrektioner, som kompenserer for faktorer, der påvirker den seismiske signalstyrke, herunder geometrisk spredning og absorption (Q-kompensation). Som det sidste processeringstrin blev data påført endnu et båndpasfilter på 100–200–1500–2000 Hz forud for eksport i SEG-Y format.

6.1.2 Processering af enkeltkanal seismiske data

Processering af enkeltkanal seismiske data er primært foretaget i softwaren GeoSuite, med supplerende processering i RadExPro for udvalgte datasæt.

Tildeling af optagegeometri

Hver trace tildeles en geografisk position ved hjælp af GPS-data fra skibet og den kendte afstand mellem GPS-antennen og enkeltkanalsstreameren. På grund af potentielle variationer i konfigurationen mellem skib, kilde og streamer forventes en vis positionsusikkerhed; det anslås dog, at denne usikkerhed er inden for 10 m.

Frekvensfiltrering

Data er påført et båndpasfilter på 50–2500 Hz for at forbedre signalkvaliteten og undertrykke støj.

Statisk korrektion for bølgebevægelser

Bølger og dønninger får det seismiske udstyr til at bevæge sig i vandet og det introducerer små variationer i ankomsten af de seismiske signaler (static variations) som kan besværliggøre tolkningen af data. For at kompensere for denne effekt er der foretaget en detektion af refleksionen fra havbunden (seabed picking) og udglatning af denne. For at korrigere for langperiodiske dønninger blev der anvendt et trace-vindue på typisk 40 traces, mens der for kortperiodiske bølger blev anvendt et kortere vindue på typisk 15 traces. Vindueslængden blev justeret fra linje til linje i forhold til de dominerende bølgebevægelser.

Top mute

Alle data over havbundrefleksionen er skåret fra med en top mute for at fjerne uønsket støj fra vandsøjlen.

Trace-mixing

For at udjævne laterale variationer og opnå et mere ensartet udtryk er der foretaget trace-mixing, hvor nabo-traces indgår med en vægtningsfaktor på 75%.

Dekonvolution

For at forbedre den vertikale opløselighed er der anvendt spiking dekonvolution. På en repræsentativ trace analyseres havbundsrefleksionen i GeoSuite's signature tool (typisk i et 1,5-2 ms vindue) og der dannes en nulfase-wavelet. Denne wavelet gemmes som en signaturfil og anvendes sammen med den originale wavelet (ofte bestående af tre fulde bølgecyklusser). Parametrene blev som udgangspunkt holdt konstante, men efter behov blev der foretaget mindre justeringer baseret på datakvalitet.

Amplitudekorrektion

For at kompensere for sfærisk divergens er data påført en tidsvariant gain (TVG). I områder med svagere signal blev der også anvendt automatisk gain control (AGC) for at normalisere amplitudeforskelle.

Supplerende processering i RadExPro

I meget lavvandede områder har kvaliteten af enkeltkanal seismiske data nogle steder været bedre end kvaliteten af multikanal data. Det skyldes primært streamerens tættere placering på kilden, hvilket resulterede i næsten lodrette indfaldsvinkler. Til sammenligning havde multikanalsstreameren sine bedst ydende kanaler ved offset større end 15 m, hvor indfaldsvinklen er væsentlig mindre og påvirker det seismiske signal negativt. For yderligere at forbedre enkeltkanal data i de tilfælde, blev der for et begrænset antal seismiske linjer (især fra meget lavvandede områder i de indre danske farvande med vanddybde <10–15 m), udført yderligere behandling af enkeltkanal data i RadExPro. Dette omfattede nedenstående processestringstrin som er beskrevet nærmere i afsnit 6.1.1:

- TFD (Tids-Frekvens Domæne) støjdemping
- Burst-støjfjernelse
- Deghosting
- Migration

6.2 Beskrivelse og analyse af nye boringer

6.2.1 Beskrivelse af vibrocore kerner

De indsamlede vibrocore kerner blev delt på langs i GEUS' laboratorium, hvorefter de blev beskrevet og fotograferet. Foto af vibrocore kernerne og sedimentologiske logs med beskrivelser af tolkningen fremgår af Bilag 1 og Bilag 2.

Den ene halvdel af kernerne blev gemt på GEUS, mens prøver blev udtaget af den anden halvdel, dels til sigteanalyser, dels til makrofossil-analyser. Farven af sedimenterne blev bestemt med Munsell soil color charts og kalkindhold blev bestemt med fortyndet saltsyre. Kernerne blev inddelt i lithologiske enheder og det blev noteret, om grænserne mellem enhederne var erosive, skarpe eller gradvise. Hver enhed blev tildelt et bogstavsymbol der betegner en tolket alder og et tolket aflejningsmiljø. Der er skelnet mellem 35 forskellige sedimenttyper. Blandt de hyppigste typer kan nævnes HP: Holocæn marin gytje, HS: Holocæn marint sand, TS: senglacial smeltevandssand, DS: glacial smeltevandssand, ML: moræneler. I Nordsøen er det vanskeligt at skelne mellem TS og DS og i tvivlstilfælde er anvendt betegnelsen DS/TS. I Nordsøen optræder desuden en enhed, der er beskrevet som hårdt, stift, lagdelt ler, som formentlig er aflejret i en eller flere isdæmmede søer. Det er dog uklart, hvorfor denne enhed er så hård. Måske er sedimentet tørret ud under Fastlandstiden. Tilsvarende er der truffet hårdt, stift ler i udfyldte kanaler eroderet ned i de underliggende lag.

I området ved Bornholm forekommer blødt ler i mange kerner. Ler afsat i den Baltiske Issø er ofte rødbrunt, men det kan være vanskeligt at skelne mellem ler fra Yoldia Havet og Ancylus Søen. Ligeledes kan det være svært at skelne mellem senglaciale, arktiske marine faunaer og arktiske, marine faunaer fra Skærumhede havet, dette er relevant i den nordlige del af Nordsøen og i Kattegat. I enkelte kerner er der truffet tørv, men kun tørv af Holocæn alder og ikke senglacial tørv. I mange kerner optræder der nederst moræneler (ML).

6.2.2 Sigteanalyser

Fra en række borekerner er der udtaget prøver af sand og grus til kornstørrelsesanalyser, som er udført i GEUS' laboratorium. I alt er 39 prøver blevet analyseret, og resultatet fremgår af Bilag 3. Inden sigtningen er prøverne blevet tørret hvorefter de er sigtet gennem en sigtesøjle fra 32 mm ned til 0,063 mm i $\frac{1}{2}$ phi intervaller, svarende til 16 sigter. Metoden er tilpasset i forhold til DS 405.9 og DS/EN 933-1 (Dansk standard 1978; DS/EN 2004), idet der er anvendt flere sigter end der beskrives i denne standard.

6.2.3 Dateringer

Som en del af projektet er der foretaget 49 kulstof-14 dateringer (Tabel 6.1) af materiale fra de udførte borer. Materialet til datering blev tørret før det blev sendt afsted til Tandem Laboratoriet ved Uppsala Universitet i Sverige. Dateringer er udført ved accelerator masse-spektrometri (AMS) og alle dateringer er korrigeret for isotop-fraktionering ved at normalisere til en ^{13}C værdi på -25‰ på PDB skalaen. Kulstof-14 aldre er kalibrerede til kalender år før nu ved brug af CALIB 14C kalibrerings-programmet. Aldre af terrestrisk materiale er kalibrerede med IntCal20 kurven (Reimer et al., 2020). Aldre af marint materiale er kalibrerede med Marine20 kurven (Heaton et al., 2020), med brug af en reservoiralder på 400 år, som foreslået af Krog & Tauber (1974). Dette svarer til en ΔR værdi på -150 år i kalibreringsprogrammet. Flere studier har vist, at reservoiralderen varierer fra område til område og over tid (Olsen et al., 2009). Det betyder, at dateringer af marint materiale er mere usikre end dateringer af terrestrisk materiale.

De fleste dateringer stemmer godt overens med de formodede aldre. Formodede interglaciale skaller har givet aldre højere end 50.000 år BP. De formodede Holocæne aflejringer har alle givet Holocæne aldre. En enkelt aflejring som var bedømt til Skærumhedeserien gav en senglacial alder. Denne datering viser, at havet i senglacial tid strakte sig ned i den nordøstlige del af dansk Nordsø. Den ældste datering af marint materiale fra tiden efter sidste istid i den vestlige del af Nordsøen gav en alder på 11.470 kal. år BP, og er den ældste datering af marint Holocænt materiale fra denne del af Nordsøen. Holocæn tørv har givet aldre mellem ca. 10.200 og 11.300 kal. år BP.

Tabel 6.1 Kulstof-14 dateringer af materiale fra vibrocore kerner.

Kerne	UTM x	UTM y	Laboratorie nummer	Materiale	Dybde (m)	Alder (^{14}C år BP) ¹	Kal. alder (år BP) ²
AS-08	658694	6249276	Ua-81975	<i>Hiatella arctica</i>	28,65	13259 ± 42	15310
AS-CPT-03	624399	6234436	Ua-81995	Kvist	24,09	9133 ± 37	10281
AS-CPT-10	625592	6257726	Ua-81976	<i>Macoma torellii</i>	20,70	13800 ± 45	16021
BO-27	484984	6137237	Ua-81996	<i>Populus, Solanum, Carex</i>	71,08	9355 ± 53	10569
KK-03	753373	6087379	Ua-81997	Radiceller	33,30	9872 ± 34	11269
KK-04	729840	6129937	Ua-81998	<i>Menyanthes trifoliata</i>	23,83	9364 ± 38	10582
KK-06	714548	6071368	Ua-81977	<i>Arctica islandica</i>	22,45	6445 ± 34	6880
LA-25	620598	6304452	Ua-81978	<i>Ostrea edulis</i>	15,10	5096 ± 31	5416
LA-25	–	–	Ua-81979	<i>Hiatella arctica</i>	17,00	14138 ± 44	16454
LA-33	628148	6322606	Ua-81980	<i>Hiatella arctica</i>	12,36	14065 ± 46	16360
LA-36	602106	6335312	Ua-81981	<i>Portlandia arctica</i>	23,80	13770 ± 51	15981
LA-38	660239	6307928	Ua-81982	<i>Mytilus edulis</i>	17,50	10587 ± 40	11938
LN-01	626963	6373843	Ua-81983	<i>Echinocyamus pusillus</i>	42,70	9055 ± 37	9772
LN-03	631737	6378016	Ua-81984	<i>Turritella communis</i>	49,90	6708 ± 32	7178
LN-03	–	–	Ua-81985	<i>Hiatella arctica</i>	50,50	10960 ± 39	12493
NN-09	503980	6394976	Ua-81986	<i>Hiatella arctica</i>	88,30	11056 ± 38	12579
NN-09	–	–	Ua-81987	<i>Macoma calcarea</i>	89,90	11393 ± 40	12865
NN-10	495493	6389267	Ua-81988	<i>Macoma calcarea</i>	84,18	10684 ± 37	12097
SN-10	385941	6257340	Ua-81989	<i>Chamelea striatula</i>	34,50	650 ± 28	263
SN-16	378485	6224611	Ua-81990	<i>Arctica islandica</i>	35,75	8243 ± 36	8768
SN-17	371223	6213376	Ua-81991	<i>Macoma balthica</i>	41,05	9652 ± 38	10583
VF-04	587723	6068397	Ua-81999	<i>Betula nana</i>	22,30	10021 ± 39	11518
VF-12	595715	6069641	Ua-82000	<i>Menyanthes trifoliata</i>	29,29	9417 ± 38	10644
VF-12	–	–	Ua-82001	<i>Phragmites australis</i>	29,84	9809 ± 38	11225
VN-14	298104	6264978	Ua-83712	<i>Cerastoderma edule</i>	59,05	10246 ± 35	11399
VN-21	172599	6232697	Ua-83713	<i>Arctica islandica</i>	72,90	>48000	>50000
VN-25	171267	6215793	Ua-83714	<i>Echinocardium cordatum</i>	67,10	10238 ± 35	11387
VN-28	170590	6207588	Ua-83715	<i>Varicorbula gibba</i>	59,40	9547 ± 34	10432
VN-28	170590	6207588	Ua-83716	<i>Echinocardium cordatum</i>	62,10	9725 ± 35	10686
VN-33	203317	6212754	Ua-82002	<i>Phragmites australis</i>	56,25	9996 ± 39	11470
VN-40	231530	6225780	Ua-83717	<i>Varicorbula gibba</i>	58,90	7889 ± 33	8333
VN-44	271780	6207158	Ua-83718	<i>Arctica islandica</i>	57,00	>48000	>50000
VN-47	285810	6220961	Ua-83719	<i>Varicorbula gibba</i>	61,70	7875 ± 34	8319
VN-48	304431	6219302	Ua-82003	Radiceller	48,55	9610 ± 42	10941
VN-50	314266	6203613	Ua-83720	<i>Mya truncata</i>	49,60	7542 ± 34	7969
VN-60	342623	6184769	Ua-82004	<i>Phragmites australis</i>	44,41	9044 ± 36	10217
VN-60	–	–	Ua-82005	Kvist	45,52	9623 ± 38	10946
VN-60	–	–	Ua-82006	Kvist	46,00	10078 ± 39	11636
VN-61	339907	6154711	Ua-81992	<i>Chamelea striatula</i>	45,90	6250 ± 33	6657
VN-67	316346	6172492	Ua-81993	<i>Tridonta borealis</i>	49,87	>48000	>50000
VN-71	283416	6189933	Ua-85531	<i>Menyanthes trifoliata</i>	56,40	11158 ± 37	13096
VN-74	248281	6193044	Ua-83721	<i>Littorina littorea</i>	39,70	9091 ± 35	9829
VN-78	228876	6151876	Ua-83722	<i>Varicorbula gibba</i>	47,95	7440 ± 33	7867
VN-81	264816	6137066	Ua-81994	<i>Cerastoderma edule</i>	47,30	9015 ± 39	10203
VN-82	210112	6196405	Ua-83723	<i>Echinocardium cordatum</i>	46,45	8585 ± 34	9220
VN-84	324561	6234402	Ua-83724	<i>Echinocardium cordatum</i>	44,65	8562 ± 34	9191
F1P1-15	424576	6318356	Ua-85978	<i>Mytilus edulis</i>	34,85	10607 ± 49	11972
F1P1-15	424576	6318356	Ua-85979	<i>Chirona hameri</i>	35,15	11025 ± 47	12550
F1P1-15	424576	6318356	Ua-85980	<i>Cylichnoides occulta</i>	35,15	10947 ± 50	12476

¹ Kulstof-14 aldre er rapporterede i konventionelle kulstof-14 år før nu (BP; before present = AD 1950; Stuiver & Polach (1977)).

² Kalibrering til kalender år BP er efter INTCAL20 og MARINE20 data (Reimer et al. 2020; Heaton et al. 2020). Median probability aldre er angivet.

6.3 Bearbejdning af ældre seismiske data

6.3.1 Re-processering af eksisterende seismiske data

Udover de nye data indsamlet som en del af den geologiske screening, er der i stort omfang også benyttet allerede eksisterende data, mest typisk enkeltkanal sparker seismik og Innomar sub-bottom profiler data, men også andre typer seismik som f.eks. boomer, pinger og airgun seismik.

I mange tilfælde er der forud for tolkningen af data foretaget en reprocessering af især eksisterende enkeltkanal sparker seismik. Processeringen har typisk svaret til processeringen af de nye enkeltkanal seismiske sparker data indsamlet i projektet, se afsnit 6.1.2.

6.3.2 Skanning og geo-referering af analoge seismiske data

Som en del af projektet er mange ældre analoge seismiske data blevet gjort digitalt tilgængelige gennem scanninger af papirudskrifter af seismiske profiler. Efter skanningen er der foretaget en geo-referering af de skannede filer ud fra fix-punkt koordinater angivet direkte på de seismiske papirplot langs med den seismiske linje. Herefter er de skannede billedfiler blevet konverteret til digitale seismiske filer i SEG-Y format (Barry et al., 1975) med softwaren ImageToSEG-Y. De ældre analoge data har i flere delområder udgjort den eneste datadækning og andre steder udgjort et væsentligt supplement. Processen med digitalisering og nyttiggørelsen af disse data har derfor været essentiel for tolkningsarbejdet i den geologiske screening og vil have stor betydning også for fremtidige projekter med fokus på den overfladenære geologi.

6.4 Seismisk tolkning og kortproduktion

De seismiske data blev efter processering indlæst i softwaren Kingdom i separate tolkningsprojekter for de forskellige områder. Tolkningen er foretaget i seismisk tovejstid (TWT) i millisekunder (ms). Det vil sige, at dybden i meter til en given laggrænse afhænger af den seismiske hastighed (lydhastighed) i lagene over laggrænsen.

Afgrænsningen af de forskellige seismiske enheder er baseret på tolkning af geologisk signifikante refleksioner som f.eks. markante erosionsflader, top eller bund af enheder og det interne seismiske refleksionsmønster. Tolkningen i de enkelte områder er foretaget med udgangspunkt i en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om stratigrafien og den geologiske udvikling. Undervejs er den seismiske tolkning korreleret med de boringsoplysninger, der har været tilgængelige, ofte i form af korte vibrocore borer (typisk op til 6 m dybe).

Det primære fokus i tolkningen har været at kortlægge tykkelsen og adskille de Holocæne og senglaciale aflejringer, som ikke har været overskredet af isen samt overfladen af de underliggende isoverskredne glaciale aflejringer. Der er således foretaget en geologisk/stratigrafisk kortlægning, som belyser den geologiske udvikling af området samt lagenes alder og dannelsesmiljø.

Baseret på den færdige tolkning er der foretaget en gridning af henholdsvis havbunden, toppen af de senglaciale aflejringer og toppen af de glaciale aflejringer. Herefter er tykkelsen af de Holocæne og senglaciale aflejringer beregnet i seismisk tovejstid (TWT). Tykkelsen af de Holocæne aflejringer er beregnet ved at subtrahere TWT til havbunden fra TWT til toppen af de senglaciale aflejringer. Tilsvarende er tykkelsen af de senglaciale aflejringer beregnet ved at subtrahere TWT til toppen af de senglaciale aflejringer fra TWT til toppen af de glaciale aflejringer. Herefter er tykkelsen i meter beregnet med en konstant seismisk hastighed på 1600 m/s for både de Holocæne og de senglaciale aflejringer. Endelig er de beregnede tykkelsesgrids eksporteret som xyz-filer og viderebehandlet i QGIS.

6.4.1 Datadækning

Afstanden mellem tolkede seismiske linjer i de forskellige områder kan variere fra få hundrede meter, eller endnu mindre, i nogle dele af et område til flere kilometer i andre dele eller op til både 10, 15 og 20 km i store områder.

Datatætheden vises i de enkelte kapitler på kort, hvor tykkelserne af de senglaciale og Holocæne aflejringer kun er vist i en 1 km bred korridor langs de tolkede linjer (se f.eks. Figur 8.6). Kortene viser på den måde, hvad datatætheden er i forskellige områder af kortene og hvor datagrundlaget er sparsomt og illustrerer dermed datagrundlaget og den tilhørende usikkerhed i forhold til datadækningen, som ligger til grund for de fuldt interpolerede tykkelseskort (se f.eks. Figur 8.7). I områder med få eller ingen tolkede linjer skal de fuldt interpolerede tykkelseskort således betragtes med større forsigtighed. Den datatæthed der ligger til grund for kortene af den samlede tykkelse af de ukonsoliderede sedimenter er således en funktion af datatætheden for de separate kort over de senglaciale og Holocæne aflejringer.

6.4.2 Overfladenær gas

En udfordrende faktor for den geologiske tolkning er tilstedeværelsen af gas i de overfladenære sedimenter, da gas slører de seismiske refleksioner. Typisk er der tale om metan dannet ved nedbrydningen af organisk materiale i mudrede sedimenter (Laier et al., 2005). Den frie gas i sedimenterne kan medføre spredning og absorption af den seismiske energi og dermed helt eller delvist ødelægge det seismiske signal. I processerede multikanal sparker data kan muligheden for at tolke reflektorer i områder med gas være bedre end i enkeltkanal sparker data på grund bedre signalstyrke, ligesom dæmpning af de høje frekvenser i data kan gøre det muligt at foretage tolkning af den lavfrekvente del af signalet, som ofte er mindre påvirket af gas.

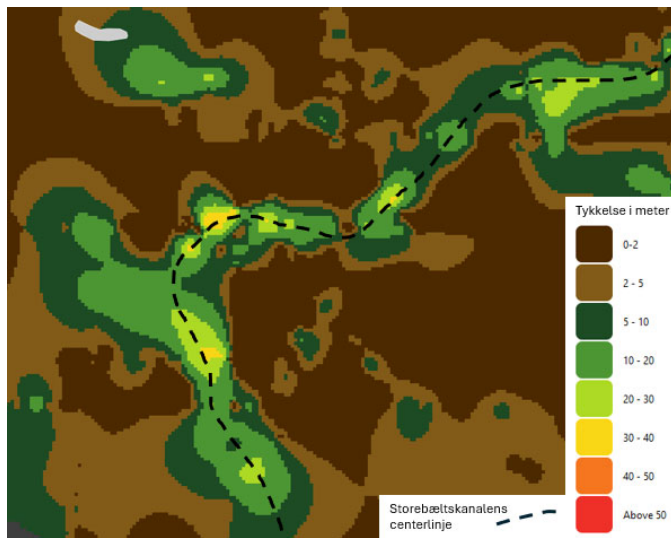
På mange af kortene præsenteret i kapitel 8-17 er der således angivet overfladenær gas i sedimenterne. Som beskrevet ovenfor kan gas dæmpe de seismiske lydbølger og sløre billedet af de underliggende lag, hvilket kan besværliggøre eller umuliggøre tolkningen. I områder hvor der er markeret gas i sedimenterne er kortlægningen således mere usikker eller har ikke været mulig. Typisk er de steder, hvor der er kortlagt overfladenær gas i sedimenterne sammenfaldende med relativt store tykkelser af Holocænt dynd og det kan generelt antages, at der er tale om gas dannet i de Holocæne dyndlag, hvilket ikke er ualmindeligt. Der er ikke i de aktuelle undersøgelser indikationer på, at der skulle være tale om gas som trænger op fra store dybder og meget gamle geologiske lag. Men selvom der er tale om overfladenær gas dannet i Holocæne aflejringer kan det, udover at være en hindring for kortlægning af geologien også stadig udgøre en potentiel risiko i forbindelse med forundersøgelser og anlægsarbejde og er vigtigt at kende til.

6.4.3 Digitalisering af ældre kort

Som beskrevet i kapitel 4 er der i områder, hvor datatætheden er meget lav, eller data mangler helt, i stedet anvendt resultater af ældre kortlægninger. Det er gjort ved at digitalisere analoge kort over f.eks. tykkelsen af dyndede sediment, mægtigheden af senglaciale og Holocæne aflejringer eller højtliggende moræner. De digitaliserede kort er herefter blevet indarbejdet i de øvrige kort baserede på seismisk tolkning. I de tilfælde, hvor den geologiske screening er baseret på ældre kortlægningsresultater, er det beskrevet i de enkelte kapitler.

6.4.4 Interpolationsparametre

Tykkelseskortene som præsenteres i de efterfølgende kapitler, er jf. ovenstående afsnit om datadækning i høj grad interpolerede over større afstande. I de datatynde områder er tykkelserne således primært styret af interpolationsparametrene defineret i den anvendte seismiske tolkningssoftware Kingdom. Den benyttede grid-algoritme i Kingdom har været flex gridding, med en curvature parameter på 0,3 samt en smoothness faktor på 6. Den valgte cellestørrelse er 50 x 50 meter. En typisk begrænsning i den valgte grid-algoritme kan ses i kanaludfyldninger, hvor tykkelseskortene ofte viser mindre udfyldte bassiner langs en kanal, som vist i eksemplet i Figur 6.3, fremfor et forløb med en mere jævnt udfyldt kanal.



Figur 6.3 Eksempel på begrænsninger i den anvendte grid-algoritme i den seismiske tolkningssoftware Kingdom, hvor en udfyldt kanal (Storebæltskanalen) fremstår som en serie udfyldte bassiner fremfor som et forløb med en mere jævnt udfyldt kanal.

7. Regionalgeologisk udvikling

7.1 Indre danske farvande

De indre danske farvande er en havdækket del af det Europæiske kontinent. Farvandene præges af relativt lavt vand, typisk med dybder mellem 10 og 30 m. De største vanddybder findes i Bornholmsbassinet med godt 90 m og i den nordligste del af Kattegat med dybder op til 50 m. Størstedelen af Kattegat er dog lavvandet, med store områder med vanddybder under 10 m, og helt ned til 2 m på Lysegrund. I Øresund er vanddybden i gennemsnit 10 m, mens den i Bælthavet kan nå op til 30 m. Der findes også her lokale render, hvor bundstrømmen er stærk og den største del af vandtransporten foregår.

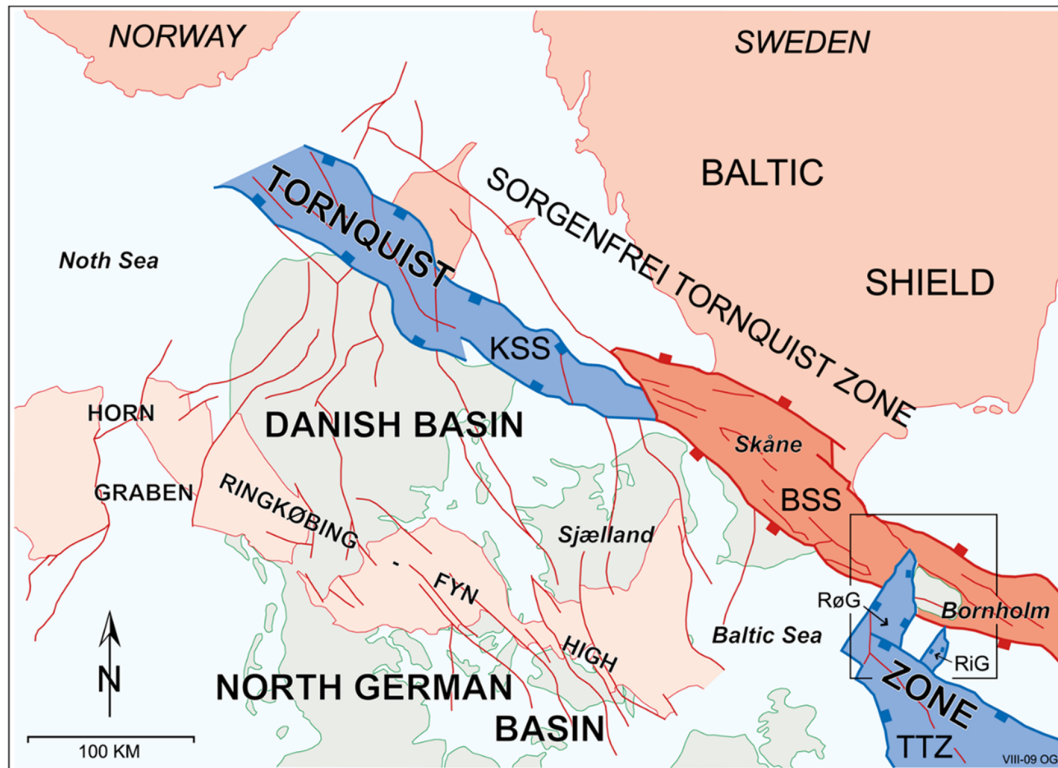
7.1.1 Prækvartæret

De overordnede tektoniske strukturelle elementer i de indre danske farvande udgøres fra nordøst til sydvest af det Baltiske Skjold, Sorgenfrei–Tornquist Zonen, det Danske Bassin, Ringkøbing–Fyn Højderyggen og det Nordtyske Bassin (Figur 7.1; Liboriussen et al., 1987; Nielsen, 2003).

Det Baltiske Skjold domineres af 3.500 til 850 millioner år gamle granitter og gnejser. Sorgenfrei–Tornquist Zonen er en 20-50 km bred, nordvest–sydøst orienteret forkastningszone. Ved Bornholm er zonen op mod 100 kilometer bred og den er gennemsat af forkastninger i retningerne NV–SØ og NNØ–SSV (Mogensen & Korstgaard, 2003). Nogle af forkastningerne i Sorgenfrei–Tornquist Zonen var aktive kort efter sidste deglaciation (Jensen et al., 2002a). I det Danske Bassin findes en op til 8 km tyk lagfølge af sedimentære bjergarter fra Perm-tiden frem til Kridt-tiden. Ringkøbing–Fyn Højderyggen er en struktur med højtliggende grundfjeld. Den strækker sig fra Møn over Fyn og Ringkøbing Fjord til Central Graven i Nord-søen og den er afgrænset af forkastninger. I det Nordtyske Bassin findes aflejringer fra Perm-tiden og frem til Kvartær. Både i det Danske Bassin og i det Nordtyske Bassin findes talrige saltstrukturer samt talrige forkastninger, hvoraf en del fortsætter op i Kvartæret (se også afsnit 7.1.3).

Den Prækvartære overflades topografi i det danske område blev kortlagt af Binzer & Stockmarr (1994). I den nordlige del af Kattegat ligger toppen af de Prækvartære aflejringer på over 200 meters dybde, mens de på Bornholm ofte falder sammen med terrænoverfladen. I Øresund, ved Djursland og sydvest for Bornholm findes Prækvartære aflejringer eksponeret direkte på havbunden (for eksempel Jensen & Hamann, 1989).

Det Prækvartære underlag bliver successivt yngre fra nordøst mod sydvest og består (fra nordøst) af aflejringer fra Jura, Nedre Kridt, Øvre Kridt, Danien, Palæogen og Miocæn (Håkansson & Pedersen, 1992). Ved Bornholm findes Prækambriske, Palæozoiske og Mesozoiske bjergarter.



Figur 7.1 Tektoniske strukturelle elementer i den danske undergrund. Fra Graversen (2004, 2009).

7.1.2 Kvartæret

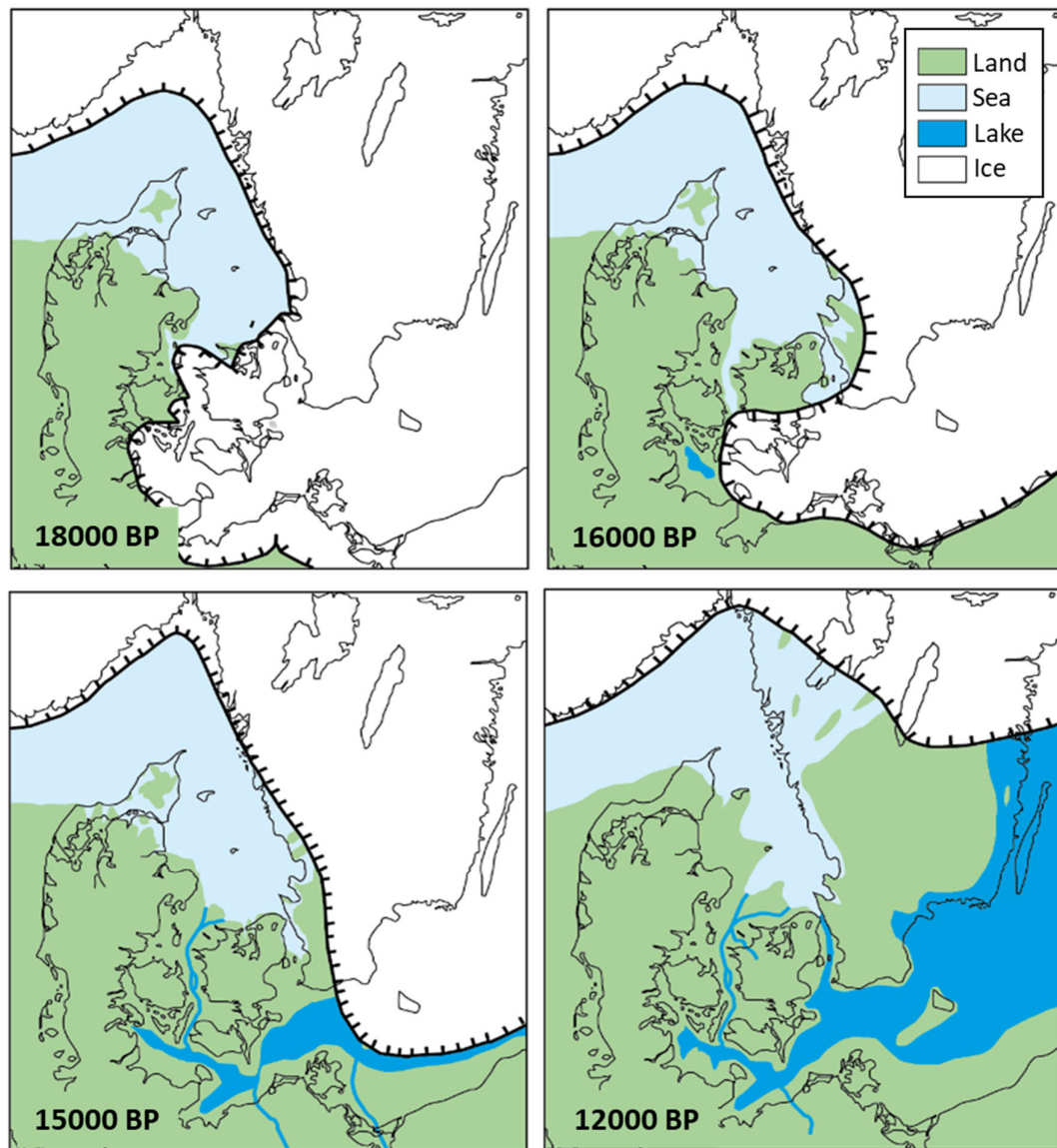
De indre danske farvande var i Kvartærtiden præget af vekslende istider og mellemistider (Larsen et al., 2009a; Houmark-Nielsen, 2021). Interglaciale aflejringer er påvist i enkelte borer fra de danske farvande. Under store dele af sidste istid var de nordlige dele af Kattegat dækket af havet og her træffes aflejringer fra Skærumhedeserien (Larsen et al., 2009a). Under sidste istids maksimum for omkring 22.000 år siden var de indre danske farvande dækket af det Skandinaviske Isskjold. De dybe render i Storebælt og Lillebælt blev eroderet af subglacialt smeltevand under et sent stadie i sidste istid og renderne indeholder både senglaciale og Holocæne ferskvandsaflejringer (Bennike et al., 2019). Kattegat blev isfrit for omkring 18.000 år siden (Hytinen et al., 2021) og aktive gletsjere var forsvundet fra resten af Danmark for omkring 15.000 år siden (Figur 7.2). Der var dog fortsat store områder med dødis i det danske område.

Havet begyndte at trænge ind i de dybe dele af Kattegat umiddelbart efter sidste deglaciation, hvor der opstod et glaciomarint miljø med arktiske hvaler, sæler og isbjørne. Der blev aflejret glaciomarint ler i dette senglaciale hav der strakte sig langt ned i Øresund (Lagerlund & Houmark-Nielsen, 1993; Knudsen et al., 1996; Larsen et al., 2009a). Det relative havniveau faldt hurtigt og nåede et minimum på omkring 30 m under det nuværende niveau for omkring 12.000 år siden (Jensen et al., 2002b; Bendixen et al., 2017a). De danske stræder blev dannet for omkring 8.000 år siden (Bennike et al., 2021a). I perioden mellem sidste deglaciation og havets indtrængen optræder Fastlandstiden, og mange steder i de indre danske farvande

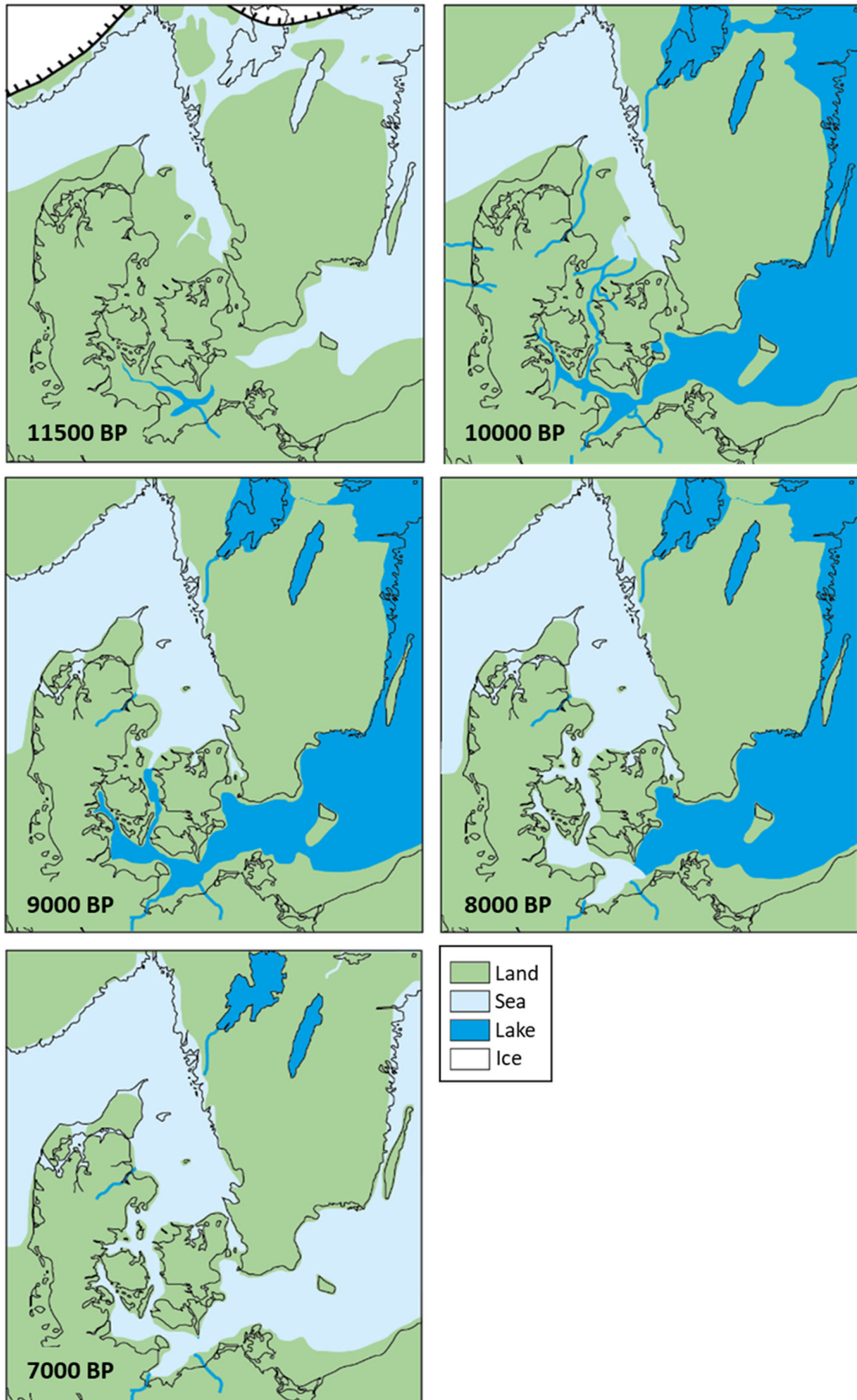
findes submarine non-marine sø- og mose aflejringer fra denne periode (Bennike et al., 2004).

I Østersøen opstod en stor isdæmmet sø efter sidste deglaciation: den Baltiske Issø (Björck, 1995; Jensen et al., 1997). Den Baltiske Issø strakte sig formentlig mod vest ind i Lillebælt (Figur 7.2; Jensen et al., 2002b). I Tidlig Holocæn blev den Baltiske Issø afløst af Yoldia Havet, der havde forbindelse til Kattegat via smalle stræder i den sydlige del af Midtsverige. Næste stadie var Ancylus Søen. Både i Yoldia Havet og i Ancylus Søen blev der aflejret ler i Arkonabassinet og Bornholmsbassinet (Jensen et al., 1999).

De Kvartære aflejringer består blandt andet af moræneler og smeltevandssand aflejret af floder under sidste istid. Efter sidste deglaciation blev der aflejret senglacialt smeltevandssler i søer, Holocænt marint ler og dynd på dybere vand og sand nær kysten.



Figur 7.2 Palæogeografisk rekonstruktion af udviklingen efter den sidste istid (18.000-7.000 BP, modificeret efter Jensen et al., 2002b), se også næste side.



7.1.3 Recente forkastninger

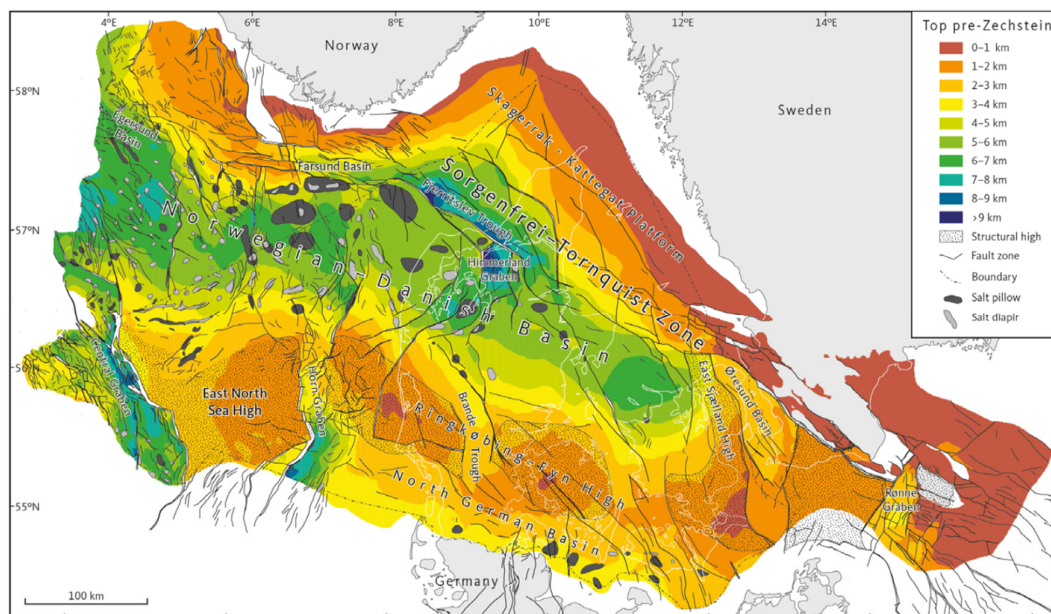
Danmark er lokaliseret i et område, hvor Alpernes bevægelse mod nord og bevægelserne ved den nordatlantiske højderyg betyder, at undergrunden er udsat for et vist kontinuert tektonisk stress. Hertil kommer stressbidrag fra den stadigt forekommende isostatisk landhævning som følge af aflastningen fra Kvartærtidens isskjolde. Men på trods af disse faktorer er den nutidige seismiske aktivitet i det danske område ganske begrænset, og med de data, der haves, er det ikke muligt med sikkerhed at relatere jordskælvene direkte til kendte forkastningszoner (Gregersen & Voss, 2015).

Undersøgelser indenfor og omkring de tidligere isdækkede områder i Nordeuropa viser imidlertid flere eksempler på betydelig tektonisk aktivitet i sen- og postglacial tid med reaktiveringer af kortlagte forkastninger, som angiveligt har medført jordskælv af betragtelig størrelsesorden (se f.eks. Steffen et al., 2021a).

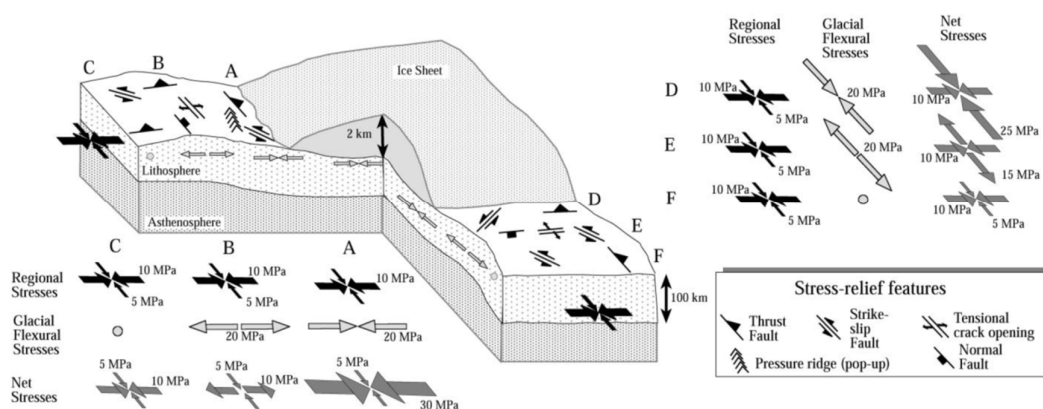
I de senere årtier er der i det danske landområde fundet flere eksempler på tektonisk aktivitet, hvor lagserien er forkastet, og hvor bevægelserne har medført, at det nuværende terræn er deformeret af forkastninger (se f.eks. Boldreel & Pedersen, 2024; Brandes et al., 2018; Lykke-Andersen et al., 1996; Sandersen & Jørgensen, 2015). I de indre danske farvande og i den sydvestlige Østersø er der også flere steder kortlagt dybe forkastninger, som tydeligvis forsætter op til havbunden (se f.eks. Alrichs et al., 2023; Al Hseinat & Hübscher, 2017; Seidel et al., 2025). Disse observationer viser tydeligt, at der er tale om meget unge bevægelser i undergrunden, og i alle tilfælde kan disse relateres til eksisterende forkastningszoner, som f.eks. Sorgenfrei–Tornquist Zonen og langs flankerne af Ringkøbing-Fyn-højderyggen (Figur 7.3). Observationerne peger på, at der er tale om sen- og postglaciale reaktiveringer af forkastninger i allerede eksisterende forkastningszoner. For det danske landområde som helhed er der påvist udbredt sammenhæng mellem de dybe forkastningssystemer og erosionsdale i det nuværende terræn, hvilket tolkes som reaktiveringer af forkastningerne i sen- og postglacial tid (Sandersen & Jørgensen, 2022).

Årsagen til reaktiveringerne skal findes i, at vægten af istidernes isskjolde pressede undergrunden ned, hvilket medførte såvel vertikale som horisontale bevægelser i jordens skorpe og i den øvre del af kappen. Masse i den øvre del af kappen blev derved skubbet væk fra isskjoldets centrum. Da ismasserne smeltede bort i senglacial tid, hævede undergrunden sig elastisk, og med en vis forsinkelse bevægede de fortrængte dele af kappen sig tilbage igen, fordi undergrunden atter var frigjort fra isens vægt. Denne mekanisme skabte et vertikalt såvel som horisontalt tektonisk stress i tiden omkring, og lige efter, istidens afslutning (Stewart et al., 2000). Figur 7.4 viser på skitseform hvordan kombinationen af det glacialt inducerede stress ("Glacial Flexural Stresses") og det regionale stress ("Regional Stresses") resulterede i et samlet stress på undergrunden ("Net Stresses") forskellige steder langs isranden. Lithosfæremodellering har vist, at hvorvidt eksisterende forkastninger i undergrunden bliver ustabile og reaktiveres, afhænger af om forkastningerne ligger favorabelt i forhold til det samlede stress omkring forkastningen, forkastningens type og poretrykket. Her vil

forkastningens lokalisering i forhold til det tidligere isdækkes margin være af stor betydning (Steffen et al., 2021b; Seidel et al., 2025).



Figur 7.3 Top præ-Zechstein dybde-struktur kort over Danmark. Gregersen et al. (2025) bearbejdet fra Vej-bæk (1997).



Figur 7.4 Konceptuel model for postglacialt stress under deglaciationen. Fra Stewart et al. (2000).

Ved undersøgelser på land er der fundet tegn på, at sådanne perioder med markant øget tektonisk og seismisk aktivitet må forventes at være forekommet flere gange i løbet af Kvar-tæret som følge af isskjoldenes gentagne opbygninger og bortsmeltning (Brandes et al., 2022; Sandersen & Jørgensen, 2015). Dette understøttes af lithosfæremodellering, som ty-pisk viser perioder med potentiel ustabilitet omkring deglaciationerne (Steffen et al., 2021b).

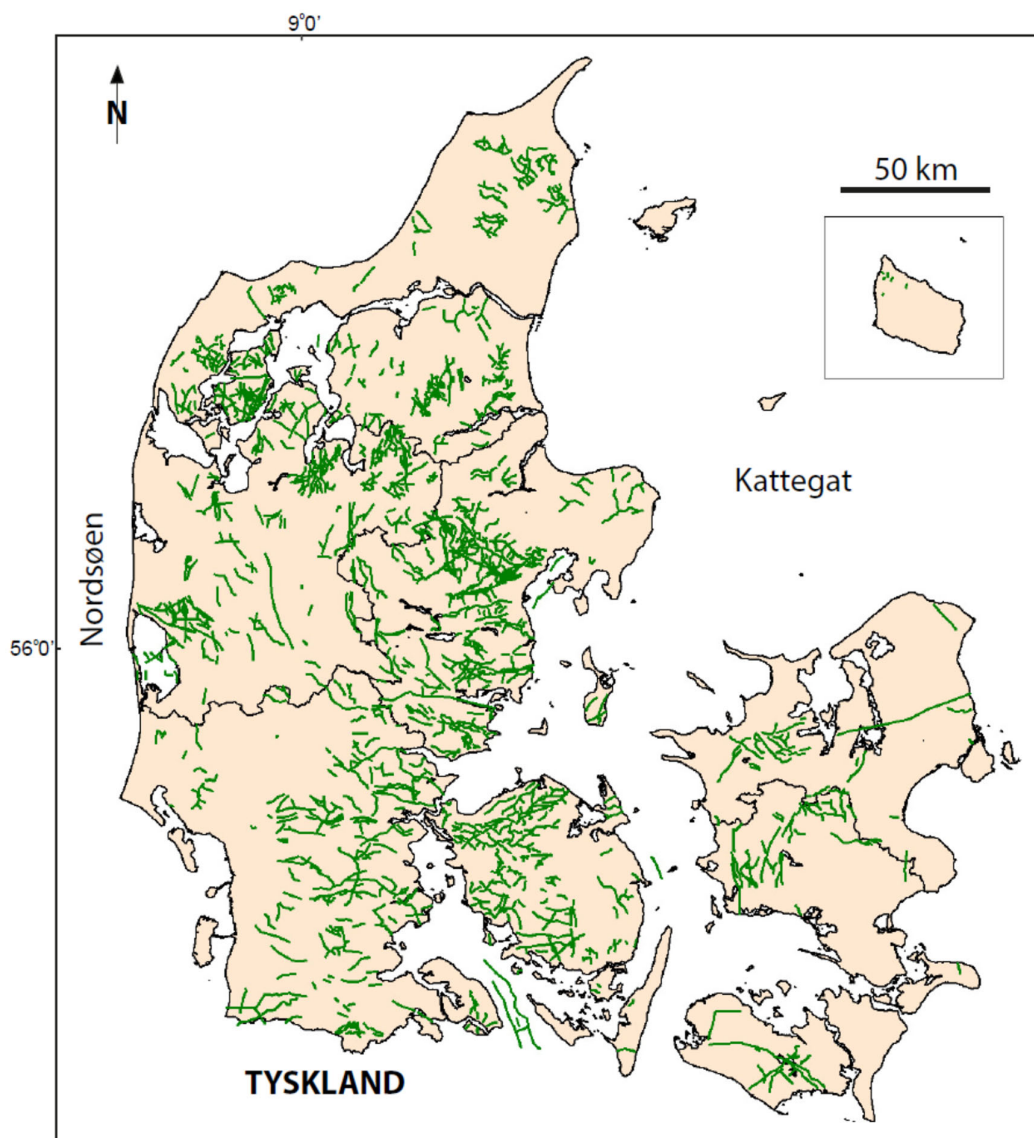
I de indre danske farvande er der ved kortlægninger indenfor Sorgenfriej-Tornquist Zonen i Kattegat og ved Bornholm fundet betydelige tykkelser af sen- og postglaciale aflejringer langs smalle løb, som tolkes at være forkastningsbetingede (Jensen et al., 2002a; 2017). I

Kattegat, omkring Anholt, er der tegn på senglaciale forsætninger i en størrelsesorden af 20 m, og ved Bornholm har nedforkastede områder fungeret som fælder for postglaciale sedimenter, og der er tegn på forkastningsaktivitet sent i postglacial tid (se også kapitel 9 og kapitel 14). Disse observationer peger således på en stedvis kobling mellem glacialt induceret forkastningsaktivitet og sedimentation i sen- og postglacial tid.

7.1.4 Begravede dale

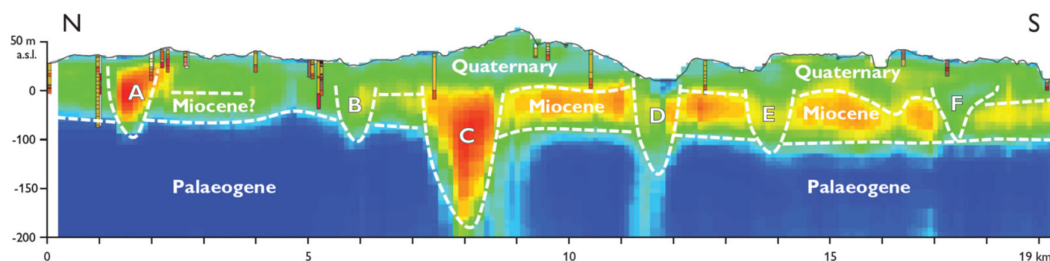
Betegnelsen "begravede dale" bruges om underjordiske erosionsrender og sænkninger, som i dag er udfyldt med aflejringer yngre end omgivelserne. Undersøgelser på land viser, at begravede dale er meget udbredte i den danske undergrund med en – indtil videre – samlet kortlagt dallængde på over 5.600 km (Figur 7.5; Sandersen & Jørgensen, 2017, 2022; begravededale.dk). De begravede dale er typisk omkring 0,5 til 2 km brede og har dybder, der kan nå omkring 400 meter. I de senere år, hvor nye geofysiske metoder har øget opløsningen i lagseriens øvre del, har det endog været muligt at kortlægge helt overfladenære dale, som kun er få hundrede meter brede (f.eks. Sandersen et al., 2023). På land kan nogle af dalene ses i det nuværende landskab, men de fleste er helt begravede uden spor på overfladen. Kendskabet til dalenes placering på land er blandt andet vigtig i forhold til grundvandsressourcerne og grundvandets sårbarhed (Sandersen & Jørgensen, 2003), mens der til havs i højere grad er fokus på dalfyldets fysiske egenskaber og forekomsten af gas i relation til installation af offshore infrastruktur (Kirkham et al., 2024).

Hovedparten af de begravede dale er dannet som tunneldale under Kvartærtidens isskjolde, hvor smeltevand under højt tryk har eroderet render i underlaget under isdækket. Dalene dannes fortrinsvist langs den yderste del af isskjoldet, tæt ved isranden. Dalene er helt eller delvist fyldt op igen med sand, grus og ler – typisk under isdækkets tilbagesmeltning (Jørgensen & Sandersen, 2006). Dalene forekommer derfor hyppigst i den Kvartære lagserie, men mange er også eroderet dybt ned i de ældre aflejringer fra før istiderne. Dette kan der ses et eksempel på i Figur 7.6, hvor der ses en række sand- og leryldte begravede dale, som alle er eroderet ned i de underliggende Miocæne og Palæogene aflejringer. Fund af aflejringer fra mellemistider viser, at mange dale er genbrugt gennem flere istider, og at dalfyldets opbygning derfor i mange tilfælde er meget komplekst og derved kan repræsentere et betydeligt tidsrum. Nogle steder er der tegn på op til 8 separate dal-generationer (Høyer et al., 2015). Dette er dog ikke altid tilfældet. I Vendsyssel kan alle kortlagte begravede dale (Figur 7.5) henføres til midlertidige isrande ved tilbagesmeltningen af to isfremstød fra henholdsvis nord og øst for 19.000 til 18.000 år siden, hvilket betyder, at erosion og efterfølgende genudfyldning af de enkelte tunneldale ved hver isrand skete på få hundrede år (Sandersen et al., 2009).



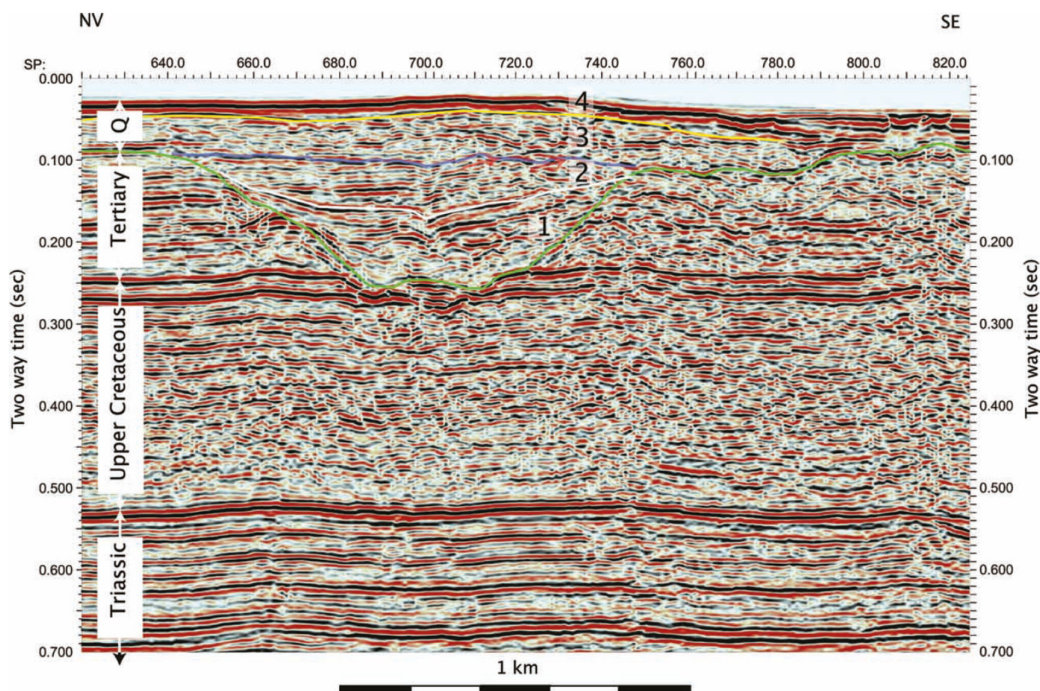
Figur 7.5 Kortlagte begravede dale i Danmark (2021-opdatering). Data fra Sandersen & Jørgensen (2022).

Selvom langt størstedelen af de begravede dale tolkes som tunneldale er der undtagelser, såsom erosionsrender dannet ved floderosion og dalsænkninger dannet ved tektoniske indsynkninger f.eks. over dybe saltstrukturer. En analyse af orientering af begravede dale, dybe forkastninger og erosionsdale i det nuværende terræn har påvist tydelige korrelationer i store dele af det danske landområde, hvilket peger på, at de dybe forkastningsstrukturer har haft indflydelse på erosionsmønstrene i Kvartærtiden (Sandersen & Jørgensen, 2022). I den nordlige del af Jylland, indenfor og lige udenfor Sorgenfrei–Tornquist Zonen, er sammenhænge særligt tydelige.



Figur 7.6 Simplificeret profil gennem seks begravede dale (A til F) ved Haderslev (Sandersen & Jørgensen, 2017). Baggrundsfarverne på profilet viser jordlagenes elektriske modstande i et 3D grid baseret på TEM-data (Transient ElektroMagnetisk metode). Lave modstande (typisk lerede aflejringer) vises med blå og grønne farver, mens høje modstande (typisk sandede aflejringer) vises med gule og røde farver. Lodrette søjler er borer fra den nationale Jupiter database. Ca. 15 gange overhøjning.

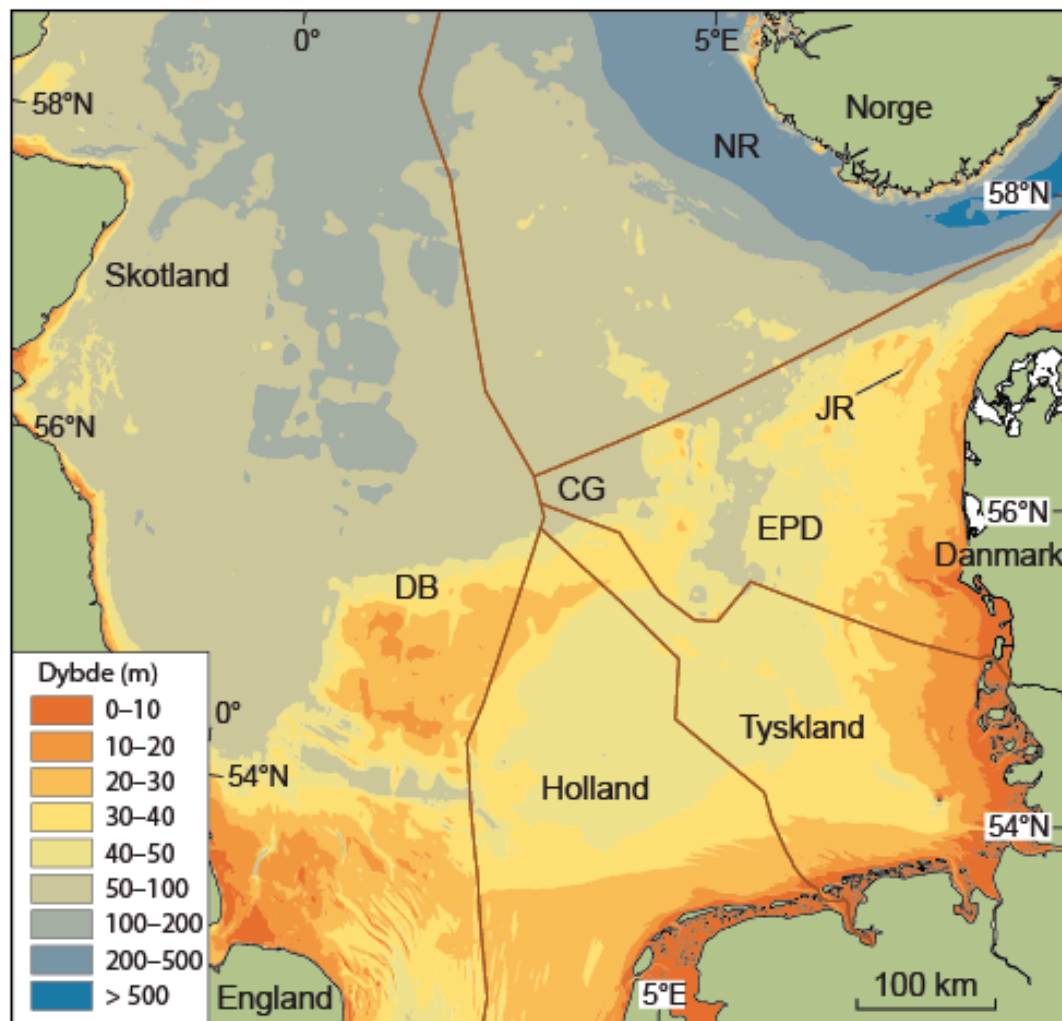
Der er ikke i dette eller i andre projekter foretaget en systematisk kortlægning af begravede dale i de indre danske farvande. I forhold til eksisterende viden er der, som det kan ses på Figur 7.5, foruden de kortlagte dale på land indtegnet nogle få begravede dale til havs. Eksempelvis er der i den sydlige del af Lillebælt kortlagt et system af begravede dale, hvoraf Figur 7.7 viser et tværsnit gennem systemets nordlige del. Den begravede dal på profilet er eroderet omkring 170 m ned i de Prækvartære aflejringer. Mange af de kortlagte dale på land ligger tæt på den nuværende kystlinje, og selvom der kun få steder findes tilstrækkelige data til havs i forlængelsen af dalene, forventes det, at mange begravede dale har en fortsættelse på tværs af kysten (Andersen et al., 2016; Sandersen et al., 2023).



Figur 7.7 Kortlagt begravet dal i Lillebælt vist på et udsnit af seismisk profil DA98-44. Fra Eiríksson et al. (2006). Bunden af de Kvartære aflejringer (Q) er markeret med en grøn streg. Dalen er eroderet ned i Palæogene og Neogene aflejringer. Ca. 2 gange overhøjning.

7.2 Nordsøen

Nordsøen er en havdækket del af det Europæiske kontinent, se Figur 7.8. Vanddybden tilta-
ger fra kysten af Jylland og vestpå. De østligste dele af Nordsøen er lavvandede, typisk med
vanddybder mellem 10 og 30 m, og centralt er vanddybderne 30 til 50 m, mens vanddybden
længst mod vest er omkring 80 m i Central Graven. Doggerbanke er et stort lavvandet om-
råde beliggende i den vestlige del af Nordsøen. I den danske del af Nordsøen er vanddybden
på Doggerbanke 25 til 35 m. Et dybere område med vanddybder op til 60 m findes også
centralt i Palæo-Elben Dalen, der strækker sig fra Elbens nuværende munding og nordpå. I
Skagerrak tiltager dybden mod nordvest op mod Norske Rende, hvor den maksimale dybde
i dansk farvand er omkring 500 m.



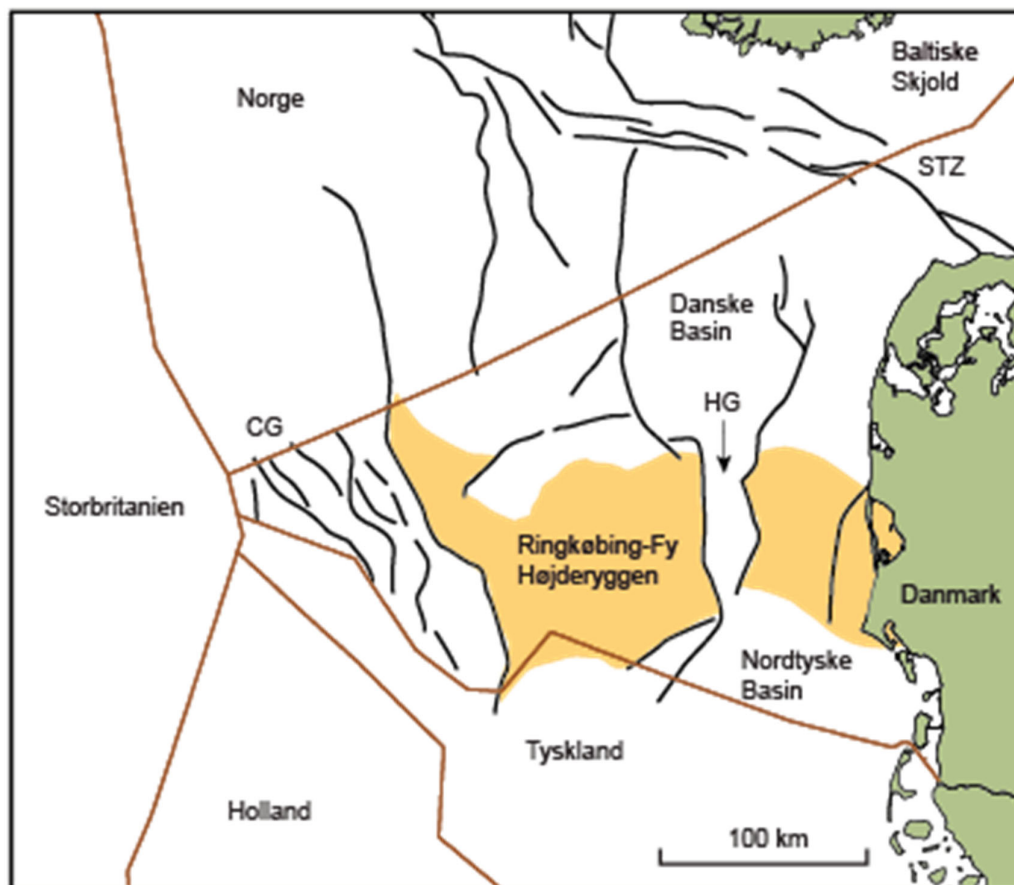
Figur 7.8 Batymetrisk kort over Nordsøen. DB: Doggerbanke, CG: Centralgraven, NR: Norske Rende, JR: Jyske Rev, EPD: Palæo-Elben Dalen.

7.2.1 Prækvartæret

I den nordlige del af området findes Sorgenfrei–Tornquist Zonen, som er en nordvest–sydøst orienteret tektonisk brudzone, der markerer overgangen mellem det skandinaviske grundfjeldsområde (det Baltiske Skjold), og de sedimentære aflejringer i det Danske Bassin (Figur 7.9; Liboriussen et al., 1987; Nielsen, 2003). I zonen findes talrige forkastninger med generelle retninger fra sydøst til nordvest (Michelsen & Nielsen, 1993). Den nordlige del af det danske Nordsø-område ligger i det Danske Bassin med tykkelser af sedimentære bjergarter på 3-6 km, mens den sydlige del ligger over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, som adskiller det Danske Bassin og det Nordtyske Bassin, med tykkelser af sedimentære bjergarter på 1-3 km. Den vestligste del af området ligger i Central Graven med op til 10 km tykke aflejringer af sedimentære bjergarter (Vejbæk, 1997). De dybe forkastninger i området afgrænser dels Horn Graven mod øst og Central Graven mod vest med henholdsvis nord-syd og nordvest-sydøst gående forløb og dels Ringkøbing–Fyn Højderyggen med mere sydvest-nordøst gående forløb, se Figur 7.9. I den nordlige del af området, i det Danske Bassin, og i den nordlige og sydlige del af Central Graven findes talrige saltstrukturer i undergrunden.

De Kvartære lag afgrænses fra de ældre lag af en markant erosionsflade (Nielsen et al., 2008). Basis af Kvartæret ligger højt i den sydlige del af Jammerbugt, hvor de Prækvartære aflejringer findes 0-10 m under havbunden, men nær grænsen til norsk farvand findes de Prækvartære aflejringer mere end 600 m under havbunden. I den centrale del af Nordsøen ligger basis af Kvartæret højt, og tykkelsen af de Kvartære aflejringer er typisk kun nogle titals-meter, men mod vest stiger tykkelsen af de Kvartære aflejringer markant og i Central Graven er mægtigheden over 1000 m.

Aflejringerne ved basis af Kvartær i den østlige del af den danske Nordsø domineres af Miocæne aflejringer i form af ler, silt og sand. Mod vest underlejres de Kvartære sedimenter af Pliocæne aflejringer. I Jammerbugt og Skagerrak dominerer skrivekridt og længst mod øst optræder lag af Nedre Kridt, Jura og Trias alder. Ud for Hanstholm findes lag af Danien kalksten. De Prækvartære lag er ofte foldede og forkastede; det gælder særligt i Sorgenfrei–Tornquist Zonen.



Figur 7.9 Dybe strukturer i den danske del af Nordsøen. CG: Central Graven, HG: Horn Graven, STZ: Sorgenfrei-Tornquist Zonen. De sorte streger markerer dybe forkastninger.

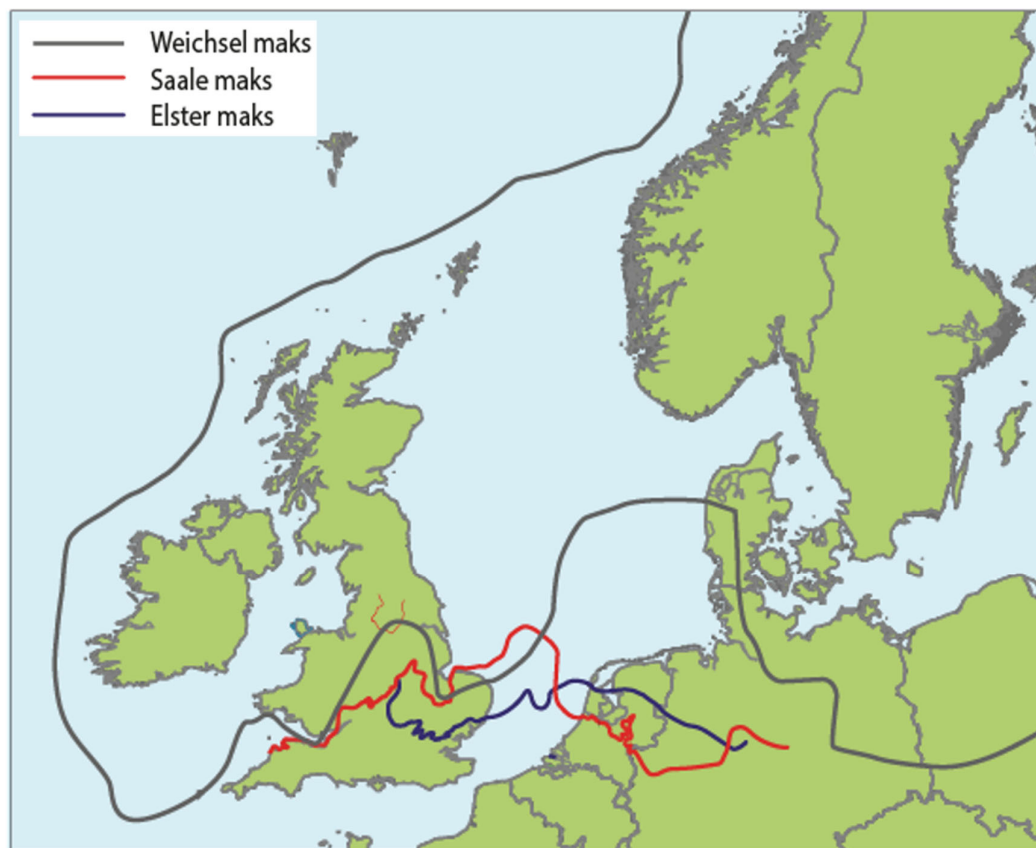
7.2.2 Kvartæret

Nordsøen var i Kvartærtiden præget af vekslende istider og mellemistider og regionen blev talrige gange dækket af det Skandinaviske Isskjold. De ældste spor af nedisninger er omkring 2,5 millioner år gamle (Rea et al., 2018). I Figur 7.10 er vist den maksimale udbredelse af isdækket under henholdsvis Elster, Saale og Weichsel istiderne.

Nedisningerne var præget af erosion, men der blev også aflejret moræneler og morænesand med sten og blokke, ligesom der blev aflejret store mængder sand af smeltevandsfloder. Under mellemistiderne var Nordsøen havdækket, og marint finkornet sand, silt og ler fra den seneste mellemistid, Eem, er påvist mange steder, ligesom der også er fundet aflejringer fra ældre mellemistider.

Aflejringerne i Nordsøen kan være præget af glacio-tektiske forstyrrelser, hvor sedimenterne er deformerede af den fremrykkende is. Glacialtektiske komplekser af Saale alder er beskrevet fra Jammerbugt (Pedersen & Boldreel, 2017) og fra Fanø Bugt i den sydøstligste del af Nordsøen (Andersen, 2004) samt fra området nord for Horns Rev (Nielsen et al., 2008). Glacialtektiske komplekser af Weichsel alder er kortlagt fra Doggerbanke af

Roberts et al. (2018) og Phillips et al. (2018) og lignende deformerede sedimenter er blevet kortlagt af GEUS på den danske del af Doggerbanke i forbindelse med denne screening.



Figur 7.10 Kortet viser den maksimale udbredelse af isen under Elster- (mørkeblå streg), Saale- (rød streg) og Weichsel glaciationerne (grå streg), efter Kirkham et al. (2024) og Gibson & Gibbard (2024).

Hele Nordsøen er præget af op til ti generationer af begravede tunneldale, som er dannet ved sub-glacial erosion, se også afsnit 7.2.4. De har ofte et komplekst fyld af varierende alder og karakter og de kan være flere hundrede meter dybe (Salomonsen & Jensen, 1994; Huuse & Lykke-Andersen, 2000a; Stewart et al., 2013; Kirkham et al., 2021). Orienteringen af dalene tyder på, at de blev dannet under et isskjold der havde rand mod syd. En anden type kanalsystem fra Doggerland området blev beskrevet af Prins & Andresen (2019), som kortlagde en hovedkanal og en serie sidekanaler, der blev dannet i proglaciale og fluviale floder.

Under sidste mellemistid, Eem, som varede fra ca. 130.000 år før nu til ca. 115.000 år før nu var Nordsøen havdækket, og marint finkornet sand, silt og ler er påvist mange steder i Horns Rev området og videre nordpå i Horn Graven samt i den vestlige del af Nordsøen. Eem aflejringerne fremtræder ofte som en markant akustisk transparent eller semi-transparent enhed på de seismiske profiler. I Horns Rev området er Eem aflejringer daterede ved hjælp af foraminifer-analyser (Konradi et al., 2005; Andresen et al., 2022).

Der er ligeledes fundet aflejringer fra fjerde-sidste mellemistid, Holstein, som var en super-interglacial for omkring 400.000 år siden. Holstein mellemistiden varede ca. 30.000 år og det globale havniveau var formentlig 6–13 m højere end i dag. Analyser af foraminiferer fra en 140 m dyb boring centralt i Nordsøen (i Britisk farvand) viser, at store dele af den Kvartære

lagserie mangler og desuden at marine sedimenter fra de kolde perioder tilsyneladende er mere udbredte end interglaciale aflejringer (Jensen & Knudsen, 1988). Det skyldes formentlig dels perioder med manglende afsætning af sedimenter og dels perioder med erosion.

Under den sidste istid, Weichsel, nåede isskjoldet ikke så langt sydpå i den danske del af Nordsøen som under de to foregående glaciationer, Elster og Saale, se Figur 7.10. Det Skandinaviske Isskjold fra nord flød sammen med det Britiske Isskjold fra vest og dækkede dele af Nordsøen (Figur 7.10). Jyske Rev, og området nord for, er således et glacialt landskab, der blev dannet under sidste istid (Larsen et al., 2009a). Øst og syd for isdækket opstod en stor isdæmmede sø, hvori der blev aflejret lagdelt ler og silt (Hjelstuen et al., 2018; Roberts et al., 2018). For 19-20.000 år siden blev de centrale og nordlige dele af Nordsøen igen isfri.

Det relative havniveau var generelt lavt under sidste istid og store dele af Nordsøen var tørt land i lange perioder. I disse områder er de dominerende aflejringer fra Weichsel istiden sandede flodaflejringer og lerede søaflejringer, antagelig fra isdæmmede søer. I en enkelt boring i den lavvandede del af Nordsøen er der truffet rester af arktiske planter, daterede til ca. 35.000 år før nu (Bennike et al., 2014). Analyser af aflejringer i en boring ved Roar-feltet viser, at havet er trængt ind i de dybere dele af dansk Nordsø i en periode med arktiske forhold (Knudsen, 1985). Larsen et al. (2009b) foreslog en alder på 30.000 til 50.000 år for denne aflejring. Flere rester af arktiske hvaler og hvalrosser fra Nordsøen er daterede til mellem 25.000 og 45.000 år, men disse fund er formentlig mellem 60.000 og 85.000 år gamle (Hijma et al., 2012), og det samme kan gælde aflejringen fra Roar-feltet.

Det meste af dansk Nordsø var fortsat tørt land i senglacial tid, dog med lokale mindre søer, hvor der blev aflejret ler og gytje (Bennike et al., 2014, 2023). Senglaciale planterester tyder på et arktisk klima med mosser, urter og dværgbuske. Efter sidste deglaciation trængte havet ind i Skagerrak og Jammerbugt, hvor istykkelsen var størst under sidste istid, og jordskorpen derfor var presset mest ned. Det Yngre Yoldia Ishav dækkede Jammerbugt og Skagerrak området indtil for ca. 12.000 år siden og der blev aflejret tykke konforme sekvenser af hovedsageligt finkornede sedimenter på relativt dybt vand.

De lavvandede vestlige og sydlige dele af Nordsøen var et stort landområde i perioden fra omkring 18.000 år før nu. For omkring 12.000 år siden begyndte havet at trænge ind i området (Konradi, 2000), men først for omkring 6.000 år siden fik Nordsøen den udstrækning, som kendes i dag. Lokalt blev der aflejret tørv i moser og gytje i søer, inden havet trængte ind over området. I Tidlig Holocæn (Fastlandstiden) var store dele af Nordsøen fortsat tørt land og i lokale moser blev der afsat tørv (Krüger et al., 2017). Dateringer af tørveaflejringer har givet aldre mellem 11.500 og 8.500 år før nu. Under den lange periode med lavt havniveau havde Elben samt Eider og Ems sine udløb nord for den danske del af Nordsøen og flodernes druknede dal, Palæo-Elben Dalen, fremgår stadig af dybdekortet over Nordsøen (Figur 7.8). Floraen omfattede træbirk, bævreasp og sjældne rester af skovfyr, hvilket viser, at lysåbne skove bredte sig i området. For omkring 12.000 år siden begyndte havet at trænge ind over området og Nordsøen begyndte at få den udstrækning som kendes i dag. Den Engelske Kanal blev overskyllet af havet for omkring 8.300 år siden, og det nuværende mønster med havstrømme blev etableret, dog var tidevandsamplituden betydeligt større end i dag. Jyllandsstrømmen blev etableret som en nordgående havstrøm langs vestkysten af Jylland (Leth, 1996) med sedimenttransport ind i Jammerbugt området og videre mod det der senere

er blevet til Skagens Gren. Store mængder af finkornet sediment blev ført nordpå, og en stor kile af dynd, ler, silt og finsand blev aflejret i Jammerbugt og viser udbygning mod nordøst med stor-skala klinteformer, mens der kystnært blev aflejret mere sandede udbygninger med skrålejringer.

Efter havets indtrængen begyndte en erosion af de ældre aflejringer og omlejring som grovkornede kystnære sedimenter, mens der i dybere områder og områder med læ blev aflejret marint dynd, ler og silt. Den yngste Holocæne enhed i området udgøres af et mobilt dynamisk overfladelag af sand som er 1-2 m tykt og forekommer i store dele af området.

I den østlige del af Nordsøen er tykkelsen af de Kvartære lag typisk kun nogle titals-meter, mens tykkelsen mod vest stiger til mere end 1000 m i Central Graven. Overordnet består de glacialle aflejringer af moræneler, morænesand og smeltevandssedimenter aflejret i forbindelse med Saale istiden eller ældre glaciationer, men kan også indeholde ældre finkornede interglacialle aflejringer. Over disse er marint finkornet sand, silt og ler fra Eem mellemistiden udbredt. Aflejringerne fra Weichsel består mod nord og vest af ler og silt i form af issøaflejringer, og i den nordøstligste del af området af moræneaflejringer. Enkelte steder i den nordlige del optræder finkornede glaciomarine aflejringer fra Tidlig eller Mellem Weichsel. I resten af området består aflejringerne fra Weichsel af smeltevandssand og -grus aflejret i store flodsystemer som udgik fra israndene mod vest, nord og øst. De senglacialle aflejringer, som dog er mindre udbredte, består ligeledes af sand og grus aflejret i flodsystemer og mere finkornede aflejringer som ler, silt og finkornet sand aflejret i søer og afsnørede flodarme, ligesom der lokalt optræder gytje fra søer. Fra Tidlig Holocæn, før havet bredte sig ind i området, findes der lokalt tørveaflejringer. Efter havets indtrængen begyndte en erosion af de ældre aflejringer og omlejring som grovkornede kystnære sedimenter i starten af transgressionen. I dybere områder og i områder med læ blev der aflejret marint dynd, ler og silt.

7.2.3 Recente forkastninger

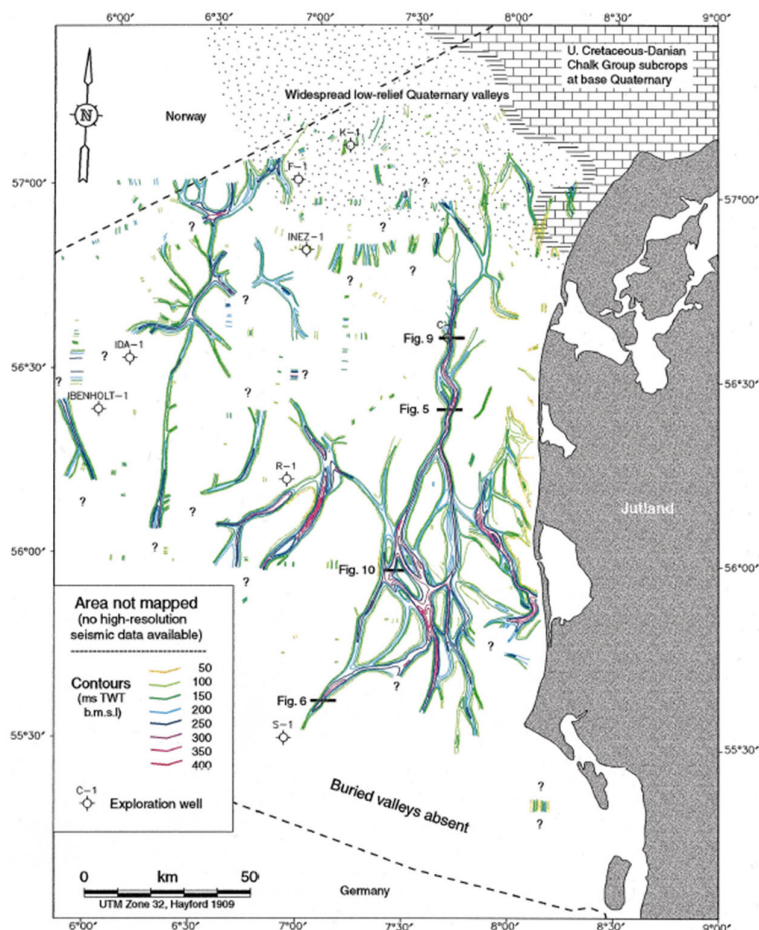
Som det er beskrevet i afsnittet om de indre danske farvande, så har glacialt induceret forkastningsaktivitet i sen- og postglacial tid kunnet påvises såvel til lands som til vands. Undersøgelser af recente forkastninger i den danske del af Nordsøen er meget sparsomme. Brandes et al. (2018, 2022) fandt ved undersøgelser langs Vendsyssels vestkyst senglacialle forkastninger relateret til Sorgenfrei–Tornquist Zonen og senglacial sedimentation i søbassiner skabt langs reaktiverede forkastninger. Sorgenfrei–Tornquist Zonen fortsætter mod nordvest ud i Nordsøen (Figur 7.3), og derfor må det forventes, at der også her har været forkastningsaktivitet i forbindelse med deglaciationerne.

Da den bagvedliggende mekanisme er et resultat af tyngdepåvirkningen fra Kvartærtidens isskjolde og den efterfølgende aflastning i forbindelse med deglaciationen, så vil den danske del af Nordsøen også have været udsat for det samme, da denne også gentagne gange har været isdækket. Det kan derfor forventes, at eksisterende forkastningssystemer i Nordsøen potentielt også kan være reaktiveret i sen- og postglacial tid, og at bevægelserne kan have skabt indsynkninger og have styret sedimentationen i lighed med hvad der ses i Kattegat og ved Bornholm.

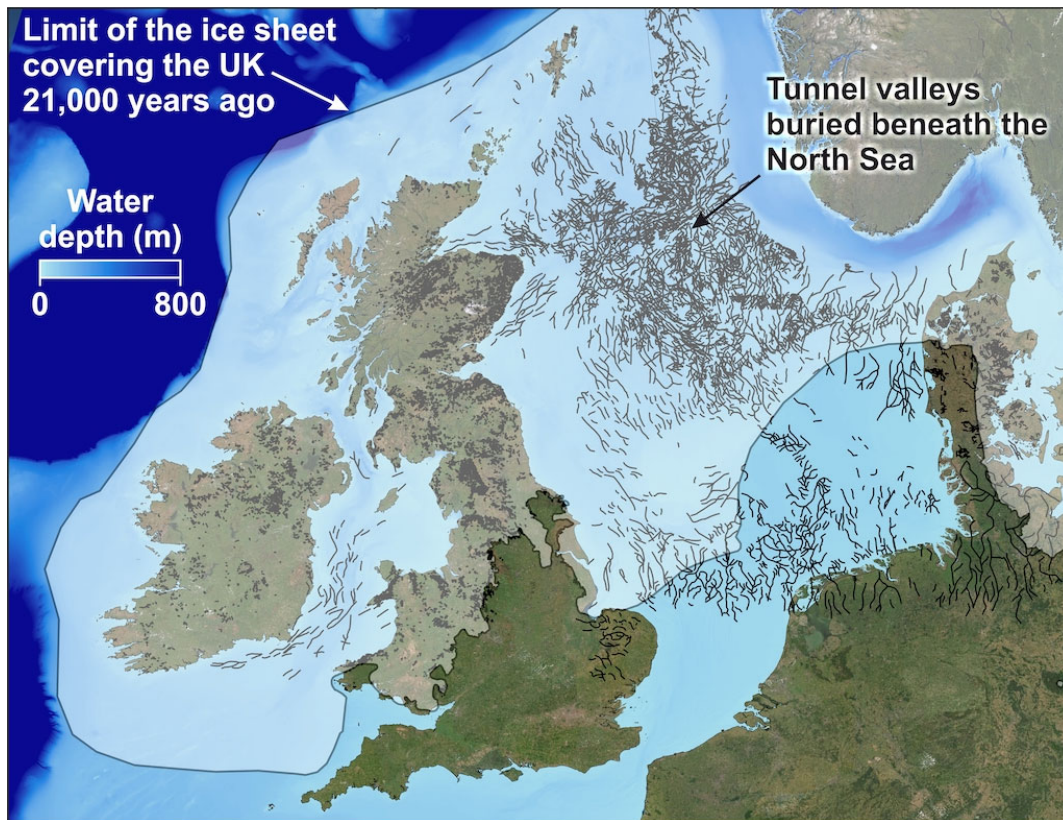
7.2.4 Begravede dale

Begravede dale i den danske del af Nordsøen er kortlagt af blandt andre Salomonsen & Jensen (1994), Huuse & Lykke-Andersen (2000a), Prins et al. (2020) og Kristensen et al. (2007) i afgrænsede områder, se f.eks. Figur 7.11. I de omkringliggende landes dele af Nordsøen, har der været tale om en mere intens kortlægning af begravede dale, hvilket kan ses af Figur 7.12, men som for de indre danske farvande er der heller ikke i Nordsøen, hverken i dette eller andre projekter, foretaget en systematisk kortlægning af begravede dale i hele det danske område.

I takt med at der er opnået større opløsning i de seismiske kortlægninger har der i den engelske sektor kunnet findes flere dale end ved tidligere kortlægninger (Kirkham et al., 2024). Op til 10 separate generationer af begravede dale med forskelligt fyld og med varierende orienteringer har kunnet udskilles. Kirkham et al. (2024) anfører, at på grund af det meget plane underlag for is skjoldene i Nordsøområdet sammenlignet med de omkringliggende landområder, har små variationer i den hydrauliske gradient i isen kunnet skabe hurtige skift i retningen af erosionen under isen, og dermed være årsagen til det store antal generationer. I det danske landområde ser det ud til, at der i højere grad er tegn på genbrug af allerede eksisterende dalsystemer og flere generationer kan derfor ligge indenfor samme daltracé og have samme orientering (Jørgensen & Sandersen, 2006; Høyer et al., 2015).



Figur 7.11 Begravede Kvartære tunneldale i den østlige del af den danske Nordsø (fra Huuse & Lykke-Andersen, 2000a).



Figur 7.12 Kortlagte tunneldale i Nordsøen. Fra Kirkham et al. (2022). Data for kortlagte dale er fra van der Vegt et al. (2012) og Ottosen et al. (2020).

Som det kan ses på Figur 7.12, så er antallet af kortlagte dale i den danske sektor af Nordsøen mindre end i de omkringliggende sektorer og i det danske landområde, men dette skyldes højst sandsynligt den mindre kortlægningsaktivitet. De mange kortlagte dalgenerationer i Nordsøen som helhed viser tydelige regionale områder med foretrukne orienteringer. Hvor der i store dele af det danske landområde kunne konstateres en korrelation til dybe forkastninger, er der ikke påpeget samme tendens i Nordsøen, og her sættes tunneldalenes orienteringer stort set udelukkende i forbindelse med isbevægelsesretningerne. Ifølge Praeg (2003) er der i den engelske sektor kun få tegn på, at begravede dales forløb, er påvirket af dybe forkastninger, mens Huuse & Lykke-Andersen (2000a) kun finder en sammenhæng mellem forkastninger og daldannelse over saltstrukturer. I den engelske sektor finder Kirkham et al. (2024) udbredte eksempler på akkumulering af gas i dalstrukturer og anbefaler blandt andet derfor, at de begravede dalstrukturer kortlægges i højt detailniveau forud for installation af infrastruktur.

8. Nordlige Kattegat

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af det nordlige Kattegat. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glacial lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glacial lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

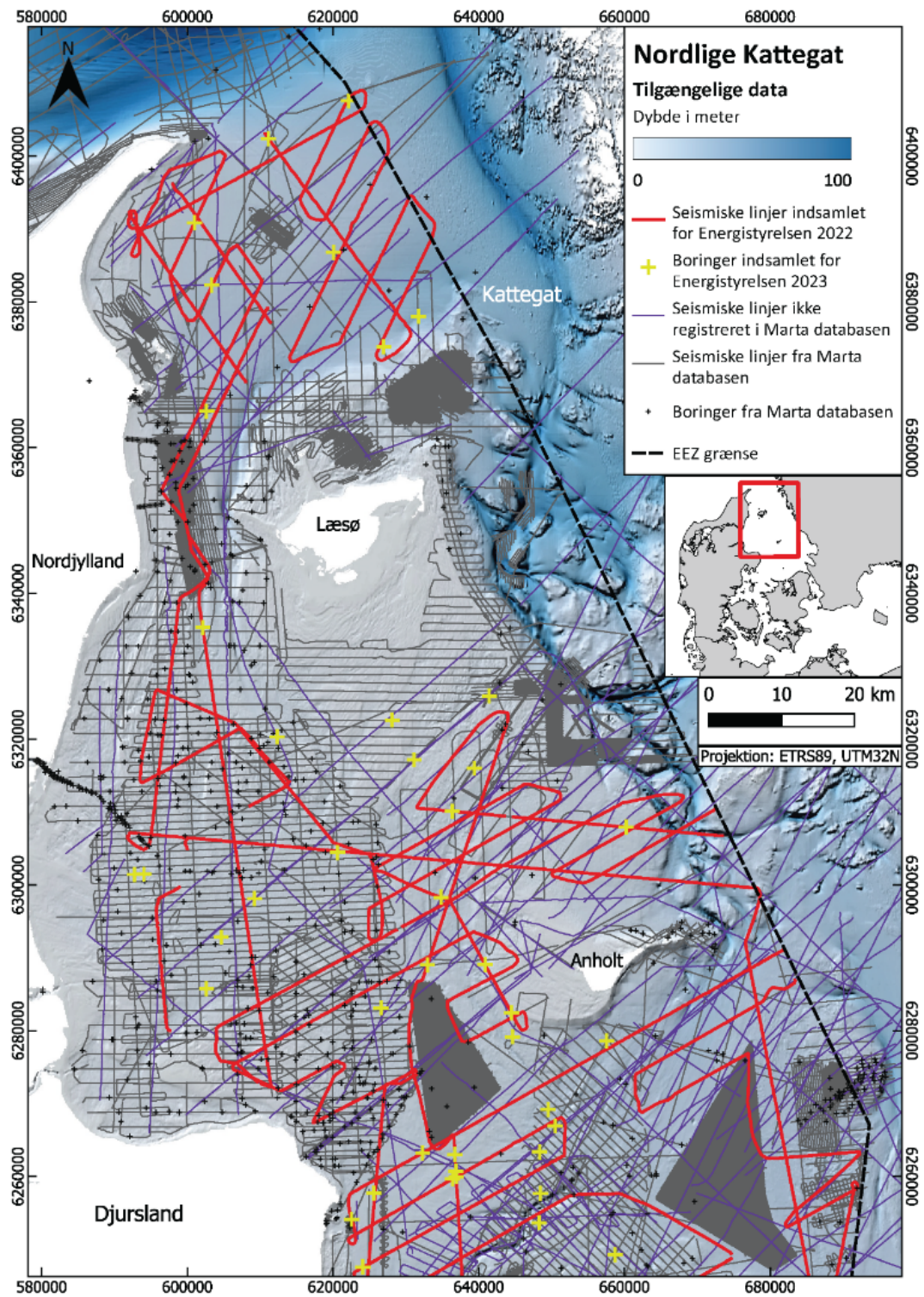
På oversigtsfiguren i Figur 8.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i det nordlige Kattegat. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

8.1 Seismiske enheder

I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 8.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 8.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

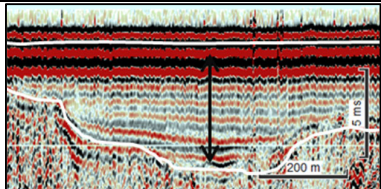
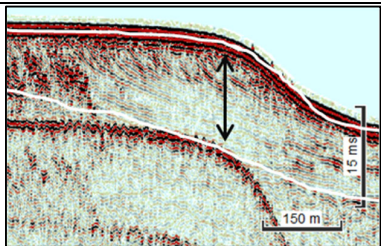
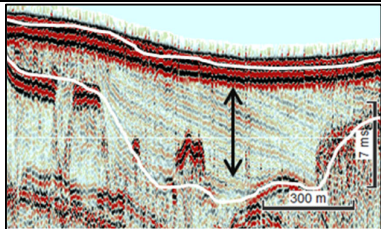
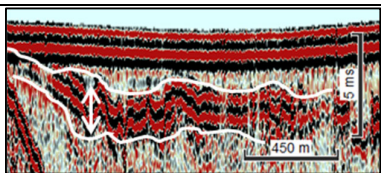
8.1.1 Prækvartære strata

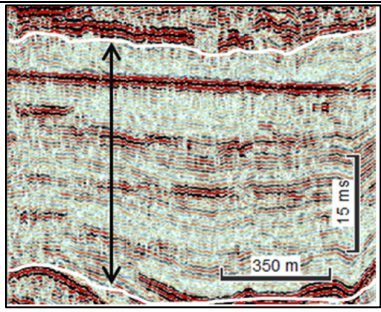
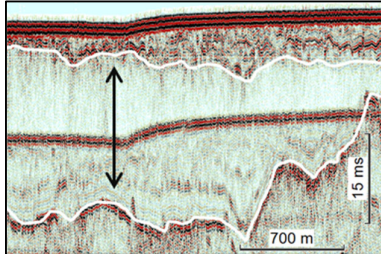
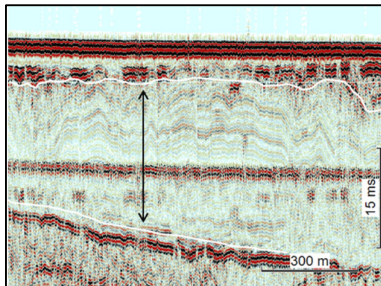
Det Prækvartære underlag varierer i lithologi og alder på tværs af det nordlige Kattegat og bliver successivt yngre fra nordøst til sydvest. Mod nordøst består Prækvartæroverfladen af Prækambrisk basement, som mod sydvest afløses af bjergarter fra Jura, Nedre Kridt og Øvre Kridt. Prækvartæroverfladen har udelukkende kunnet tolkes på enkelte dybere airgun seismiske linjer og på få sparker seismiske linjer. Overfladen ses på Airgun data som en tydelig, kontinuert, let ondulerende, horisontal reflektor i området nord for Læsø i 200 – 250 m dybde (markeret med gråblå på Figur 9.2 A). I området mellem Læsø og Anholt er der kun stedvist seismisk gennemtrængning af de overliggende Kvartære sedimenter til denne grænse. Når den ses, fremstår de Prækvartære aflejringer her med skråtstillede interne reflektorer, med høj amplitude øverst, men hvor det seismiske signal hurtigt dør ud.

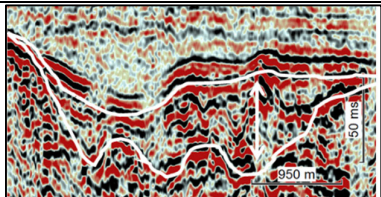
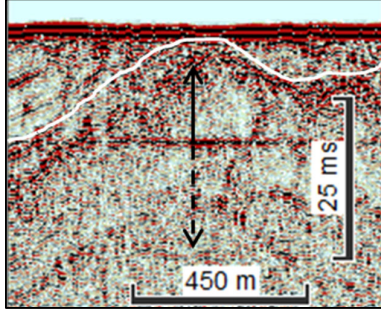
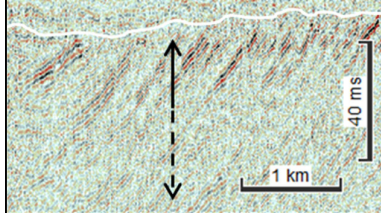


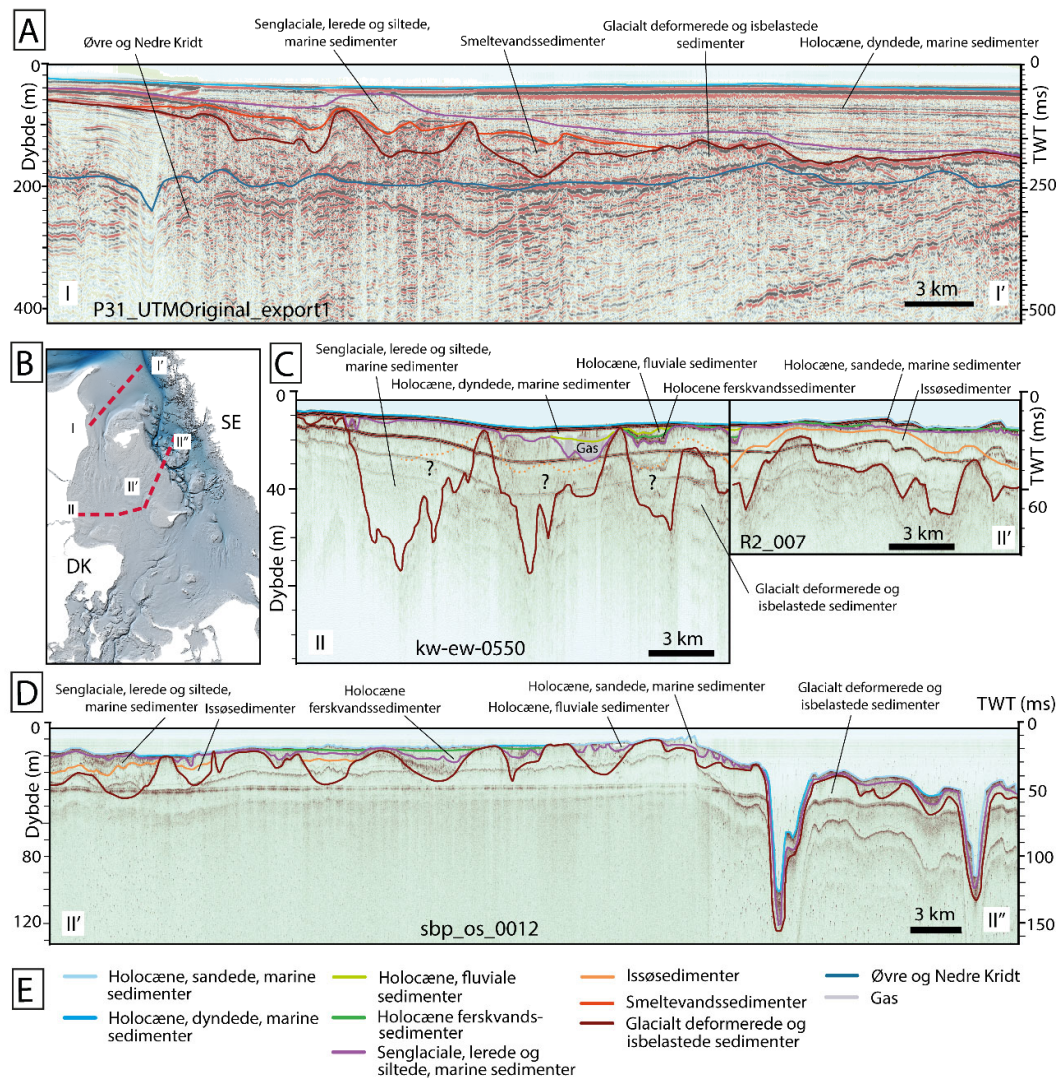
Figur 8.1 Oversigtskort over det nordlige Kattegat. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borerer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

Tabel 8.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Sen-Tidlig Holocæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallelle, kontinuerte reflektorer. Semi-transparent. Konformt overliggende den underliggende enhed, stedvist nedskåret i underliggende enheder.	150	Stor lateral udbredelse nord for Læsø. Forekommer i dybe kanaler i Kattegattrenden, øst for Læsø- Anholt og i Aalborg Bugt.	Dyndet (finsand)	Marin	
Sen-Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende udbyggede reflektorer. Positiv form.	15	Kontinuert forekomst langs østsiden af Læsø-Anholt platformen. Forekomster i midten af Aalborg Bugt. Positive rygformer i de lavtliggende områder.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin-/kyst-/flakdannelse	
Tidlig Holocæn	Holocæne, fluviale sedimenter	Skråt hældende reflektorer, semi-transparent, skarp nedre grænse, men stedvis sløret af gas.	10	Findes i depressioner/nedskårne kanaler i underliggende enhed(er) centralt i Aalborg bugt.	Sand	Fluvial	
Tidlig Holocæn	Holocæne ferskvands-sedimenter	Let ondulerende reflektorer med høj amplitude.	2	Findes i fordybninger i underliggende enhed i Aalborg Bugt.	Tørv og gytje	Sø/lakustrin	

Senglacial	Senglaciale, lerede og siltede sedimenter	Transparent til semi-transparent internt refleksionsmønster med parallelle, kontinuerte reflektorer, konformt overliggende underliggende enheder.	25	Stor lateral udbredelse nord for Læsø. Mindre forekomster centralt i Aalborg Bugt og i Kattegattrenden øst for Læsø-Anholt.	Ler og silt	Glaciomarin	
Glacial	Issøsedimenter	Stedvis transparent øverst til semi-transparent med svagt synlige parallelle reflektorer nederst i enheden. Stedvis tydelige, parallelle reflektorer.	35	Stor udbredelse i dybere dele af Aalborg Bugt. Findes stedvist i lokale depressioner i Læsø-Anholt platformen.	Ler og silt	Glaciolakustrin	 

Glacial	Smeltevands-sedimenter	Høje amplituder, kaotisk	30	Findes i depressioner i underliggende enhed i området nord for Læsø		Glaciofluvial	
Glacial/ Pleistocæn	Glacialt de-formerede og isbelastede sedimenter	Kaotiske ikke-transpa-rente reflektorer. Be-grænset nedtrængning af det seismiske signal. On-dulerende overflade. Svarer i store dele til aku-stisk basement.	-	Udbredt i hele området	Moræne-ler/-moræ-nesand samt ispå-virket/is-overskre-det ler, silt, sand	Glacial	
Prækvartær	Kridt, Jura, Prækam-brium	Horisontale til skråt hæl-dende reflektorer. Oftest højreflektiv øverst men begrænset nedtræng-ning.	-			Prækvartær	



Figur 8.2 Eksempler på seismiske data fra det nordlige Kattegat som viser de tolkede seismiske enheder. Profilerne illustrerer også variationen i typer af seismiske data anvendt i den geologiske screening. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Airgun seismisk profil nord for Læsø. B) Oversigtskort. C) Sparker seismisk profil fra Aalborg Bugt. D) Sub-bottom profiler seismisk profil fra området mellem Læsø og Anholt. E) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

8.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter findes i hele området og består typisk af moræner og -sand, men ler, silt og sand kan også forekomme. De glacialle aflejringer ses over den Prækvarter flade nord for Læsø som en seismisk enhed med kaotiske, ikke-transparente reflektorer og med en ondulerende øvre grænse. De glacialt deformerede og isbelastede sedimenter ses også i området mellem Læsø og Anholt, hvor de i mange af de anvendte seismiske data optræder som akustisk basement. Det vil sige, at der generelt er begrænset nedtrængning af det seismiske signal i enheden. Skråstillede reflektorer optræder sporadisk i enheden i hele det nordlige Kattegat. Enheden er tolket som bestående af en

lagserie af isbelastede og stedvist, glacialt deformerede sedimenter med stor intern variation afhængig af graden af ispåvirkning, og toppen af enheden er markeret med mørkebrun på Figur 8.2. På platformen mellem Læsø og Anholt optræder svagt synlige (lav amplitude), skråtstillede lag som er tolket til at repræsentere glacialtektoniske deformationer, hvor ældre Kvartære enheder er blevet skubbet op af isen under sidste istid. Antageligvis består den deformerede lagserie af sedimenter fra Skærumhedeserien til og med moræneaflejringer fra sidste istid.

8.1.3 Smeltevandssedimenter

Smeltevandssedimenter findes i området nord for Læsø i depressioner i den underliggende enhed. Den seismiske enhed har interne, ondulerende reflektorer (Figur 8.2 A). Den seismiske facies er semi-kaotisk med en ondulerende til horisontal øvre grænse. Baseret på enhedens beliggenhed i depressioner i den isbelastede overflade og dens seismiske karakter, tolkes enheden som smeltevandssedimenter aflejret i smeltevandssfloder under isens overordnede tilbagetrækning i slutningen af sidste istid. Enheden ses kun i området nord for Læsø.

8.1.4 Issøsedimenter

Centralt i Aalborg Bugt er der tolket en lokal enhed af issøsedimenter, som konformt overlejrer den isbelastede flade. Enheden har stor udbredelse i de dybere dele af Aalborg Bugt og findes stedvist i lokale depressioner på Læsø-Anholt platformen. Den øvre grænse er jævn til ondulerende og enheden er transparent øverst til semi-transparent, med svagt synlige, parallelle interne reflektorer, nederst. Enheden har en mægtighed på op til 35 m og er truffet i flere borer, f.eks. nederst i boring 561008.22 (LA-25), centralt i Aalborg Bugt, se Figur 8.3 hvor den er angivet med DL (smeltevandssler). Baseret på borer og enhedens seismiske karakter og dens konforme udtryk tolkes enheden som sedimenter aflejret i en lokal issø under isens overordnede tilbagetrækning i slutningen af sidste istid.

8.1.5 Senglaciale lerede og siltede, marine sedimenter

Senglaciale lerede og siltede, marine sedimenter ses konformt over smeltevandsenheden, hvor denne optræder, men overlejrer direkte den isbelastede flade i størstedelen af området. Den nederste del af enheden er oftest transparent og den øverste del oftest semi-transparent med horisontale, parallelle, kontinuerte interne reflektorer. Enhedens øvre grænse er jævn til ondulerende. Enheden har en mægtighed på op til 50 m og har stor lateral udbredelse. De største mægtigheder findes nord for Læsø og centralt i Aalborg Bugt i depressioner i den underliggende glaciale enhed. De sennglaciale, marine sedimenter er truffet i flere borer, f.eks. boring 561008.22 (LA-25) og 571027.41 (LA-36), se Figur 8.3, hvor den er angivet med YL (sennglacial saltvandssler). Baseret på borer og enhedens seismiske karakter og dens konforme udtryk samt to kulstof-14 dateringer i borerne på henholdsvis 16.454 og 15.981 kal. år BP, tolkes enheden som lerede og siltede glaciomarine sedimenter aflejret i det sennglaciale Yoldia Hav.

8.1.6 Holocæne ferskvandssedimenter

Holocæne ferskvandssedimenter findes stedvist i bunden af depressioner i den underliggende senglaciale enhed. Seismisk ses enheden som et tyndt bånd af let ondulerende, parallelle reflektorer med høj amplitude. Enheden optræder primært i Aalborg Bugt og på platformen mellem Læsø og Anholt. Enheden er op til 2 m tyk. Baseret på enhedens seismiske karakter og høje amplituder, tolkes den som tørv og gytje aflejret i Tidlig Holocæn.

8.1.7 Holocæne, fluviale sedimenter

Holocæne, fluviale sedimenter findes også i depressionerne, stedvist konformt over enheden tolket som Holocæne ferskvandssedimenter, og stedvist nedskåret i enheden tolket som senglaciale sedimenter. Seismisk har enheden skråt-hældende reflektorer som indikerer udbygning af sandede sedimenter. Den øvre grænse er jævn til ondulerende. Enheden er op til 10 m tyk og tolkes på baggrund af den seismiske karakter, som sandede, fluviale sedimenter aflejret under Fastlandstiden/Tidlig Holocæn, da området mellem Læsø og Anholt var tørlagt, og der løb floder fra Jylland ud i Aalborg Bugt.

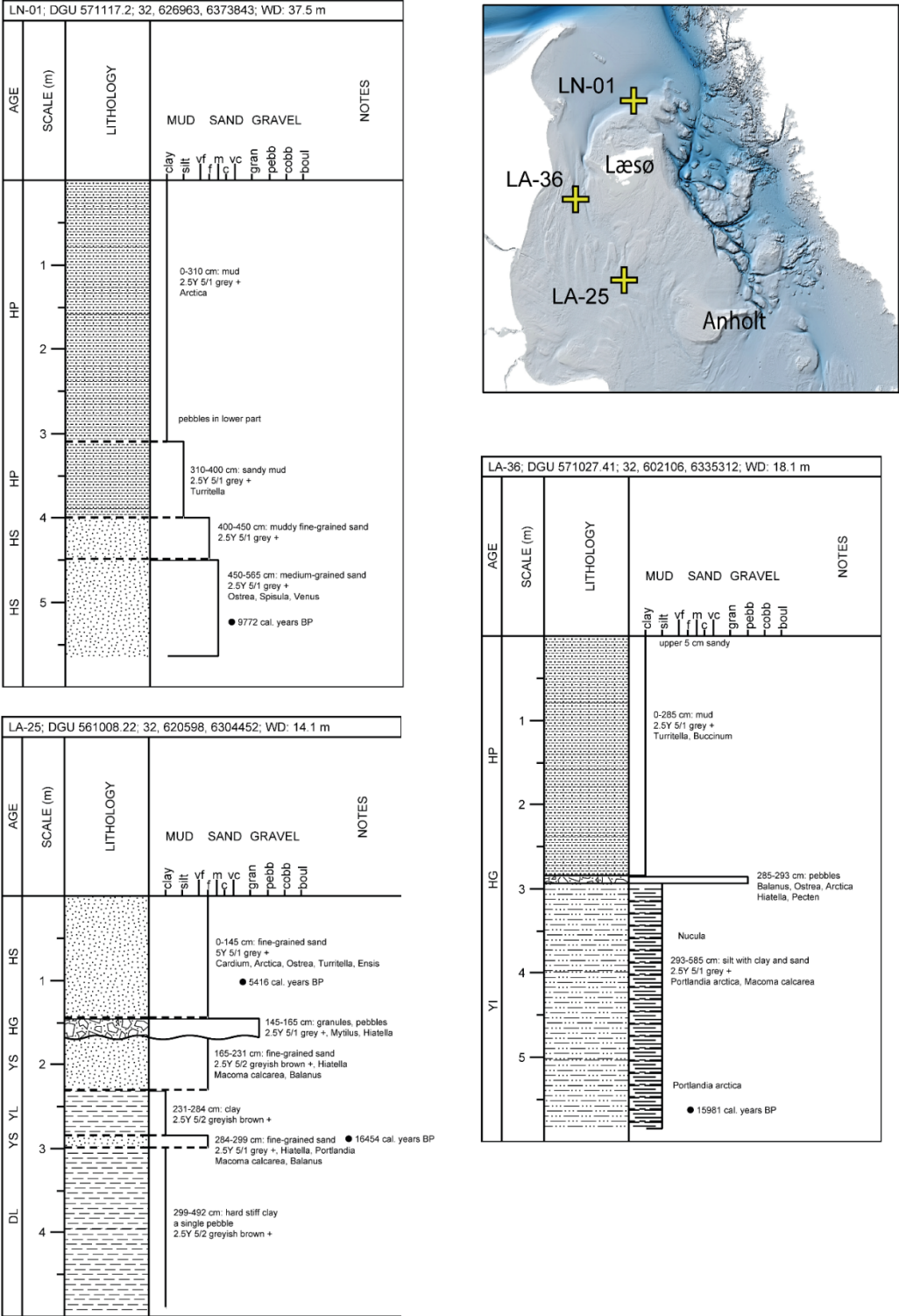
8.1.8 Holocæne, sandede, marine sedimenter

Holocæne, sandede, marine sedimenter findes flere steder i området. Øst for den nuværende kyst i Aalbæk Bugt, umiddelbart nord for Læsø og langs den østlige side af platformen mellem Læsø og Anholt ses de som en seismisk enhed med parallelle, skråt-hældende reflektorer der bygger ud mod øst. Lignende seismiske enheder med skråtstillede lag ses som positive former på områder med lav vanddybde umiddelbart nord for Læsø og i aflange rygge i Aalborg Bugt. Enheden er truffet i mange boringer og ses f.eks. i boringerne 571117.2 (LN-01) og 561008.22 (LA-25), se Figur 8.3, hvor den er angivet med HS (Holocæn saltvands-sand). Enheden er op til 10 m tyk, og hvor den findes, udgør den øvre grænse dagens havbund. Baseret på boringer og det seismiske udtryk tolkes enheden som Holocæne, sandede, marine sedimenter. De udbyggende enheder i Aalbæk Bugt og langs den østlige del af platformen mellem Læsø og Anholt tolkes som kystudbygninger i Tidlig Holocæn, jævnfør en kulstof-14 datering i boring 571117.2 (LN-01) på 9.772 kal. år BP. De blev dannet da havniveauet var lavt og store dele af Kattegat var tørlagt. De rygformede, positive former i Aalborg Bugt tolkes som flakdannelser i Sen Holocæn, jævnfør en datering på 5.416 kal. år BP i boring 561008.22 (LA-25).

8.1.9 Holocæne, dyndede, marine sedimenter

Over de Holocæne fluviale og Holocæne ferskvandssedimenter, men oftest direkte over de senglaciale lerede og siltede, marine sedimenter, findes en enhed af Holocæne, dyndede, marine sedimenter. Enheden har parallelle, horisontale, kontinuerte, semi-transparente, interne reflektorer. Den nedre grænse er skarp og den øvre grænse er dagens havbund. De største mægtigheder findes nord for Læsø (150 m), centralt i Aalborg Bugt og i Kattegatrenden øst for platformen mellem Læsø og Anholt. I boring 571117.2 (LN-01) og 571027.41 (LA-36) ses enheden øverst i kernen på Figur 8.3, hvor den er vist med HP (Holocæn

saltvandsgytje). Baseret på boringer og enhedens seismiske karakter tolkes den som dyn- dede, marine sedimenter. Nord for Læsø og i Kattegattrenden øst for platformen mellem Læsø og Anholt er enheden formentlig aflejret i Tidlig til Sen Holocæn, mens den i Aalborg Bugt formentlig er aflejret i Sen Holocæn.



Figur 8.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området.

8.2 Konceptuel geologisk model

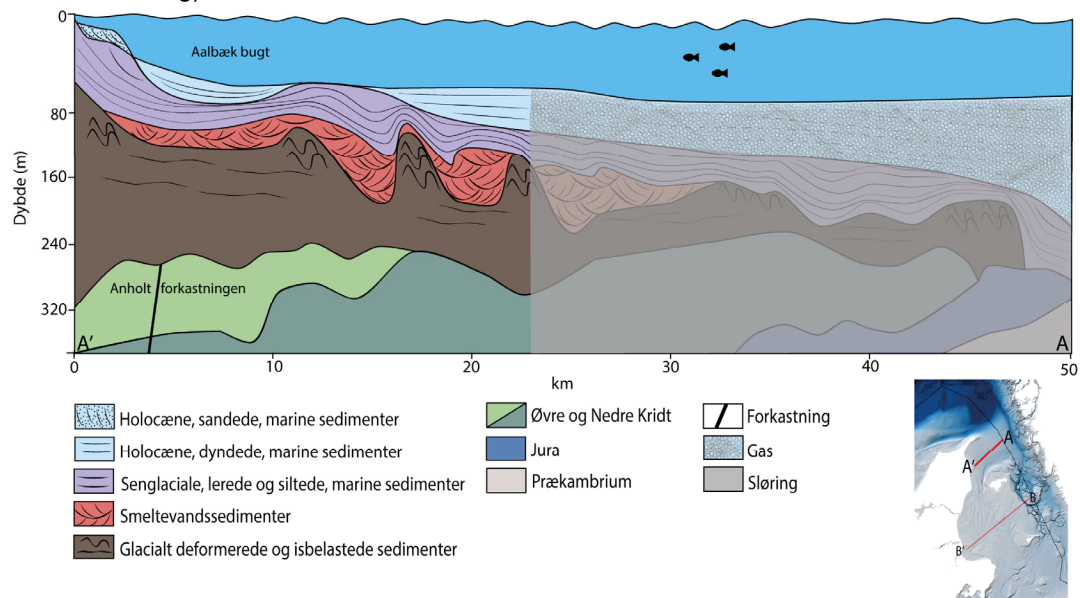
Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Kattegat, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for den nordlige del af Kattegat. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med et geologisk profil henholdsvis nord for Læsø og mellem Læsø og Anholt (Figur 8.4 og Figur 8.5). Modellerne fokuserer på den øvre lagserie/de Kvartære lag ned til omkring 200 og 300 meters dybde. Placeringen af profilerne er vist på Figur 8.10.

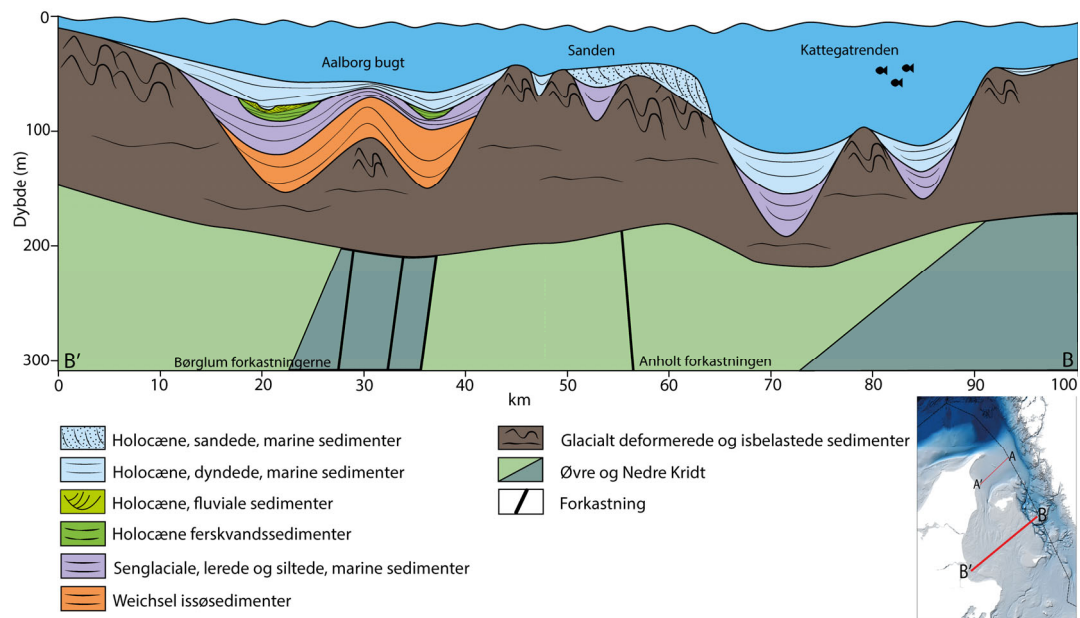
I området nord for Læsø ligger den Prækvartære overflade i omkring 150 meters dybde (Figur 8.4). Mod sydvest udgøres underlaget for de Kvartære lag af Øvre Kridt (lysegrøn), videre mod nordøst af Nedre Kridt (mørkegrøn) og Jura (blå) og helt mod nordøst af Prækambrisk basement vist med grå (Håkansson & Pedersen, 1992). Over den Prækvartære overflade findes en lagserie af isbelastede og stedvist, glacialt deformerede lag med en ondulerende øvre grænse (mørkebrun), antagelig primært bestående af deformerede sedimenter fra Skærumhedeserien til og med moræneaflejringer fra sidste istid (jf. Knudsen & Lykke-Andersen, 1982; Larsen et al., 2009b). Overlejrende de isbelastede og glacialt deformerede lag findes glaciofluviale aflejringer (smeltevandsaflejringer) af op til 30 m mægtighed stedvist som fyld i depressioner i den ondulerende overflade (rød). Konformt overlejrende de glaciofluviale lag, stedvist direkte over den isbelastede flade og mod nordøst direkte over jurassiske lag findes siltede og lerede aflejringer fra senglacial tid (lilla). De senglaciale lag har en mægtighed op til over 50 m. Øverst findes en tyk lagpakke af Holocæne, dyndede marine lag, som bliver tykkere mod nordøst og opnår en mægtighed på op til omkring 150 m (lyseblå med horisontal lagdeling). I de lavvandede dele af området, som var tørlagt i det tidligste Holocæn, er grænsen mellem de glaciale og senglaciale lag og de overliggende Holocæne enheder erosiv og ikke-konform. Mod sydvest, nær den nuværende kystlinje, findes Holocæne, sandede marine lag, som repræsenterer en kystudbygning fra Tidlig Holocæn, da det relative havniveau var på sit laveste (lyseblå med skråstillede lag). Shallow gas slører de shallow seismiske signaler i en stor del af området nord for Læsø, og de tolkede tykkelser, specielt mod nordøst, er derfor meget usikre (boblesignatur og grå farve; Laier & Jensen, 2007).

I området mellem Læsø og Anholt findes den Prækvartære overflade i omkring 150-200 meters dybde (Figur 8.5). Underlaget for den Kvartære lagserie udgøres primært af Øvre og Nedre Kridt (grønne farver). Over den Prækvartære overflade findes en lagserie af isbelastede og stedvist, glacialt deformerede lag med en ondulerende øvre grænse (mørkebrun), antagelig primært bestående af deformerede sedimenter fra Skærumhedeserien til og med moræneaflejringer fra sidste istid (jf. Knudsen & Lykke-Andersen, 1982; Larsen et al., 2009b). Centralt i Aalborg Bugt falder overfladen af de isbelastede lag til omkring 150 m under havets overflade og bassinet er udfyldt med hvad der formodes at være Weichsel issøsedimenter

(orange). Mellem Læsø og Anholt stiger overfladen op og befinder sig nær havbunden. I Kattegattrenden falder overfladen igen til omkring 175 m under havets overflade. Udfyldt i depressioner i den ondulerende, isbelastede overflade findes lerede og siltede, senglaciale aflejringer op til over 50 m mægtighed (lilla). I Aalborg bugt, over de senglaciale lag, findes der stedvist (i bunden af kanalstrukturer) Holocæne ferskvandslag med udviklede tørvedannelser (grøn) og fluviale sedimenter (lysegrøn). Øverst findes en lagpakke af Holocæne, dyndede, marine lag, som i Aalborg Bugt opnår tykkelser op til omkring 20-30 m, og som i Kattegattrenden opnår tykkelser helt op til over 30 m (lyseblå med horisontal lagdeling). Langs den østlige kant af platformen Sanden mellem Læsø og Anholt findes et druknet kystsystem, som blev dannet i Tidlig Holocæn, da det relative havniveau var på sit laveste (lyseblå med skråtstillede lag).



Figur 8.4 Konceptuel geologisk model for det nordligste Kattegat. Placeringen af profilet er vist på Figur 8.10.



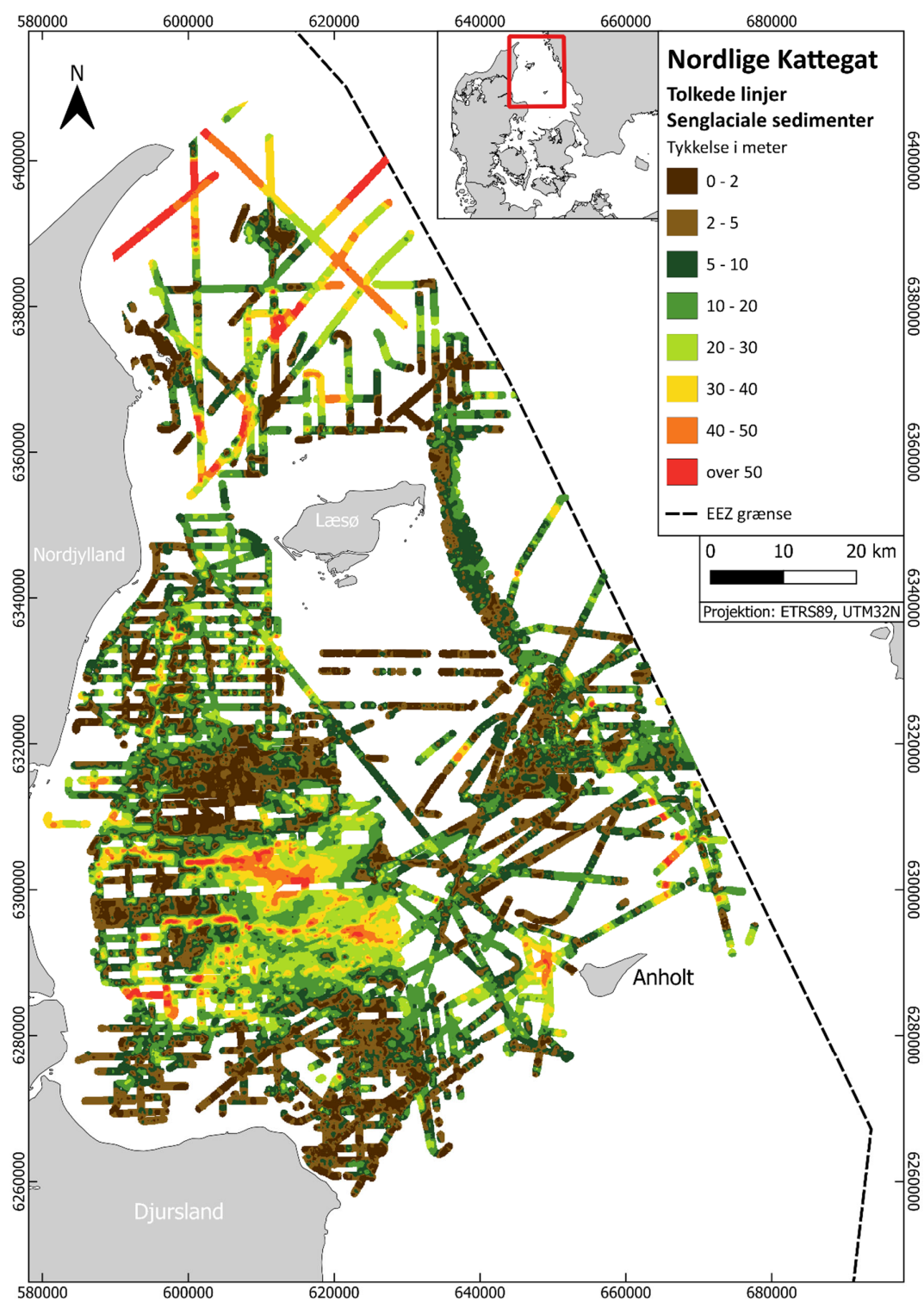
Figur 8.5 Konceptuel geologisk model for det centrale Kattegat. Placeringen af profilet er vist på Figur 8.10.

8.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

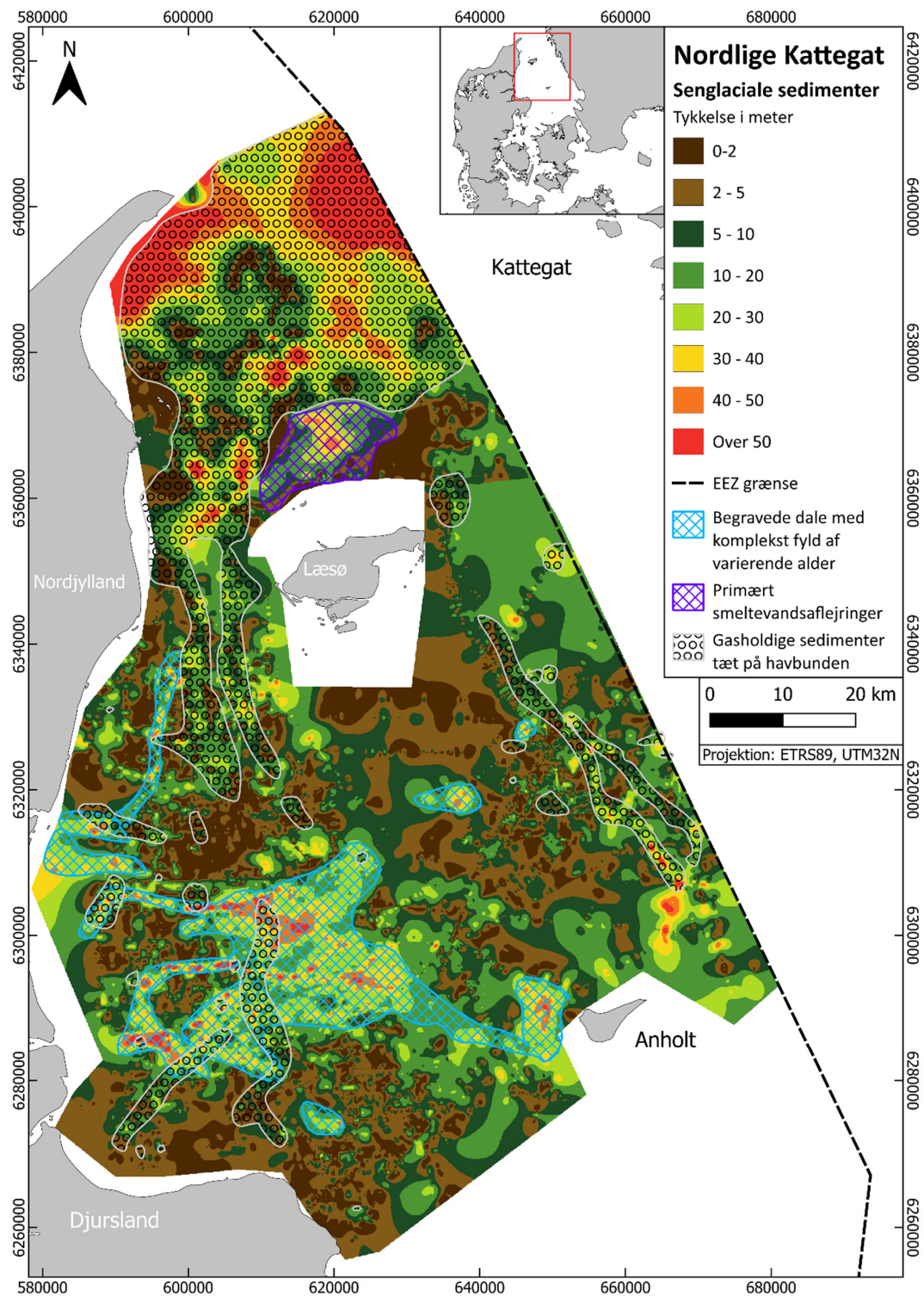
På Figur 8.6 er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 8.7. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med stor forsigtighed.

Kortet i Figur 8.7 viser tykkelsen af de senglaciale aflejringer umiddelbart over de glacialt deformerede og isbelastede lag. Den generelle mægtighed af den senglaciale lagpakke varierer fra 0 til langt over 50 m. I de kystnære områder samt på platformen Sanden mellem Læsø og Anholt er tykkelsen overvejende 0 til 5 m. Ved kysten i Aalbæk Bugt, langs med Grenen, er der dog mægtigheder over 50 m, og området nord for Læsø har generelt mægtigheder over 50 m. Aalborg Bugt gennemskæres af en række begravede dale/kanaler (markeret med lyseblå krydsskravering på Figur 8.7), hvor mægtigheden af de senglaciale lag varierer fra omkring 20 til 40 m og enkelte steder overstiger 50 m. I Kattegattrenden er der mægtigheder på omkring 30 til 40 m. I området umiddelbart øst for Læsø, op mod den svenske grænse, er datatætheden lav og den interpolerede mægtighed er mere usikker her (se Figur 8.6). I hele det nordlige Kattegatområde forekommer shallow gas, og tolkninger i områder med gas er generelt usikre (Laier & Jensen 2007).

De senglaciale sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. I en række områder udgøres sedimenterne dog primært af glacial smeltevandsaflejringer eller senglacialt sand (markeret med lilla krydsskravering på Figur 8.7). En række nedskårne og efterfølgende udfyldte og begravede dale (jf. Sandersen & Jørgensen, 2016) forekommer også i området (markeret med blå krydsskravering på Figur 8.7); her kan dalfyldet være komplekst og af variabel alder og lithologi.



Figur 8.6 Kortet illustrerer, hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 8.7). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



Figur 8.7 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter i det nordlige Kattegat. På kortet er markeret et område, hvor de senglaciale aflejringer primært udgøres af glacielle smeltevandsaflejringer eller senglacielt sand (lilla krydsskravering). Desuden er beliggenheden af større nedskårne, begravede dale, hvor dalfylde kan være komplekst og af variabel alder vist (lyseblå krydsskravering). Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

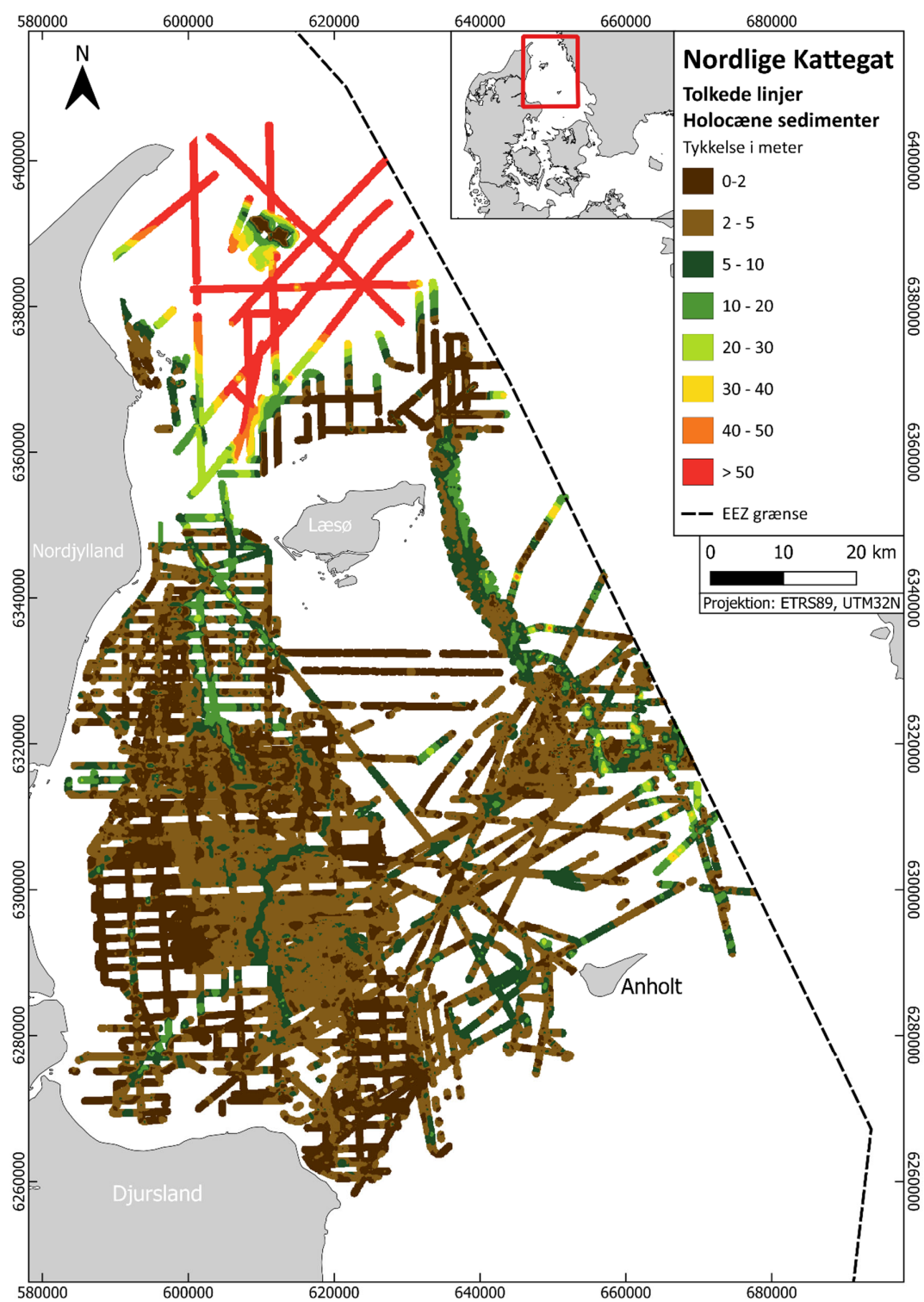
8.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

På Figur 8.8 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 8.9. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med stor forsigtighed.

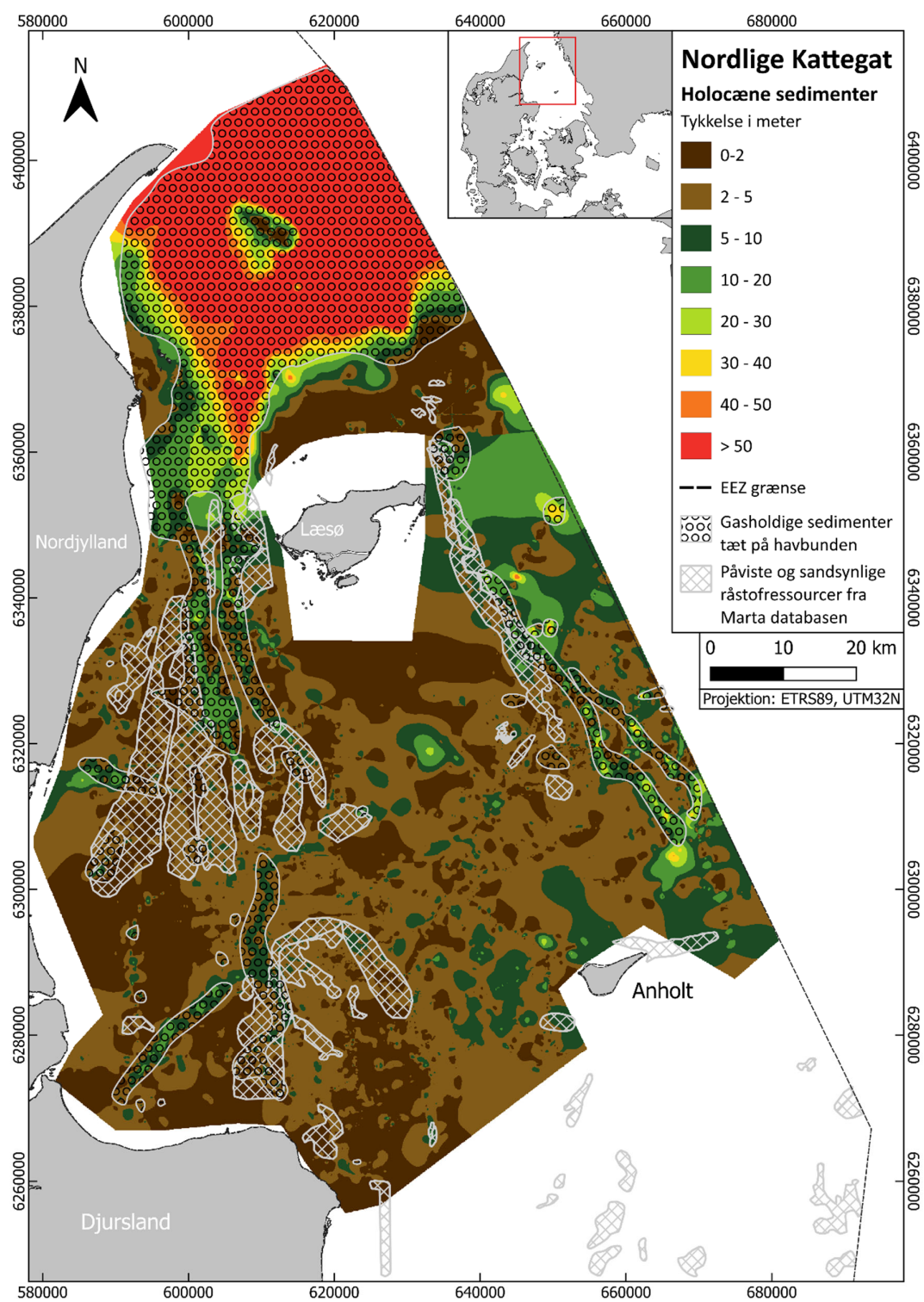
Kortet i Figur 8.9 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien. Tykkelsen af de Holocæne lag varierer i Aalborg Bugt og på platformen Sanden mellem Læsø og Anholt generelt fra 0 til 10 meter. I en række udfyldte kanaler og mindre bassiner, varierer tykkelserne fra omkring 20 til 30 m og enkelte steder forekommer mægtigheder over 30 m. Området nord for Læsø adskiller sig markant fra Aalborg Bugt med meget store mægtigheder på over 50 m af Holocæne sedimenter, bortset fra omkring Herthas Flak, ved kysten ud for Frederikshavn samt umiddelbart nordøst for Læsø (Figur 8.9), hvor det Holocæne dække er tyndt. Store mægtigheder på omkring 20 til 40 m findes også i Kattegattrenden.

I området umiddelbart øst for Læsø, op mod den svenske grænse, er datatætheden lav og den interpolerede mægtighed er usikker (se Figur 8.8). I hele det nordlige Kattegatområde forekommer shallow gas, og tolkninger i områder med gas er usikre.

De Holocæne aflejringer udgøres primært af dyndede, marine lag, men de nederste lag i Aalborg Bugt udgøres af ferskvandsaflejringer med tørvedannelser (Figur 8.5; Lomholt et al., 2017). Langs den østlige kant af platformen Sanden mellem Læsø og Anholt findes et druknet kystsystem, som blev dannet i Tidlig Holocæn, da det relative havniveau var på sit laveste. Her består de Holocæne aflejringer af sand. Enkelte mindre druknede kystsystemer findes også i Aalborg Bugt. Påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering på Figur 8.9. I disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter, og de falder i flere tilfælde sammen med de ovennævnte kystudbygninger samt med morfologisk positive barredannelser i Læsø Rende.



Figur 8.8 Kortet illustrerer, hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 8.9). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



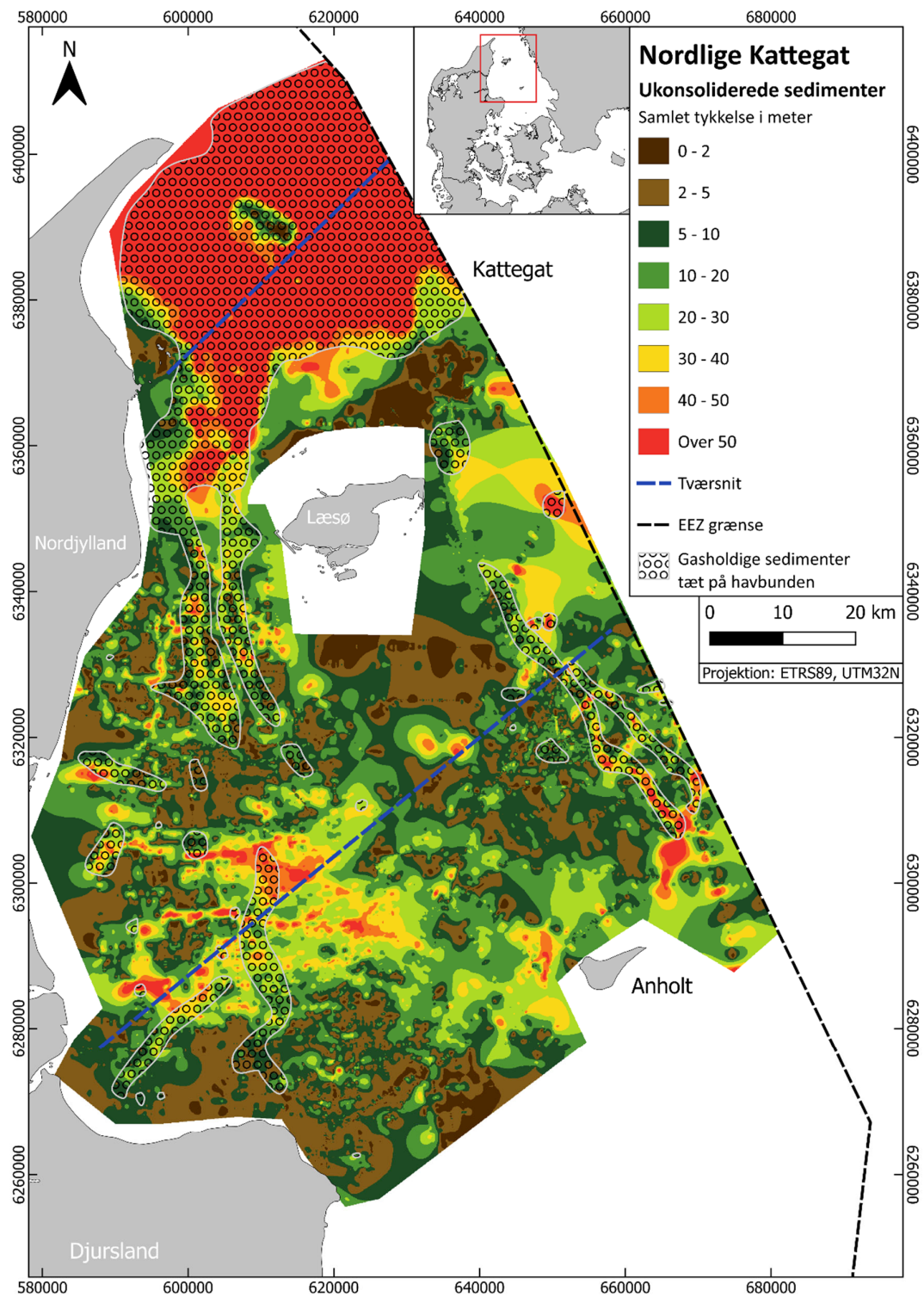
Figur 8.9 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter i det nordlige Kattegat. På kortet er påviste og sandsynlige, sandede ressourcer fra Marta databasen markeret (grå krydsskravering). Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

8.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

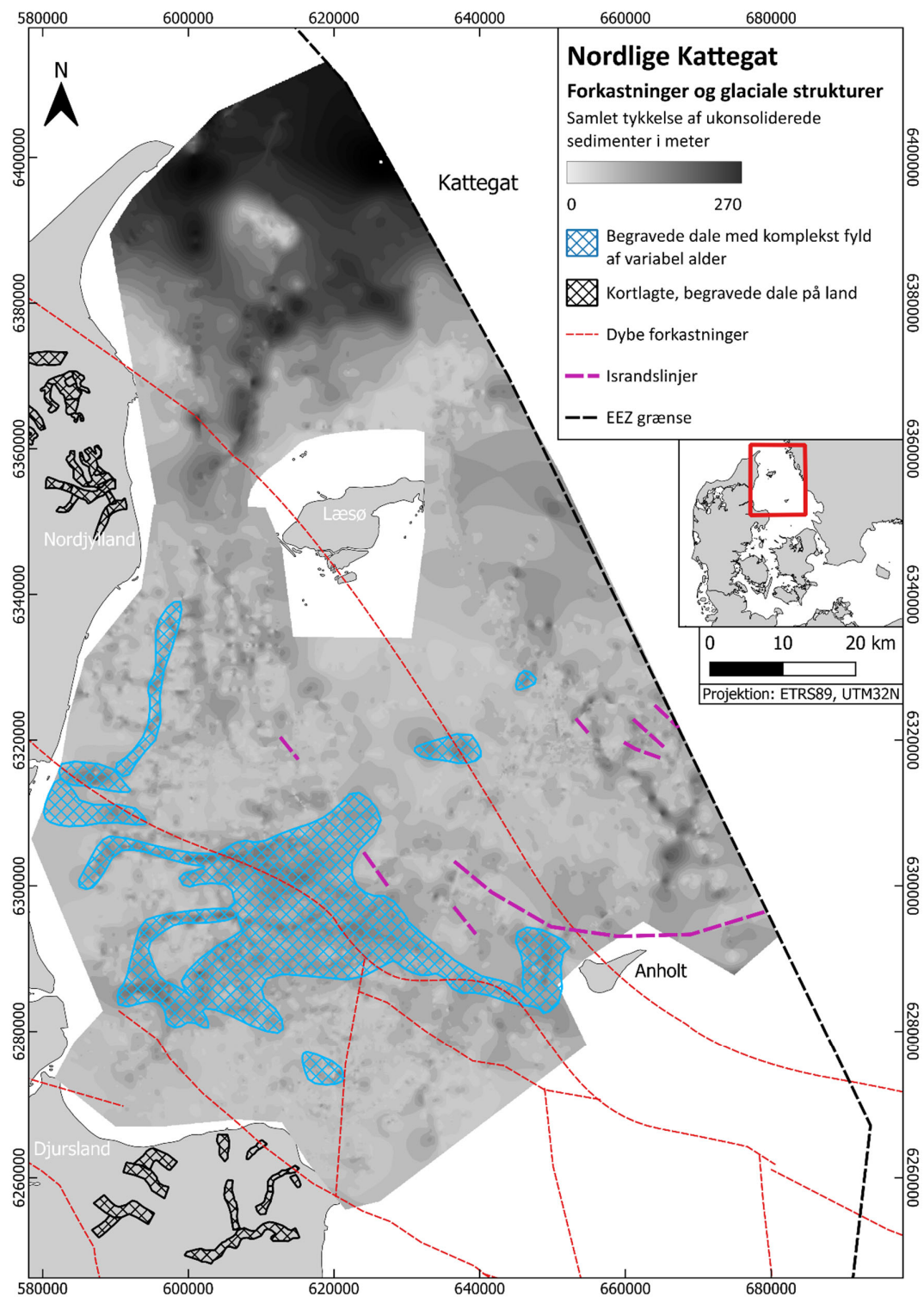
I Figur 8.10 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isdækker, og som overlejrer de ældre, og typisk hårdere, glaciale lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag fra overfladen af de isbelastede og glacialt deformerede lag op til havbunden. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde samt gasfyldte områder som de respektive senglaciale og Holocæne tykkelseskort. Beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 8.4 og Figur 8.5 er angivet på kortet.

Kortet viser mægtigheder fra 0 til 5 m i de kystnære områder (bortset fra langs Grenen i Aalbæk bugt), på platformen Sanden mellem Læsø og Anholt, samt enkelte andre steder. Kanalerne centralt i Aalborg Bugt har mægtigheder fra 20 til over 50 m, området nord for Læsø har generelt mægtigheder over 50 m (bortset fra Herthas Flak, ud for Frederikshavn og umiddelbart nordøst for Læsø) og Kattegattrenden har mægtigheder fra 20 til over 50 m.

I Figur 8.11 er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede linjer (Nielsen, 2003). Områder med nedskårne, begravede dale er vist med blå krydsskravering, og markante israndslinjer tolket i projektet eller kendt fra litteraturen er angivet med lilla, stiplede linjer (jf. Kjær et al. 2003). Kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala. Det ses, at tykkelsesvariationerne i høj grad er styret af større begravede dale og dybe forkastningszoner. Herudover ses øgede tykkelser som er sammenfaldende med nuværende batymetrisk lavtliggende områder, som har været oversvømmet siden senglacial tid og frem til i dag.



Figur 8.10 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i det nordlige Kattegat. På kortet er beliggenheden af de geologiske profiler (Figur 8.4 og Figur 8.5) angivet. Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

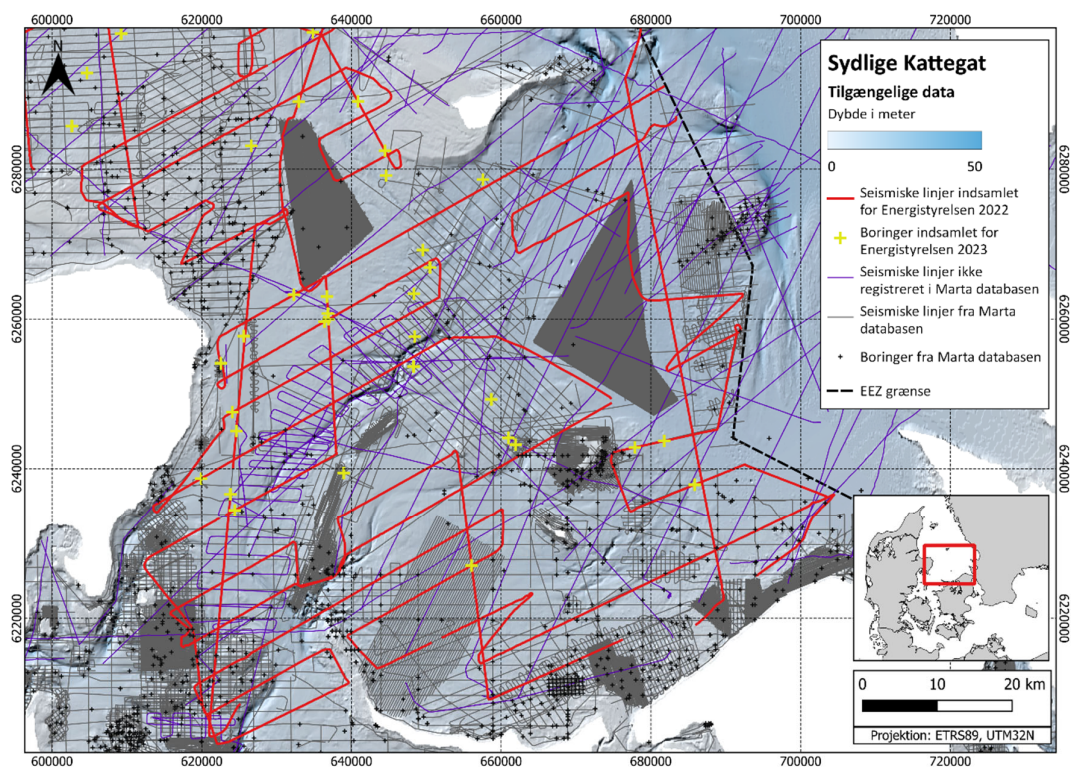


Figur 8.11 Kort med kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003) og områder med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016) samt israndslinjer kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

9. Sydlige Kattegat

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af det sydlige Kattegat. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med et geologisk profil. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciale lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciale lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 9.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i det sydlige Kattegat. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

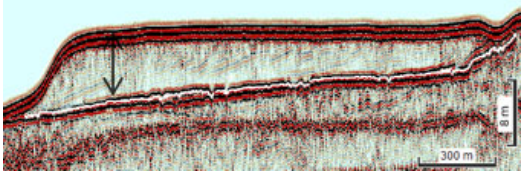
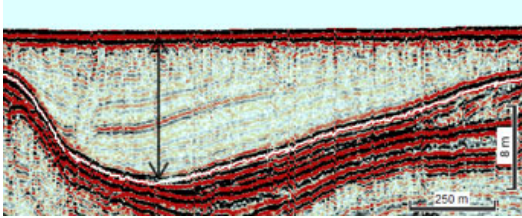
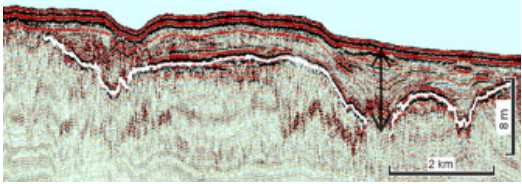
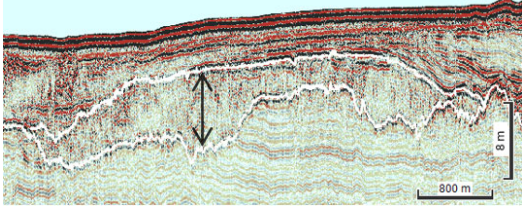


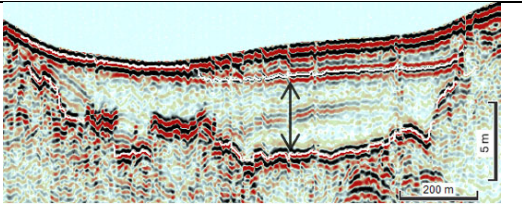
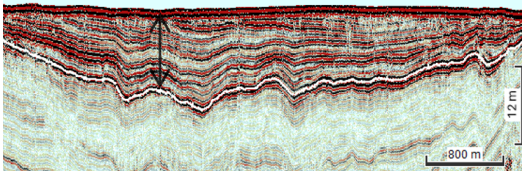
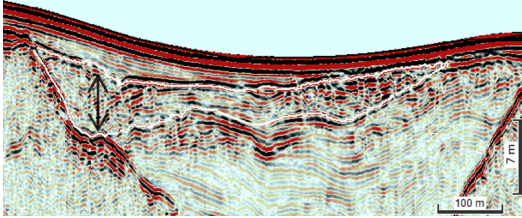
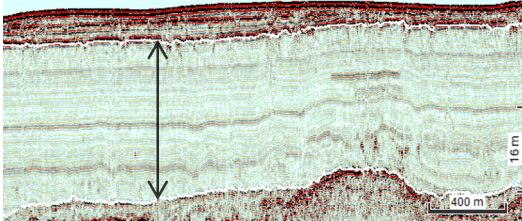
Figur 9.1 Oversigtskort over det sydlige Kattegat. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

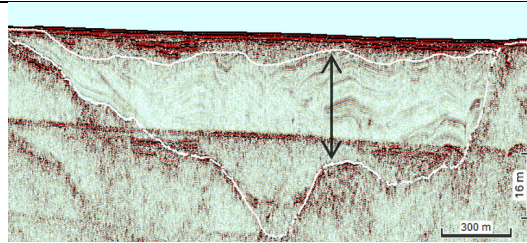
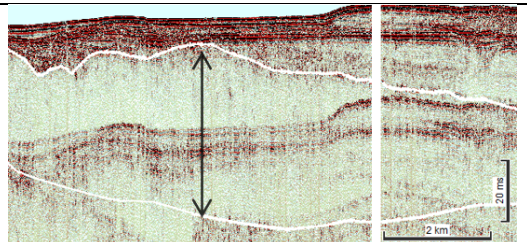
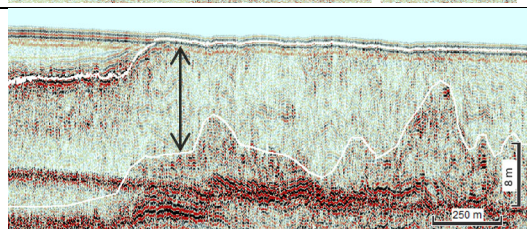
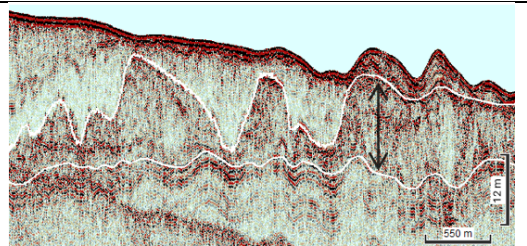
9.1 Seismiske enheder

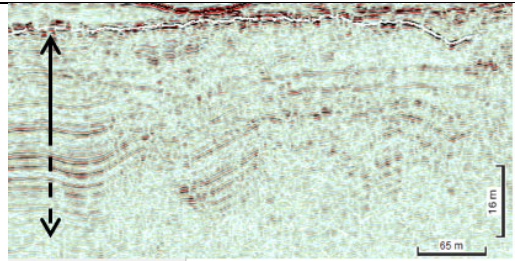
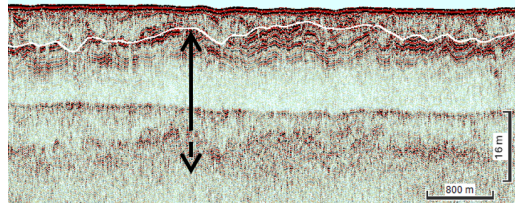
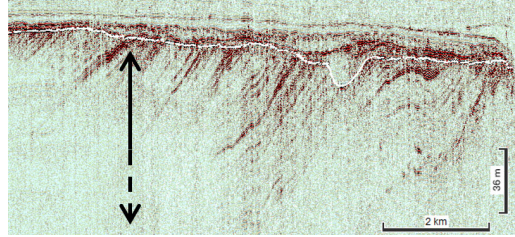
I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 9.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 9.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

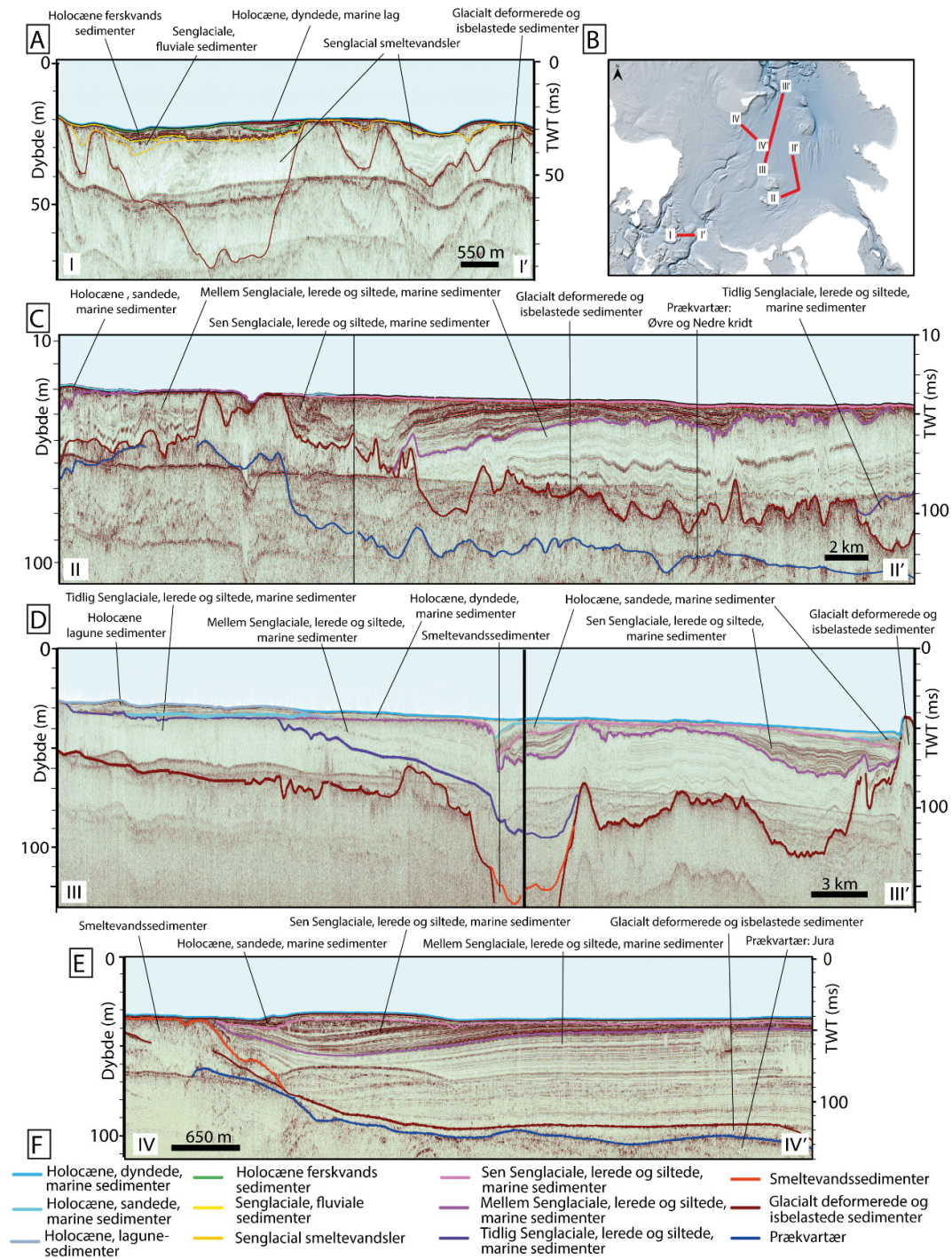
Tabel 9.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Sen til Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer, udbyggende klinoformer. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk.	20	Lokale forekomster. Spredt i hele området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin-/kyst/flakdannelse	
Sen Holocæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallele, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude.	30	Nuværende batymetriske lavninger.	Ler, silt, gyttje og dynd	Marin	
Tidlig Holocæn	Holocæne lagune-sedimenter	Subhorizontale til skråt-stillede downlappende reflektorer. Medium til høj amplitude. Kan fremstå kaotisk.	20	30 km langt og 20 km bredt område mellem Hesselø og Anholt.	Sand med indslag af heterolith, silt og ler	Lagune	
Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Kaotisk seismisk facies. Lav til medium amplitude.	5	Nord-syd orienterede sandbanker ved udmundningen af storebæltskanalen.	Sand	Marin	

Tidlig Holocæn	Holocæne ferskvands-sedimenter	Semi-transparent seismisk facies med få kontinuerlige interne reflektorer. Lav amplitude.	10	Udfyldning i Storebæltskanalen og i Tidlig Holocæn kanal- og flodsystemer i den sydvestlige del af området.	Ler, silt og gytje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale	Lakustrin og fluvial	
Sen senglacial	Senglaciale, lerede og siltede marine sedimenter	Laminerende kontinuerlige interne reflektorer med høj amplitude.	20	25 km lang zone som strækker sig fra ca. 5 til 15 km sydøst for Anholt.	Ler med indslag af silt og finsand	Glaciomarin	
Sen senglacial	Senglaciale, fluviale sedimenter	Kaotisk. Laminerende indslag forekommer. Mellem amplitude.	5	Nedskårne kanaler i den sydvestlige del af området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Fluvial	
Mellem senglacial	Senglaciale, lerede og siltede marine sedimenter	Laminerende kontinuerlige interne reflektorer. Semi-transparent. Lav til mellem amplitude. Top horisont ofte eroderet.	65	35 km langt marint bassin som strækker sig fra ca. 5 til 25 km sydøst for Anholt.	Ler med indslag af silt og finsand	Glaciomarin	

Mellem senglacial	Senglacial smeltevands- ler	Laminerende kontinuerlige og foldede reflektorer. Semi-transparent. Lav til mellem amplitude.	50	Nedskårne kana- ler i den sydvest- lige del af områ- det.	Ler med indslag af silt og fin- sand	Glaciolakustrin	
Tidlig senglacial	Senglaciale lerede og sil- tede marine sedimenter	Transparent til kaotisk seismisk facies. Lav til mellem amplitude.	60	Optræder i en zone som stræk- ker sig i en bue fra 0 til 30 km nord for Lysegrund.	Ler med indslag af silt og fin- sand. Dropsten kan fore- komme	Gletsjer-proxi- mal, glacio-ma- rin	
Glacial	Smeltevands- sedimenter	Kaotisk. Mellem til høj amplitude. Laminerende og transparente indslag kan forekomme.	90	0 til 20 km fra Sjællands Nord- kyst. 20 km bred zone, 5 til 40 km syd for Anholt. Udfyldte begra- vede dale.	Dårligt sor- teret sand og grus	Gletsjer-proxi- mal, fluvial	
Glacial	Glacialt de- formerende og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Høj amplitude. Oftentimes med en ondulerende overflade. Laminerende, foldede og tektoniserede lag kan forekomme.	Ukendt	Hele området.	Moræneler og -sand	Glacial	

Prækvarter	Palæogen	Parallele, foldede og forkastede reflektorer med lav amplitude. Eroderet i toppen. Enkelte steder ses god nedtrængning af den seismiske energi, men det er sjældent.	Ukendt	Syd for Djursland	Plastisk ler og mergel	Marin	
Prækvarter	Øvre kridt og Danien	Parallele, foldede og forkastede reflektorer. Eroderet i toppen. Begrænset nedtrængning.	Ukendt	25 km bred zone fra Djursland til Nordsjælland og i det nordøstlige hjørne af området.	Skrivekridt og kalk	Marin	
Prækvarter	Jura og Nedre kridt	Skråstillede interne reflektorer med høj amplitude. Kan være forkastede og foldede. Eroderet i toppen. Begrænset nedtrængning.	Ukendt	40 km bred zone fra Anholt til Skåne.	Ler- og sandsten	Marin	



Figur 9.2 Eksempler på sparker seismiske data fra det sydlige Kattegat som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil sydøst for Djursland. B) Oversigtskort. C) Seismisk profil nord for Sjælland. D) Seismisk profil sydøst for Anholt. E) Seismisk profil syd for Anholt. F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

9.1.1 Prækvarter strata

Det Prækvarter underlag varierer generelt i lithologi og alder på tværs af det sydlige Kattegat fra nordøst til sydvest. Mod nordøst består Prækvarteroverfladen af skivekridt fra Øvre Kridt og centralt i det sydlige Kattegat af ler- og sandsten fra Jura. Længere mod sydvest bliver det Prækvarter underlag igen successivt yngre og består af ler- og sandsten fra Nedre kridt, skivekridt fra Øvre Kridt, kalk fra Danien og plastisk ler fra Palæogen. Fælles for de Prækvarter aflejringer er, at den øvre grænse er eroderet af de Kvarter is skjolde.

Den store lithologiske variation giver sig også til udtryk i den interne seismiske facies. Ler- og sandstensaflejringer fra Nedre Kridt og Jura har ofte parallelle skråtstillede interne reflektorer med høj amplitude, som i flere tilfælde kan være foldede og forkastede. Kridt og kalkaflejringer fra Øvre Kridt og Danien har en høj-amplitude øvre erosiv grænse, med interne parallelle og foldede reflektorer. De interne reflektorer bliver hurtigt svagere med dybden, da den seismiske energi ikke kan trænge igennem den hårde lithologi. Aflejringerne af plastisk ler fra Palæogen fremstår ofte med mange parallelle, kontinuerlige og foldede reflektorer.

9.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter er til stede i hele det sydlige Kattegat med få og begrænsede undtagelser. Enheden består typisk af moræneler og -sand, men interglaciale og interstadi-ale marine, lakustrine aflejringer og smeltevandssedimenter kan forekomme. Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter, men der kan forekomme laminerede og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende, som illustreret på Figur 9.2 B. I få tilfælde optræder der glacialtektoniske forkastninger i enheden, blandt andet ved Store Midelgrund.

9.1.3 Smeltevandssedimenter

Det er vanskeligt at adskille smeltevandssedimenterne fra de glaciale aflejringer, da begge enheder som regel har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen er typisk ud fra borings-informationer og/eller svage amplitudeændringer. I de tilfælde det har været muligt, er enheden tolket med i den senglaciale enhed, da enheden ikke betragtes som værende isoverskredet. Der er tolket smeltevandssedimenter i en 20 km bred zone som strækker sig fra 5 til 40 km mod syd fra Anholt, 0 til 20 km mod nord fra Sjællands nordkyst og i udfyldte begravede dale.

9.1.4 Senglaciale, lerede og siltede, marine sedimenter

De marine senglaciale sedimenter i det sydlige Kattegat kan underinddeles i tre større seismiske enheder, Tidlig senglacial, Mellem senglacial og Sen senglacial, som alle har en leret og siltet lithologi med indslag af finsand. Trods deres sammenlignelige lithologi udviser de signifikant forskellige seismiske facies, antageligt grundet aflejringsmiljø. De tre enheders beliggenhed i forhold til hinanden er illustreret på Figur 9.2 B, C og D.

Tidlig senglacial

Tidlig senglacial enheden har en transparent intern seismisk facies med få strukturer. I nogle tilfælde kan enheden fremstå kaotisk, og derved forveksles med den glacial enhed. Enheden kan tolkes i en zone som strækker sig i en bue fra 0 til 30 km nord for Lysegrund og har en maksimal tykkelse på 60 m i en Prækvartær depression sydvest for Anholt.

I flere af de sydligste boringer som træffer enheden er der dokumenteret dropsten og marin fauna med *Hiatella arctica*, hvilket antyder et gletsjer-proximalt marint aflejningsmiljø. Kulstof-14 dateringer af enheden viser en alder på ca. 18.200 til 15.500 kal. år BP (Hyttinen et al., 2020; Jensen et al., 2002b) og den yngste datering på 15.310 kal. år BP ses i boring 561123.58 (AS-08), se Figur 9.3.

Mellem senglacial

Mellem senglacial enheden har en semi-transparent seismisk facies bestående af parallelle interne kontinuerlige reflektorer med lav- til mellem amplitude. Enheden er aflejret i et 35 km langt marint bassin som strækker sig fra ca. 5 til 25 km sydøst for Anholt, og har sin maksimale tykkelse i en 65 m dyb depression i den Prækvartære overflade sydvest for Anholt. De interne reflektorer toplapper ofte på den øvre laggrænse, hvilket indikerer at enheden har været eroderet ved et lavt relativt havniveau. Der er ingen kulstof-14 dateringer af enheden, men formodentlig er den aflejret umiddelbart efter Tidlig senglacial enheden eller samtidig med dele af denne.

Sen senglacial

Sen senglacial enheden har en seismisk facies meget lig Mellem senglacial enheden, og adskiller sig kun fra denne, ved en højere amplitude. Derudover on- og downlapper de interne reflektorer på Mellem senglacial enheden, hvilket indikerer at Sen senglacial enheden er aflejret ved et stigende relativt havniveau. Enheden kan tolkes i en 25 km lang zone som strækker sig fra ca. 5 til 15 km sydøst for Anholt, og har en maksimal tykkelse på ca. 20 m, 25 km øst for Anholt. Der er flere kulstof-14 dateringer af enheden og de viser at enheden er aflejret fra 15.000 til 11.700 kal. år BP (Hyttinen et al., 2020; Jensen et al., 2002b). Den ældste datering på 15.064 kal. år BP er fra boring 561116.1 (572003), se Figur 9.3.

9.1.5 Senglacial smeltevandsler og fluviale sedimenter

I den sydvestlige del af det sydlige Kattegat er der aflejret senglacialt smeltevandsler i en række nedskårne kanaler, hvor tykkelsen lokalt kan være op imod 50 m, som vist på Figur 9.2 A. Boringer i området dokumenterer, at sedimenterne har en leret og siltet lithologi (TL enheden i boring 561032.57 (MF-8), se Figur 9.3. I flere tilfælde optræder et tyndt sandlag med en mægtighed på 3-5 m over smeltevandsleret. Sandlaget har en kaotisk seismisk facies, og tolkes som aflejret under fluviale forhold. Der er ingen kulstof-14 dateringer af enheden, men smeltevandsleret er antageligt aflejret samtidig med at den marine Mellem senglacial enhed er aflejret i den nordøstlige del af området. De fluviale sedimenter er antageligt aflejret samtidigt med at den marine Sen senglacial enhed er aflejret i den nordøstlige del af området.

9.1.6 Holocæne, lerede og siltede, ferskvands- og brakvandssedimenter

Det relative havniveau i det sydlige Kattegat i Tidlig Holocæne var relativt lavt, men stigende, fra 11.700 til 9.800 kal. år BP. I den sydvestlige del af området (Figur 9.2 A) og i Storebæltskanalen er der aflejret ferskvands- og brakvandssedimenter i daværende søer og flodsystemer. Enheden har en semi-transparent seismisk facies med interne reflektorer med lav amplitude. Den maksimale tykkelse af sedimenterne er 10 m. Lithologien består typisk af ler, silt og gytje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale (Jensen et al., 2005). Enheden optræder f.eks. i boring 561032.57 (MF-8) som FT, FP og FS, se Figur 9.3.

9.1.7 Tidlig Holocæn, sandede, marine- og lagunesedimenter

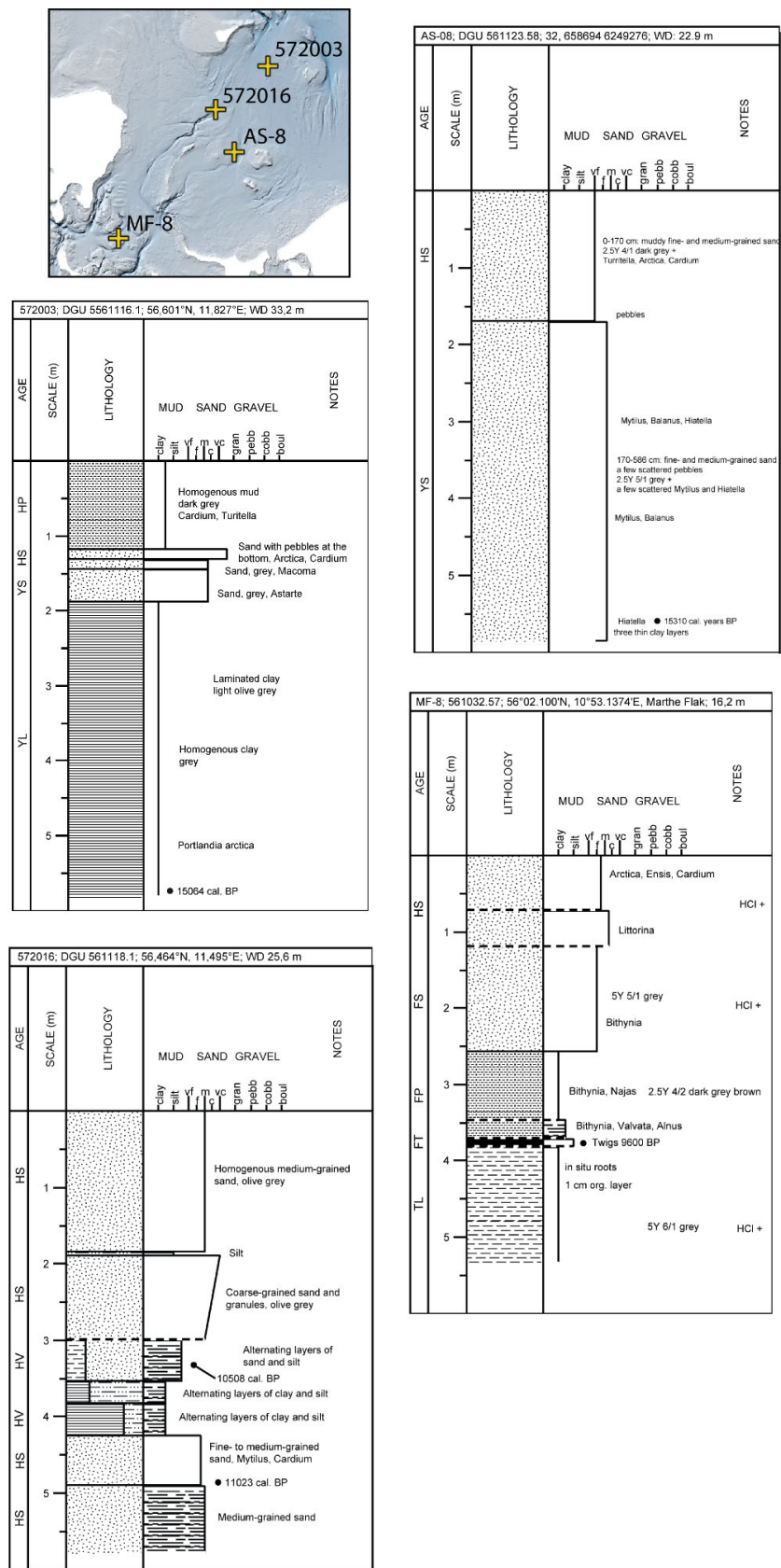
Ved udmundingen af Storebæltskanalen i Kattegat er der dannet nord-syd orienterede sandbanker i Tidlig Holocæn fra 11.700 kal. år BP til 10.800 kal. år BP (nederste HS enhed i boring 561118.1 (572016) i Figur 9.3). Sandbankerne har en transparent til kaotisk seismisk facies, og en tykkelse på maksimalt 5 m. På samme tid blev der dannet en undersøisk barriere 15 til 30 km sydøst for Anholt, som transformerede området til et lagunemiljø fra 10.800 til 9.800 kal. år BP (HV enheden i boring 561118.1 (572016) med en datering på 10.508 kal. år BP i Figur 9.3). Lagunesedimenterne er aflejret i et 30 km langt og 20 km bredt område mellem Hesselø og Anholt ud for Storebæltskanalens udmunding. Lithologien består overvejende af sand med indslag af heterolith, silt og ler. I sedimenterne er der fundet planterester og fossiler af terrestrisk, lakustrin og marin oprindelse (Bennike et al., 2000; Bendixen et al., 2013, 2017b). Enheden har en seismisk facies med subhorisontale til skråtstillede og downlappende interne reflektorer med høj amplitude. Den maksimale tykkelse af sedimenterne er op til 20 m. De sandede marine- og lagunesedimenter ses øverst til venstre på Figur 9.2 C.

9.1.8 Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser

Kyst- og flakaflejringer forekommer lokalt i hele det sydlige Kattegat med en tykkelse på op til 20 m. De kan være aflejret under hele den Holocæne periode, og afspejler et varierende relativt havniveau i perioden. Lithologien vil typisk bestå af mellem- til grovkornet sand med grusede indslag. Enheden har en seismisk facies med interne udbyggende kliniformer med lav- til medium amplitude.

9.1.9 Holocæne, dyndede, marine sedimenter

De Holocæne, dyndede, marine sedimenter er primært aflejret i Sen Holocæn under et højt relativt havniveau der tilnærmelsesvis minder om det nuværende i det sydlige Kattegat. De største tykkelser af enheden findes i nuværende batymetriske lavninger med maksimale tykkelser på op til 30 m. Lithologien består overvejende af marint ler, silt, gytje og dynd. Enheden har en lamineret seismisk facies med interne reflektorer med mellem- til lav amplitude, men transparente indslag kan forekomme.



Figur 9.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området.

9.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

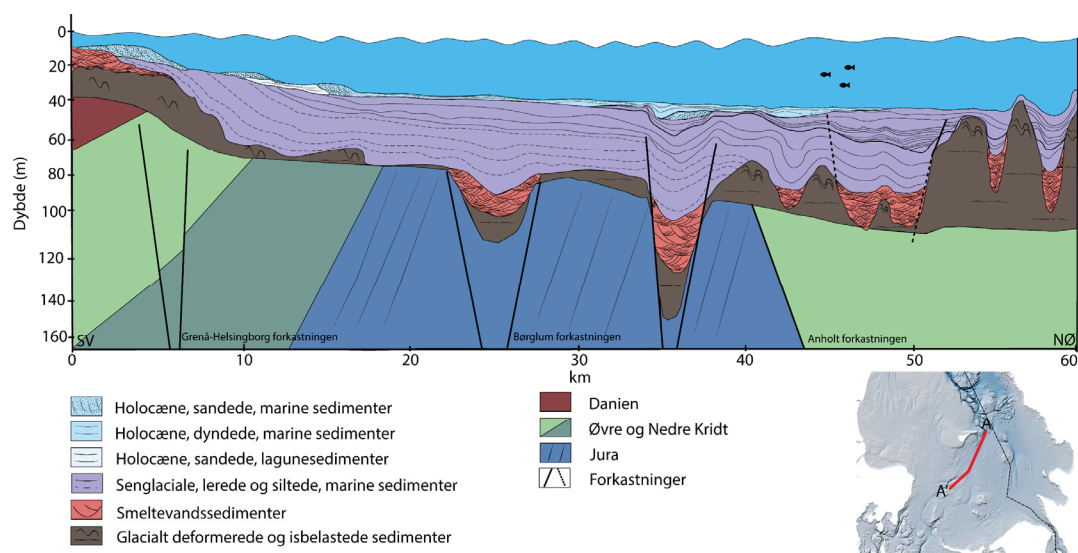
På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Kattegat, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for det sydlige Kattegat. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med det geologiske profil i Figur 9.4. Placeringen af profilet er vist på Figur 9.9.

De nederste blå, grønne og rustrøde lag på Figur 9.4 repræsenterer Prækvarter aflejringer som mod nordøst består af skrivekridt fra Øvre Kridt og centralt af ler- og sandsten fra Jura og som mod sydvest bliver successivt yngre og består af ler- og sandsten fra Nedre kridt, skrivekridt fra Øvre Kridt og kalk fra Danien. Det overlejrende, brune lag repræsenterer en serie af ældre glacielle lag til og med lag fra sidste istid, Weichsel, som har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Lagene består i det sydlige Kattegat formentlig hovedsageligt af moræner, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglacielle og interstadiale sedimenter. De røde lag repræsenterer sandede smeltevandsaflejringer, formentlig fra den seneste istid, Weichsel.

Det tykke, lilla, tværgående lag repræsenterer senglacielle, lerede, marine sedimenter aflejret fra omkring 18.200 til 11.700 BP og svarer til de tre tidlige, mellem og sen senglacielle enheder beskrevet i afsnit 9.1.4. Den seismiske enhed beskrevet som senglacial smeltevandsler og fluviale sedimenter i afsnit 9.1.5 er ikke repræsenteret på profilet. De øgede mægtigheder af de senglacielle sedimenter centralt og til højre på profilet skyldes forkastningsbetinget indsynkning under aflejringen omkring f.eks. Børglum og Anholt forkastningerne.

I forbindelse med det lave relative havniveau i Tidlig Holocæn blev der eroderet kanaler i de senglacielle aflejringer. De tidligste Holocæne (lyseblå) udfyldninger af kanalerne, da det relative havniveau igen begyndte at stige, består af sandede aflejringer (markeret med skrå intern signatur centralt på profilet). I de mere lavvandede områder blev der dannet et lagunemiljø med aflejring af sandede sedimenter, repræsenteret af det lyseste lyseblå lag.

Under den fortsatte havspejlsstigning blev der efterfølgende aflejret overvejende finkornede Holocæne sedimenter repræsenteret ved de lyseblå lag med horisontal lagdeling, mens de lyseblå lag med skrålejringer til venstre i profilet repræsenterer Holocæne kystudbygninger.



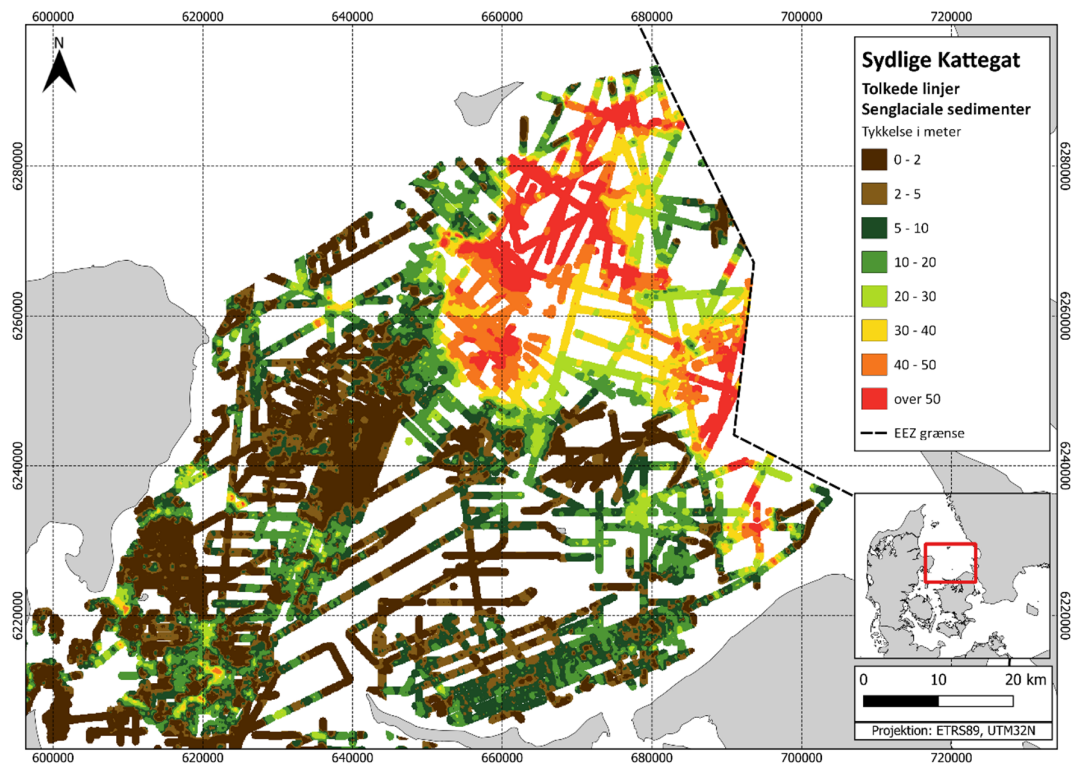
Figur 9.4 Konceptuel geologisk model for det sydlige Kattegat. Placeringen af profilet er vist på Figur 9.9.

9.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

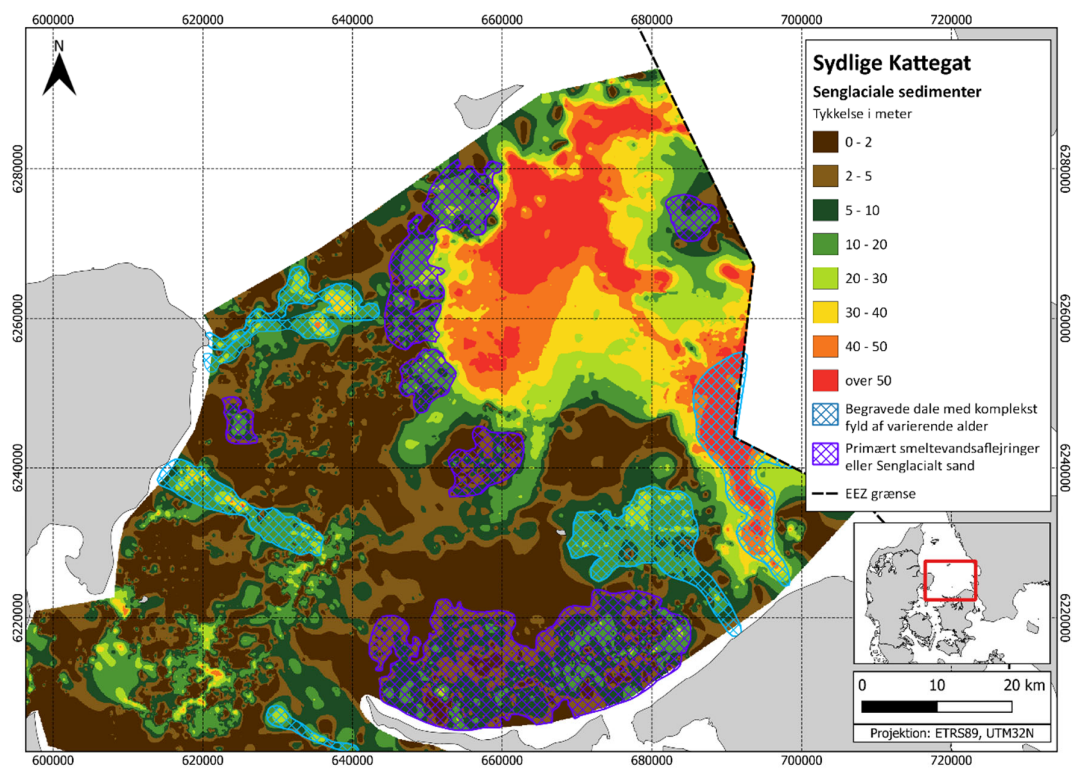
På Figur 9.5 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 9.6. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 9.6 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacialle aflejringer. I den sydvestlige del af området varierer tykkelsen fra 0-5 m. Området gennemskæres dog af en række udfyldte kanaler og mindre bassiner, hvor tykkelsen varierer fra 5-20 m, og enkelte steder er mægtigheden helt op til 30, 40 eller 50 m. Disse områder er dels sammenfaldende med eksisterende, batymetriske lavninger og/eller repræsenterer palæofloder og -dræningssystemer, der var aktive i senglacial tid. I den nordøstlige del af området ses et større bassin, hvor tykkelsen er 30-50 m og i de centrale dele over 50 m. Den forøgede tykkelse i dette område er styret af et større forcastningssystem (markeret med grøn krydsskravering på Figur 9.10), som var aktivt før og under aflejringen af de senglaciale sedimenter. Forkastningssystemet ledte til indsynkning i det specifikke område, hvilket gav plads til mere sediment (Jensen et al., 2002a).

De senglaciale sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. I en række områder udgøres sedimenterne dog primært af glacialle smeltevandssedimenter eller senglacialt sand (markeret med lilla krydsskravering på Figur 9.6). En række nedskårne og efterfølgende udfyldte og begravede dale forekommer også i området (markeret med blå krydsskravering på Figur 9.6) og her kan dalfyldet være komplekst og af varierende alder og lithologi.



Figur 9.5 Kortet illustrerer hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 9.6) og dermed, hvor usikkerheden er størst.



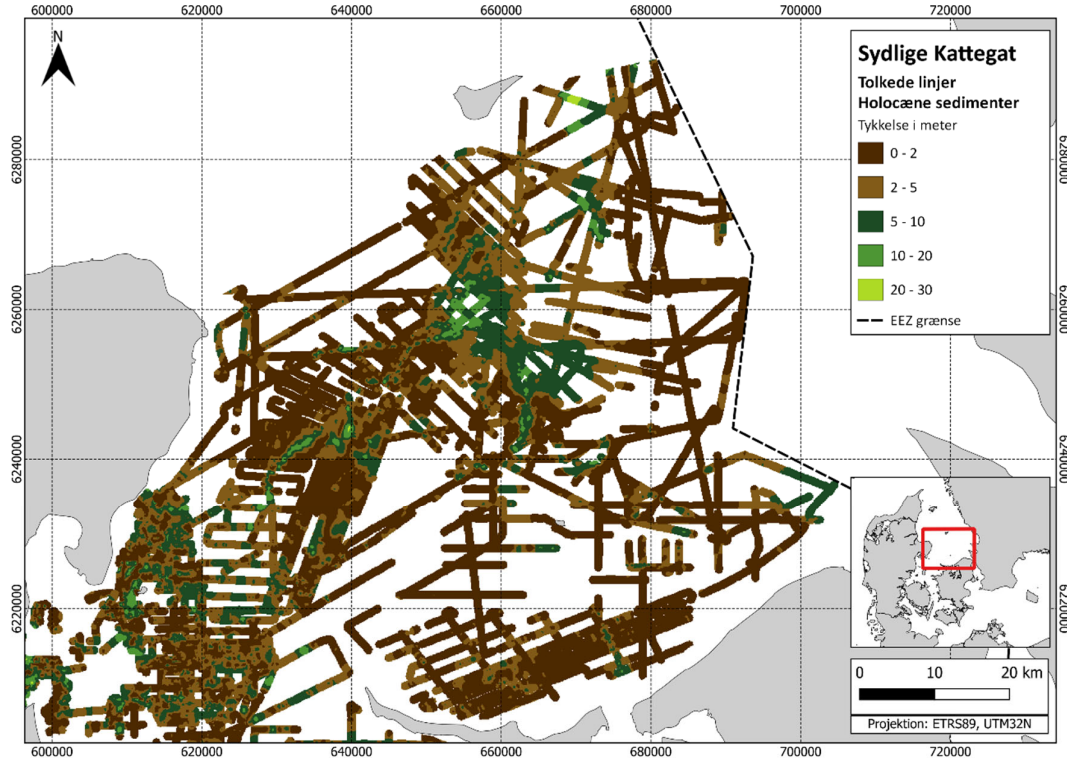
Figur 9.6 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter. På kortet er markeret større områder hvor de senglaciale aflejringer primært udgøres af glacielle smeltevandssaflejringer eller senglaciale sand (lilla krydsskravering). Desuden er vist beliggenheden af større nedskårne, begravede dale, hvor dalfyldt kan være komplekst og af varierende alder (blå krydsskravering).

9.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

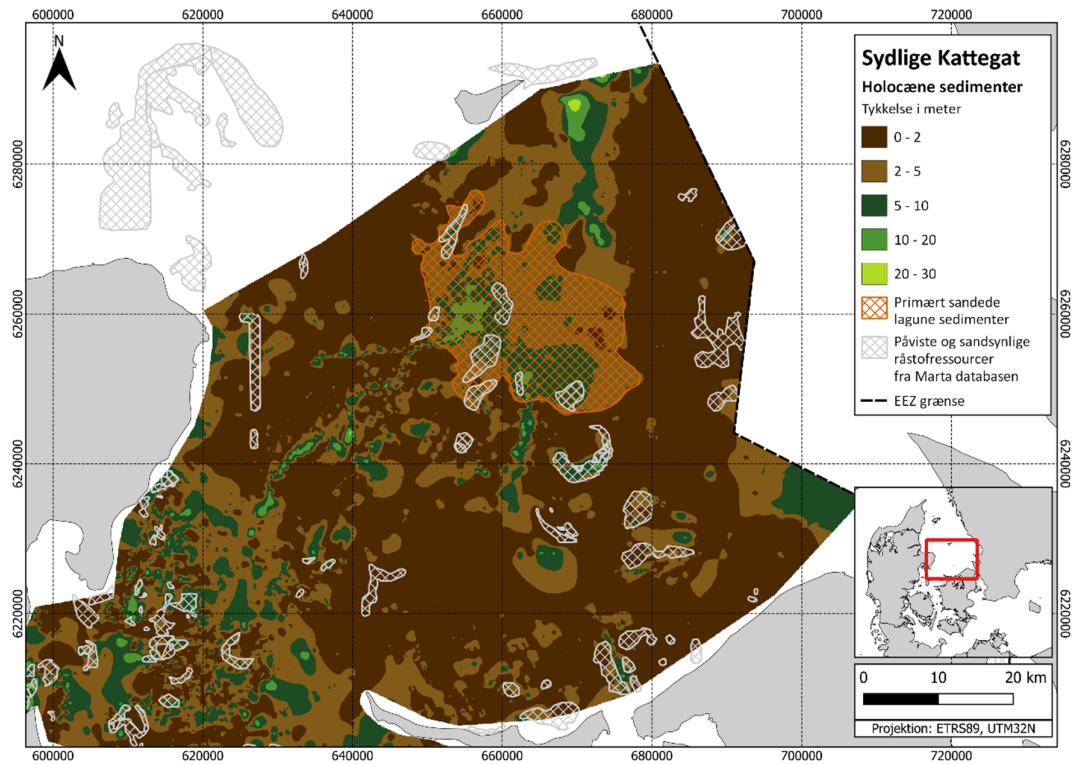
På Figur 9.7 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 9.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 9.8 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien over de senglaciale sedimenter. Tykkelsen varierer generelt fra 0 til 5 meter, men i en række spredte, udfyldte kanaler og mindre bassiner, er tykkelserne 5-20 m og enkelte steder helt op til 30 m. Kanalerne er ofte sammenfaldende med nuværende batymetriske lavninger. Omkring 10 km øst for Anholt er tykkelsen af de Holocæne sedimenter op til 30 m, og den forøgede tykkelse i dette område er, ligesom for de senglaciale aflejringer, styret af indsynkning i forbindelse med et større forkastningssystem (markeret med grøn krydsskravering på Figur 9.10).

De Holocæne sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. I et større område ca. 30 km syd for Anholt, består de Holocæne aflejringer dog primært af sandede lagunesedimenter (markeret med orange krydsskravering på Figur 9.8), som blev aflejret tidligt i Holocæn (10.500 til 9.500 BP). Herudover er påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen markeret med grå krydsskravering på Figur 9.8. I disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter.



Figur 9.7 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 9.8) og dermed, hvor usikkerheden er størst.

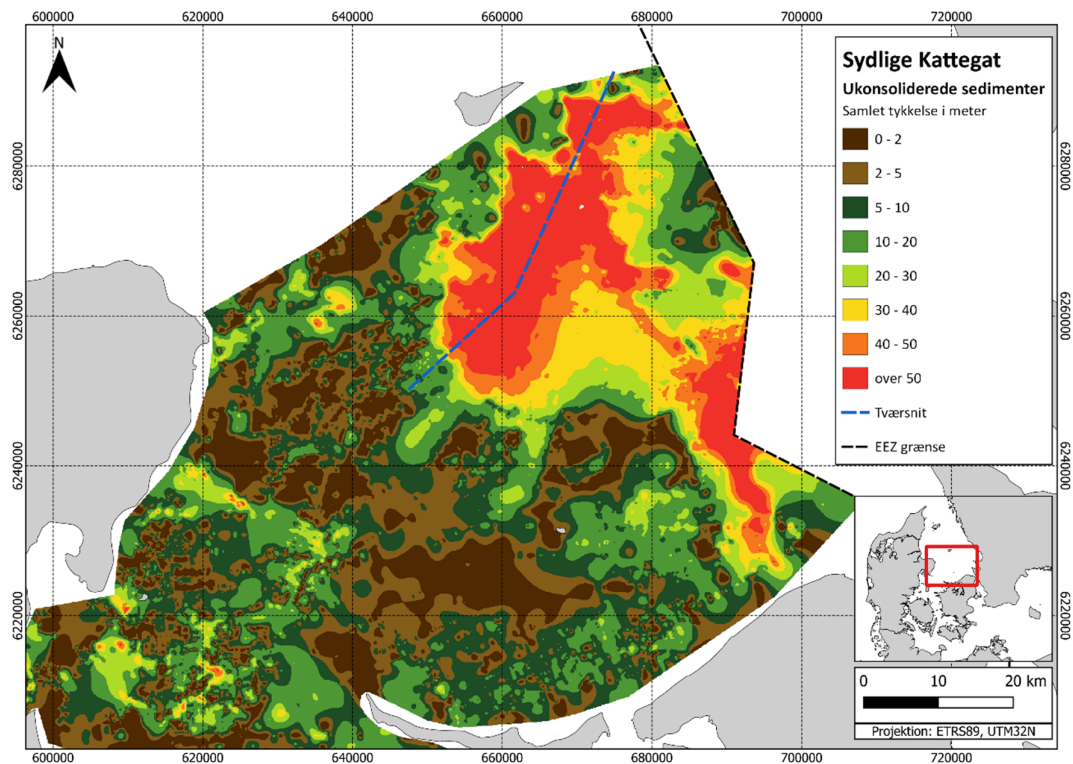


Figur 9.8 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. På kortet er markeret et større område, hvor de Holocæne aflejringer primært udgøres af sandede lagunesedimenter (orange krydsskravering). Desuden er påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen markeret (grå krydsskravering).

9.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

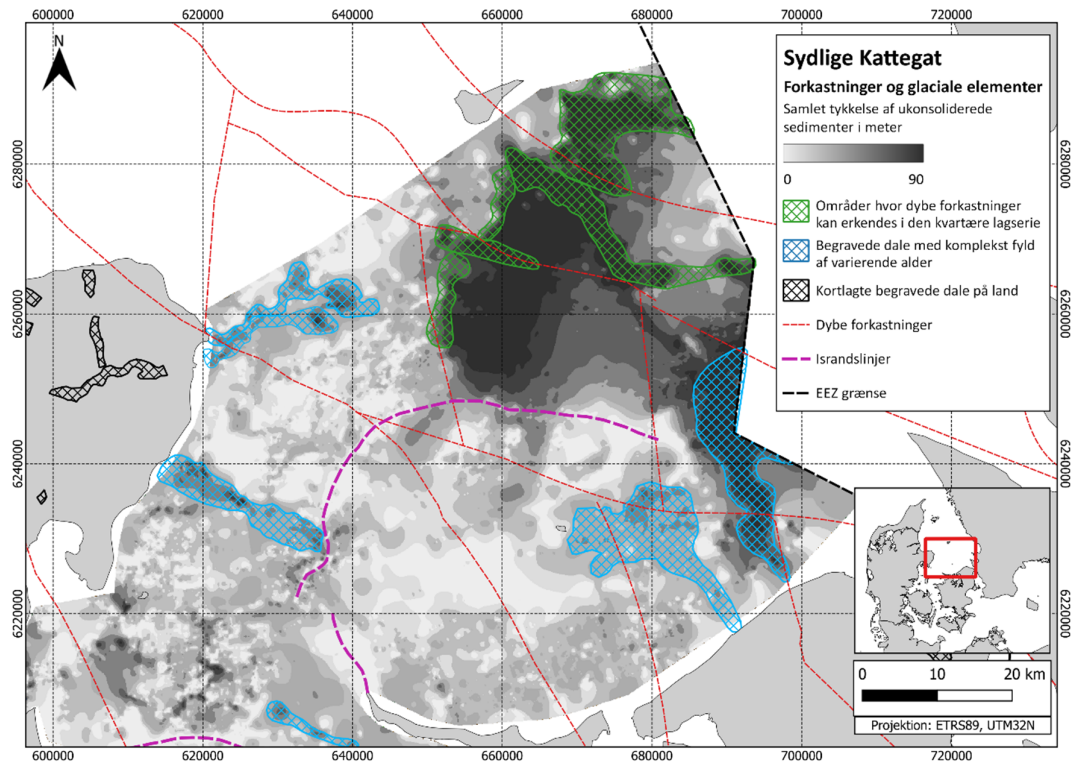
I Figur 9.9 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjalde og som overlejrer de ældre, og typisk mere hårde, glaciæle lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciæle og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de glaciæle moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglaciæle og Holocæne tykkelseskort.

Kortet (Figur 9.9) viser et centralt område med tykkelser fra 0-5 m og et område sydvest herfor, som præges af udfyldte kanaler og bassiner med tykkelser fra 5-20 m og flere steder med mægtigheder helt op til 30, 40 og 50 m. Mod nordøst ses tykkelser fra 30-50 m, og centralt i den nordøstlige del ses tykkelser over 50 m. Beliggenheden af det geologiske profil i Figur 9.4 er desuden vist på kortet.



Figur 9.9 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af det geologiske profil (Figur 9.4) angivet.

I Figur 9.10 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Områder hvor forkastninger kan erkendes i den Kvartære lagserie er vist med grøn krydsskravering (nærværende arbejde; Jensen et al., 2002a). Områder med nedskårne, begravede dale er vist med blå krydsskravering, og markante israndslinjer tolket i projektet eller kendt fra litteraturen er angivet med lilla, stiplede streg (Kjær et al., 2003). Kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala. Det ses, at tykkelsesvariationerne i høj grad er styret af større begravede dale og forkastningszoner. Herudover ses øgede tykkelser som er sammenfaldende med nuværende batymetriske lavninger, som har været oversvømmet siden senglacial tid og frem til i dag.

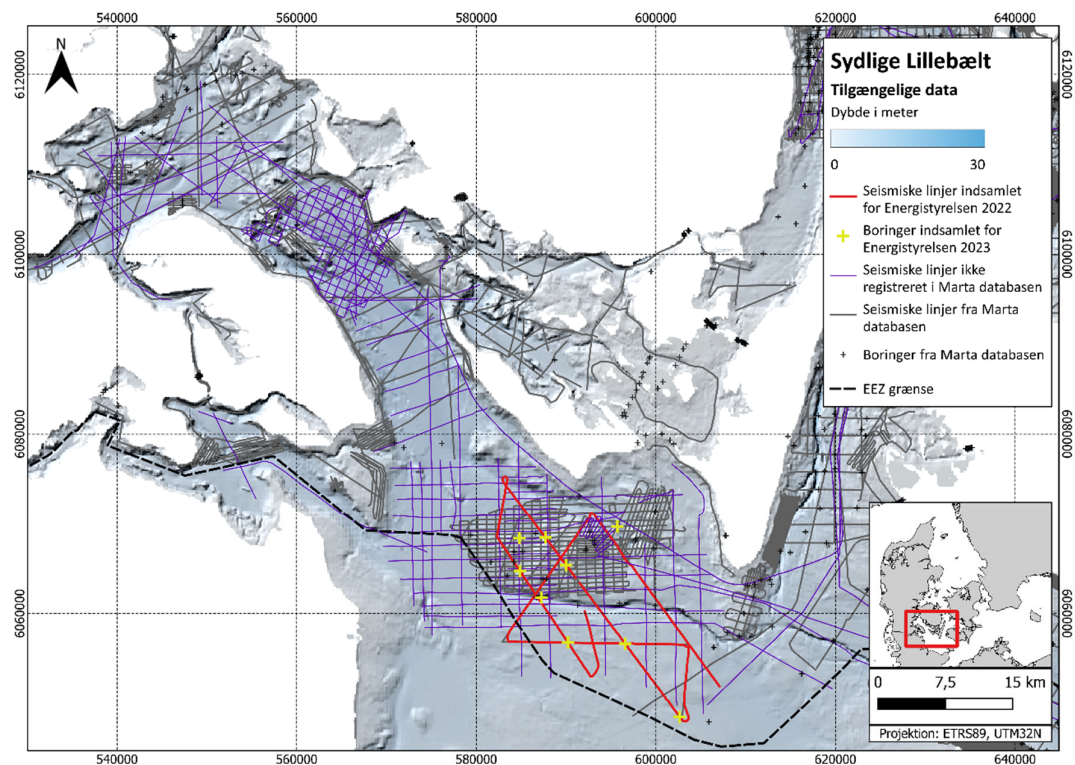


Figur 9.10 Kort med kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003) og områder hvor forkastninger kan erkendes i den Kvartære lagserie (Jensen et al., 2002a). Desuden ses områder med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016) og israndslinjer kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

10. Sydlige Lillebælt

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af det sydlige Lillebælt. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciala lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciala lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 10.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i det sydlige Lillebælt. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

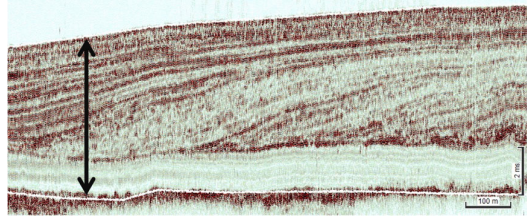
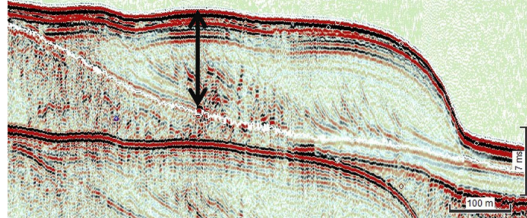
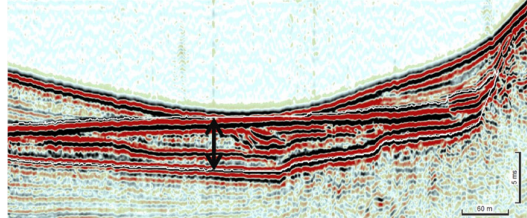


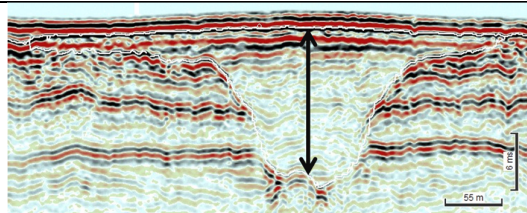
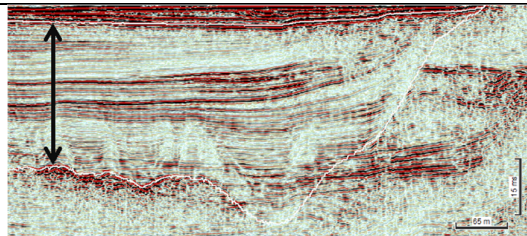
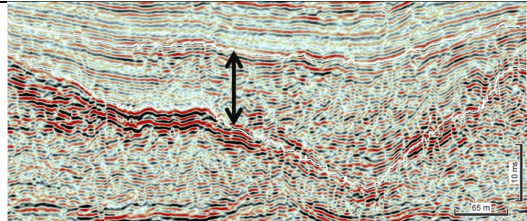
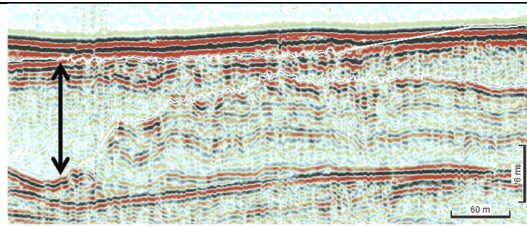
Figur 10.1 Oversigtskort over det sydlige Lillebælt. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

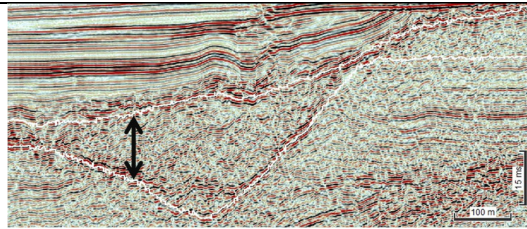
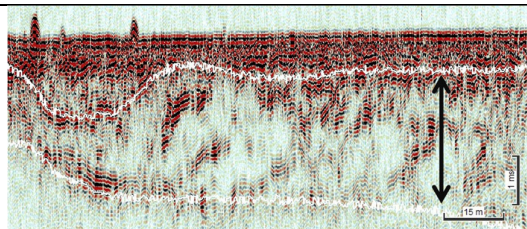
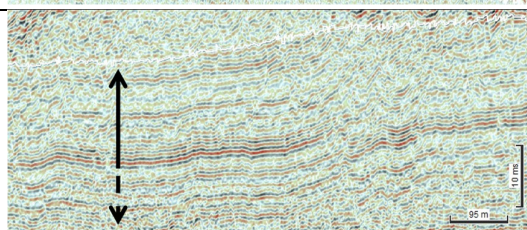
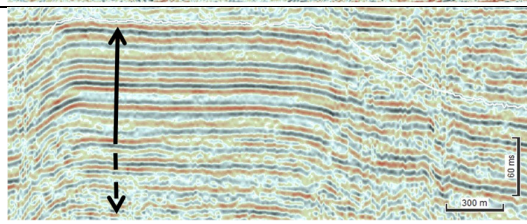
10.1 Seismiske enheder

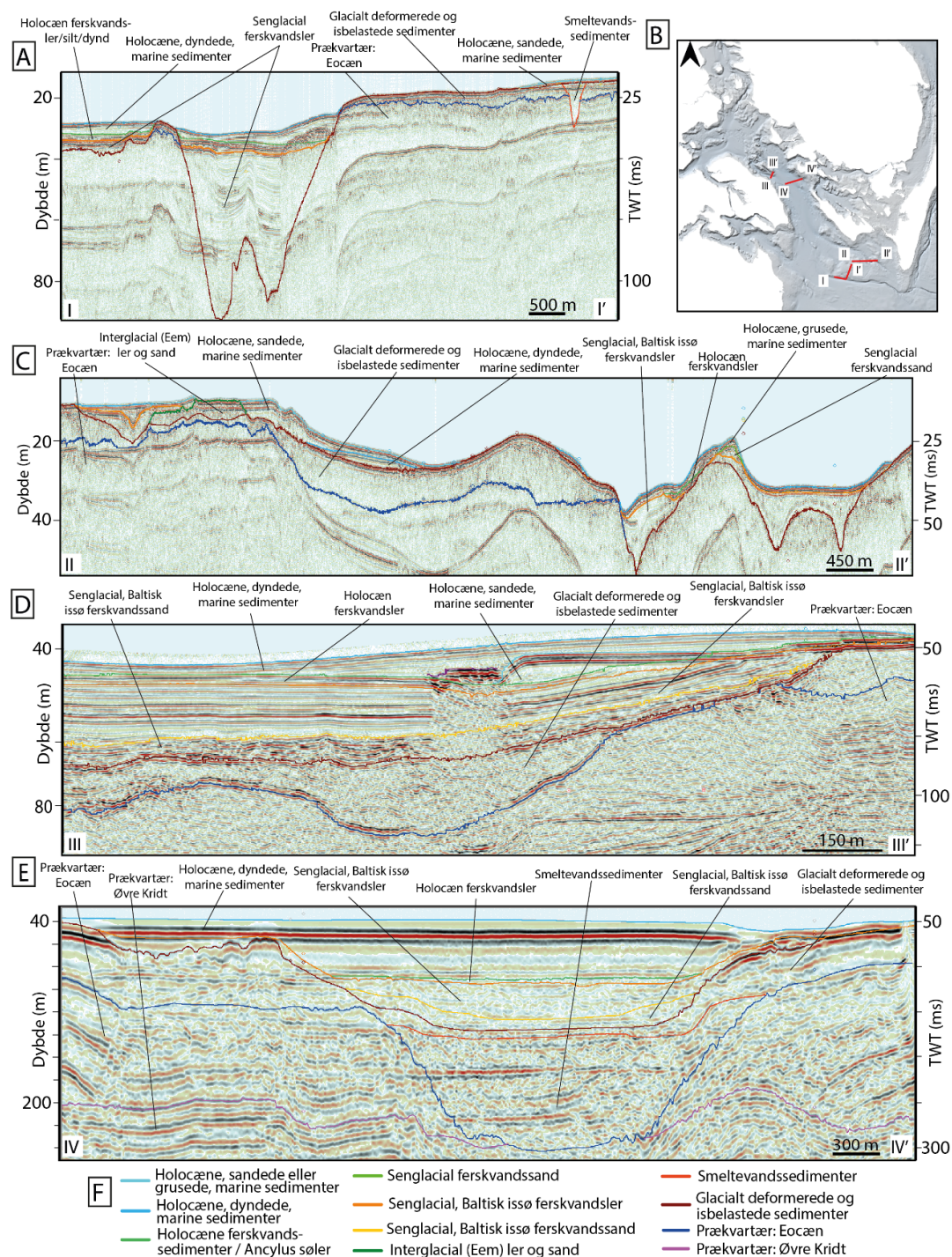
I det følgende beskrives de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 10.1 vises en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies. I Figur 10.2 gives fire udvalgte seismiske eksempler, som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området.

Tabel 10.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Sen Holocæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude.	50	Størstedelen af området i batymetriske lavninger.	Gytje og dynd	Marin	
Sen til Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer, udbyggende klinoformer. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk	15	Lokale forekomster, spredt i området.	Sand (mellem- til grovkornet, kan være gruset)	Marin-/kyst/flakdannelser	
Tidlig Holocæn	Holocæne ferskvands-sedimenter	Høj amplitude ved øvre og nedre afgrænsning med kontinuerlige interne reflektorer.	5	Udfyldning i kanalsystemerne i området.	Ler, silt og gytje med indslag af tørv og terestrisk plantemateriale	Lakustrin og fluvial	

Sen senglacial	Senglaciale, ferskvands-sedimenter	Kaotisk. Laminerende indslag forekommer. Mellem amplitude.	13	Nedskårne kanaler og spredte mindre positive former tæt på havbunden i de mere lavvandede områder.	Sand, fin-til mellemkornet, kan være gruset lokalt	Fluvial	
Mellem og sen senglacial	Senglaciale smeltevandssedimenter og issøler	Laminerende kontinuerlige og forkastede reflektorer. Semi-transparent. Lav til mellem amplitude.	55	Nedskårne kanaler i store dele af området.	Ler med indslag af silt og finsand	Lakustrin	
Tidlig senglacial	Senglaciale sandede til siltede smeltevandssedimenter	Transparent til kaotisk seismisk facies. Mellem amplitude.	55	Optræder mellem Als og Fyn i de dybe kanaler.	Sand der gradvist bliver mere siltet og leret opefter	Fluvial og lakustrin	
Glacial	Smeltevandssedimenter	Kaotisk. Mellem til høj amplitude. Transparente indslag forekommer stedvist.	17	Spredte mindre forekomster ved Vejsnæs Flak. Udfyldt begravet dal syd for Lyø.	Dårligt sorteret sand og grus	Gletsjer-proximal, fluvial	

Glacial	Glacialt de-formerede og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Høj amplitude. Ofte med en ondulerende overflade. Laminerende, foldede og tektoniserede lag kan forekomme.	Ukendt	Hele området.	Moræneler og -sand	Glacial	
Interglacial	Glacialt de-formerede og isbelastede interglaciale og interstadi-ale sedimenter	Kaotisk. Glacio-tektoniseret enhed med folder og forkastninger.	5 m	Meget begrænset område ca. 8 km syd for sydspidsen af Ærø.	Sand og hårdt ler	Fersk/marin	
Prækvarter	Palæogen	Parallele, foldede og forkastede reflektorer. Eroderet i toppen. Stedvis god nedtrængning af den seismiske energi.	Ukendt	8 km bred og 20 km lang zone syd for Ærø. 11 km lang zone langs østkysten af Als.	Plastisk ler og mergel	Marin	
Prækvarter	Øvre kridt og Danien	Parallele, foldede og forkastede reflektorer. Stedvist eroderet i toppen. Kun seismisk nedtrængning i dybe Airgun data.	Ukendt	Kortlagt mellem Als og Fyn.	Skrivekridt og kalk	Marin	



Figur 10.2 Eksempler på seismiske data fra det sydlige Lillebælt som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Sparker seismisk profil syd for Ærø (SV-NØ). B) Oversigtskort. C) Sparker seismisk profil Syd for Ærø (V-Ø). D) Sparker seismisk profil nord for Als (N-S). E) Airgun seismisk profil mellem Als og Fyn (SV-NØ). F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

10.1.1 Prækvartære strata

I det sydlige Lillebælt består de øverste Prækvartære sedimenter af Palæogen plastisk ler og mergel. I området fremstår aflejringerne fra Palæogen med mange parallelle, foldede og forkastede interne reflektorer. Den øvre grænse af de Prækvartære sedimenter er eroderet af de Kvartære isskjolde og aflejringerne er påvirkede af glacialtektonik.

I dybere airgun seismiske data i området har det været muligt at identificere toppen af kalken ved korrelation med den dybe boring 551029.16 (M0059), der viser kridt/kalk i 169 meters dybde (Figur 10.4). Kridt og kalkaflejringerne har en høj-amplitude øvre grænse, der stedvist er eroderet, med interne parallelle og foldede reflektorer (Figur 10.2 E).

10.1.2 Interglaciale sedimenter

Der er kortlagt interglaciale sedimenter i et begrænset område syd for Ærø, hvor glacialtektonik har flyttet interglacialt ferskvandssand og marint ler tæt på havbunden, med et tyndt dæklag af recent sand (Figur 10.2 C). Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter med transparente indslag. Stedvist kan glacialtektoniske strukturer genkendes i enheden. Det har udelukkende været muligt at udskille enheden fra de glacialt deformerede og isbelastede sedimenter ud fra boring 541006.5 (R7_002), der har gennemboret omkring 5 m af enheden (Figur 10.3).

10.1.3 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter er til stede i hele det sydlige Lillebælt med varierende tykkelse. Enheden består typisk af moræneler og -sand, men smeltevandsaflejringer samt interglaciale marine og lakustrine aflejringer kan forekomme. Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter med høj amplitude (Figur 10.2 D). Der kan forekomme laminerede og transparente indslag i enheden. Den nedre grænse er erosiv og den øvre er ondulerende. Der er generelt begrænset nedtrængning af det seismiske signal i enheden.

10.1.4 Glaciale smeltevandssedimenter

Der er tolket spredte glaciale smeltevandssedimenter af mindre omfang i Vejsnæs Flak området (Figur 10.2 A) og en tyk sekvens i en begravet dal syd for Lyø. Enheden er kortlagt i depressioner i den underliggende enhed. Det er vanskeligt at adskille smeltevandsaflejringerne fra de glaciale aflejringer, da begge enheder som regel har en kaotisk intern seismisk facies med mellem til høj amplitude. Stedvist kan smeltevandssedimenterne have transparente indslag. Adskillelsen af smeltevandssedimenterne er typisk sket ud fra boringsinformationer. Hvor enheden er udskilt, er den for det meste taget med i den senglaciale enhed, da enheden ikke betragtes som værende isoverskredet. Undtagelsen herfra er den tykke sekvens af smeltevandssedimenter i den begravede dal syd for Lyø (Figur 10.2 E). Disse sedimenter er overlejret af moræneler og er derfor ikke taget med i den senglaciale enhed.

10.1.5 Senglaciale, sandede ferskvandssedimenter

De sandede ferskvandssedimenter er aflejret i tidlig senglacial. De er kortlagt mellem Als og Fyn, hvor enheden i de dybere kanaler/lavninger kommer op på en tykkelse på 55 m. I områder hvor den underliggende moræne ligger højt, tynder enheden ud. De ældre senglaciale sedimenters akustiske signatur er overvejende kaotisk med mellem amplitude, men kan stedvist være mere transparent (Figur 10.2 D).

Refleksionsmønstret indikerer, at sedimenterne er grovere end de mellem og sen senglaciale aflejringer. Dette er dokumenteret i boring 551029.16 (M0059), hvor der er boret gennem 10 m proglacialt smeltevandssand, med siltede og lerede indslag (Figur 10.4). Der kan forventes en høj grad af kornstørrelsesmæssige variationer såvel horisontalt som vertikalt indenfor enheden på grund af skiftende aflejningsforhold i den tidlige senglaciale periode. Det forventes, at overgangen fra denne enhed til den mellem og sen senglaciale enhed er gradvis, og at enheden derfor bliver mere finkornet opetter.

Det har ikke altid været muligt at adskille denne enhed fra den mellem og sen senglaciale enhed. Dette skyldes i særdeleshed, at der er gas i lavningerne, hvor enheden findes. Gasen optræder, hvor der er tykkere lag af Holocænt gytje og dynd. Det har derfor kun været muligt at adskille enheden i de højopløselige data mellem Als og Fyn. Det formodes dog, at enheden også er til stede i bunden af de dybere kanaler i resten af områder.

10.1.6 Senglacial, Baltisk Issøler

De mellem og sen senglaciale aflejringer har større udbredelse i området end de tidlige senglaciale aflejringer. De udfylder lavninger og kanaler i hele området fra den nordligste del af det sydlige Lillebælt til Langeland. Enheden har en maksimal tykkelse på 55 m i den dybe begravede dal syd for Lyø.

Sedimenternes akustiske signatur er semi-transparent og præget af parallelle laminerede reflektorer, der konformt overlejrer den isbelastede flade og udfylder bassinet (Figur 10.2 A og C). Enheden har generelt lav til mellem amplitude, med enkelte høj-amplitude reflektorer (Figur 10.2 D). Det interne refleksionsmønster indikerer, at de yngre senglaciale sedimenter består af ler og reflektorerne med høj amplitude kan skyldes et højere indhold af organisk materiale. I boring 551029.16/M0059 er der boret gennem 30,5 m opad-finende lamineret issøler (Figur 10.4). Enheden indeholder dropsten og i boringen beskrives det, at de nederste 13 m af enheden er is-proximal, mens de øverste 17,5 m er is-distal. Enhedens øvre grænse er jævn og boring 551029.16 (M0059) samt uplappende reflektorer set enkelte steder i området antyder, at den øvre grænse er erosiv (Figur 10.2 D).

Baseret på boringer, enhedens seismiske karakter og dens konforme udtryk tolkes enheden som sedimenter aflejret i den Baltiske Issø efter isens overordnede tilbagetrækning i slutningen af sidste istid.

10.1.7 Sen senglacial ferskvandssedimenter

I den sydlige del af Vejsnæs Flak området er der aflejret senglacialt smeltevandssand i en nedskåret kanal med en maksimal tykkelse på 13 m. Boring 541010.22 syd for Ærø dokumenterer, at kanaludfyldningen består af overvejende finkornet sand. Kanaludfyldningen har en kaotisk seismisk facies med lav amplitude (Tabel 10.1).

I de mere lavvandede områder af det sydlige Lillebælt ses desuden mindre lokale senglaciale forekomster, som danner positive former (Figur 10.2 C). Disse er mere grovkornede end kanaludfyldningen og kan indeholde grus og sten (boring 550931.2 (TRS-02), Figur 10.3). Enhedens seismiske facies er kaotisk til svagt lagdelt og har højere amplitude end kanaludfyldningen.

10.1.8 Tidlig Holocæn, lerede og siltede, ferskvandssedimenter

Holocæne ferskvandssedimenter er identificeret i flere af borerne i det sydlige Lillebælt, hovedsageligt i batymetriske lavninger i den senglaciale overflade. Aflejringerne stammer fra søer og flodsystemer under det relativt lave vandniveau i Tidlig Holocæn. Seismisk ses enheden som et tyndt bånd af let ondulerende, parallelle reflektorer med høj amplitude. Båndet kan være op til 5 m tykt. Den høje amplitude skyldes formentlig, at enheden ofte indeholder organisk materiale, se boring 541011.6 (R7_004) og 550931.2 (TRS-02) i Figur 10.3.

Boringerne i enheden viser, at den er meget varierende og både består af tørv, gytje, sand, silt og ler. I en af borerne beskrives det, at enheden indeholder brakvandssedimenter (boring 541010.23 syd for Ærø).

10.1.9 Holocæne, sandede, marine sedimenter

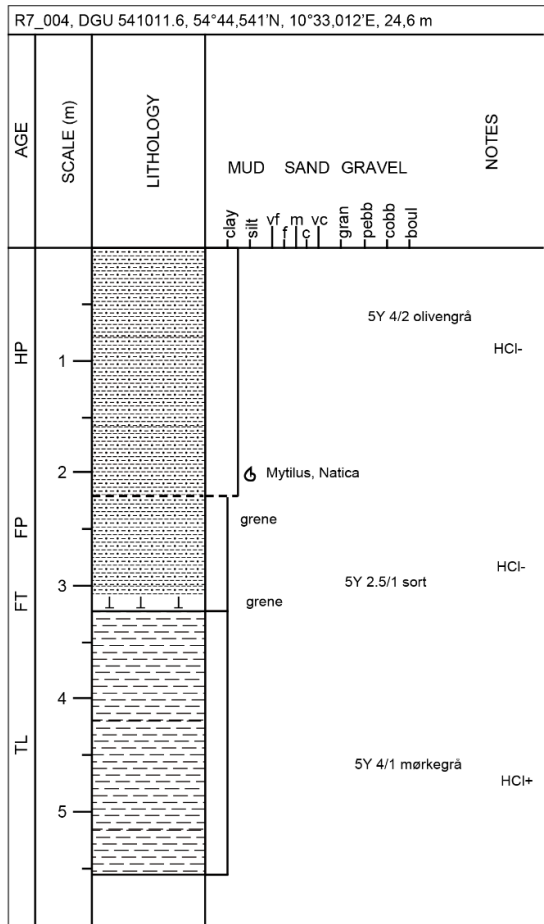
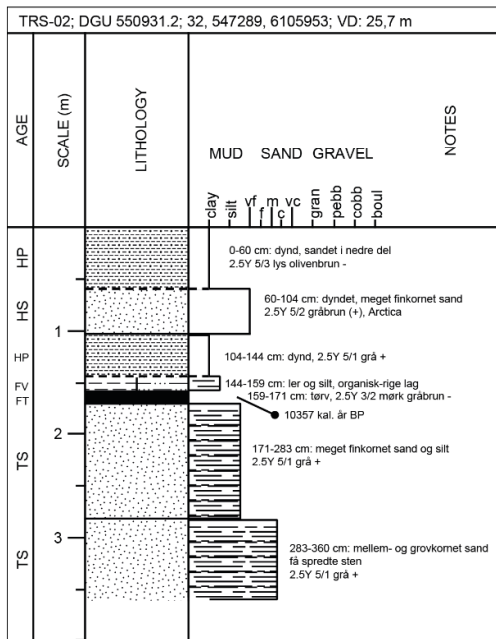
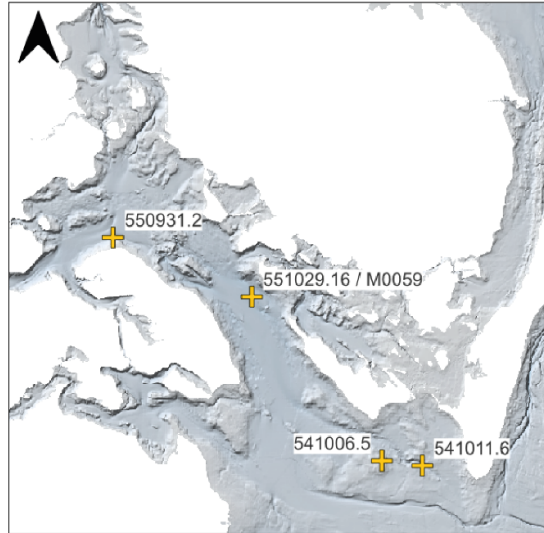
Holocæne, sandede, marine sedimenter findes flere steder i området. De optræder i form af kyst- og flakaflejringer som lokale forekomster, der ligger spredt i det sydlige Lillebælt med en tykkelse på op til 15 m (Figur 10.2 C og D). De kan være aflejret under hele den Holocæne periode, og afspejler et varierende relativt havniveau. Lithologien består typisk af mellem- til grovkornet sand med grusede indslag (f.eks. boring 541010.28 syd for Ærø). Enheden har en seismisk facies med interne udbyggende kliniformer med lav- til medium amplitude (Tabel 10.1) og stedvist kan enheden være mere kaotisk af udseende.

I de lavvandede dele af det sydlige Lillebælt viser borerne ofte et lag af recent marint sand eller grus, der er aflejret direkte ovenpå de glacialt deformerede og isbelastede sedimenter. Disse enheder har et mere kaotisk internt reflektionsmønster og tykkelsen er ofte under 1 m med en maksimal tykkelse på 4 m.

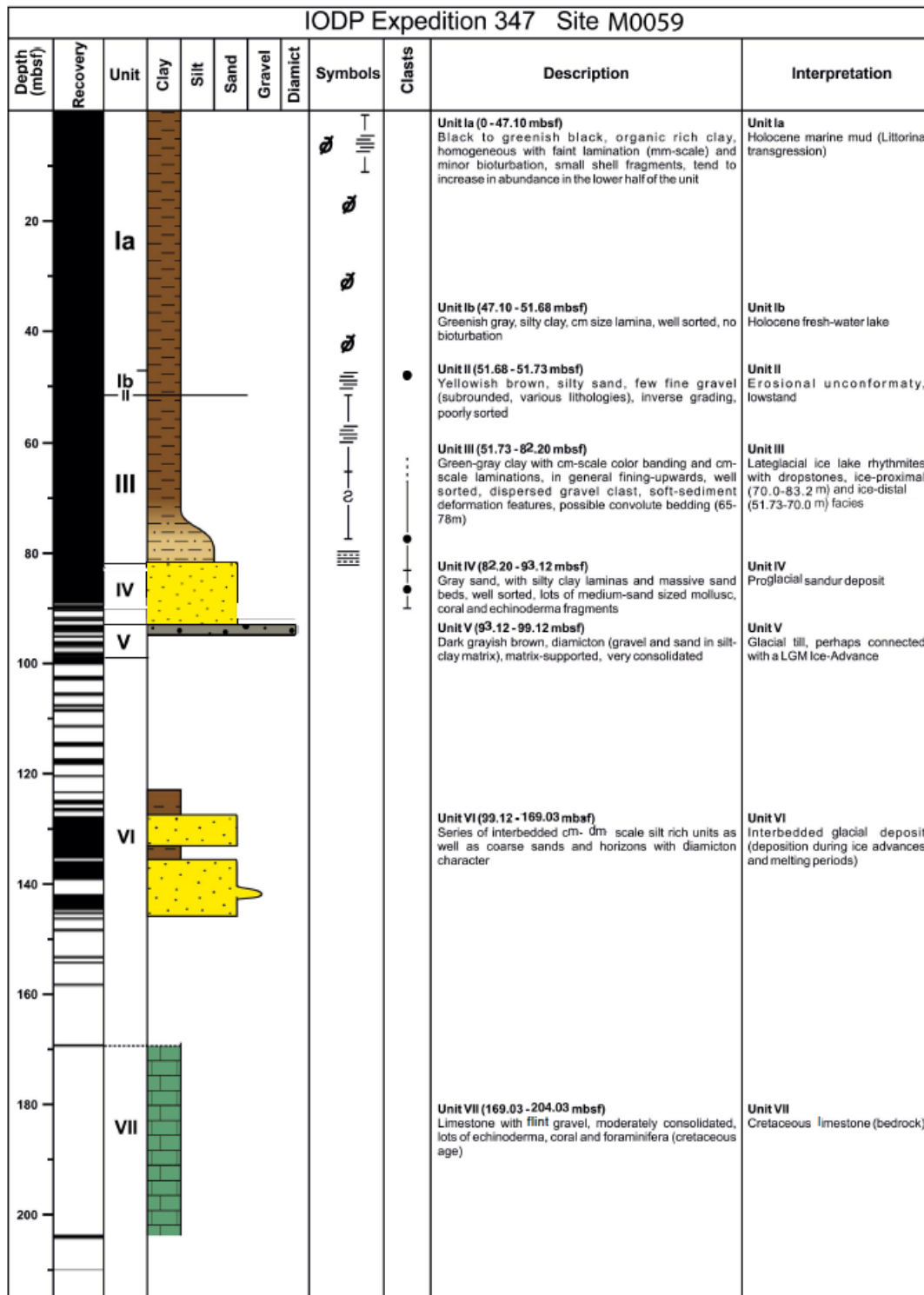
10.1.10 Holocæne, dyndede, marine sedimenter

Der er kortlagt en enhed af Holocænt dynd i store dele af det sydlige Lillebælt i batymetriske lavninger. Enheden overlejrer de Holocæne ferskvandssedimenter og de senglaciale lerede

R7_02, DGU 541006.5, 54°45,059'N, 10°26,615'E, 8,8 m							
AGE	SCALE (m)	LITHOLOGY	MUD	SAND	GRAVEL		NOTES
			-clay -silt vf f m c vc	gran pebb	cobb boul	Mya	
HS							HCl(+)
QL							
1							
IS							
QL							
2							
3							
IS							
4							
5							



GEUS



Figur 10.4 Sedimentologisk log for IODP-boring M0059 (DGU 551029.16). Fra Andrén et al. (2015).

Enheden er præget af parallelle kontinuerede interne reflektorer med mellem- til lav amplitude og transparente indslag kan forekomme (Tabel 10.1). Enheden har en skarp nedre grænse og den øvre er den nuværende havbund. Den seismiske signatur og boringerne i området indikerer, at den primære lithologi er marin gyttje og dynd, men stedvist kan enheden være

mere siltet eller leret. De Holocæne, dyndede, marine sedimenter er primært aflejret i Sen Holocæn under et højt relativt havniveau, der minder om det nuværende.

10.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Lillebælt området, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for det sydlige Lillebælt. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med et nordligt og et sydligt geologisk profil i Figur 10.5. Placeringen af profilerne er vist på Figur 10.10.

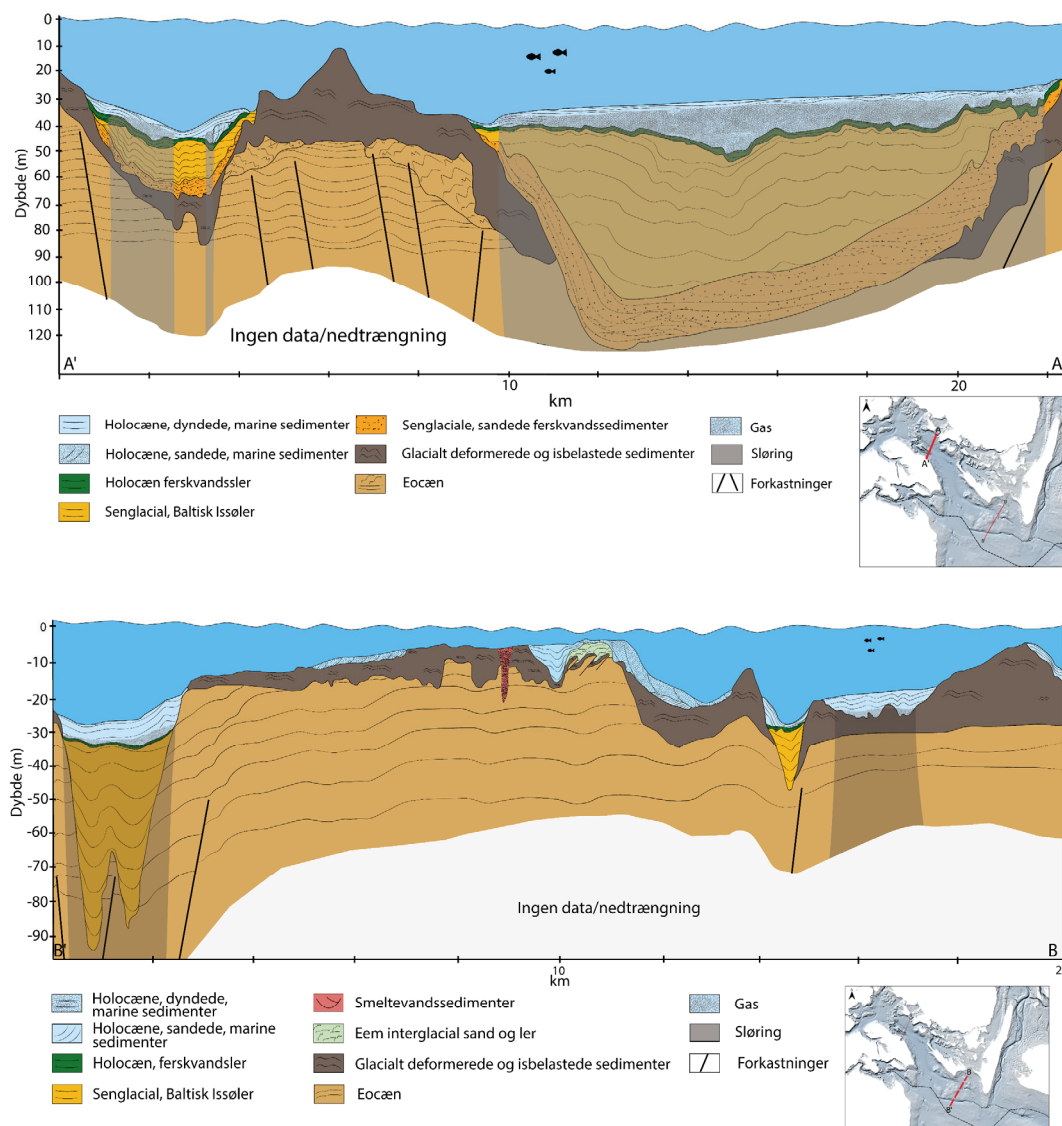
På de to profiler består de Prækvartære aflejringer af Lillebæltssler fra Eocæn (nederste lysebrune lag). De øverste dele af de Eocæne aflejringer er ofte glacialt deformerede, hvilket ses som foldninger og dislokationer. Der er også fundet flere dybere forkastninger der har gennemskåret aflejringerne, sandsynligvis grundet salt diapirisme i området.

På begge profiler overlejres de Prækvartære lag af en serie af ældre glaciale aflejringer til og med lag fra sidste istid, Weichsel (markeret med mørkebrun farve), som har været overskredet af et eller flere isskjalde og forventes at være overkonsoliderede og som kan være glacialt deformerede. Lagene består formentlig hovedsageligt af moræner, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglaciale sedimenter. Både den nedre og den øvre afgrænsning af de glaciale lag har stedvist et meget uregelmæssigt relief og på det nordlige profil ses en markant ryg med højtliggende glaciale aflejringer.

I forbindelse med afsmeltningen af den sidste is eroderede smeltevandet dybe kanaler i Lillebælt området. Disse holdes i et vist omfang stadig åbne af stærk strøm, men er også delvist udfyldte af senglaciale og Holocæne sedimenter. De mørke orange og relativt tykke orange lag over de glaciale sedimenter på det nordlige profil er tolket som henholdsvis senglacialt sand og senglacialt ler. Aflejringerne udfylder en mindre og en stor nedskåret kanal i de Prækvartære aflejringer som formentlig repræsenterer nogle af de store sø- og dræningssystemer, der blev dannet af smeltevandet. De senglaciale aflejringer tolkes således at være afsat i en gren af den Baltiske Issø (Bennike & Jensen, 2011). Det dybtliggende senglaciale sand er tolket på baggrund af det interne seismiske refleksionsmønster i enheden og er desuden beskrevet i en dyb IODP-boring, som senglacialt ferskvandsand. Det senglaciale ler draperes af et tyndt lag af Holocænt ferskvandsler markeret med grøn og som overlejres af et relativt tykt lag af marine Holocæne dyndede aflejringer (lyseblå med horisontal lagdeling). Øverst i den sydlige mindre kanal ses en mindre udbygning af Holocæn sand (lyseblå med skråtstillede lag) som formentlig repræsenterer en kystudbygning fra Tidlig Holocæn. Store

dele af området med tykke Holocæne aflejringer er præget af gas i sedimenterne (markeret med boblesignatur på profilet) og de tolkede tykkelser er mere usikre her.

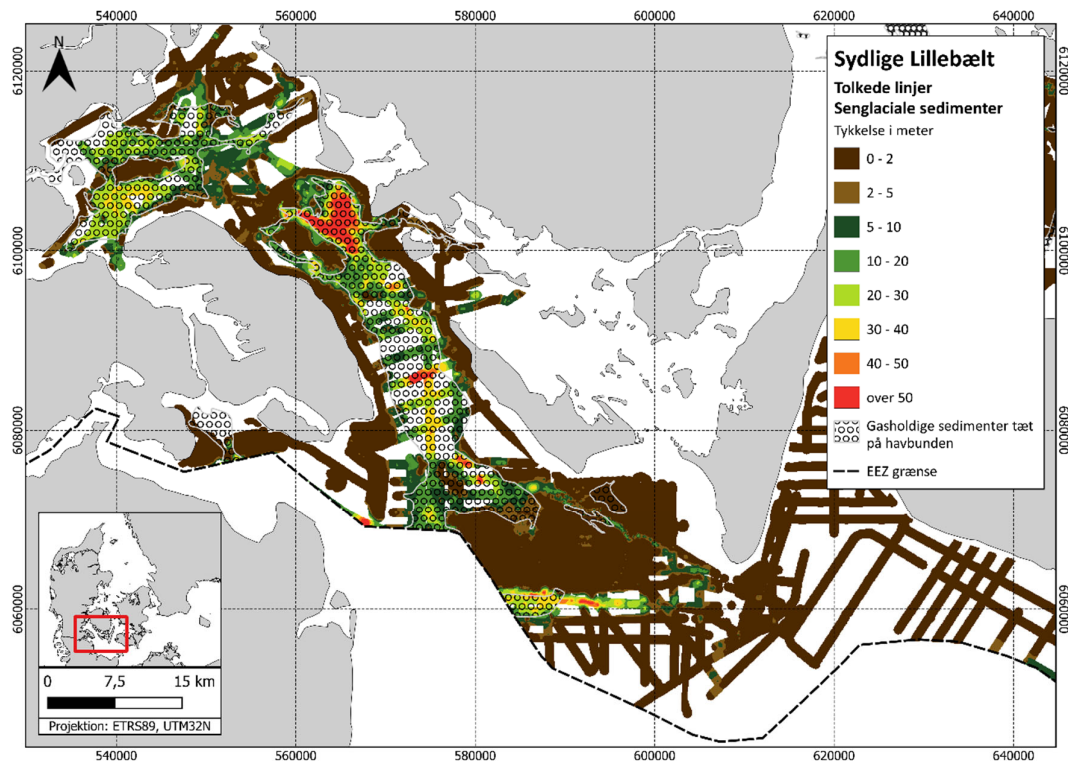
På det sydlige profil ses flere større og mindre nedskårne kanaler i de Prækvartære og glaciale aflejringer. Flere af disse er udfyldt med senglacialt ferskvandsler (orange) overlejret af Holocænt ferskvandsler (grøn med horisontal lagdeling) og Holocænt dynd (lyseblå med horisontal lagdeling) og en enkelt er udfyldt med glacialt smeltevandssand (rød). Også her tolkes de senglaciale lerede sedimente at være afsat i en gren af den Baltiske Issø. Centralt/sydligt på profilet ligger de Prækvartære aflejringer højt og med et relativt tyndt dække af glaciale sedimente. Over de glaciale aflejringer ses et område med dislokeret Eem interglacialt sand og ler (mintgrøn), og flere steder et dække af Holocænt marint dynd (lyseblå med horisontal lagdeling) og/eller Holocænt marint sand (lyseblå med skråtstillede lag).



Figur 10.5 Et nordligt (øverst) og et sydligt (nederst) geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for det sydlige Lillebælt. Placeringen af profilet er vist på Figur 10.10.

10.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

På Figur 10.6 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 9.6. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er usikker.

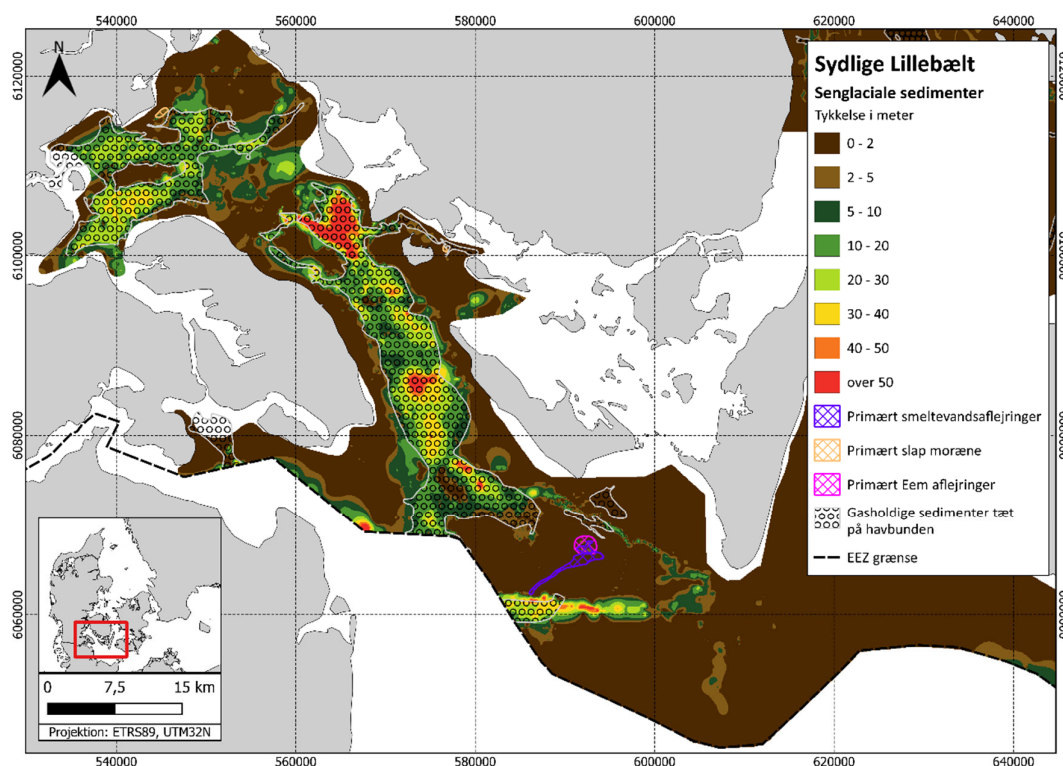


Figur 10.6 Kortet illustrerer hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 10.7). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder. Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

Kortet i Figur 10.7 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacielle aflejringer og i store områder, især langs kysterne, mod nord og mod sydøst, er tykkelsen kun op til 2 m. Nord for Als ses et sydvest-nordøst gående strøg med tykkelser af senglaciale sedimenter op til 20-40 m og i en dyb og bred nordvest-sydøst gående kanal centralt i området mellem Als og Fyn/Ærø ses ligeledes tykkelser op til 20-40 m og lokalt mere end 50 m. Omkring 15 km syd for Ærø ses en smal øst-vest gående kanal også med tykkelser op til 20-40 m og lokalt mere end 50 m og som formentlig hænger sammen med en tilsvarende dalstruktur som er delvist kortlagt syd for Als på grænsen til tysk farvand.

De senglaciale sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. I bunden af den dybe og brede kanal centralt i området er dog tolket 10 til 20 m sandede aflejringer på baggrund af det interne seismiske refleksionsmønster. Herudover er der i to områder syd for

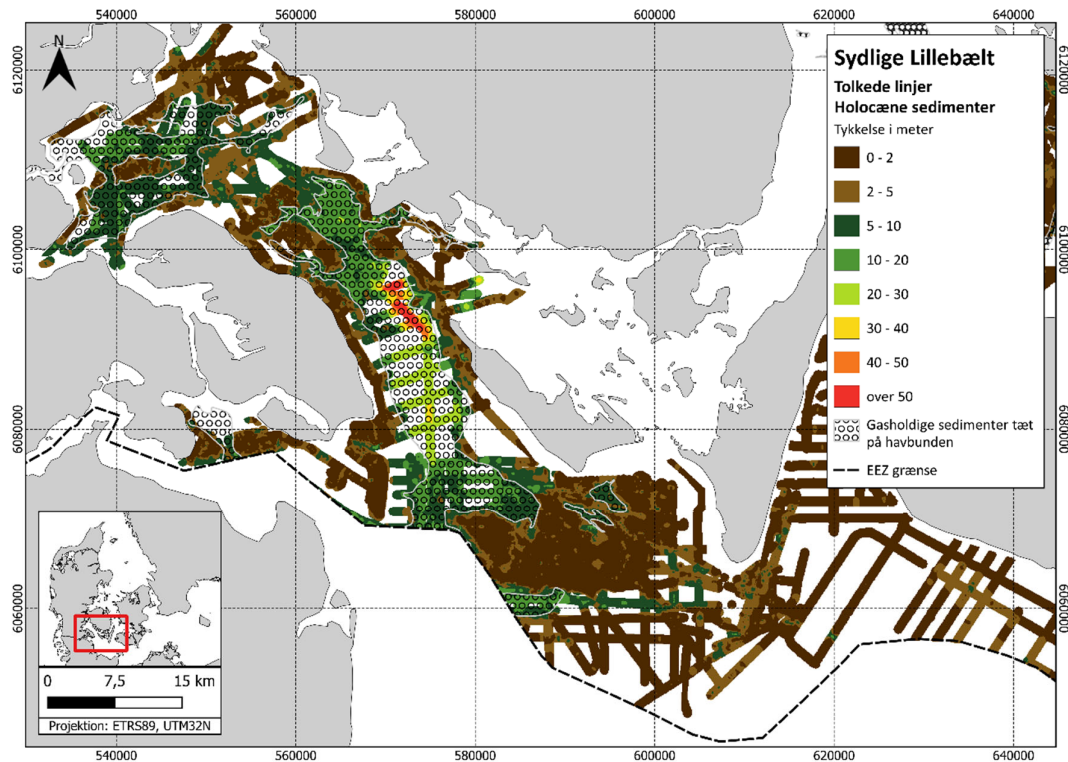
Ærø tolket henholdsvis en mindre enhed af Eem interglacial sand (markeret med lyserød krydsskravering) og en smal begravet dal udfyldt med smeltevandsaflejringer (markeret med lilla krydsskravering). I to mindre områder, ved Halk Hoved og Lyø Sand, er der tolket slap moræne, eller flydemoræne/afsmeltningsmoræne, som ikke har været overskredet af isen og derfor ikke er overkonsolideret som de isbelastede glaciale aflejringer. Den slappe moræne er derfor medtaget i tykkelserne af de senglaciale aflejringer og området er markeret med orange krydsskravering. Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur.



Figur 10.7 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter. På kortet er markeret mindre områder, hvor dele af de senglaciale aflejringer udgøres af Eem interglacial sand (lyserød krydsskravering), glaciale smeltevandsaflejringer (lilla krydsskravering) eller slap moræne (orange krydsskravering). Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur.

10.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

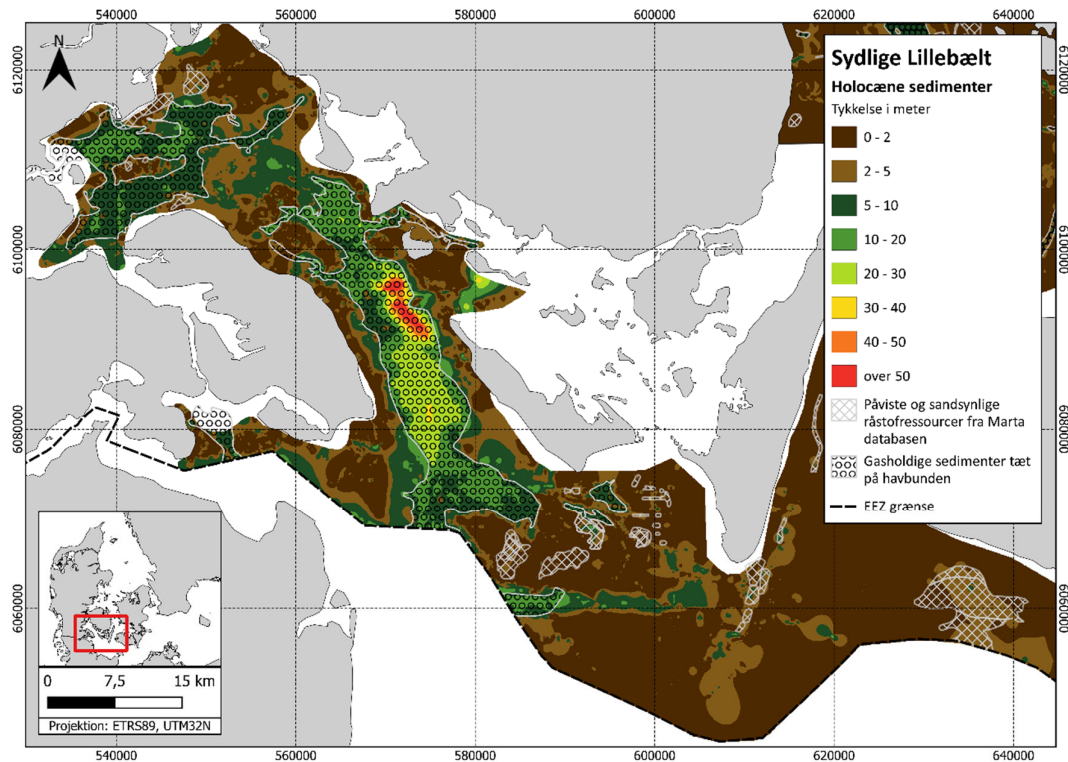
På Figur 10.8 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 10.9. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimentter således betragtes med større forsigtighed. Områder med gasholdige sedimentter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker.



Figur 10.8 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 10.9). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder. Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

Kortet i Figur 10.9 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien over de sen-glaciale sedimenter. Tykkelsen varierer generelt fra 0 til 5 meter, men nord for Als ses et sydvest-nordøst gående strøg med tykkelser af Holocæne sedimenter op til 10-20 m og i en dyb og bred nordvest-sydøst gående kanal centralt i området mellem Als og Fyn/Ærø ses tykkelser op til 30 m og lokalt mere end 50 m. Omkring 15 km syd for Ærø ses en smal øst-vest gående kanal også med tykkelser op til 10-20 m; den hænger formentlig sammen med en tilsvarende kanal som er delvist kortlagt syd for Als på grænsen til tysk farvand.

De Holocæne sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. Påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering på Figur 10.9 og i disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter. Gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur.



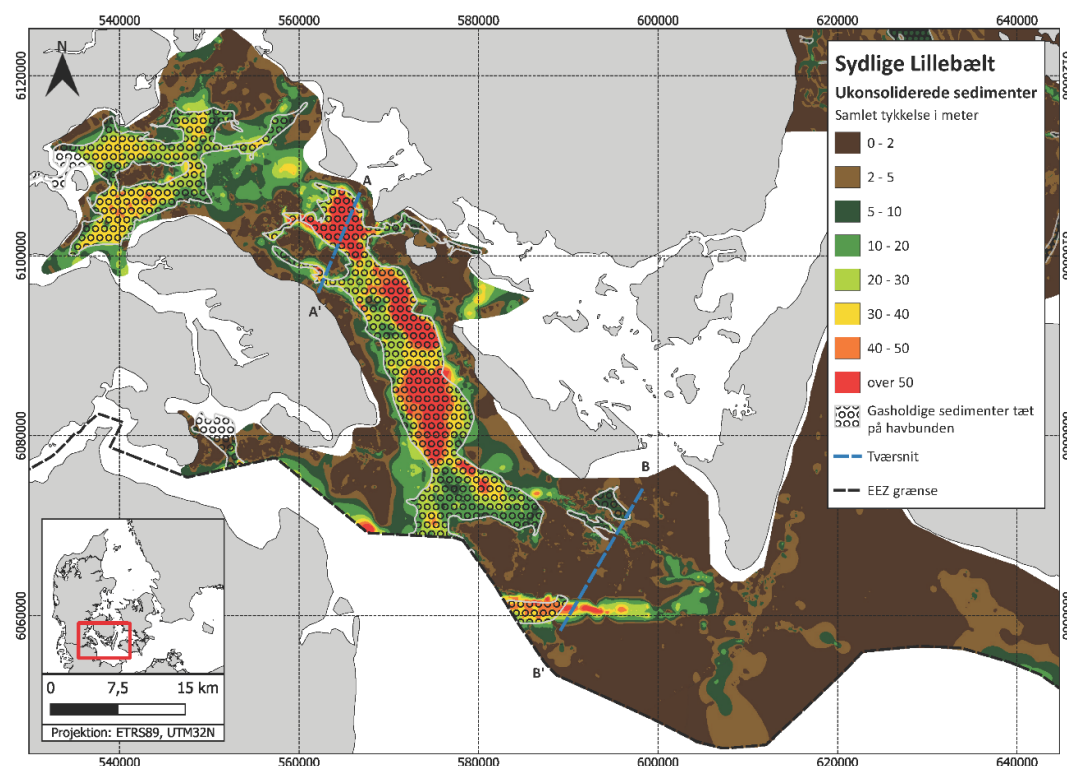
Figur 10.9 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering og gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur.

10.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 10.10 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde og som overlejrer de ældre, og typisk mere hårde, glaciæle lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciæle og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne glaciæle moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglaciæle og Holocæne tykkelseskort. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker.

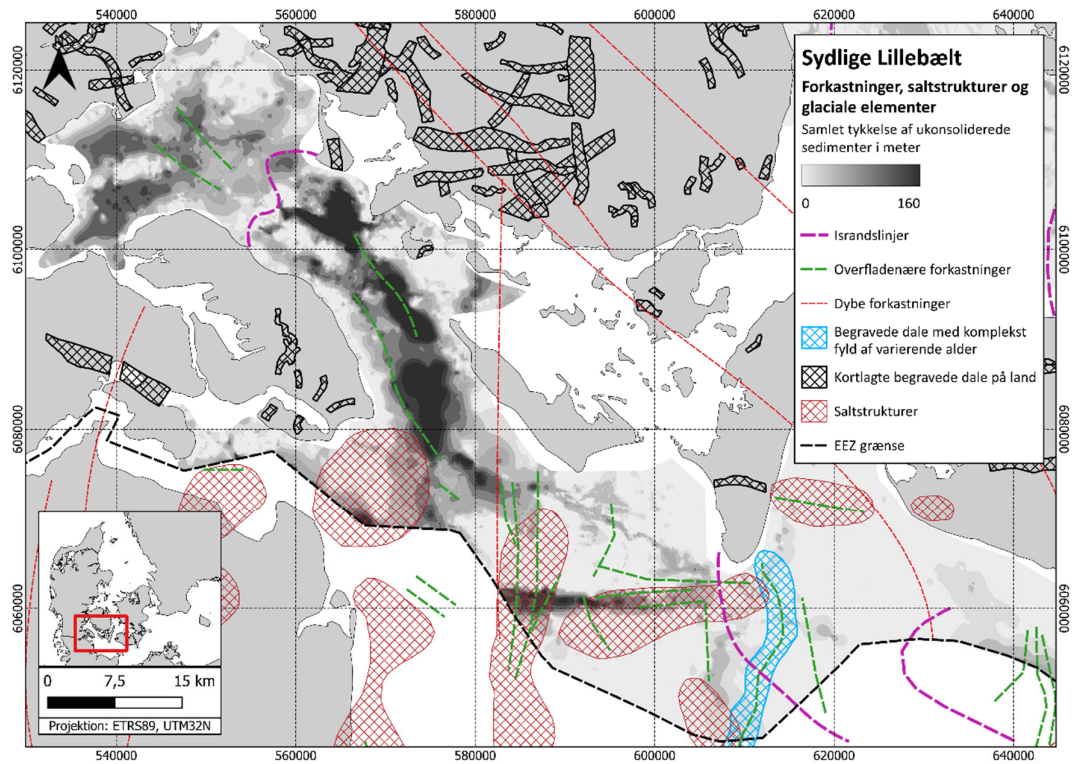
Kortet (Figur 10.10) viser generelt tykkelser fra 0-5 m langs kysterne samt mod nordvest og sydøst. Nord for Als ses et sydvest-nordøst gående strøg med tykkelser op til 20-40 m og lokalt op til 50 m. I en dyb og bred nordvest-sydøst gående kanal centralt i området mellem Als og Fyn/Ærø ses samlede tykkelser over 50 m. Omkring 15 km syd for Ærø ses en smal øst-vest gående kanal også med tykkelser over 50 m; den hænger som nævnt ovenfor formentlig sammen med en tilsvarende dalstruktur som er delvist kortlagt syd for Als på grænsen til tysk farvand.

Områderne med store tykkelser af ukonsoliderede sedimenter repræsenterer tidligere sø- og dræningssystemer, som senere er blevet delvist udfyldte. Generelt ses et sammenfald mellem områder med større mængtigheder af ukonsoliderede aflejringer og gasholdige sedimenter tæt på havbunden. Beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 10.5 er vist på kortet.



Figur 10.10 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 10.5 angivet.

I Figur 10.11 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i den dybe undergrund og overfladenære forkastninger er vist med henholdsvis rød krydsskravering og grønne stiplede streger (Al Hseinat & Hübscher, 2017). Der ser flere steder ud til at være en sammenhæng mellem de dybe saltstrukturer og beliggenheden af overfladenære forkastninger. De overfladenære forkastninger ser enkelte steder ud til at have en betydning for tykkelsen af de ukonsoliderede sedimenter. Tolkede begravede tunneldale i området er vist med blå krydsskravering og kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk). Der er således kortlagt en større, nord-syd gående begravet dal syd for Langelands østkyst. Israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003) er vist med lilla stiplede streger. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

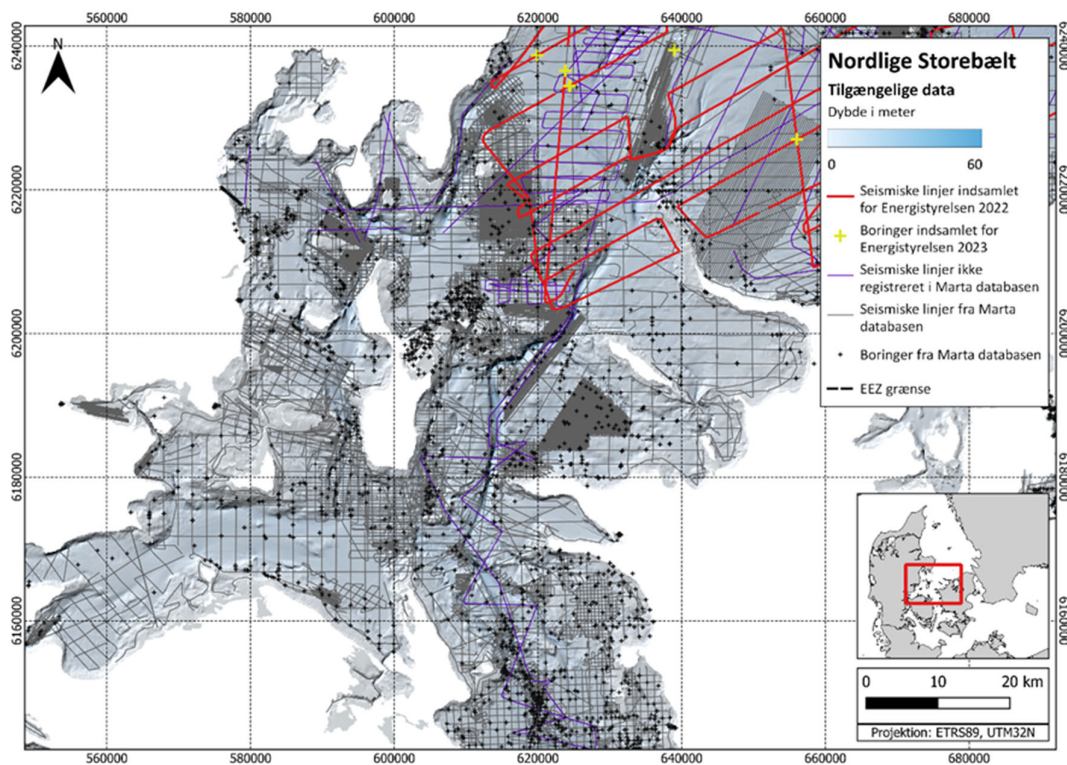


Figur 10.11 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund, overfladenære forkastninger (Al Hseinat & Hübscher, 2017), tolkede begravede tunnel-dale i området, israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003) samt områder på land med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

11. Nordlige Storebælt

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af det nordlige Storebælt. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciala lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciala lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 11.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i det nordlige Storebælt. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

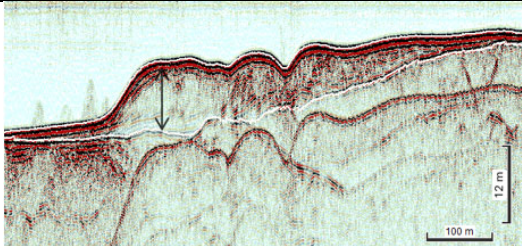
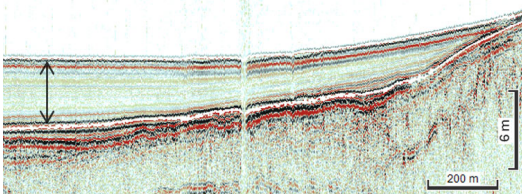
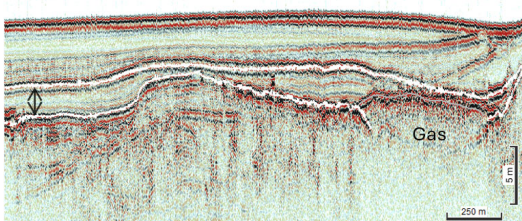


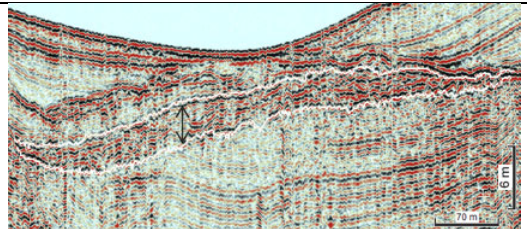
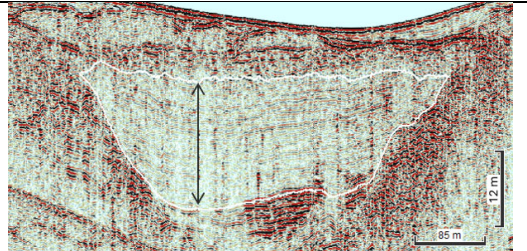
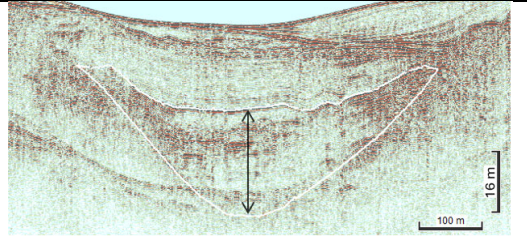
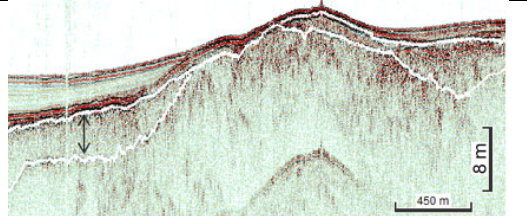
Figur 11.1 Oversigtskort over det nordlige Storebælt. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

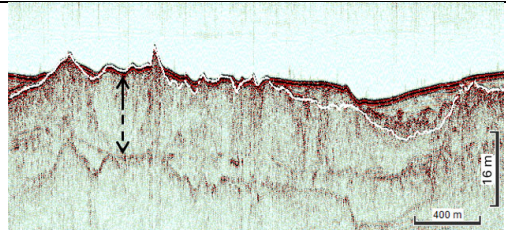
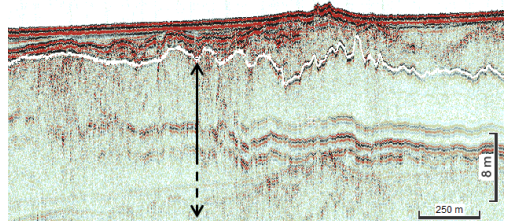
11.1 Seismiske enheder

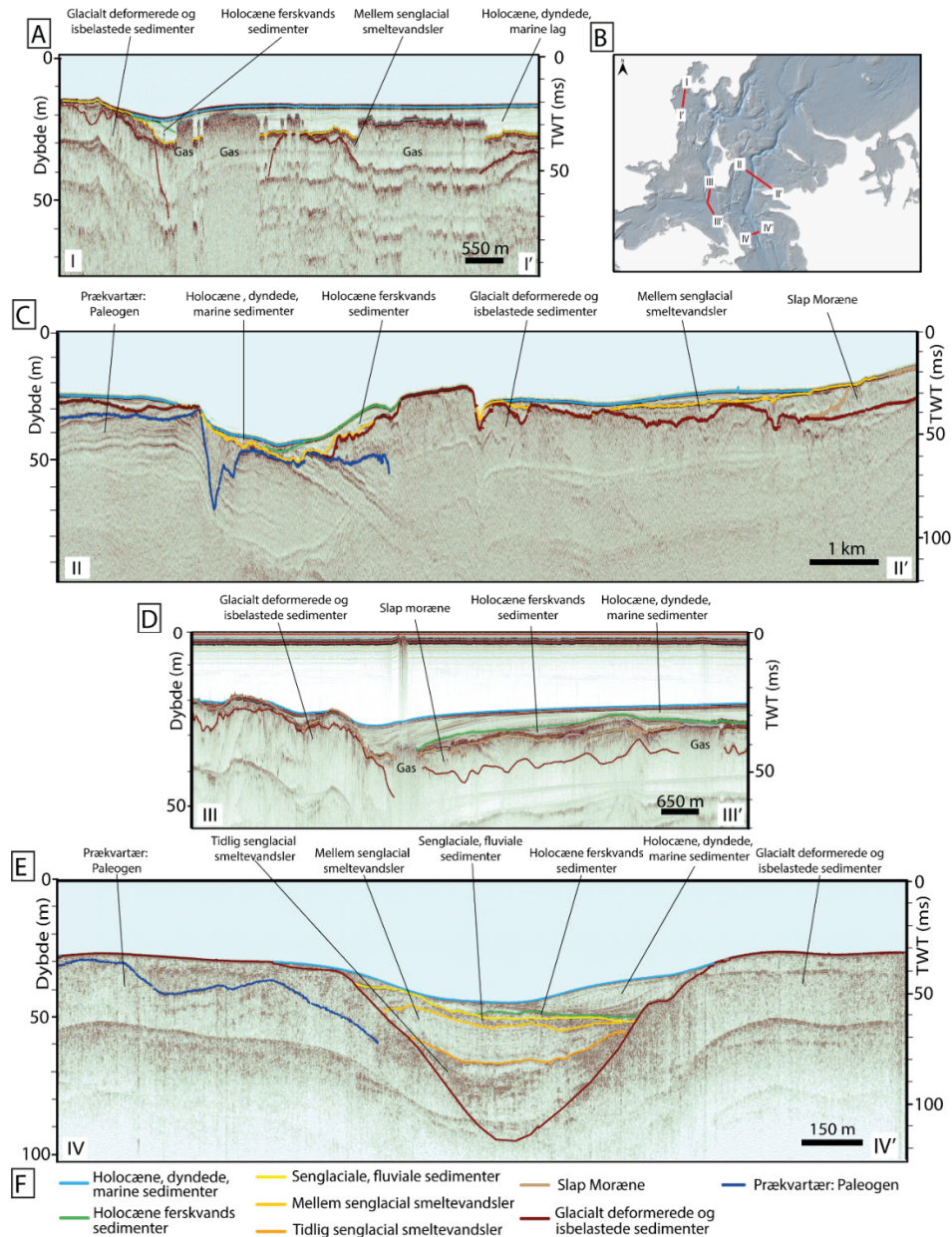
I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 11.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 11.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

Tabel 11.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer. Udbyggende klinteformer. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk.	10	Lokale forekomster. Spredt i hele området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin-/kyst/flakdannelse	
Sen Holocæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallele, kontinuerlige reflektorer. Semi-transparent, lav til medium amplitude.	>20	Nuværende batymetriske lavninger.	Ler, silt, gyttje og dynd	Marin	
Tidlig Holocæn	Holocæne ferskvands-sedimenter	Parallele kontinuerlige reflektorer. Semi-transparent, lav til medium amplitude. Top-horisont ofte en kraftig refleksor, hvorpå Holocæne, dyndede, marine sedimenter down- og onlapper.	10	Udfyldning i Tidlig Holocæn kanalsystemer sydøst for Djursland, i Storebæltskanalen og i to store bassiner i Aarhus Bugt og nord for Fyn.	Ler, silt og gyttje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale	Lakustrin og fluvial	

Sen senglacial	Senglaciale, fluviale sedimenter	Kaotisk. Laminerede indslag forekommer. Mellem amplitude.	5	I nedskårne kanaler sydøst for Djursland og i Storebælts-kanalen mellem Fyn og Sjælland.	Sand (mellem- til grovkornet)	Fluvial	
Mellem senglacial	Senglacial smeltevandslær	Laminerede, kontinuerte interne refleksioner. Kan fremstå foldet. Semi-transparent. Lav til mellem amplitude.	50	I nedskårne kanaler sydøst for Djursland, Aarhus Bugt og i Storebælts-kanalen.	Ler med indslag af silt og finsand	Lakustrin og fluvial	
Tidlig senglacial	Senglacial smeltevandslær	Kaotisk seismisk facies med transparente og laminerede indslag.	30	I Storebælts-kanalen mellem Fyn og Sjælland.	Ler med indslag af sand og grus	Gletsjer-proximal, lakustrin	
Glacial	Slap moræne	Kaotisk. Mellem til høj amplitude. Kontinuierlige reflektorer kan forekomme. Adskilt fra de Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter af en reflektor med mellem amplitude.	30	Mellem Samsø, Fyn og Sjælland.	Moræneler og -sand	Glacial	

Glacial	Glacialt de- formerede og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Høj amplitude. Ofte med en ondulerende top-horisont. Laminererede, foldede og deformerede lag kan forekomme.	Ukendt	Hele området.	Moræneler og -sand	Glacial	
Prækvarter	Palæogen	Parallelle, foldede og for- kastede reflektorer. Ero- deret i toppen. I flere til- fælde optræder et trans- parent lag i toppen. Lav amplitude.	Ukendt	Hele området.	Plastisk ler og mergel	Marin	



Figur 11.2 Eksempler på sparker seismiske data fra det nordlige Storebælt som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil i Aarhus Bugt. B) Oversigtskort. C) Seismisk profil mellem Samsø og Røsnæs. D) Seismisk profil mellem Samsø og Fynshoved. E) Seismisk profil mellem Fyn og Sjælland. F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

11.1.1 Prækvarter strata

I det nordlige Storebælt består den Prækvarter overflade af plastisk ler og mergel fra Palæogen. Enheden er til stede i hele området i varierende dybde fra 0 til 125 m under havbunden. Det Palæogene ler kommer tættest på havbunden syd for Djursland, nær Jyllands kyst syd for Aarhus, syd for Samsø og i Storebæltskanalen mellem Samsø og Sjælland. Den

interne seismiske facies består af laminerede kontinuerlige reflektorer, som kan være foldede og forkastede (Figur 11.2 B). I få tilfælde optræder et transparent lag i toppen. Den øvre grænse er eroderet af de Kvartære isskjolde.

11.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter er til stede i hele det nordlige Storebælt. Enheden består typisk af moræneler og -sand, men interglaciale marine, lakustrine aflejringer og smeltvandsaflejringer kan forekomme. Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter, men der kan forekomme laminerede og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende (Figur 11.2 A, B, C). I få tilfælde optræder glacialtektoniske forkastninger i enheden.

11.1.3 Slap moræne

Det er vanskeligt at adskille slap moræne fra glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, da begge enheder har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen er typisk ud fra boringsinformationer og/eller svage amplitudeændringer, men der ses ofte en kontinuerlig refleksion mellem de to enheder. Den slappe moræne betragtes som værende ikke-isoverskredet, og i de tilfælde hvor det har været muligt, er enheden tolket med i de senglaciale aflejringer. Der er tolket slap moræne mellem Samsø, Sjælland og Fyn, hvor enheden har en maksimal tykkelse på 30 m. Den forventede lithologi er morænesand og moræneler, som er transporteret over isen eller umiddelbart foran isen og derfor som nævnt ikke er blevet isbelastet.

11.1.4 Tidlig senglacial smeltvandsler

Enheden er kun tolket lokalt i Storebæltskanalen mellem Fyn og Sjælland, hvor den har en maksimal tykkelse på 30 m (Figur 11.2 D). Den seismiske facies er af kaotisk karakter med flere laminerede og transparente indslag. Der er kun få borer i enheden, som alle indeholder lamineret ler med et højt karbonat indhold, men grundet den til tider kaotiske seismiske facies forventes der indslag af sand og grus i enheden. Enheden er formentlig aflejret umiddelbart efter isens tilbagetrækning i området. I boring 551016.127 (544001-1) i Figur 11.3 er enheden truffet i 5,5 meters dybde. Andre studier har foreslået, at enheden er aflejret i en lokal issø (Bennike et al., 2004; Jensen et al., 2005).

11.1.5 Mellem senglacial smeltvandsler

Denne enhed er tolket i Aarhus Bugt, sydvest for Djursland og i Storebæltskanalen. Enhedens udbredelse begrænser sig som regel til nedskårne kanaler, hvor tykkelsen lokalt kan være op til 50 m (Figur 11.2 B og C). I Aarhus Bugt tyder det dog på, at enheden udfylder et større bassin, som kan have været en sø i Senglacial tid. Det tolkede Mellem senglaciale smeltvandsler har en lamineret semi-transparent seismisk facies. Den ældste datering af sedimenterne i Storebæltskanalen er på 14.300 kal. år BP i boring 551016.127 (544001-1) i

Figur 11.3 (Bennike et al., 2019). Andre studier har foreslået at enheden mellem Fyn og Sjælland er aflejring i den Baltiske Issø (Bennike et al., 2004; Jensen et al., 2005).

11.1.6 Senglaciale fluviale sedimenter

Over det Mellem senglaciale smeltevandsler optræder der ofte et tyndt sandlag (Figur 11.2 D og Figur 9.2 A) med en mægtighed på 3-5 m. Sandlaget har en kaotisk seismisk facies, og tolkes som værende aflejret under fluviale forhold. Mellem Fyn og Sjælland er der to kulstof-14 dateringer af enheden, som begge viser en alder på ca. 12.000 kal. år BP. Bennike et al. (2004) foreslog, at enheden her repræsenterer den sidste drænering af den Baltiske Issø.

11.1.7 Holocæne ferskvandssedimenter

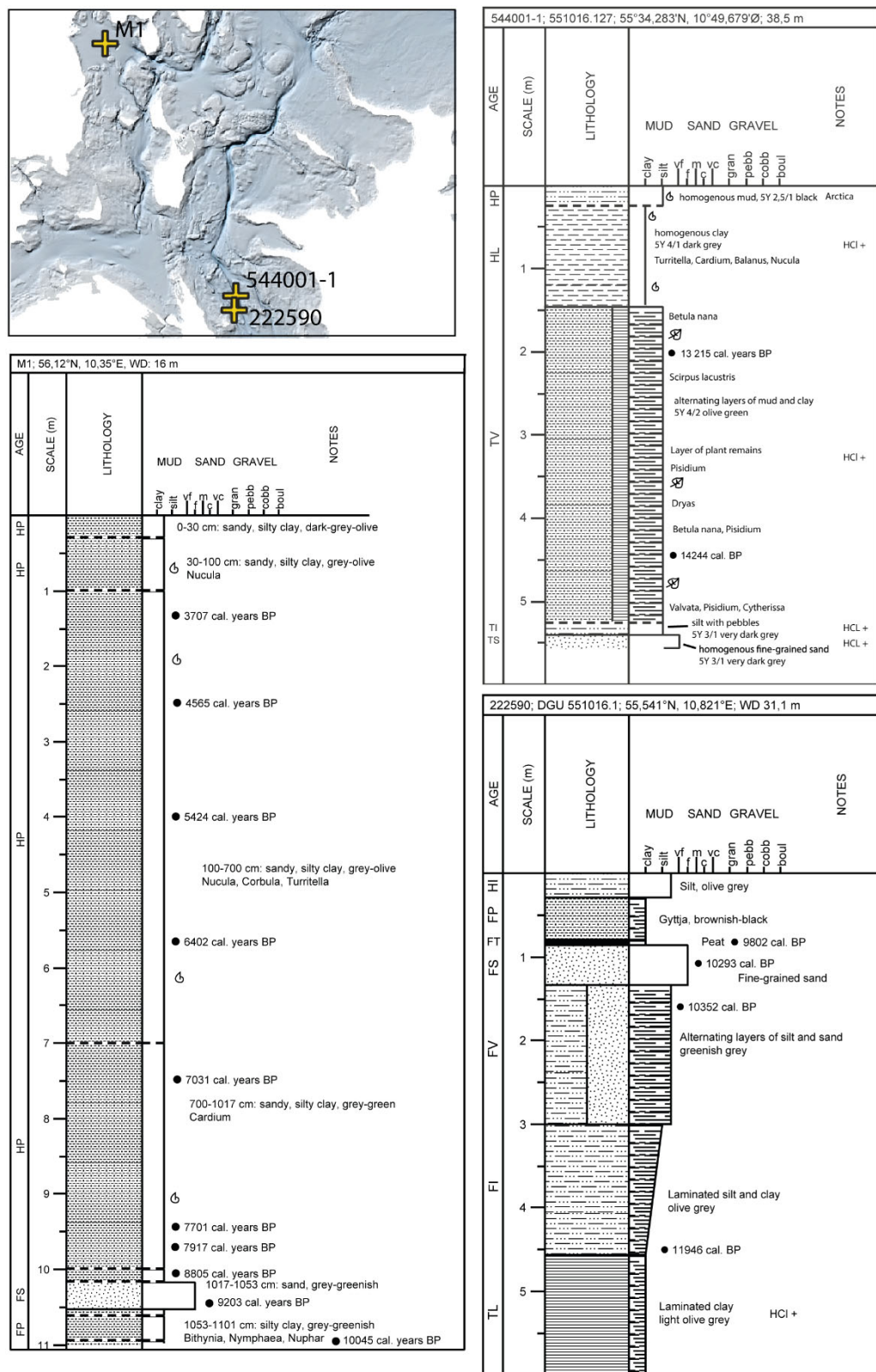
Vandstanden i det nordlige Storebælt i Tidlig Holocæn var lav, men stigende, fra 11.700 til 8.200 kal. år BP. I Aarhus Bugt og nord for Fyn var der to større søer, som blev drænet ud i det marine bassin syd for Anholt via kanal- og flodsystemer syd for Djursland og i Storebæltskanalen. I den nordlige del af Storebæltskanalen er sedimenterne sandsynligvis aflejret under brakvandsforhold. Enheden har en semi-transparent seismisk facies med interne reflektorer med lav amplitude. Top horisonten er ofte en kraftig reflektor, hvorpå de Holocæne dyndede, marine sedimenter down- og onlapper. Den maksimale tykkelse af sedimenterne er 10 m. Lithologien består typisk af ler, silt og gytje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale. Enheden er truffet i dybdeintervallet 0,2-4,5 m i boring 551016.1 (222590) i Figur 11.3 (Jensen et al., 2005).

11.1.8 Holocæne dyndede, marine sedimenter

De Holocæne, dyndede, marine sedimenter er aflejret i Mellem- og Sen Holocæn under et højt relativt havniveau der minder om det nuværende i det nordlige Storebælt. De største tykkelser af enheden findes i Aarhus Bugt og nord for Fyn, hvor tykkelsen er 20 m eller derover. Lithologien består overvejende af marint ler, -silt, -gytje og -dynd. Enheden har en lamineret seismisk facies med interne reflektorer med mellem- til lav amplitude, men transparente indslag kan forekomme. De ældste marine skaller mellem Fyn og Sjælland er daterede til ca. 8.200 kal. år BP. I Aarhus Bugt er de ældste marine skaller daterede til ca. 8.900 kal. år BP, som vist i boring M1 i Figur 11.3 (Bennike et al., 2021b).

11.1.9 Holocæne sandede kyst- og flakdannelser

Kyst- og flakdannelser forekommer lokalt i hele det nordlige Storebælt med en tykkelse på op til 10 m. De kan være aflejret under hele den Holocæne periode, og afspejler et stigende relativt havniveau. Lithologien består typisk af mellem- til grovkornet sand med grusede indslag. Enheden har en seismisk facies med interne udbyggende klinoformer med lav- til medium amplitude.



Figur 11.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området.

11.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Storebælt, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for det nordlige Storebælt. Den konceptuelle geologiske model er beskrevet herunder og illustreret med et nordligt og et sydligt geologisk profil i Figur 11.4. Placeringen af profilerne er vist på Figur 11.9.

Det nederste orange-brune lag på det sydlige (nederste) profil repræsenterer Prækvartære lag fra Eocæn, formentlig plastisk ler.

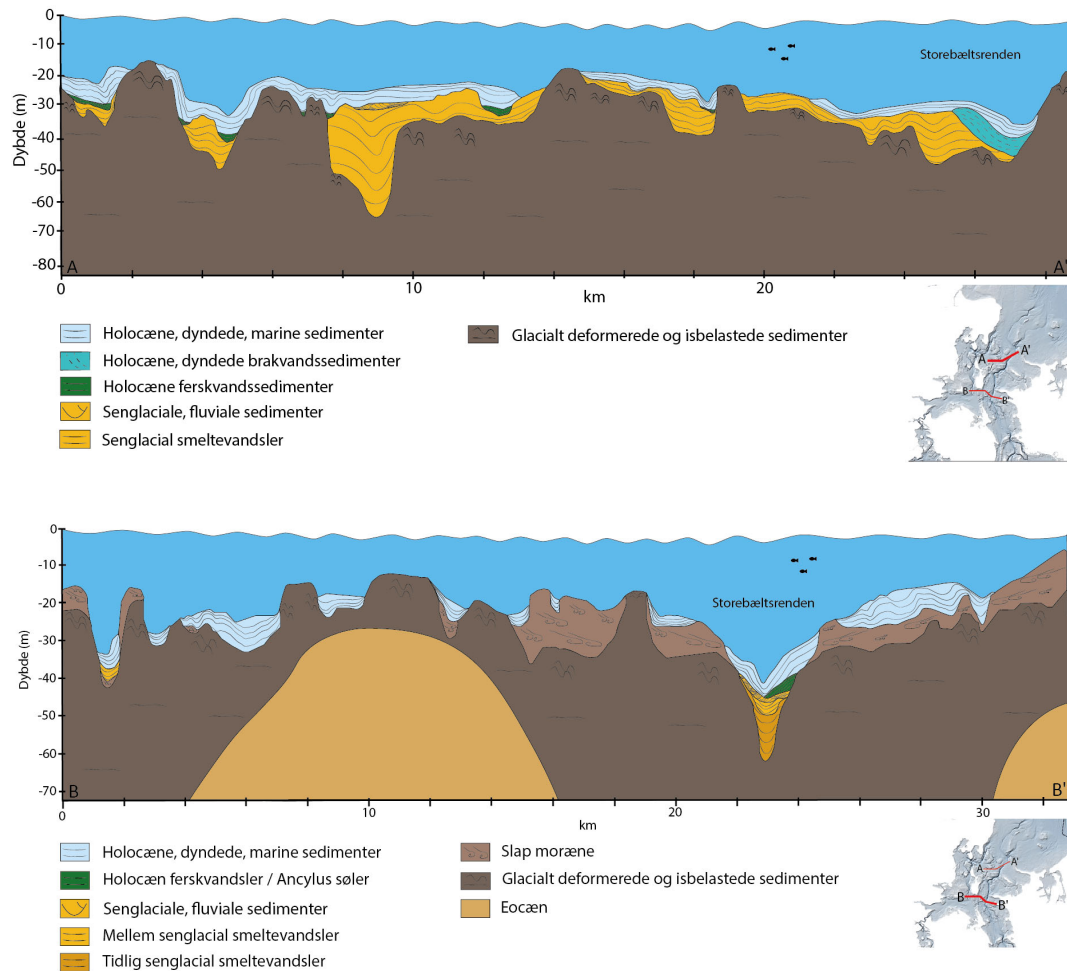
De brune lag med det meget uregelmæssige øvre relief på begge profiler repræsenterer en serie af ældre glaciale lag, til og med lag fra sidste istid, Weichsel, som har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Lagene består formentlig hovedsageligt af moræner, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglaciale sedimenter.

Det lysebrune lag på det sydlige profil repræsenterer slap moræne, eller flydemoræne/afsmeltningsmoræne (indikeret med en "flydesignatur"), som ikke har været overskredet af isen og derfor ikke er overkonsolideret som de isbelastede glaciale aflejringer. Lagene er blandt andet kortlagt i forbindelse med forundersøgelser til en mulig kommende Kattegatforbindelse (Prins et al., 2020). Det har ikke været muligt at skelne mellem slap moræne og senglaciale lerede sedimenter i de seismiske data.

Det orange, tværgående lag på det nordlige (øverste) profil repræsenterer primært senglaciale, lerede, marine sedimenter aflejret fra omkring 17.000 til 11.700 BP. Den meget varierende tykkelse afspejler enhedens udfyldning af det underliggende relief. En lokal senglacial fluvial enhed ses også med orange farve og interne skrålejringer mod vest på profilet og centralt ses med grøn farve mindre bassiner udfyldt med Holocæne ferskvandssedimenter. Det blågrønne lag mod øst i Storebæltsrenden på det nordlige profil repræsenterer Holocæne dyndede brakvandssedimenter aflejret tidligt i Holocæn.

I dybere, udfyldte dele af Storebæltsrenden, og tilstødende lavninger, findes i den sydlige del af området en sekvens med lokale senglaciale søaflejringer og Baltisk Issøler. Disse aflejringer er repræsenteret af de mørke og lysere orange lag med forskellig intern signatur på det sydlige (nederste) profil. De senglaciale aflejringer er overlejret af Holocæne tørve-, ferskvands- og brakvandsaflejringer vist med grønt i renden til højre på det sydlige profil. I renden til venstre på profilet repræsenterer det orange lag senglaciale ferskvandsaflejringer.

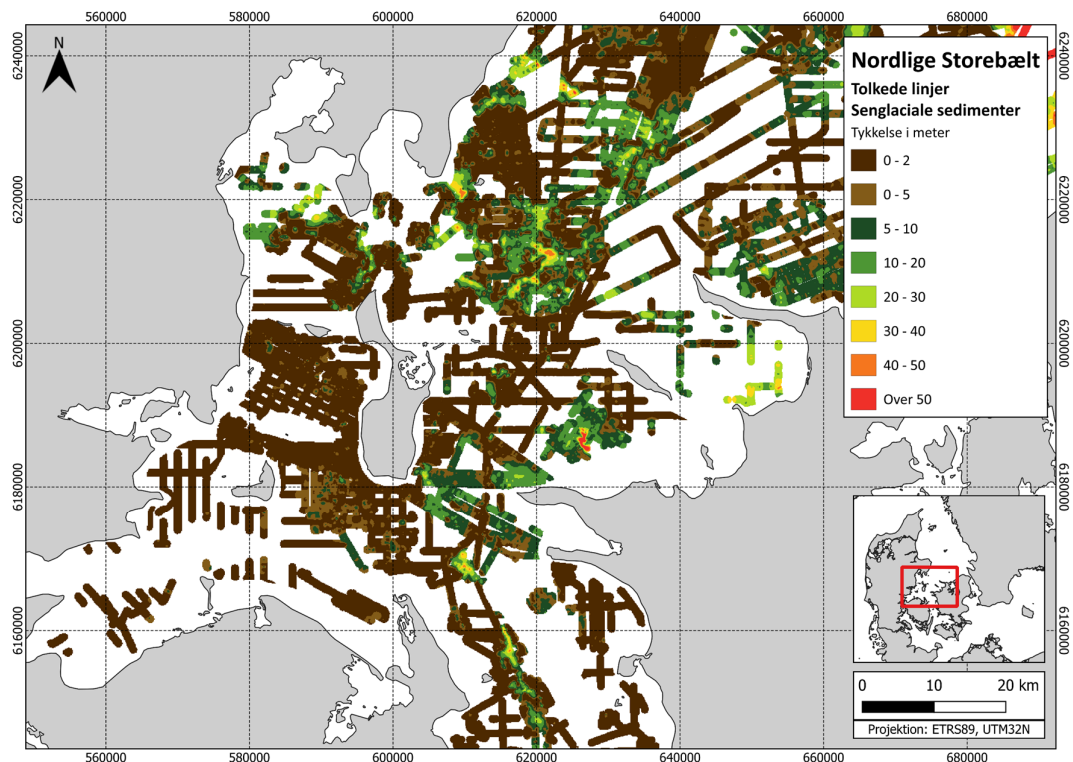
De lyseblå lag på begge profiler repræsenterer dyndede marine sedimenter aflejret senere i Holocæn.



Figur 11.4 Et nordligt (øverst) og et sydligt (nederst) geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for det nordlige Storebælt. Placeringen af profilerne er vist på Figur 11.9.

11.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

På Figur 11.5 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 11.6. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

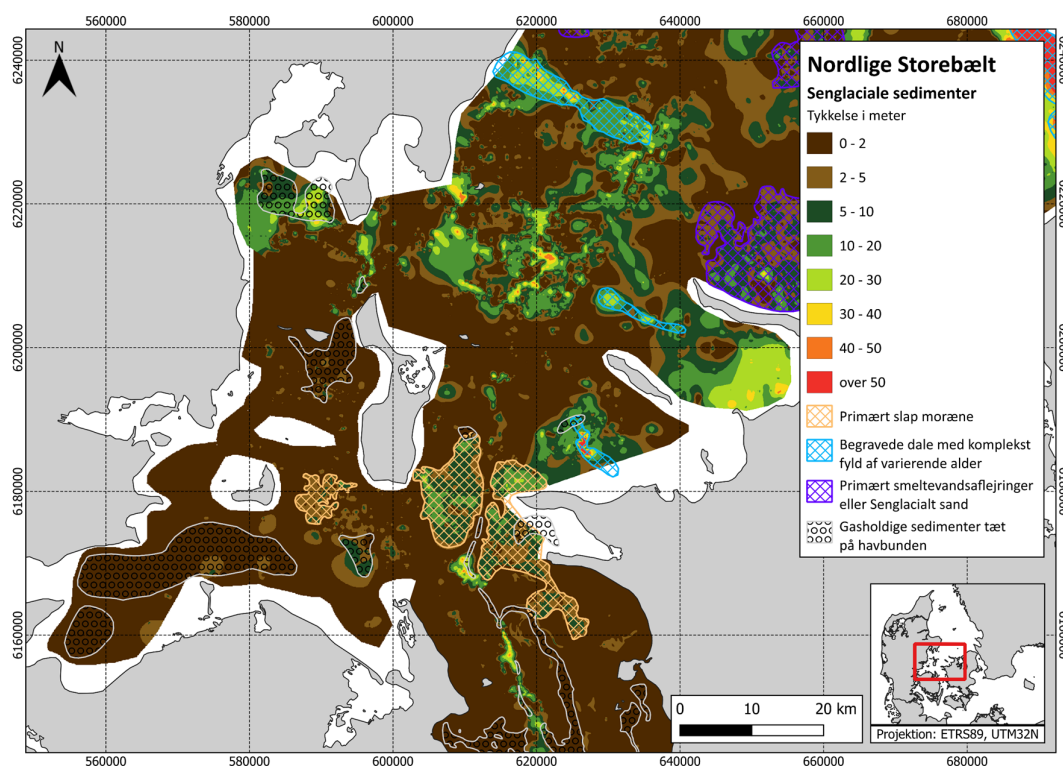


Figur 11.5 Kortet illustrerer hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 11.6). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

Kortet i Figur 11.6 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacialle aflejringer og generelt varierer tykkelsen fra 0-5 m. Herudover ses en række større og mindre kanaler i Storebælt, sydvest for Sejro samt syd for Djursland og centralt mellem Djursland og Sjællands Odde, hvor mægtigheden af de senglaciale aflejringer er op til 20-30 m og enkelte steder op til 40-50 m. Disse er mere eller mindre sammenfaldende med eksisterende, batymetriske lavninger og repræsenterer palæofloder/-dræningssystemer udfyldt med blandt andet senglaciale aflejringer. Øst for Djursland og nordøst og sydvest for Sejro er områderne tolket som dybere begravede dale. Umiddelbart øst for Aarhus og i Sejro Bugten ses desuden større bassiner udfyldt med henholdsvis 10-20 m og 20-40 m senglaciale aflejringer. Disse repræsenterer formentlig også palæodræningssystemer og/eller begravede dale/lokale trug som senere er udfyldt med senglaciale aflejringer.

De senglaciale sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer, hovedsageligt ler og silt med et meget lavt organisk indhold. I en række områder udgøres sedimenterne dog primært af glacialle smeltevandsaflejringer eller senglacialt sand (markeret med lilla krydsskravering på Figur 11.6). En række nedskårne og efterfølgende udfyldte og begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016) forekommer også i området (markeret med blå krydsskravering på Figur 9.6) og her kan dalfyldet være komplekst og af varierende alder og lithologi. Sydvest og især sydøst for Samsø er der i forbindelse med forundersøgelser til en mulig kommende Kattegatforbindelse kortlagt slap moræne (Prins et al., 2020), eller flydemoræne/afsmeltningsmoræne, som ikke har været overskredet af isen og derfor ikke er overkonsolideret som de isbelastede glacialle aflejringer. Den slappe moræne er derfor medtaget i tykkelserne af de senglaciale aflejringer og områderne er markeret med orange

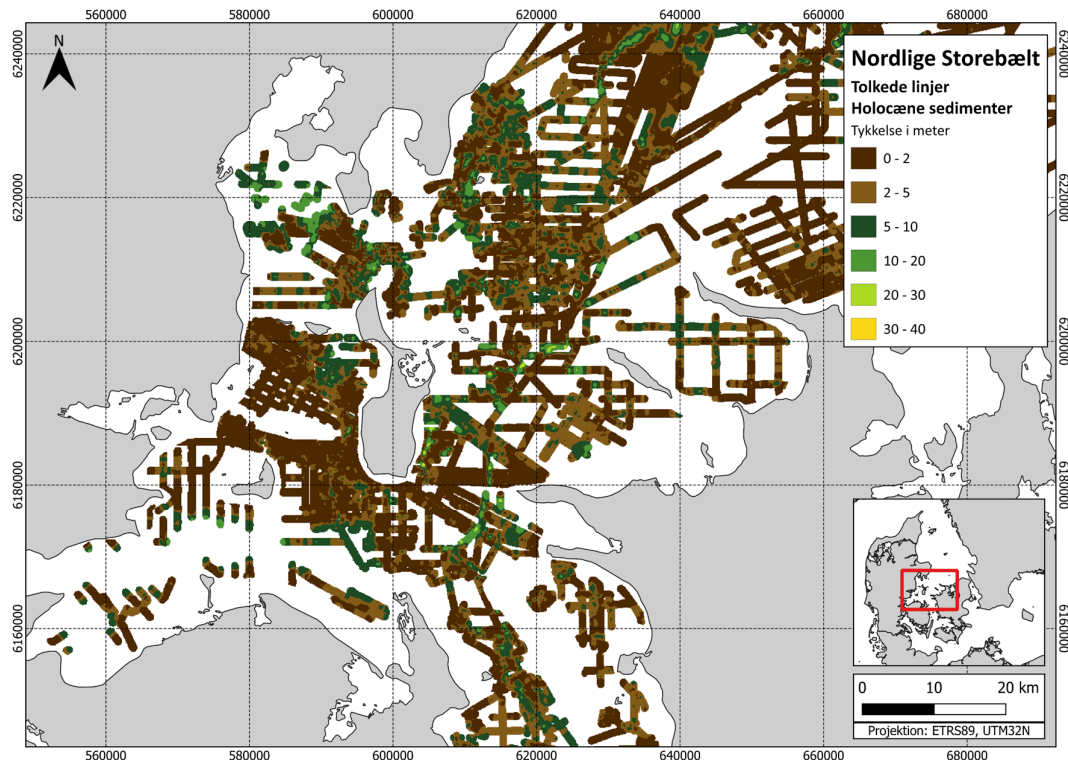
krydsskraving. Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker



Figur 11.6 Kort over tykkelsen af senlaciale sedimenter. På kortet er markeret større områder hvor de senlaciale aflejringer primært udgøres af glacielle smeltevandssaflejringer eller senlaciale sand (lilla krydsskraving). Beliggenheden af større, nedskårne begravede dale, hvor dalfyldet kan være komplekst og af varierende alder, er vist med blå krydsskraving. Områder med slap eller blød moræneler er vist med orange krydsskraving. Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur.

11.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

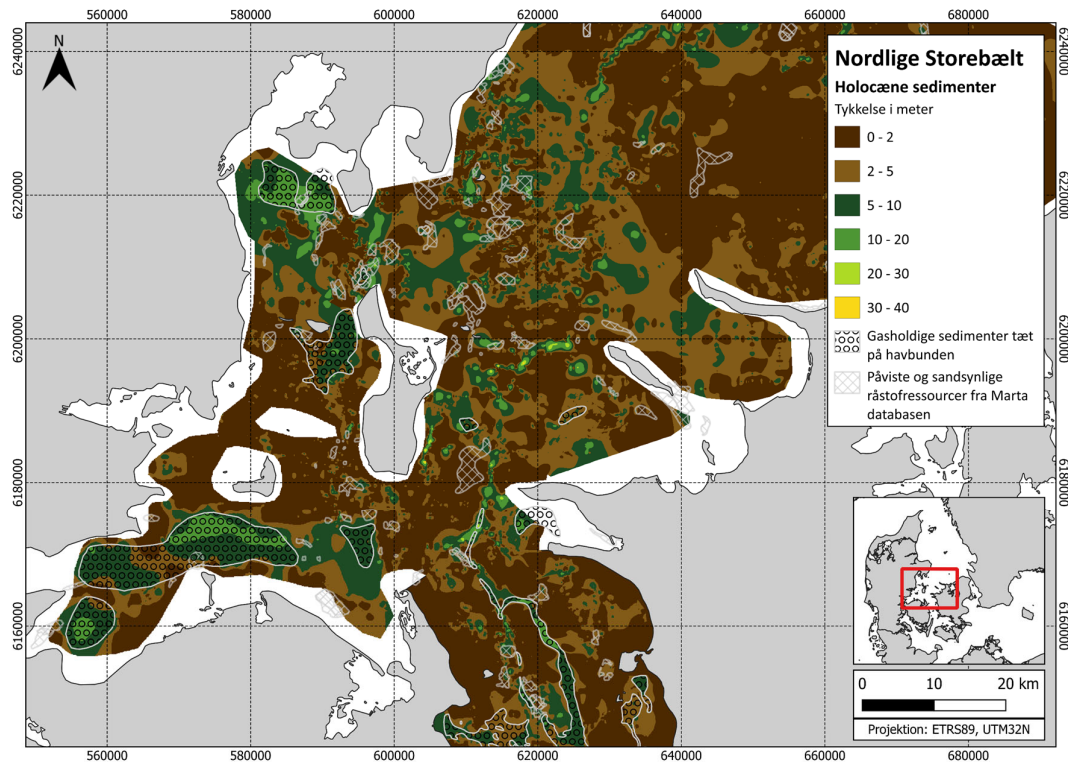
På Figur 11.7 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 11.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.



Figur 11.7 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 11.8). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

Kortet i Figur 11.8 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien over de senglaciale sedimenter. Tykkelsen varierer generelt fra 0 til 5 meter, men mod nordvest og vest (øst for Aarhus og vest for den nordlige del af Samsø), og mod syd og sydvest (i området nord for Fyn og i Tragten ved Lillebælt), ses større kanaler med tykkelser på op til 20 m. Herudover ses en række mindre, spredte kanaler, hvor tykkelserne også er 5-20 m og meget få steder helt op til 30 m. Kanalerne er flere steder sammenfaldende med nuværende batymetriske lavninger, som f.eks. den nuværende Storebæltsrende samt renden nord om Fyn og vest om Samsø, og repræsenterer tidligere dræningssystemer som er delvist udfyldt med Holocæne marine sedimenter.

De Holocæne sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer med et varierende organisk indhold. Den nederste del af de Holocæne aflejringer udgøres i udfyldte lavninger ofte af et tørvelag eller lakustrine aflejringer, der opefter afløses af organisk-rige brakvandssedimenter efterfulgt af fuldt marine aflejringer. Påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen markeret med grå krydsskravering på Figur 11.8 og i disse områder består dele af de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter. Gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker.



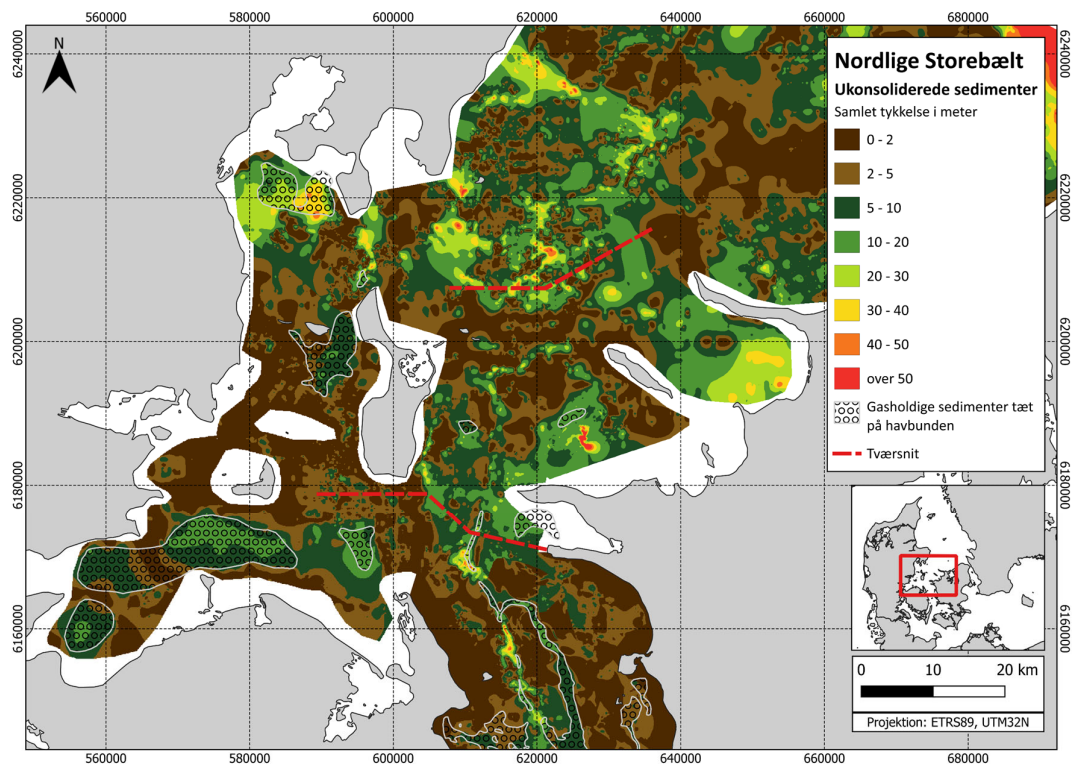
Figur 11.8 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering og gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur.

11.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 11.9 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde og som overlejrer de ældre, og typisk mere hårde, glaciale lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne glaciale moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglaciale og Holocæne tykkelseskort. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker.

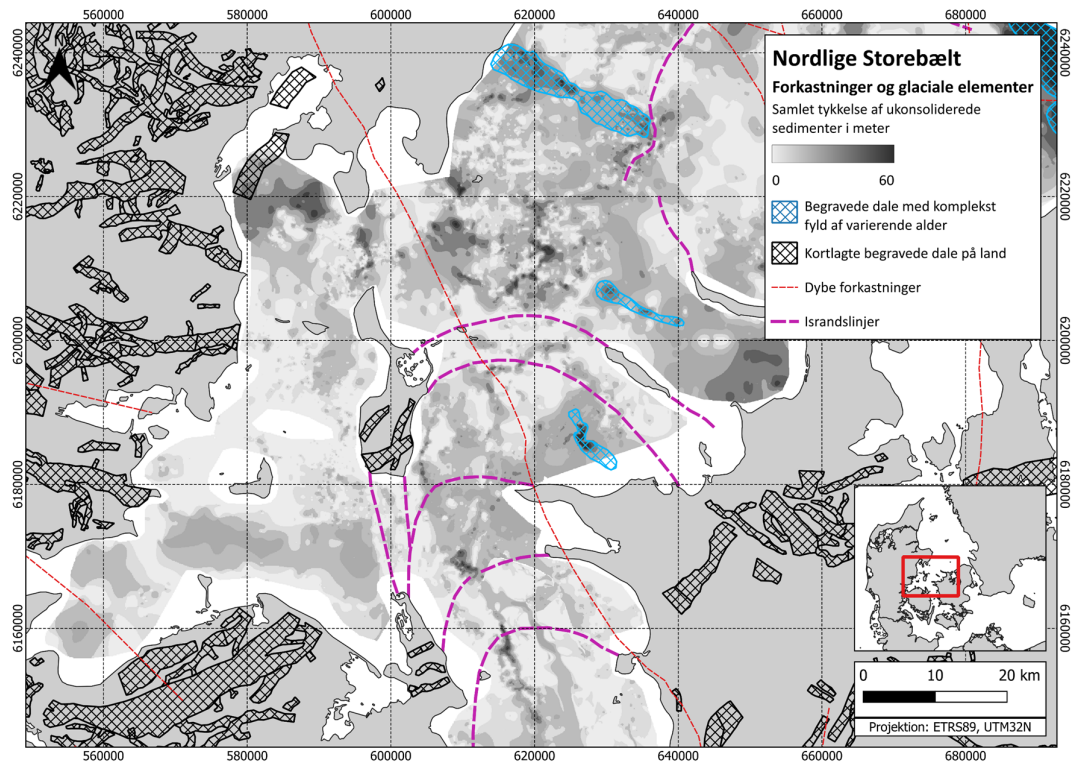
Kortet (Figur 11.9) viser generelt tykkelser fra 0-5 m, men i en række større områder samt i udfyldte kanaler og begravede dale er den samlede tykkelse af de ukonsoliderede sedimenter op til 20, 30 og 40 m og enkelte steder over 50 m. Det drejer sig blandt andet om et nordvestligt-sydøstligt strøg fra Aarhus til Sejerø Bugten, øst for Djursland, sydvest for Sejerø, mellem Samsø og Røsnæs/Asnæs, området nord for Fyn og i Tragten ved Lillebælt samt Storebælt. Områderne repræsenterer formentlig dels tidligere dræningssystemer og dels begravede dale/lokale trug, som senere er blevet delvist udfyldte. Kanalerne op gennem Storebæltrends, øst om Samsø og videre op i det sydlige Kattegat repræsenterer tidligere

dræningssystemer for den Baltiske Issø og Ancylus Søen. Generelt ses mod vest et sammenfald mellem områder med større mægtigheder af ukonsoliderede aflejringer og gasholdige sedimenter tæt på havbunden. Beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 11.4 er vist på kortet.



Figur 11.9 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 11.4 angivet. Overfladenær gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

I Figur 11.10 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Områder med nedskårne, begravede dale er vist med blå krydsskravering, og markante israndslinjer tolket i projektet eller kendt fra litteraturen er angivet med lilla, stiplet streg (Kjær et al. 2003). Kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; [begravededale.dk](https://www.begravededale.dk)). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 11.10 Kort med kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003) samt områder med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016) og israndslinjer kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

12. Sydlige Storebælt og Femern Bælt

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af det sydlige Storebælt og Femern Bælt. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciale lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciale lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 12.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i det sydlige Storebælt og Femern Bælt. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

I et større område fra nord for Langeland og op til nord for Sprogø samt i et område vest for Jammerland Bugt er en række ældre seismiske linjer fra 1979 ikke længere tilgængelige. Kortlægningen i dette område er således alene baseret på digitaliserede kort over tykkelsen af dyndaflejringer, områder med gas i sedimenterne og tykkelsen af senglaciale sandressourcer fra råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988). Det samme gælder et større område øst for den nordlige del af Langeland, og her er kortlægningen baseret på GEUS' generelle kort over sedimenter på havbunden, som viser højtliggende moræneler.

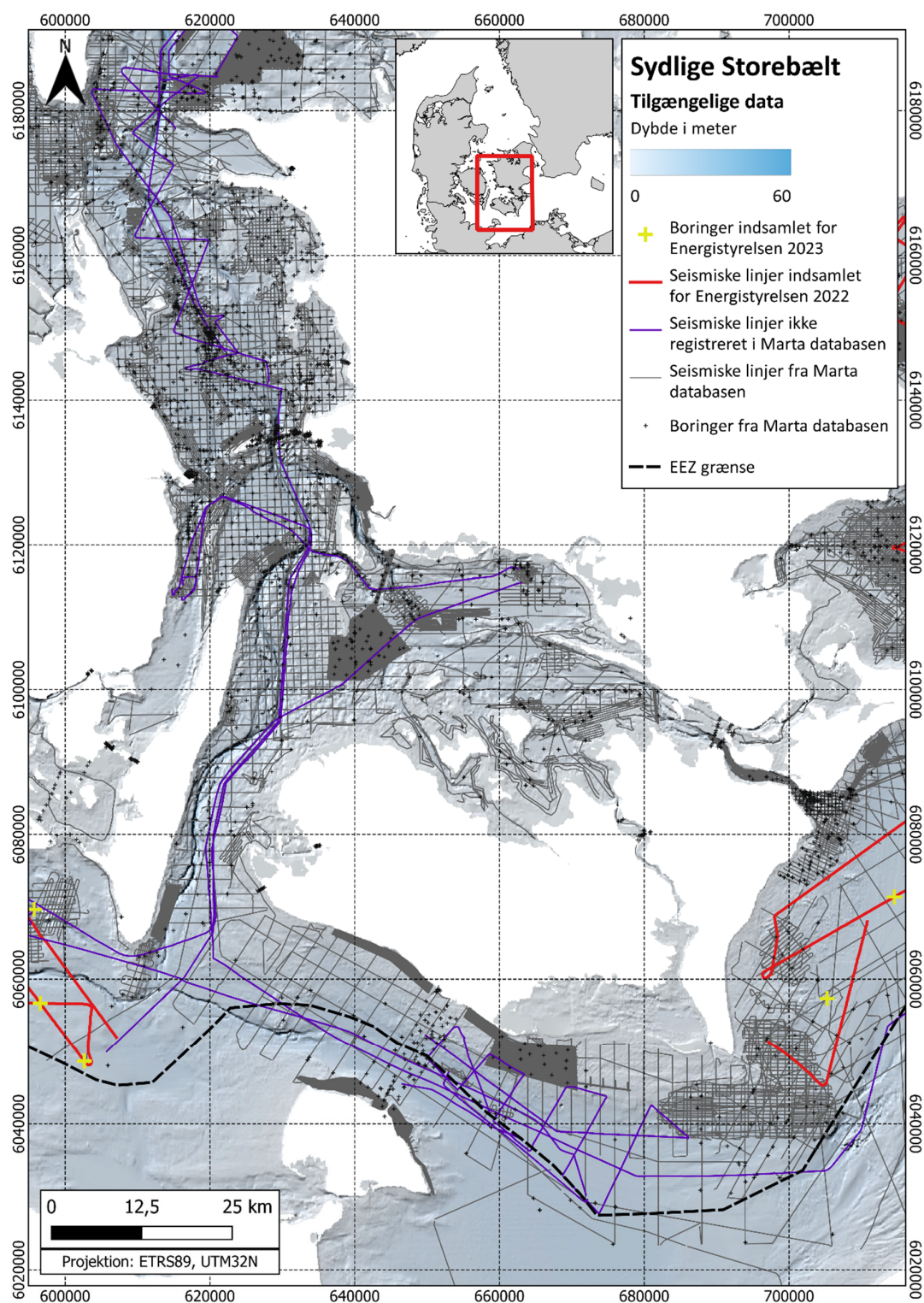
12.1 Seismiske enheder

I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 12.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 12.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

12.1.1 Prækvartære strata

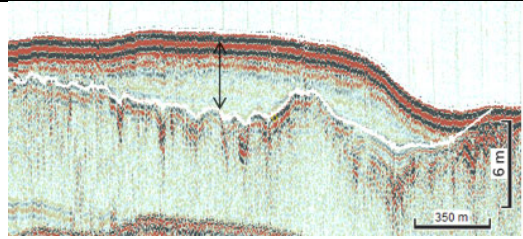
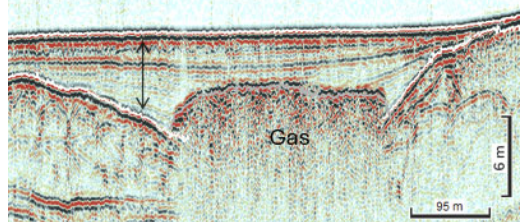
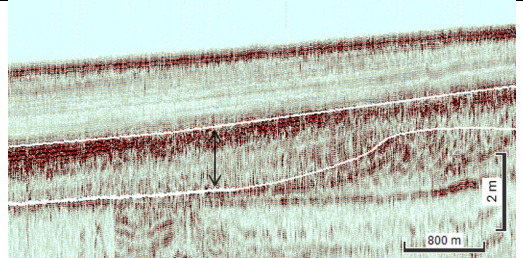
I det sydlige Storebælt består den Prækvartære overflade af skrivekridt og kalk fra Øvre Kridt og Danien i Smålandsfarvandet samt i Storebæltskanalen mellem Sprogø og Nakskov. Nord for Sprogø og syd for Nakskov består den Prækvartære overflade af plastisk ler og mergel fra Palæogen. De Prækvartære aflejringer optræder i varierende dybder i området fra 0 til 75 m under havbunden, dybest i den nordlige del af Storebæltskanalen.

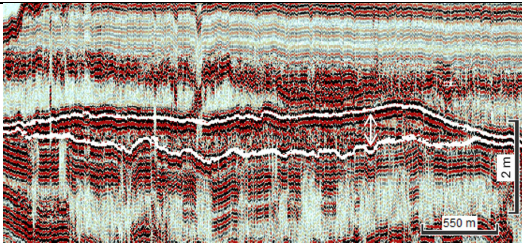
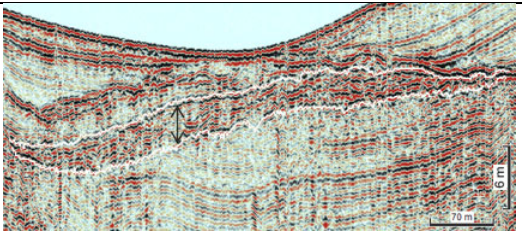
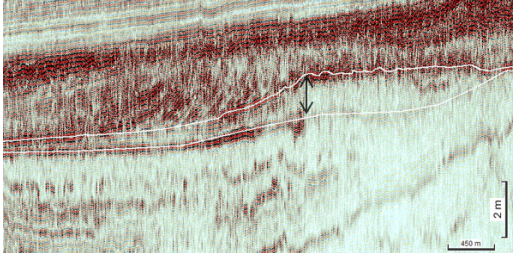
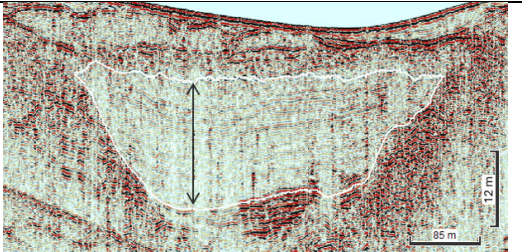
Kridt og kalkaflejringerne har en seismisk facies bestående af parallelle og foldede reflektorer, som kan være forkastede. Den seismiske nedtrængning er begrænset (Figur 12.2 C). Den interne seismiske facies for det Palæogene mergel og ler består af laminerede kontinuerlige reflektorer, som kan være foldede og forkastede. I få tilfælde optræder et transparent lag i toppen. Den øvre grænse for begge enheder er eroderet af de Kvartære isskjolde.

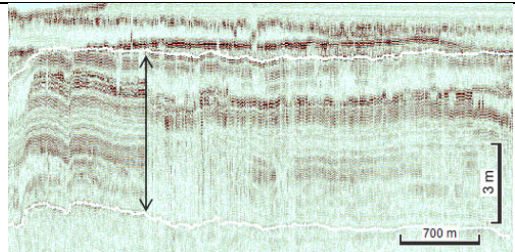
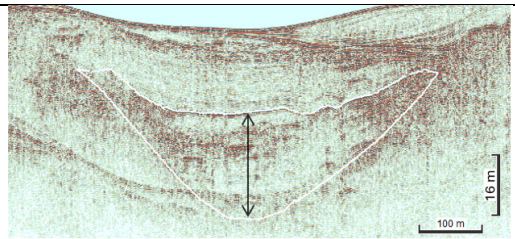
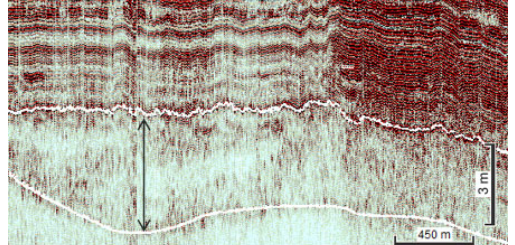


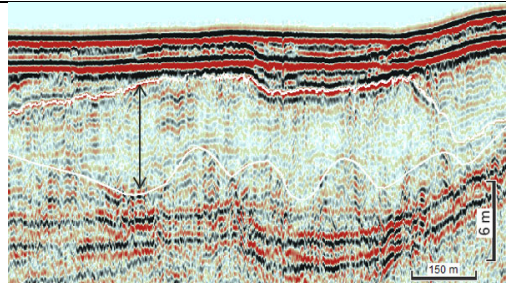
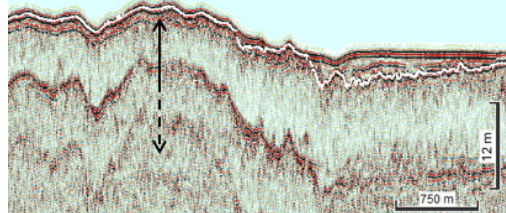
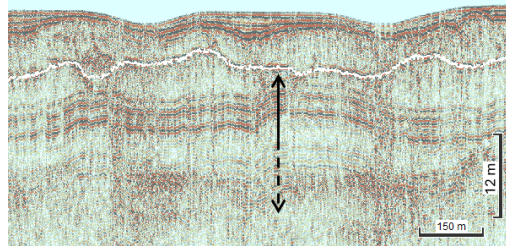
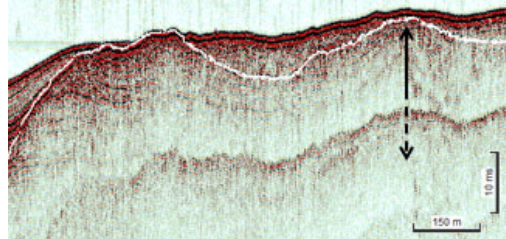
Figur 12.1 Oversigtskort over det sydlige Storebælt og Femern Bælt. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og boringer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

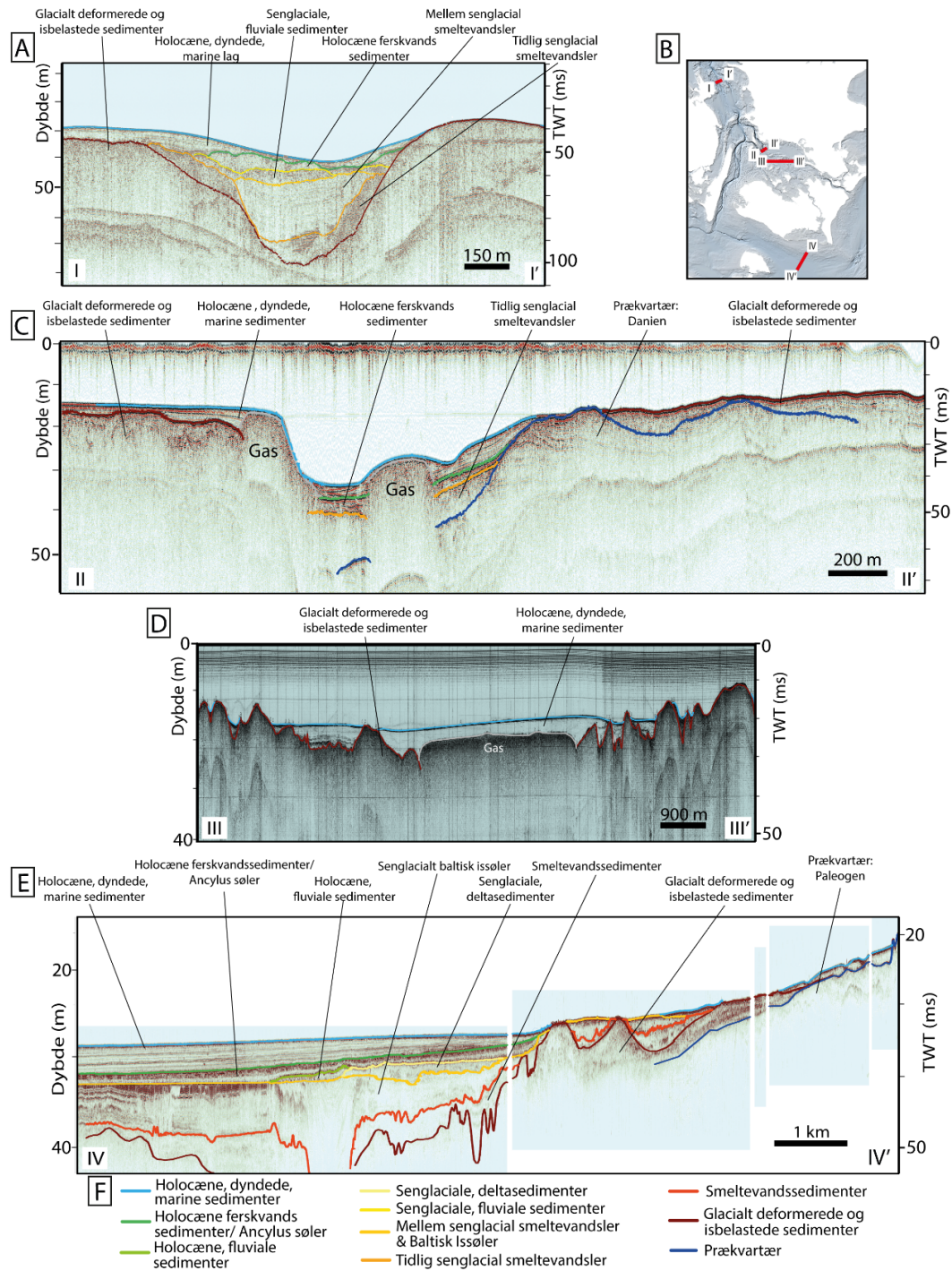
Tabel 12.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflekto- rer. Udbyggende klino- former. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk.	10	Lokale forekom- ster. Spredt i hele området.	Sand (mel- lem- til grovkornet)	Marin-/kyst-/ flakdannelser	
Mellem til Sen Holo- cæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer. Semi-transpa- rent. Lav til medium am- plitude.	>20	Nuværende batymetriske lav- ninger.	Ler, silt, gytje og dynd	Marin	
Tidlig Holo- cæn	Holocæne ferskvands- sedimenter	Parallelle kontinuerlige reflektorer. Semi-transpa- rent. Lav til medium am- plitude. Top horisont ofte en kraf- tig reflektor, hvorpå Holo- cæne, dyndede, marine sedimenter down- og on- lapper.	10	Udfyldning i Tidlig Holocæn flodsys- temer, i Store- bælts-kanalen og i daværende søer.	Ler, silt og gytje med indslag af tørv og ter- restrisk plante- ma- teriale	Lakustrin og flu- vial	

Tidlig Holocæn	Holocæne, fluviale sedimenter	Kaotisk i midten af Fæmern Bælt. Skråt hældende og downlappende reflektorer på lavere vanddybde. Lav til mellem amplitude.	5	Lokale forekomster 20 til 30 km sydvest for Gedser.	Sand (mellem til grovkornet)	Fluvial	
Sen senglacial	Senglaciale fluviale sedimenter	Kaotisk. Laminerede indslag forekommer. Mellem amplitude.	5	I Storebælts-kanalen mellem Fyn og Sjælland.	Sand (mellem til grovkornet)	Fluvial	
Sen senglacial	Senglaciale delta-sedimenter	Kaotisk med få skråtstiliede og downlappende reflektorer. Lav amplitude.	5	Lokale forekomster 20-30 km sydvest for Gedser.	Sand (mellem til grovkornet)	Delta	
Mellem senglacial	Senglacial smeltevandssler	Laminerede kontinuerlige refleksioner. Kan fremstå foldet. Semi-transparent. Lav til mellem amplitude.	50	I Storebælts-kanalen mellem Fyn og Sjælland.	Ler med indslag af silt og finsand	Lakustrin og fluvial	

Mellem senglacial	Senglacial Baltisk Issø- ler	Laminerende kontinuerlige refleksioner. Kan fremstå foldet og forkastet. Trans- parente indslag forekom- mer. Lav til mellem ampli- tude. Den øvre grænse er erosiv.	10	I Femern Bælt på store vanddybder.	Ler med indslag af silt og fin- sand	Gletsjer-proxi- mal, lakustrin	
Tidlig senglacial	Senglacial smeltevands- ler	Kaotisk seismisk facies med transparente og la- minerende indslag.	30	I Storebælts-kana- len mellem Fyn og Sjælland.	Ler med indslag af sand og grus	Gletsjer-proxi- mal, fluvial	
Glacial	Smeltevands- sedimenter	Kaotisk. Lav til mellem amplitude. Laminerende og transparente indslag kan forekomme.	10	I Femern Bælt.	Dårligt sor- teret sand og grus	Gletsjer-proxi- mal, fluvial	

Glacial	Slap moræne	Kaotisk. Mellem til høj amplitude. Kontinuerlige reflektorer kan forekomme. Adskilt fra de Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter af en reflektor med svag til mellem amplitude.	30	Mellem Samsø, Fyn og Sjælland.	Moræneler og -sand	Glacial	
Glacial	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Høj amplitude. Ofte med en ondulerende top horisont. Laminerende foldede og tektoniserede lag kan forekomme.	Ukendt	Hele området.	Moræneler og -sand	Glacial	
Prækvarter	Palæogen	Parallele, foldede og for-kastede reflektorer. Eroderet i toppen. I flere tilfælde optræder et transparent lag i toppen. Lav amplitude	Ukendt	Hele området undtagen i Smålandsfar-vandet og i Storebælt fra Sprogø til Nakskov.	Plastisk ler og mergel	Marin	
Prækvarter	Danien og Øvre Kridt	Parallele foldede og for-kastede reflektorer. Eroderet i toppen. Begrænset nedtrængning	Ukendt	I Smålandsfar-vandet og i Storebælt fra Sprogø til Nakskov.	Skrivekridt og kalk	Marin	



Figur 12.2 Eksempler på seismiske data fra det sydlige Storebælt og Femern Bælt som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Sparker seismisk profil i Storebælt. B) Oversigtskort. C) Sparker seismisk profil fra Smålandsfarvandet. D) Skannet seismisk profil fra Smålandsfarvandet. E) Sub-bottom profiler seismisk profil fra Femern Bælt. F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

12.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter er til stede i hele det sydlige Storebælt med få og begrænsede undtagelser, hvor den Prækvartære overflade er eksponeret ved havbunden. Enheden består typisk af moræneler og -sand, men smeltevandsaflejringer samt interglaciale marine og lakustrine aflejringer kan forekomme. Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter, men der kan forekomme laminerede og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende, som illustreret på Figur 12.2 E. I få tilfælde optræder der glacialtektoniske deformationer i enheden, blandt andet ved flere af israndslinjerne fra Det Ungbaltiske Isfremstød i området.

12.1.3 Slap moræne

Det er vanskeligt at adskille slap moræne fra glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, da begge enheder har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen er typisk sket ud fra boringsinformationer og/eller svage amplitudeændringer. Der ses ofte en kontinuerlig refleksion mellem de to enheder. I de tilfælde det har været muligt, er slap moræne tolket med i de senglaciale aflejringer, da enheden ikke betragtes som værende isoverskredet. Der er tolket slap moræne mellem Samsø, Sjælland og Fyn med en maksimal tykkelse på 30 m. Den forventede lithologi er morænesand og moræneler, som er transporteret over isen eller umiddelbart foran isen og derfor som nævnt ikke er blevet isbelastet.

12.1.4 Smeltevandssedimenter

Det er vanskeligt at adskille smeltevandsaflejringerne fra de glaciale aflejringer, da begge enheder som regel har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen er typisk sket ud fra boringsinformationer og/eller svage amplitudeændringer. I de tilfælde det har været muligt, er smeltevandssedimenter tolket med i de senglaciale aflejringer, da enheden ikke betragtes som værende isoverskredet. Der er tolket smeltevandssedimenter i Femern Bælt, som vist på Figur 12.2 E. Disse sedimenter må være aflejret kort tid efter isens tilbagetrækning fra området omkring 17.000 til 16.000 kal. år BP i et glaciofluvialt miljø (Heinrich et al., 2018; Hughes et al., 2016).

12.1.5 Tidlig senglacial smeltevandsler

Enheden kan kun tolkes lokalt i Storebæltskanalen mellem Fyn og Sjælland og til syd for Omø (Figur 12.2 A og B). Enheden har en maksimal tykkelse på 30 m mellem Fyn og Sjælland. Den seismiske facies er af kaotisk karakter med flere laminerede og transparente indslag. Der er kun få borer i enheden, som alle indeholder lamineret ler med et højt karbonat indhold, men grundet den til tider kaotiske seismiske facies forventes der indslag af sand og grus i enheden. Enheden er formentlig aflejret umiddelbart efter isens tilbagetrækning i området og kan muligvis korreleres med smeltevandssedimenterne i Femern Bælt. Andre studier har forslået, at enheden er aflejret i en lokal issø (Bennike et al., 2004; Jensen et al., 2005).

12.1.6 Senglacial, Baltisk Issøler

I det sydlige Storebælt kan senglacial, Baltisk Issøler kun tolkes i Femern Bælt, hvor det glaciofluviale miljø blev omdannet til et glaciolakustrint bassin fra ca. 16.000 kal. år BP og frem til 11.600 kal. år BP (Heinrich et al., 2018; Hughes et al., 2016). Enheden er op til 10 m tyk i de nuværende batymetriske lavninger i Femern Bælt. Den seismiske facies er lamineret med transparent indslag. De interne refleksioner toplapper på den øvre grænse, hvilket indikerer at enheden har været eroderet. Lokalt fremstår enheden foldet og forkastet. Boringer i området viser en lithologi bestående af ler med indslag af silt og finsand, se f.eks. Figur 12.3.

12.1.7 Mellem senglacial smeltevandsler

Mellem senglacial smeltevandsler kan tolkes i Storebæltskanalen mellem Fyn og Sjælland. Enhedens udbredelse begrænser sig til nedskårne kanaler, hvor tykkelsen lokalt kan være op imod 50 m (Figur 12.2 A). Det mellem senglaciale smeltevandsler har en lamineret semi-transparent seismisk facies. Den ældste datering af sedimenterne i Storebæltskanalen er på 14.300 kal. år BP, i boring 551016.127 (544001-1), se Figur 11.3, (Bennike et al., 2019). Andre studier har forslået, at enheden mellem Fyn og Sjælland er aflejringer fra den Baltiske Issø (Bennike et al., 2004; Jensen et al., 2005).

12.1.8 Senglaciale deltasedimenter

Over det senglaciale, Baltisk Issøler er der tolket en enhed på op til 5 m i Femern Bælt, som har en kaotisk til transparent seismisk facies (Figur 12.2 E). Lokalt kan der erkendes skråtstillede lag. Den øvre grænse er eroderet. Borekerner viser, at enheden består af omlejret materiale, som har en opad-finende kornstørrelsesfordeling. Enheden er tolket som værende aflejret under deltalignende forhold, og repræsenterer den endelige drænering af den Baltiske Issø (Heinrich et al., 2018).

12.1.9 Senglaciale, fluviale sedimenter

Over det mellem senglaciale smeltevandsler i Storebæltskanalen optræder der ofte et tyndt sandlag (Figur 12.2 A) med en tykkelse på 3-5 m. Sandlaget har en kaotisk seismisk facies, og tolkes som værende aflejret under fluviale forhold. Mellem Fyn og Sjælland er der to kulstof-14 dateringer af enheden, som begge viser en alder på ca. 12.000 kal. år BP. Mellem Fyn og Sjælland har Bennike et al. (2004) forslået, at enheden repræsenterer den endelige drænering af den Baltiske Issø, og den må således være aflejret samtidig med, eller umiddelbart efter, de senglaciale deltasedimenter i Femern Bælt.

12.1.10 Holocæne, fluviale sedimenter

I Femern Bælt er der en sandet enhed i bunden af lerede aflejringer fra Ancylus Søen, som er op til 5 m tyk. Tæt på tysk område har enheden en kaotisk og transparent seismisk facies, og danner flodbarre-lignende strukturer. På lavere vand er der tydelige skråtstillede lag i

enheden. Disse aflejringer er tolket som værende aflejret under det laveste relative vandniveau i begyndelsen af Holocæn ca. 11.600 BP. På denne tid var der i Femern Bælt området et system af flettede floder.

12.1.11 Holocæne ferskvandssedimenter/ Ancylus Sø-ler

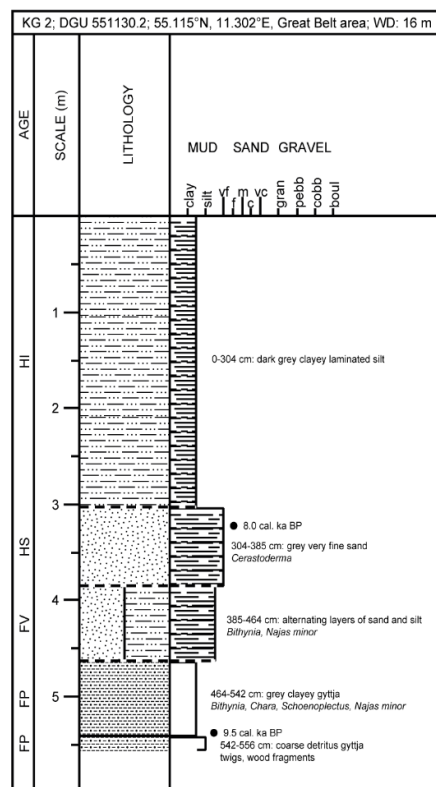
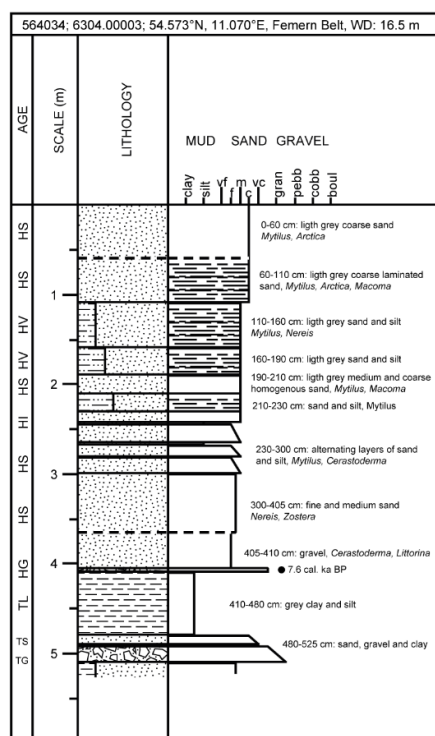
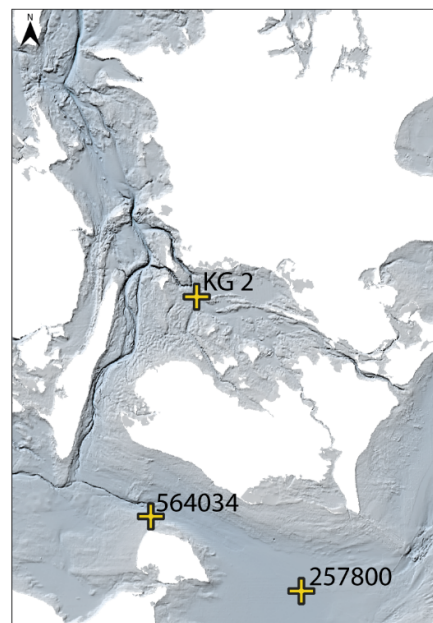
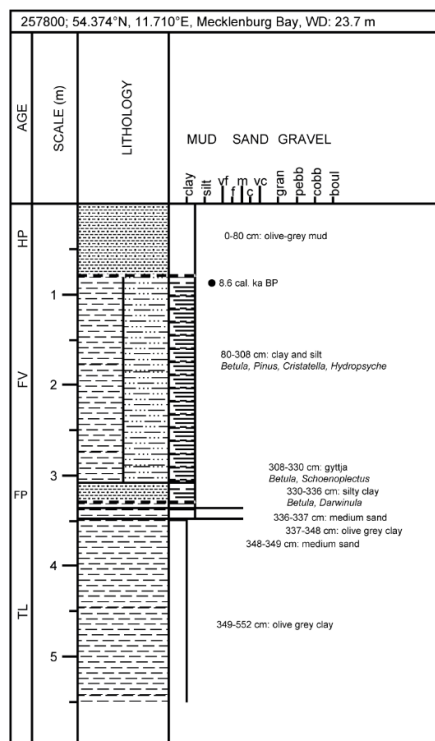
Vandstanden i Tidlig Holocæn var lav, men stigende, fra 11.700 til 7.600 kal. år BP i det sydlige Storebælt. På denne tid havde Femern Bælt forbindelse til den større Ancylus Sø i Baltikum, som drænerede mod nord via Storebæltskanalen. Der var ligeledes to større søer i Smålandsfarvandet, men det er uvist om de havde forbindelse til Ancylus Søen. De aflejrede sedimenter fra denne tid har en semi-transparent seismisk facies med interne reflektorer med lav amplitude. Top-horisonten er ofte en kraftig reflektor, hvorpå de Holocæne dyndede, marine sedimenter down- og onlapper. Den maksimale tykkelse af sedimenterne er 10 m. Lithologien består typisk af ler, silt og gytje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale. De yngste ferskvandssedimenter i Femern Bælt har en alder på 8.600 kal. år BP, og i Storebælt på 8.800 kal. år BP (Bennike et al., 2021a), se boring 257800 i Figur 12.3.

12.1.12 Holocæne, dyndede, marine sedimenter

De Holocæne, dyndede, marine sedimenter er aflejret i Mellem og Sen Holocæn under et højt relativt havniveau, der minder om det nuværende i det sydlige Storebælt. De største tykkelser findes i nuværende batymetriske lavninger i Femern Bælt, Smålandsfarvandet og mellem Fyn og Sjælland. Lithologien består overvejende af marint ler, silt, gytje og dynd, se f.eks. boring 257800 i Figur 12.3. Enheden har en lamineret seismisk facies med interne reflektorer med mellem- til lav amplitude, og transparente indslag forekommer. De ældste marine skaller i Storebæltskanalen mellem Fyn og Sjælland er dateret til ca. 8.200 kal. år BP. I Femern Bælt er de ældste marine skaller daterede til ca. 7.600 kal. år BP, se boring 564034 i Figur 12.3 (Bennike et al., 2021a). Der må således have været en brakvandsovergang fra 8.800 til 8.200 BP i Storebælt og fra 8.600 til 7.600 BP i Femern Bælt.

12.1.13 Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser

Kyst- og flakaflejringer forekommer lokalt i hele det sydlige Storebælt med en tykkelse på op til 10 m. De største forekomster er fundet syd for Langeland. De kan være aflejret under hele den Holocæne periode, og afspejler et stigende relativt havniveau i perioden. Lithologien består typisk af mellem- til grovkornet sand med grusede indslag. Enheden har en seismisk facies med interne udbyggende klintoformer med lav- til medium amplitude. Den ældste datering af Holocænt marint sand i området er på 8.000 kal. år BP, se boring 551130.2 (KG2) i Figur 12.3.

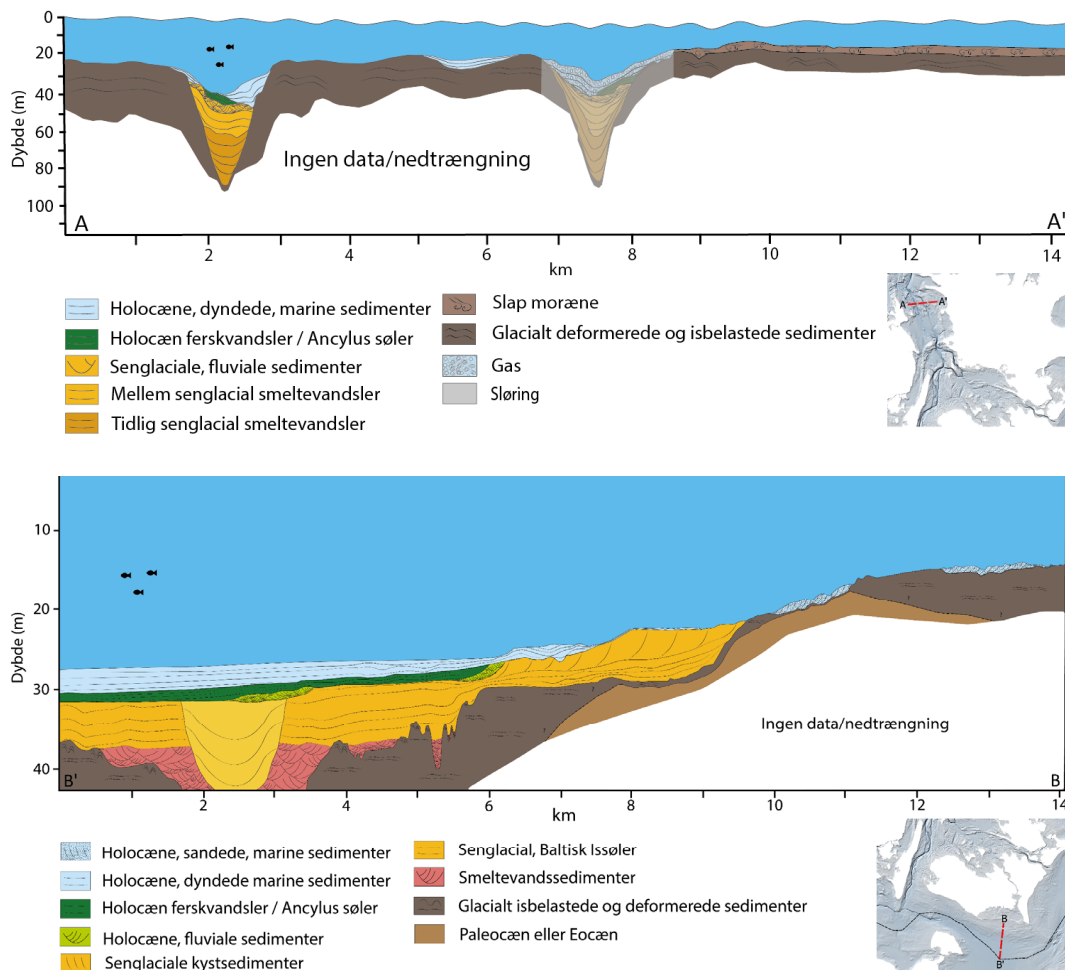


Figur 12.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området.

12.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i det sydlige Storebælt og Femern Bælt, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for området. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med et nordligt geologisk profil i Storebælt og et sydligt profil i Femern Bælt i Figur 12.4. Placeringen af profilerne er vist på Figur 12.9.



Figur 12.4 Et nordligt (øverst) og et sydligt (nederst) geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for det sydlige Storebælt og Femern Bælt. Placeringen af profilerne er vist på Figur 12.9.

Det nederste lysebrune lag på profilet i Femern Bælt (nederst) repræsenterer Prækvartære lag fra Paleocæn eller Eocæn, formentlig plastisk ler.

De mørkebrune lag på begge profiler repræsenterer en serie af ældre glaciale lag, til og med lag fra sidste istid, Weichsel, som har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Lagene består formentlig hovedsageligt af moræner, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og fin-kornede interglaciale sedimenter. På den sydlige del af profilet i Femern Bælt (nederst) er overfladen af de glaciale lag dybtliggende og meget uregelmæssig og afspejler en dyb og bred erosionskanal som senere er udfyldt. På profilet i Storebælt (øverst) fremstår overfladen mere jævn og eroderet ned til nogenlunde samme niveau udenfor et par markante nedskårne og udfyldte kanaler, hvor den vestlige er Storebæltsrenden.

Det overliggende brune lag på profilet i Storebælt (øverst) repræsenterer slap moræne, eller flydemoræne/afsmeltningsmoræne (indikeret med en "flydesignatur"), som ikke har været overskredet af isen og derfor ikke er overkonsolideret som de isbelastede glaciale aflejringer. Tilsvarende lag er blandt andet kortlagt i forbindelse med forundersøgelser til en mulig kommende Kattegatforbindelse (Prins et al., 2020). Tolkningen af slap moræne i området er primært baseret på boringsoplysninger og har generelt ikke været mulig alene på baggrund af de seismiske data. Storebæltsrenden mod vest og den nedskårne kanal mod øst er udfyldt med lokale senglaciale søaflejringer og Baltisk Issøler markeret med henholdsvis mørk orange og orange farve. Det grønne lag i Storebæltsrenden repræsenterer ferskvandsler fra Tidlig Holocæn. Øverst i kanalerne og i lavninger i den glaciale overflade ses marine dyndede aflejringer fra Sen Holocæn, vist med lyseblå farve og horisontal lagdeling. Den østlige udfyldte kanalstruktur ligger i et meget datatyndt område, og er primært tolket på baggrund af tilstedeværelsen af gas i sedimenterne på ældre kort fra råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988). Både dybden og udfyldningen af kanalen er således usikker og tilstedeværelsen af gas som slører de underliggende lag er markeret med boblesignatur og en grå sløring på profilet.

Over de glaciale lag ses på profilet i Femern Bælt en enhed af smeltevandssedimenter med rød farve i den centrale del af den store erosionskanal. Herover optræder tykke lag af Baltisk Issøler vist med orange farve og horisontal lagdeling. På den nordlige del af profilet ses mere sandede Baltiske Issø aflejringer vist med orange farve og skråtstillede lag, som formentlig kan associeres til den sidste dræning af den Baltiske Issø (Heinrich et al., 2018). I den sydlige del af profilet ses en markant nedskåret kanal, som er eroderet 10-15 m ned i de senglaciale lag og efterfølgende udfyldt igen med senglaciale aflejringer. Kanalen er tilsyneladende ret lokal eller har en orientering og et forløb, så den ikke har kunnet følges på nærliggende seismiske linjer; den er vist med en lidt lysere orange farve. Ligeledes på den sydlige halvdel af profilet ses to mindre enheder markeret med lys grøn farve og skråtstillede lag, som formentlig repræsenterer sandede flodaflejringer fra stadiet mellem den Baltiske Issø og Ancylus Søen (Heinrich et al., 2018). Over de senglaciale aflejringer ses igen på den sydlige del af profilet et relativt tyndt lag markeret med grøn som repræsenterer ferskvandsler fra Tidlig Holocæn. Herover ses relativt tykke marine dyndede Holocæne aflejringer vist med lyseblå og horisontal lagdeling. På den nordlige del af profilet ses over de glaciale aflejringer enkelte enheder af marine sandede Holocæne aflejringer markeret med lyseblå og skråtstillede lag.

12.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

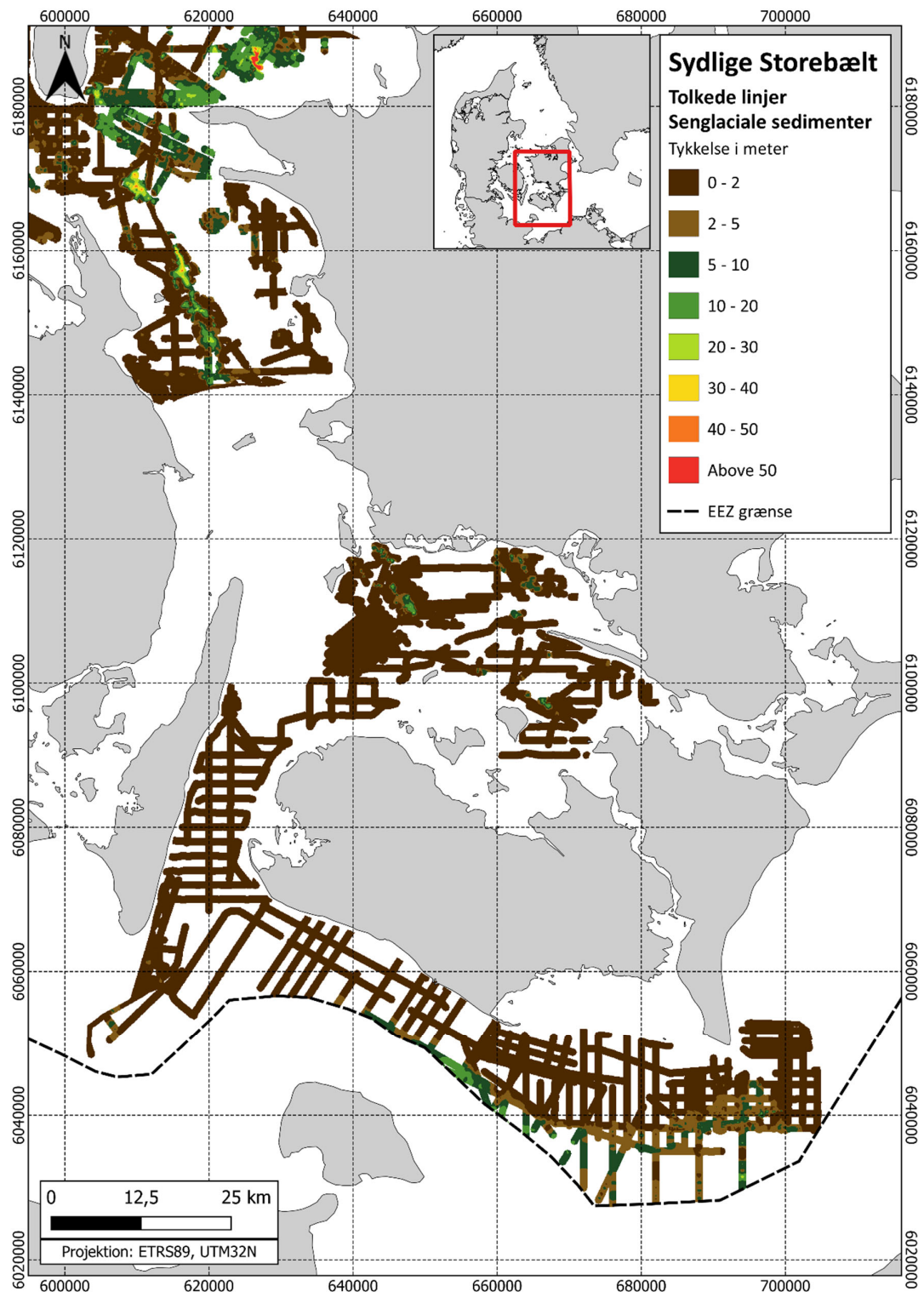
På Figur 12.5 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 12.6. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 12.6 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacielle aflejringer, og i meget store områder varierer tykkelsen fra 0-2 m. I den sydlige del af Femern Bælt ses dog et større område med tykkelser på op til 5 m, og længst mod syd tæt på Tysk farvand ses tykkelser på op til 20 m. I den østlige del af Smålandsfarvandet ses en række udfyldte lavninger og kanaler med tykkelser af de senglaciale aflejringer på op til 20 m og meget lokalt 30 m samt områder, hvor tykkelsen er usikker på grund af sløring fra gas i de overliggende sedimenter. I området øst for det nordlige Langeland, hvor tykkelsen er 0-2 m, er kortlægningen, i mangel af brugbare eksisterende seismiske data, baseret på GEUS' generelle kort over sedimenter på havbunden, som viser højtliggende moræneler. Nord for Langeland ses områder med tykkelser op til 5 m og her er tykkelserne baseret på kort fra tidligere råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988), igen i mangel af brugbare eksisterende seismiske data. Skov- og Naturstyrelsens kortlægning angiver tilstedeværelsen af adskillige mindre kanaler udfyldt med senglaciale aflejringer, og ud fra andre kortlagte områder og den generelle konceptuelle model for området kan disse både være udfyldt med lerede og sandede senglaciale aflejringer. Desuden angiver kortet også her områder med gas i sedimenterne som betyder større usikkerhed.

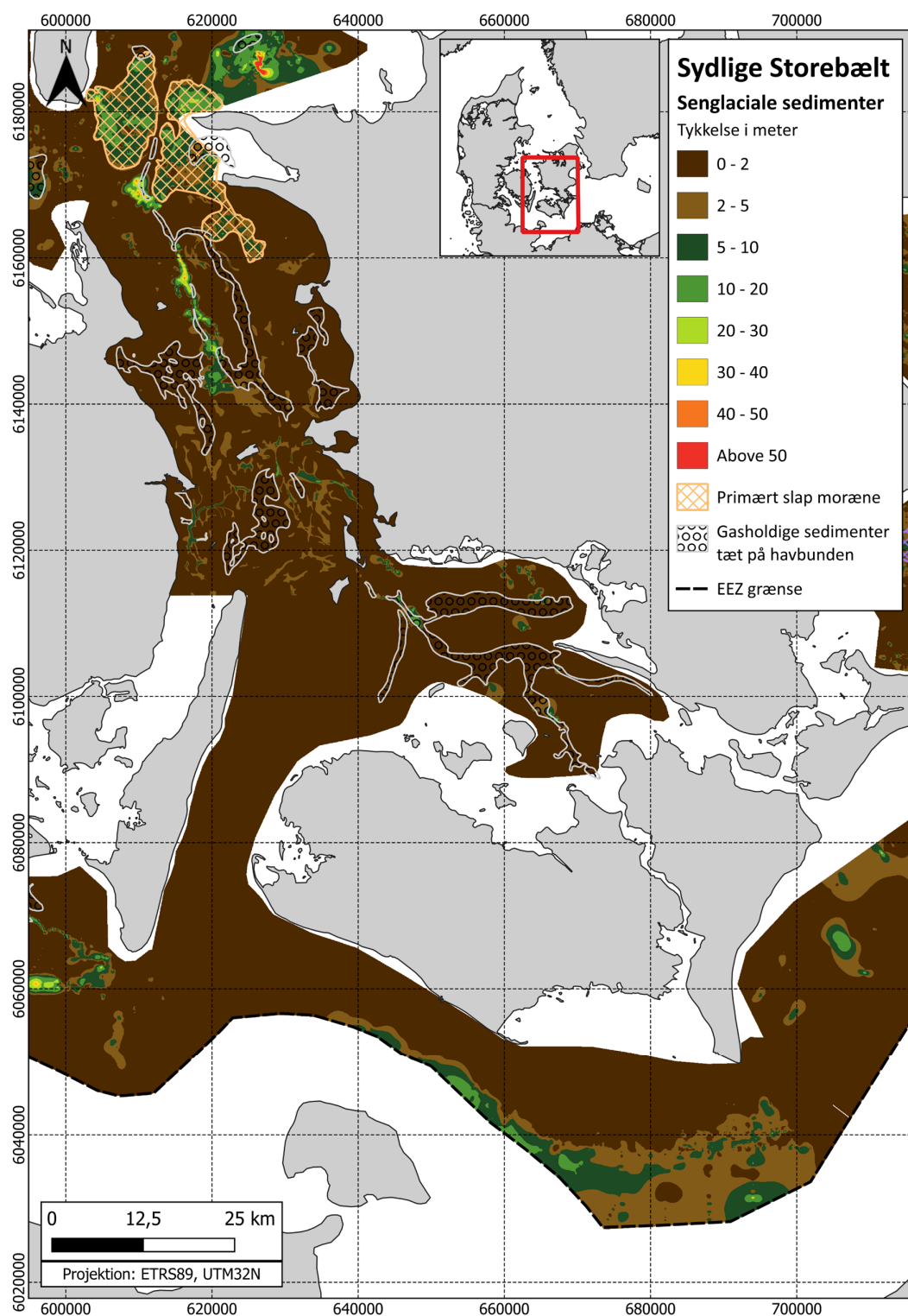
I den nordlige del af det kortlagte område ses flere større udfyldte kanaler og lavninger med tykkelser af senglaciale aflejringer på op til 20-30 m, og lokalt op til 40-50 m eller over 50 m. Disse er mere eller mindre sammenfaldende med eksisterende, batymetriske lavninger og repræsenterer palæofloder/-dræningssystemer udfyldt med blandt andet senglaciale aflejringer. Øst for Fyns Hoved og Kerteminde træder Storebæltsrenden tydeligt frem med store mægtigheder af senglaciale aflejringer og øst for denne løber en anden og mindre udfyldt kanal. Denne er tolket primært på baggrund af angivelse af gas i sedimenterne i de gamle kort fra Skov- og Naturstyrelsen (1988), da der kun eksisterer meget få tilgængelige seismiske linjer i netop dette delområde. De gamle kort angiver ikke her senglaciale sedimenter, men ud fra andre kortlagte områder og den generelle konceptuelle model for området forventes kanalen at have en vis dybde og ligesom Storebæltsrenden være udfyldt med større mægtigheder af lerede senglaciale aflejringer, som dog ikke fremgår af tykkelseskortet.

De senglaciale sedimenter består primært af bløde og finkornede aflejringer, hovedsageligt ler og silt med et meget lavt organisk indhold. De dybere dele af de senglaciale aflejringer i den sydlige del af Femern Bælt formodes dog at bestå af sandede glacielle smeltevandsaflejringer og i nogle af de mindre kanaler i området nord for Langeland kan sedimenterne med baggrund i Skov- og Naturstyrelsens (1988) råstofkortlægning bestå af senglaciale sand. Sydøst for Samsø er der i forbindelse med forundersøgelser til en mulig kommende Kattegatforbindelse kortlagt slap moræne (Prins et al., 2020), eller flydemoræne/afsmeltningsmoræne, som ikke har været overskredet af isen og derfor ikke er overkonsolideret som de isbelastede

glaciale aflejringer. Den slappe moræne er derfor medtaget i tykkelserne af de senglaciale aflejringer og områderne er markeret med orange krydsskravering. Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur.



Figur 12.5 Kortet illustrerer hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 12.6). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



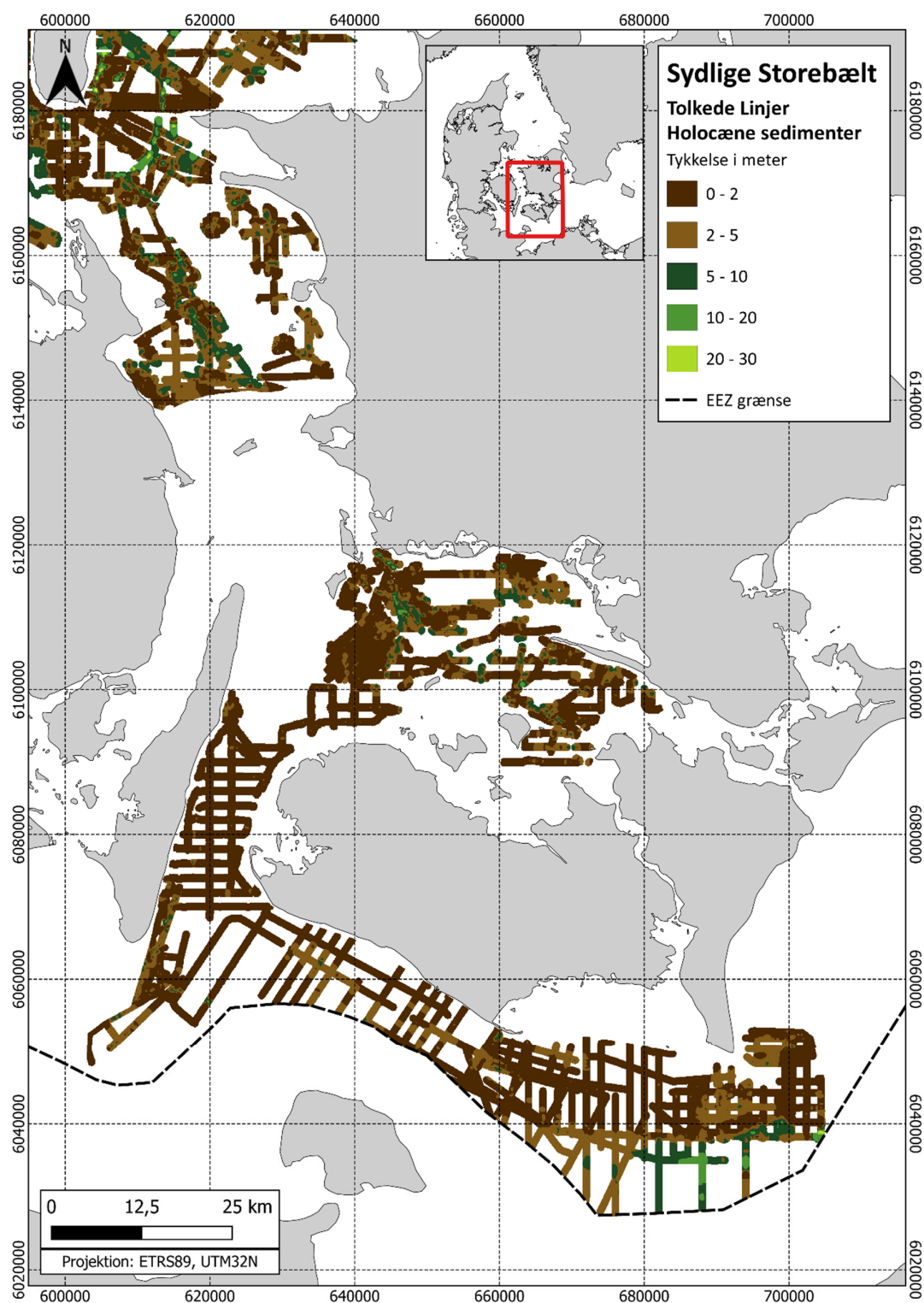
Figur 12.6 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter. Dele af kortet, som ikke er dækket af tilgængelige seismiske data, er baseret på ældre kort fra råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988). Områder med slap eller blød moræneler er vist med orange krydsskravering. Endelig er gas i sedimenterne nær havbunden vist med boblesignatur.

12.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

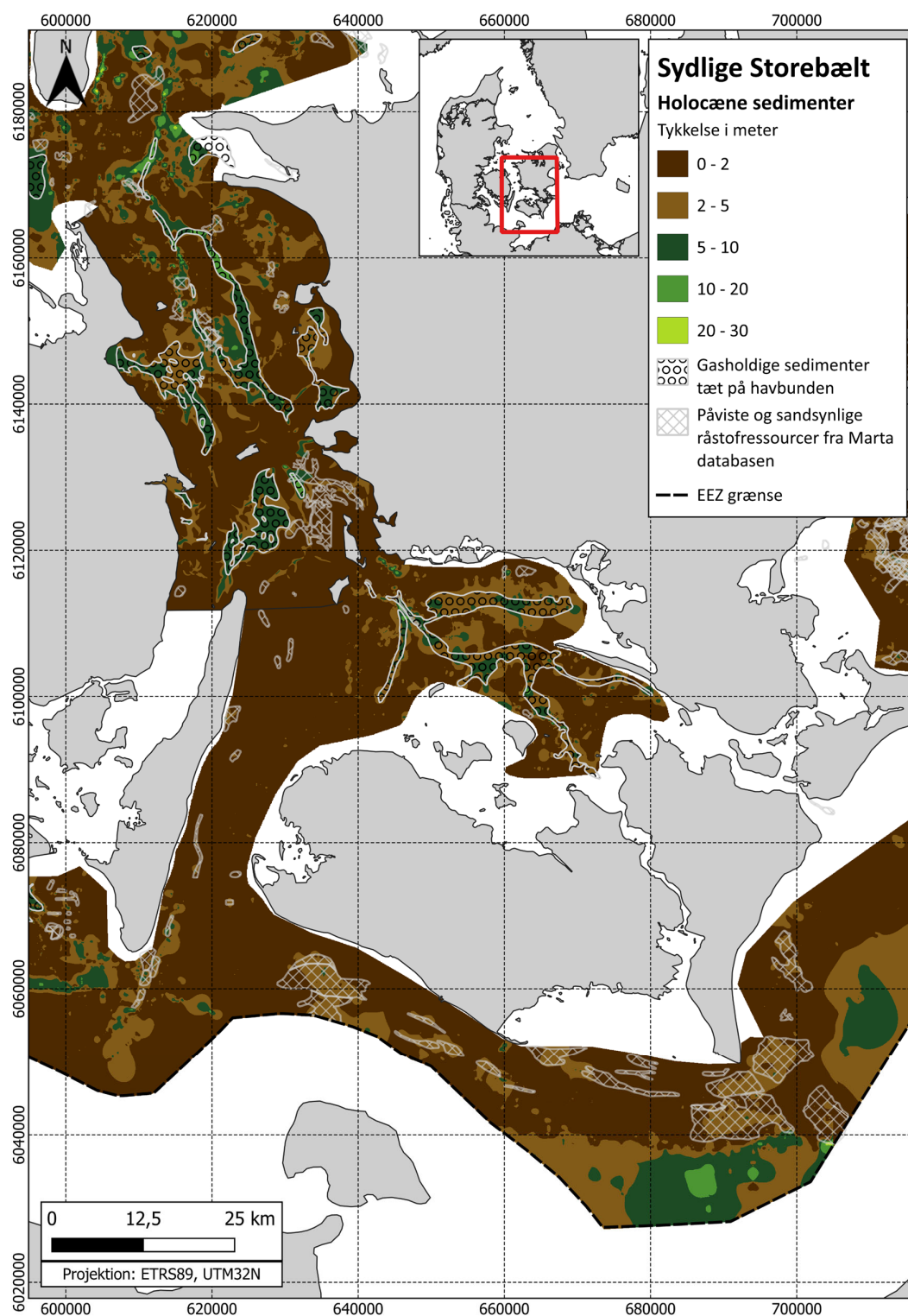
På Figur 12.7 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 12.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 12.8 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien over de senglaciale sedimenter. Tykkelsen varierer generelt fra 0 til 5 meter, men i den sydlige del af Femern Bælt ses tykkelser på op til 10-20 m. I området øst for Langeland er tykkelsen dog kun 0-2 m. Her er kortlægningen længst mod nord, i mangel af brugbare eksisterende seismiske data, baseret på GEUS' generelle kort over sedimenter på havbunden, som viser højtliggende moræner. I Smålandsfarvandet ses en række udfyldte kanaler/lavninger med tykkelser af Holocæne sedimenter på op til 10 m og med gas i sedimenterne, hvor tykkelserne er størst. I området fra nord for Langeland og op til nord for Sprogø samt i et område vest for Jammerland Bugt er kortlægningen baseret på kort fra tidligere råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988), også her i mangel af brugbare eksisterende seismiske data. Skov- og Naturstyrelsens kortlægning angiver tykkelsen af dyndede sedimenter som her antages at repræsentere de Holocæne aflejringer, og i nogle områder når op på 10 m og lokalt 20 m. Desuden angiver kortet også her områder med gas i sedimenterne som betyder større usikkerhed. Det samme gælder i den kortlagte kanal øst for Storebæltsrenden, hvor kortet viser op til 20 m Holocæn dynd og gas i sedimenterne. I den resterende nordlige del af området ses en række kanaler/lavninger med Holocæne tykkelser på op til 10-20 m og lokalt 30 m. Disse er flere steder sammenfaldende med nuværende batymetriske lavninger, som f.eks. den nuværende Storebæltsrende samt renden umiddelbart øst for Samsø, og repræsenterer tidligere dræningssystemer for den Baltiske Issø og Ancylus Søen som er delvist udfyldt med Holocæne marine sedimenter.

De Holocæne sedimenter består overvejende af bløde og finkornede aflejringer, men en række påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering på Figur 12.8 og i disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter. Gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur.



Figur 12.7 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 12.8). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



Figur 12.8 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering og gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur.

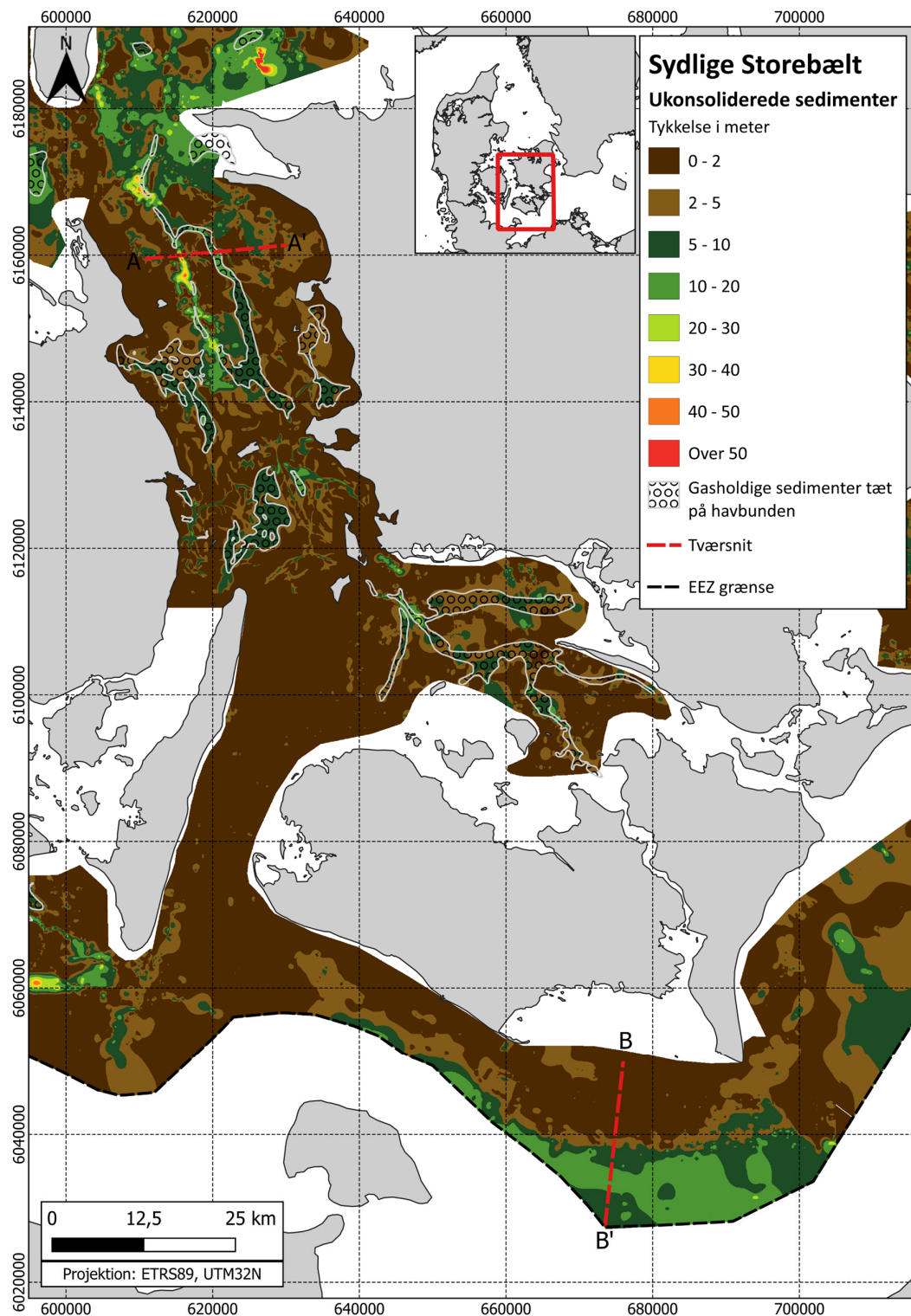
12.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 12.9 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde og som overligger de ældre, og typisk mere hårde, glaciale lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne glaciale moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglaciale og Holocæne tykkelseskort. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker. Beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 12.4 er vist på kortet.

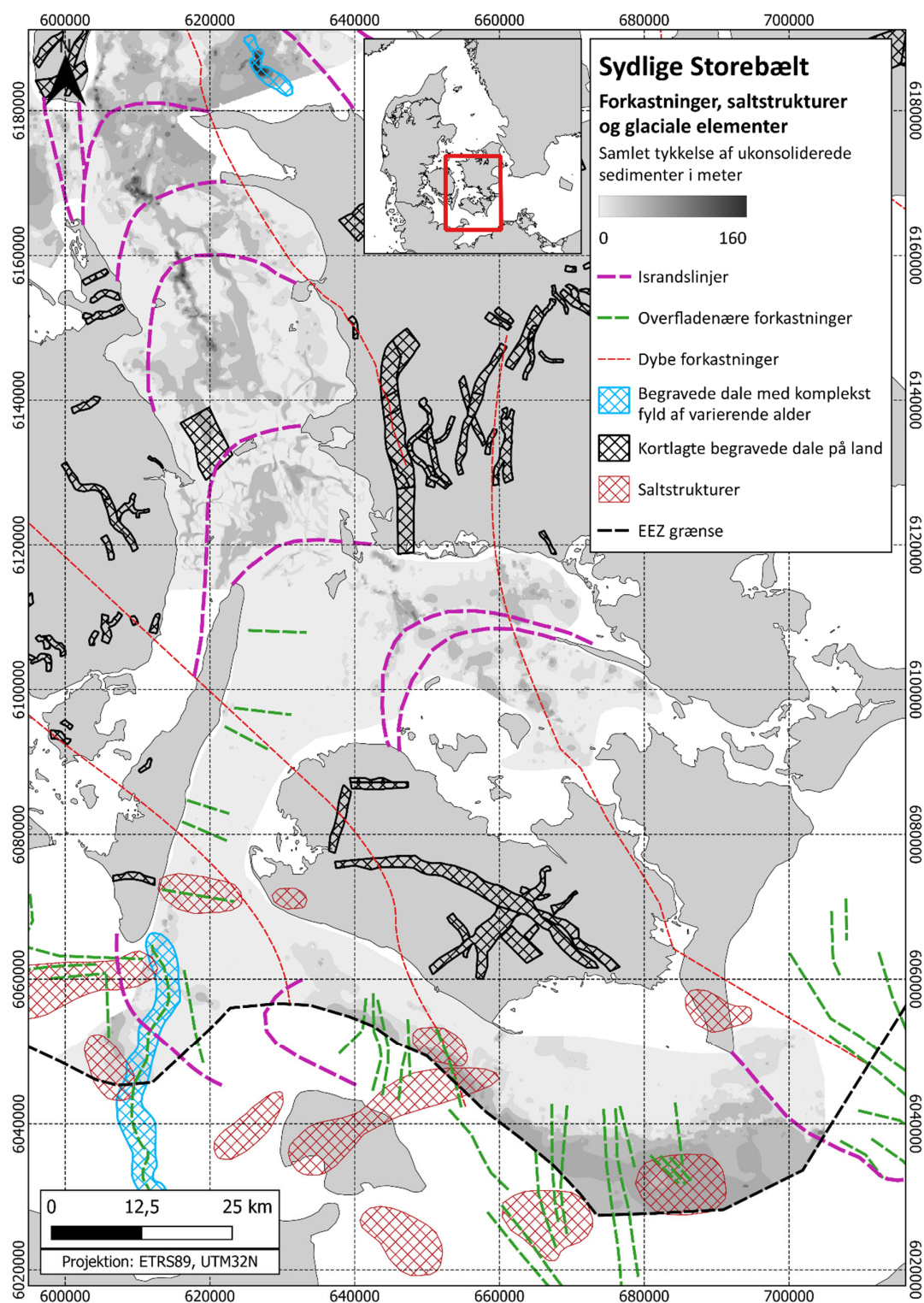
Kortet i Figur 12.9 viser generelt tykkelser på 0-5 m, men i området øst for Langeland er tykkelsen dog kun 0-2 m. I den sydlige del af Femern Bælt ses tykkelser på op til 10-20 m og i Smålandsfarvandet ses en række udfyldte kanaler/lavninger med tykkelser på op til 10-20 m, lokalt 30 m, og med gas i sedimenterne, hvor tykkelserne er størst. I området øst for den nordlige del af Langeland er kortlægningen, i mangel af brugbare seismiske data, baseret på GEUS' generelle kort over sedimenter på havbunden, som viser højtliggende moræner. I området fra nord for Langeland og op til nord for Sprogø samt i et område vest for Jammerland Bugt er kortlægningen baseret på kort fra tidligere råstofkortlægning foretaget af Skov- og Naturstyrelsen (1988), igen i mangel af brugbare eksisterende seismiske data. Nord for Langeland er den samlede tykkelse af ukonsoliderede aflejringer op til 10 m og lokalt 20 m i adskillige mindre udfyldte kanaler/lavninger. Nord for Sprogø ses lokalt tykkelser op til 30-40 m og lokalt over 50 m, blandt andet i Storebæltsrenden og en udfyldt kanal øst for denne, hvor kortlægningen også er baseret på de gamle kort fra Skov- og Naturstyrelsen (1988). De mange kanaler/lavninger i den nordlige del af området er flere steder sammenfaldende med nuværende batymetriske lavninger, som f.eks. den nuværende Storebæltsrende og kanalen øst for denne samt renden umiddelbart øst for Samsø, og repræsenterer palæofloder/-dræningssystemer som efterfølgende kun er blevet delvist udfyldt med senglaciale og Holocæne sedimenter.

I Figur 12.10 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i den dybe undergrund og overfladenære forkastninger er vist med henholdsvis rød krydsskravering og grønne stiplede streger (Al Hseinat & Hübscher, 2017) og der ser flere steder ud til at være en sammenhæng mellem de dybe saltstrukturer og beliggenheden af overfladenære forkastninger. Tolkede begravede tunneldale i området er vist med blå krydsskravering, og der er således kortlagt en større, nord-syd gående begravet dal syd for Langelands østkyst i et område med flere overfladenære forkastninger med samme orientering. Kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk) og i Smålandsfarvandet ser der ud til at være en sammenhæng mellem de kortlagte begravede dale på land og de udfyldte kanaler til havs. Israndslinjer i området kendt fra litteraturen (Kjær et al., 2003) eller tolket i nærværende projekt er vist med lilla stiplede streger; også her synes der at være en sammenhæng mellem israndslinjer i Smålandsfarvandet og de udfyldte

kanaler samt begravede dale på land, som kan være dannet, eller genbrugt, af smeltevand fra isen. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 12.9 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 12.4 angivet. Områder med overfladenær gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.



Figur 12.10 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund og overfladenære forkastninger (Al Hseinat & Hübscher, 2017), tolkede begravede tunnel-dale i området, israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Kjær et al., 2003) samt områder på land med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

13. Øresund til Gedser

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af området fra Øresund til Gedser. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med fire geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glacial lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glacial lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 13.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i området. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

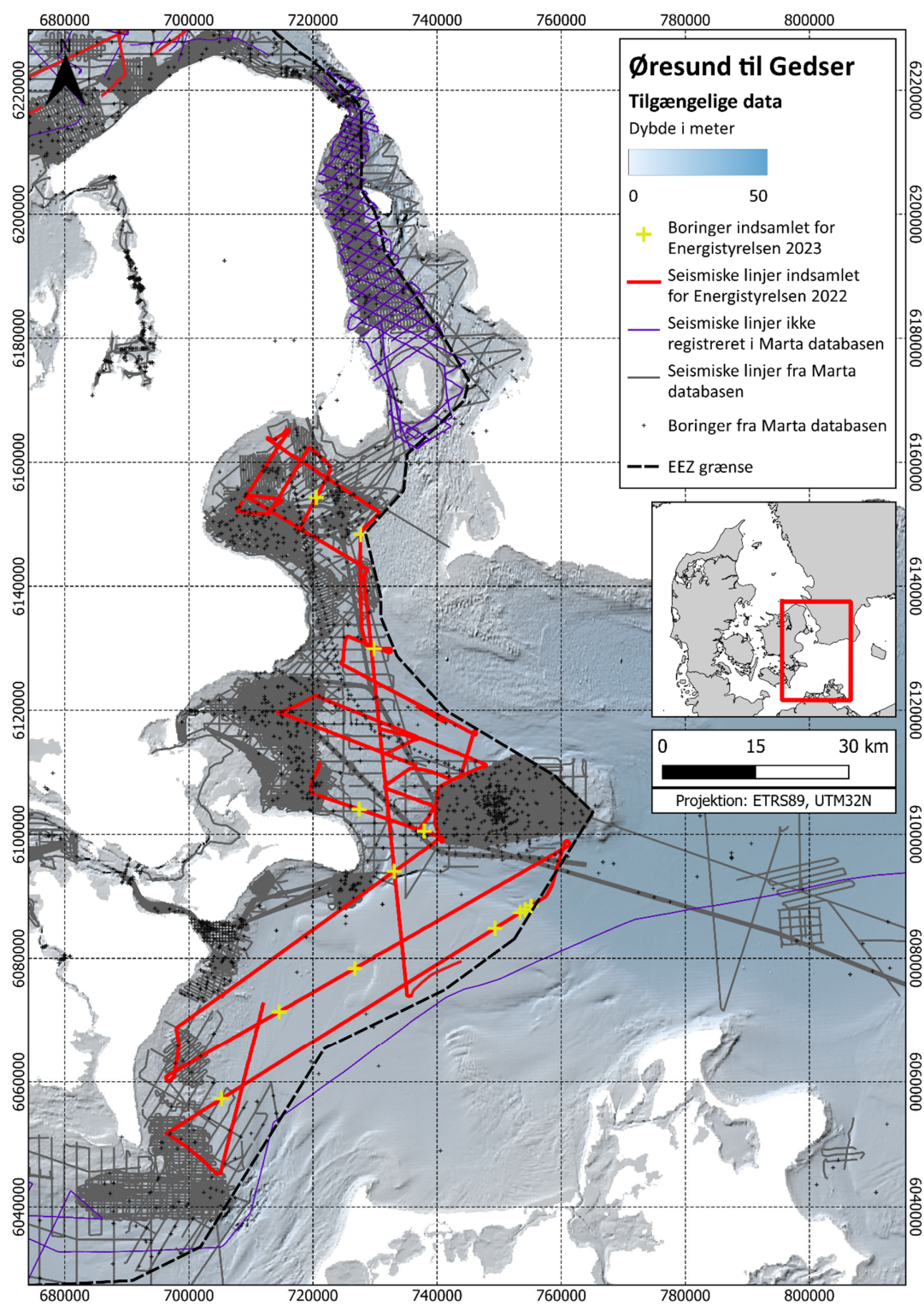
Øresund er dækket af seismiske linjer indsamlet i 1974 af Geoteknisk Institut og Sveriges Geologiske Undersøgelse. Tolkninger af disse data blev foretaget af Kuijpers (1994) for Skov- og Naturstyrelsen. Kortlægningsresultaterne fra dette arbejde, der dækker hele Øresund, er digitaliseret og anvendt i forbindelse med nærværende arbejde, hvilket har givet de bedst tilgængelige, sammenhængende informationer om tykkelsen af de sen- og postglaciale aflejringer, glacial aflejringer på havbunden og områder med gas i sedimenterne.

En tilsvarende digitalisering af ældre kortlægningsresultater er anvendt i Køge Bugt baseret på råstofkortlægning udført af Skov- og Naturstyrelsen (1987) og for havbunden øst for Falster, hvor kortlægningen blev udført i forbindelse med en råstofkortlægning for Skov- og Naturstyrelsen (Kuijpers, 1991). Tolkningerne er baseret på ældre seismiske data, der dog ikke har været tilgængelige for projektet.

Kortlægningen af Kriegers Flak området er baseret på data og publicerede resultater udført for Energinet som en del af forundersøgelserne til Kriegers Flak I OWF (Rambøll, 2013) og Kriegers Flak North/South (Jensen & Bennike, 2022).

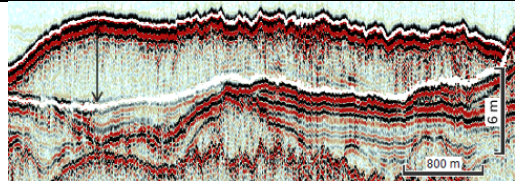
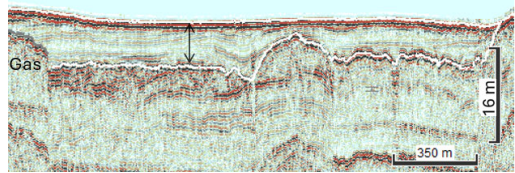
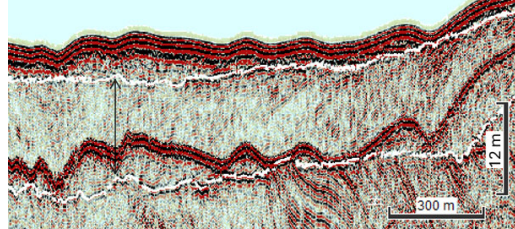
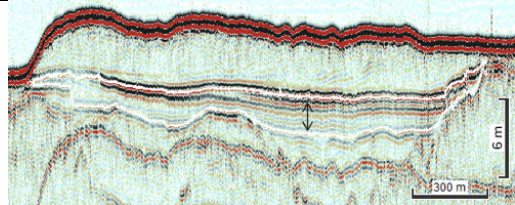
13.1 Seismiske enheder

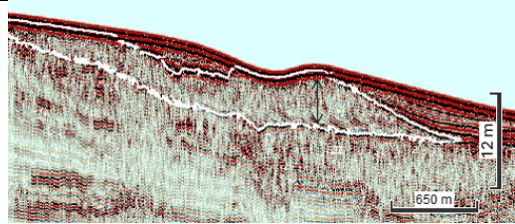
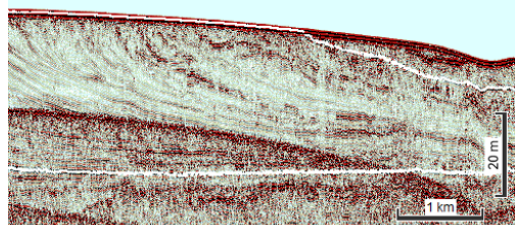
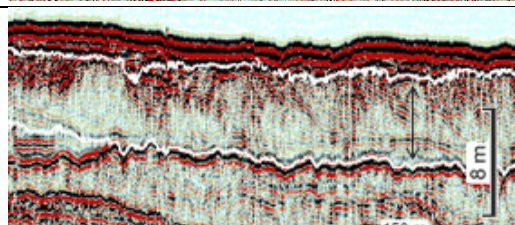
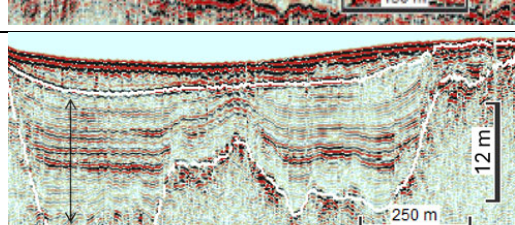
I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 13.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 13.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

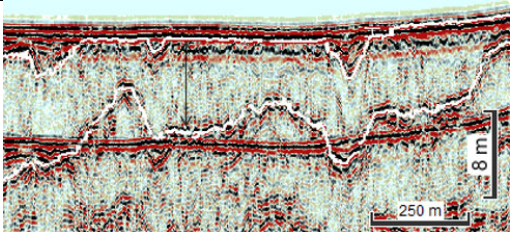
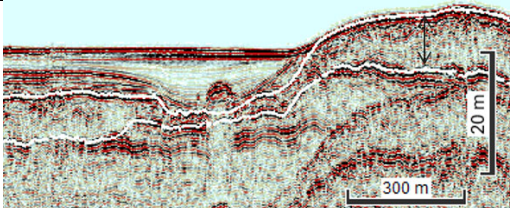
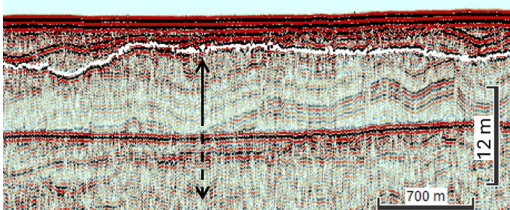
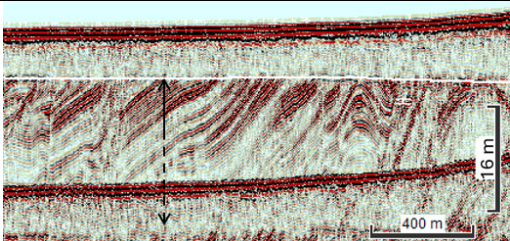


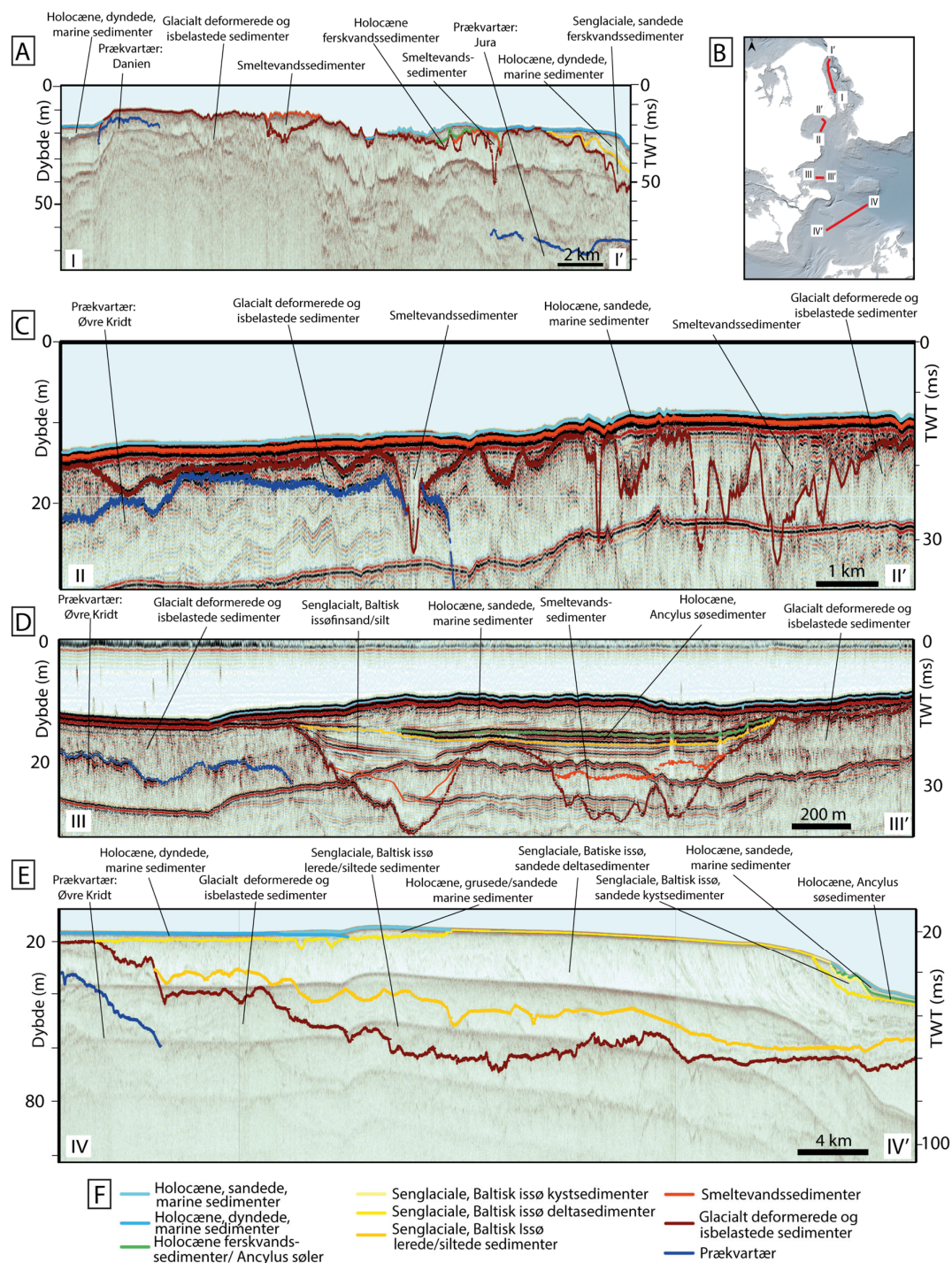
Figur 13.1 Oversigtskort over området. Dybdekortet er modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og boringer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

Tabel 13.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer. Udbyggende klinoformer. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk.	10	Lokale forekomster. Spredt i hele området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin-/kyst/flakdannelser	
Mellem til Sen Holocæn	Holocæne, dyndede, marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude.	>20	Nuværende batymetriske lavninger.	Ler, silt, gytje og dynd	Marin	
Tidlig Holocæn	Holocæne deltasedimenter	Kaotisk med få hældende og downlappende reflektorer. Lav til medium amplitude.	20	Mellem Helsingør og Helsingborg.	Sand (mellem til grovkornet)	Delta	
Tidlig Holocæn	Holocæne ferskvands-sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude. Top horisont ofte en kraftig reflektor, hvorpå Holocæne, dyndede, marine lag down- og onlapper.	10	Udfyldning i Tidlig Holocæne søer og kanaler i Faxe Bugt, Øresund og syd for Kriegers Flak.	Ler, silt og gytje med indslag af tørv og terrestrisk plantemateriale	Lakustrin og fluvial	

Sen senglacial	Senglaciale kystsedimenter	Kaotisk med få skråt hældende og downlappende reflektorer.	10	15 km syd for Kriegers Flak.	Sand (mellem til grovkornet)	Kystnær	
Sen senglacial	Senglaciale deltasedimenter	Skråt hældende reflektorer, som er vandrette nær basis. Eroderet i toppen.	40	15 til 40 km sydvest for Kriegers Flak.	Sand (fin til mellemkornet)	Delta	
Mellem senglacial	Senglaciale kystsedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer.	10	På Kriegers Flak og i Faxe Bugt.	Sand (mellem til grovkornet)	Kystnær	
Tidlig senglacial	Baltisk Issø finsand/silt	Laminerede kontinuerlige reflektorer.	20	Fyld i begravede dale mod syd i Faxe Bugt.	Finsand og silt	Lakustrin	

Glacial	Smeltevands-sedimenter	Kaotisk. Lav til mellem amplitude.	20	Lokale forekomster i hele området. Begrænser sig primært til begravede dale.	Dårligt sorteret Sand og Grus	Gletsjer-proximal, fluvial	
Glacial	Glacialt deformederede og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Mellem til høj amplitude. Stedvist med diskontinuerlige folder og dislokationer.	Ukendt	Udbredt i hele området	Moræneler, morænesand samt ispåvirket/isoverskredet ler, silt og sand	Glacial	
Prækvarter	Øvre Kridt og Danien	Parallelle, foldede og forkastede reflektorer.	Ukendt	Syd for Helsingør	Skrivekridt og kalk	Marin	
Prækvarter	Jura	Skråstillede høj-amplitude interne reflektorer. Kan være forkastede og foldede. Eroderet i toppen. Begrænset nedtrængning.	Ukendt	Nord for Helsingør	Sandet muddersten	Marin	



Figur 13.2 Eksempler fra Øresund, Køge Bugt, Faxe Bugt og vestlige Østersø på sparker seismiske data som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil i Øresund. B) Oversigtskort. C) Seismisk profil i Køge Bugt. D) Seismisk profil i Faxe Bugt. E) Seismisk profil i vestlige Østersø. F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

13.1.1 Prækvaltære strata

Det Prækvaltære underlag varierer i lithologi og alder fra Øresund i nord til Gedser i syd. Nord for Helsingør består det Prækvaltære underlag af ler- og sandstensaflejringer fra Jura på den sydlige flanke af inversionszonen-/Sorgenfrei–Tornquist Zonen. Seismisk fremtræder aflejringerne ofte med parallelle, skråstillede, interne reflektorer med høj amplitude og med antydninger af, at være foldede og gennemskåret af forkastninger. Den øvre grænse er eroderet. Syd herfor, i Det danske Bassin, findes kalkaflejringer fra Danien i et område fra Helsingør til Stevns og Kriegers Flak. Fra Kriegers Flak til Gedser og i en del af Køge Bugt består Prækvaltæret af aflejringer fra Øvre Kridt i form af skrivekridt.

Kridt- og kalkaflejringer fra Øvre Kridt og Danien har en høj-amplitude øvre erosiv grænse, med interne parallelle og foldede reflektorer. De interne reflektorer bliver hurtigt svagere med dybden, da den seismiske energi ikke kan trænge igennem den hårde lithologi. Lokalt findes glaciale deformationer i de øverste dele af kalkaflejringerne.

Fælles for de Prækvaltære aflejringer er, at den øvre grænse er eroderet i forbindelse med de Kvartære isoverskridelser.

13.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glacialt isbelastede sedimenter er til stede i hele området fra Øresund til Gedser. De består typisk af moræneler og -sand, men ler, silt og sand kan også forekomme. Det seismiske refleksionsmønster er kaotisk med mellem til høj amplitude. Stedvist ses diskontinuerlige folder og dislokationer, men med stor intern variation afhængig af graden af ispåvirkning. De glaciale aflejringer overlejrer den Prækvaltære flade, som det dog ikke har været muligt at kortlægge seismisk i store dele af området.

I Øresundsregionen ligger de glaciale aflejringer generelt tæt på havbunden, dog lokalt med erosionskanaler dannet af smeltevandssfloderne under deglaciationen. I det nordligste Øresund stiger dybden til den glaciale flade, der her overlejres af senglaciale og Holocæne sedimenter.

I Køge Bugt er den højtliggende kalkoverflade (Kridt-Danien) overlejret af en serie af moræneaflejringer. Området præges af en række udfyldte kanaler/begravede dale dannet i forbindelse med Weichsel deglaciationen. Moræneaflejringerne er præget af deformationer fra adskillige gletsjeroverskridelser, der delvist har sammenblandet moræneaflejringer med smeltevandssedimenter.

I Faxe Bugt kan deformationer af de glaciale aflejringer generelt henføres til Hovedfremstødet i Weichsel, mens israndsstrøgene i den ydre del af Faxe Bugt først blev dannet under Bæltfremstødet. De oppressede kridtflager i Møns Klint udgør en landværts pendant til deformationsområderne i havbunden.

Kriegers Flak området er præget af højtliggende moræneaflejringer fra Weichsel. Fra boringer på selve Kriegers Flak kendes to moræneenheder med forskellige geotekniske egenskaber.

Moræneler og -sand er truffet i en række boringer i alle delområder, se f.eks. boring 551230.45 (FB-7) og boring 551218.70 (KB-9) i Figur 13.3.

13.1.3 Slap moræne

Fra boringer i Faxe Bugt kendes sporadisk tilstedeværelsen af aflejringer med glaciale ukonsoliderede sedimenter, som delvis udfylder lavninger i det glaciale terræn, se boring 551230.45 (FB-7) i Figur 13.3. Aflejringerne kan karakteriseres som slap moræne eller flydemoræne, der ikke har været isbelastet. Flydemorænen har ikke kunnet kortlægges seismisk. Den er vanskelig at adskille fra glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, da begge enheder har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen er typisk sket ud fra boringsinformationer og/eller svage amplitudeændringer. Der er ofte en kontinuerlig refleksion mellem de to enheder. Den forventede lithologi er ukonsolideret morænesand og moræneler, som er transporteret over isen eller umiddelbart foran isen.

13.1.4 Smeltevandssedimenter

Det er vanskeligt at adskille smeltevandsaflejringer fra de glaciale aflejringer, da begge enheder som regel har en kaotisk intern seismisk facies. Adskillelsen kan dog ske ud fra svage amplitudeforskelle, enhedernes morfologi/daludfyldninger, deres relation til den glaciale flade og ud fra boringsinformationer. Smeltevandssedimenter er tolket med i den senglaciale enhed, da de ikke betragtes som værende isoverskredet.

Da isranden trak sig tilbage sydpå i Øresund, strømmede enorme mængder smeltevand nordpå foran den tilbagetrækkende isrand. Det resulterede i et kanaliseret Øresundsmiljø med eroderede dybe huller og kanaler, der blev udfyldt med usorterede sandede og grusede smeltevandssedimenter.

I Køge Bugt formodes en række dalsystemer mod nordvest og vest at være fortsættelser af tunneldale på land, og de er således dannet af sub-glacialt smeltevand. Dalstrøgene i den nordlige del af Køge Bugt er koncentreret omkring nordvest-sydøst orienterede forkastningszoner i kalken. Disse senglaciale kanalsystemer er udfyldt med smeltevandsaflejringer kun få meter under havbunden.

I Faxe Bugt tolkes enheden af smeltevandssedimenter på baggrund af enhedens beliggenhed i depressioner i den isbelastede overflade og dens seismiske karakter. Den øvre grænse til de overliggende enheder fremtræder oftest seismisk diffus.

Smeltevandsaflejringer eller senglaciale fluviale aflejringer er truffet i flere boringer Øresund, Køge Bugt og Faxe Bugt, se f.eks. boring 551226.76 (FB-11) og boring 551218.70 (KB-9) i Figur 13.3.

13.1.5 Senglaciale, Baltiske issøsedimenter

I tilknytning til afsmeltningen i senglacialtiden fra cirka 16.000 kal. år BP til 11.600 kal. år BP opstod den Baltiske Issø som et glacio-lakustrint miljø i Østersøbassinet. I de dybeste og distale dele af søen i Arkonabassinet syd og sydvest for Kriegers Flak og som fyld i begravede dale i Faxe Bugt findes aflejringer af smeltevandsler og -silt og finsand, der seismisk fremstår som laminerede, kontinuerlige reflektorer med en semi-transparent facies.

Da vandstanden i den seneste fase af den Baltiske Issø kulminerede, blev der udviklet kyst- og stranddannelser/barriereø-systemer. Kystdannelser øst for Falster og på Kriegers Flak tolkes dannet under den Baltiske Issøs maksimum. Finsandede deltaudbygninger i området øst for Falster og sydvest for Kriegers Flak med tykkelser større end 20 m repræsenterer denne fase. Seismisk fremstår disse som skråt hældende reflektorer med downlap og en øvre erosiv grænse. Da vandstanden igen faldt i forbindelse med dræningen af den Baltiske Issø, blev der lokalt syd for Kriegers Flak aflejret kystnære, finsandede facies over del-tasedimenterne, som linseformede enheder med skråt hældende, downlappende reflektorer.

Mellem 16.000 og 15.00 BP var den nordlige del af Øresund præget af marine forhold og Øresund spillede en vigtig rolle i dræningen af den Baltiske Issø. Nord for Helsingør blev der dannet et stort delta.

Aflejringer fra den Baltiske Issø er blandt andet truffet i boring 541208.2 (KK-03), se Figur 13.3, hvor den nederste enhed repræsenterer Baltisk Issøler, der overlejres af enheder af siltede og sandede mere kystnære facies.

13.1.6 Holocæne ferskvandssedimenter

For omkring 11.700 år siden fik Østersøen forbindelse til Kattegat via smalle stræder i den sydlige del af Midtsverige, og der blev etableret marine forhold i Østersøen (Yoldia Havet). Men som følge af den isostatisk landhævning blev Ancylus Søen dannet i Østersøområdet i den efterfølgende periode. Ancylus Søen havde sit højeste niveau omkring kote -20 m i den sydligste del af Østersøen. Seismiske enheder, der repræsenterer Ancylus Søen, er kortlagt i Faxe Bugt og sydvest for Kriegers Flak. Seismisk fremstår enheden semi-transparent med parallelle kontinuerlige reflektorer. Top-horisonten er ofte en kraftig reflektor. Den maksimale tykkelse af enheden er 4-5 m. Lithologien består typisk af ler, silt og gytje med indslag af tørv.

Den isostatisk landhævning og faldet i det relative havniveau medførte, at store dele af Øresund frem til omkring 10.000 BP var tørlagt land med skove, søer og moser. Tørv med in situ rødder, der er fundet i boring 551203.44 (554103), se Figur 13.3, i den nordlige del af Øresund, syd for Hven, er dateret til 10.339 kal. år BP, svarende til Tidlig Holocæn, og er samtidig med Ancylus Søens udvikling.

Tørv fra lokale moser er gennemboret i boring 541208.2 (KK-03, dateret 11.269 kal. år BP) og boring 551226.76 (FB-11, dateret 11.287 kal. år BP), se Figur 13.3.

13.1.7 Holocæne, sandede, kyst- og flakdannelser

I Faxe Bugt blev der aflejret strand- og barriereø-systemer i den sidste fase af den Baltiske Issø. Disse aflejringer er blevet omlejret i flere efterfølgende faser. Første gang i Tidlig Holocæn i forbindelse med Ancyclus Søens højeste vandstand. Anden gang under Littorina-transgressionens stigende havniveau ca. 8.000 BP, hvorved stranddannelserne blev flyttet flere km mod vest i Faxe Bugt. Aflejringerne herfra findes i dag spredt i området som bankeformede, marine sandaflejringer med tykkelser på op til 10 m. Seismisk fremstår de ofte med skråt hældende, lav til medium amplitude reflektorer.

På overfladen af Kriegers Flak findes en meget stor sand og grus kystaflejring (oddeplatform) fra den Baltiske Issø (Jensen, 2013). Til forskel fra Faxe Bugt havde Yoldia Havet og Ancyclus Søen ikke mærkbar effekt på Kriegers Flak. Men i forbindelse med Littorina-transgressionen for omkring 7.000 til 8.000 år siden fortsatte prograderingen af oddeplatformen på skuldrene af den oprindelige Baltiske Issø oddeplatform.

I Køge Bugt findes spredte, Holocæne, marine sandbanker af omlejrrede smeltevandssedimenter. Øst for Falster findes Holocæne, marine sand- og grusaflejringer, hvis oprindelse er omlejrrede, glaciale sedimenter fra de nærliggende, højtliggende moræneområder.

Holocæne kystaflejringer er gennemboret i mange borer fra Faxe Bugt, blandt andet i boring 551226.76 (FB-11), se Figur 13.3.

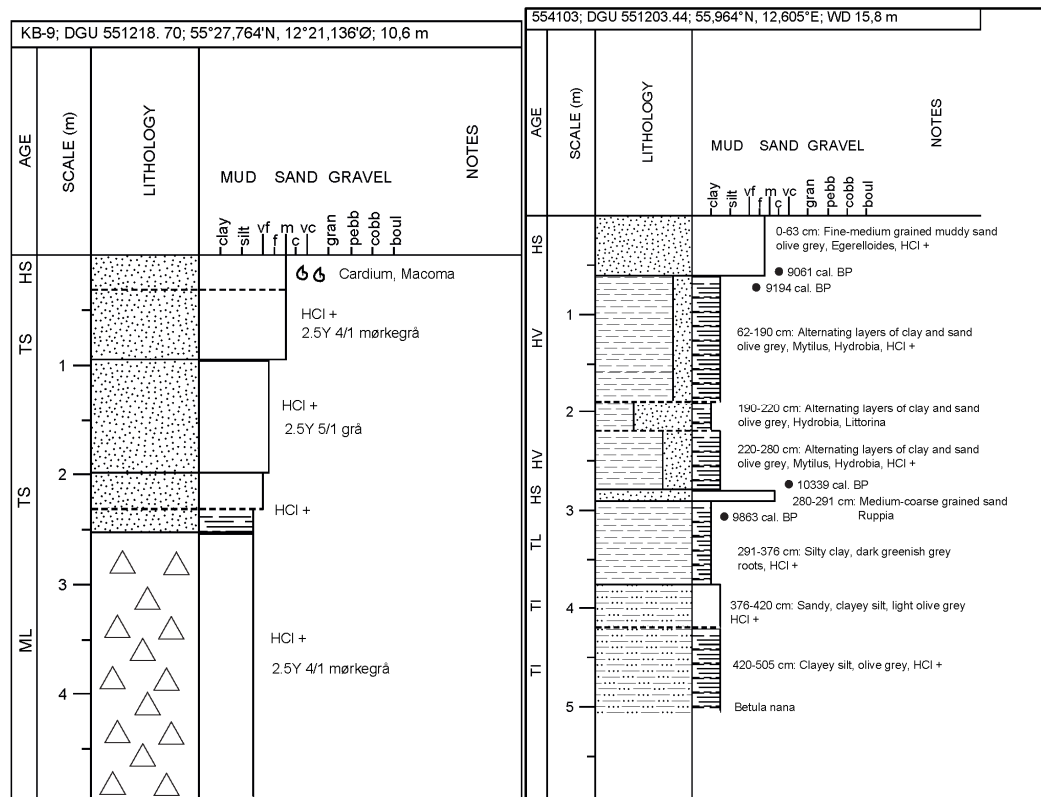
13.1.8 Holocæne, sandede og dyndede, marine sedimenter

De Holocæne, dyndede, marine sedimenter er primært aflejret i Sen Holocæn under et højt relativt havniveau tæt på det nuværende. Lithologien består overvejende af marint ler, silt, gytje og dynd. Enheden har en lamineret seismisk facies med interne reflektorer med mellem- til lav amplitude, men transparente indslag kan forekomme. Gas kan forekomme i de dybeste bassiner, hvilket kan gøre estimeringen af lagtykkelsen usikker.

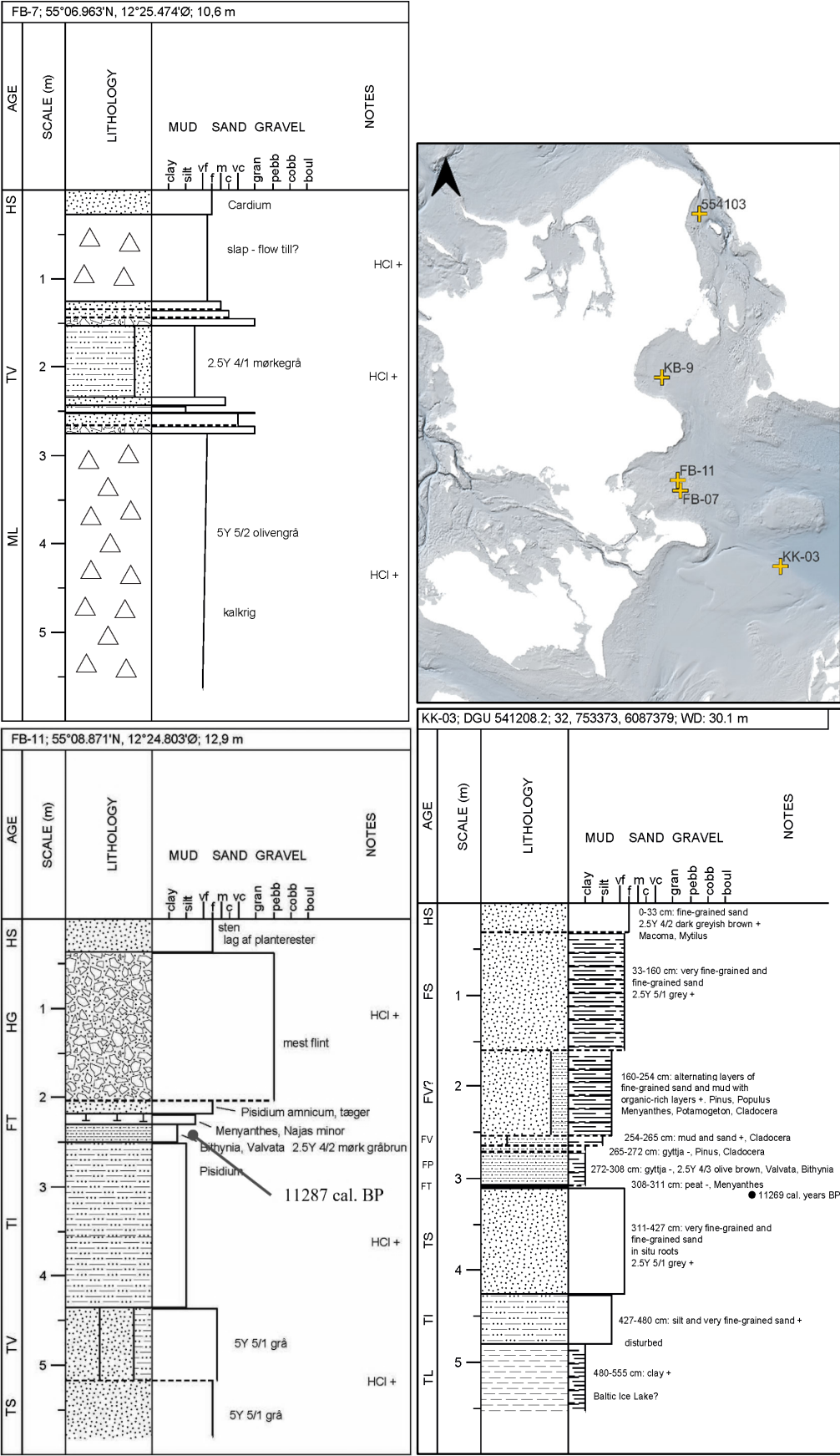
Indenfor undersøgelsesområdet findes tykkelser af enheden på 20 til 30 m i et aflejringsbassin øst for Møn med maksimale tykkelser på op til 50 m i den vestlige del af Arkonabassinet syd for Kriegers Flak. I Faxe Bugt og Køge Bugt er disse sedimenter generelt fraværende bortset fra udfyldninger på toppen af smeltevandssedimenterne i de lokale smeltevandskanaler.

I Øresund er den øverste enhed af Holocæne, dyndede, marine sedimenter tolket aflejret i forbindelse med transgressionen af Littorinahavet, hvor Kattegat blev forbundet med Østersøen og havniveauet steg til det nuværende. De tykkeste lag på op til 10 m findes som udfyldninger af de dybe huller og kanaler, der blev dannet af smeltevandet centralt i Øresund.

De Holocæne marine enheder er truffet som den øverste enhed i et stort antal borer indenfor det kortlagte område, se f.eks. boring 551230.45 (FB-7), 551226.76 (FB-11), 541208.2 (KK-03), 551218.70 (KB-9) og 551203.44 (554103) i Figur 13.3.



Figur 13.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området, se også næste side.



13.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

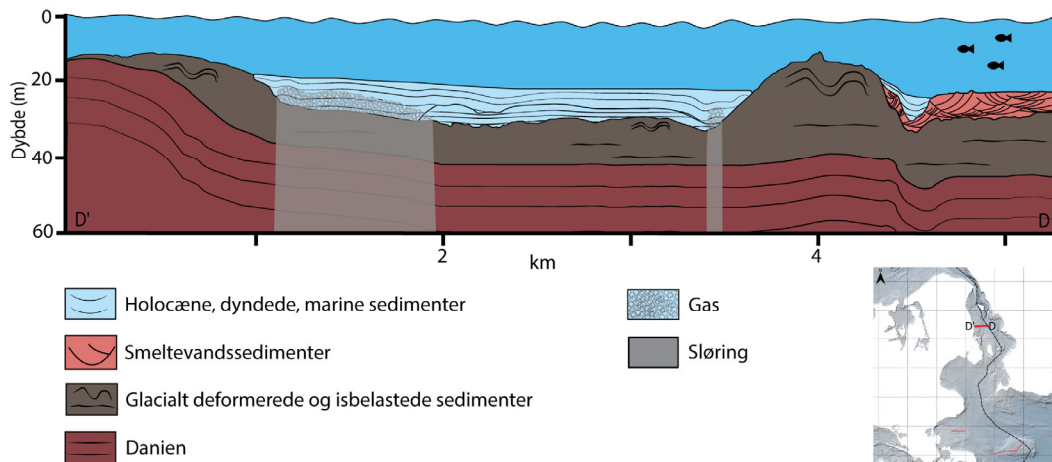
På baggrund af den generelle geologiske udvikling i området fra Øresund til Gedser, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet konceptuelle geologiske modeller for delområderne Øresund, Faxe Bugt, Kriegers Flak og Østersøen øst for Falster. De konceptuelle modeller er illustreret med fire vest-øst/sydvest-nordøst gående profiler i Figur 13.4 til Figur 13.7. Modellerne fokuserer på den øvre lagserie/de Kvartære lag og placeringen af profilerne er vist på Figur 13.12.

13.2.1 Øresund

Den konceptuelle model for Øresund er præsenteret i et geologisk profil i Figur 13.4. Den nederste rødbrune enhed repræsenterer de Prækvartære lag af Danien kalksten. Hovedtypen af kalksten tilskrives "København Kalk" Formationen, en lysegrå, hård kalksten med grå flint. Den sydlige del af Øresundsområdet er præget af en meget højtliggende kalkoverflade, der er blotlagt på havbunden omkring Saltholm. Under Danien kalkstenen følger skrivetridt fra Øvre Kridt. I den nordlige del af Øresund findes en dyb nordvest-sydøst orienteret dalstruktur i kalkoverfladen, den såkaldte Esrum-Alnarp dal, hvor Prækvartæroverfladen ligger dybere end kote -50 m.

Over Prækvartærfladen ses en 10–20 m tyk enhed (brun farve) af glaciale lag, der hovedsagelig består af moræneaflejringer, men også kan indeholde sandede og grusede smeltvandsaflejringer og være glacialt deformeret. I regionen er beskrevet to moræneenheder aflejret af gletsjere under sidste istid, Weichsel. Under det første isfremstød var regionen dækket af is fra nordøst, hvor isranden nåede Hovedopholdslinjen i Jylland. Det andet isfremstød kom fra sydøst og repræsenterer den isrand, der nåede den østjyske israndslinje. I store områder udgør moræneenheden havbunden og på grund af erosion findes der her stenrev.

Kort efter deglaciationen overgik Øresund til marine forhold. På profilet i Figur 13.4 ses dog en enhed (rød farve), som formodes at udgøre senglaciale sandede smeltvandsedimenter, aflejret direkte over de glaciale lag. Den senglaciale enhed kan dog også indeholde mere finkornede brakvandsaflejringer afsat i forbindelse med indtrængning af havvand fra Kattegat. Som følge af den isostatisk landhævning var Øresund tørlagt i en periode, hvilket erosionsfladen mellem den senglaciale og den overliggende Holocæne (lyseblå farve) marine dyndede enhed afspejler. Denne øverste enhed tolkes aflejret i forbindelse med transgressionen af Littorinahavet, hvor Kattegat blev forbundet med Østersøen og havniveauet steg til det nuværende.



Figur 13.4 Vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for Øresund. Placeringen af profilet er vist på Figur 13.12.

13.2.2 Faxe Bugt

Det geologiske profil i Figur 13.5 viser den konceptuelle geologiske model for Faxe Bugt. De Prækvarter aflejringer fra Øvre Kridt (skrivekridt) er ikke vist på profilet. Den nederste enhed er således moræneaflejringer, hvor den nederste moræneenhed (brun farve) er en fast bundmoræne, der henføres til Weichsel Hovedfremstødet omkring 20.000 BP (Houmark-Nielsen, 1987). Deformationer i morænen henføres til Bæltfremstødet omkring 16.000 BP ligesom israndsstrøgene i den ydre del af Faxe Bugt. De oppressede kridtflager i Møns Klint udgør en landværts pendant til deformationsområderne i havbunden. Den overliggende øvre moræneenhed (lysebrun farve) er en flydemoræne, eller slap moræne, som ofte udfylder lavninger i det underliggende glaciale landskab. Enheden er afsat i forbindelse med at isen trak sig tilbage og er derfor mindre konsolideret end bundmorænen. Efter isen smeltede tilbage, blev der lokalt dannet issøer med finkornede aflejringer i rendestrukturer, hvilket dog ikke er vist på profilet.

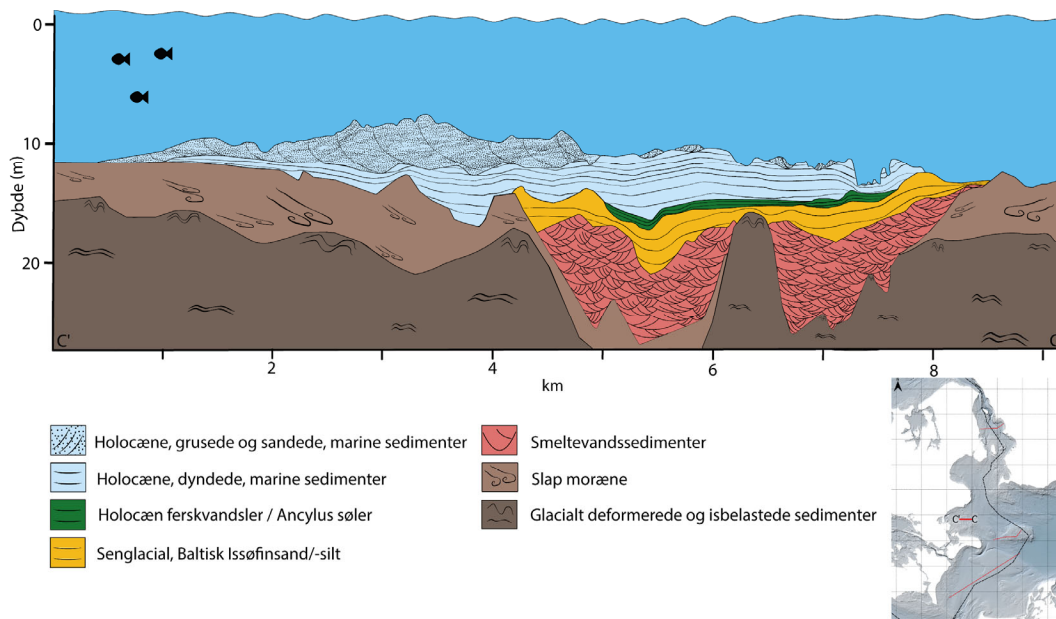
De glaciale morænesedimenter overlejres af sandede og grusede smeltevandssaflejringer (rød farve), som delvist udfylder de smeltevandskanaler, der blev dannet foran isfronten.

Over smeltevandssedimenterne ses en enhed, der henføres til den Baltiske Issø (orange farve), hvor der skete erosion af morænelandskabet med kystdannelser af strand- og barriereø-systemer. Sedimenterne herfra kan være relativt grove bestående af sand og grus.

Under Ancylus Søens højstandsfasen i Tidlig Holocæn opstod i en periode en sø vest for den Baltiske Issøes kystdannelser, der således for en periode dannede en barriere gennem den centrale del af Faxe Bugt. Aflejringerne fra denne lokale sø består af finkornede sø- og lagunesedimenter vist med grøn farve på Figur 13.5.

Senere i Holocæn, under Littorina transgressionen, blev de sandede og grovkornede dannelser reaktiverede og med det stigende havniveau blev kystzonen og nye stranddannelser flyttet flere kilometer mod vest i Faxe Bugt. De Holocæne marine enheder består af kyst- og

lagunesand og -grus og silt/ler relaterede til den fremadskridende transgression af området. På Figur 13.5 ses de relativt tykke marine dyndede Holocæne aflejringer med lyseblå farve og subhorizontal lagdeling. På den vestlige del af profilet ses enheder af marine sandede Holocæne aflejringer markeret med lyseblå og skråstillede lag. Til højre på figuren ses et hul efter råstofindvinding.



Figur 13.5 Vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for Faxe Bugt. Placeringen af profilet er vist på Figur 13.12.

13.2.3 Kriegers Flak

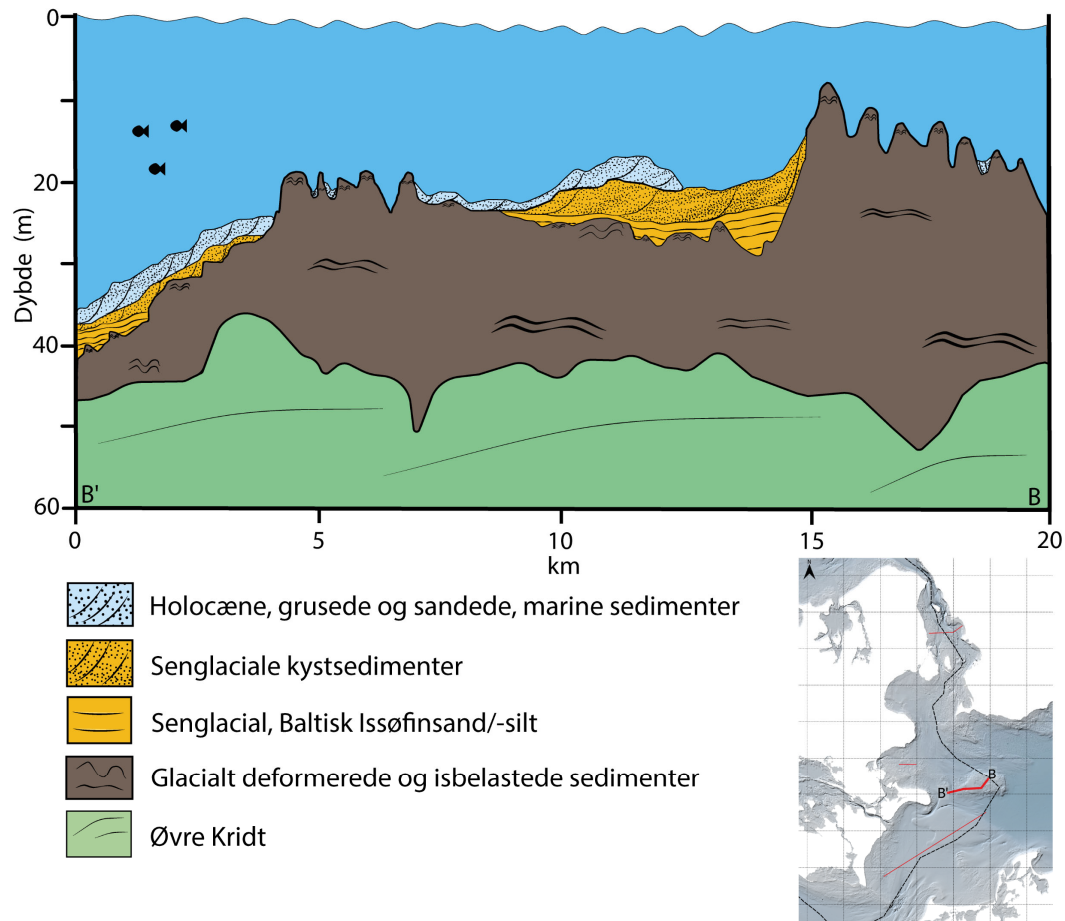
Den konceptuelle geologiske model for Kriegers Flak er vist på profilet i Figur 13.6. Over det Prækvartære skrivekridt (lysegrøn farve) er kernen i Kriegers Flak opbygget af glaciale aflejringer med sen- og postglaciale sedimenter på flankerne og i en central lavning.

Det glaciale landskab på Kriegers Flak er præget af markante morænerygge. Den glaciale overflademorfologi viser en vestlig morænekold, som i store områder ligger mellem kote –18 og –15 m, og en østlig morænekold der ligger omkring kote –20 m. De glaciale aflejringer består af to moræneenheder med en plan laggrænse, hvor der langs med denne findes linser/lag af smeltevandssedimenter. Den nedre moræneenhed er generelt leret, mens den øvre er meget hård og sandet med tykkelser mellem 20 og 40 m. Begge enheder udviser glaciale deformationer. På Figur 13.6 er de to moræneenheder vist som en samlet enhed af glacialt isbelastede, deformerede lag (brun farve). Såvel den øvre som den nedre moræneenhed indeholder op til flere meter tykke lag af smeltevandsler og -sand, som relateres til ældre isfremstød.

Ved transgressionen i forbindelse med den Baltiske Issø for omkring 13.000 år siden og igen for omkring 12.000 år siden udgjorde det glaciale landskab kysten på Kriegers Flak. Det gav optimale betingelser for kysterosion, transport og aflejring. Sedimenterne fra den Baltiske

Issø (orange farve) på Kriegers Flak viser, at der først blev aflejret finkornede issøsedimenter i den initiale fase, men i takt med den fortsatte transgression og kystudvikling blev der aflejret sand og grus på den vestlige læside af den dominerende østlige Kriegers Flak moræneknold. Det resulterede i dannelsen af en meget stor sand- og grusbanke (oddeplatform), som strækker sig ca. 5 km i øst-vestlig retning og ca. 10 km i nord-sydlig retning. Et mindre lignende system kan genfindes på læsiden af den vestlige moræneknold (Figur 13.6). Sedimentationen ophørte ved dræningen af den Baltiske Issø for ca. 11.700 år siden.

De efterfølgende Yoldia Hav og Ancylus Sø faser har ikke sat sig spor på selve Kriegers Flak. Men i Holocæn fra omkring 7.000 til 8.000 år BP fortsatte prograderingen af oddeplatformen på skuldrene af den Baltiske Issø odde platform med aflejring af sandede og grusede sedimenter (lyseblå farve).

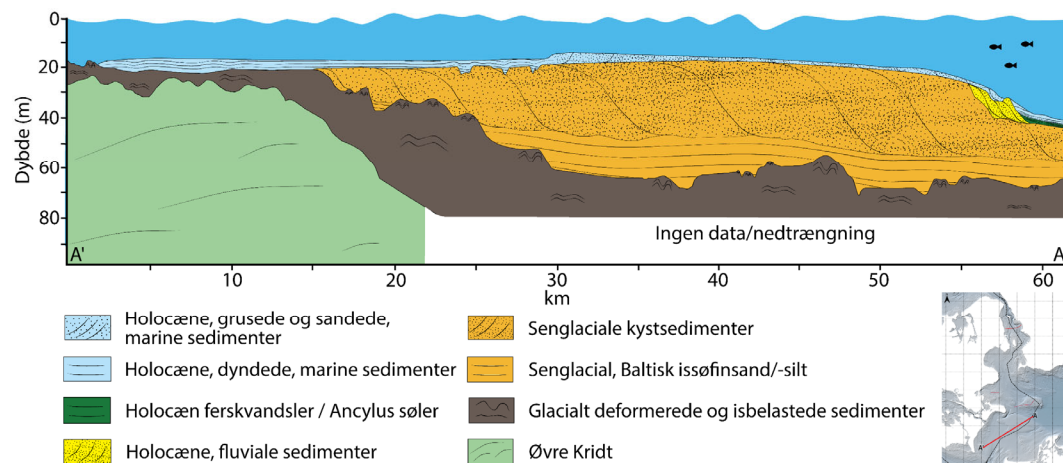


Figur 13.6 Vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for Kriegers Flak. Placeringen af profilet er vist på Figur 13.12.

13.2.4 Øst for Falster

Den geologiske opbygning af havbunden mellem Kriegers Flak og Gedser er illustreret med det geologiske profil i Figur 13.7. Prækvarteret fra Øvre Kridt (lysegrøn farve) ligger i området fra kysten til ca. 10 km øst for Falster relativt tæt på havbunden (<10 m). Øst herfor

tiltager dybden til fladen med en jævn hældning mod syd og øst til kote –80 m eller mere. Prækvartærfladen er i hele området overlejret af glaciale moræneaflejringer (brun farve), der tiltager i tykkelse fra vest mod øst i takt med Prækvartærfladens stigende dybde. Den glaciale overflades ujævne morfologi afspejler flere stadier af de isrande, der blev udviklet i forbindelse med Weichsel isens tilbagerykning.



Figur 13.7 Sydvest-nordøst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for området Øst for Falster. Placeringen af profilet er vist på Figur 13.12.

Over den glaciale flade følger to markante enheder aflejret i forbindelse med den senglaciale Baltiske Issø. Den nederste enhed består af finkornede, glaciolakustrine lerede og siltede aflejringer, som kendes fra Arkonabassinet øst for Kriegers Flak (den nederste orange, lagdelte enhed på Figur 13.7). Opad ændrer sedimenterne gradvist karakter fra ler til fin- til mellemkornet sand, hvilket afspejler overgangen fra et glaciolakustrint søbassin til et mere kystnært miljø (den øverste, prikkede, orange enhed på Figur 13.7). Enheden repræsenterer de kystnære, kileformede udbygninger i den Baltiske Issø på den vestlige kant af Arkonabassinet. På de seismiske data ses tydelige udbygningsstrukturer fra vest mod øst. Enheden opnår tykkelser på mellem 20 og 30 m.

Over de senglaciale enheder følger tre Holocæne enheder aflejret efter dræneringen af den Baltiske Issø. Den ældste enhed er aflejringer fra Tidlig Holocæn/Ancyclus Sø-stadiet. Den ses som en kileformet enhed af organisk-holdige ferskvandsaflejringer (grøn farve).

Den Holocæne transgression resulterede i starten i erosion og omlejring af ældre sedimenter, der på det geologiske profil er angivet som sandede flodaflejringer (gul farve). De ses som kiler ved foden af de senglaciale kystaflejringer.

De Holocæne recente og sub-recente aflejringer ses som lyseblå enheder. De består af dynamisk sand markeret med skråtstillede lag og dyndholdigt finsand i de dybeste dele markeret med subhorizontal lagdeling.

13.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

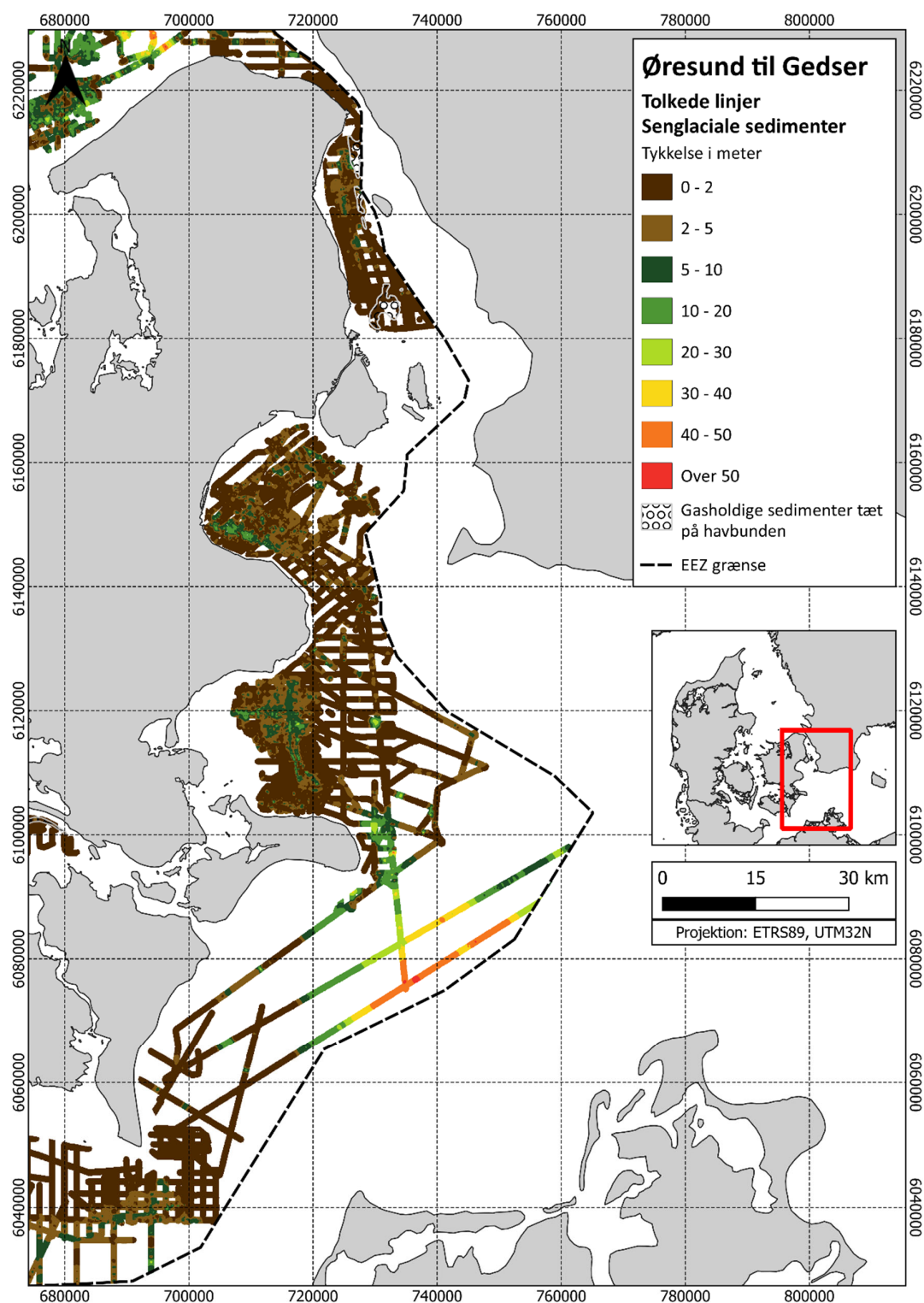
På Figur 13.8 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 13.9. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed. I områderne udenfor de tolkede seismiske linjer vist på Figur 13.8 er tolkningerne fra tidligere projekter benyttet til kortlægningen af de senglaciale aflejringer.

Kortet i Figur 13.9 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacial aflejringer. I Øresund er tykkelsen generelt 0-2 m og den glacial flade fremstår flere steder i nord-syd gående strøg som glacial morænerygge, hvilket understøttes af havbundssedimentkortet. Omkring Saltholm findes en udbredt glacial moræneplatform på havbunden, der mod sydøst går over i en højtliggende Prækvartær overflade, der bærer præg af glacial erosion. I et længere nord-syd gående strøg vest for Hven ses tykkelser op til 5-10 m, hvor der er aflejret senglaciale sedimenter i dybe huller og erosionskanaler dannet af smeltevand, der strømmede nordpå under afslutningen af den sidste glaciation. Mellem Hornbæk og Gilleleje ses ligeledes en række fordybninger med tykkelser på 5-10 m og enkelte steder op til 20 m.

De senglaciale aflejringer i Øresund består overvejende af grovere og mere sandede smeltevandssedimenter.

I Køge Bugt er tykkelserne generelt 0-5 m, men en række nordvest-sydøst gående begravede dale er udfyldt med op til 20 m senglaciale aflejringer. Dalene er naturlige fortsættelser af tunneldale på land (Køge Ådal, Store Vejleådal) og tolkes derfor som tunneldale anlagt ved smeltevandserosion i slutningen af istiden.

Nederst i de begravede dale optræder smeltevandssedimenter og i borer i de nordligste dale ses udfyldninger af grove, sandede aflejringer. De sydlige begravede dale er præget af en tyk serie af senglaciale aflejringer, der går over i tørveaflejringer få meter under havbunden. Centralt i Køge Bugt, mellem dalene, ses senglaciale siltede og sandede issøsedimenter og i den sydøstlige del af Køge Bugt findes aflejringer fra transgressionerne af den Baltiske Issø (og muligvis Ancylus Søen i Tidlig Holocæn) op til omkring 13 m under det nuværende havniveau.



Figur 13.8 Kortet illustrerer, hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 13.9). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

I Faxe Bugt ligger morænefladen tæt på havbunden og tykkelserne af de senglaciale aflejringer er her ligeledes generelt 0-5 m, bortset fra enkelte strøg i den indre del med tykkelser op til 10-20 m og en lille udfyldt lavning med op til 30 m sedimenter centralt i den ydre del af Faxe Bugt.

Centralt i Faxe Bugt optræder stedvist en enhed af mindre konsolideret flydemoræne (slap moræne) på flankerne af morænefladen, mens den i de dybeste dele overlejres af sandede og grusede smeltevandssaflejringer, som delvist udfylder de tilstedeværende smeltevandskanaler. Over smeltevandssedimenterne findes en enhed, der henføres til den Baltiske Issø med kystdannelser af strand- og barriereø-systemer. Sedimenterne herfra kan være relativt grove bestående af sand og grus.

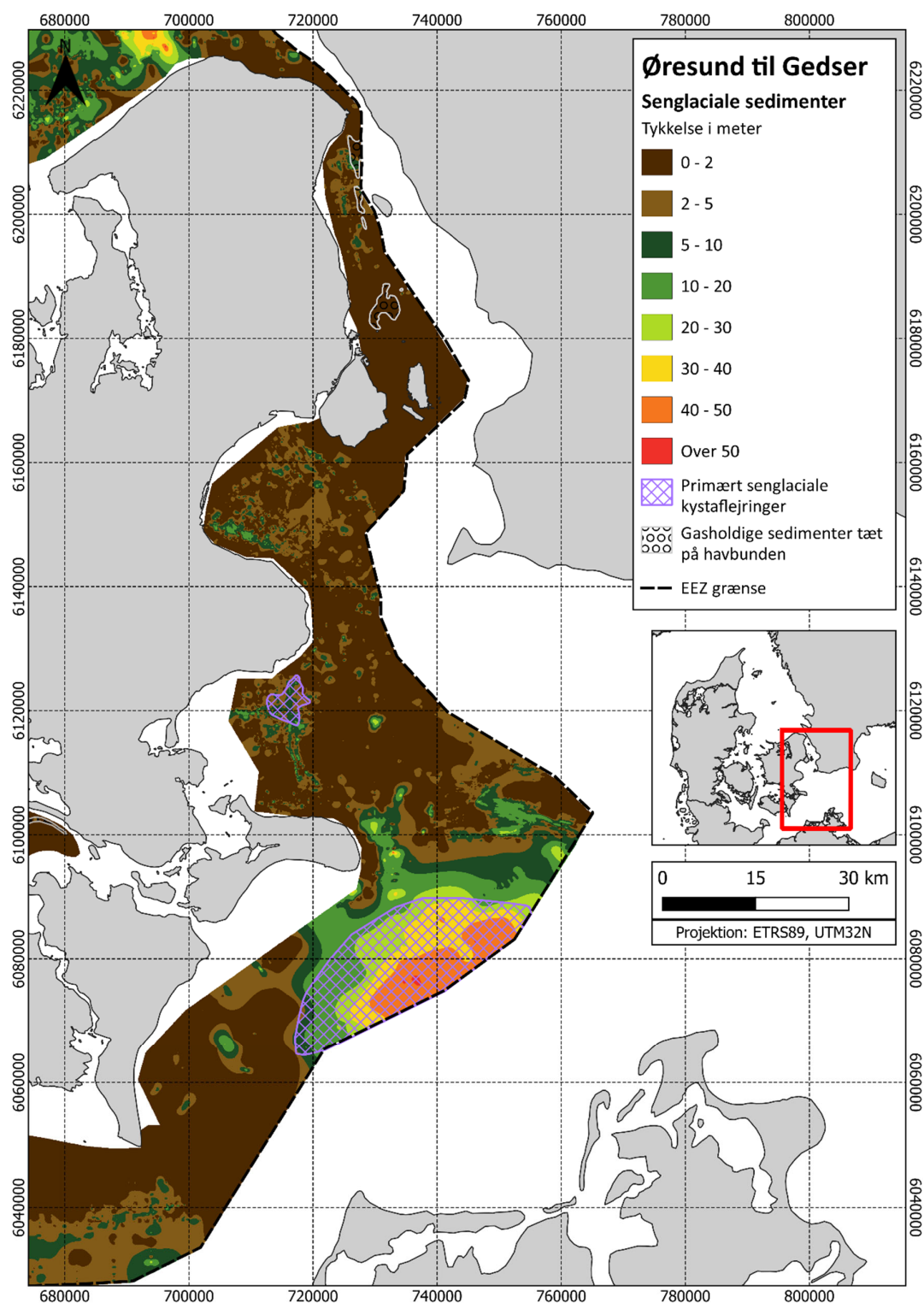
På Kriegers Flak øst for Møn er tykkelserne generelt 0-5 m, men i en central lavning i den ellers højtliggende moræneflade ses tykkelser på op til 20 m og mellem Møn og Kriegers Flak ses tykkelser op til 30 m. I området syd og sydvest for Kriegers Flak stiger tykkelsen af de senglaciale aflejringer markant med tykkelser på op til 40-50 m på den vestlige flanke af Arkonabassinets.

Øst for Falster ligger morænefladen også tæt på havbunden og tykkelsen af de senglaciale aflejringer er generelt 0-2 m bortset fra enkelte udfyldte lavninger med tykkelser op til 20 m.

På Kriegers Flak består sedimenterne dels af finkornede issøsedimenter fra den initiale fase af den Baltiske Issø, og dels af en sand- og grusbanke (oddeplatform) udviklet på den vestlige læside af de østlige og vestlige moræneknolde i forbindelse med transgressionerne af den Baltiske Issø.

Syd for Kriegers Flak består de store mægtigheder af senglaciale aflejringer i de dybeste dele primært af finkornede, glaciolakustrine lerede og siltede aflejringer fra den Baltiske Issø. Opad ændrer sedimenterne gradvist karakter fra ler til fin- til mellemkornet sand, hvilket afspejler overgangen fra et glaciolakustrint søbassin til kystnære udbygninger i den Baltiske Issø på den vestlige kant af Arkonabassinets.

Områder hvor de senglaciale aflejringer overvejende består af sandede kystaflejringer er markeret på Figur 13.9 med lilla krydsskravering og områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret med boblesignatur.



Figur 13.9 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter i området fra Øresund til Gedser. På kortet er markeret områder, hvor de senglaciale aflejringer primært udgøres af kystaflejringer (lilla krydsskravering). Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

13.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

På Figur 13.10 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 13.11. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med stor forsigtighed. I områderne udenfor de tolkede seismiske linjer vist på Figur 13.10 er tolkningerne fra tidligere projekter benyttet til kortlægningen af de senglaciale aflejringer.

Kortet i Figur 13.11 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter umiddelbart under havbunden. I den sydlige del af Øresund er tykkelsen generelt 0-2 m og typisk optræder de Holocæne sedimenter som et mindre end 1 m tyndt dække over den glaciale flade. Mellem Helsingør og Gilleleje er tykkelsen generelt 2-10 m med mindre områder med tykkelser op til 20 m og endda 30 m enkelte steder. I det dybe område mellem Hven og det flade, lavvandede område Disken sydøst for Helsingør ses tykkelser på op til 20-30 m og lokalt op til 40 m. I et område nordøst for København findes en daludfyldning med tykkelser på 5-10 m.

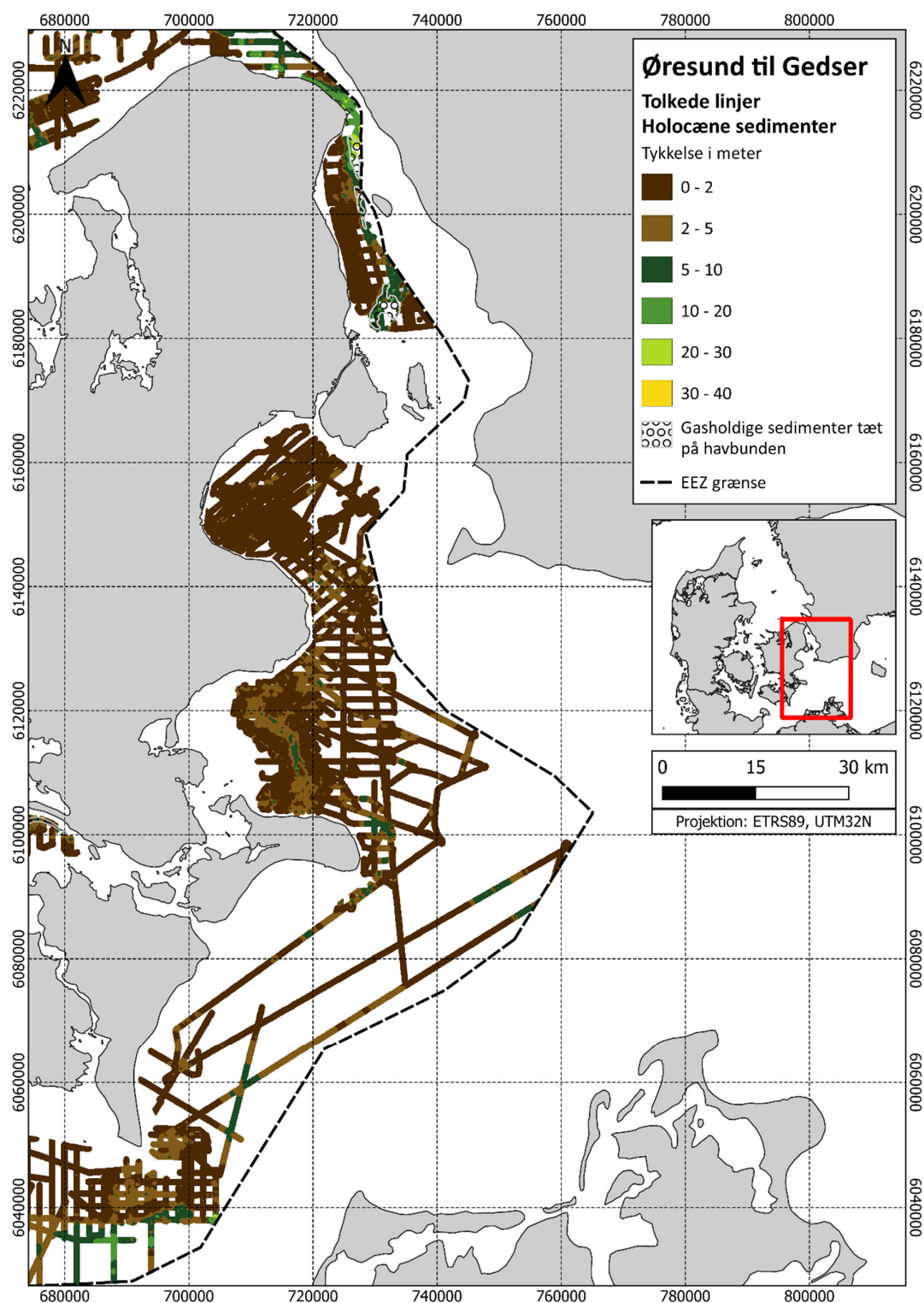
Mod nord består de Holocæne aflejringer af sand med stigende kornstørrelse fra bund til top, mens aflejringerne nordøst for København består af relativt finkornede sedimenter. I områderne nordøst for København og mellem Hven og Disken, hvor der er store Holocæne mægtigheder, optræder der gas i sedimenterne, som slører de seismiske data og tykkelserne er derfor mere usikre her.

I Køge Bugt er tykkelsen generelt 0-2 m og i spredte lavninger i området 2-5 m.

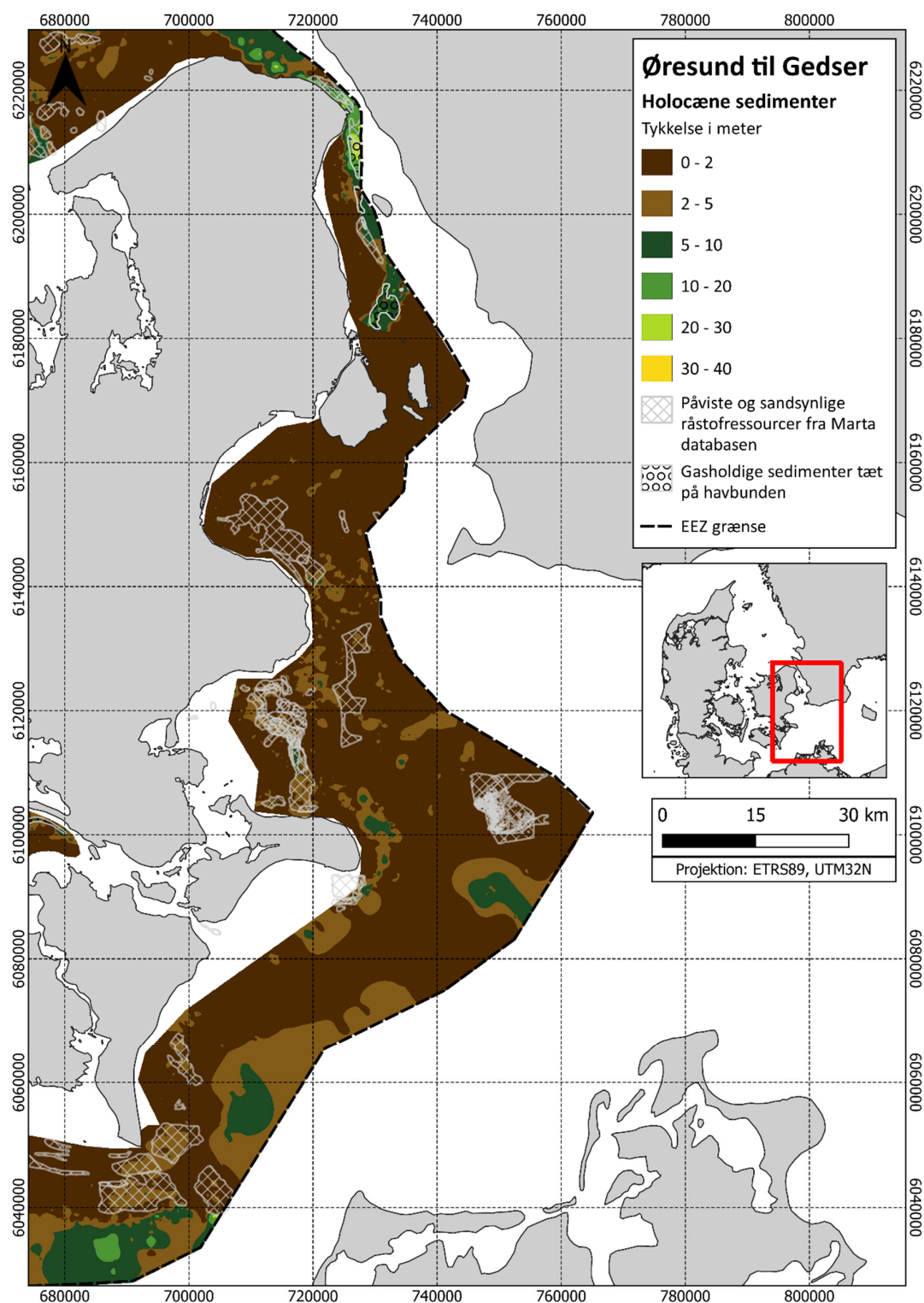
I senglacial tid og Tidlig Holocæn blev området tørlagt og lavninger samt endnu ikke helt opfyldte kanalsystemer/dale (se afsnit 13.3) blev mere eller mindre opfyldt af dominerende finkornede ferskvandsaflejringer og stedvis tørv. Under de senere transgressioner blev det sidste af lavningerne udfyldt af Holocænt sand. I de sydlige begravede dale går de tykke senglaciale aflejringer over i tørveaflejringer få meter under havbunden og herover findes Holocæne sandede gytjeaflejringer, der afspejler en udvikling fra en sø-fase til brakke og marine forhold. I det meste af området er de højtliggende glaciale aflejringer blevet eroderet i forbindelse med Littorina transgressionen og omlejret til sandbanker af få meters tykkelse. Disse sandbanker fremtræder morfologisk, især i den sydlige del af Køge Bugt.

I Faxe Bugt er tykkelsen generelt 0-2 m og 2-5 m i udfyldte lavninger. Enkelte steder er tykkelsen lokalt op til 10 m.

Det er påvist at der centralt i Faxe Bugt, vest for stranddannelserne fra den Baltiske Issø som dannede en barriere igennem området, opstod en lokal sø med finkornede sedimenter under Ancyclus Søens højstandsfasen i Tidlig Holocæn. De Holocæne ferskvandssedimenter overlægges af tre Holocæne marine enheder af kyst- og lagunesand, grus og silt/ler, alle relaterede til den fremadskridende transgression af området.



Figur 13.10 Kortet illustrerer, hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 13.11). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



Figur 13.11 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter i området fra Øresund til Gedser. På kortet er påviste og sandsynlige, sandede ressourcer fra Marta databasen markeret med grå krydsskravering. Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

På Kriegers Flak er tykkelsen af de Holocæne aflejringer omkring 0-2 m. Syd for Kriegers Flak og øst for Falster er mægtighederne mod nordvest generelt 0-2 m og lokalt op til 2-5 m, eller 5-10 m. Mod sydøst ud mod Arkonabassinet og Kadetrenden er tykkelsen 2-5 m og lokalt op til 5-10 m.

På Kriegers Flak består de Holocæne aflejringer af sand og grus i en fortsat prograderende oddeplatform. Syd for Kriegers Flak og øst for Falster findes mod sydøst, på kanten af Arkonabassinet og Kadetrenden, en kileformet, få meter tyk, enhed af organisk-holdige ferskvandsaflejringer fra Tidlig Holocæn/Ancylus søstadiet. I samme områder findes lokalt meter-tykke aflejringer af Holocæne sandede, fluviale sedimenter. Som et tyndt dække følger herover Holocæne, recente og sub-recente marine, sandede sedimenter aflejret under den Holocæne transgression. I de kystnære dele ud for Falsters østkyst består enheden typisk af få meter tykt dynamisk sand og i de dybeste dele mod sydøst af 2-5 m dyndholdigt finsand.

Påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen er markeret med grå krydsskraving på Figur 13.11. I disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret med boblesignatur.

13.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 13.12 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde og som overlejrer de ældre, typisk mere hårde, glacielle lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglacielle og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne glacielle moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglacielle og Holocæne tykkelseskort. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker. Beliggenheden af de geologiske profiler i Figur 13.4 til Figur 13.7 er vist på kortet.

Mellem Hven og Gilleleje viser kortet i Figur 13.12 tykkelser på op til 10-20 m, men også områder med 0-5 m og lokalt tykkelser på helt op til 30-40 m.

Nordøst for København ses generelt tykkelser på 0-5 m, men større områder med tykkelser op til 5-10 m og lokalt 10-20 m. Ud for København og Amager er den samlede tykkelse blot 0-2 m og i Køge bugt generelt 0-5 m, bortset fra en række udfyldte begravede dale mod nordøst og sydvest, hvor tykkelsen er op til 10-20 m og meget lokalt op til 30 m.

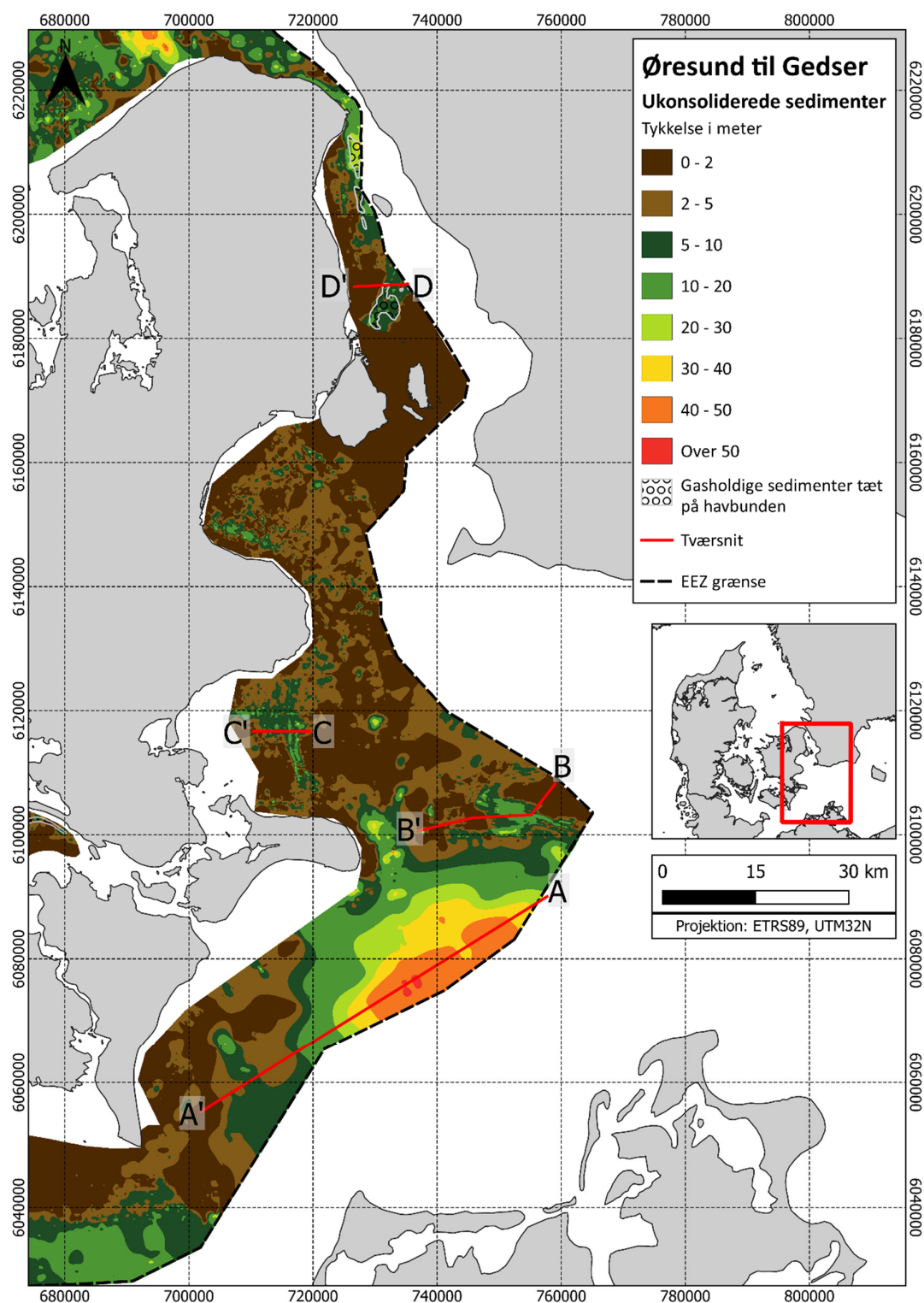
I den centrale del af Faxe Bugt er tykkelsen 0-2 m, bortset fra et enkelt lokalt område med op til 30 m, og ellers generelt i Faxe Bugt 2-5 m og mod øst lokalt op til 10 m. I den vestlige del af Faxe Bugt er tykkelsen i et større centralt område 5-10 m og 10-20 m og helt lokalt op til 30 m.

I Kriegers Flak området er tykkelsen generelt 0-5 m og mellem Møn og Kriegers Flak op til 20-30 m og lokalt 30-40 m. Centralt på Kriegers Flak er desuden et område, hvor tykkelsen er 10-20 m og helt lokalt op til 30 m. I et stort område syd for Kriegers Flak stiger tykkelsen markant og gradvist ud mod Arkonabassinet fra 5-10 m til 40-50 m og helt lokalt over 50 m.

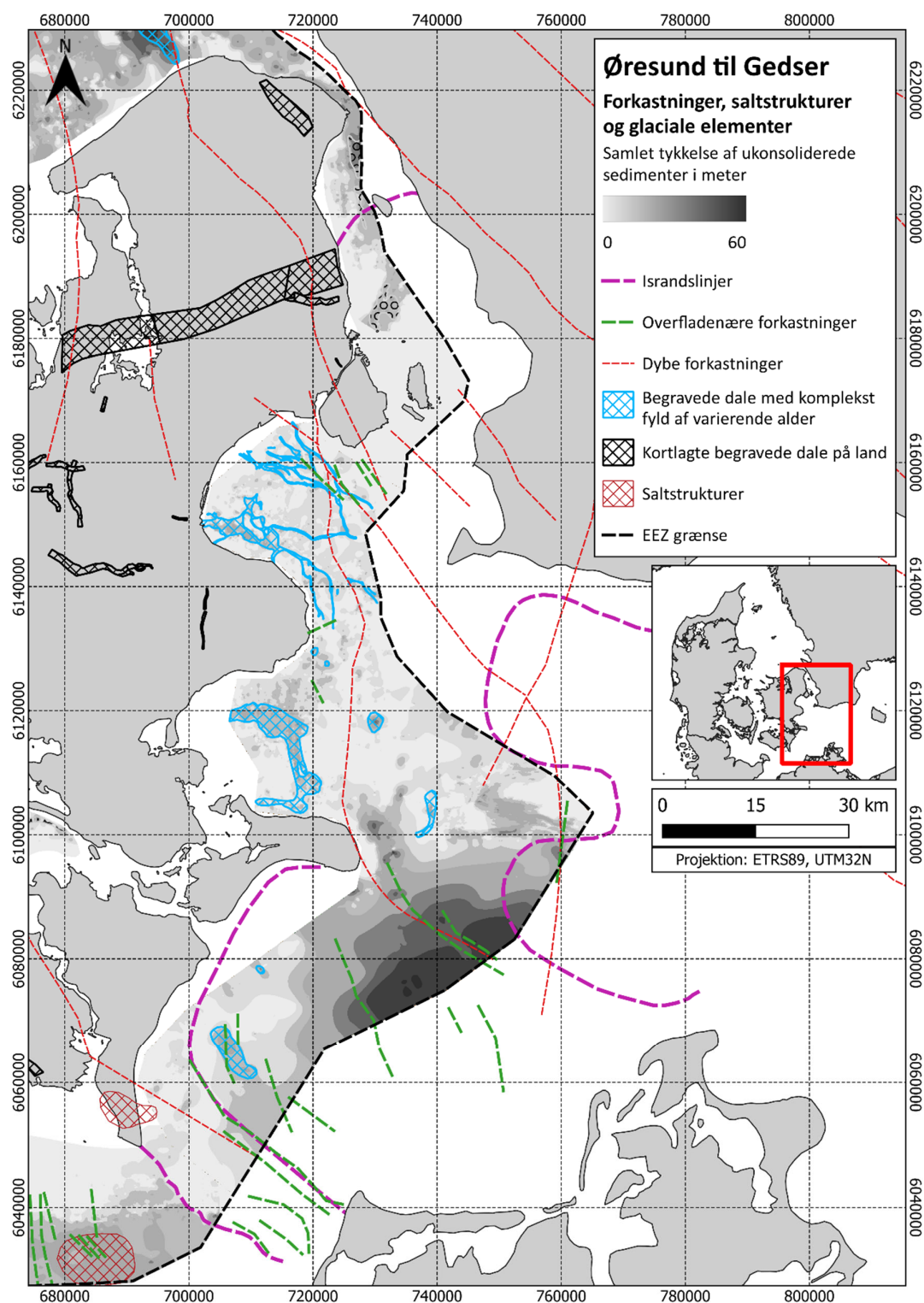
Sydøst for Falster er tykkelsen generelt 0-5 m, mens den ud mod Kadetrenden er 5-10 m og enkelte steder lokalt 10-20 m.

På Figur 13.13 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i den dybe undergrund og overfladenære forkastninger er vist med henholdsvis rød krydsskravering og grønne stiplede streger (Al Hseinat & Hübscher, 2017). Flere steder ser der ud til at være en sammenhæng mellem de dybe og de overfladenære forkastninger, f.eks. i Køge Bugt. Tolkede begravede tunneldale i området er vist med blå krydsskravering, og der er således kortlagt to større, nordvest-sydøst gående dalsystemer i Køge Bugt og områder med tolkede tunneldale i Faxe Bugt og sydøst for Falster. Begravede tunneldale på land (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk), der er vist med sort krydsskravering, viser umiddelbart at kunne have en sammenhæng med systemet af begravede dale i den sydlige del af Køge Bugt. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

Det generelle deglaciationsmønster i den vestlige del af Østersøen publiceret af Lange (1984) er vist med lilla stiplede streger. Der ses en sammenhæng mellem disse israndslinjer og udformningen af kystlinjen og det glaciale landskab øst for Falster og syd for Møn. Det samme gør sig gældende for det glaciale landskab på Kriegers Flak, der efter deglaciationen omkring 16.000 BP blev efterladt med en markant glacial overflademorfologi med en østlig og en vestlig moræneknold som følge af flere glaciale genfremstød fra flere retninger.



Figur 13.12 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området fra Øresund til Gedser. På kortet er beliggenheden af de geologiske profiler (Figur 13.4 til Figur 13.7) angivet.



Figur 13.13 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund og overfladenære forkastninger (Al Hseinat & Hübscher, 2017), tolkede begravede tunnel-dale i området, israndslinjer i området kendt fra litteraturen (Lange, 1984) eller tolket i nærværende projekt samt områder på land med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

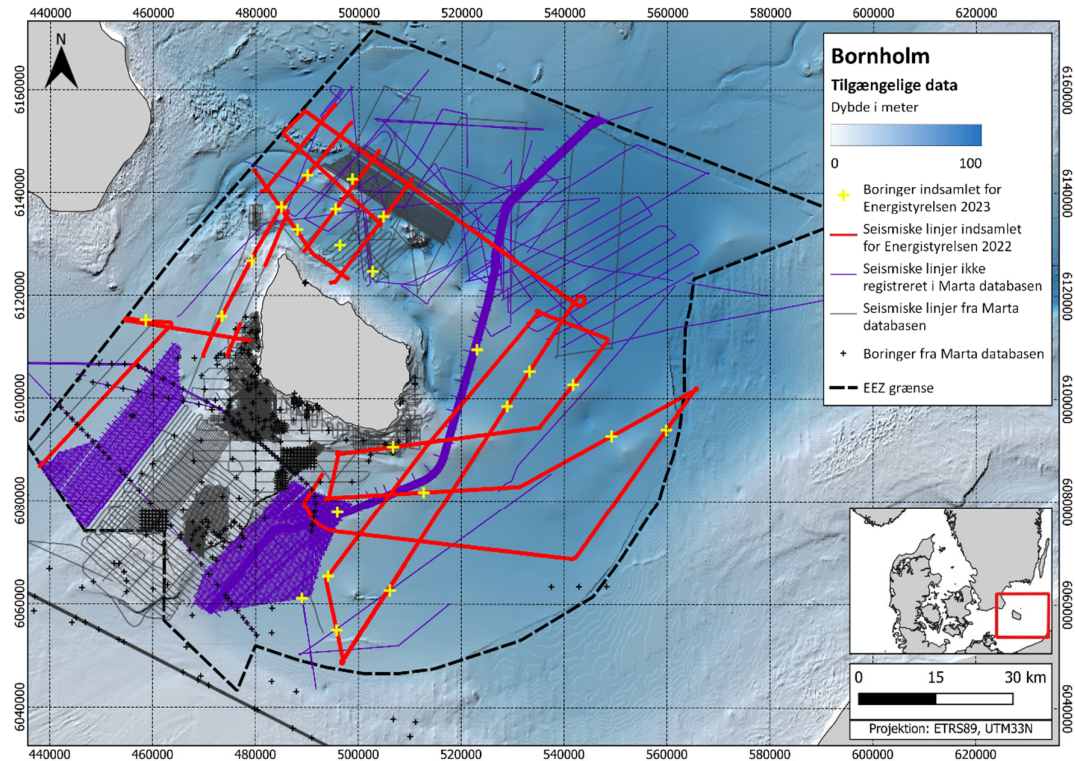
14. Bornholm

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af Østersøen omkring Bornholm. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med tre geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciala lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciala lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 14.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i Østersøen omkring Bornholm. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

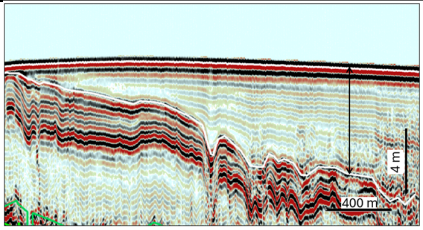
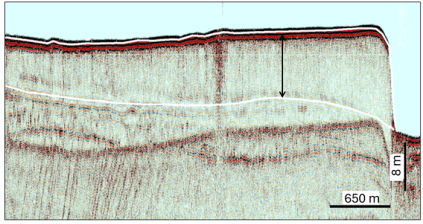
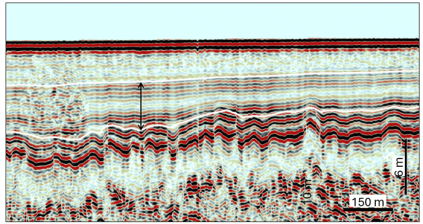
14.1 Seismiske enheder

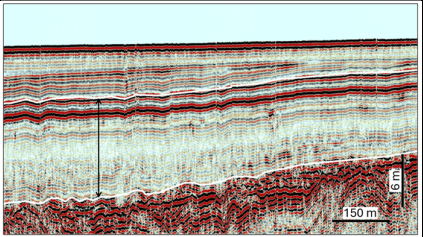
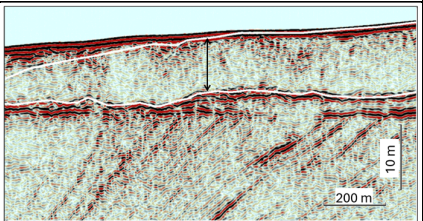
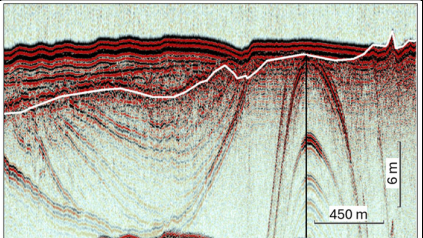
I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 14.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 14.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

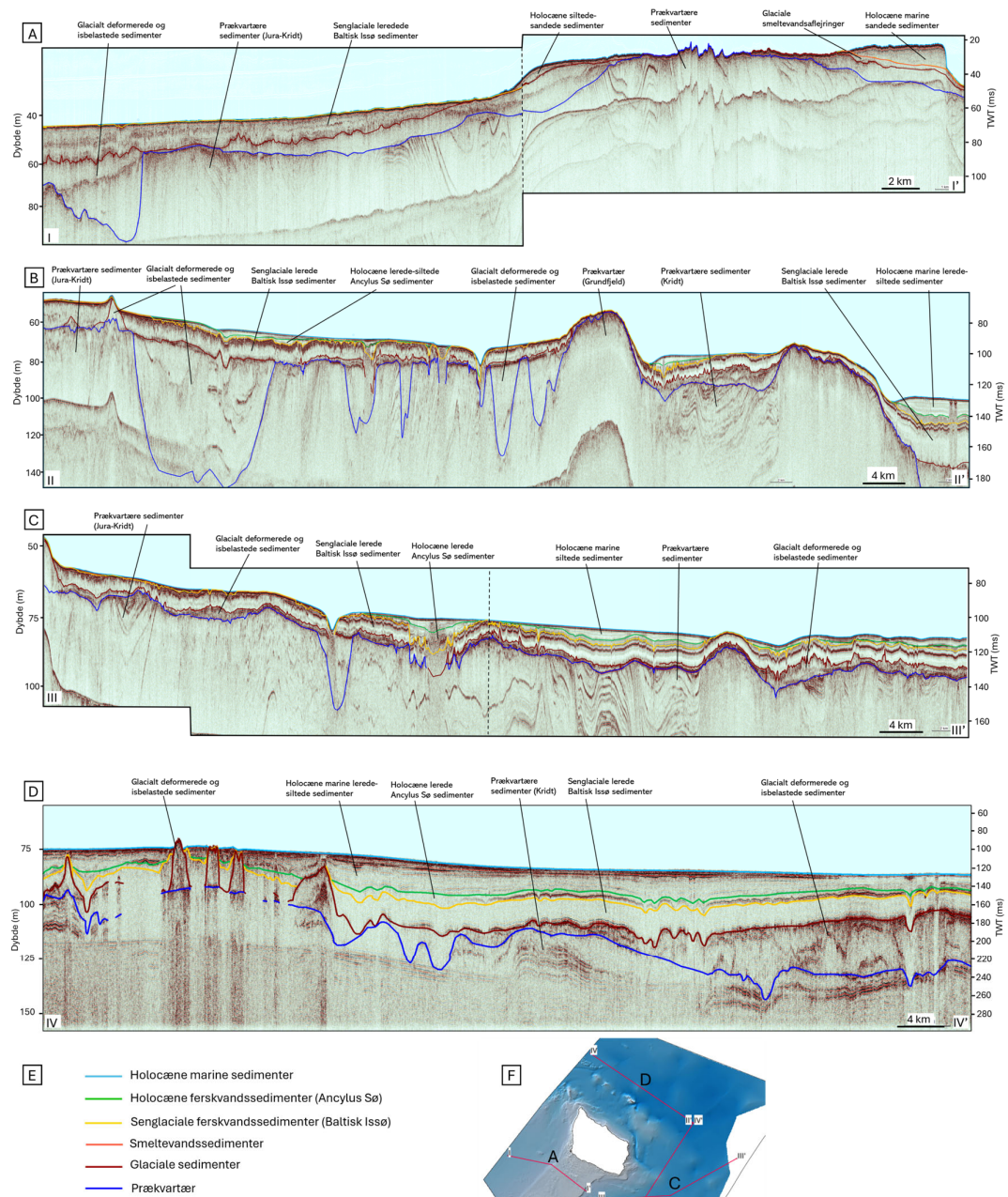


Figur 14.1 Oversigtskort over Østersøen omkring Bornholm. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

Tabel 14.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Holocæn	Holocæne, le- rede og siltede sedimenter	Parallelle lav-amplitude re- flekterer. Onlap på skrå- nende undergrænse og konformt overlejrende un- derliggende enhed i dybere bassiner.	10	Findes på dybder >30 m over store dele af området.	Ler, silt og fint sand med orga- nisk indhold	Marin suspensi- ons-aflejring	
Holocæn	Holocæne, sa- dedede, ma- rine sedimen- ter	Lav-amplitude til semi- transparente skrå reflekto- rer (skrålejring) i lateralt ud- byggende barreform.	15	Findes langs den sydøstvendte kant af Rønne Banke.	Sand (fin til grovkornet)	Marin flakudbyg- ning	
Tidlig Holo- cæn	Holocæne ferskvands-se- dimenter (An- cylus sø-aflej- ringer)	Parallelle reflekterer med medium-høj amplitude, kon- formt overlejrende underlig- gende enhed.	5	Findes på dybder >30 m over hele området.	Ler og silt, lagdelt og med orga- nisk indhold	Lakustrin (Ancy- lus Sø)	

Senglacial	Senglaciale ferskvands-sedimenter (Baltisk Issøler)	Parallelle, let bølgende, kontinuerlige, høj-amplitude til semi-transparente reflektorer, konformt overlejrende underliggende enheder. Onlap ses stedvist på undergrænse med markant morfologi.	15 m (op til 25 m i Bornholms-bassin)	Findes på dybder >30 m over hele området.	Varv-lignende ler-silt lamination, øverste og nederste del med sandede indslag	Lakustrin (Baltisk Issø)	
Glacial	Glacialt deformerede og is-belastede sedimenter	Kaotiske, ikke-transparente reflektorer. Begrænset gennemtrængning af det seismiske signal. Ondulerende erosiv undergrænse, stedvist som begravede dale.	50	Udbredt over det meste af området på nær i lavvandsområder omkring Bornholm, hvor Prækvartære aflejringer ligger helt op til havbunden.	Moræneler, morænesand samt ispåvirket/ isoverskredet ler, silt, sand	Glacial	
Prækvartær	Jura-Kridt og Kambrium-Silur	Parallelle og foldede kontinuerlige reflektorer veks-lende fra lav til høj amplitude. Stedvis med forkastninger.	-	Udbredt i hele området.	Sandsten, lersten, kalksten (let til hårdt konsolideret)	Marin-terrestrisk	



Figur 14.2 Eksempler på sparker seismiske data fra Østersøen omkring Bornholm som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil sydvest for Bornholm. B) Seismisk profil sydøst for Bornholm. C) Seismisk profil syd for Bornholm. D) Seismisk profil nordøst for Bornholm. E) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder. F) Oversigtskort.

14.1.1 Prækvartære strata

De Kvartære lag afgrænses fra de Prækvartære lag af en markant erosionsflade og basis af Kvartæret ligger højt i området, maksimalt ca. 80 m under havbunden i den østligste del af området. I de mere lavvandede områder omkring Bornholm findes Prækvartære lag ofte direkte op til havbunden, eller med et dække på kun få meter. Prækvartæret domineres af sedimentære aflejringer fra Jura-Kridt, som indgår i forkastningsbetingede blokke, som en del af den tektoniske Tornquist Zone. Jura-Kridt aflejringerne består af løst til hårdere cementerede sandsten, lersten, og kridt-kalk aflejringer. Herudover findes der umiddelbart syd-øst og øst for Bornholm Palæozoiske hårdt cementerede sandsten og skifre fra Kambrium-Silur, samt grundfjeld. Fælles for de Prækvartære enheder er, at den øvre grænse er eroderet af de Kvartære isskjold. Den seismiske karakter af Jura-Kridt enhederne er typisk skråt-stillede reflektorer, ofte med foldningstrukturer og stedvist gennemsat af regionale forkastninger. Amplituden er vekslende fra højreflektiv til lavreflektiv betinget af lagdeling og lithologisk variation af de Mesozoiske enheder. Refleksioner fra de ældre Palæozoiske enheder og grundfjeld er typisk meget begrænsede, bortset fra den overliggende erosionsgrænse. Jura-Kridt aflejringer er truffet i et større antal boreriger omkring Bornholm samt i IODP-boringerne i Bornholmsbassinet øst for Bornholm (Jensen et al., 2017).

14.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter fra Weichsel istiden og muligvis ældre istider findes som en enhed af meget varierende tykkelse over de Prækvartære enheder. På dele af de lavvandede områder omkring Bornholm er Prækvartæret dog blottet helt op til havbunden grundet erosion fra havet. De glacialt deformerede isbelastede aflejringer består typisk af moræneler og -sand, men indlejrede smeltevandsaflejringer kan forekomme. De glaciale aflejringer er typisk kun 3-5 m tykke, men stedvist forekommer der begravede dale med komplekst fyld og en tykkelse på helt op til ca. 50 m. Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter, men der kan forekomme lagdelte og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende, som illustreret i Tabel 14.1. Moræneler og -sand er truffet i en række boreriger omkring Bornholm, se f.eks. boring 541504.1 (BO-06) og 551420.4 (BO-36) i Figur 14.3, og i IODP-site M0065 borerigerne øst for Bornholm (Jensen et al., 2021).

14.1.3 Smeltevandssedimenter

Der er kun identificeret smeltevandsaflejringer af begrænset omfang omkring Bornholm. I de fleste tilfælde er der tale om sandede sedimenter, som på lavere vanddybder ligger over de yngste moræneaflejringer, og som muligvis også kan være af senglacial fluvial oprindelse. I de tykkere glaciale enheder, som indgår i de begravede dale, må det anses for sandsynligt, at smeltevandsaflejringer af forskellig type udgør en betragtelig del. I forbindelse med geofysiske og geotekniske undersøgelser for Energiø Bornholm I og II blev der identificeret sandede aflejringer i begravede dale, som overlejres af yngre glaciale moræneaflejringer (Rambøll, 2024). Sandforekomsterne må formodes at være af glacial oprindelse, men for de større begravede dales vedkommende, kan en interglacial oprindelse ikke udelukkes. Den interne seismiske facies er typisk massiv og stedvis med interne erosionshorisonter. Smeltevandsaflejringer eller senglaciale fluviale aflejringer er truffet i flere boreriger på Rønne Banke, se

f.eks. boring 551423.1 (BO-23) og 541501.18 (BO-20) i Figur 14.3. Smeltevandssedimenter med en tykkelse på op til ca. 15 m er ligeledes truffet i IODP M0065 boringerne øst for Bornholm umiddelbart under senglacialt Baltisk Issøler (Jensen et al., 2021).

14.1.4 Senglaciale, lerede ferskvandssedimenter (Baltisk Issø-fase)

Senglaciale ferskvandssedimenter aflejret i den Baltiske Issø dækker området på dybder mere end 30 m under det nuværende havniveau. Enheden er typisk op til 10-20 m tyk, men i Bornholmsbassinet, hvor syn-depositionel tektonik formodes at have været aktiv, er enheden helt op til ca. 50 m tyk. Den interne seismiske facies i den nedre del af enheden viser medium-høj amplitude reflektorer som generelt set er konforme med den ondulerende nedre grænse til den glaciale enhed. Stedvist kan onlap dog ses på markante glaciale rygge. Den midterste del af enheden udviser parallelle reflektorer med lavere amplitude, som giver den et mere massivt udseende. Den øvre del af enheden har parallelle reflektorer med højere amplitude (Tabel 14.1). Baltisk Issøler er truffet i et stort antal boringer, der viser fint lamineret, rødgrå lerede til siltede sedimenter uden organisk materiale (f.eks. boring 541412.2 (BO-12ny), 541509.1 (BO-01), 541504.1 (BO-06) og 551420.4 (BO-36), se Figur 14.3). IODP M0065 boringerne viser, at den nederste del består af siltet ler, den midterste del af næsten rent ler, og den øverste del af siltet ler med enkelte sandlag (Jensen et al., 2021).

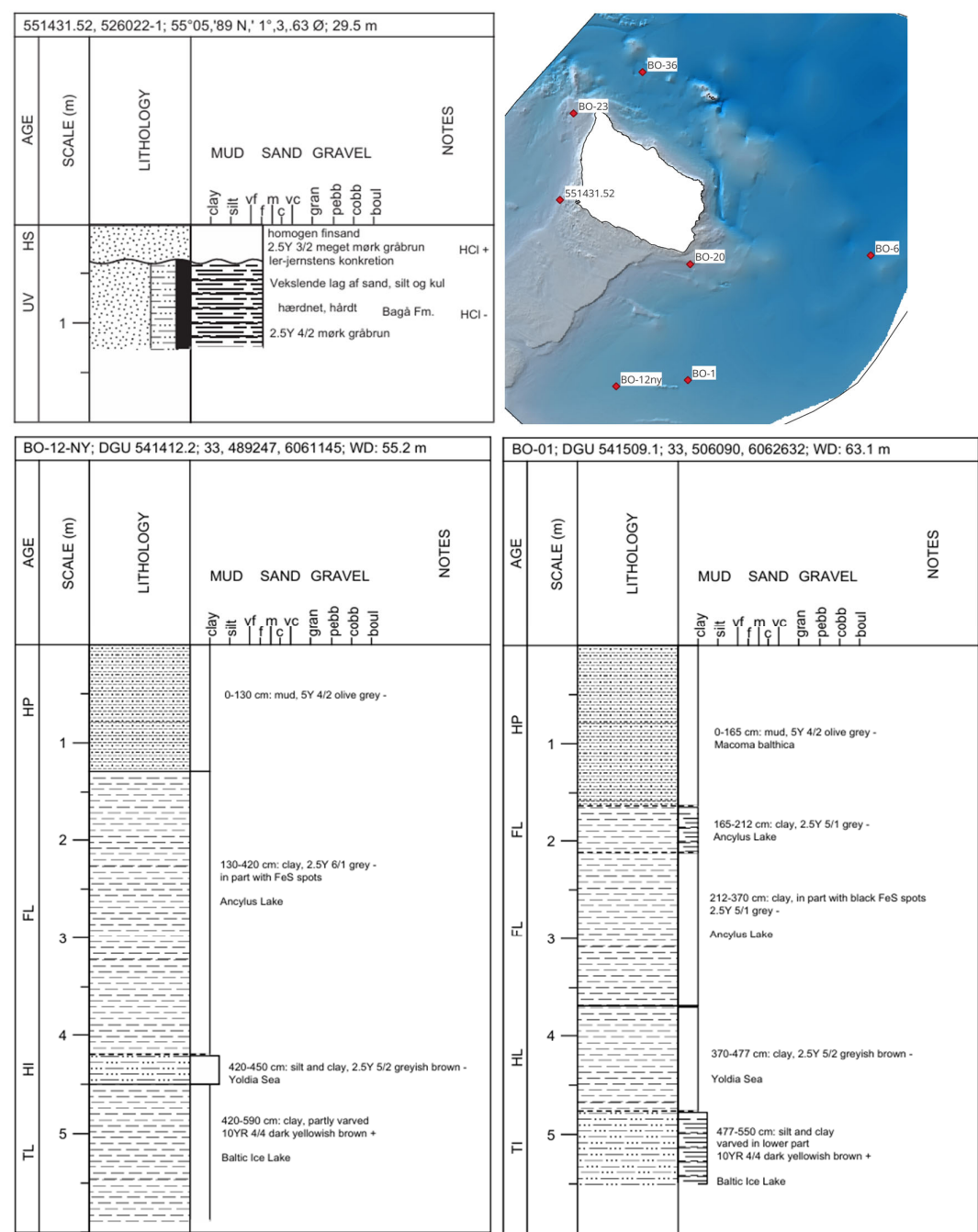
14.1.5 Tidlig Holocæn ferskvandssedimenter (Ancylus Sø-fase)

Baltisk Issøler overlejres af et tyndt lag af marint sandet ler (Tidlig Holocæn Yoldia Hav) som igen overlejres af Tidlig Holocæn lakustrint ler afsat under Ancylus Sø-fasen i Østersøen. Sedimenterne fra Tidlig Holocæn er typisk 3-6 m tykke, men når i de dybere bassiner en tykkelse på op til 10 m. Ancylus Sø-ler findes udbredt på dybder større end 30 m over hele området. Den interne seismiske facies i enheden er medium-høj amplitude parallelle reflektorer som aftager i amplitude opover, og som konformt overlejrer den underliggende enhed. Hvor det er muligt seismisk at erkende den marine Yoldia Hav enhed, som er mere sandet, ses denne som en relativt massiv tynd enhed med en markant nedre reflektor. Ancylus Sø-ler er truffet i et stort antal boringer der påviser mørk, grå, siltet ler med organisk indhold (f.eks. boring 541412.2 (BO-12ny) og 541509.1 (BO-01), se Figur 14.3).

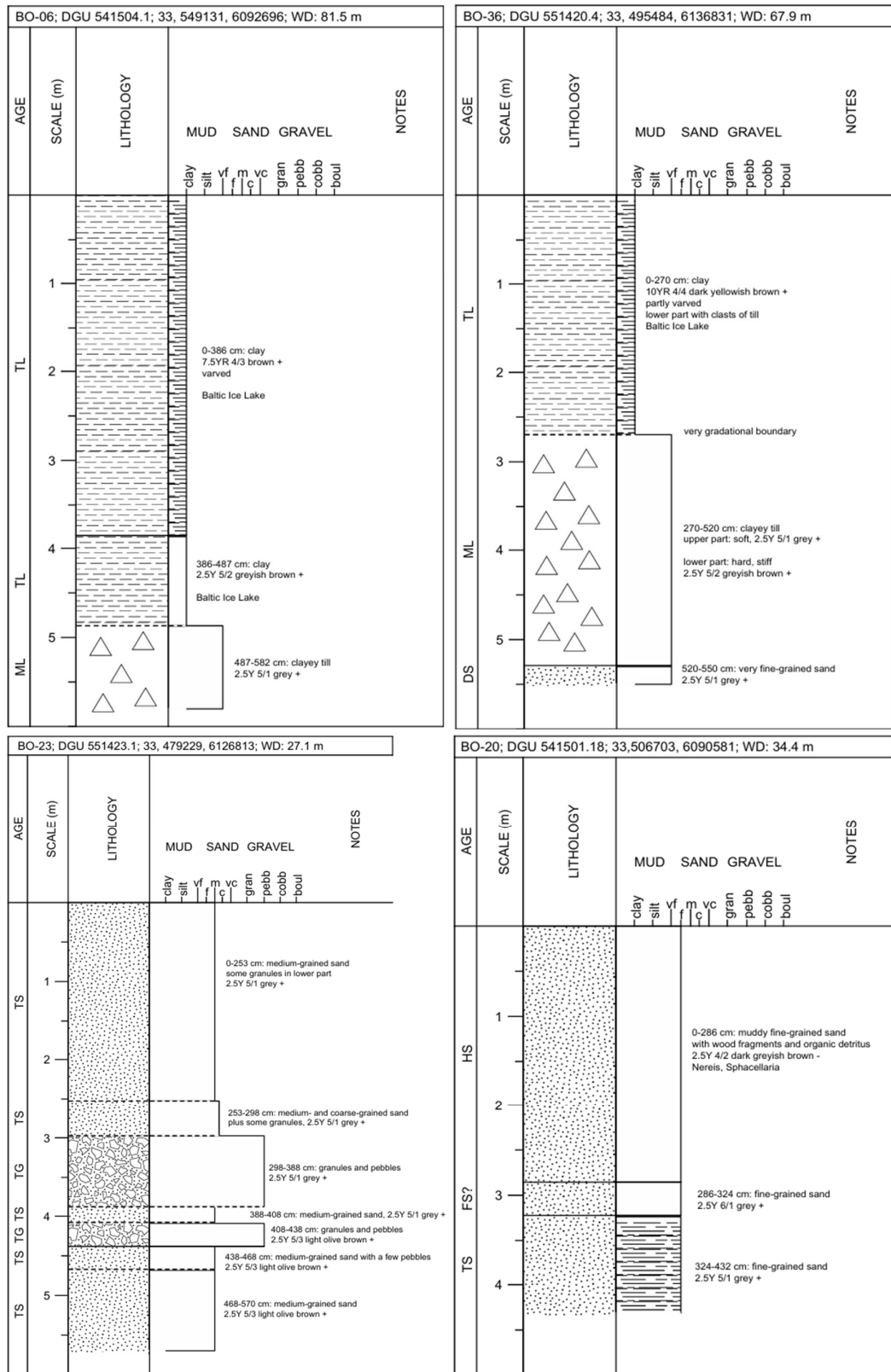
14.1.6 Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter

Holocæne marine aflejringer udgør den yngste sedimentenhed i området. På større dybder opnår de en mægtighed på knap 10 m, men ellers er de typisk kun få meter tykke. Holocæne marine aflejringer findes dels som siltede til lerede bassinaflejringer og dels som sandede bankeaflejringer langs kanten af Rønne Banke. Den interne seismiske facies af bassinaflejringerne er typisk lav-amplitude parallelle reflektorer, som udviser onlap hvor undergrænsen er skrånende. I mindre udfyldte bassiner ses ofte en asymmetrisk bundtet opbygning med interne diskontinuitetsflader. Store sandbanker med positiv morfologi ses langs kanten af Rønne Banke. Sandbankerne viser typisk lav-medium amplitude skrånende og udbyggende reflektorer (skrålejrning), men kan også fremstå som seismisk transparente. De Holocæne marine enheder er truffet i et stort antal boringer, der underbygger, at bassinaflejringerne

består af blødt siltet, organisk-rigt ler med et mindre sandindhold (f.eks. boring 541412.2 (BO-12ny) og 541509.1 (BO-01), se Figur 14.3). Sandbankeaflejringerne består typisk af fin- til grovkornet sand.



Figur 14.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området. Det er ikke alle seismiske enheder der er truffet i boringer. Se også næste side.



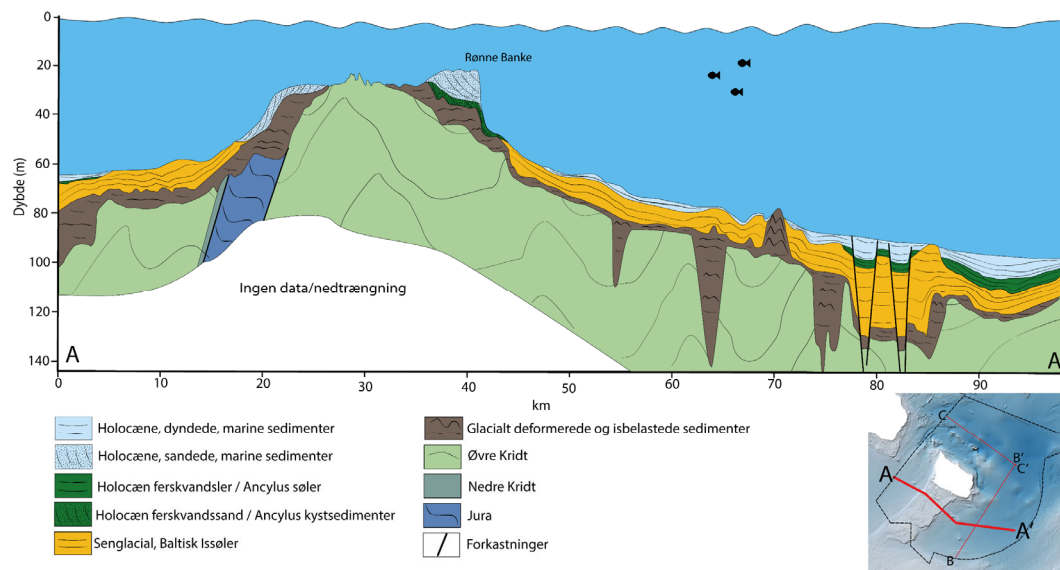
14.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

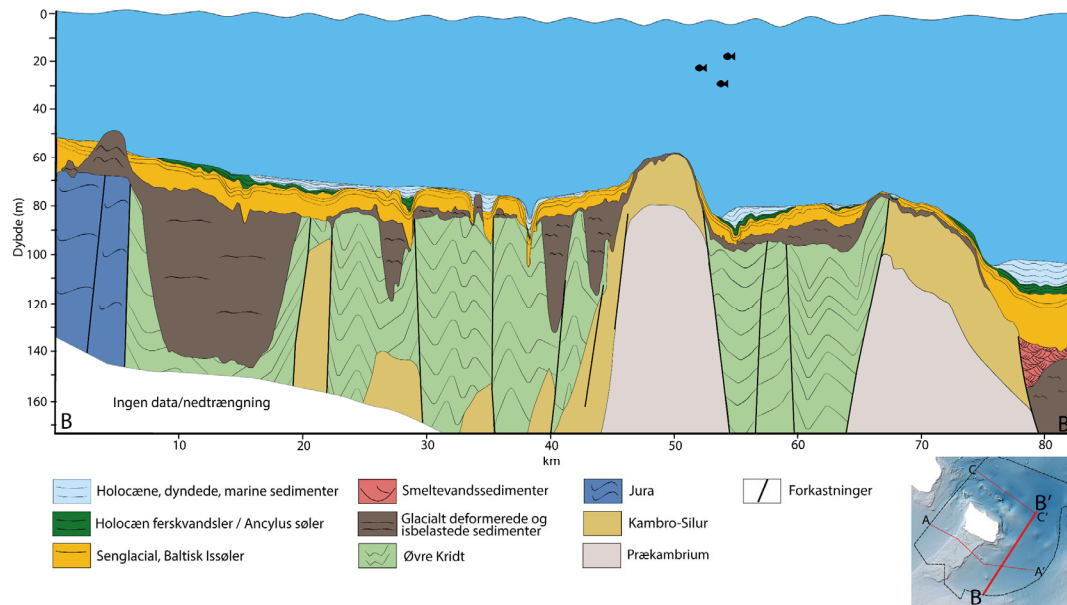
På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Østersøen omkring Bornholm, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for området. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med tre geologiske profiler sydvest, sydøst og nordøst for Bornholm i Figur 14.4 til Figur 14.6. Placeringen af profilerne er vist på Figur 14.11.

De Prækvarterne aflejringer er tæt på havbunden domineret af Øvre Kridt aflejringer, markeret med lysegrøn på profilerne. Langs forkastningszonerne findes tæt under havbunden også blokke med Jura-Nedre Kridt (blå og mørkegrøn) og Kambro-Siluriske aflejringer (karrygule) samt Prækambrisk grundfjeld (lyserød).

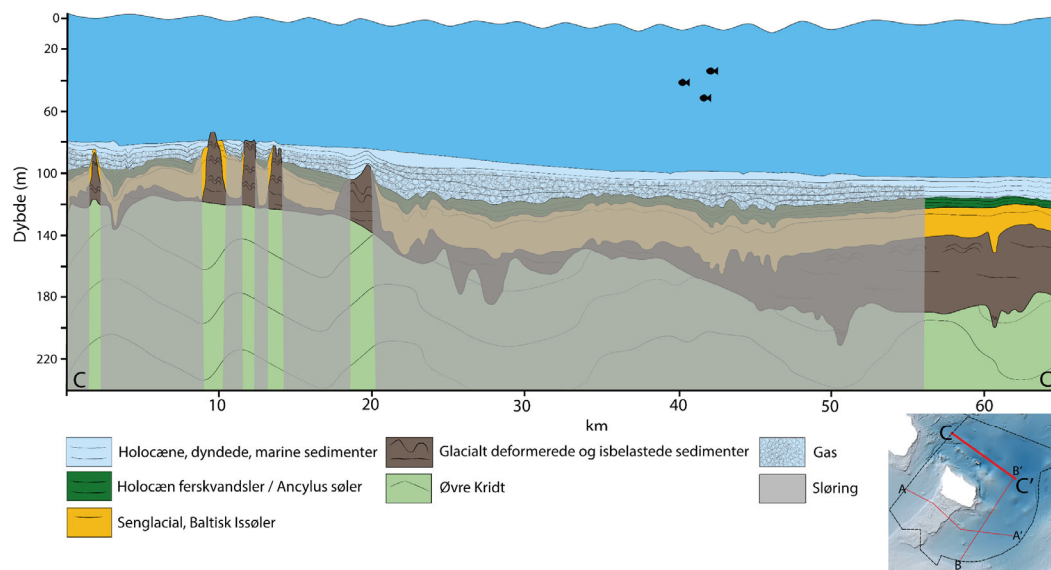
Glaciale moræneaflejringer (mørkebrune) af varierende tykkelse overlejrer den Prækvarterne lagserie. Moræneaflejringerne er ofte mindre end 5-10 m tykke, men stedvist findes udfyldte trug eller dale eroderet i de Prækvarterne aflejringer, med tykkelser af moræneler på over 50 m (Rambøll, 2024). Ligeledes ses også enkelte markante rygge af moræneler med tykkelser på op til ca. 40 m. Ved Adler Grund sydvest for Bornholm samt i Bornholmsdybet nordøst for Bornholm ved IODP 347 site M0065 (Andrén et al., 2015) optræder glacialt smeltevandssand og -grus (markeret med rød) over moræneaflejringerne.



Figur 14.4 Geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model sydvest for Bornholm. Placeringen af profilet er vist på Figur 14.11.



Figur 14.5 Geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model sydøst for Bornholm. Placeringen af profilet er vist på Figur 14.11.

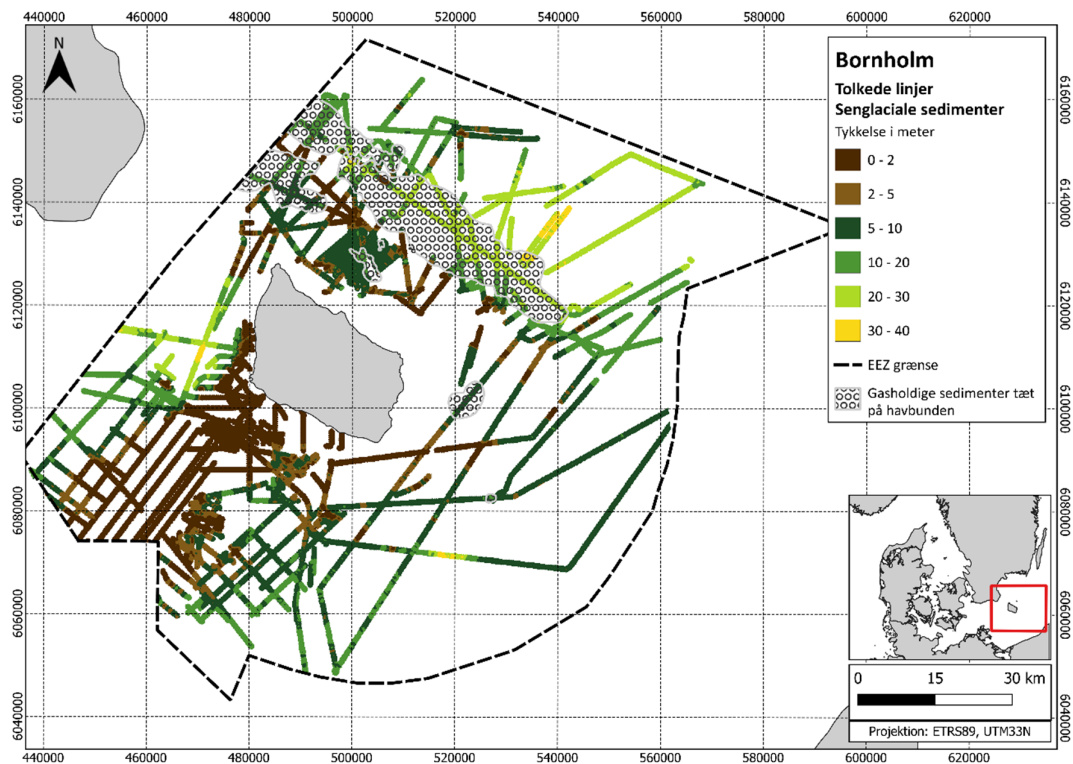


Figur 14.6 Geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model nordøst for Bornholm. Placeringen af profilet er vist på Figur 14.11.

Fint lagdelt Baltisk Issøler (markeret med orange) med tykkelser på 10-20 m aflejret i senglacialtiden overlejrer de glacialle aflejringer på dybder større end 30 m under det nuværende havniveau. Issøleret overlejres af et tyndt lag af marint ler (Holocænt Yoldia Hav) som igen overlejres af Ancyclus-ler (markeret med mørk grøn) fra søfasen i Tidlig Holocæn. Ancyclus-leret har en maksimal tykkelse på ca. 10 m i de dybere bassiner. Stedvist findes også bevarede kystnære Ancyclus-aflejringer af en mere sandet karakter (også mørk grøn, men markeret med skrålejringer). Holocæne marine aflejringer (overvejende finkornede) er markeret med lys blå farve. På Rønne Banke og i områder umiddelbart syd og nord for Bornholm findes store Holocæne marine sandbanker med skrålejringer.

14.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

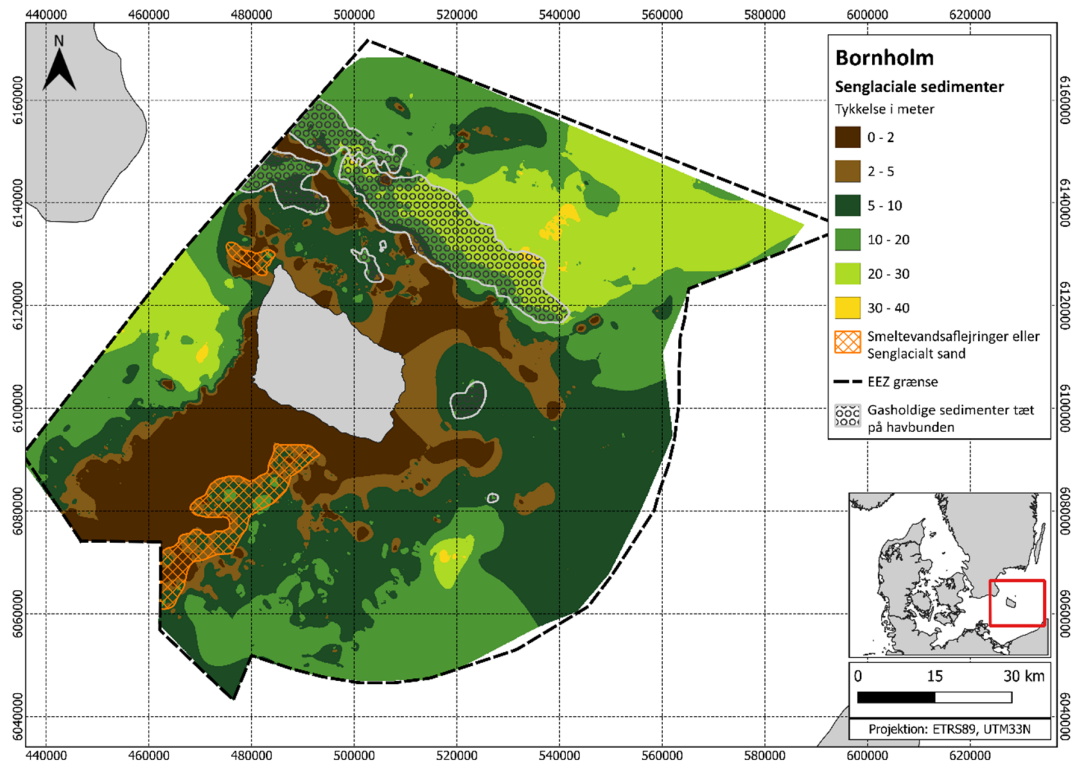
På Figur 14.7 er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 14.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med stor forsigtighed.



Figur 14.7 Kortet illustrerer, hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 14.8). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

Kortet i Figur 14.8 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacialle og Prækvarter aflejringer. Der er store tykkelsesvariationer fra 0-40 m, som dels afspejler at Baltisk Issøler kun blev aflejret på dybder større end 30 m under det nuværende havniveau og dels, at aflejringerne stedvist er blevet eroderet. Områder med fravær af senglaciale aflejringer findes således på den mere lavvandede Rønne Banke sydvest for Bornholm og i relativt lavvandede områder syd, øst og nord for Bornholm. Omvendt findes tykke senglaciale aflejringer i de dybere bassiner omkring Bornholm. I Bornholmsbassinet nordøst for Bornholm ved IODP boring Site M0065 (Andrén et al., 2015) er der tydelige tegn på forkastningsbettinget syndepositionel aflejring af både den senglaciale og den Holocæne sekvens. Dette har medført store mængtigheder af bløde sedimenter og typisk udstrakt forekomst af gas i de overfladenære sedimenter (vist med boblesignatur, Laier & Jensen, 2007).

De senglaciale sedimenter består overvejende af bløde fint lagdelte ler-aflejringer.



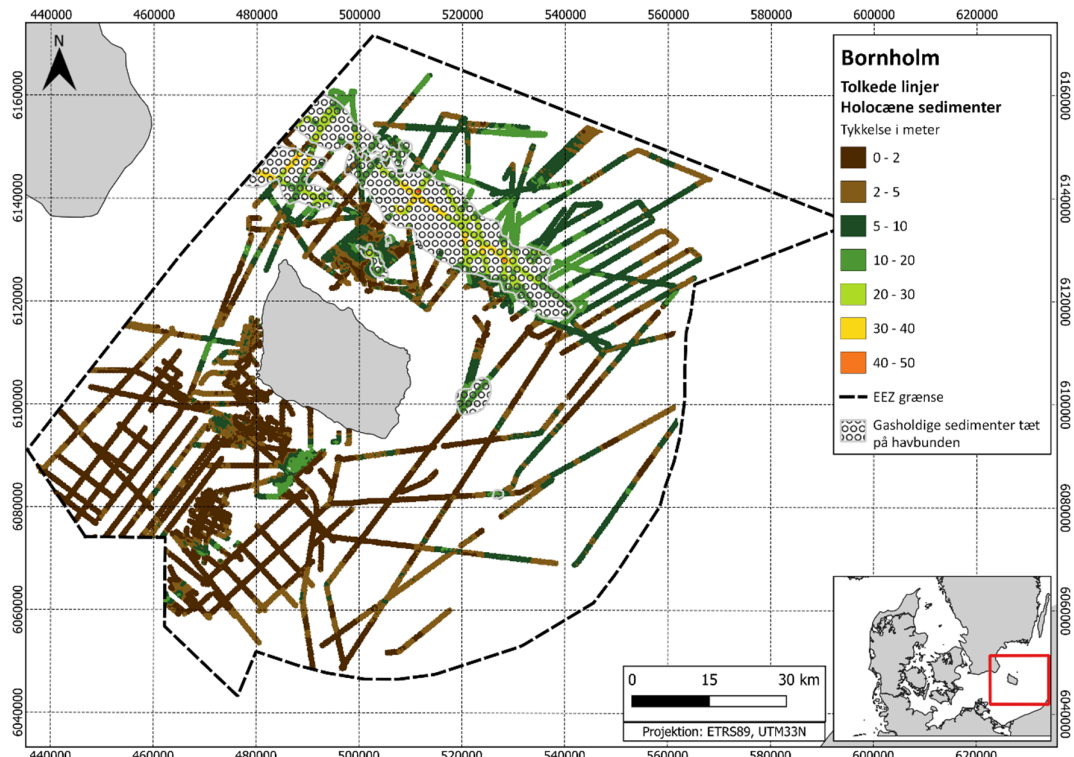
Figur 14.8 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter i Østersøen omkring Bornholm. På kortet er markeret områder, hvor de senglaciale aflejringer primært udgøres af sandede kystaflejringer (orange krydskravering). Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

14.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

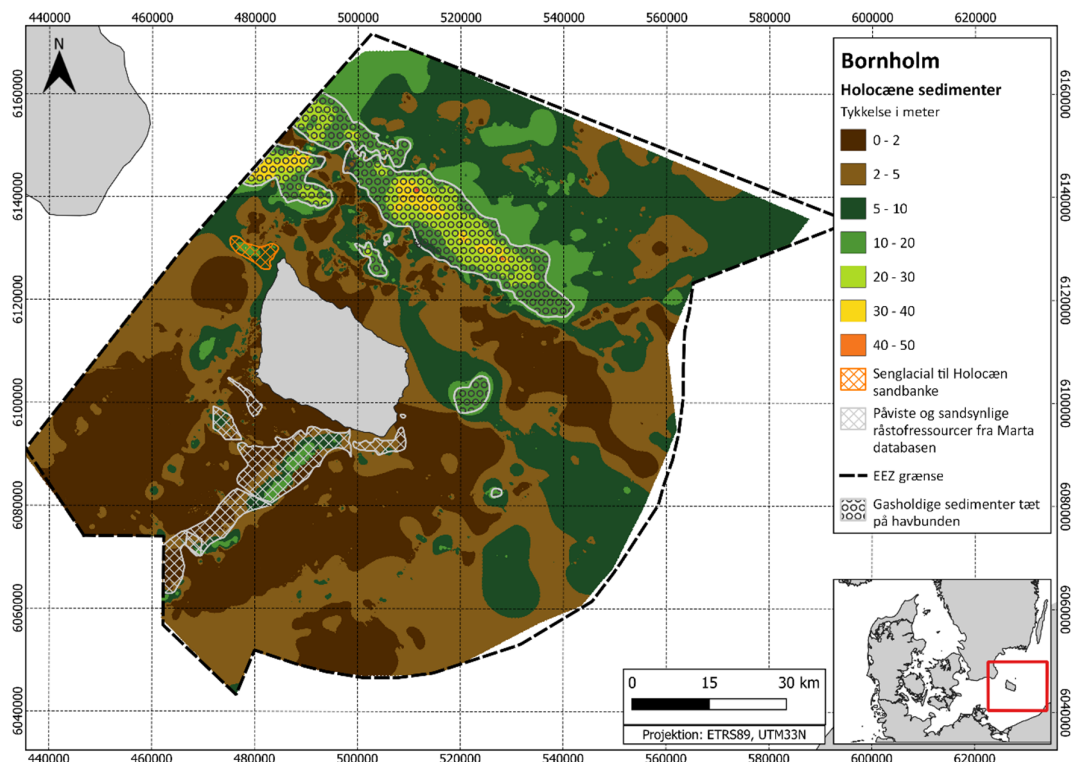
På Figur 14.9 er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 14.10. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med stor forsigtighed.

Kortet i Figur 14.10 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter under havbunden. Tykkelsen varierer generelt fra 0 til 20 meter, udover en dyb gasholdig (vist med boblesignatur) udfyldning i Bornholmsbassinet nordøst for Bornholm, hvor tykkelsen af Holocæne sedimenter opnår en maksimal tykkelse på helt op til ca. 50 m. Tykkelsen af de Holocæne aflejringer vest og syd for Bornholm er generelt mindre end 5 m, bortset fra Holocæne sandbankeforekomster på Rønne Banke, der opnår mægtigheder på op til ca. 15 m.

De Holocæne sedimenter (Ancylus Sø-aflejringer og marine aflejringer) består overvejende af bløde og finkornede aflejringer. Dog findes store velsorterede sandforekomster på den sydøstligt orienterede del af Rønne Banke strukturen.



Figur 14.9 Kortet illustrerer, hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 14.10). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

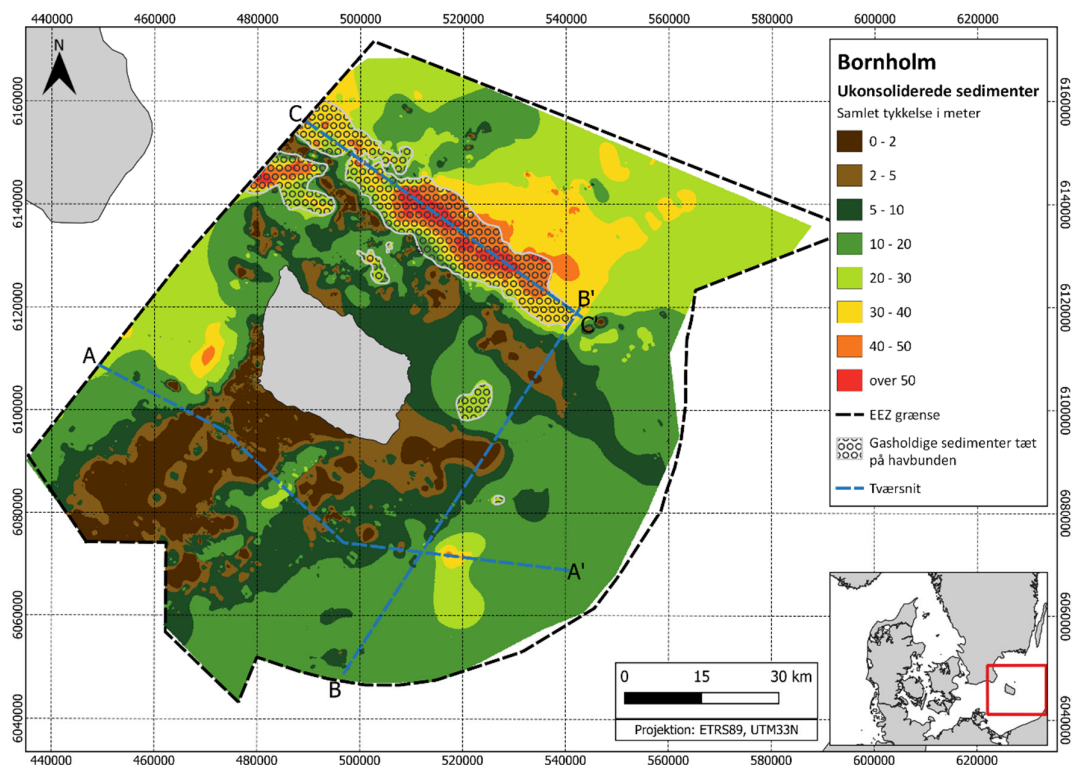


Figur 14.10 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter i Østersøen omkring Bornholm. På kortet er påviste og sandsynlige, sandede ressourcer fra Marta databasen vist med grå krydsskravering og en senlaciel-Holocæn sandbanke med orange. Områder med gas i sedimenterne er vist med boblesignatur.

14.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 14.11 herunder er den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter vist. Sedimenterne har ikke været overskredet af Kvartærtidens isskjalde. De potentielt, bløde sedimenter overlejrer de ældre, og typisk hårdere, glaciale lag og de Prækvartære aflejringer, som i større områder omkring Bornholm ligger helt op til havbunden. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de Holocæne og senglaciale lag fra havbunden og ned til toppen af de glaciale moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive Holocæne og senglaciale tykkelseskort.

Kortet i Figur 14.11 viser, at de generelt lavvandede områder som Rønne Banke sydvest for Bornholm og området ca. 20 km nordøst for Bornholm inkl. Christiansø i større dele har tykkelser af bløde ukonsoliderede sedimenter på mindre end 5 m. Umiddelbart syd for Rønne, hvor Prækvartære aflejringer er eksponeret på havbunden, er der således helt fravær af ukonsoliderede sedimenter. Omvendt har store dele af de dybere dele af området tykkelser af bløde ukonsoliderede sedimenter på 10-30 m, og i Bornholmsbassinet ses i en langstrakt zone maksimale tykkelser på over 50 m.

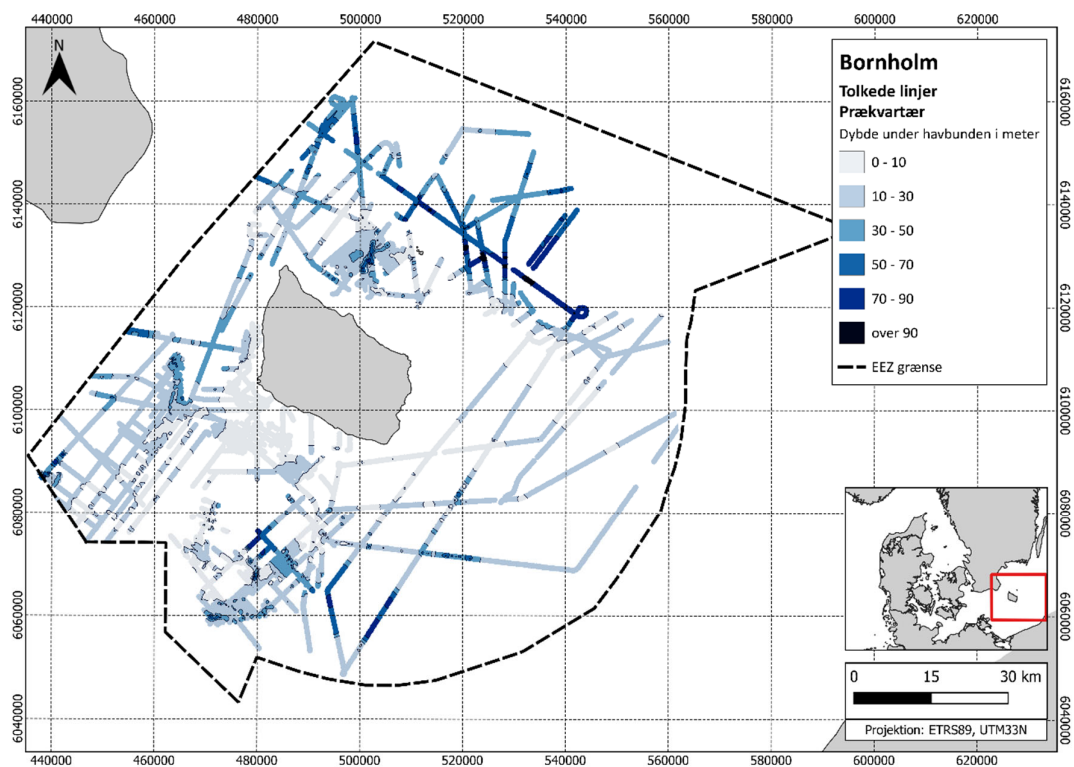


Figur 14.11 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i Østersøen omkring Bornholm. På kortet er beliggenheden af de geologiske profiler (Figur 14.4 til Figur 14.6) angivet.

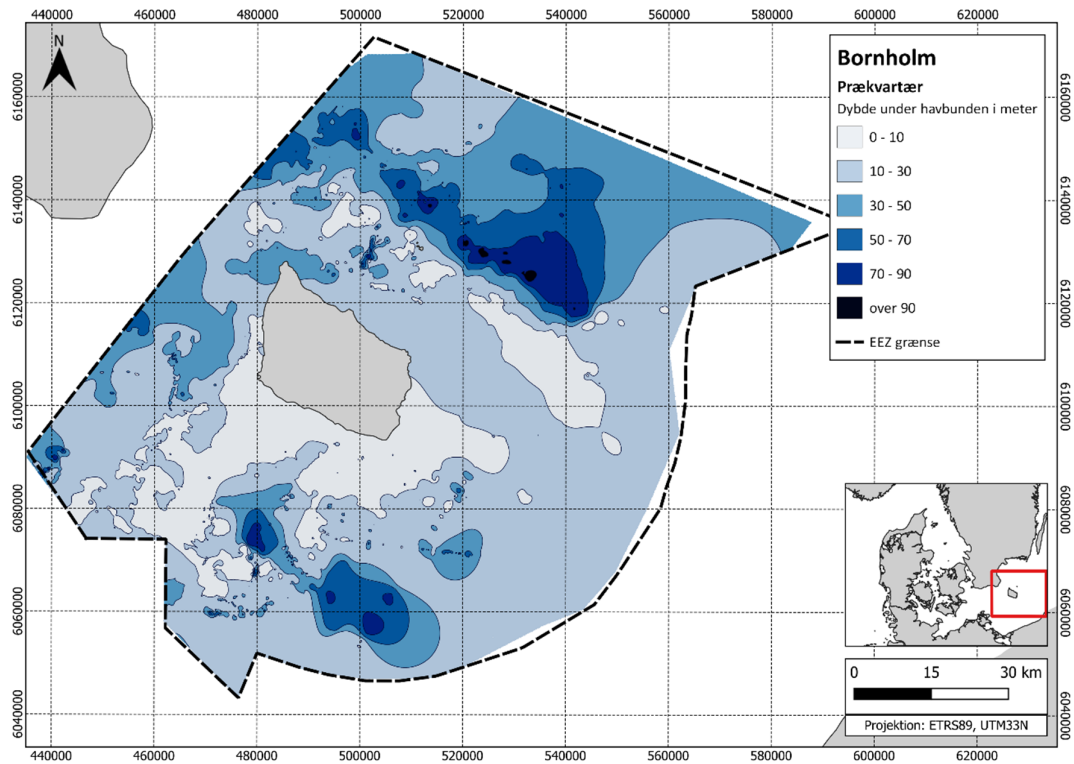
Det har på de fleste seismiske profiler været muligt at kortlægge den Prækvartære overflade, dvs. overgangen mellem Prækvartære og Kvartære aflejringer (Figur 14.12). Ved at vise den tolkede dybde af Prækvartære aflejringer under havbund i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til

grund for det fuldt interpolerede kort (Figur 14.13). I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede kort således betragtes med stor forsigtighed. Forskellen mellem tykkelsen af de ukonsoliderede aflejringer (Figur 14.11) og dybden under havbunden af de Prækvarter aflejringer svarer til tykkelsen af de mellemliggende glaciale aflejringer, som stedvist udviser stor tykkelse i markante udfyldte dalstrukturer eroderet i de Prækvarter aflejringer (Figur 14.13, Figur 14.14).

Den Prækvarter overflade ligger mindre end 10 m under havbunden i et større område sydvest og syd for Bornholm samt i den NV-SØ gående struktur med højtliggende grundfjeld gennem Christiansø nordøst for Bornholm. I Bornholmsbassinet nordøst for Bornholm ses den Prækvarter overflade at befinde sig mere end 70 m under havbunden i en nordvest-sydgøst orienteret zone sammenfaldende med forkastningszonen i området. I et område syd for Rønne Banke er der lokaliseret en stor begravet Kvarter dal (Figur 14.14), der har skåret sig ca. 50 m ned i den Prækvarter undergrund, som dermed i den zone befinder sig ca. 60-70 m under havbunden.



Figur 14.12 Dybden under havbund af Prækvarter bjergarter langs tolkede seismiske linjer.

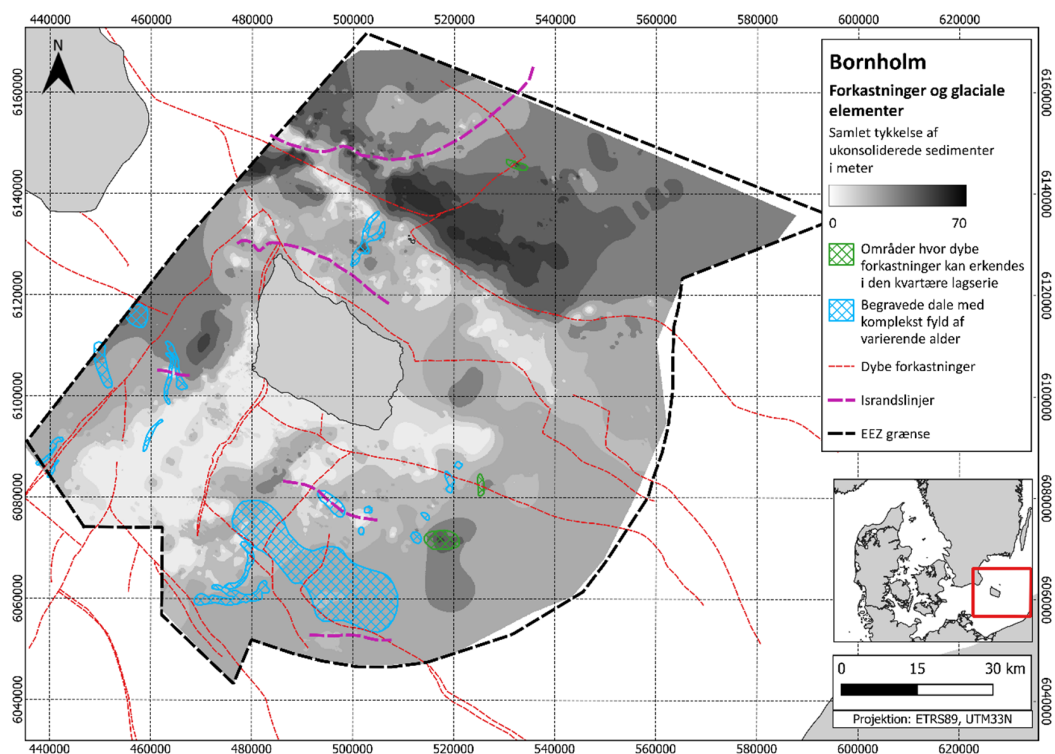


Figur 14.13 Dybden under havbund af Prækvartære bjergarter i Østersøen omkring Bornholm.

I Figur 14.14 herunder er beliggenheden af større kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger efter Nielsen (2003). Områder hvor forkastninger kan erkendes i den Kvartære lagserie er vist med grøn krydsskravering. Den samlede tykkelse af potentielt, bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala. Det ses, at tykkelsesvariationerne i høj grad er sammenfaldende med forekomsten af dybe forkastningszoner og forkastningsblokke, som specielt i området omkring Bornholm har stor indflydelse på dybdeforhold og sedimentakkumulering. Øgede tykkelser er således sammenfaldende med sedimentbassiner, som har været oversvømmet siden senglacial tid og frem til i dag.

Nærværende undersøgelse har identificeret flere områder med kilometer-brede begravede Kvartære dale, som har skåret sig op til ca. 50 m ned i den Prækvartære undergrund (markeret med blå krydsskravering). En specielt stor dal er identificeret i Bornholmsbassinet syd for Rønne Banke. Boringer udført i forbindelse med de geotekniske undersøgelser for Energiø Bornholm II (Rambøll, 2024) viser, at dalfyldet består af en sammensat serie af vekslende moræneler og smeltevandssand.

På Figur 14.14 er desuden markeret større israndslinjer med inspiration fra Szuman et al. (2024). Israndslinjerne er identificeret i nærværende undersøgelser, og fremstår som positive batymetriske lineamenter bestående af moræne aflejringer.



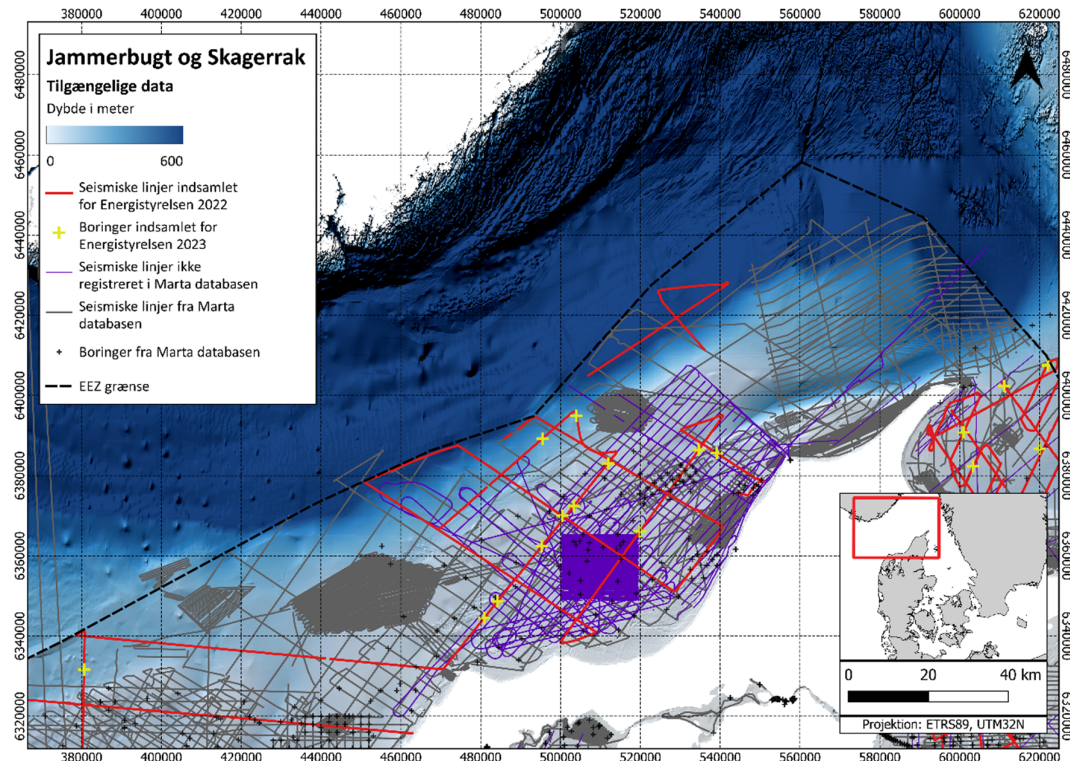
Figur 14.14 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003) og områder hvor forkastninger kan erkendes i den Kvartære lagserie samt tolkede begravede dale og israndslinjer (Szuman et al., 2024). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

15. Jammerbugt og Skagerrak

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af Jammerbugt og Skagerrak. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glaciala lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glaciala lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

I et større område i Skagerrak, nordvest for Tannis Bugt mellem Hirtshals og Skagen, har der kun været meget højploeselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed. Samtidig har overfladenær gas i sedimenterne i området yderligere forhindret nedtrængning af de seismiske signaler og dermed også forhindret kortlægning af de underliggende geologiske lag. Det har således ikke været muligt at foretage en egentlig kortlægning i området, hvorfor der kun kan angives en forventning til sedimenttykkelserne baseret på generel viden om området fra publicerede studier.

På oversigtsfiguren i Figur 15.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i området. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.



Figur 15.1 Oversigtskort over Jammerbugt og Skagerrak. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

15.1 Seismiske enheder

I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 15.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 15.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler, som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

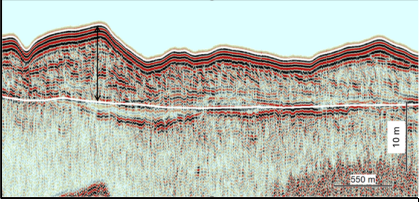
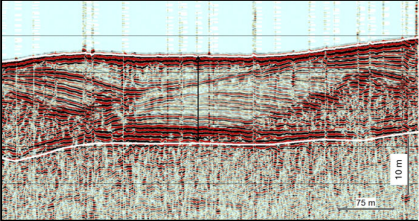
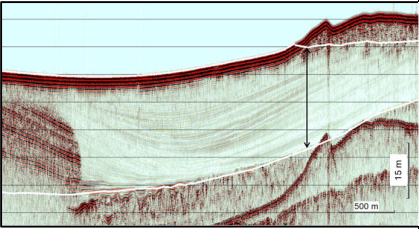
15.1.1 Prækvartære strata

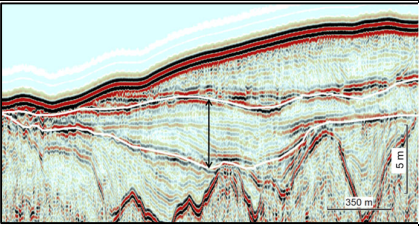
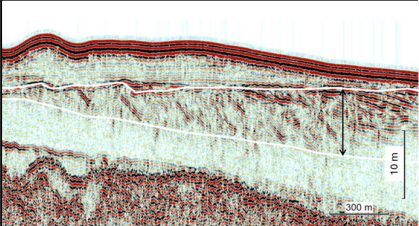
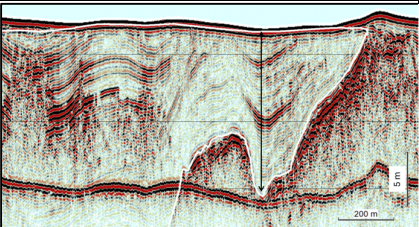
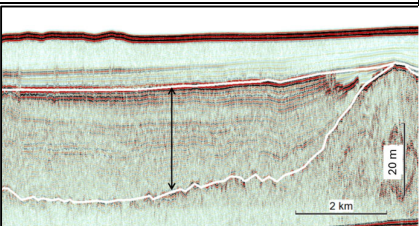
De Kvartære lag afgrænses fra de ældre lag af en markant erosionsflade (Nielsen et al., 2008) og de Prækvartære sedimenter ved basis af Kvartær i Jammerbugt og Skagerrak domineres af skrivekridt (Japsen, 2000). Ud for Hanstholm forekommer der lag af Danien kalksten. De Prækvartære lag er foldede og forkastede, særligt i Sorgenfrei-Tornquist Zonen (Michelsen & Nielsen, 1993). Basis af Kvartæret ligger højt i den sydlige del af Jammerbugt, hvor de Prækvartære aflejringer findes 0-10 m under havbunden, men nær grænsen til norsk farvand findes de Prækvartære aflejringer mere end 600 m under havbunden. Fælles for de Prækvartære aflejringer er, at den øvre grænse er eroderet af de Kvartære isskjolde. Den seismiske karakter af kridt-aflejringerne er interne parallelle og ofte foldede reflektorer med medium-høj amplitude, samt en høj-amplitude øvre erosiv grænse. Kalkaflejringer fra Danien har høj-amplitude interne parallelle og foldede reflektorer samt en høj-amplitude øvre erosiv grænse. Flere borer i moræneaflejringer fra området har et stort indehold af kridt-klastre (f.eks. boring 570921.6 (JAM-50) i Figur 15.3), og dybere seismiske undersøgelser har identificeret glacialt dislokerede og imbrikerede flager af kridtaflejringer i den centrale ydre Jammerbugt (Pedersen & Boldreel, 2015).

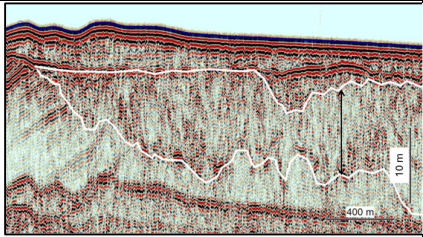
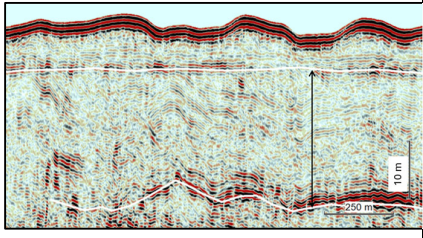
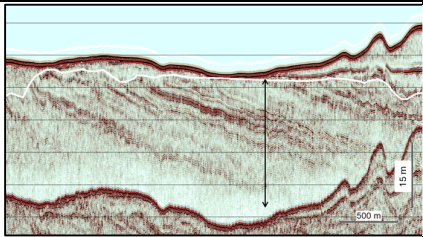
15.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

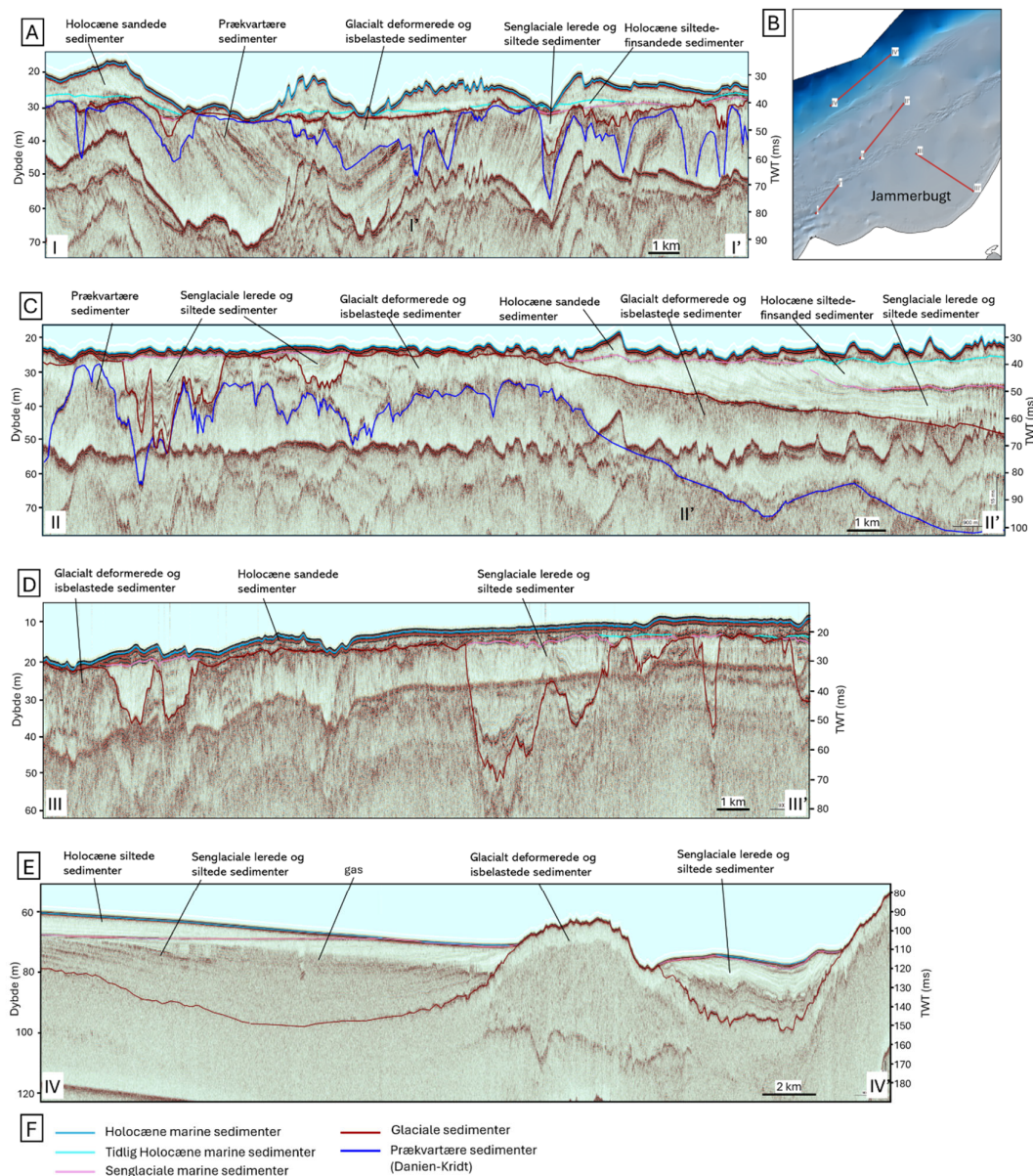
Nordsøen var i Kvartærtiden præget af vekslende istider og mellemistider og Jammerbugt og Skagerrak blev talrige gange dækket af det Skandinaviske Isskjold. Under Weichsel istidens kulmination var hele Jammerbugt dækket af et isskjold, som strakte sig sydpå til den sydlige del af Jyske Rev. Det dybe havområde Norske Rende nordvest for Jammerbugt er skabt ved erosion af fokuserede isstrømme, som under deglaciationer har dannet marint baserede isbræmmer, som hurtigt har trukket sig tilbage. De isbelastede og glacialt deformerede aflejringer består typisk af moræneler og -sand, men indlejrede interglaciale og interstadiale marine aflejringer, lakustrine aflejringer og smeltevandsaflejringer kan forekomme. De glacialle aflejringer kan være præget af glacio-tektoniske forstyrrelser, hvor sedimenterne er deformerede af den fremrykkende is, og Pedersen & Boldreel (2017) har beskrevet et stort glacialtektonisk kompleks med opskudte flager af skrivekridt i Jammerbugt ud for kysten mellem Hirtshals og Blokhus. Deformationen er dateret til Saale istiden, og flagerne omfatter formentlig også Kvartære lag. På kysten i Jammerbugt er et stort glacialtektonisk kompleks fra den seneste istid, Weichsel, beskrevet ved Rubjerg Knude af Pedersen (2005). Den interne seismiske facies i de glacialle isbelastede sedimenter er for det meste af kaotisk karakter, men der kan forekomme lagdelte og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende og præget af dybere indfyldte dale, som illustreret i Figur 15.2 Tabel 15.1.

Tabel 15.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Mellem til Sen Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter (mobilt sand)	Skråt hældende, udbyggede reflektorer. Ofte som positive barreformer som stedvist er opbygget af overlejrende sæt. Skarp nedre grænse.	10	Stor lateral udbredelse i Jammerbugt på dybder <35 m.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin	
Mellem til Sen Holocæn	Holocæne, siltede/finsandede, marine sedimenter (contouritter)	Let bølgende og lateralt opbyggende reflektorer med medium amplitude.	15	Findes på skråninger på vanddybder >80 m i ydre Jammerbugt/Skagerrak.	Siltet finsand	Marin	
Holocæn	Holocæne, siltede-lerede finsandede, marine sedimenter	Parallelle reflektorer med medium amplitude. Overlejrer konformt den underliggende senglaciale overflade.	30	Aflejringer på dybere vand i ydre Jammerbugt og Skagerrak.	Siltet-leret finsand	Marin	

Tidlig Holocæn	Holocæne, siltede-finsandede, marine sedimenter	Parallelle kontinuerlige reflektorer med medium amplitude. Onlap på flanker. Stedvis med interne diskontinuitetsflader.	10	Udfyldning af lavninger vest og syd for Hanstholm.	Finsand, siltet med indslag af lerlag	Marin (kystdannelser i beskyttede havarme)	
Tidlig Holocæn	Holocæne, marine, sandede sedimenter	Ondulerende til let kaotiske reflektorer med medium-høj amplitude. Stedvis som udbyggende skrålejringer.	15	Findes langs marginen af den højtliggende glaciale flade i Jammerbugt.	Fin-grovkornet sand	Marin low-stand kystaflejring	
Senglacial	Senglaciale, marine, lerede-siltede sedimenter (Yngre Yoldialer)	Parallelle reflektorer med medium amplitude. Overlejrer konformt den underliggende glaciale overflade.	30	Findes i begravede depressioner/kanalsystemer i dele af Jammerbugt.	Ler, silt og finsand	Glaciomarin	
Senglacial	Senglaciale, marine, lerede-siltede sedimenter (Yngre Yoldialer)	Parallelle, lav-medium amplitude reflektorer. Overlejrer konformt den underliggende glaciale overflade. På dybere vand er overgangen til Holocæne aflejringer konform.	30	Findes langs marginen af den glaciale overflade i Jammerbugt og på dybere vand i Skagerrak.	Ler, silt og finsand	Glaciomarin	

Glacial	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	Kaotiske, ikke-transparente reflektorer. Begrænset gennemtrængning af det seismiske signal. Ondulerende overflade.	35	Udbredt i det meste af området på nær steder hvor Holocæne sedimenter erosivt overlejrer Prækvarter aflejringer.	Moræneler, morænesand samt ispåvirket/ isoverskredet ler, silt, sand	Glacial	
Glacial	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter (deformerede marine aflejringer fra Skærumhede-serien)	Diskontinuerte-kaotiske reflektorer med variabel hældning og diskontinuerte folder. Begrænset gennemtrængning af det seismiske signal. Undergrænse varierer fra markant høj-amplitude reflektor til diskontinuerlig.	30	Udbredt i det meste af området på nær steder hvor Holocæne sedimenter erosivt overlejrer Prækvarter aflejringer.	Ispåvirket/ isoverskredet ler, silt og sand, stedvis med bevaret stratifikation fra ældre deformerede formationer	Glacial	
Prækvarter	Danien og Øvre Kridt	Horizontale til skråthældende eller foldede reflektorer. Oftest højreflektiv øverst men begrænset nedtrængning.	-	Udbredt i hele området. Mod nord og vest på dybere vand findes Prækvarteroverfladen på større dybde.	Kalk og skrivekridt	Marine shelf-aflejringer	



Figur 15.2 Eksempler på sparker seismiske data fra Jammerbugt og Skagerrak som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil ud for Hanstholm. B) Oversigtskort. C) Seismisk profil centralt i Jammerbugt. D) Seismisk profil ud for Tranum Strand. E) Seismisk profil i ydre Jammerbugt. F) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

Moræneler er truffet i flere borer i Jammerbugt (f.eks. boring 570824.1 (JAM-12), se Figur 15.3, 570922.4 (JAM-18), 570921.6 (JAM-50), se Figur 15.3, 570921.5 (JAM-51) og 570917.19 (JB-05). Der er kun identificeret få forekomster af smeltevandsaflejringer i Jammerbugt. Det skyldes formodentligt, at området blev oversvømmet af Yoldia Havet umiddelbart efter at Sen-Weichsel isskjoldet trak sig tilbage. Der blev herved aflejret tykke sekvenser af glaciomarint ler og silt direkte på den glacial overflade. Det er dog sandsynligt, at subglaciale smeltevandsaflejringer kan findes i trug eller nedskårne dale i de glacial aflejringer.

15.1.3 Senglaciale, lerede til siltede, glaciomarine sedimenter

Senglaciale, marine sedimenter fra den yngste del af Weichsel er dels bevaret i udfyldninger af lavninger/kanalsystemer i den glaciale overflade i de lavvandede dele af Jammerbugt med vanddybder mindre end 25 m (Hansen et al., 2024), og ses dels som en sammenhængende enhed, der overlejrer den glaciale overflade på dybere vand ud mod Skagerrak. Enheden repræsenterer glaciomarine aflejringer afsat i Yoldia Havet efter Weichsel-isen trak sig tilbage (Jessen, 1936; Jensen et al., 2010). Den interne seismiske facies består af medium-amplitude, parallelle reflektorer, konforme med den ondulerende undergrænse (Tabel 15.1). Toppen af enheden afskæres på lavere vand erosivt af Holocæne enheder. Mod dybere vand går overgrænsen til de Holocæne aflejringer fra at være erosiv til at være tilnærmelsesvis konform. De senglaciale marine aflejringer er truffet i flere borer, der viser, at de er finkornede og indeholder marine muslinger. Dateringer af flere borer, der gennemborer den øverste del af enheden, gav kulstof-14 aldre på 12.000-13.000 kal. år BP (Figur 15.3).

15.1.4 Senglaciale, finsandede til lerede ferskvandssedimenter

Senglaciale ferskvandssedimenter fra den yngste del af Weichsel er observeret i flere borer i den kystnære del af Jammerbugt. Aflejringerne er svære at identificere seismisk, da de let kan forveksles med ældre marine senglaciale udfyldninger af lavninger mellem højereliggende glaciale partier. Den interne seismiske facies består af vekslende lav- til medium amplitude, let ondulerende reflektorer (Tabel 15.1). Senglaciale ferskvandsaflejringer er truffet i flere borer ud for Lønstrup og Løkken, og består her af fint til meget fint siltet sand.

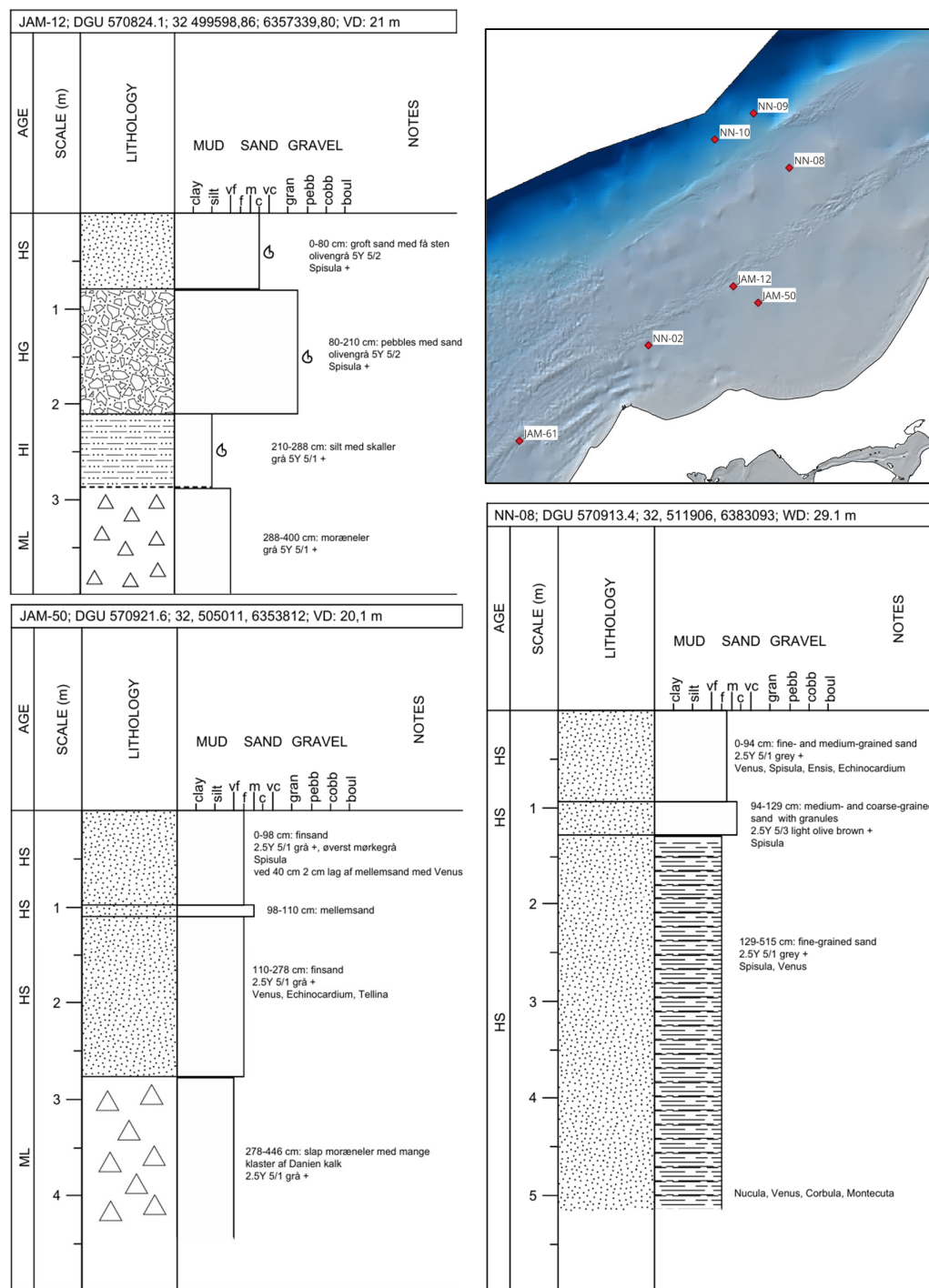
15.1.5 Tidlig Holocæn, marine sedimenter

Tidlig Holocæn marine sedimenter findes i Jammerbugt dels som kliniforme udbygninger mod dybere vand mod nordøst og nordvest og dels som daludfyldninger i den sydlige del af Jammerbugt. Herudover findes Tidlig Holocæn marine aflejringer stedvist bevaret under den kraftigt erosive yngre Holocæne mobile sandenhed. Den interne seismiske facies består af medium amplitude, parallelle til sigmoidale/lateralt udbyggende reflektorer (Tabel 15.1). Undergrænsen af enheden består ofte af høj-amplitude reflektorer, men på dybere vand mod nord er undergrænsen til marine senglaciale Yoldia Hav aflejringer formentlig konform og svær at erkende, da sedimentationen må formodes at have været kontinuerlig. Enheden afskæres på vanddybder mindre end ca. 30 m erosivt af overlejrende Holocæne enheder af mobilt sand. De Tidlig Holocæn marine aflejringer er truffet i flere borer, der viser, at de typisk består af finkornet sand og silt med indslag af tynde lerlag (f.eks. boring 570827.1 (JAM-04), 570925.1 (JAM-08) og 570824.1 (JAM-12), se Figur 15.3).

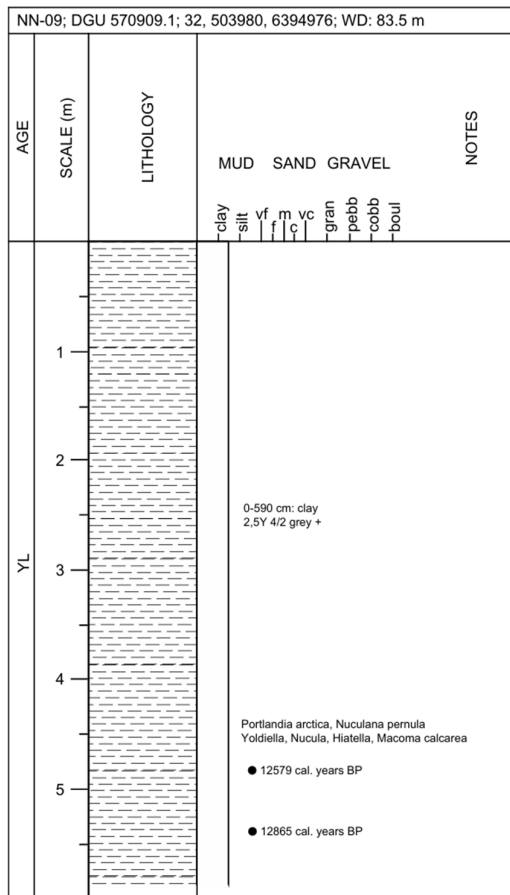
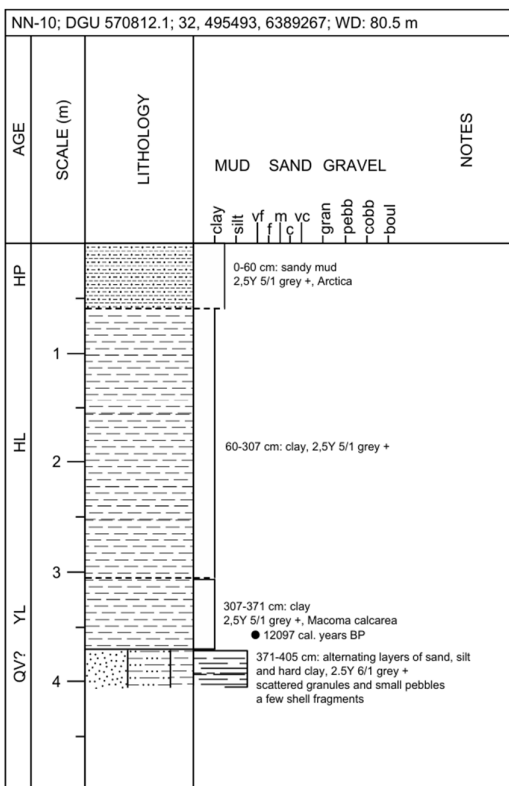
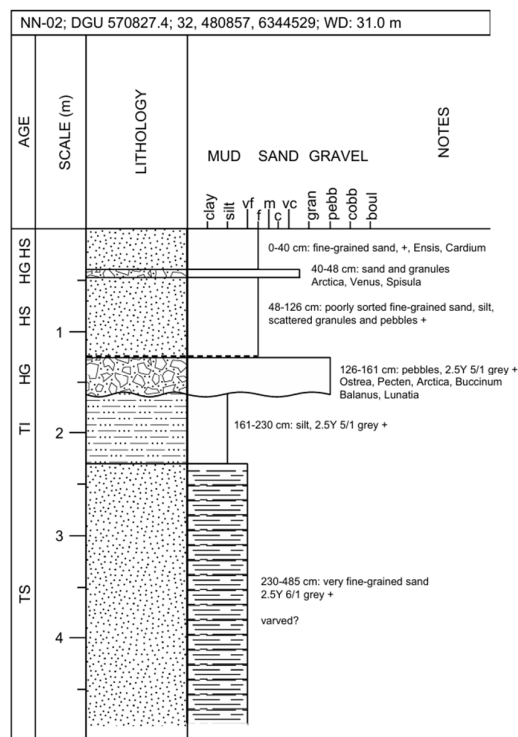
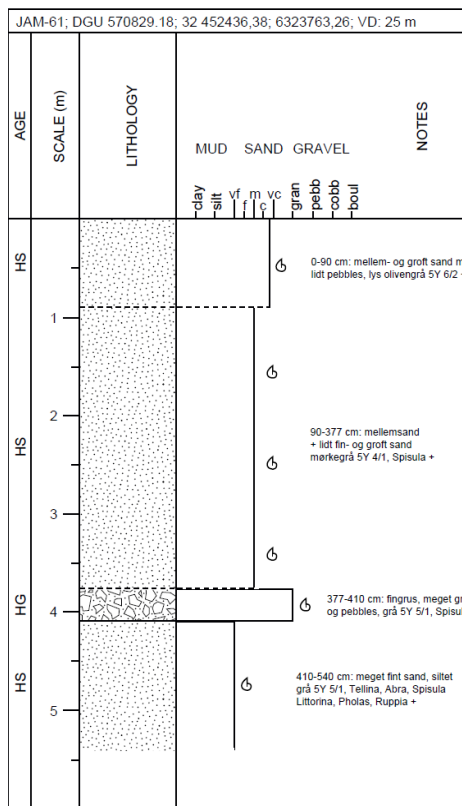
15.1.6 Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter

Holocæne sandaflejringer udgør den yngste sedimentenhed i området. Aflejringerne bliver ofte omtalt som mobilt sand, og findes både som et op til få meter tyndt dække over ældre aflejringer og som store sammensatte barresystemer med en mægtighed på op til ca. 15 m (Nørgaard-Pedersen et al., 2023). Barresystemerne er ofte præget af aktivt vandrende

bundformer. Den interne seismiske facies består af høj-medium amplitude reflektorer, typisk udbyggende med skrålejringer (Tabel 15.1). Undergrænsen er ofte skarp og med høj amplitude. Det Holocæne marine sand er truffet i et stort antal borer, der viser, at de typisk består af fin- til grovkornet marint sand, som stedvist er gruset (Figur 15.3). Sandaflejringerne formodes at være blevet dannet i Midt-Sen Holocæn under dynamiske forhold svarende til de nuværende i Nordsøen. Det er muligt, at kernen i de store barresystemer blev dannet tidligere i Holocæn under et lavere havniveau og under et andet tidevandsregime end i dag.



Figur 15.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området, se også næste side.



15.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Jammerbugt og Skagerrak, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for området. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med to geologiske profiler i Figur 15.4. Placeringen af profilerne er vist på Figur 15.9.

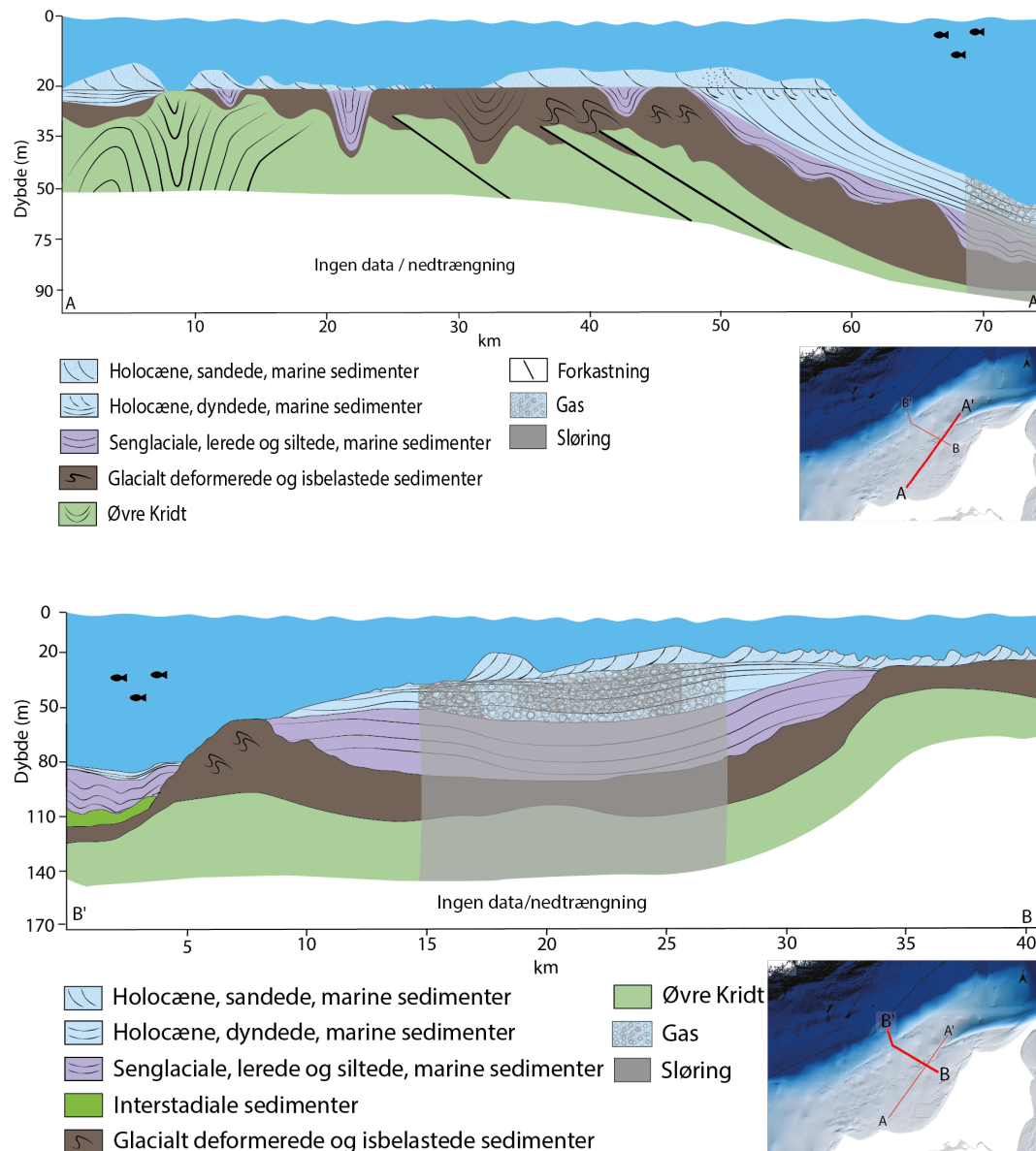
Det nederste lysegrønne lag på profilerne repræsenterer de Prækvarter lag som domineres af skrivekridt. De Prækvarter lag er flere steder deformerede enten i form af folder eller overskydninger.

De mørkebrune lag på begge profiler repræsenterer en serie af ældre glaciale lag, til og med lag fra sidste istid, Weichsel, som har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilerne). Lagene varierer i tykkelse og består formentlig hovedsageligt af moræneler og morænesand fra Saale og Weichsel istiderne, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglaciale sediment. Centralt på det øverste profil er markeret en nedskæring internt i de glaciale lag som senere er udfyldt igen. Udfyldningen tolkes som glaciomarine aflejringer fra Tidlig og Mellem Weichsel. På det nederste profil ses mod nordvest et grønt lag som kan repræsentere marine lag fra Eem eller Mellem Weichsel, den såkaldte Skærumhede Serie (Larsen et al. 2009b).

De lilla lag på profilerne repræsenterer lerede og siltede glaciomarine aflejringer fra det senglaciale ishav. De optræder dels i lavninger i den glaciale overflade og dels mod nordøst og nordvest på dybere vand. Senglaciale søaflejringer og moseaflejringer fra Tidlig Holocæn forekommer kun sparsomt i området, og er ikke medtaget i modellen.

De lyseblå lag repræsenterer dels Holocæne dyndede marine lag (vist med horisontal eller svagt hældende intern lagdeling, mere eller mindre konformt med underlaget) og dels et mobilt dynamisk overfladelag af Holocænt marint sand (vist med stejle skrålejringer og prikket signatur for sand). I de mere lavvandede områder er lavninger i den glaciale og senglaciale overflade blevet udfyldt med dyndet materiale. På større vanddybder mod nordøst og nordvest har Jyllandsstrømmen aflejret en stor kile af dynd, ler, silt og finsand, som viser udbygning mod nordøst med stor-skala kliniformer, mens der kystnært blev aflejret mere sandede udbygninger med skrålejringer. Enheden er rig på skaller af marine muslinger og snegle. På vanddybder større end 100 m langs skråningen til de mere lavvandede dele af Jammerbugt ses i dele af området karakteristiske contourit aflejringer, som dannes langs skråninger ved høj sedimentationsrate under kraftig strøm. Tilsvarende aflejringer er beskrevet fra den

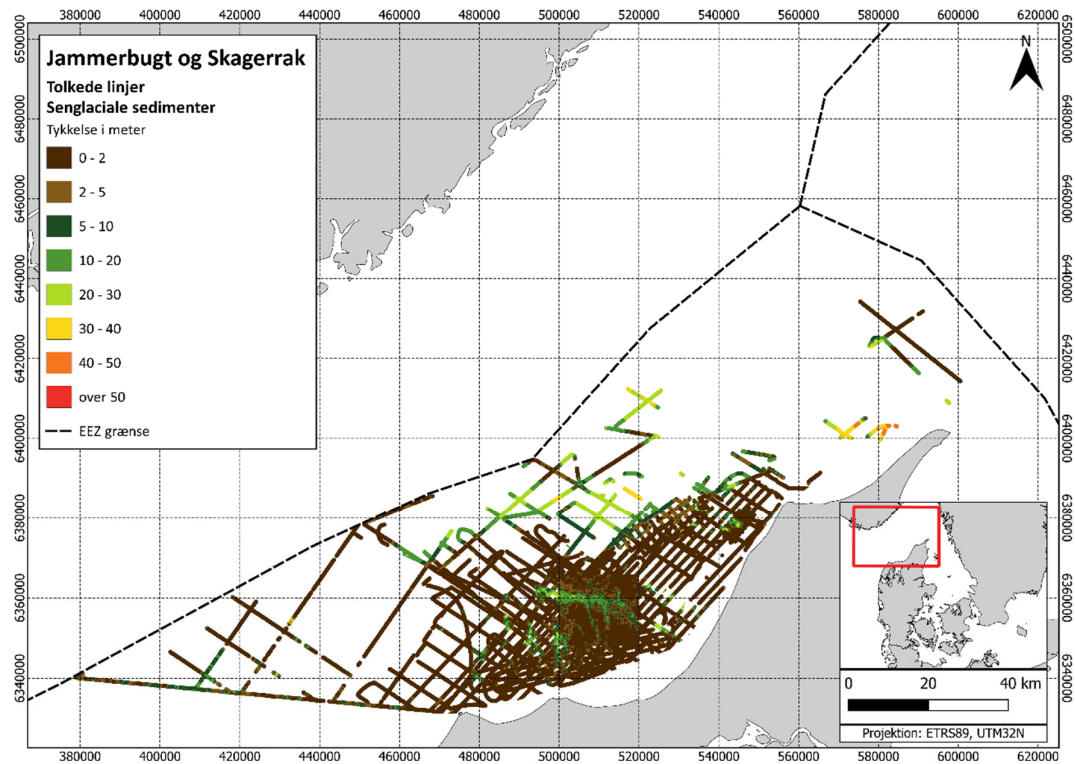
nærliggende norske sektor af Bøe et al. (1998). På lavere vanddybder, over de finkornede aflejringer, ses en yngre enhed af dynamisk sand som bygger ud over de lavvandede dele af området. I områder med større sandakkumulationer, og hvor der er stærk strøm under storme, ses store sandbølger på havbunden.



Figur 15.4 Øverst ses et sydvest-nordøst gående og nederst et nordvest-sydøst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for Jammerbugt og Skagerrak. Placeringen af profilerne er vist på Figur 15.9 og Figur 12.9.

15.3 Tykkelse af senglaciale aflejringer

På Figur 15.5 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 15.6. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de senglaciale sedimenter således betragtes med større forsigtighed.



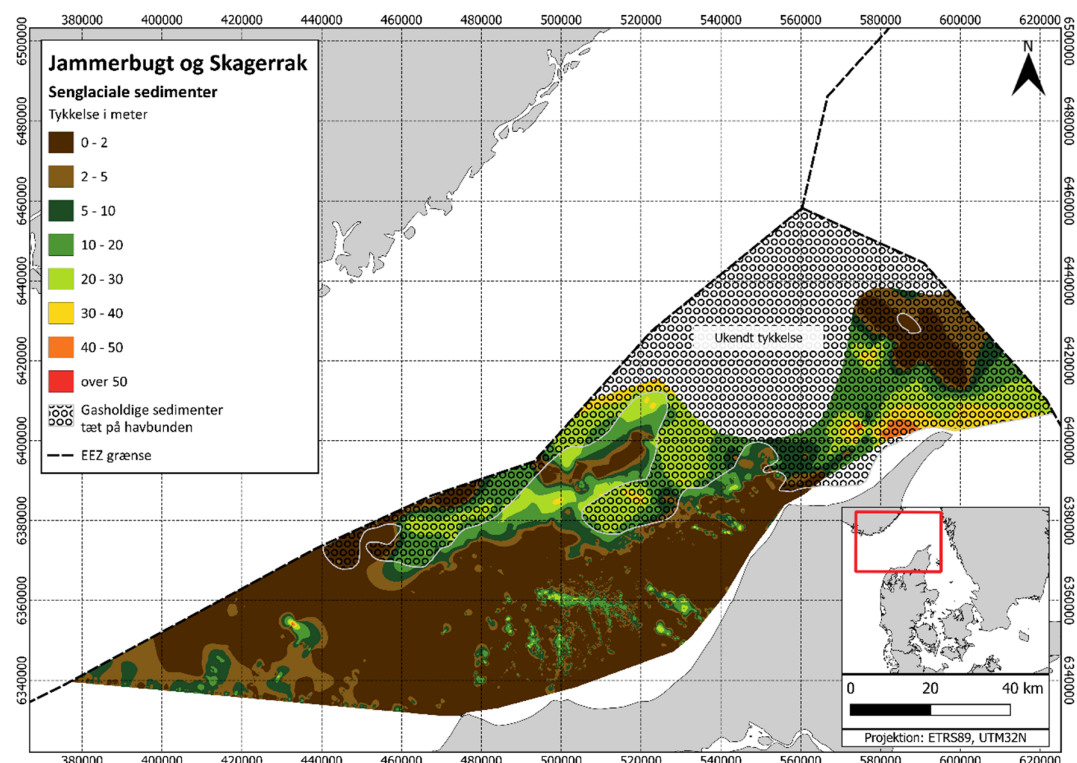
Figur 15.5 Kortet illustrerer hvor senglaciale aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 9.6). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

Kortet i Figur 15.6 viser tykkelsen af de senglaciale sedimenter umiddelbart over de glacielle aflejringer, og i meget store områder varierer tykkelsen fra 0-2 m. Længst mod sydvest ses dog områder med tykkelser på op til 5-20 m og i en meget lokal lavning op til 50 m. I de indre dele af Jammerbugt mellem Hirtshals og Hanstholm ses desuden en række dalnedskæringer i det glacielle underlag som er udfyldte med senglaciale aflejringer. I disse begravede dale når tykkelserne af senglaciale sedimenter op på 20-30 m. Mod nordvest i de ydre dele af Jammerbugt når tykkelserne af de senglaciale aflejringer op på 20-30 m og lokalt 40 m. Ved Tannis Bugt mellem Hirtshals og Skagen og nord for Skagen ses tykkelser på op til 50 m, men længere nord for Skagen ses et større område, hvor tykkelsen af de senglaciale aflejringer kun er 0-5 m.

I et større område i Skagerrak, nordvest for Tannis Bugt mellem Hirtshals og Skagen, har der kun været meget højpålselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed. Samtidig har overfladenær gas i sedimenterne i området (vist med boblesignatur på

kortet) yderligere forhindret nedtrængning af de seismiske signaler og dermed også forhindret kortlægning af de underliggende geologiske lag. Det har således ikke været muligt at foretage en egentlig kortlægning af de senglaciale aflejringer i store dele af Skagerrak. Da tykkelsen af de senglaciale aflejringer, hvor den har kunnet kortlægges, varierer en del, er det desuden vanskeligt at forsøge at forudsige tykkelserne i de områder, som ikke kunne kortlægges. Området som er påvirket af gas, er imidlertid i stor udstrækning sammenfaldende med et område med stor tykkelse af finkornede Holocæne sedimenter. På den baggrund synes det rimeligt at antage, at der i området, hvor de senglaciale aflejringer ikke har kunnet kortlægges, optræder relativt tykke lag af dyndede Holocæne sedimenter.

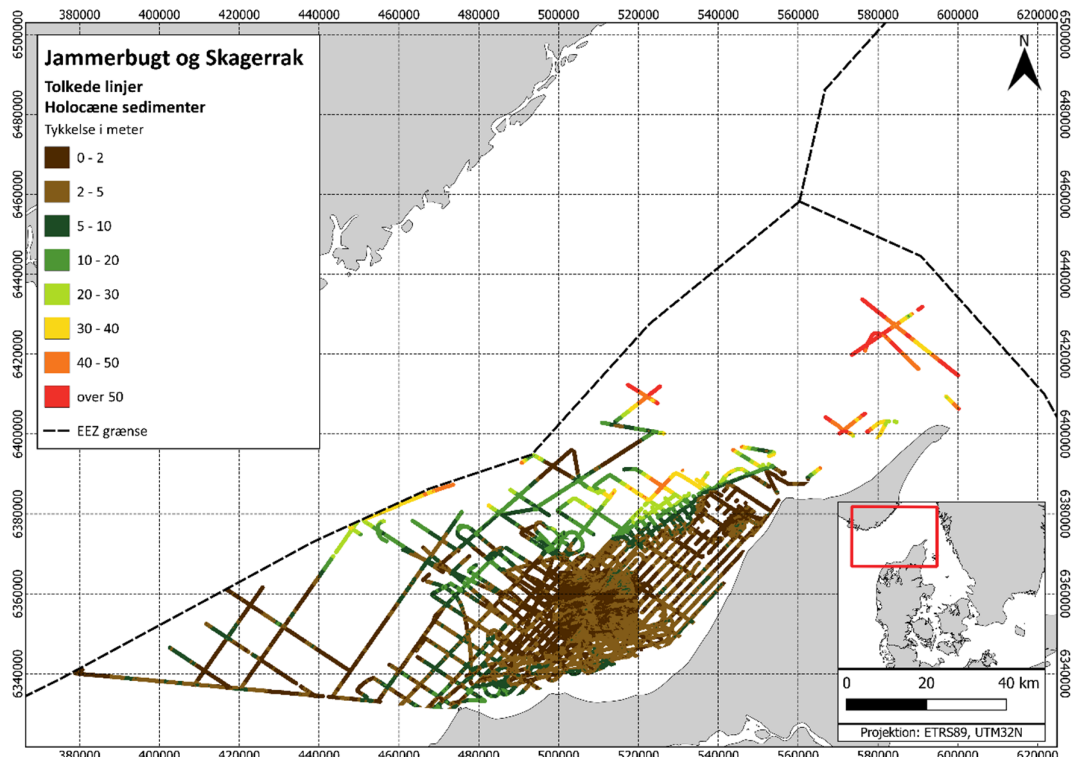
De senglaciale aflejringer består primært af lerede og siltede marine sedimenter.



Figur 15.6 Kort over tykkelsen af senglaciale sedimenter. I den nordlige del af Skagerrak har det ikke været muligt at kortlægge de senglaciale aflejringer ud fra de tilgængelige seismiske data på grund overfladenær gas i sedimenterne (vist med boblesignatur).

15.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

På Figur 15.7 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 15.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.



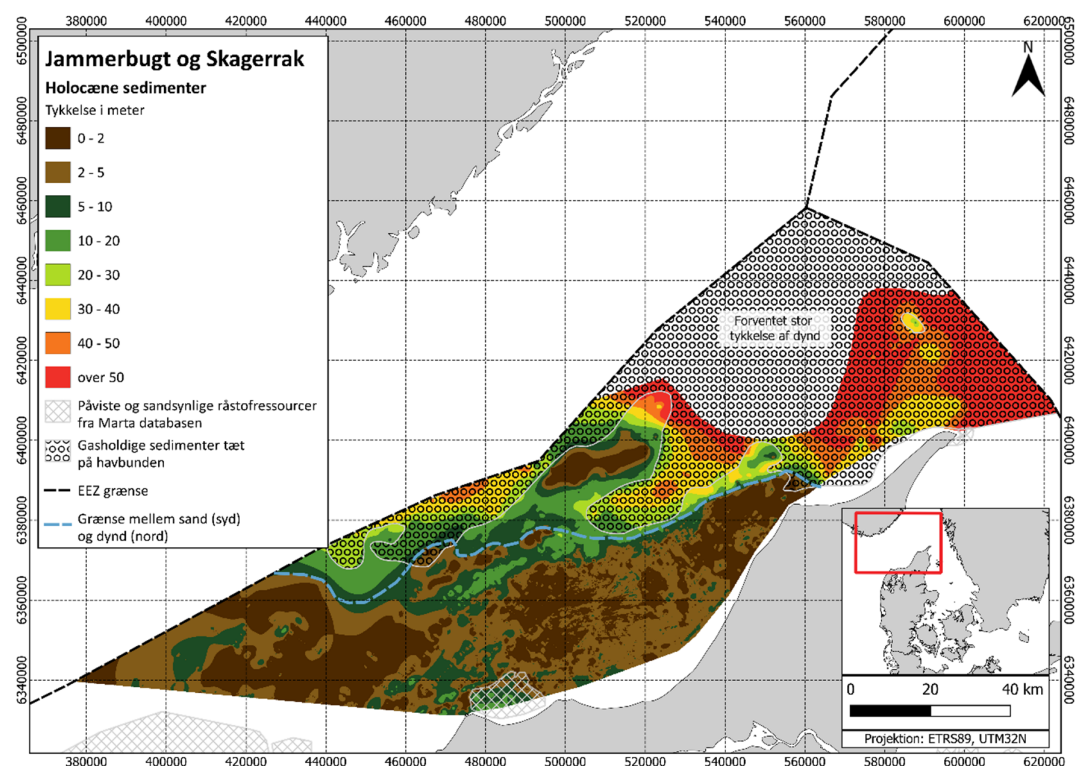
Figur 15.7 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 15.8). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

Kortet i Figur 15.8 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien over de senglaciale sedimenter. I den sydlige halvdel af det kortlagte område varierer tykkelsen generelt fra 0 til 5 meter, og lokalt op til 10-20 m i større og mindre render og lavninger. I den nordlige halvdel af området stiger tykkelsen generelt fra syd til nord fra omkring 5-10 m til over 50 m. I et større område i den ydre del af Jammerbugt mod nordvest, hvor vanddybden er relativt lav på Store Rev, er tykkelsen af de Holocæne aflejringer dog kun 0-5 m og nord for Skagen er der områder, hvor tykkelserne kun er 20-40 m.

I et større område i Skagerrak, nordvest for Tannis Bugt mellem Hirtshals og Skagen, har der kun været meget højpålselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed. Samtidig har overfladenær gas i sedimenterne i området (vist med boblesignatur på kortet) yderligere forhindret nedtrængning af de seismiske signaler og forhindret kortlægning af de underliggende geologiske lag. Det har således ikke været muligt at foretage en egentlig kortlægning af de Holocæne aflejringer i store dele af Skagerrak. Det område som er påvirket af gas, er imidlertid i stor udstrækning sammenfaldende med store tykkelser af finkornede Holocæne sedimenter, hvor de har kunnet kortlægges, og på den baggrund synes det rimeligt at antage, at der i området hvor de Holocæne aflejringer ikke har kunnet kortlægges på grund af gas, også kan forventes relativt tykke lag af dyndede Holocæne sedimenter.

De to områder med relativt tynde Holocæne aflejringer mod syd og relativt tykke aflejringer mod nord adskilles på kortet med en stiptet blå streg. Syd for den blå streg består de Holocæne sedimenter overvejende af et relativt tyndt dække af dynamisk sand, mens de nord for strengen består af relativt tykke og dyndede lag. Samtidig er en række påviste og sandsynlige

råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen markeret med grå krydsskravering på Figur 15.8; i disse områder består de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter.



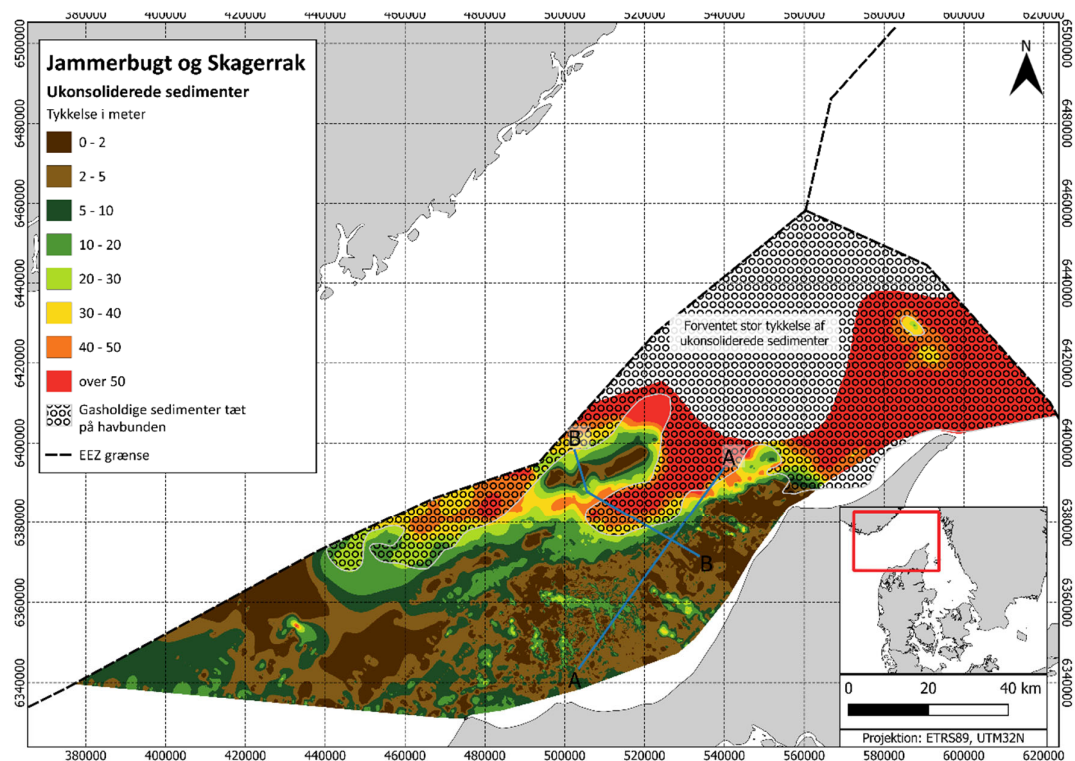
Figur 15.8 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering og gas i sedimenterne nær havbunden er vist med boblesignatur. Den stiplede blå streg markerer grænsen mellem mere sandede Holocæne sedimenter mod syd og mere dyndede aflejringer mod nord.

15.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 15.8 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde og som overligger de ældre, og typisk mere hårde, glaciale lag. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne glaciale moræneaflejringer. Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive senglaciale og Holocæne tykkelseskort. Områder med gasholdige sedimenter tæt på havbunden er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker. Placeringen af de geologiske profiler i Figur 15.4 er vist på kortet.

I den sydlige halvdel af det kortlagte område varierer den samlede tykkelse af bløde sedimenter generelt fra 0 til 5 meter, og længst mod sydvest op til 5-10 m, lokalt 10-20 m og i en enkelt meget lokal lavning op til 50 m. I de indre dele af Jammerbugt mellem Hirtshals og Hanstholm ses desuden en række dalnedskæringer i det glaciale underlag som er udfyldt

med primært senglaciale aflejringer. I disse begravede dale når tykkelserne af de bløde sedimenter op på 20-30 m og helt lokalt 30-40 m.



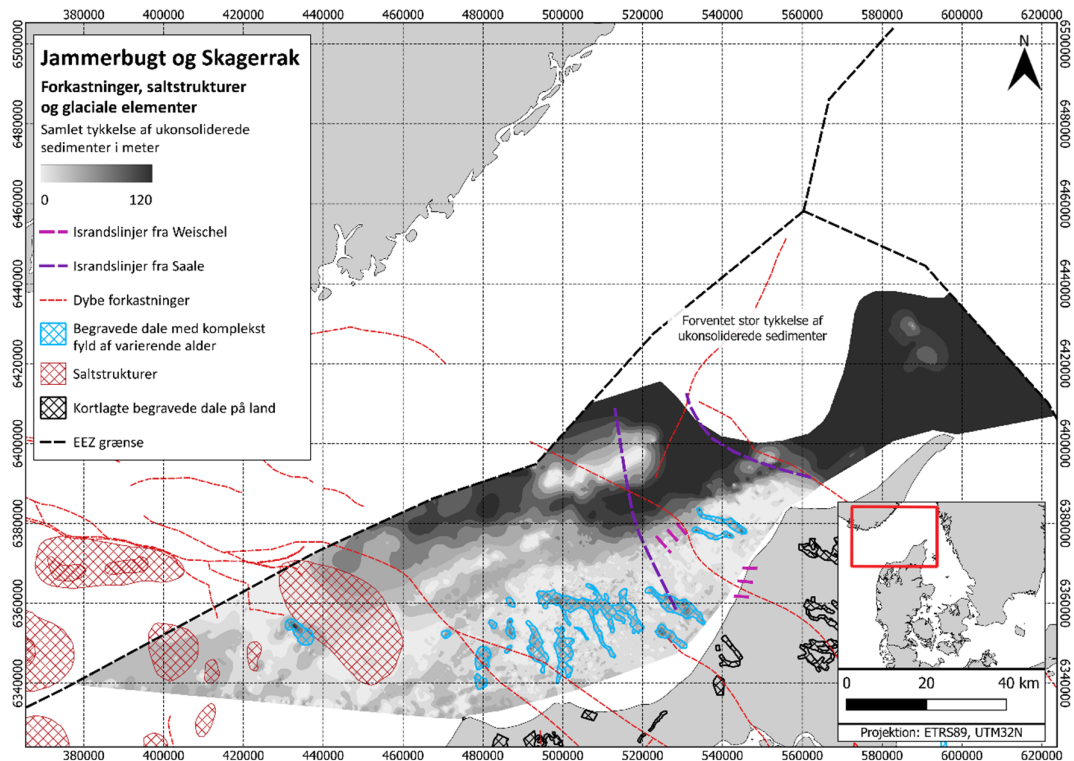
Figur 15.9 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 15.4 angivet.

I den nordlige halvdel af det kortlagte område stiger tykkelsen hurtigt mod nord til mere end 50 m. I et større område i den ydre del af Jammerbugt mod nordvest, hvor vanddybden er relativt lav på Store Rev, er tykkelsen af de bløde sedimenter dog kun 0-5 m, og nord for Skagen er der områder, hvor tykkelsen er omkring 30-50 m, og helt lokalt 10-30 m.

I et større område i Skagerrak, nordvest for Tannis Bugt mellem Hirtshals og Skagen, har der kun været meget højpålselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed. Samtidig har overfladenær gas i sedimenterne i området (vist med boblesignatur på kortet) yderligere forhindret nedtrængning af de seismiske signaler og forhindret kortlægning af de underliggende geologiske lag. Det har således ikke været muligt at foretage en egentlig kortlægning af hverken de senglaciale eller de Holocæne aflejringer i store dele af Skagerrak. Da tykkelsen af de senglaciale aflejringer varierer en del i området, er det vanskeligt at forsøge at forudsige tykkelserne i de områder, som ikke har kunne kortlægges. Det område som er påvirket af gas, er imidlertid i stor udstrækning sammenfaldende med store tykkelser af finkornede Holocæne sedimenter, hvor de har kunnet kortlægges, og på den baggrund synes det rimeligt at antage, at der i det område, som ikke har kunnet kortlægges på grund af gas, også kan forventes relativt tykke lag af dyndede og bløde Holocæne sedimenter.

I Figur 15.10 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i undergrunden er vist med rød krydsskravering. Tolkede begravede tunneldale i området er vist med blå krydsskravering,

og der er således kortlagt en række dale i den indre del af Jammerbugt med sydøst-nordvest gående retning og en række dale med en mere nord-syd eller SSØ-NNV gående retning. Kortlagte begravede dale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk). Israndslinjer fra Saale istiden er vist med lilla stiplede streger i Jammerbugt ud for kysten mellem Hirtshals og Blokhus, og afgrænser et stort glacialtektonisk kompleks med opskudte flager af skrivekridt; deformationerne omfatter formentlig også Kvartære lag (Pedersen & Boldreel, 2017). Et glacialtektonisk kompleks ved Rubjerg Knude fra Weichsel istiden er vist med lys-lilla stiplede streger og er beskrevet af Pedersen (2005). Begge glacialtektoniske komplekser kan erkendes i de tolkede data i nærværende projekt. Den samlede tykkelse af bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 15.10 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund, tolkede begravede tunneldale i området, israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Pedersen, 2005; Pedersen & Boldreel, 2017) samt områder på land med nedskårne begravede dale (Sandersen & Jørgensen, 2016). Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

16. Østlige Nordsø

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af den Østlige Nordsø langs vestkysten af Jylland. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med to geologiske profiler. Endelig beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af de senglaciale lag umiddelbart over de glacial lag, dernæst tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag, som ligger lige under havbunden og til sidst den samlede tykkelse af potentielt bløde sediment (den samlede mægtighed af senglaciale og Holocæne lag fra havbunden og ned til de glacial lag) samt andre vigtige geologiske forhold.

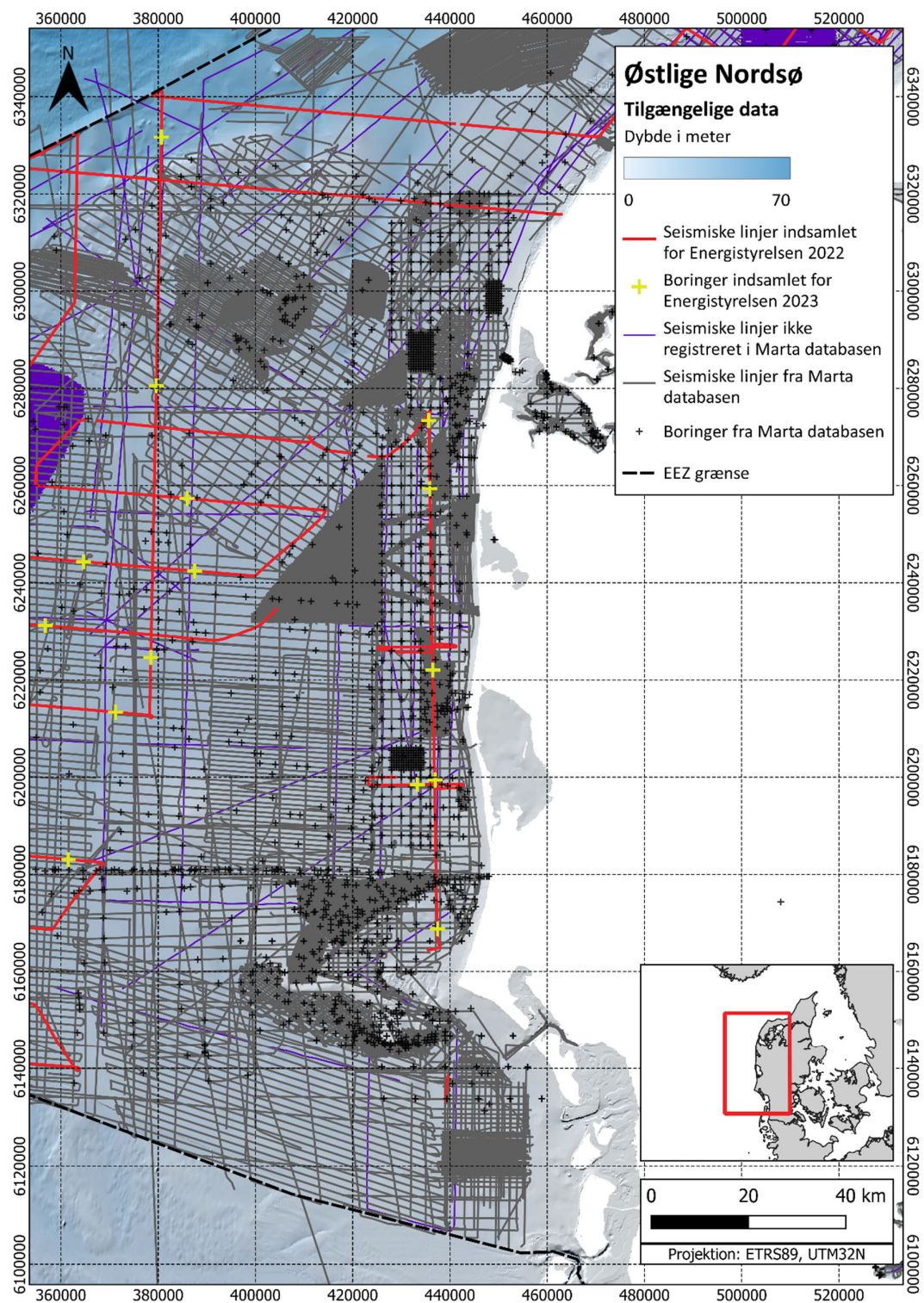
På oversigtsfiguren i Figur 16.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i området. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

16.1 Seismiske enheder

I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 16.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 16.2 og Figur 16.3 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

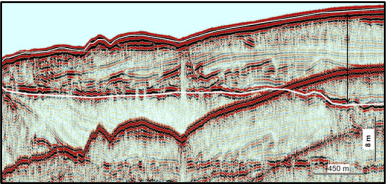
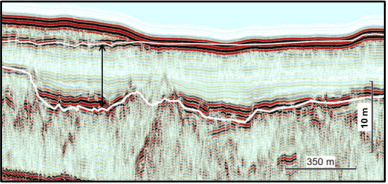
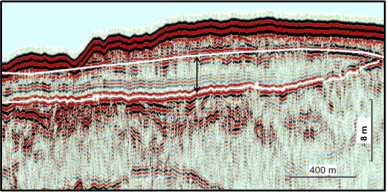
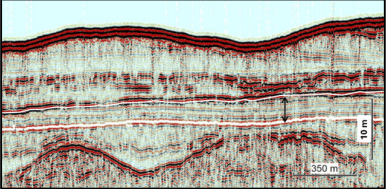
16.1.1 Prækvartære strata

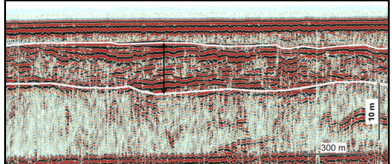
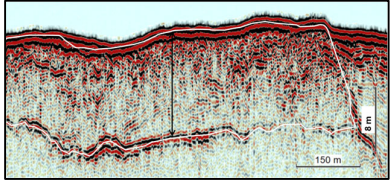
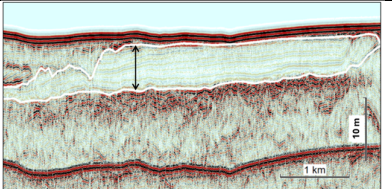
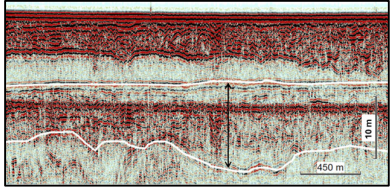
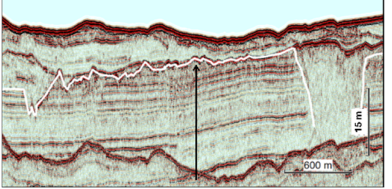
De Kvartære lag afgrænses fra de Prækvartære lag af en markant erosionsflade (Nielsen et al. 2008) og basis af Kvartæret ligger højt i området, enkelte steder lige under havbunden. De Prækvartære sediment ved basis af Kvartær domineres af Miocæne sediment (Japsen, 2000; Knutz et al. 2022), som varierer fra sandede til lerede marine og fluviale aflejringer. Der er mest tale om kvartssand, glimmersand og glimmerler, ofte med små fragmenter af brunkul. Mod nord, ud for Hanstholm, er der lag af Danien kalksten og umiddelbart syd herfor et bælte af Palæogene lerlag (Håkansson & Pedersen, 1992; Japsen, 2000). Længst mod syd er der muligvis Pliocæne aflejringer. Fælles for de Prækvartære aflejringer er, at den øvre grænse er eroderet af de Kvartære isskjalde. Den seismiske karakter af de Miocæne aflejringer er medium-høj amplitude interne parallelle og ofte foldede reflektorer samt en høj-amplitude øvre erosiv grænse. Kalkaflejringer fra Danien har høj-amplitude interne parallelle og foldede reflektorer samt en høj-amplitude øvre erosiv grænse. Miocæne aflejringer er truffet i en række borerelativt tæt på Vestkysten.

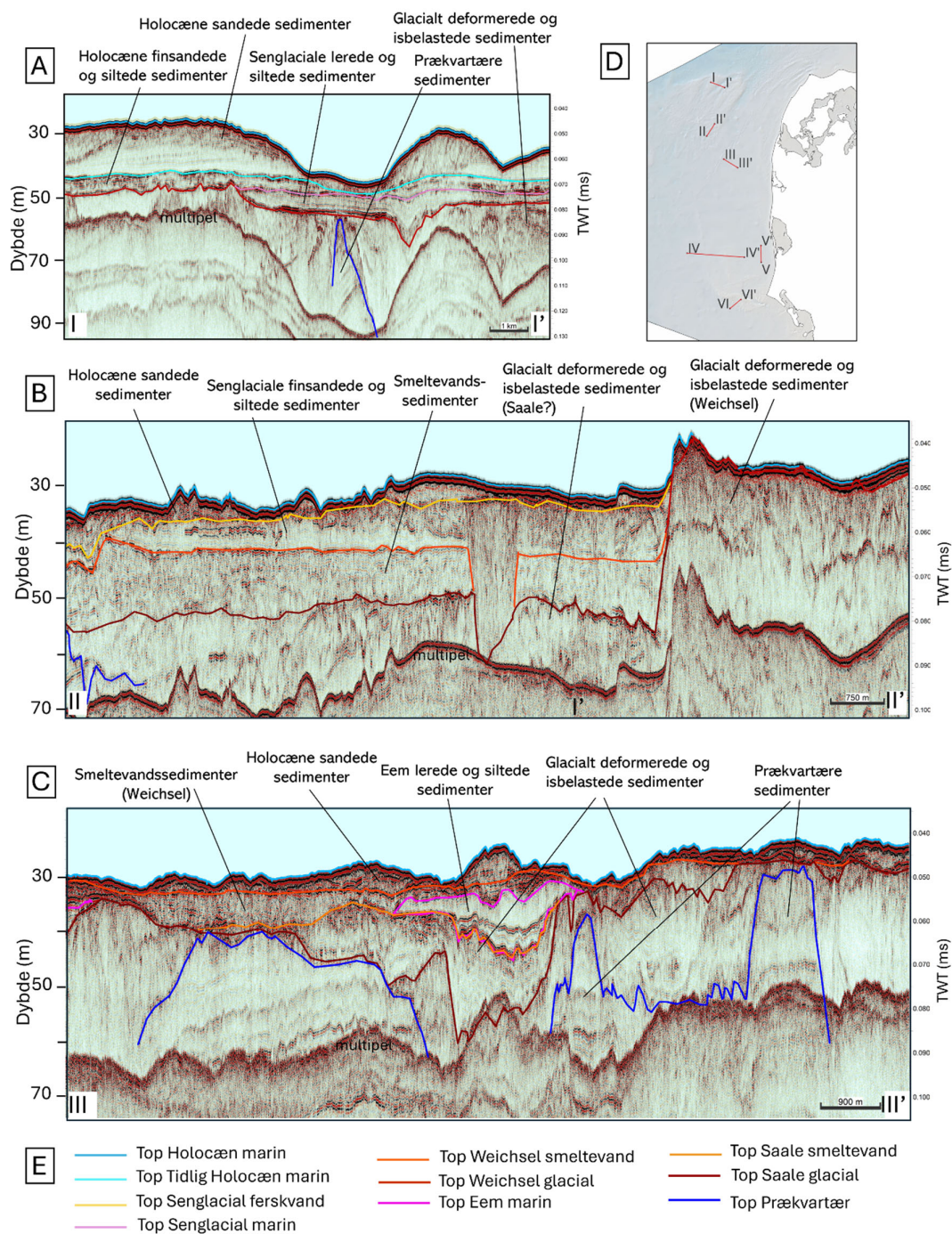


Figur 16.1 Oversigtskort over den østlige Nordsø langs Jyllands vestkyst. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

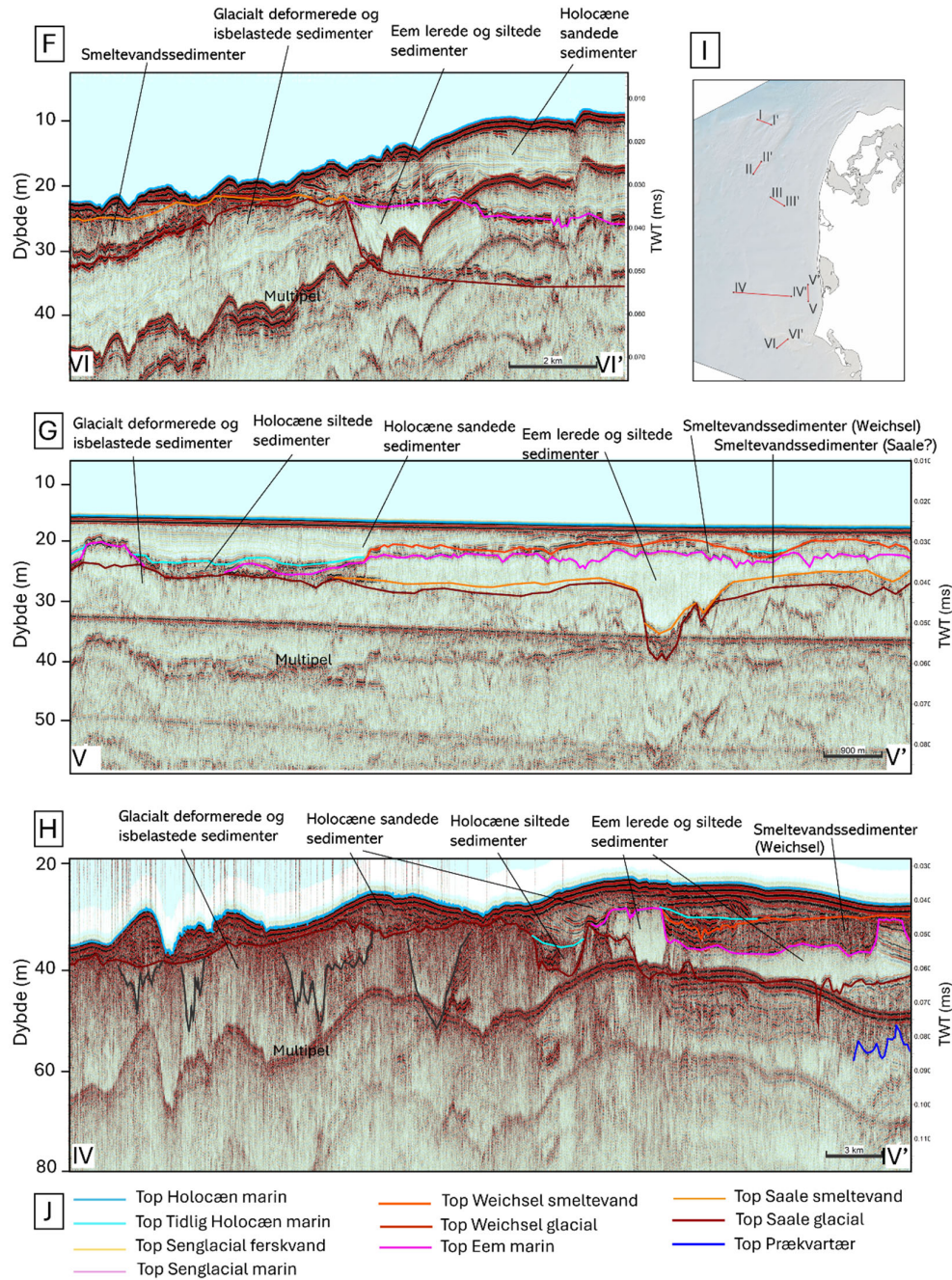
Tabel 16.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Mellem til Sen Holo-cæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende, udbyggede reflektorer. Ofte som positive barreformer der stedvist er opbygget af flere overlappende udbyggende enheder. Skarp nedre grænse.	20	Stor lateral udbredelse omkring Horns Rev og Jyske Rev.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin	
Tidlig Holo-cæn	Holocæne, finsandede, marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige lav-amplitude reflektorer med onlap på flanker. Stedvis med interne afskæringer.	15	Udfyldning af lavninger nord og øst for Jyske Rev samt udfyldning af lavning nord for Horn Rev.	Finsand, siltet med indslag af lerlag	Marin (kystdannelser i beskyttede havarme)	
Senglacial til Tidlig Holo-cæn	Senglaciale, marine, lerede og siltede sedimenter	Parallelle til let ondulerende reflektorer. Overlæjrer konformt underliggende enheder.	10	Udfyldning af lavninger og på flanker af højereliggende partier.	Finsand med indslag af ler og silt	Lakustrin	
Senglacial	Senglaciale, marine, lerede og siltede sedimenter	Parallelle, kontinuerte reflektorer. Overlæjrer konformt underliggende enheder.	10	Findes i fordybninger nord for Jyske Rev på dybder >40 m.	Ler og silt	Marin (ishavsdannelser, Yoldia Havet)	

Glacial (Weichsel)	Glaciale smeltevandssedimenter	Sub-parallelle til kaotiske høj-amplitude reflektorer med interne afskæringer og partier med skrålejninger.	30	Stor lateral udbredelse fra syd for Jyske Rev til Horns Rev.	Sand med indslag af grus og lerede partier	Glaciofluvial	
Glacial (Weichsel)	Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	Kaotiske, ikke-transparente reflektorer. Begrænset gennemtrængning af det seismiske signal. Stedvist med diskontinuerte folder og dislokationer. Ondulerende overflade.	35	Udbredt i hele området. Jyske Rev præget af Weichsel israndsaflejringer (området syd for Jyske Rev præget af Saale eller ældre glaciale aflejringer).	Moræneler, morænesand samt ispåvirket/isoverskredet ler, silt, sand	Glacial	
Interglacial/ Eem	Interglaciale, marine, lerede og siltede sedimenter	Semi-transparente parallelle reflektorer. Overlejrer konformt underliggende enhed. Ofte plan basis, men stedvist mindre nedskårne kanaler i underlaget.	20	Findes i et bredt bælte langs Vestkysten fra syd for Horns Rev til syd for Jyske Rev.	Ler og silt, stedvist mere sandet	Marin	
Præ-Weichsel (Saale eller ældre)	Ældre, glaciale smeltevandssedimenter	Varierende amplituder veksellende med semi-transparente partier. Kaotisk med interne afskæringer og partier med skrålejninger.	30	Stor lateral udbredelse fra syd for Jyske Rev til syd for Horns Rev.	Sand med indslag af grus og lerede partier	Glaciofluvial	
Prækvarter	Miocæn, Danien og Øvre Kridt	Horizontale til skråt hældende eller foldede reflektorer. Ofte høj-reflektiv øverst men begrænset nedtrængning.	-	Udbredt i hele området.	Sand og ler, kalk og skrivekridt	Marin til fluvio-deltaisk	



Figur 16.2 Eksempler på sparker seismiske data fra den østlige Nordsø som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) Seismisk profil nord for Jyske Rev. B) Seismisk profil på den sydlige del af Jyske Rev. C) Seismisk profil nordvest for Nissum Fjord. D) Oversigtskort. E) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.



Figur 16.3 Eksempler på sparker seismiske data fra den østlige Nordsø som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. F) Seismisk profil fra Horns Rev. G) Seismisk profil sydvest for Ringkøbing Fjord. H) Seismisk profil vest for Ringkøbing Fjord. I) Oversigtskort. J) Tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder.

16.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter

Glaciale isbelastede sedimenter fra Weichsel istiden findes nord for en linje mellem Lodbjerg på Vestkysten, den sydlige del af Jyske Rev og videre mod den sydlige del af Lille Fiskerbanke i vest. Linjen er den marine fortsættelse af Weichsel istidens glaciale hovedopholds-linje, der strækker sig igennem Jylland (Ussing, 1903, 1907; Houmark-Nielsen & Kjær, 2003). Ældre glaciale isbelastede sedimenter fra Saale og formentlig også ældre glaciale perioder findes syd for Jyske Rev (Ehlers, 1990; Huuse & Lykke-Andersen, 2000a), og er i større dele af den østlige Nordsø begravet af ikke-isbelastede yngre smeltevandsaflejringer, ferskvandsaflejringer og marine aflejringer. De ældre glaciale isbelastede aflejringer findes dog helt op til havbunden i et område nordvest for Horns Rev (Vovov bakkeø) samt i den kystnære del af den østlige Nordsø, hvor erosion har blotlagt de ældre aflejringer. De glacialt deformerede isbelastede aflejringer består typisk af moræneler og -sand, men indlejrede interglaciale marine aflejringer, lakustrine aflejringer og smeltevandsaflejringer kan forekomme. Stedvist indgår deformerede flager af den Prækvartære undergrund også i glacialtektoniske komplekser.

Glacialtektoniske komplekser er kendt fra den sydøstlige danske Nordsø ud for Fanø og Horns Rev (Larsen & Andersen, 2005; Jensen et al., 2008), men er også beskrevet for delområder længere mod nord langs Vestkysten (Huuse & Lykke-Andersen, 2000b; Al-Hamdani & Jensen, 2015). Den interne seismiske facies er af kaotisk karakter, men der kan forekomme lagdelte og transparente indslag i enheden. Den øvre grænse er ofte ondulerende, som illustreret i Tabel 16.1. Moræneler og -sand er truffet i en række borer og omkring Jyske Rev, mod syd langs Vestkysten og i et højtliggende glacialt område nordvest for Horns Rev, se f.eks. boring 550701.2 (VKY-52) i Figur 16.4.

16.1.3 Smeltevandssedimenter

Der er identificeret smeltevandsaflejringer fra både Weichsel istiden og fra Saale eller ældre glaciale perioder i området. Smeltevandsaflejringerne fra Weichsel er typisk lettere at identificere da de ligger højere i lagfølgen, hvor borer og i højere grad har kunnet verificere de seismiske tolkninger (Lomholt et al., 2024). I dele af den østlige Nordsø, hvor interglaciale marine Eem aflejringer forekommer, adskiller Eem sedimenter ofte ældre smeltevandsaflejringer af Saale alder fra Weichsel smeltevandsaflejringer (Larsen & Andersen, 2005). Den interne seismiske facies er domineret af subparallel-kaotiske høj-amplitude reflektorer med interne afskæringer og partier med skrålejringer (Tabel 16.1). Den nedre grænse er ofte ondulerende og bærer kraftigt præg af at være erosiv. De seismiske enheder tolket som smeltevandsaflejringer forekommer typisk som titalskilometer udbredte lag, der vidner om sedimentation i flettede flodsystemer. Mellemlejrerede lerede lag vidner om periodiske sødannelser i afsnørede smeltevandskanaler. Smeltevandssedimenter er truffet i et stort antal borer over det meste af den østlige Nordsø. Smeltevandsaflejringerne i borerne er domineret af fin- til mellemkornet sand, med stedvist mere grovkornede og grusede indslag. Herudover forekommer også en hyppig vekslen mellem sandede, siltede og lerede sedimenter, se f.eks. boring 560716.32 (SN-K-14) i Figur 16.4.

16.1.4 Interglaciale, lerede og siltede, marine sedimenter

Interglaciale finkornede marine aflejringer fra Eem perioden findes bevaret i et ca. 30-50 km bredt bælte langs Vestkysten fra syd for Horns Rev til umiddelbart syd for Jyske Rev. Den interne seismiske facies er generelt semi-transparent med lav-amplitude parallelle reflektorer, der fremtræder konformt over en høj-amplitude forholdsvis plan undergrænse (Tabel 16.1). Stedvist ses mindre V-formede nedskæringer/kanaler at afbryde den plane undergrænse. Eem aflejringer er truffet i adskillige borer i den østlige Nordsø og er tidligere beskrevet i videnskabelige studier (Konradi et al., 2005). Aflejringerne er generelt siltede til lerede og nogle steder med et højere gytjeindhold, se f.eks. boring 550704.188 (SN-K-2) i Figur 16.4. Stedvist er aflejringerne af en mere finsandet karakter. De interglaciale aflejringer indeholder marine skaller fra arter, der indikerer et relativt varmt tempereret miljø.

16.1.5 Senglaciale, finsandede til lerede ferskvandssedimenter

Senglaciale ferskvandssedimenter fra yngste del af Weichsel er observeret omkring, og på, Jyske Rev. Det antages at enheden repræsenterer sø- og fluviale aflejringer afsat i senglacial tid i tidligere kuperede landområder omkring, og på, Jyske Rev, før området blev transgrederet af havet i Holocæn tid. Det formodes, at tilsvarende senglaciale dannelser også forefindes i andre dele af Nordsøen, men også at den seismiske karakter ikke altid er til at skelne fra distale smeltevandssedimenter. Den interne seismiske facies består af vekslende lav til medium amplitude, parallelle reflektorer som er konforme med den let ondulerende grænse til den underliggende enhed (Tabel 16.1). Ferskvandsaflejringerne er truffet i adskillige borer, der viser at de ofte er finsandede, men også indeholder lerede til siltede partier, og et mindre indhold af organiske makrofossiler. Kulstof-14 dateringer af enheden i boring 560722.4 (NS12-2-13) og boring 560706.32 (JR-14) fra Jyske Rev gav aldre på ca. 12.300 til 14.100 kal. år BP (Bennike et al., 2014, 2023).

16.1.6 Senglaciale, lerede til siltede glaciomarine sedimenter

Senglaciale marine sedimenter fra Sen Weichsel er observeret nord for Jyske Rev, hvor de forekommer på dybder mere end ca. 40 m. Enheden repræsenterer glaciomarine aflejringer afsat i Yngre Yoldia Havet på den nordlige rand af det glacialt dannede Jyske Rev i perioden efter Weichsel-isen trak sig tilbage (Jensen et al., 2010). Den interne seismiske facies består af medium-amplitude, parallelle reflektorer som er konforme med den ondulerende grænse til den underliggende enhed (Tabel 16.1). Enheden afskæres typisk erosivt af overlejrende Holocæne enheder. De senglaciale marine aflejringer er truffet i enkelte borer, som viser at de er finkornede og indeholder marine muslinger. En kulstof-14 datering fra boring 570732.1 (F1P1-VB15) der gennemborede den øverste del af enheden, gav en kulstof-14 alder på ca. 12.500 kal. år BP (se Figur 16.4).

16.1.7 Tidlig Holocæn, marine sedimenter

Tidlig Holocæn, marine sedimenter findes i den østlige Nordsø bevaret dels i begravede kanalsystemer, der formodes at udgøre sidegrene til palæo-Elben Dalen længere ude i den

centrale danske Nordsø, og dels i et dalsystem beliggende i området mellem det østlige Jyske Rev og Agger Tange/Nissum Bredning, hvor brak til beskyttet marint såkaldt Agger Ler er beskrevet (Jensen et al., 2010). Den interne seismiske facies består af medium-amplitude, parallelle til sigmoidale/lateralt udbyggende reflektorer (Tabel 16.1). Undergrænsen af enheden består ofte af en høj-amplitude reflektor. Enheden afskæres typisk erosivt af den overlejrende Holocæne enhed. De Tidlig Holocæn, marine aflejringer er truffet i flere boringer, som viser at de typisk består af finkornet, siltet sand med indslag af tynde lerlag og/eller gytjelag, se f.eks. boring 560726.1 (VKY-34) og 560722.8 (VKY-09) i Figur 16.4. Basis af enheden formodes i nogle tilfælde at udgøres af en høj-reflektiv tørvehorisont.

16.1.8 Midt-Sen Holocæn, marine sedimenter

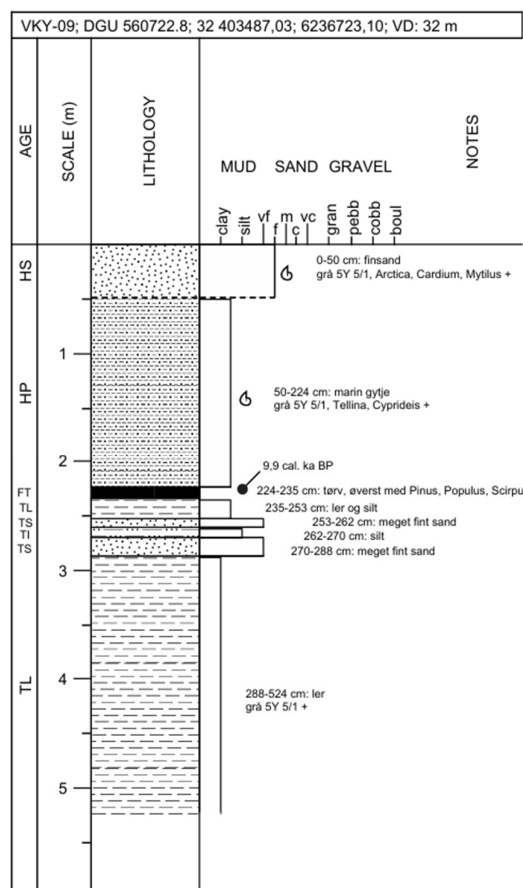
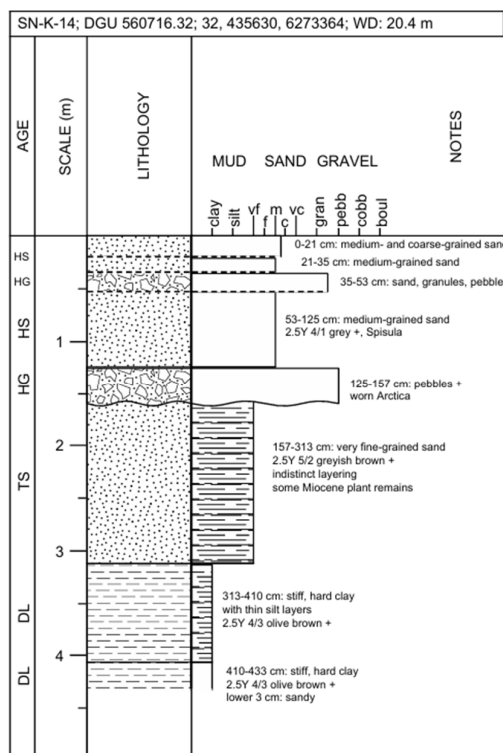
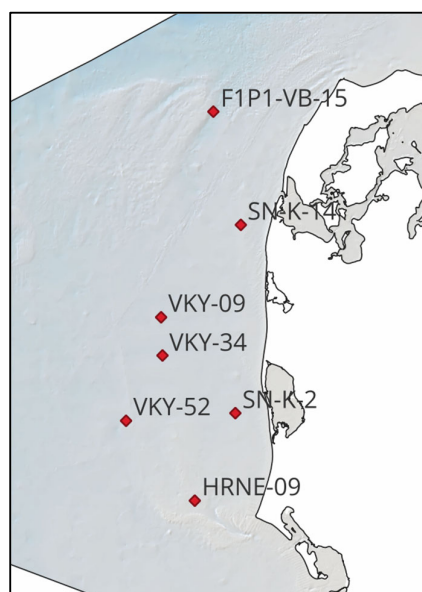
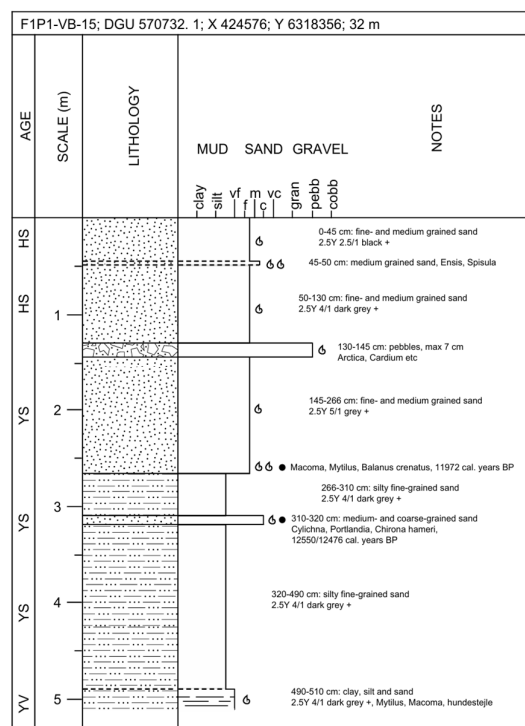
Holocæne sandaflejringer udgør den yngste sedimentenhed i området. Sandaflejringerne bliver ofte omtalt som mobilt sand og findes både som et op til få meter tyndt dække over ældre aflejringer og som store sammensatte barresystemer med en mægtighed op til ca. 15 m. Barresystemerne er ofte præget af aktivt vandrende sandbundformer. De største mægtigheder findes på Horns Rev og på den nordlige del af Jyske Rev, hvor sandbarrerne danner store positive bundformer. Den interne seismiske facies består af høj- til medium-amplitude, typisk skråt hældende og udbyggende, reflektorer (Tabel 16.1). Undergrænsen er typisk skarp og med høj amplitude. Det Holocæne marine sand er truffet i et meget stort antal boringer, som viser at de typisk består af fin- til grovkornet marint sand, som stedvist er gruset, se f.eks. boring 550715.45 (HRNE-09) i Figur 16.4. Sandaflejringerne formodes at være dannet i Mellem- til Sen Holocæn under dynamiske forhold svarende til de nuværende forhold i Nordsøen. Det kan dog ikke udelukkes, at kernen i de store barresystemer blev dannet tidligere i Holocæn under et lavere havniveau og under et andet tidevandsregime.

16.2 Konceptuel geologisk model

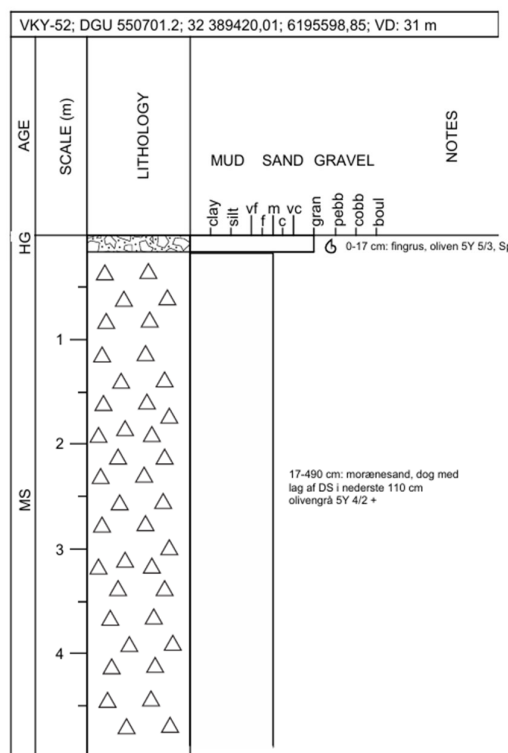
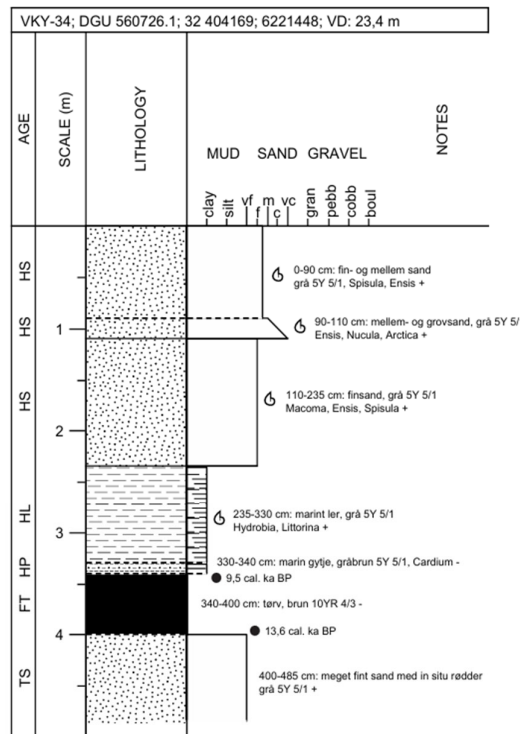
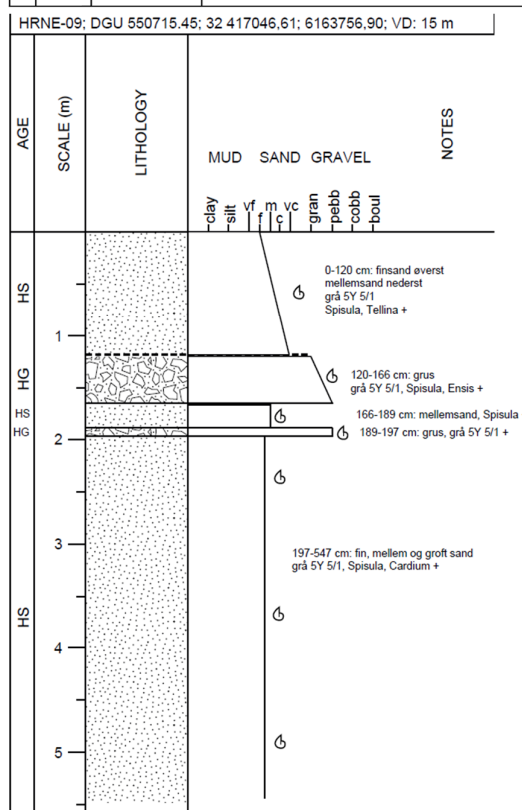
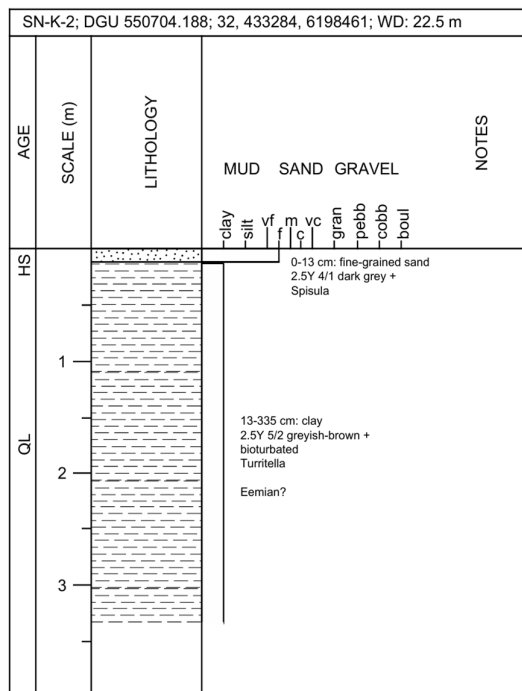
Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og boringer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i den østlige Nordsø langs Jyllands Vestkyst, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for området. Den konceptuelle model er beskrevet herunder og illustreret med to geologiske profiler i Figur 16.5. Placeringen af profilerne er vist på Figur 16.10.

Det nederste gule lag på det nordlige profil ved Jyske Rev repræsenterer Prækvarter lag som formentlig domineres af Miocæne aflejringer og som flere steder er deformerede enten i form af folder eller overskydninger.



Figur 16.4 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området, se også næste side.



Det nederste mørkebrune lag på de to profiler repræsenterer en serie af glaciale lag fra Saale og/eller ældre istider. Lagene har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Enheden har ofte en vis tykkelse og typisk har det ikke været muligt at kortlægge dens nedre grænse. Sedimenterne består formentlig hovedsageligt af moræneler og morænesand, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglaciale sedimenter. Flere steder på det nordlige profil, og i den vestlige ende af det sydlige profil, ses en række nedskårne begravede dale vist med lysegrå farve, som formentlig er af Saale alder og kan have et komplekst og varierende fyld af sedimenter.

Det ferskenfarvede lag, over de ældre glaciale aflejringer på det sydlige profil, repræsenterer sandede smeltevandsaflejringer, som formentlig er af Saale alder eller ældre. Aflejringerne bærer ikke præg af at have været isoverskredet, hvilket taler for at de er af Saale alder. Mod vest og i et område centralt på profilet er tykkelsen relativt stor, men ellers er laget tyndt. På den østlige del af det sydlige profil ses over det ferskenfarvede lag et mint-grønt lag med en vis tykkelse, som repræsenterer marine finkornede aflejringer fra Eem. Dette lag har ikke været overskredet af Weichsel isen.

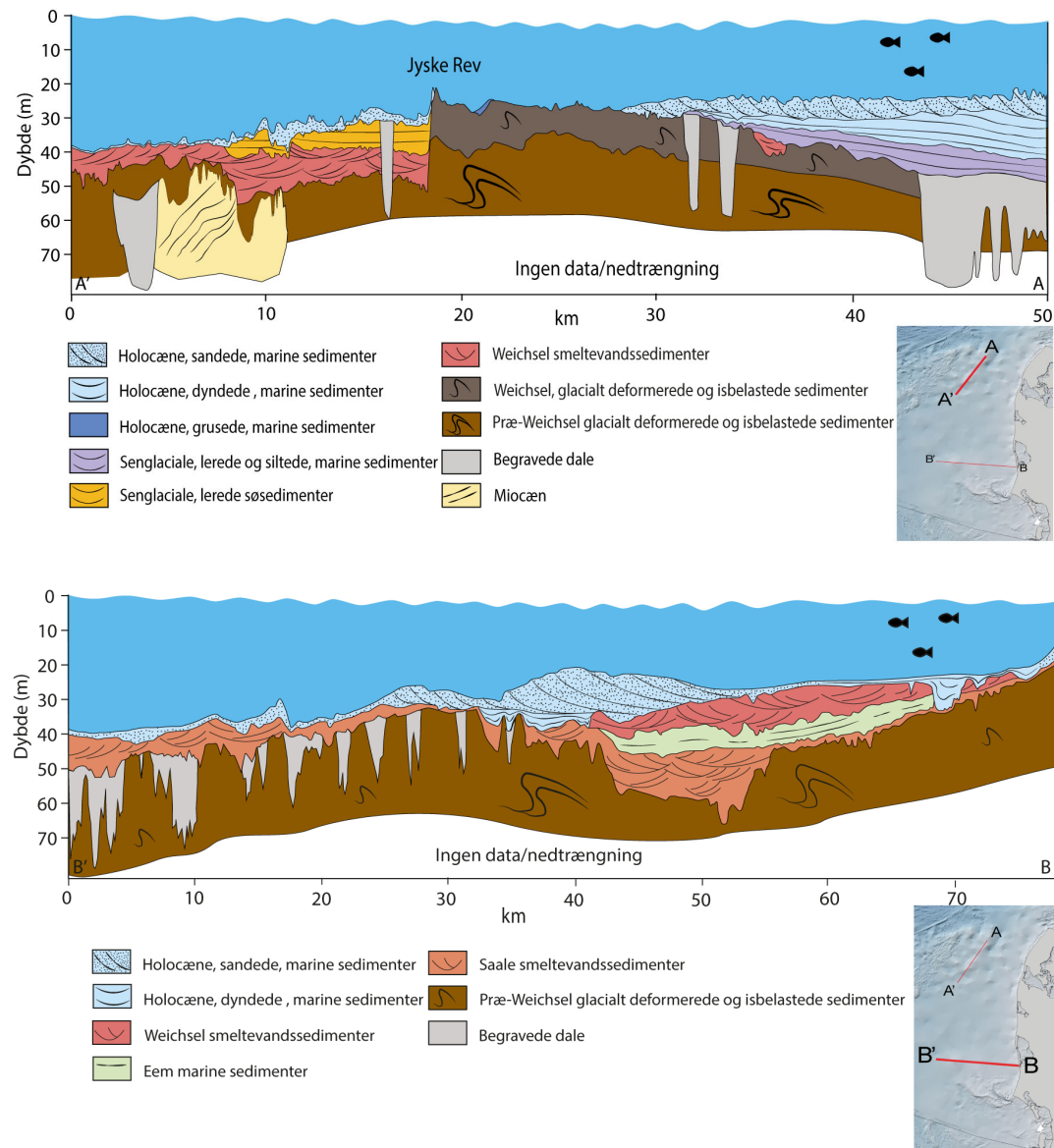
På det nordlige profil ses over de ældre mørkebrune lag en enhed med mørk grå farve som repræsenterer en serie af glaciale lag fra Weichsel. Lagene har været overskredet af Weichsel isen og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Sedimenterne består formentlig hovedsageligt af moræneler og morænesand, men kan også indeholde sandede smeltevandsaflejringer og finkornede interstadiale sedimenter. Enheden optræder ikke på den sydvestlige del af profilet, eller længere mod syd i området, og dens udbredelse markerer således den maksimale udbredelse af Weichsel isen fra nord.

Syd for udbredelsen af de mørkegrå glaciale lag fra Weichsel, og et enkelt sted længere mod nordøst på det nordlige profil over disse, ses et lag vist med rød farve, som repræsenterer Weichsel smeltevandsaflejringer, der ikke har været overskredet af isen. På det sydlige profil overlejrer de røde Weichsel smeltevandsaflejringer marine sedimenter fra Eem og/eller Saale (eller ældre) smeltevandsaflejringer. På det nordlige profil overlejrer Weichsel smeltevandsaflejringerne de mørkebrune ældre glaciale aflejringer samt, lokalt mod nordøst på profilet, de mørkegrå glaciale lag fra Weichsel, som nævnt ovenfor. Smeltevandsaflejringerne er afsat i store flodsystemer, som udgik fra isranden mod øst og nord. Enheden er relativt tyk, hvor den er til stede, og udfylder mange steder nedskæringer i de underliggende aflejringer, men er fraværende på den vestlige del af det sydlige profil og det meste af den nordøstlige del af det nordlige profil.

På den sydvestlige del af det nordlige profil ses, over Weichsel smeltevandsaflejringerne, et relativt tykt lag med orange farve som repræsenterer finkornede senglaciale søaflejringer. På den nordøstlige del af profilet repræsenterer det lilla lag marine finkornede senglaciale aflejringer.

De øverste lyseblå lag på begge profiler repræsenterer Holocæne aflejringer. I den nordøstlige ende af det nordlige profil består de dybere dele af de Holocæne aflejringer af marine dyndede sedimenter (vist med horisontal eller svagt hældende intern lagdeling, mere eller mindre konformt med underlaget). Herudover består de Holocæne aflejringer af et relativt

tyndt dække af marint dynamisk sand (vist med prikket signatur og storskala skrålejringer), bortset fra den meget, meget lille kile med mørkeblå farve centralt på profilet, som repræsenterer marine grusede sedimenter. På det sydlige profil udfylder marine dyndede sedimenter (igen vist med intern lagdeling) lavninger i den underliggende overflade. De dyndede sedimenter overlejres af et dække af marine sandede aflejringer (igen vist med prikket signatur og storskala skrålejringer), som kan have en betydelige mængde.



Figur 16.5 Øverst ses et nordligt sydvest-nordøst gående og nederst et sydligt vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for den østlige Nordsø. Placeringen af profilerne er vist på Figur 16.10.

16.3 Tykkelse af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer

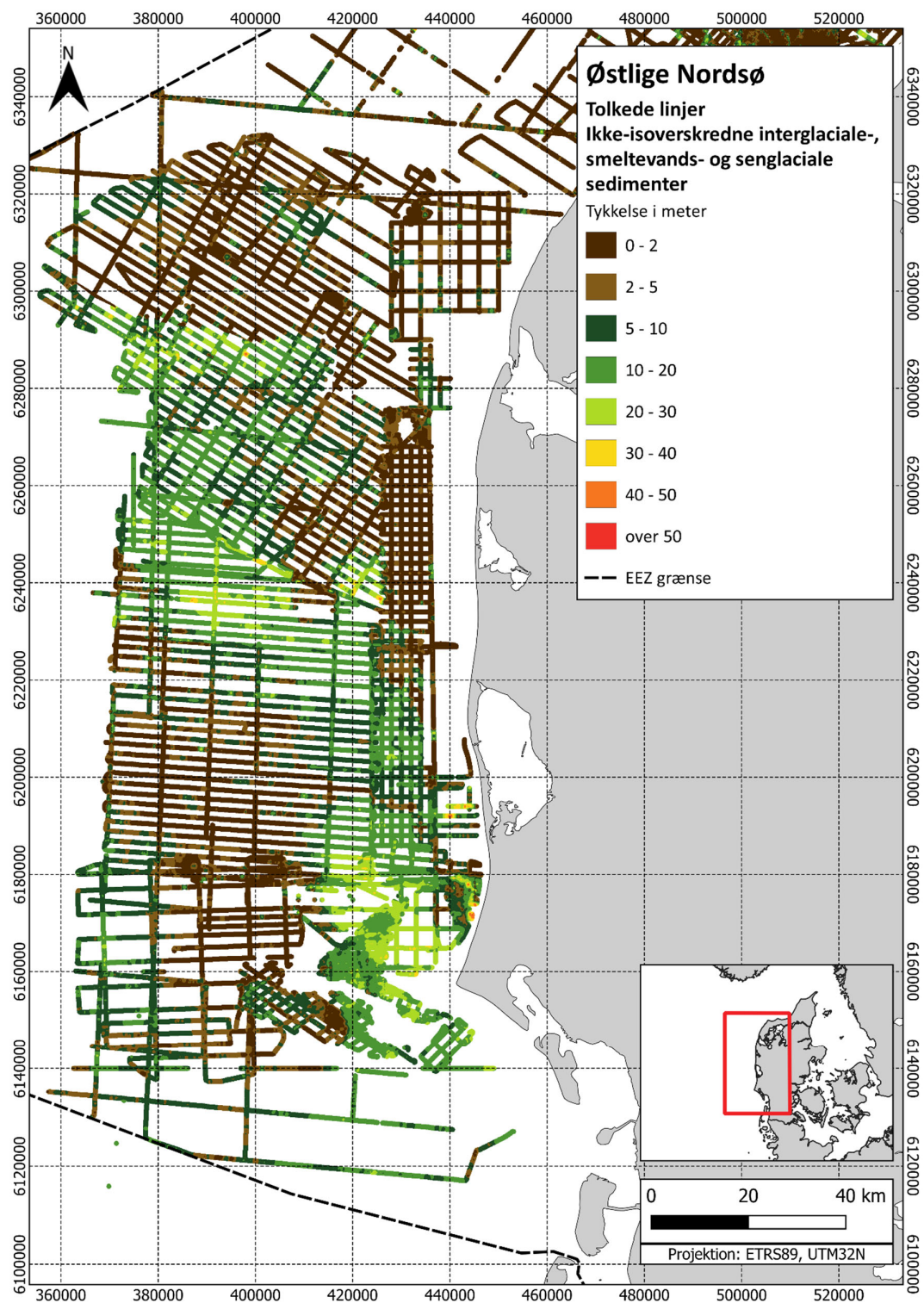
Som det fremgår af beskrivelsen af den generelle geologiske udvikling i området og den konceptuelle geologiske model er der store dele af det kortlagte område, som ikke har været overskredet af isen i forbindelse med den seneste istid Weichsel. I disse områder optræder således aflejringer fra Weichsel der ikke, som det ellers ofte er tilfældet, er konsoliderede af isens vægt. Derfor er der foretaget en samlet kortlægning af potentielt bløde senglaciale og ældre ikke-isoverskredne aflejringer.

På Figur 16.6 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 16.7. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort således betragtes med større forsigtighed.

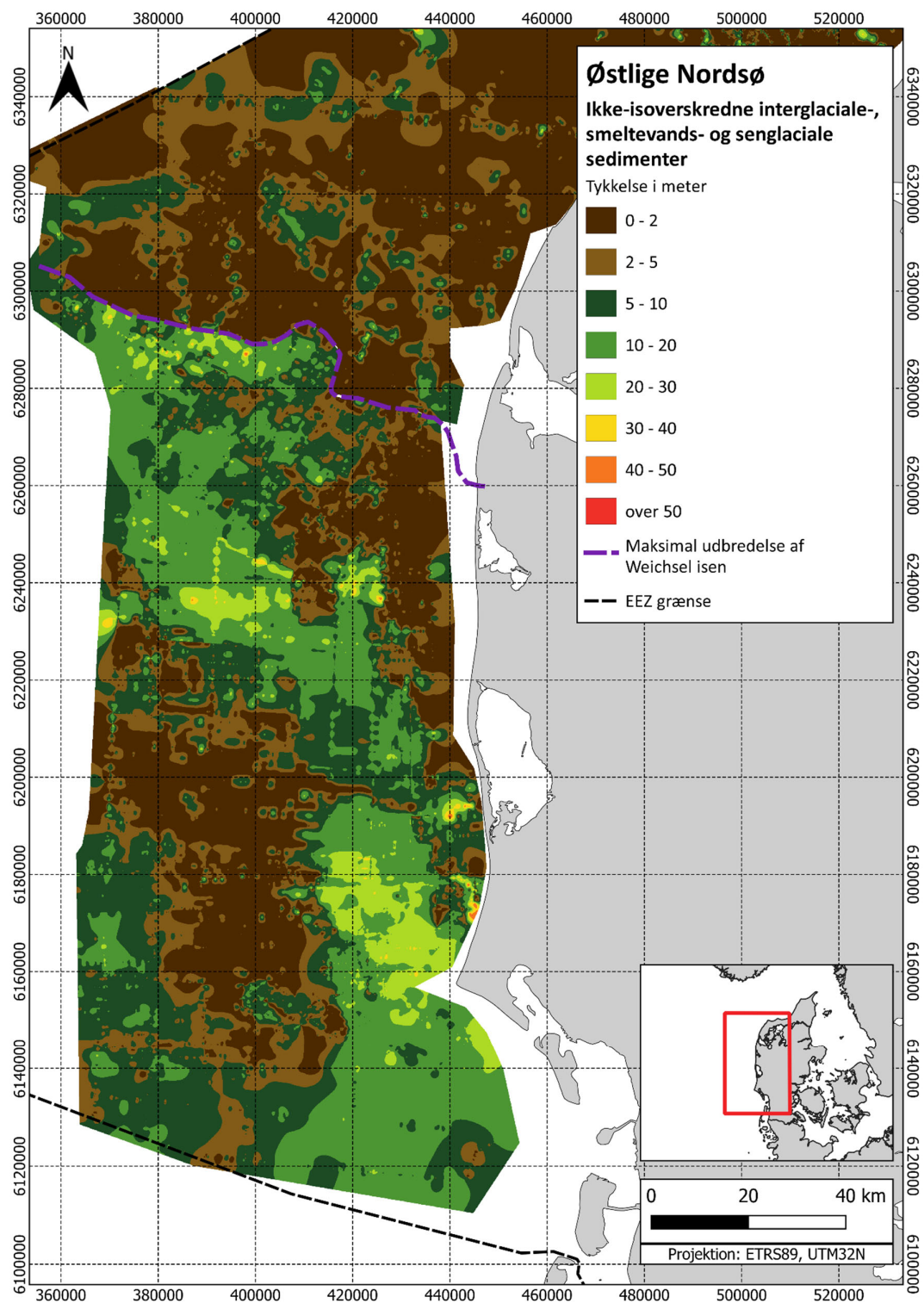
Kortet i Figur 16.7 viser tykkelsen af de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter i hele den østlige del af den danske Nordsø. I den nordlige del af området, nord for den maksimale udbredelse af Weichsel isen vist med lilla stiptet streg, er tykkelsen generelt 0-2 m i store områder. I en række strøg gennem denne del af området er tykkelsen dog 2-5 m og mere lokalt i disse strøg op til 5-10 eller 10-20 m.

Syd for den maksimale udbredelse af Weichsel isen er tykkelsen generelt 0-5 m i et område langs vestkysten, som er smalt ved Ringkøbing Fjord, men som breder sig mere og mere vestover nord for Ringkøbing Fjord samt i et større område mod sydvest. I et bredt strøg fra nordvest til sydøst er tykkelsen af de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter generelt op til 10-20 og lokalt op til 20-30 m og længst mod sydvest er tykkelsen generelt 5-10 m og lokalt 10-20 m.

De senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer består nord for den maksimale udbredelse af Weichsel isen (vist med lilla stiptet streg) primært af finkornede marine senglaciale aflejringer og kan lokalt indeholde sandede Weichsel smeltevandsaflejringer. Syd for den maksimale udbredelse af Weichsel isen består sedimenterne primært af finkornede senglaciale issøaflejringer og sandede Weichsel smeltevandsaflejringer mod nordvest og mod sydvest primært af sandede smeltevandsaflejringer af Saale alder (eller ældre). I den sydøstlige del af området består sedimenterne af sandede Weichsel smeltevandsaflejringer, finkornede marine Eem aflejringer og sandede smeltevandsaflejringer af Saale alder (eller ældre).



Figur 16.6 Kortet illustrerer hvor senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 16.7). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



Figur 16.7 Kort over tykkelsen af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer. Den maksimale udbredelse af Weichsel isen er vist med en lilla stiplede streg.

16.4 Tykkelse af Holocæne aflejringer

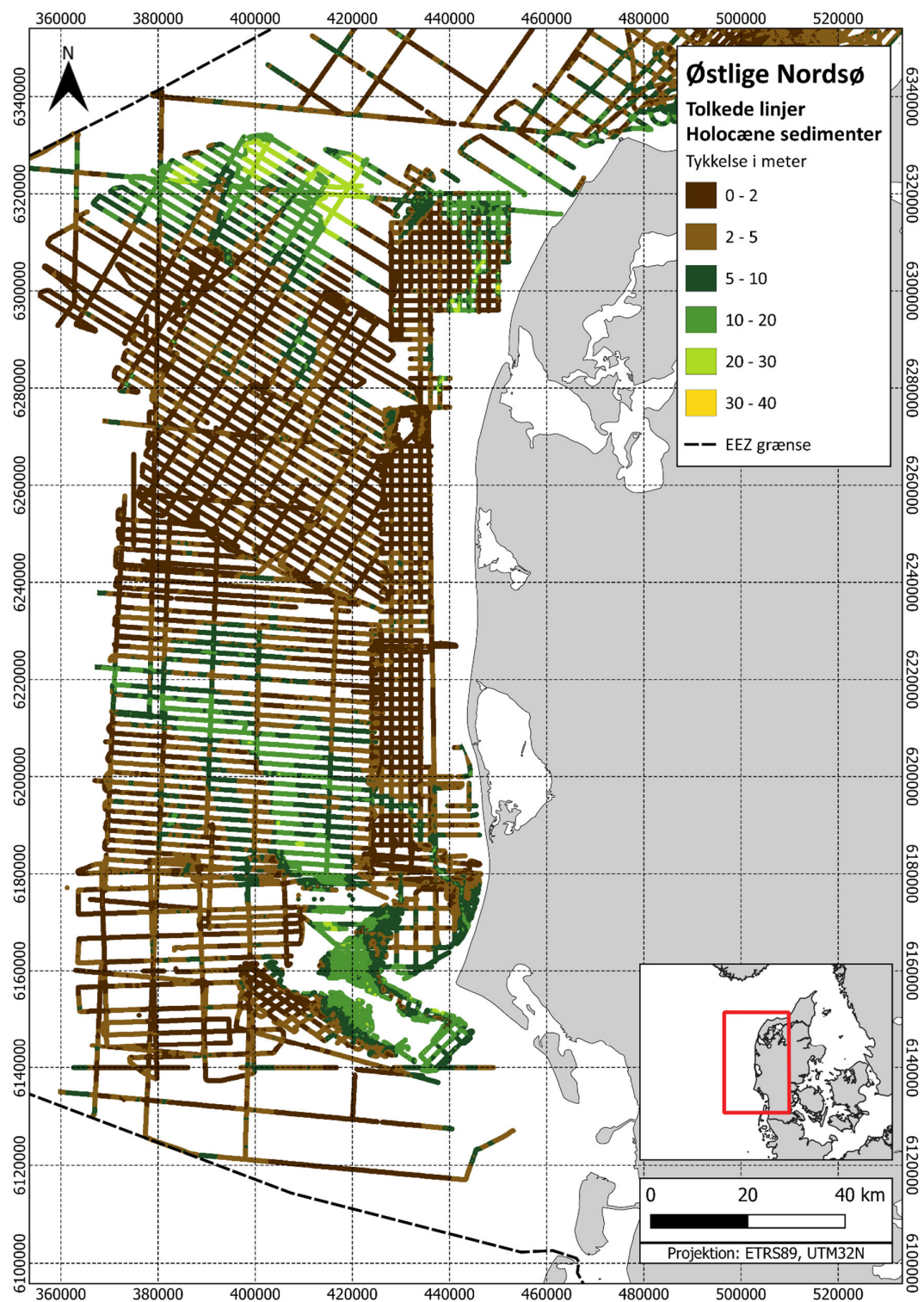
På Figur 16.8 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 16.9. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 16.9 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien under havbunden. Tykkelsen varierer generelt fra 0-5 m i langt størsteparten af området, men i et bredt vest-øst gående strøg i den nordlige del af området er tykkelsen omkring 10-20 m og lokalt på til 20-30 m. I den sydlige del af området ses et nordvest-sydøst gående strøg med tykkelser på op til 10-20 m.

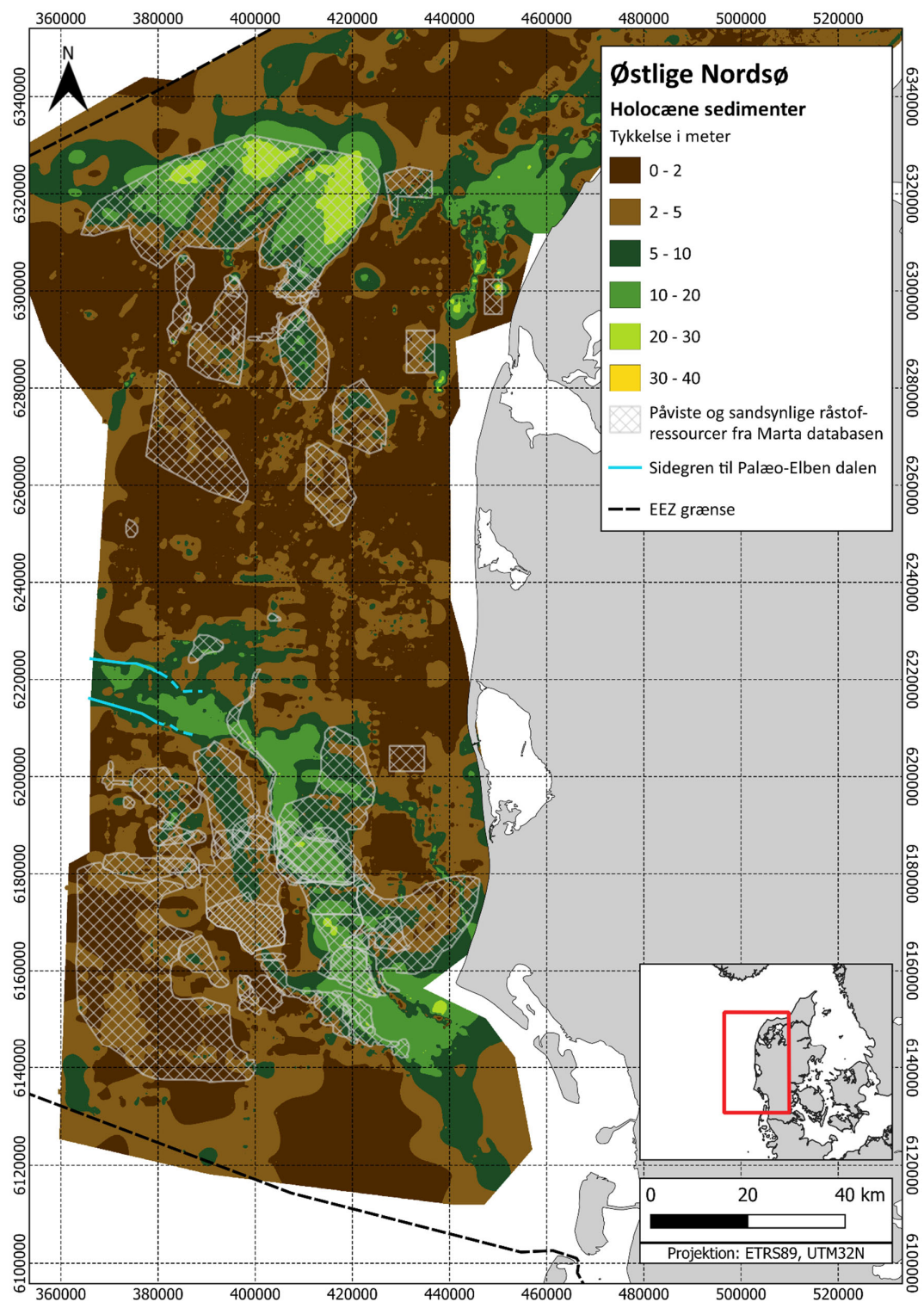
En tolket sidegren til Palæo-Elben Dalen, som ligger længere mod vest i Nordsøen, er vist med lyseblå farve på kortet og ser ud til at have en mulig forlængelse mod sydøst.

I områderne med begrænset tykkelse af Holocæne sedimenter består aflejringerne overvejende af marine dynamiske sandede sedimenter. I området med større tykkelser i den nordlige del af området består aflejringerne øverst af sandede marine sedimenter aflejret i meget store barresystemer og nederst af dyndede marine sedimenter. I den sydlige del af området optræder dyndede marine sedimenter som indfyld i lavninger, men de Holocæne aflejringer består overvejende af marine sandede sedimenter.

En række påviste og sandsynlige råstofressourcer af Holocæn alder fra Marta databasen er markeret med grå krydsskraver på Figur 16.9. I disse områder består i al fald den øverste del af de Holocæne aflejringer primært af sandede sedimenter.



Figur 16.8 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 16.9). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.



Figur 16.9 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Påviste og sandsynlige sandede ressourcer fra Marta databasen er markeret med grå krydsskravering og en mulig sidegren til Palæo-Elben Dalen er vist med lyseblå farve.

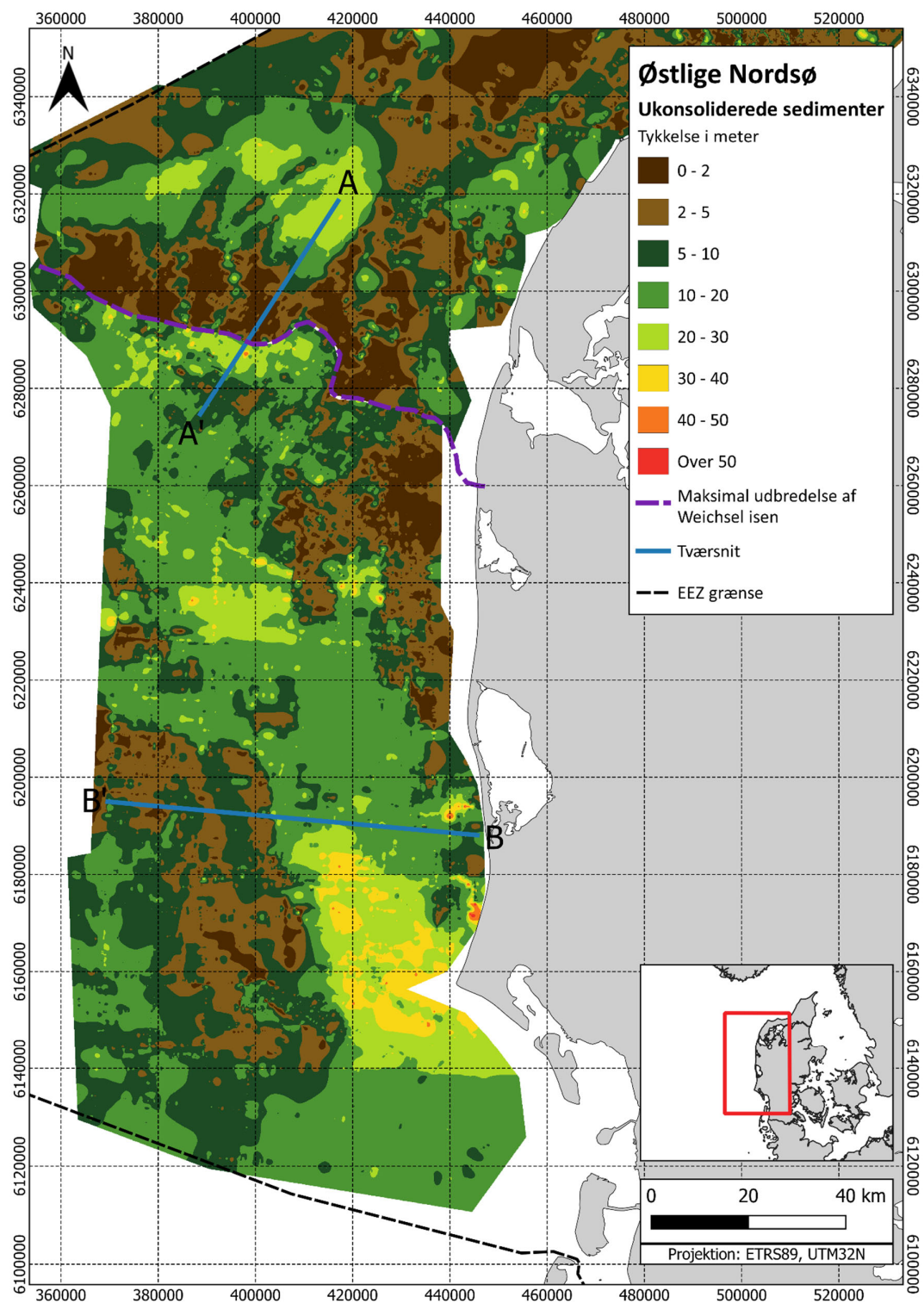
16.5 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

I Figur 16.10 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag, samt i hele den sydlige del af området også ikke-isoverskredne, aflejringer fra Weichsel, fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne (ældre) glacialle aflejringer.

Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive tykkelseskort, det er baseret på senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter samt Holocæne aflejringer, se Figur 9.6 og Figur 9.8. En lilla stiptet streg viser den maksimale udbredelse af Weichsel isen mod syd og placeringen af de geologiske profiler i Figur 16.5 er vist på kortet.

Nord for den maksimale udbredelse af Weichsel isen er tykkelsen generelt 0-5 m bortset fra et vest-øst gående strøg, med varierende bredde, med tykkelser op til 10-20 m og centralt 20-30 m samt et nord-syd gående strøg ud for vestkysten af Thy også med tykkelser op til 10-20 m og lokalt 20-30 m. Syd for den maksimale udbredelse af Weichsel isen er tykkelsen generelt 0-5 m i et område langs vestkysten, som er smalt ved Ringkøbing Fjord, men som breder sig mere og mere vestover nord for Ringkøbing Fjord samt 2-5 m i et større område mod sydvest. I et bredt strøg fra nordvest til sydøst er tykkelsen generelt 10-20 m og i områder mod nord og centralt op til 20-30 m samt ud for Blåvandshuk 30-40 m. Længst mod sydvest er tykkelsen generelt 5-20 m.

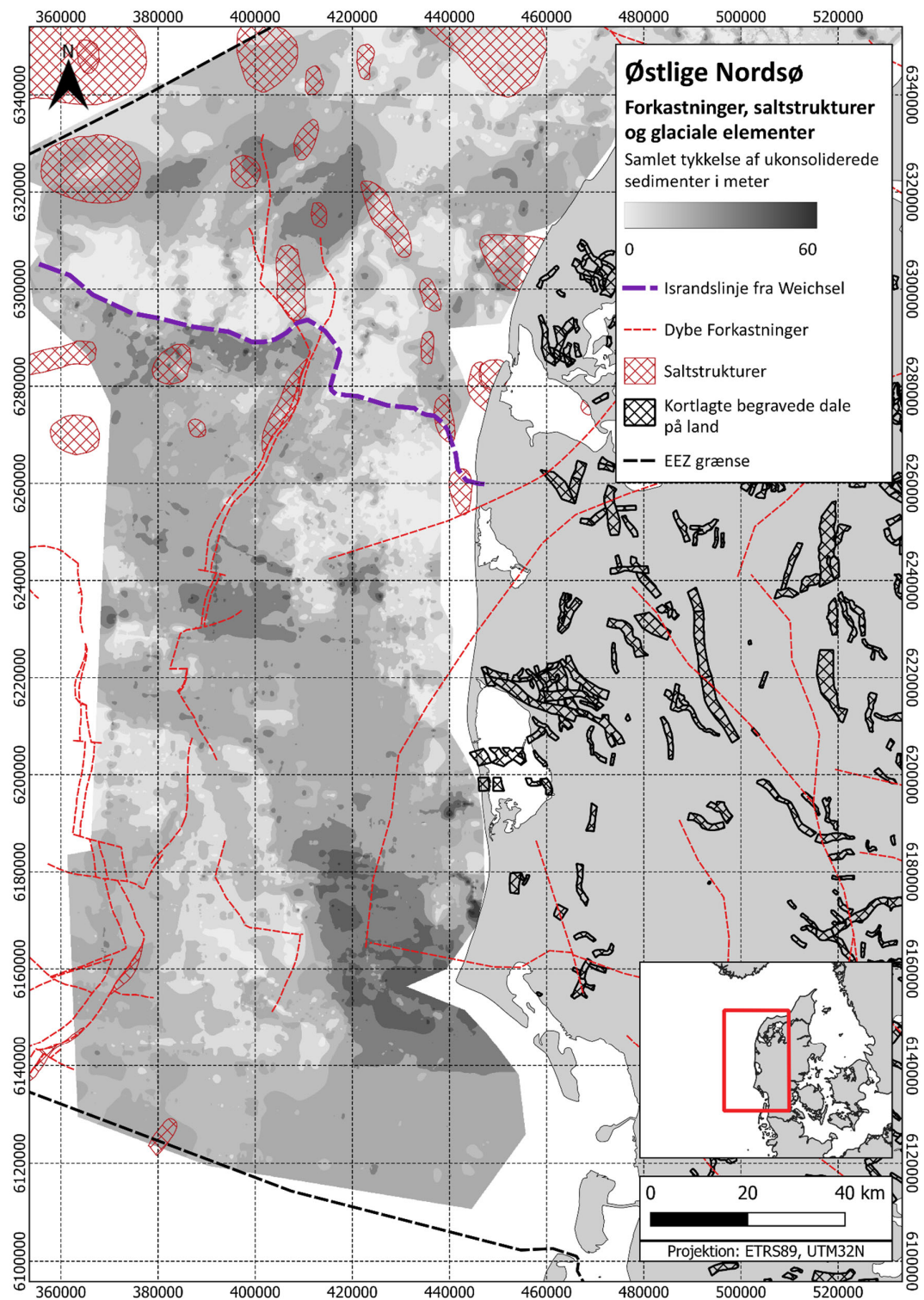
Store dele af området præges af dybe begravede dale som skærer sig ned i de underliggende aflejringer. Det har dog ikke været muligt at foretage en detaljeret kortlægning af disse på det foreliggende datagrundlag. Dels er nedtrængningen af det seismiske signal typisk ikke tilstrækkeligt til at kortlægge bunden af dalene og dels er der ofte for stor afstand mellem de enkelte seismiske linjer til at det er muligt at forbinde tolkede dal-segmenter fra linje til linje med rimelig sikkerhed. Størsteparten af dalene formodes at være dannet under Saale eller ældre glaciationer og sedimenterne som udfylder dalene har formentlig været isbelastede på et tidspunkt. Aflejringerne i de begravede dale er således ikke medtaget i tykkelserne af de ukonsoliderede og potentielt bløde sedimentter. Men det er vigtigt at være opmærksom på tilstedeværelsen af begravede dale da sedimentterne som udfylder dem potentielt kan være meget heterogene med både glacialle og ikke-glacialle aflejringer og skarpe overgange mellem sedimenttyper på tværs af dalflankerne og internt i dalfyldet med abrupte forskelle i geotekniske egenskaber som angivet i Tabel 3.1.



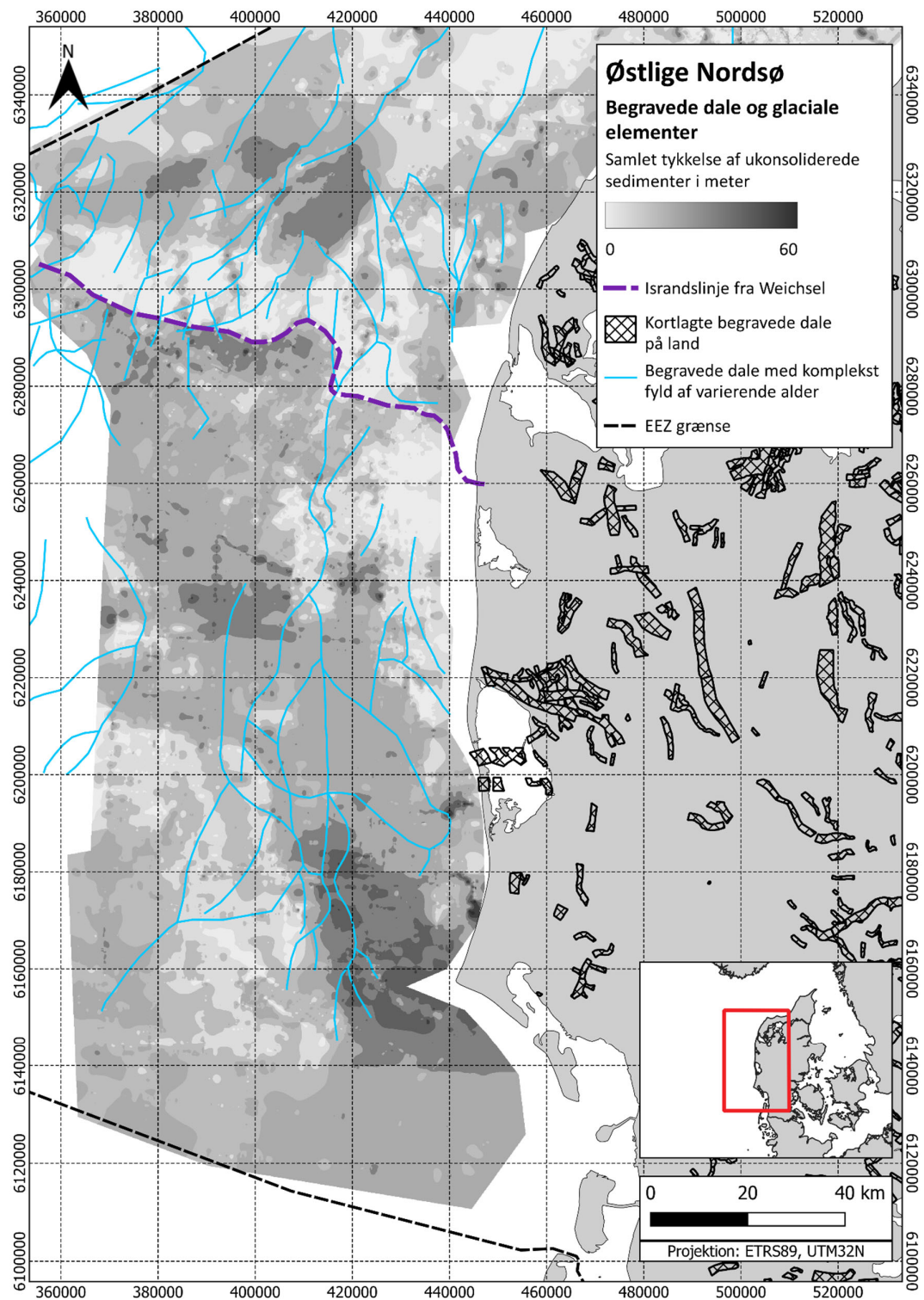
Figur 16.10 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er den maksimale udbredelse af Weichsel isen og beliggenheden af de to geologiske profiler i Figur 16.5 angivet.

I Figur 16.11 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i undergrunden er vist med rød krydsskravering. Med stiplede lilla streger er vist en markant israndslinje fra Weichsel tolket i de seismiske data og som samtidig viser den maksimale udbredelse af Weichsel-isen. Tolkede begravede tunneldale på land er vist med sort krydsskravering (Sandersen & Jørgensen, 2016, 2017; begravededale.dk). Som det også fremgår af Figur 16.12 kan der forventes en relativt stor tæthed af begravede dale i det kortlagte område. Den samlede tykkelse af bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

Kortet i Figur 16.12 viser, med tynde blå streger, begravede dale i området kendt fra litteraturen (Salomonsen & Jensen, 1994; Huuse & Lykke-Andersen, 2000a; Kirkham et al., 2024; Prins & Andresen, 2019; van der Vegt et al., 2012; Ottesen et al., 2020). Som det fremgår af kortet, optræder de begravede dale med relativt stor tæthed, og selvom dalfylde typisk formodes at være isbelastet i størsteparten af dalene, er det vigtigt at være opmærksom på deres tilstedeværelse som beskrevet ovenfor. Herudover viser kortet ligesom kortet i Figur 16.11 den maksimale udbredelse af Weichsel-isen i form af israndslinjen fra Weichsel og tolkede begravede tunneldale på land. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 16.11 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund, tolkede begravede tunneldale på land (Sandersen & Jørgensen, 2016) og en markant israndslinje fra Weichsel. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 16.12 Kortet viser tolkede begravede dale i området kendt fra litteraturen (Salomonsen & Jensen, 1994; Huuse & Lykke-Andersen, 2000a; Kirkham et al., 2024; Prins & Andresen, 2019; van der Vegt et al., 2012; Ottesen et al., 2020). Desuden viser kortet tolkede begravede tunneldale på land (Sandersen & Jørgensen, 2016) og en markant israndslinje fra Weichsel. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala

17. Vestlige Nordsø

I dette kapitel præsenteres resultaterne af kortlægningen af den vestlige del af Nordsøen. Først gives en detaljeret beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og dernæst beskrives den konceptuelle geologiske model for områdets udvikling og opbygning illustreret med tre geologiske profiler. Herefter beskrives først tykkelsen og beskaffenheden af en markant og tyk enhed af finkornede Weichsel issøsedimenter i den sydvestlige del af området, som ikke har været overskredet af isen. Dernæst beskrives de senglaciale og andre ældre ikke-isoverskredne lag fra Weichsel samt tykkelsen og beskaffenheden af de overliggende Holocæne lag. Til sidst beskrives den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter (den samlede mægtighed af aflejringer fra Weichsel, senglacial tid og Holocæn som ikke har været overskredet af isen) samt andre vigtige geologiske forhold.

På oversigtsfiguren i Figur 17.1 ses de seismiske linjer, tilgængelige for arbejdet i den vestlige del af Nordsøen. Baseret på en vurdering af nedtrængningsgrad, kvalitet, tæthed og alder er et relevant udvalg af data benyttet i tolkningsarbejdet.

I den sydvestligste del af det kortlagte område ligger overfladen af konsoliderede sedimenter som har været isoverskredet dybt (muligvis oveni den seismiske havbundsmultipel), og har ikke kunne tolkes på de tilgængelige data. Tykkelsen af de ukonsoliderede sedimenter i det område er derfor kun en minimumstykkelser, baseret på det som har kunnet tolkes, og forventes at være større end kortet viser.

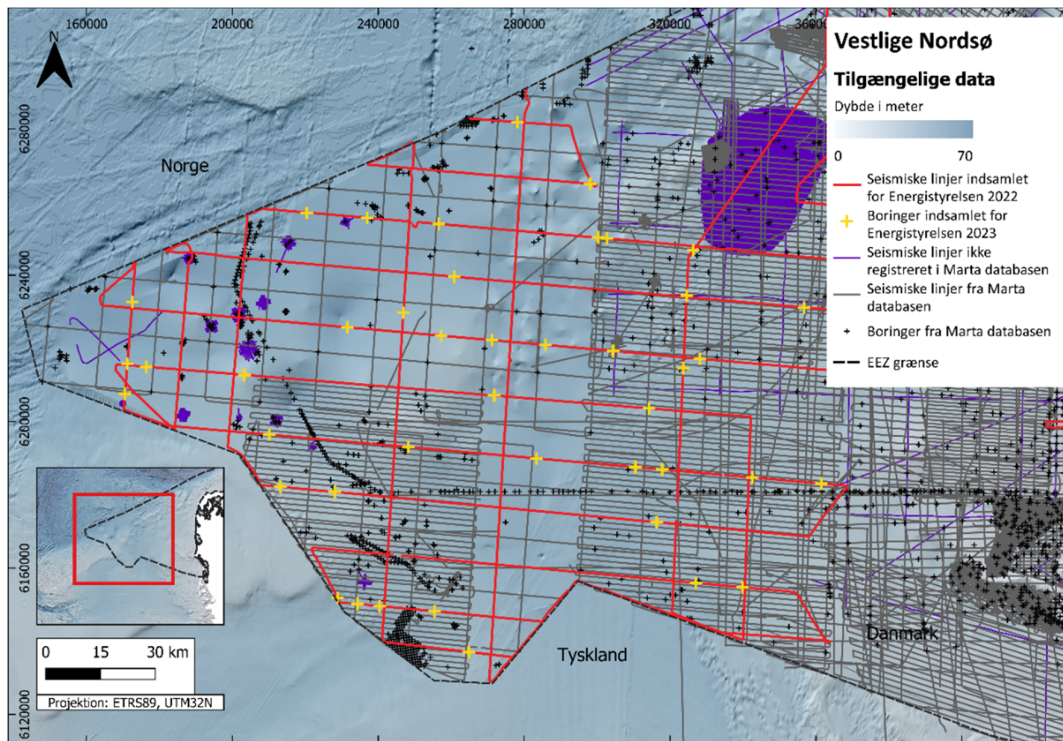
I den nordøstligste del af det kortlagte område har der kun været meget højoypløselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed og i et mindre område slet ingen data. I området med højoypløselige data med ringe nedtrængning har det således kun været muligt at kortlægge tykkelsen af de Holocæne aflejringer og ikke tykkelsen af de senglaciale aflejringer. I området helt uden data er hverken tykkelsen af de Holocæne eller senglaciale aflejringer kortlagt, hvorfor det kun har været muligt at angive en forventet minimumstykkelser.

17.1 Seismiske enheder

I det følgende gives en beskrivelse af de seismiske enheder tolket i området og i Tabel 17.1 er vist en oversigt over enhederne med eksempler på deres seismiske facies, mens der i Figur 17.2 er givet en række udvalgte seismiske eksempler som illustrerer de seismiske enheder og deres beliggenhed i området og i forhold til hinanden.

17.1.1 Prækvartære strata

Den Prækvartære overflade ligger meget dybt mod vest og udgøres her af Pliocæne sedimenter, som i dybder på ned til 1.230 m overlægges konformt af Pleistocæne sedimenter (Nielsen et al., 2008). Mod øst er basis af de Kvartære aflejringer erosiv og højtliggende og her udgøres det Prækvartære underlag af Miocæne sedimenter. I dybere airgun seismik data ses, hvordan lagene dykker til store dybder i den vestlige del af området/hen over



Figur 17.1 Oversigtskort over den vestlige del af Nordsøen. Dybdekort modificeret efter EMODnet (2022). Kortet viser seismiske data og borer tilgængelige for arbejdet, hvoraf et udvalg er benyttet.

Centralgraven, mens de Prækvartære lag kun er synlige i sparker seismik data fra Palæo-Elben Dalen og østover. Her optræder de Prækvartære aflejringer som kontinuerte, parallelle reflektorer, der hælder svagt mod vest. Længere mod øst er de Prækvartære lag stejlt, skråstillede og tydeligvis påvirket af glacialteknik.

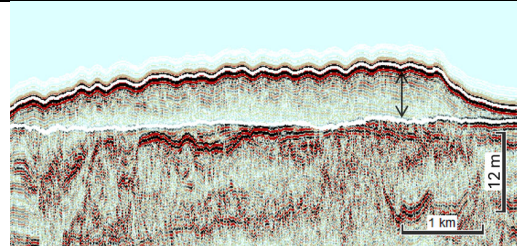
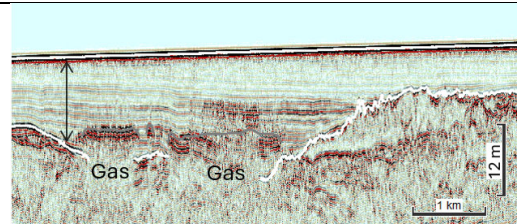
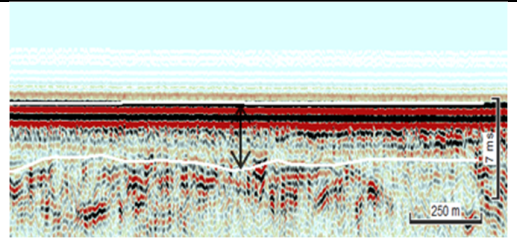
17.1.2 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, præ-Weichsel

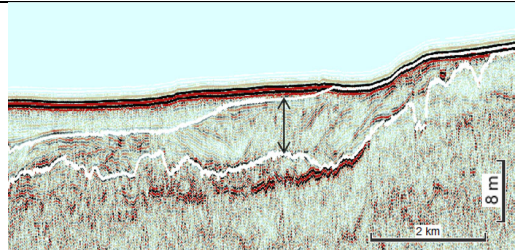
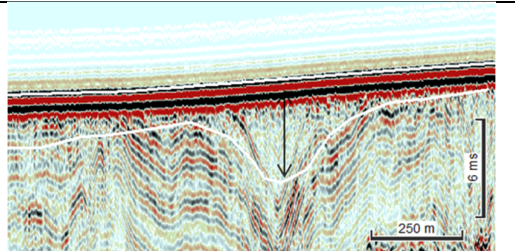
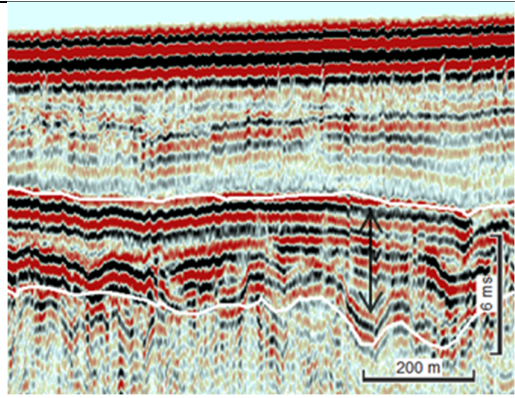
Over de Prækvartære strata ses stedvist en ondulerende reflektor, der er tolket som en Præ-Weichsel isdeformeret og isbelastet flade. Stedvist er denne reflektor tydelig og andre steder næsten ikke synlig. Det interne refleksionsmønster i den underliggende enhed er kaotisk. Mod øst skæres enheden ofte af begravede dale. Grænsen er vanskelig at identificere i den vestligste del af området (Figur 17.2 A og B).

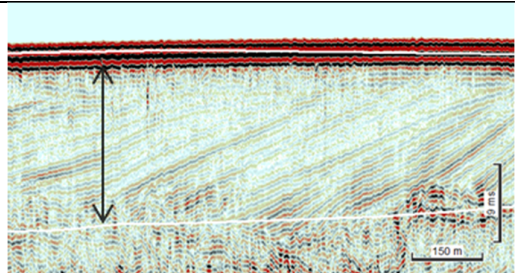
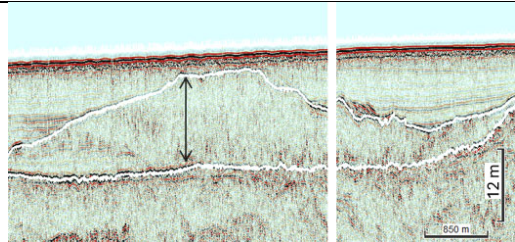
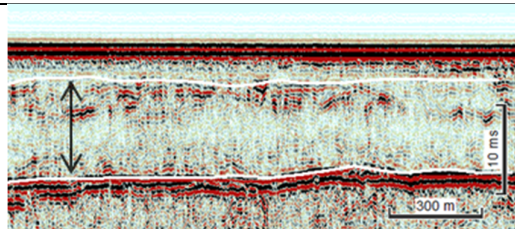
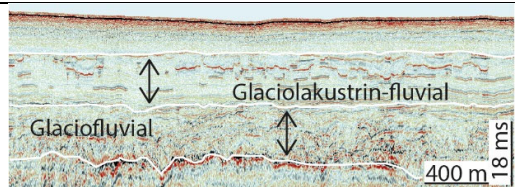
17.1.3 Smeltevandssedimenter, præ-Weichsel

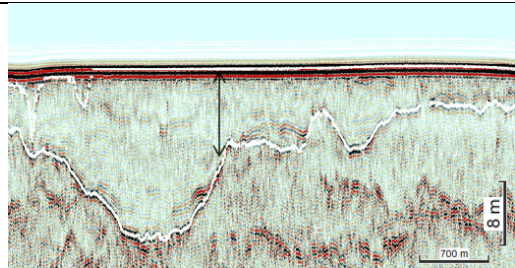
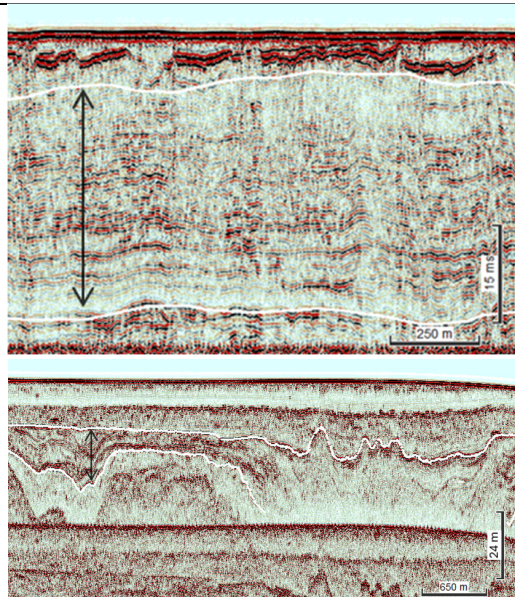
Præ-Weichsel smeltevandssedimenter findes over den præ-Weichsel isbelastede flade og i depressioner i denne (Figur 17.2 A). Enheden dækker store områder men er ofte vanskelig at skelne fra glacialt deformerede og isbelastede sedimenter samt yngre smeltevandssedimenter. Mægtighederne når op over 30 m. Enheden er formentlig aflejret foran en tilbage-trækkende isrand under Elster eller Saaleistiden.

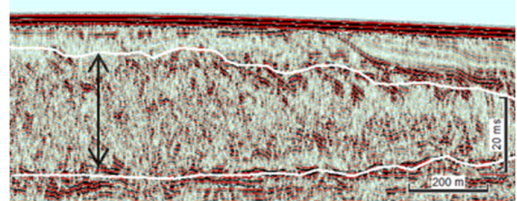
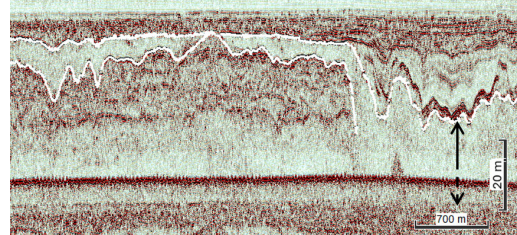
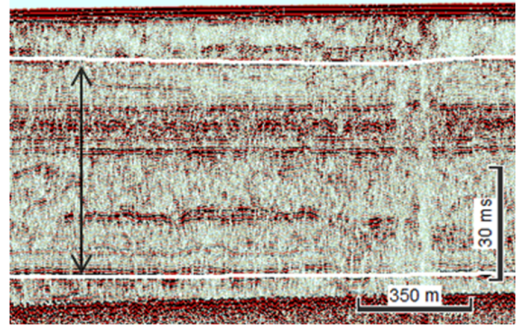
Tabel 17.1 Oversigt over seismiske enheder tolket i området.

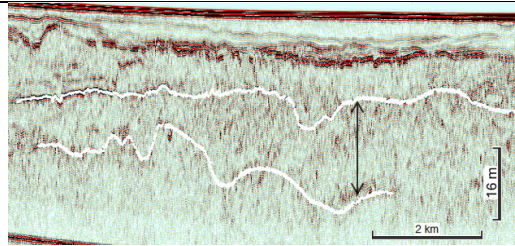
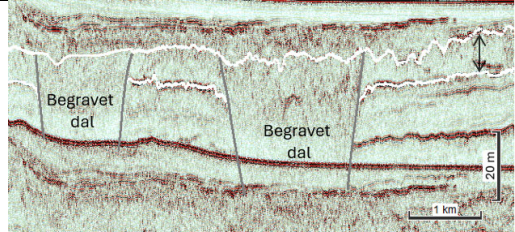
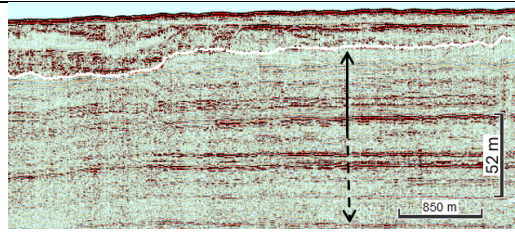
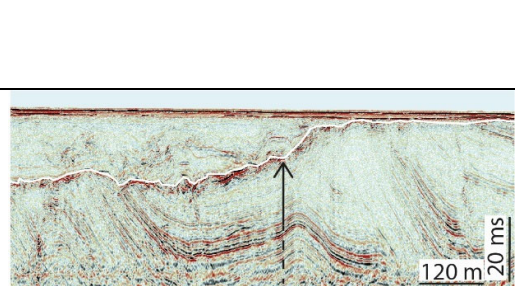
Tolket alder	Enhed	Beskrivelse af seismisk udseende/karakter	Maksimal Tykkelse (m)	Udbredelse	Forventet sediment-type	Aflejringsmiljø	Seismisk eksempel
Mellem til Sen Holo-cæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende og downlappende reflektorer, udbyggende klinoformer. Lav til medium amplitude. Kan fremstå kaotisk. Positive bundformer.	20	Lokale forekomster. Spredt i hele området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin, flakdannelser	
Holocæn	Holocæne, dyndede, estuarine-marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude.	30	I Palæo-Elben Dalen.	Ler, silt, gytje og dynd	Marin	
Tidlig Holo-cæn	Holocæne lerede og siltede marine sedimenter	Parallelle, kontinuerlige reflektorer, semi-transparent. Lav til medium amplitude.	7	Op mod den norske grænse.	Ler og silt	Marin	

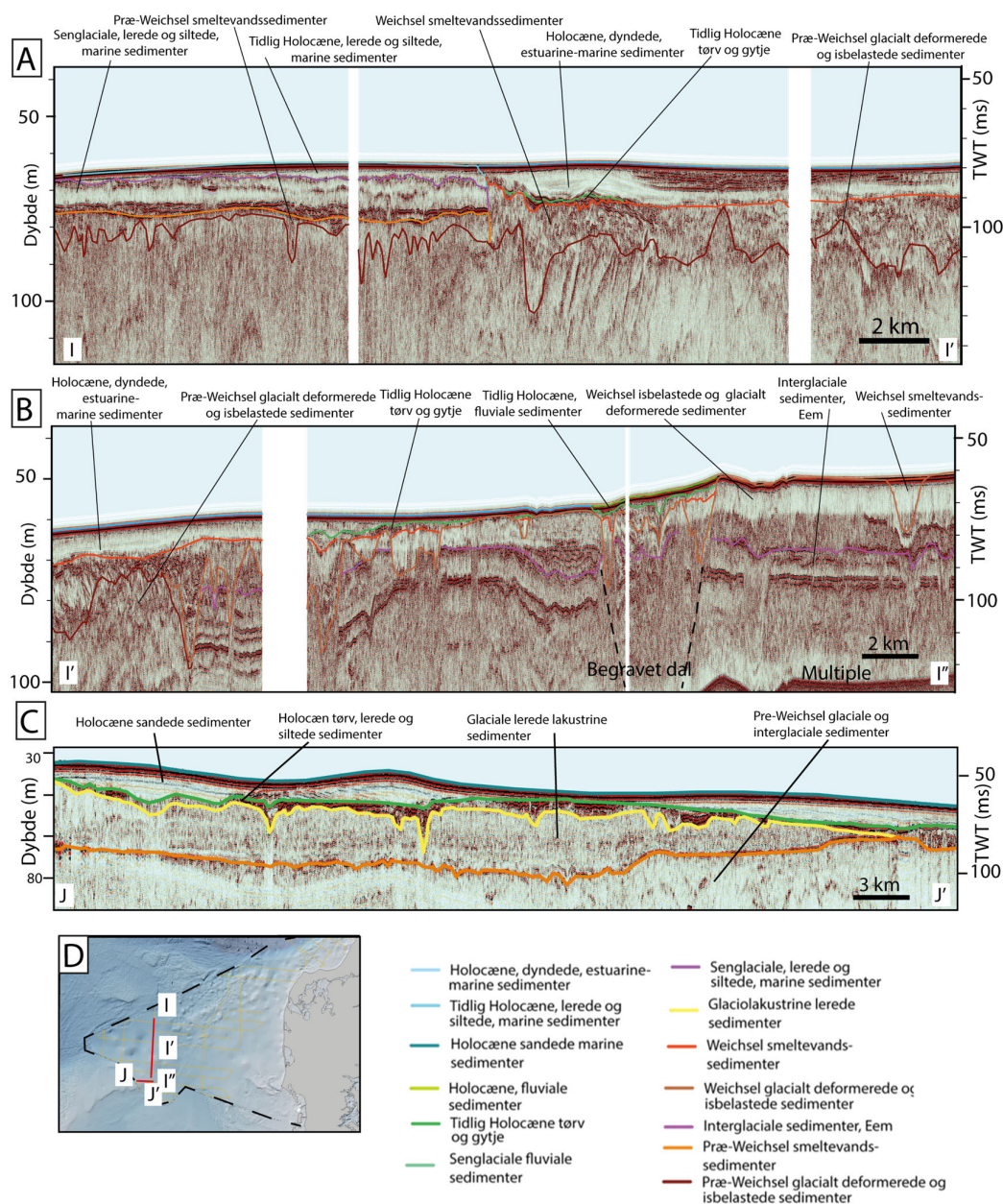
Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede sedimenter	Interne reflektorer med krydslejring. Lav til medium amplitude, udbyggede.	10	I Palæo-Elben Dalen.	Fin- til mellemkornet sand og tørv ved basis	Kystudbygning langs flankerne af Palæo-Elben Dalen	
Tidlig Holocæn	Holocæne, fluviale sedimenter	Lav til medium amplitude. Konformt overlejrende underliggende enheder.	4	I kanaler på Doggerbanke.	Formodentlig fin-kornet sand	Flodkanaler på Doggerbanke	
Tidlig Holocæn	Tidlig Holocæne tørv og gytje	Let ondulerende reflektorer med høj amplitude. Findes i fordybninger i underliggende enhed.	3-4	Hyppige forekomster i Doggerbanke Tail End området samt i den sydlige del af Central-graven.	Tørv og gytje	Sø, mose eller floddale- og sletter (limniske aflejringer). Dannet under Fastlandstiden i Tidlig Holocænt område parallelt med Palæo-Elben Dalen.	

Tidlig Holocæn	Holocæne, sandede, marine sedimenter	Skråt hældende reflekterer.		Stor udbredelse på den nordlige side af Doggerbanke Tail End området.	Sand (mellem- til grovkornet)	Marin/kyst Doggerbanke udbygning	
Sen senglacial	Senglaciale, sandede, fluviale sedimenter	Kaotisk seismisk facies. Lav til medium amplitude.	20	Lokale forekomster ved basis af Palæo-Elben Dalen.	Sand (mellem- til grovkornet)	Fluvial eller glaciofluvial	
Senglacial	Senglaciale, lerede og siltede, marine sedimenter	Transparente til semitransparente, parallelle, kontinuerlige reflektorer, Konformt overlejrende underliggende enheder.		Kun helt mod nord.	Ler og silt	Glaciomarin	
Glacial (Weichsel)	Glaciale smeltevands-sedimenter (glaciofluviale/glaciolakustrine)	Udfyldning af en større glacial kanal. Kanaliserede refleksioner nederst. Lagdelte lakustrine aflejringer øverst. Begyndende yderligere kanalisering i toppen ved dræning af sø-sedimenter.	45	Kanal i Energiø-området.	Primært sand, men finere mod toppen, med silt og ler	Glaciofluvial-glaciolakustrin	

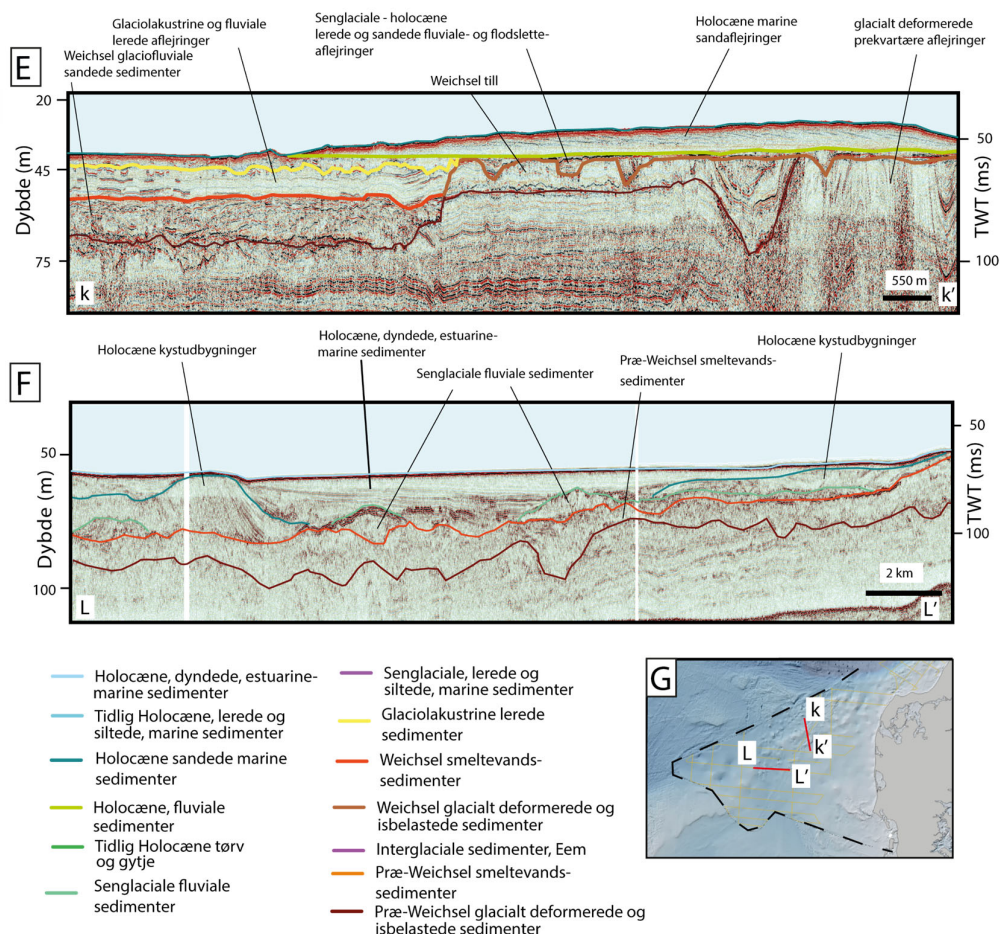
Glacial (Weichsel)	Weichsel smeltevands- sedimenter	Kaotisk. Kontinuerlige re- flekterer forekommer.	30	Findes i største- delen af området.	Dårligt sor- teret sand og grus	Glaciofluvial	
Glacial (Weichsel)	Weichsel issøsedimen- ter	Laminerede og kontinu- erlige reflektorer. Foldet i Doggerbanke området (den nordlige del af den store, sydvestlige udbre- delse). Til tider kaotisk. Erosiv, øvre grænse un- der Palæo-Elben Dalen.	40	Stor lateral ud- bredelse i den sydvestlige del af området. Mindre forekomster i de nordligste tunnel- dale i området. Udgør her det yngste dalfyld.	Ler med indslag af silt og fin- sand	Glaciolakustrin	

Glacial (Weichsel)	Weichsel glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	Kaotiske ikke-transparente til transparente reflektorer. Stedvist skrå reflektorer. Ondulerende overflade.		Kun mod vest. Store mægtigheder mod nordvest. Størst tykkelse på nordsiden af Doggerbanke Tail End området. Tynder kraftigt ud mod nord og vest herfra.	Moræneler, morænesand samt ispåvirket/isoverskredet ler, silt, sand	Glacial	
Eem	Eem interglacial sand (truffet i fem boringer)	Transparent. Lav amplitude.	>40 i tunneldale	Lokale forekomster og i de nordligste tunneldale.	Fin- til mellemkornet sand	Marin	
Interglacial (Eem?)	Interglaciale, marine sedimenter	Parallele transparente til semi-transparente reflektorer. Stedvist skåret af yngre tunneldale fra Weichsel.	>50	Forekommer i hele den nordvestlige del af området vest for Pæløo-Elben Dalen, under den isbelastede Weichsel flade.	Formodentlig ler til sand	Marin	

Glacial (Præ-Weichsel: Elster eller Saale)	Præ-Weichsel smeltevandssedimenter	Kaotisk. Vanskelig at skelne fra glacialt deformerede og isbelastede sedimenter og Weichsel smeltevandssedimenter. (kan dog skelnes via borer og stratigrafi).	>30	Hele området.	Dårligt sorteret sand og grus	Glaciofluvial	
Glacial (Præ-Weichsel: Elster eller Saale)	Præ-Weichsel glacialt deformerede og isbelastede sedimenter	Kaotisk. Ondulerende topreflektor. De begravede dale skærer enheden.	Ukendt	Hele området.	Moræner og morænesand samt glacialt deformerede sedimenter	Glacial	
Prækvarter	Miocæne og Pliocæne sedimenter	Skråt hældende til plane parallelle reflektorer. Kan være stedvist foldet og forkastet. Ofte erosiv øvre grænse.	Ukendt, men stor mægtighed	Kun observeret øst for Palæo-Elben dalen, hvor enheden er terrænnær. I dybden hælder lagene mod vest, og ligger i centralgraven i dybder >1000 m.	Fin- til mellemkornet sand samt silt og ler	Marin	
Prækvarter	Prækvarter glacialt deformerede lag	Foldede reflektorer med meget varierende hældning. Erosiv øvre grænse.	Ukendt, men stor mægtighed	Er observeret i Energjo-området, men forventes at have større udbredelse.		Marin	



Figur 17.2 Eksempler på sparker seismiske data fra den vestlige del af Nordsøen som viser de tolkede seismiske enheder. Den vertikale skala til højre er seismisk tovejstid (Two-Way-Time, TWT) og skalaen til venstre er i dybder. Der er anvendt en hastighed på 1600 m/s til tid/dybde konvertering. A) og B) N-S gående seismisk profil i den vestlige del af området. C) Ø-V gående seismisk profil i den sydvestlige del af området. D) Oversigtskort og tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder. E) N-S gående seismisk profil i den nordøstlige del af området. F) Ø-V gående seismisk profil i den østlige del af området. G) Oversigtskort og tegnforklaring: Farverne indikerer de øvre grænser for de seismiske enheder. Se også næste side.



17.1.4 Interglaciale sedimenter

I den vestlige del af området ses en transparent eller semi-transparent enhed med parallelle, interne reflektorer. Stedvist er enheden skåret af yngre tunneldale fra Weichsel. Samme enhed ses lokalt i ældre begravede tunneldale i den nordlige del af området, men her er enheden dog mere transparent (Figur 17.2 B). Enheden tolkes til at være aflejret i den varme mellemistid Eem i et marint miljø.

17.1.5 Glacialt deformerede og isbelastede sedimenter, Weichsel

I den centrale del af området omkring Centralgraven findes en række deformationsbånd. Det interne refleksionsmønster i disse er karakteriseret ved at være enten akustisk kaotisk og transparent eller ved at bestå af meget stejle reflektorer, som bryder den ellers flade og parallelle refleksionsstruktur i enheden. Reflektorerne onlapper desuden på hinanden, og optræder, afhængig af retningen af det enkelte profil, som karakteristiske overskydningsmønstre. De deformerede lag har ingen tilknytning til tektoniske fænomener i øvrigt, og glider på en decollement-flade ca. 120 m under havoverfladen. De deformerede sedimenter udgøres

af glaciale søaflejringer, der hovedsageligt består af gråt stift ler, som blev aflejret under sidste glaciale maksimum (se næste afsnit).

17.1.6 Weichsel Issøsedimenter

Under sidste glaciale maksimum, mens isen bevægede sig frem mod sin maksimale udbredelse, flød det Britiske Isskjold og det Skandinaviske Isskjold sammen, og dæmmede op for smeltevand, så der blev dannet en enorm sø i den danske del af Nordsøen. Her blev der aflejret lerede issøsedimenter med en maksimal tykkelse på op mod 40 m (Figur 17.2 C). Aflejringerne findes hovedsageligt i den vestligste del af Nordsøen i den sydlige del af området omkring Centralgraven. I Palæo-Elben Dalen er enheden eroderet og den findes kun sparsomt i andre områder længere mod øst. Sedimenterne består hovedsageligt af gråt, hårdt, stift ler (se f.eks. boring 550502.2 (VN-44) i Figur 17.3), muligvis med enkelte dropsten, men der forventes at være en vis kornstørrelsesvariation internt i enheden relateret til afstanden til sedimentkilden, som primært var isen mod nord. Ved opsplittningen af det Britiske og det Skandinaviske Isskjold blev vandet fra søen drænet mod nord, ud i Nordatlanten, antagelig over relativt kort tid (Hjelstuen et al., 2018). Issøaflejringerne var nu blottet, og blev udsat for udtørring og permafrost, hvilket muligvis har medført, at sedimenterne blev hårde og stive.

17.1.7 Glaciale smeltevandssedimenter, Weichsel

I store dele af området findes glaciofluviale erosionskanaler, som er udfyldt med 30-40 m tykke hovedsageligt sandede og grusede sedimenter. Disse kanaler er skabt i Weichsel istiden, som smeltevandskanaler, hvor der blev aflejret store mængder groft materiale. I Energiområdet, findes grove smeltevandsaflejringer i en stor vest-øst gående kanal, og denne enhed optræder således i en stor del af det kortlagte område (Figur 17.2 E).

17.1.8 Senglaciales, fluviale sedimenter

I den nordlige del af Palæo-Elben Dalen findes eroderede senglaciales fluviale aflejringer. Disse optræder typisk som positive former med basis ved bunden af Palæo-Elben Dalen og med en erosiv top. Det interne refleksionsmønster er kaotisk med lav til middel amplitude. De fluviale aflejringer optræder som spredte erosionsrester af tidligere flodaflejringer, og er derfor lokale fænomener.

17.1.9 Senglaciales, glaciomarine sedimenter

I den nordlige del af området, op imod grænsen til norsk farvand, ses en lokal transparent til semi-transparent enhed med parallelle, kontinuerede interne reflektorer. Enheden overlever konformt de underliggende enheder og er tolket som senglaciales, marine aflejringer. Enhedens udbredelse fortsætter formentlig mod nord ind i norsk sektor. Enheden er skåret af Holocæne, dyndede estuarine-marine sedimenter aflejret i Palæo-Elben (se afsnit 17.1.13). Der er ingen boringer i enheden, og tolkningen er derfor usikker.

17.1.10 Holocæn tørv og gytje

Hen over Doggerbanke Tail End området ses en højreflektiv enhed (Figur 17.2 A), som er nedskåret i den isbelastede Weichsel flade og Weichsel smeltevandssedimenter samt i Palæo-Elben Dalen (under de Holocæne, dyndede estuarine-marine sedimenter aflejret i Palæo-Elben, se afsnit 17.1.13). Enheden er op til 3-4 m tyk og er dateret og tolket som Holocæn tørv og gytje aflejret i Fastlandstiden i Tidlig Holocæn (se boring 550401.1 (VN-33) i Figur 17.3), hvor store dele af Nordsøen var tørlagt. I Palæo-Elben Dalen kan enheden også være aflejret i sen senglacial tid inden transgressionen af området.

17.1.11 Holocæne fluviale sedimenter

I Doggerbanke Tail End området findes en enhed med interne reflektorer med lav til medium amplitude (Figur 17.2 B) som konformt overlejrer Holocæn tørv og gytje beskrevet i forrige afsnit. Enheden er tolket som Holocæne, fluviale sedimenter aflejret i Fastlandstiden, hvor store dele af Nordsøen var tørlagt, og floder drænerede Doggerland.

17.1.12 Holocæne sandede, marine sedimenter

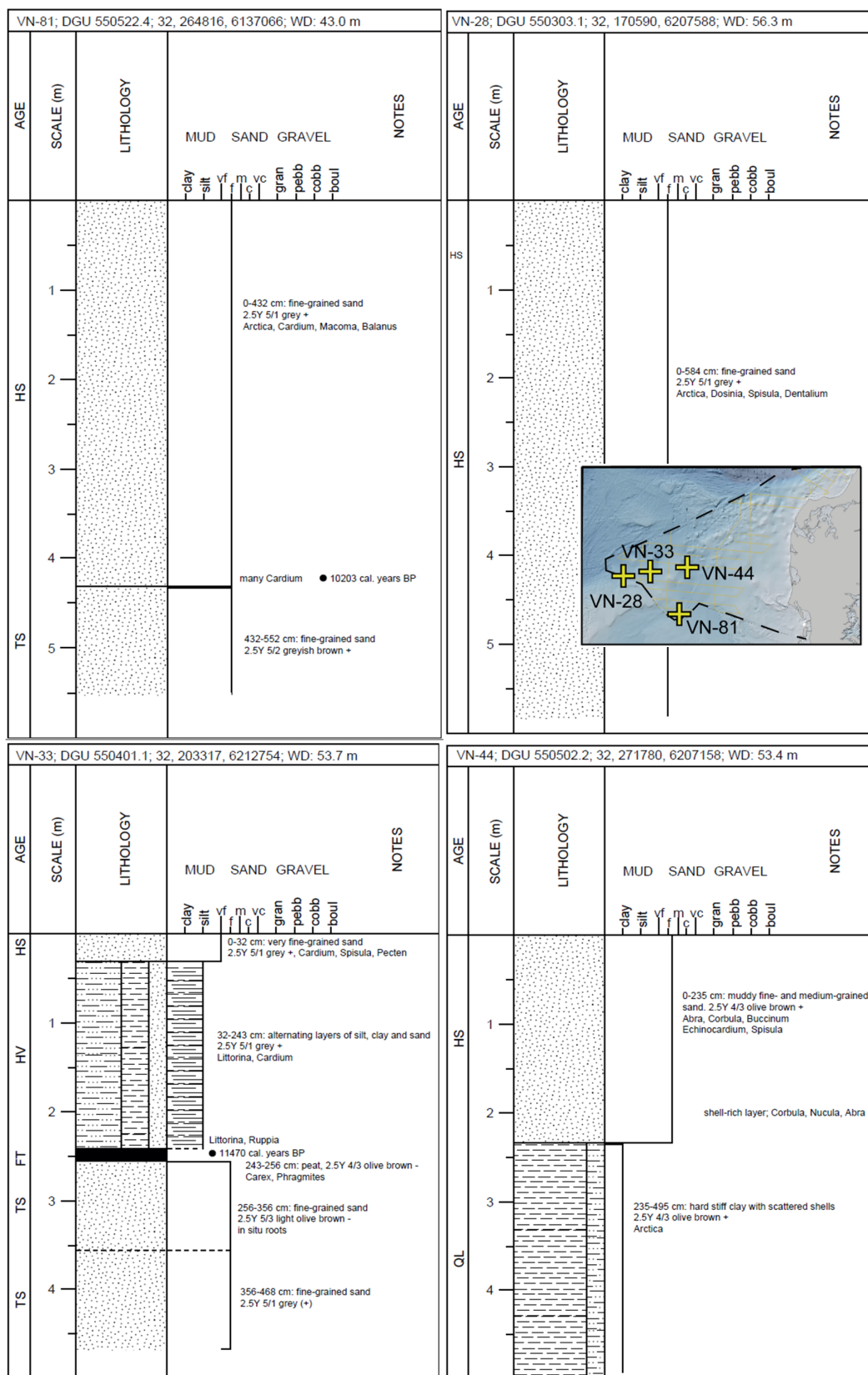
I takt med stigende havniveau under den Holocæne transgression, udviklede Palæo-Elben Dalen sig til et estuarie. I denne periode blev der aflejret en enhed med interne skråtstillede reflektorer (se Figur 17.2 F og boring 550303.1 (VN-28) samt boring 550522.4 (VN-81) i Figur 17.3), der tolkes som kystudbygninger i estuariet i forbindelse med transgressionen. Helt mod vest, nord for Doggerbanke, ses ligeledes en kystudbygning af sandede marine sedimenter, der tolkes som kystudbygning under Fastlandstiden i Tidlig Holocæn.

17.1.13 Holocæne dyndede, estuarine-marine sedimenter

I områder med dybere vand, typisk 50 m eller mere, findes der Holocæne dyndede marine sedimenter. Det største område med disse aflejringer er i Palæo-Elben Dalen, som i den nuværende batymetri følger kote -50 m kurven i et ssø-nnv strøg centralt gennem den vestlige danske Nordsø. Overgangen fra estuarin til marin kan være vanskelig at identificere i seismiske profiler, men vil være tydeligere i sedimentkerner, se f.eks. boring 550401.1 (VN-33) i Figur 17.3. På seismiske profiler fremstår enheden med parallelle interne reflektorer, som varierer mellem kraftige og svage amplituder. Der findes flere steder biogen gas i sedimentet, som skaber meget kraftige amplituder.

17.1.14 Holocæne marine sedimenter

Stedvist i hele området ses en enhed bestående af skråt hældende og downlappende reflektorer, der overordnet tolkes som udbyggende klintoformer (Figur 17.2 E). Enheden befinder sig umiddelbart under havbunden, har lav til medium amplitude og kan fremstå kaotisk. Den danner ofte positive bundformer og er tolket som flakdannelser dannet af marine bundstrømme.



Figur 17.3 Sedimentologiske logs for udvalgte kerner i området.

17.2 Konceptuel geologisk model

Forud for tolkningsarbejdet er der opstillet en indledende konceptuel geologisk model for området baseret på eksisterende viden om den forventede lagfølge og geologiske udvikling. Den indledende konceptuelle model har dannet ramme for den videre tolkning af seismiske data og borer og er undervejs blevet tilrettet og udvidet efter behov, i takt med at tolkningsarbejdet har bibragt nye detaljer om geologien. De geologiske profiler og tilhørende beskrivelser i det følgende repræsenterer derfor den opdaterede viden der er tilvejebragt gennem den geologiske screening og illustrerer den aktuelle opfattelse af områdets geologi.

På baggrund af den generelle geologiske udvikling i Nordsøen, det seismiske tolkningsarbejde i dette projekt og beskrivelsen af de seismiske enheder er der således opstillet en konceptuel geologisk model for den vestlige del af Nordsøen. Den konceptuelle model er illustreret med to vest-øst gående profiler (Figur 17.4 og Figur 17.5) og et nord-syd gående profil gennem hele området (Figur 17.6). Modellerne fokuserer på den øvre lagserie/de Kvar-tære lag. Placeringen af profilerne er vist på Figur 17.13.

Det nederste lysegule lag på det nordlige vest-øst gående profil (Figur 17.4) repræsenterer Miocæne eller Pliocæne aflejringer som er glacialt deformerede.

Det nederste mørkebrune lag på alle tre profiler repræsenterer en serie af glaciale lag fra Saale og/eller ældre istider. Lagene har været overskredet af et eller flere isskjolde og kan være glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Enheden har ofte en vis tykkelse, men i store områder ligger lagene så dybt, at det ikke har været muligt at kortlægge dem ud fra de tilgængelige data, ligesom det typisk ikke har været muligt at kortlægge deres nedre grænse. Sedimenterne består formentlig hovedsageligt af moræneler og morænesand, men kan også indeholde smeltevandsaflejringer og finkornede interglaciale sedimenter. På den østlige del af profilet i Figur 17.5 ses en række nedskårne begravede dale med lysegrå farve, som formentlig er af Saale alder og kan have et komplekst og varierende fyld af sedimenter.

Det ferskenfarvede lag, over de ældre glaciale aflejringer på det sydlige vest-øst gående profil (Figur 17.5) og det nord-syd gående profil (Figur 17.6), repræsenterer sandede smeltevandsaflejringer som formentlig er af Saale alder eller ældre. Mod vest er tykkelsen relativt stor, men laget bliver gradvist tyndere mod øst og enheden er helt fraværende i den østligste del af profilet i Figur 17.5.

På det nordlige vest-øst gående profil (Figur 17.4) repræsenterer det mintgrønne lag marine sandede interglaciale aflejringer fra Eem. På den nordlige/centrale del af det nord-syd gående profil i Figur 17.6 ses, over de ældre glaciale aflejringer, et tykt lag med mørkegrå farve som antages at repræsentere finkornede marine interglaciale aflejringer, formentlig fra Eem, eller finkornede glaciomarine aflejringer fra en marin fase i Tidlig Weichsel (Knudsen, 1985). Enheden tynder ud mod syd og optræder ikke på den sydlige del af profilet.

Over de marine interglaciale Eem eller glaciomarine Weichsel aflejringer ses på Figur 17.6, med brun farve, en enhed med stigende tykkelse mod syd som repræsenterer en serie af glaciale lag fra Weichsel. Lagene har været overskredet af Weichsel isen og kan være

glacialt deformerede (markeret med bølget signatur på profilet). Mod nord, hvor enheden er relativt tynd, består sedimenterne formentlig hovedsageligt af moræneler og morænesand, men kan også indeholde sandede smeltevandsaflejringer og finkornede interstadiale sedimenter. Mod syd, hvor enheden er relativt tyk, består sedimenterne formentlig af finkornede issøaflejringer som har været isbelastede og er deformerede af isen. Enheden optræder ikke på den sydlige del af profilet og dens udbredelse mod syd markerer samtidig den maksimale udbredelse af Weichsel isen fra nord og fra vest. Enheden optræder heller ikke på den nordligste del af profilet. Denne del af området har dog været overskredet af isen i Weichsel, men eventuelle ispåvirkede Weichsel aflejringer er senere eroderet væk, formentlig i forbindelse med afsætning af store mængder Weichsel smeltevandsaflejringer (se nedenfor).

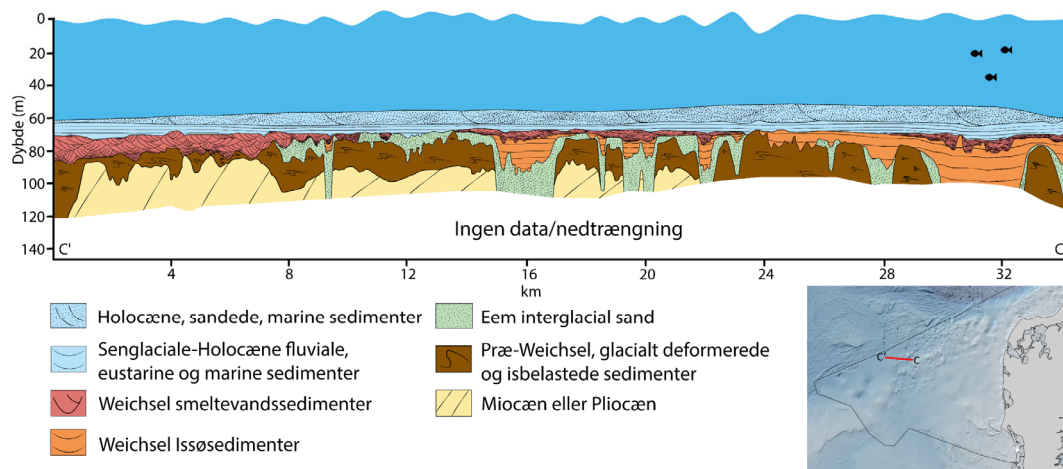
På profilet i Figur 17.4 og den sydlige del af profilet i Figur 17.6 (og som en lille kile mod vest på profilet i Figur 17.5) ses, over de ældre smeltevandsaflejringer, et tykt lag med orange farve som repræsenterer finkornede Weichsel issøsedimenter. Sedimenterne antages at være afsat i en stor isdæmmed sø øst og syd for isranden. Søen har på et tidspunkt dækket store dele af den vestlige del af området. Denne del af Weichsel issøaflejringerne har ikke været overskredet og belastet af isen.

De røde lag i den øvre del af lagserien på de tre profiler repræsenterer Weichsel smeltevandsaflejringer, som er udbredte i det meste af området og afsat i store flodsystemer som udgik fra isranden mod vest og nord. Enheden varierer meget i tykkelse og udfylder mange steder nedskæringer i de underliggende aflejringer. I den vestlige del af profilerne i Figur 17.4 og Figur 17.5 samt i den nordlige del af profilet i Figur 17.6 er enheden relativt tyk, mens den er relativt tynd eller fraværende langs resten af de tre profiler.

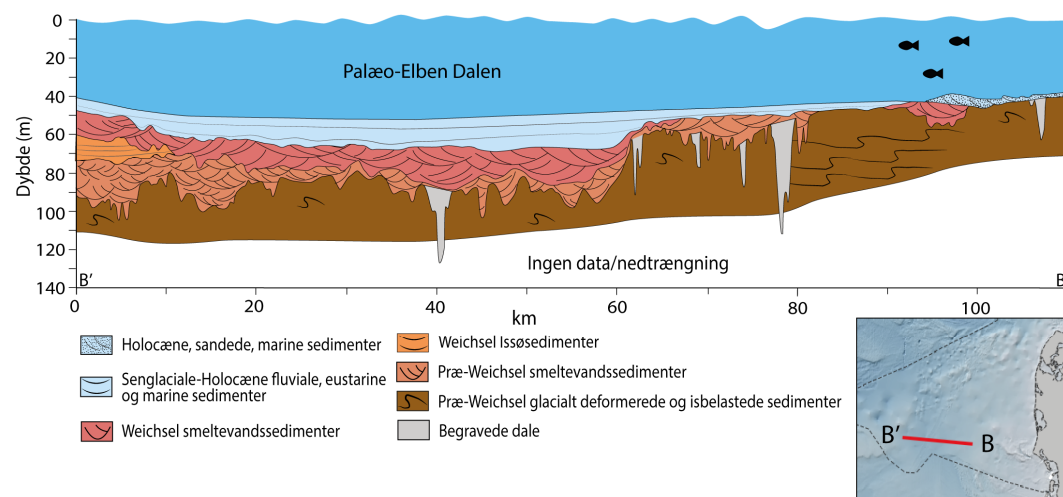
På profilet i Figur 17.6 ses over Weichsel aflejringerne en række lokale samt mere udbredte enheder med grøn farve, som repræsenterer finkornede søaflejringer. De dybest liggende er formentlig senglaciale og de højere liggende formentlig Holocæne.

I den nordlige ende af profilet i Figur 17.6 repræsenterer det lilla lag formodede marine senglaciale aflejringer.

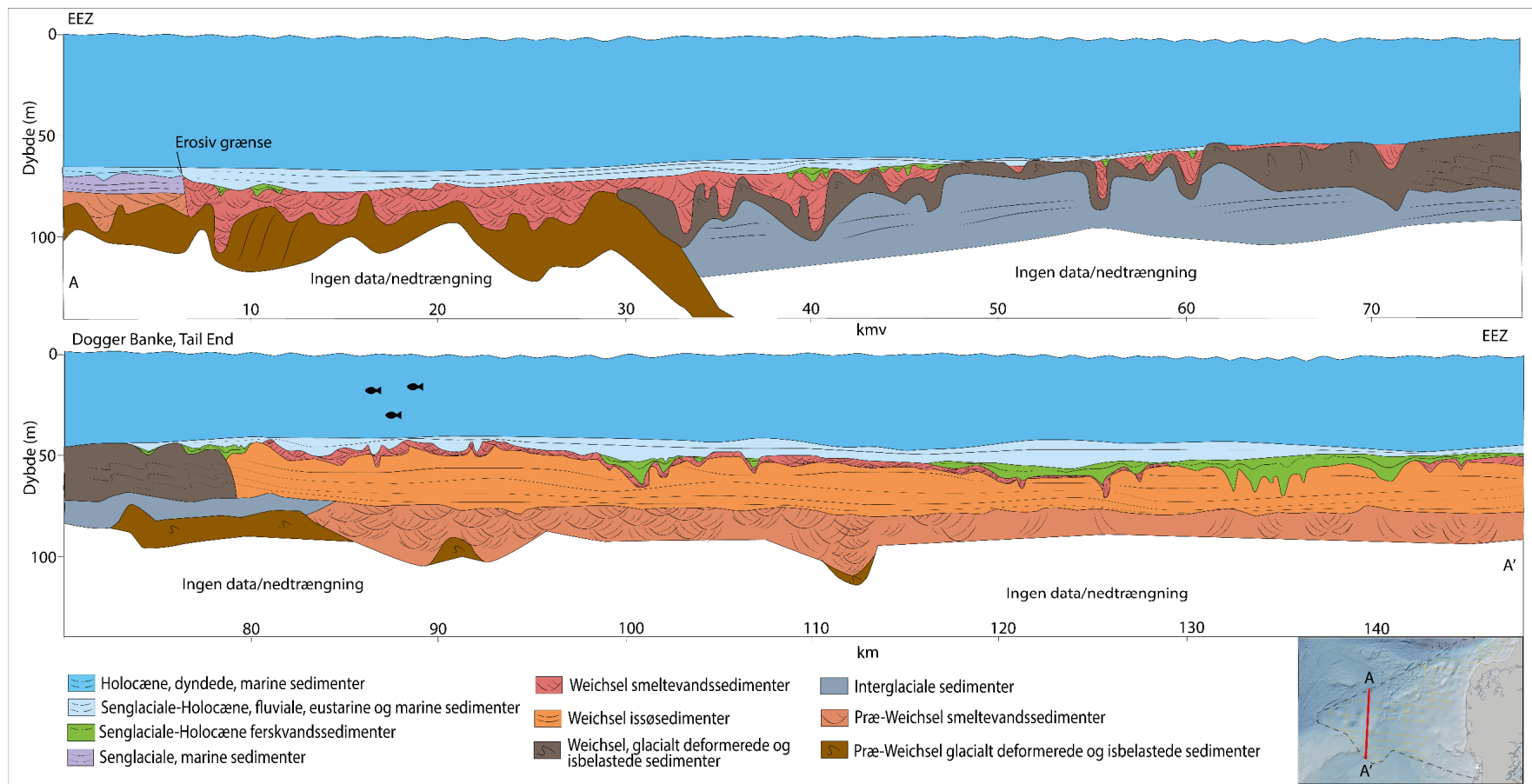
De øverste lyseblå lag på alle tre profiler repræsenterer senglaciale-Holocæne aflejringer afsat blandt andet i Palæo-Elben Dalen. Enheden omfatter nederst senglaciale fluviale aflejringer (særligt i den nordlige del af området), men i takt med stigende havniveau i Tidlig Holocæn opstod et estuarie-miljø med afsætning af brakvandssedimenter (Özmaral et al., 2022). Med fortsat stigende havniveau i Holocæn blev der efterfølgende aflejret marine sedimenter. I den østligste del af profilet i Figur 17.5 og langs hele profilet i Figur 17.4 er vist med en prikket signatur, at der øverst i lagserien er afsat marine, sandede Holocæne aflejringer. I den nordlige ende af profilet i Figur 17.6 er det vist med en lidt mørkere lyseblå farve, at der her afsat marine, dyndede Holocæne aflejringer.



Figur 17.4 Vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model i den nordlige del af området. Placeringen af profilet er vist på Figur 17.13.



Figur 17.5 Vest-øst gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model på tværs af Palæo-Elben Dalen i den sydlige del af Nordsøen. Placeringen af profilet er vist på Figur 17.13.



Figur 17.6 Nord-syd gående geologisk profil som illustrerer den konceptuelle geologiske model for den vestlige del af Dansk Nordsø. Placeringen af profilet er vist på Figur 17.13.

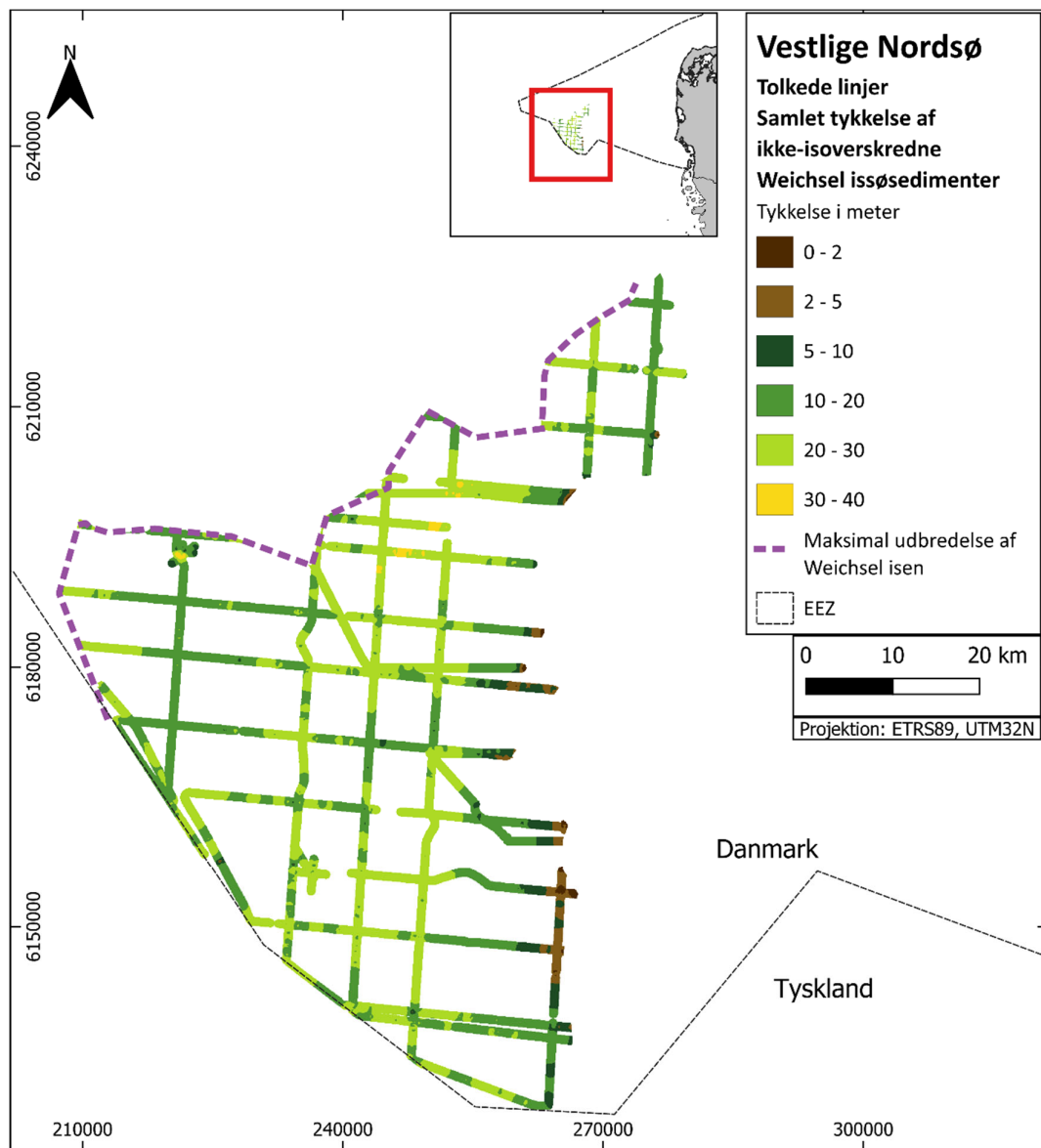
17.3 Tykkelse af Ikke-isoverskredne Weichsel issøsedimenter

I et større område mod sydvest i den danske del af Nordsøen er der kortlagt en markant, tyk enhed af finkornede Weichsel issøsedimenter, som ikke har været overskredet af isen. Enheden er også kortlagt længere mod nord, men her er der tydelige tegn, i form af glacialtektoniske deformationer, på at enheden har været overskredet af den seneste is i Weichsel. Mod nord anses issøsedimenterne således for at være konsoliderede, selvom de formentlig har anderledes geotekniske egenskaber end de moræneaflejringer, der ofte optræder i områder og som har været overskredet af isen. Det er derfor kun den sydlige del af enheden, som er kortlagt som potentielt bløde sedimenter.

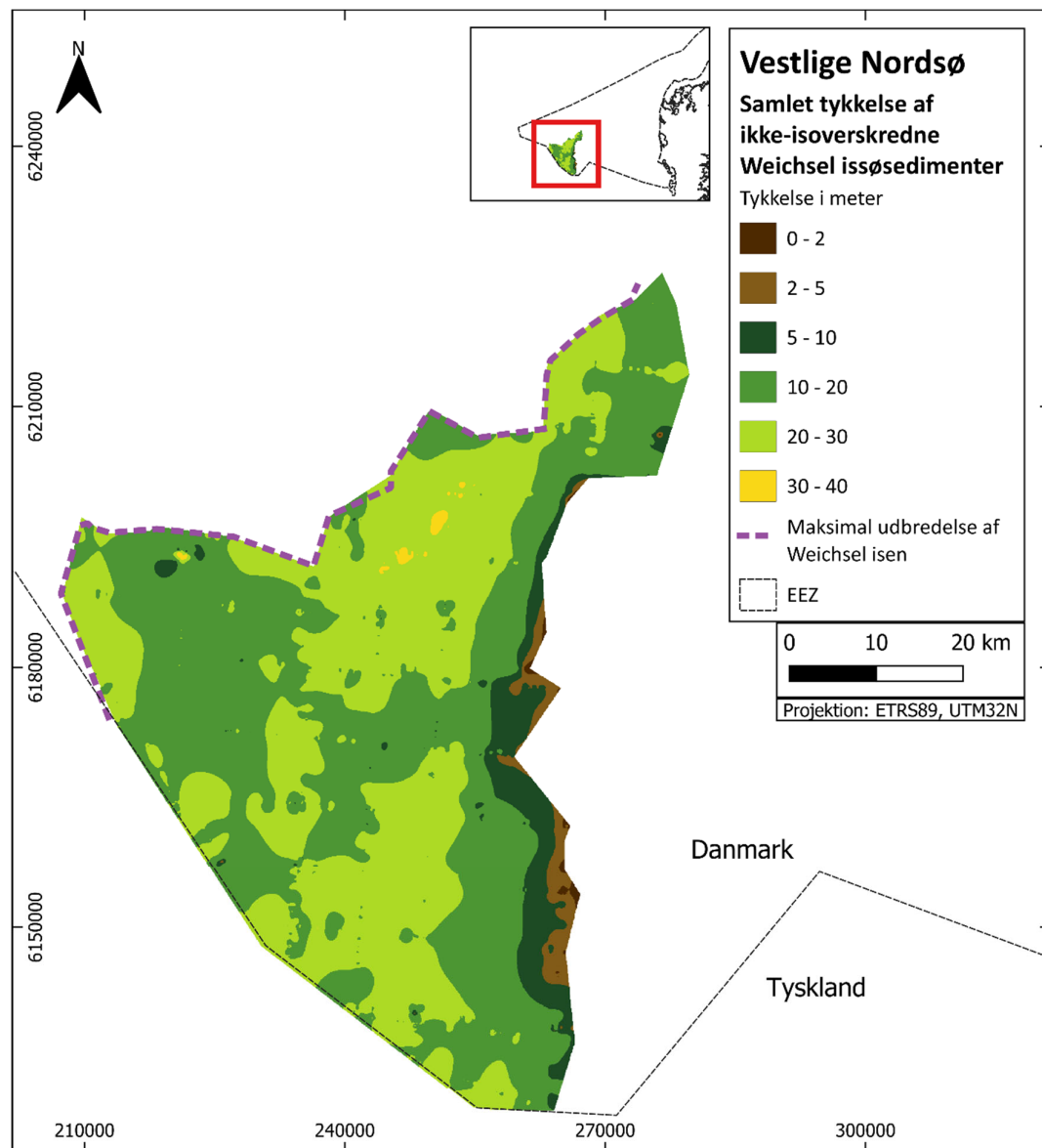
På Figur 17.7 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af Weichsel issøsedimenter som ikke har været overskredet af isen. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 17.8. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for issøsedimenterne således betragtes med større forsigtighed.

Kortet i Figur 17.8 viser tykkelsen af den sydlige enhed af Weichsel issøsedimenter som ikke har været overskredet af isen. Den maksimale udbredelse af Weichsel isen er vist med en lilla stiptet streg. Tykkelsen af enheden er generelt 10-30 m i området og helt lokalt op til 40 m. Den østlige afgrænsning af sedimenterne er meget markant og der er formentlig tale om aflejringer fra en isdæmmed sø. Søen og dermed aflejringerne har muligvis haft en større udbredelse, men aflejringerne er i så fald efterfølgende eroderet bort som en del af erosionen i Palæo-Elben Dalen. Eventuelle senglaciale aflejringer som optræder sporadisk i området over issøaflejringerne er inkluderet i tykkelseskortet.

Issøaflejringerne består primært af lerede og siltede sedimenter.



Figur 17.7 Kortet illustrerer hvor der er tolket Weichsel issøsedimenter i seismikken og giver indblik i data-grundlaget, og dermed usikkerheden, for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 17.8).

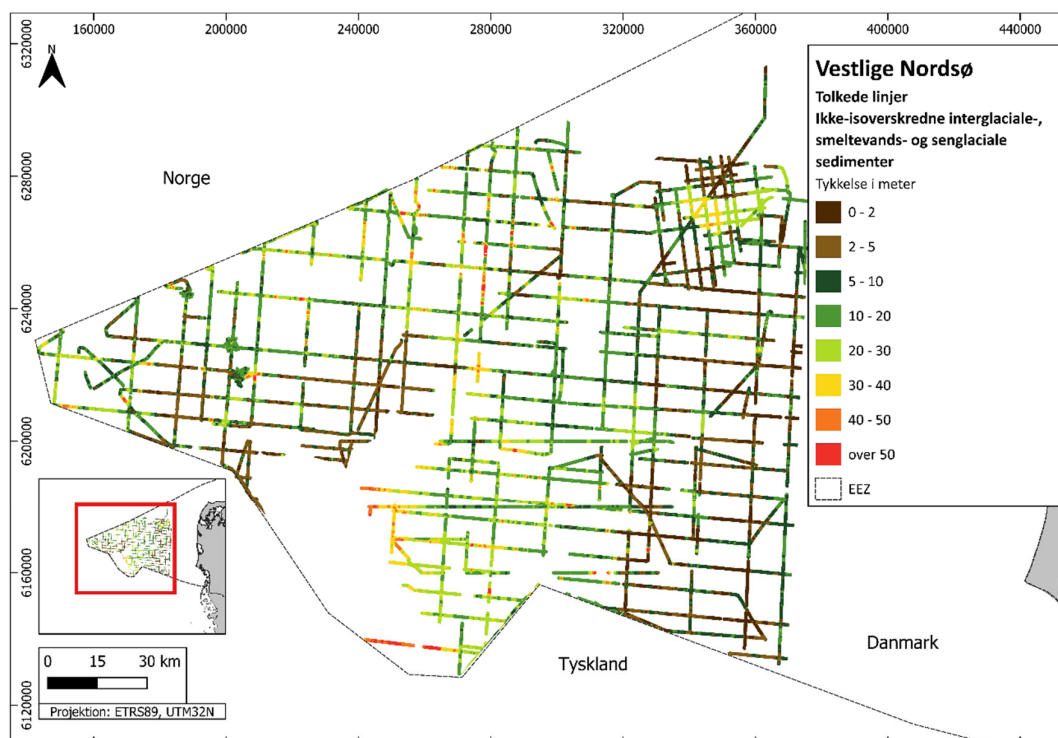


Figur 17.8 Kort over tykkelsen af ikke-isoverskredne Weichsel issøsedimenter i den sydvestlige del af området.

17.4 Tykkelse af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer

Som beskrevet ovenfor er der store dele af det kortlagte område, som ikke har været overkredet af isen i forbindelse med den seneste istid Weichsel. I disse områder optræder således aflejringer fra Weichsel der ikke, som det ellers ofte er tilfældet, er konsoliderede af isens vægt. Derfor er der foretaget en samlet kortlægning af potentielt bløde senglaciale og ældre ikke-isoverskredne aflejringer.

På Figur 17.9 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 17.10. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort således betragtes med større forsigtighed.



Figur 17.9 Kortet illustrerer hvor senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 17.10). I datatynne områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

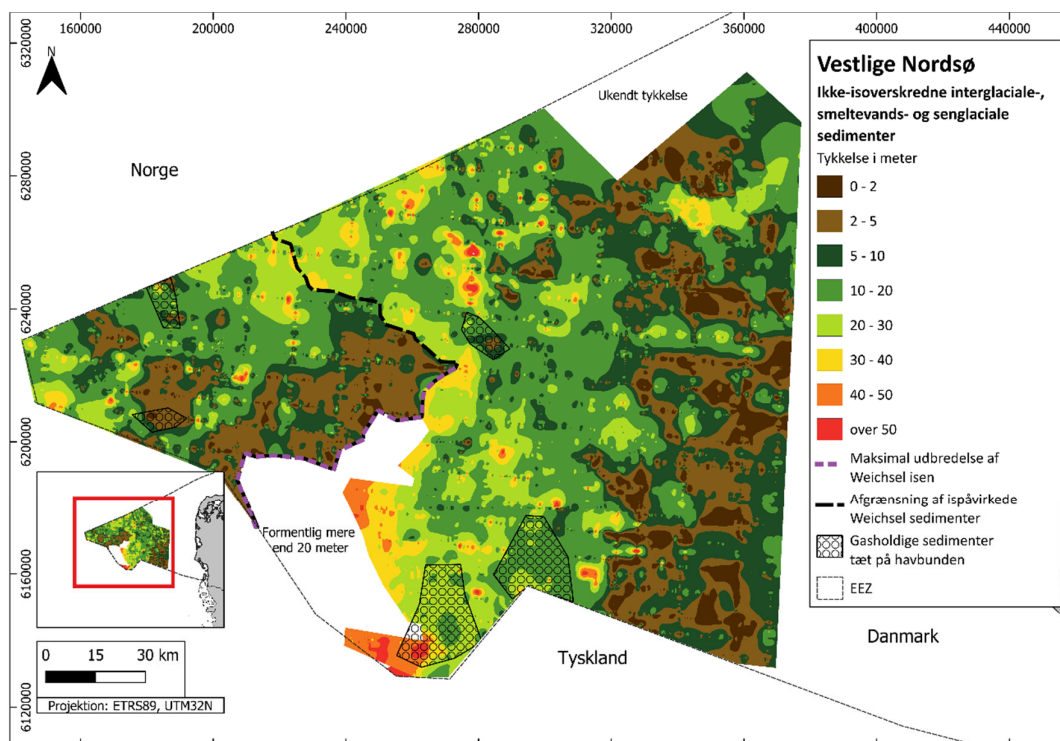
Kortet i Figur 17.10 viser tykkelsen af de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter i hele den vestlige del af den danske Nordsø. Længst mod øst er tykkelsen generelt 0-10 m, undtagen i enkelte kanallignende strøg og helt mod nordøst, hvor tykkelsen er 10-30 m og mod nordøst op til 30-40 m i et lokalt område. Mod vest er tykkelsen omkring 2-5 m i flere områder, men i resten af den vestlige del af området, og i et stort centralt område, er tykkelsen generelt 10-30 m og lokalt op til både 40 og 50 m eller mere. Kortet viser især i den nordlige del en lang række mindre områder med stor tykkelse, og disse repræsenterer sedimenter som udfylder begravede dale. Men på grund af den store afstand mellem de seismiske linjer bliver dalene ikke forbundet i interpolationsrutinen (se også afsnit 6.4.4), ligesom det heller ikke manuelt har været muligt at forbinde dalene fra linje til linje.

I den sydvestligste del af området ligger overfladen af konsoliderede sedimenter, som har været overskredet af isen under tidligere glaciationer, dybt (muligvis oveni den seismiske havbundsmultipel), og har ikke kunnet tolkes ud fra de tilgængelige data. Der er derfor ikke tolket en samlet tykkelse af de senglaciale og ældre ikke-isoverskredne aflejringer i dette område. Tykkelsen forventes dog at være relativt stor, og under alle omstændigheder mindst ca. 20 m, svarende til tykkelsen af enheden af Weichsel issøsedimenter, som er kortlagt

separat og vist i Figur 17.8 (se forrige afsnit). Den samlede tykkelse er sandsynligvis større, ligesom umiddelbart øst for området, hvor der er stor tykkelse af ældre ikke-isoverskredne Weichsel aflejringer. I den del af området som er sammenfaldende med området, hvor der er tolket Weichsel issøaflejringer, er eventuelle senglaciale aflejringer, som optræder sporadisk i området, inkluderet i tykkelsen af issøsedimenterne. De aflejringer som tykkelseskortet for de senglaciale og ældre ikke-isoverskredne aflejringer afspejler umiddelbart øst for området, hvor tykkelsen ikke er tolket, er som nævnt ovenfor ældre end Weichsel issøsedimenterne, og ligger under disse.

Længst mod nordøst har der kun været meget højopløselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed og i et mindre område slet ingen data. Her har det ikke været muligt at kortlægge tykkelsen af de senglaciale aflejringer. En række områder er påvirket af gas i sedimenterne (vist med boblesignatur på kortet), som forstyrrer/forhindrer nedtrængning af de seismiske signaler, og dermed tolkningen af data, og her er de geologiske tolkninger mere usikre.

En lilla stiptet streg viser den maksimale udbredelse af Weichsel isen mod sydøst og en sort stiptet streg viser den maksimale udbredelse mod nordøst af isbelastede sedimenter fra Weichsel. I et bælte øst for den sorte streg optræder der således ikke isbelastede aflejringer fra Weichsel, men kun senglaciale aflejringer over de ældre glacial aflejringer og hvis der har været isbelastede aflejringer fra Weichsel til stede på et tidspunkt, er de senere eroderet væk, formentlig i forbindelse med afsætning af store mængder af Weichsel smeltevands-sedimenter.



Figur 17.10 Kort over tykkelsen af senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer. I et område mod sydvest har det ikke været muligt at kortlægge tykkelsen, men den forventes at være relativt stor og minimum ca. 20 m (svarende til tykkelsen af Weichsel issøsedimenter vist i Figur 17.8), sandsynligvis større.

De senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer består primært af sandede og grusede smeltevandsaflejringer, men der forekommer også interglaciale aflejringer og søaflejringer, som forventes at være mere finkornede.

17.5 Tykkelse af Holocæne aflejringer

På Figur 17.11 herunder er vist de seismiske linjer, som er benyttet i tolkningen af de Holocæne sedimenter. Ved at vise den tolkede tykkelse af sedimenterne i en 1 km bred korridor langs den enkelte linje illustrerer kortet datatætheden og dermed tolkningsusikkerheden, som ligger til grund for det fuldt interpolerede tykkelseskort i Figur 17.12. I områder med få eller ingen tolkede linjer skal det fuldt interpolerede tykkelseskort for de Holocæne sedimenter således betragtes med større forsigtighed.



Figur 17.11 Kortet illustrerer hvor Holocæne aflejringer er tolket i seismikken og giver indblik i datagrundlaget for det fuldt interpolerede tykkelseskort (Figur 17.12). I datatynde områder er usikkerheden af det interpolerede grid således større end i datatætte områder.

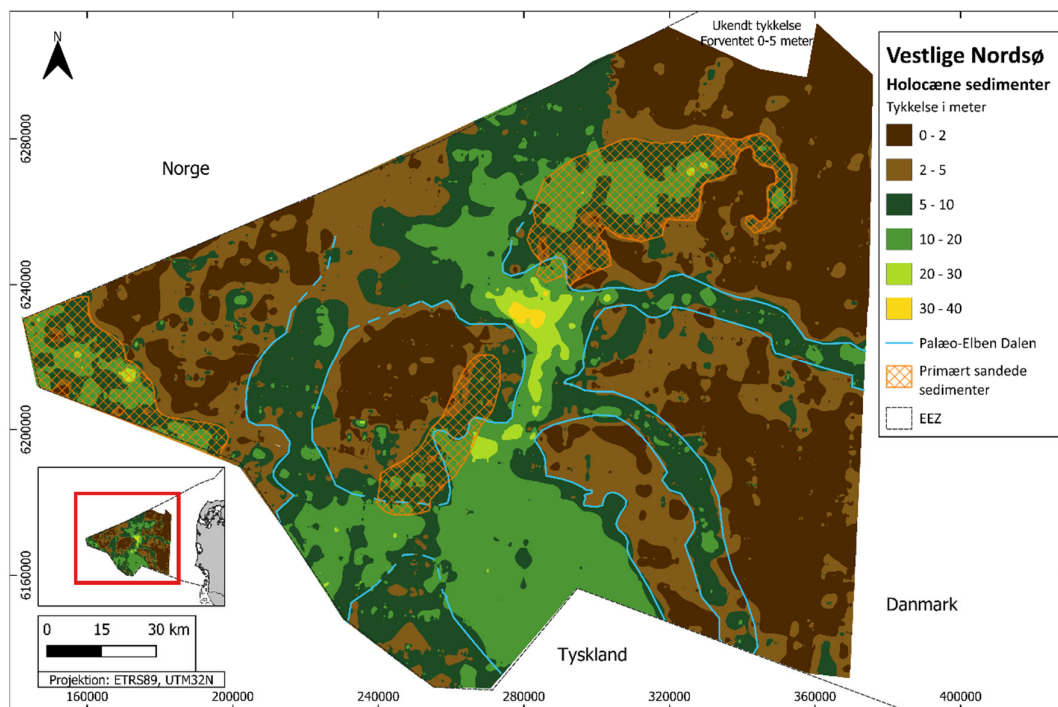
Kortet i Figur 17.12 viser tykkelsen af de Holocæne sedimenter, som udgør den øverste del af lagserien under havbunden. I den østlige del af området er tykkelsen generelt 0-5 m, men området gennemskæres af flere større udfyldte kanaler med tykkelser af Holocæne aflejringer på op til 5-20 m. Kanalerne tolkes at udgøre sidegrene af Palæo-Elben. Den centrale del af området præges af selve Palæo-Elben Dalen, som sammen med ovennævnte sidegrene er indtegnet med tynde blå streger på kortet. Som tidligere nævnt fremgår Elbens druknede dal stadig af dybdekortet over Nordsøen (Figur 7.8), men dalen er også delvist udfyldt af Holocæne aflejringer med tykkelser på 5-20 m og lokalt, i midten af området, op til 20-40 m.

Længst mod nordøst har der ingen data været til rådighed og i et mindre område var det ikke muligt at kortlægge tykkelsen af de Holocæne aflejringer, hvorfor der kun er angivet en forventet minimumstykkelse.

I den vestlige og nordvestlige del af området er tykkelsen af de Holocæne sedimenter generelt også omkring 0-5 m, men her optræder også en formodet sidegren af Palæo-Elben med tykkelser på 5-10 m og lokalt op til 20 m.

Længst mod vest stiger tykkelsen af de Holocæne aflejringer til 5-20 m og lokalt op til 30 m i et lokalt bassin. Den østlige afgrænsning af bassinet løber parallelt med dybe forkastninger i Central Graven og bassinet kan være delvist forkastningsbetinget. Aflejringerne tolkes her som Tidlig Holocæne sandede kystudbygninger fra Dogger Banke, aflejret på et tidspunkt hvor havniveauet var lavt. De er vist på kortet med orange krydsskravering. Mod nord er et andet område vist med orange krydsskravering for at angive sandende aflejringer. Her er der formodentlig tale om relikte sandbanker skabt på et tidspunkt, hvor området var præget af et overfladelag af dynamisk sand. De tynde blå streger markerer som tidligere nævnt afgrænsningen af Palæo-Elben Dalen og formodede sidegrene til Palæo-Elben. På flankerne af dalen optræder der centralt i området også sandede enheder som kan være relikte sandbanker og disse er ligeledes angivet med orange krydsskravering.

De Holocæne aflejringer består overvejende af finkornet ler og silt, men kan som nævnt ovenfor også bestå af mere sandede og grovkornede aflejringer i større områder.



Figur 17.12 Kort over tykkelsen af Holocæne sedimenter. Orange krydsskravering angiver sandende aflejringer og de tynde blå streger markerer afgrænsningen af Palæo-Elben Dalen og tilhørende sidegrene.

17.6 Samlet tykkelse og andre vigtige geologiske forhold

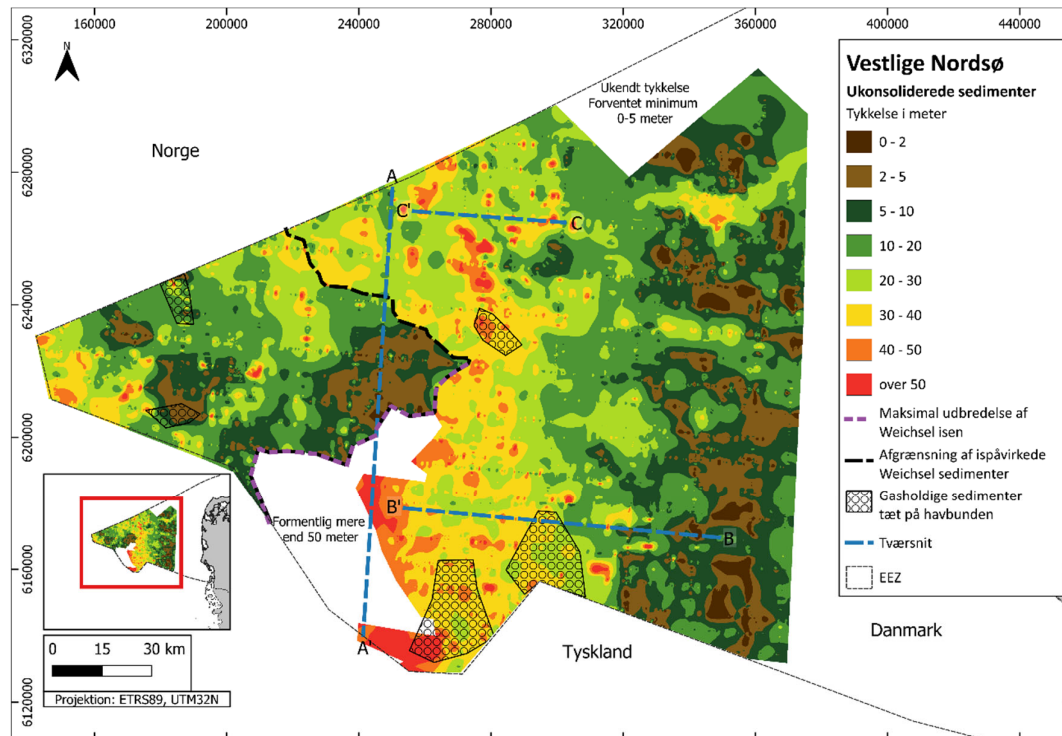
I Figur 17.13 herunder er vist den samlede tykkelse af potentielt bløde og ukonsoliderede sedimenter, som ikke har været overskredet af Kvartærtidens isskjolde. Kortet repræsenterer således den samlede tykkelse af de senglaciale og Holocæne lag, samt i en stor del af den danske Nordsø også ikke-isoverskredne aflejringer fra Weichsel, fra havbunden og ned til toppen af de isoverskredne (ældre) glaciale aflejringer.

Der skelnes på kortet ikke mellem områder med finkornede sedimenter og områder med mere sandede sedimenter, ligesom kortet er behæftet med de samme usikkerheder i datatynde områder som de respektive tykkelseskort, det er baseret på (ikke-isoverskredne Weichsel issøaflejringer, senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne sedimenter samt Holocæne aflejringer, se Figur 17.8, Figur 17.10 og Figur 17.12). Områder med gasholdige sedimenter i de senglaciale og øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer er markeret på kortet med boblesignatur. I disse områder har det ikke været muligt at tolke de seismiske data eller tolkningen er mere usikker. En lilla stiplede streg viser den maksimale udbredelse af Weichsel isen mod sydøst og en sort stiplede streg viser den maksimale udbredelse mod nordøst af isbelastede sedimenter fra Weichsel. Placeringen af de geologiske profiler i Figur 17.4, Figur 17.5 og Figur 17.6 er vist på kortet.

Længst mod vest og i den centrale del af området varierer den samlede tykkelse af bløde sedimenter generelt fra 20 til 50 m og lokalt er tykkelsen over 50 m. Området mod vest udgør til dels et lokalt bassin som kan være delvist forkastningsbetinget og i den centrale del udgør sedimenterne blandt andet udfyldning af Palæo-Elben Dalen. Mellem den vestligste del af området og Palæo-Elben Dalen og i den østlige del af området er tykkelsen af de bløde sedimenter generelt mindre og varierer mellem 2 og 10 m i større områder og ellers mellem 10 og 30 m, og lokalt op til 30-40 m i flere større vest-øst gående strøg.

I den sydvestligste del af det kortlagte område ligger overfladen af konsoliderede sedimenter som har været isoverskredet dybt og har ikke kunne tolkes ud fra de tilgængelige data. Baseret på de enheder som har kunnet tolkes, forventes den samlede tykkelse af de ukonsoliderede sedimenter i dette område dog at være minimum 50 m, svarende til tykkelsen af de Holocæne aflejringer og Weichsel issøsedimenter, hvortil kommer en forventet relativt stor, men ukendt, tykkelse af øvrige ældre ikke-isoverskredne aflejringer i området.

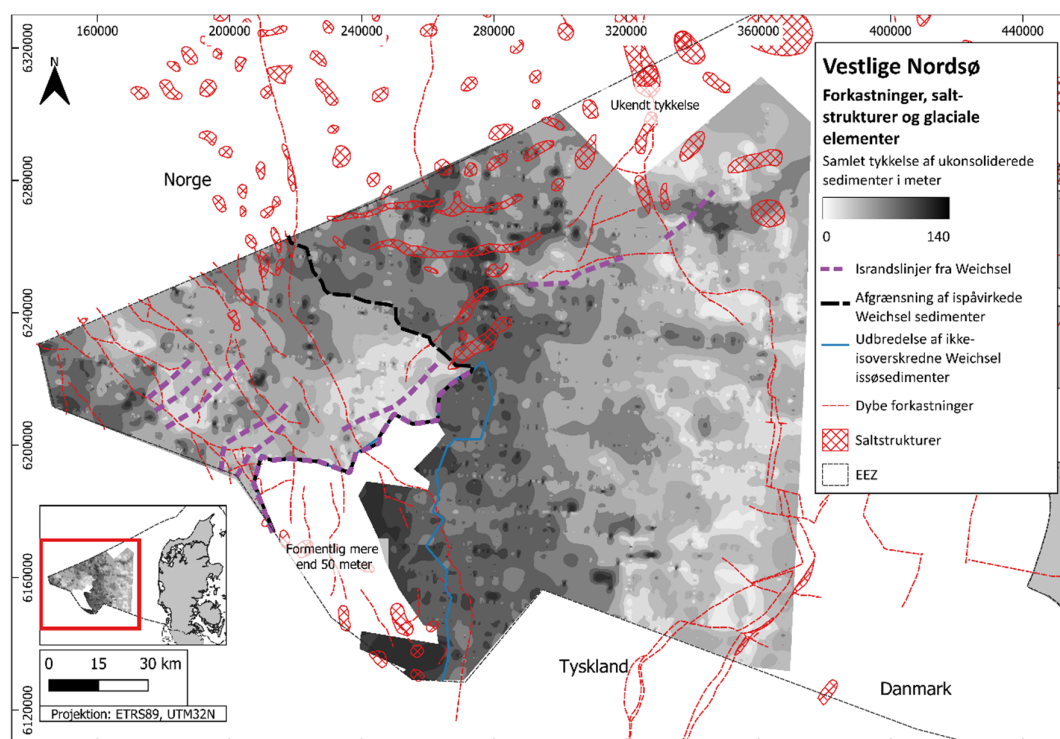
I den nordøstligste del af det kortlagte område har der kun været meget højoypløselige data med relativt ringe seismisk nedtrængning til rådighed og i et mindre område slet ingen data. Her har det således kun været muligt at angive en forventet minimumstykkelser af de ukonsoliderede sedimenter baseret på tykkelsen af Holocæne aflejringer, hvor de har kunnet kortlægges.



Figur 17.13 Kort over den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter i området. På kortet er beliggenheden af de tre geologiske profiler i Figur 17.4, Figur 17.5 og Figur 17.6 angivet.

I Figur 17.14 herunder er beliggenheden af kendte forkastninger i den dybe undergrund vist med røde, stiplede streger (Nielsen, 2003). Saltstrukturer i undergrunden er vist med rød krydsskravering. En række Weichsel israndslinjer er indtegnet på kortet med lilla stiplede streg mod nord og nordvest. De er dels baseret på Phillips et al. (2018 og 2022) og Kirkham et al. (2024) og dels på glacialtektoniske deformationer af lagserien tolket i de seismiske data i dette projekt og viser den maksimale udbredelse fra nord og vest af Weichsel-isen. Desuden viser kortet udbredelsen af sedimenter mod vest som er deformeret af Weichsel isen (sort stiplede streg) og udbredelsen af Weichsel issøsedimenter som ikke er ispåvirkede (blå streg).

Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

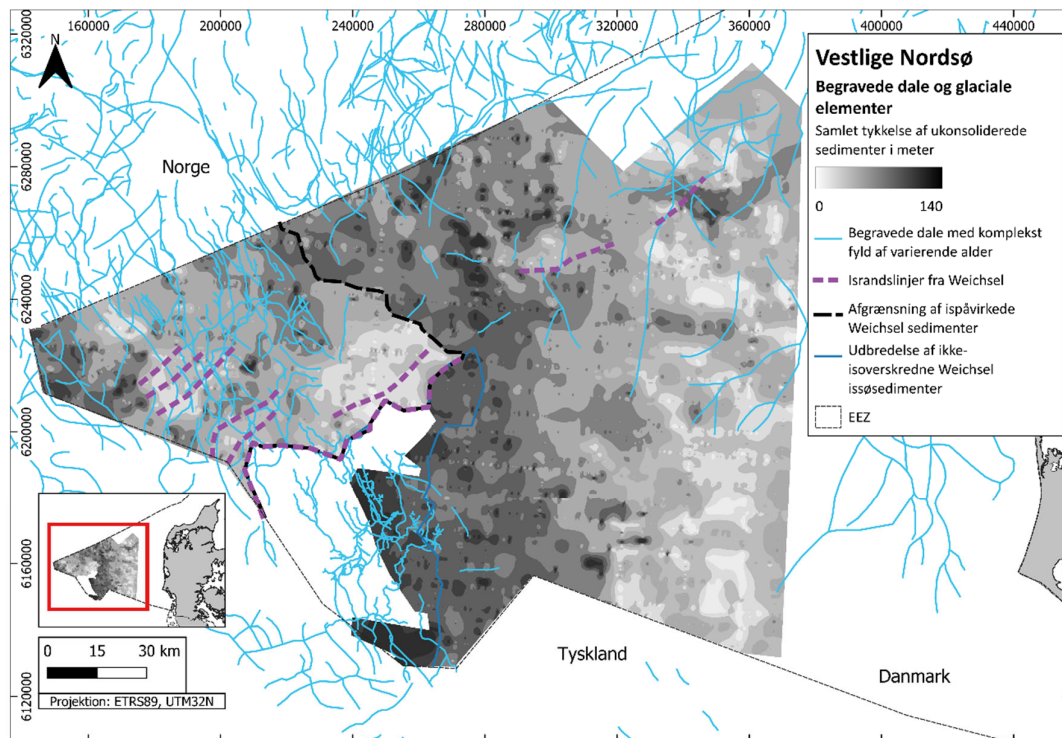


Figur 17.14 Kortet viser kendte forkastninger i den dybe undergrund (Nielsen, 2003), saltstrukturer i den dybe undergrund og israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Phillips et al., 2018, 2022; Kirkham et al., 2024). Desuden viser kortet udbredelsen af sedimenter mod vest som er deformerede af Weichsel isen og udbredelsen af Weichsel issøsedimenter som ikke er ispåvirkede. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

Kortet i Figur 17.15 viser, med blå streger, begravede dale i området kendt fra litteraturen (Kirkham et al., 2024; Prins & Andresen, 2019; van der Vegt et al., 2012; Ottesen et al., 2020). Især i den vestlige del af området er der tolket mange begravede dale, men også mod nord ses en del, og dalenes beliggenhed afspejler i en vis udstrækning udbredelsen af is-skjoldet i Weichsel. Det generelle fravær af tolkede begravede dale i den sydøstlige del af området skyldes formentlig blandt andet, at der ikke tidligere er foretaget en tolkning af dale her. Det kan skyldes, at der ikke har været tilstrækkeligt med data til rådighed i form af linjetæthed og nedtrængning i lagserien af de seismiske signaler. I den aktuelle undersøgelse har der heller ikke været tilstrækkeligt med data til, at det har været muligt at kortlægge begravede dale og deres forløb.

Herudover viser kortet ligesom kortet i Figur 17.14 israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Phillips et al., 2018, 2022; Kirkham et al., 2024), udbredelsen af sedimenter mod vest som er deformerede af Weichsel isen og udbredelsen af Weichsel issøsedimenter som ikke er ispåvirkede.

Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.



Figur 17.15 Kortet viser tolkede begravede dale i området kendt fra litteraturen (Kirkham et al., 2024; Prins & Andresen, 2019; van der Vegt et al., 2012; Ottesen et al., 2020). Desuden viser kortet israndslinjer i området kendt fra litteraturen eller tolket i nærværende projekt (Phillips et al., 2018, 2022; Kirkham et al., 2024), udbredelsen af sedimenter mod vest som er deformeret af Weichsel isen og udbredelsen af Weichsel issedimenter som ikke er ispåvirkede. Den samlede tykkelse af potentielt bløde sedimenter er vist på kortet i gråskala.

18. Vurdering af tykkelsen af bløde sedimenter

Baseret på de udarbejdede kort over tykkelsen af ukonsoliderede sedimenter (se kapitel 8-17) som ikke har været overskredet af isen, er der foretaget en inddeling af det danske havområde i forhold til, i hvilket omfang bløde sedimenter forventes at udgøre en udfordring i forbindelse med fundering af havvindmøller, se Figur 18.7 og Figur 18.8.

Inddelingen er foretaget ud fra en overordnet antagelse om, at tykkelser af bløde sedimenter mellem 0-20 m ikke vil give anledning til større funderingsmæssige udfordringer, at tykkelser af bløde sedimenter mellem 20-40 m potentielt kan give anledning til funderingsmæssige udfordringer og at tykkelser af bløde sedimenter over 40 m forventes at give anledning til funderingsmæssige udfordringer. I praksis, og måske især på sigt, kan det vise sig, at geotekniske eksperter og udviklere af havvind kan have en anden vurdering, ligesom det konkrete valg af funderingstype kan være afgørende for betydningen af tykkelsen af bløde sedimenter.

De ukonsoliderede sedimenter omfatter både sandede aflejringer, som typisk ikke udgør en udfordring og bløde aflejringer af ler, mudder og dynd, som ved store tykkelser antages at kunne give funderingsmæssige udfordringer på grund af lave geotekniske styrkeparametre. Der er således tale om en storskala og meget overordnet kortlægning af tykkelsen af ukonsoliderede sedimenter, og det har generelt ikke været muligt at foretage en detaljeret differentiering af fordelingen af henholdsvis sand og ler/mudder/dynd.

Kortene med tykkelsen af ukonsoliderede sedimenter (Figur 18.5 og Figur 18.6), som ikke har været overskredet af isen, repræsenterer den samlede tykkelse af senglaciale (Figur 18.1 og Figur 18.2) og Holocæne (Figur 18.3 og Figur 18.4), potentielt bløde aflejringer i det danske havområde. I de forudgående kapitler med beskrivelser af de enkelte delområder indgår separate tykkelseskort for disse enheder og mere detaljerede beskrivelser af resultaterne af den geologiske kortlægning.

I den konkrete inddeling af det danske havområde i kategorier kan der være større eller mindre dele af et område, hvor tykkelsen af ukonsoliderede sedimenter er større eller mindre end det angivne interval for kategorien ud fra en antagelse om, at mindre områder som udskiller sig fra det generelle billede, ikke nødvendigvis behøver at udgøre en udfordring. Der kan også være områder med større tykkelser af ukonsoliderede sedimenter end det angivne interval for kategorien, men hvor det på baggrund af den samlede kortlægning er vurderet, at en større del af tykkelsen udgør sandede aflejringer som ikke forventes at give anledning til funderingsmæssige udfordringer.

På baggrund af ovenstående og de samlede resultater af kortlægningen er der foretaget nedenstående inddeling og beskrivelse af kategorier:

Sandsynligvis ikke større tykkelser af bløde sedimenter

Denne kategori omfatter områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer, som ikke har været overskredet af isen, typisk er mellem 0 og 20 m, men kan være større i mindre områder. De ukonsoliderede aflejringer kan både være sandede sedimenter, som typisk ikke

udgør en udfordring, og bløde aflejringer af ler, mudder og dynd som ved store tykkelser kan give funderingsmæssige udfordringer. De bløde sedimenter optræder i denne kategori typisk i tykkelser, hvor de ikke forventes at give anledning til væsentlige udfordringer. I mindre områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer er større, kan der være behov for at vurdere, om der primært er tale om sandede sedimenter eller bløde, lerede og dyndede sedimenter.

Potentielt større tykkelser af bløde sedimenter

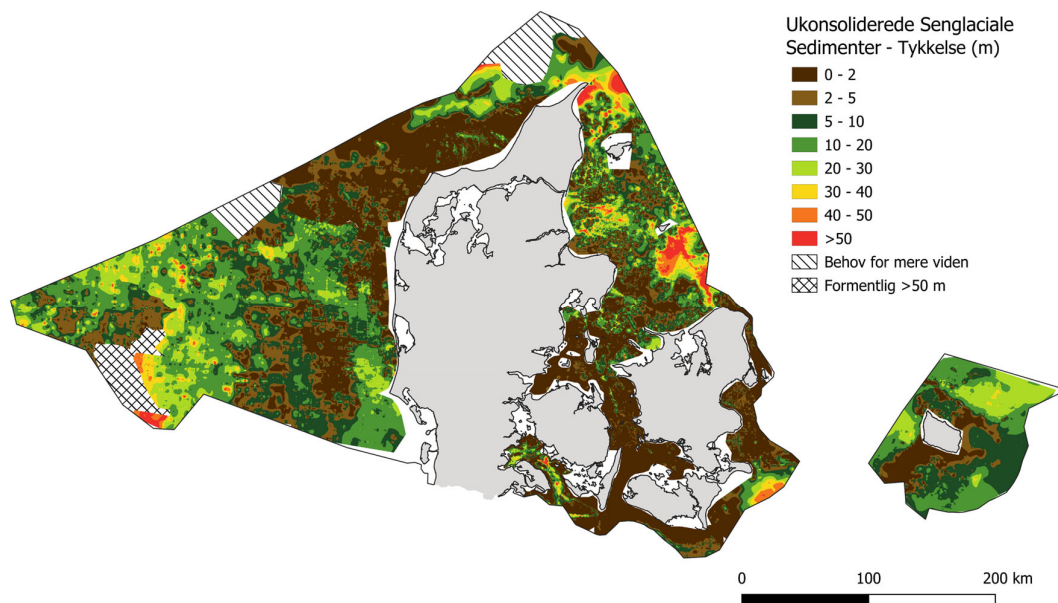
Kategorien omfatter områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer, som ikke har været overskredet af isen, typisk er mellem 20 og 40 m, men lokalt kan være både større og mindre. De ukonsoliderede aflejringer kan både være sandede sedimenter, som typisk ikke udgør en udfordring, og bløde aflejringer af ler, mudder og dynd som ved store tykkelser kan give funderingsmæssige udfordringer. De bløde sedimenter forventes i denne kategori at optræde i tykkelser, hvor de kan give anledning til funderingsmæssige udfordringer, men i forhold til konkrete områder kan der være behov for at vurdere, om der primært er tale om sandede sedimenter eller bløde lerede og dyndede sedimenter.

Forventeligt større tykkelser af bløde sedimenter

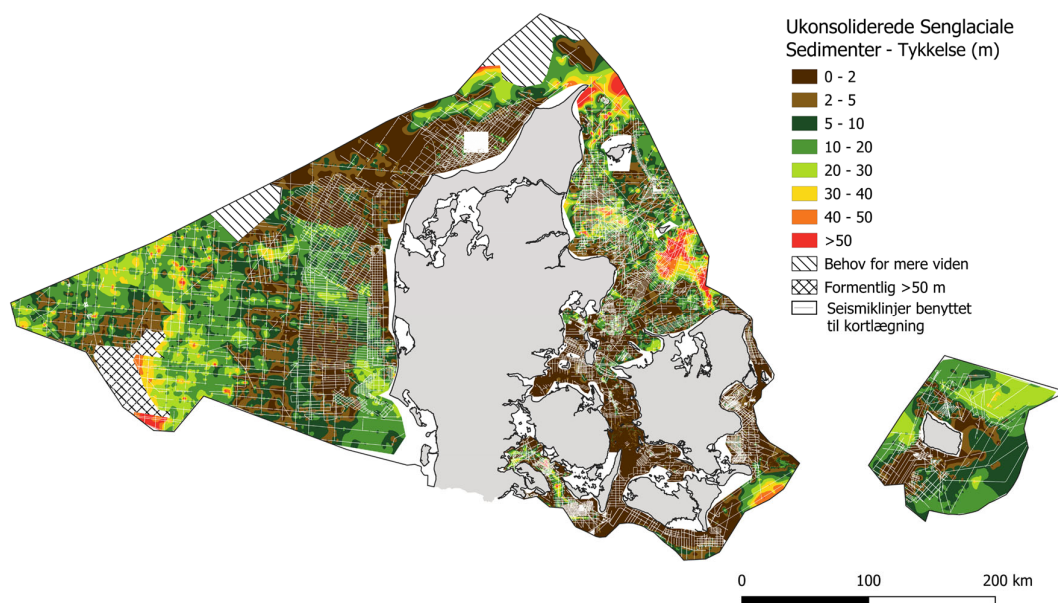
Kategorien omfatter områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer, som ikke har været overskredet af isen, typisk er over 40 m, men lokalt kan være både større og mindre. De ukonsoliderede aflejringer forventes hovedsageligt at bestå af bløde sedimenter som blødt ler, mudder og dynd, som ved store tykkelser kan give funderingsmæssige udfordringer, men kan også indeholde sandede sedimenter, som typisk ikke udgør en udfordring. Fordelingen mellem bløde lerede og dyndede sedimenter og mere sandede sedimenter vil have betydning for, i hvilket omfang de store tykkelser giver anledning til funderingsmæssige problemer.

Behov for mere viden

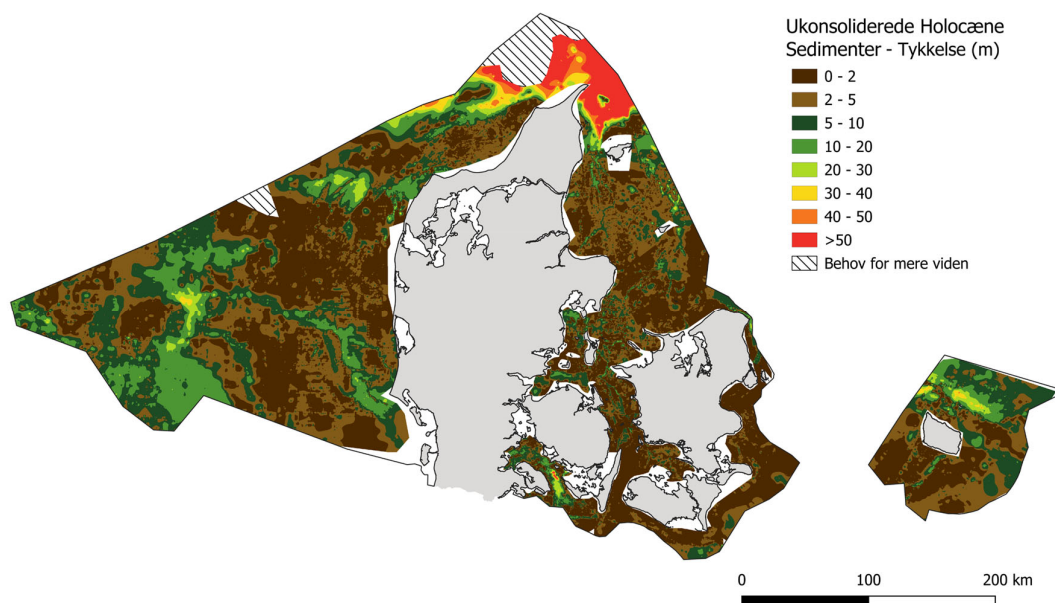
Kategorien omfatter områder uden data eller hvor datagrundlaget ikke er tilstrækkeligt til en kategorisering i forhold til mulige udfordringer med bløde sedimenter.



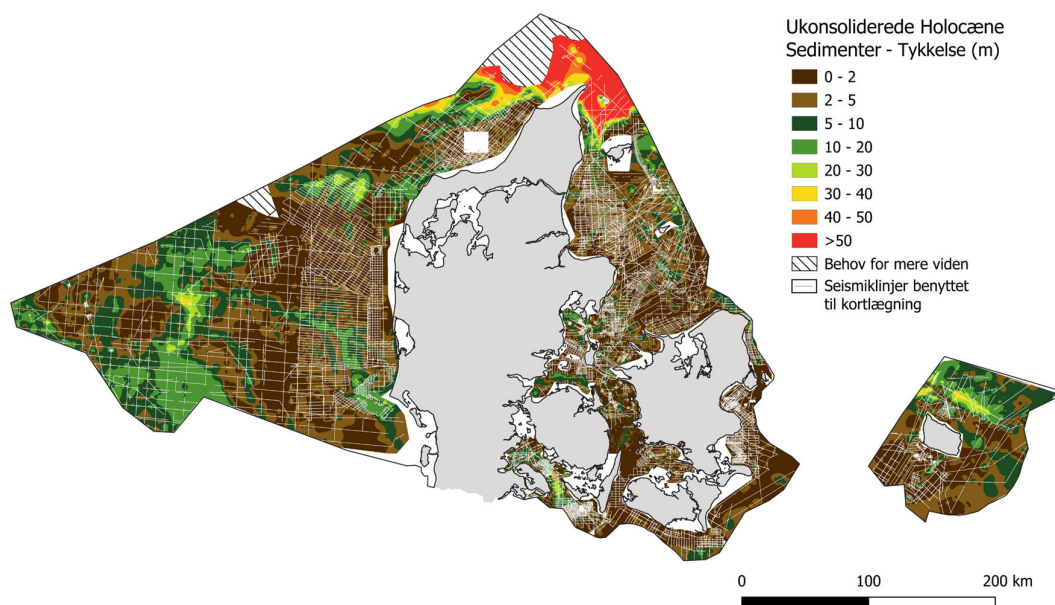
Figur 18.1 Kort over tykkelsen af ukonsoliderede senglaciale sedimenter.



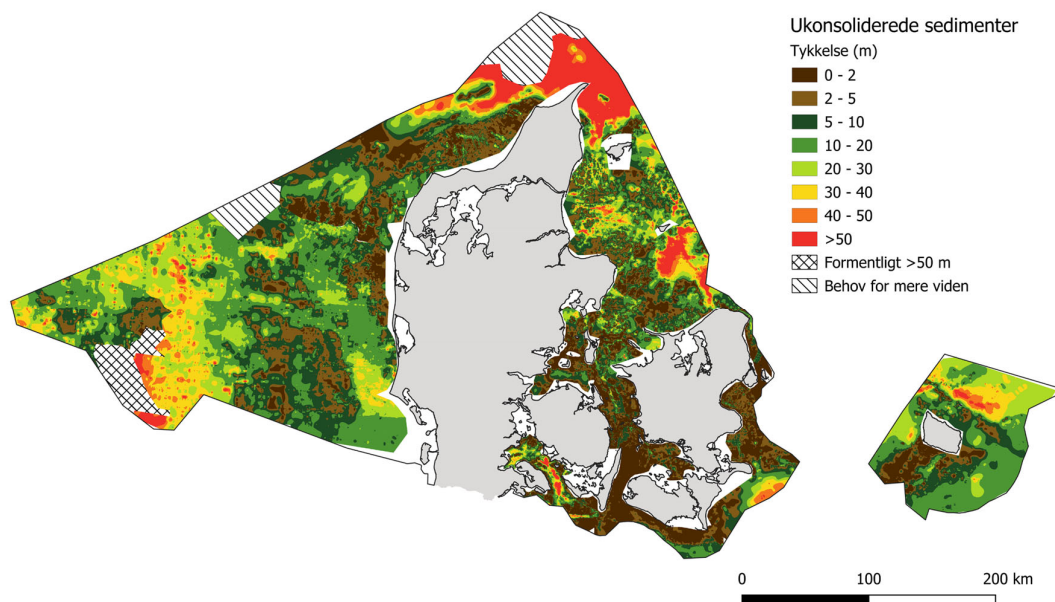
Figur 18.2 Kort over tykkelsen af ukonsoliderede senglaciale sedimenter samt datagrundlag i form af tolkede seismiske linjer. Kortet giver således en oversigt over datatætheden og viser dermed, hvor usikkerheden er størst.



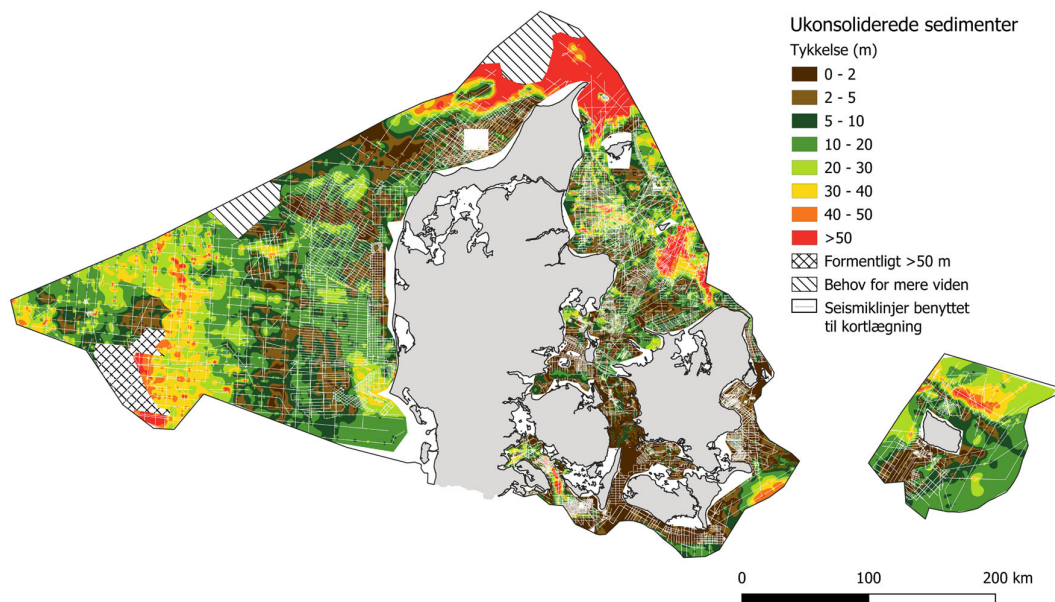
Figur 18.3 Kort over tykkelsen af ukonsoliderede Holocæne sedimenter.



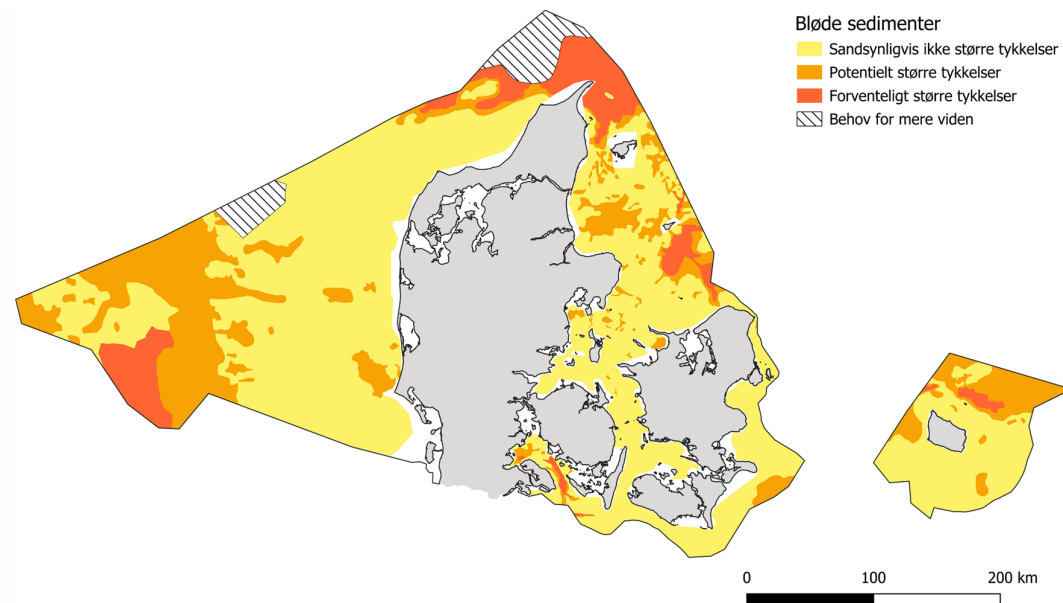
Figur 18.4 Kort over tykkelsen af ukonsoliderede Holocæne sedimenter samt datagrundlag i form af tolkede seismiske linjer. Kortet giver således en oversigt over datatætheden og viser dermed, hvor usikkerheden er størst.



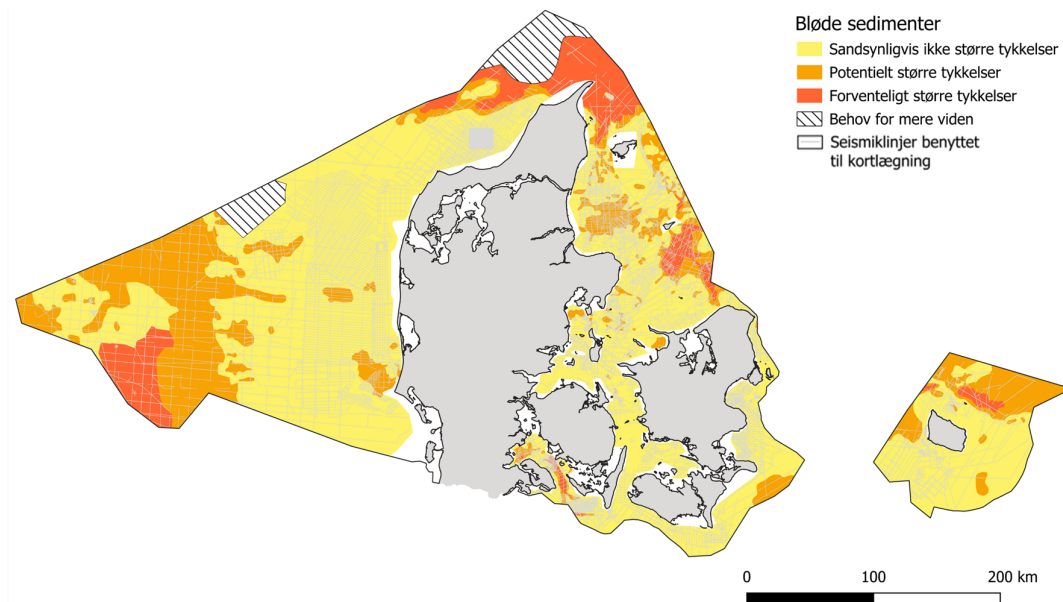
Figur 18.5 Kort over den samlede tykkelse af senglaciale og Holocæne ukonsoliderede sedimenter.



Figur 18.6 Kort over den samlede tykkelse af senglaciale og Holocæne ukonsoliderede sedimenter samt datagrundlag i form af tolkede seismiske linjer. Kortet giver således en oversigt over datatætheden og viser dermed, hvor usikkerheden er størst.



Figur 18.7 Inndeling af det danske havområde i kategorier i forhold til den forventede tykkelse af bløde sedimenter.



Figur 18.8 Inndeling af det danske havområde i kategorier i forhold til den forventede tykkelse af bløde sedimenter samt datagrundlag i form af tolkede seismiske linjer. Kortet giver således en oversigt over data-tætheden og viser dermed, hvor usikkerheden er størst.

19. Marinarkæologiske interesser

Den geologiske udvikling og detaljerede forståelse af geologien i et område er udover betydningen for lagenes egenskaber i forhold til fundering af havvindmøller også vigtig i forhold til en arkæologisk screening af området, hvor fordelingen mellem land og hav efter sidste istids maksimum, som følge af lokale/regionale ændringer i relativt havniveau, kan indikere, hvor der kan være mulighed for at finde forhistoriske bopladser.

På baggrund af den geologiske kortlægning der er gennemført i projektet præsenteres i denne rapport en række kort, der illustrerer fordelingen af land, hav, søer og is for udvalgte tidspunkter i tiden efter sidste istid samt en overordnet vurdering af muligheden for marinarkæologiske interesser i henholdsvis Nordsøen og indre danske farvande.

19.1 Havniveauændringer og fordelingen af land / hav

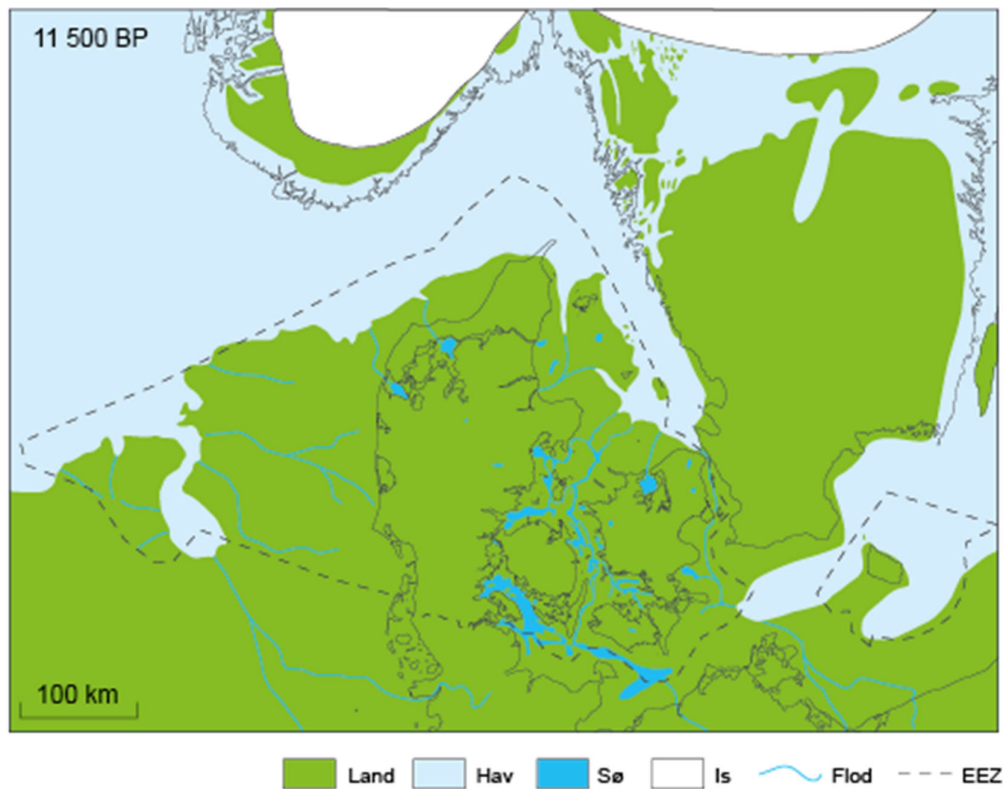
I det følgende illustreres og beskrives den geografiske udvikling af det danske område ud fra tre kort, der illustrerer fordelingen af land, hav, søer og is for 11.500, 10.000 og 8000 år siden (Figur 19.1, Figur 19.2, Figur 19.3).

Kortene er baseret på den geologiske kortlægning af de senglaciale og Holocæne aflejringer foretaget i projektet, sammenholdt med en række dateringer af sedimenter som giver oplysninger om kystlinjens beliggenhed til bestemte tidspunkter. Samtidig er dateringerne anvendt til at fremstille en række repræsentative strandforskydningskurver for udvalgte områder (Figur 19.4 til Figur 19.10), som viser variationerne i det relative havniveau eller søniveau i Holocæn.

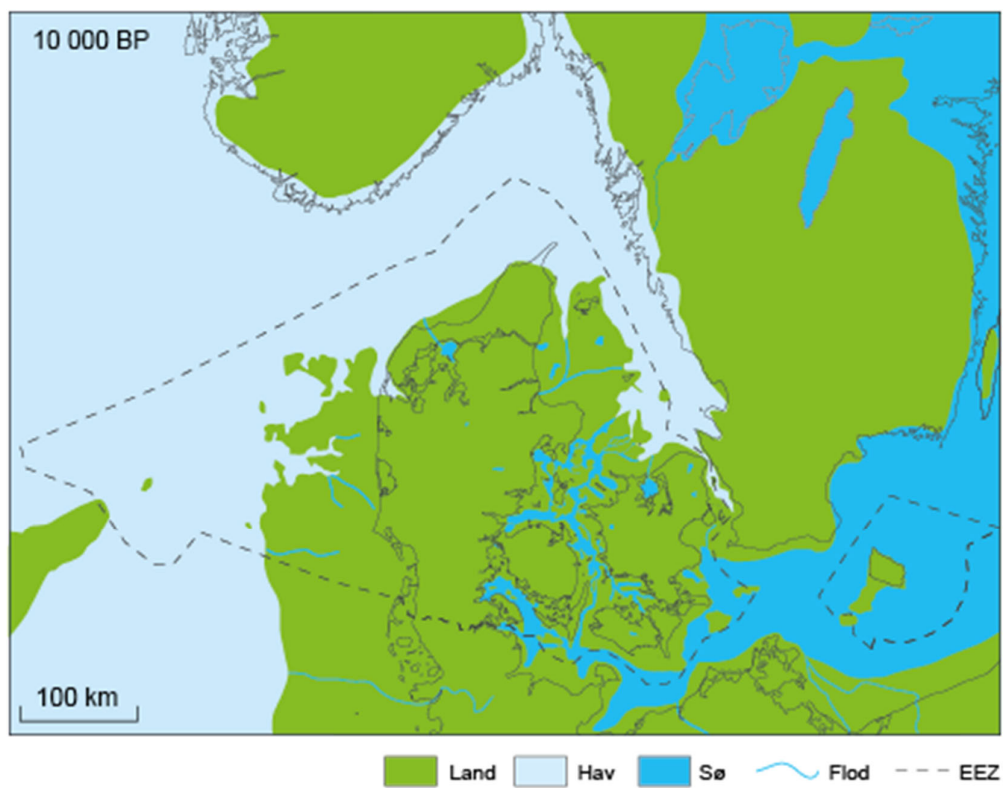
19.1.1 Palæogeografiske kort

I Figur 19.1 er vist fordelingen af land, hav, søer og is for 11.500 år siden. Det globale havniveau var lavt på dette tidspunkt og store dele af den danske del af Nordsøen var land. Havet var trængt ind over de nordlige dele af Danmark, som var presset ned efter isens vægt, men de lavvandede dele af det nuværende Kattegat var også land. Østersøen var efter stadiet med den Baltiske Issø kortvarigt et brakvandshav, der var forbundet med Kattegat via smalle stræder i Sverige. Bornholm var en halvø og i de centrale dele af de nuværende indre danske farvande var der store søer.

I Figur 19.2 er vist fordelingen af land, hav og søer for 10.000 år siden. Det relative havniveau i den nordlige del af Danmark var tæt på nutidens, mens det stadig var lavere end i dag i den sydlige del af Danmark. De lavvandede dele af Kattegat var stadig land, men i Nordsøen var det kun de sydøstlige dele, der var land. Østersøens forbindelse til Kattegat var afskåret og Bornholm var en ø i Ancylus Søen, mens de centrale indre danske farvande i endnu højere grad end tidligere var præget af store søer.

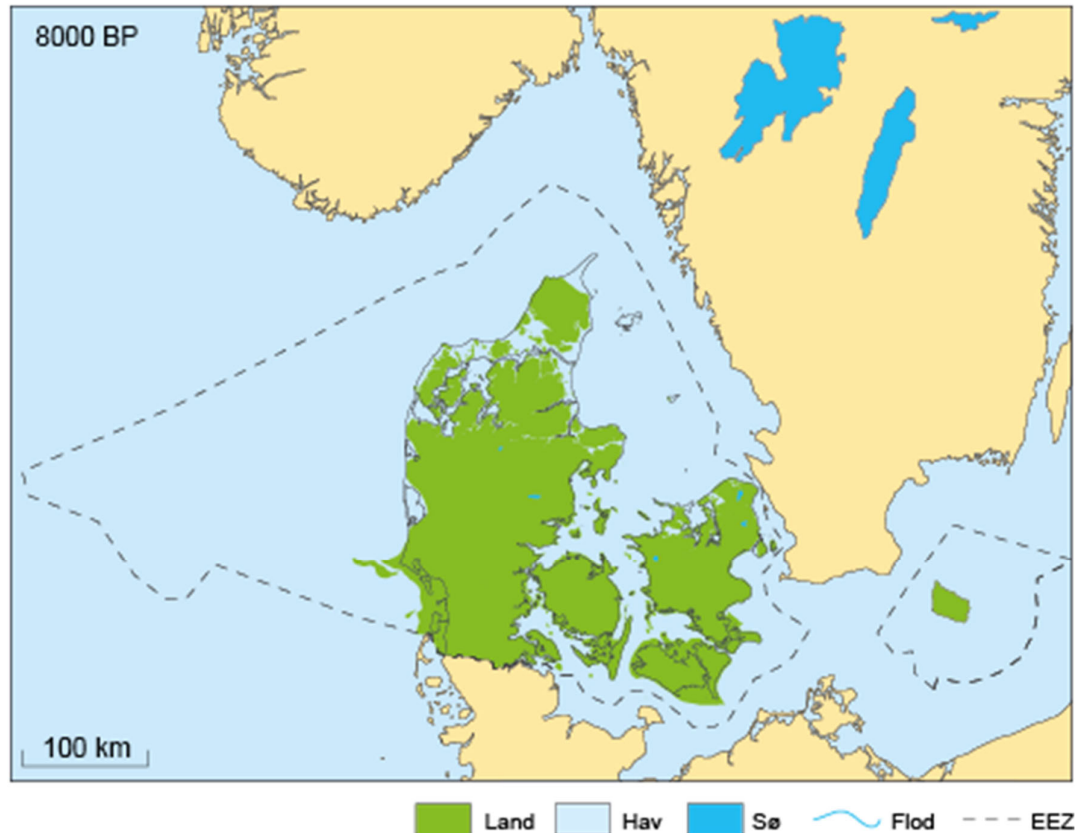


Figur 19.1 Fordelingen af land, hav, søer og is for 11.500 år siden.



Figur 19.2 Fordelingen af land, hav og søer for 10.000 år siden.

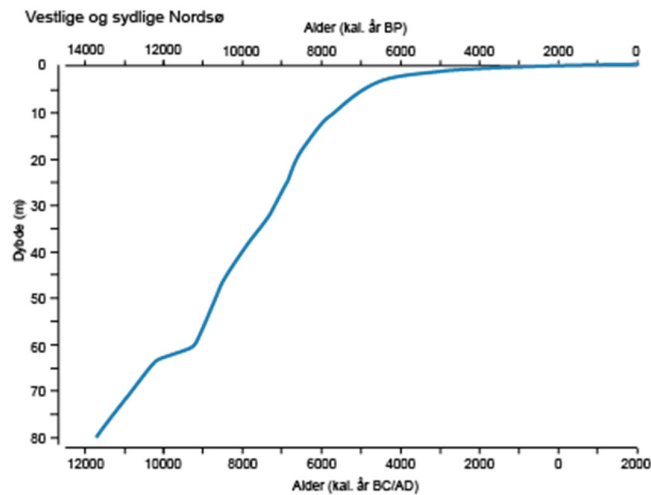
I Figur 19.3 er vist fordelingen af land, hav og søer for 8.000 år siden (kun for det danske område). I den nordlige del af Danmark var det relative havniveau betydeligt højere end i dag og Vendsyssel og Hanherred var et ø-rige. I den sydlige del af Danmark var det relative havniveau stadig lavere end i dag, men fordelingen af land og hav nærmede sig nutidens. I den sydlige del af Danmark og i Østersøen var der svagt brakke forhold på dette tidspunkt.



Figur 19.3 Fordelingen af land, hav og søer for 8000 år siden (kun for det danske område).

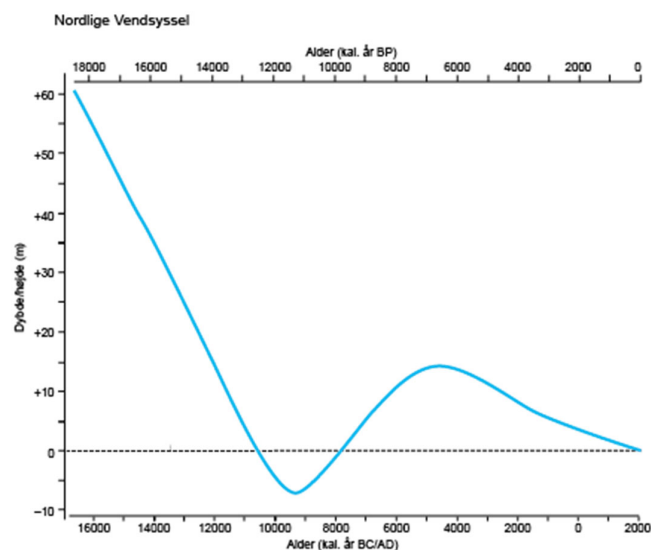
19.1.2 Strandforskydningskurver

I Figur 19.4 er vist en strandforskydningskurve for den vestlige og sydlige del af den danske del af Nordsøen. Kurven svarer til udviklingen i det globale havniveau (Lambeck et al., 2014; Hijma et al., 2025). I løbet af 4000 år, fra 11.700 til 7.700 år før nu steg havniveauet omkring 50 m og det meste af Nordsøen blev overskyllet af havet.



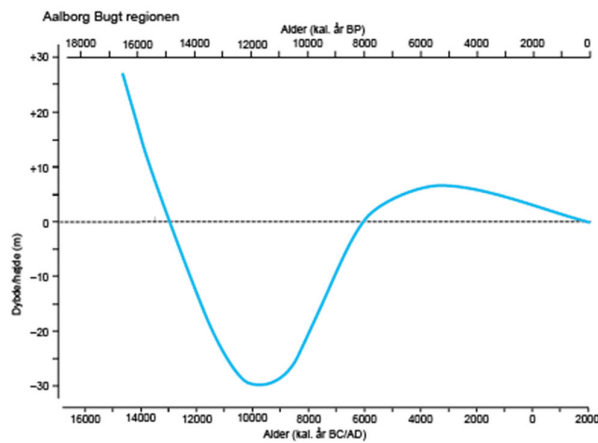
Figur 19.4 Strandforskydningskurve for den vestlige og sydlige del af den danske del af Nordsøen.

I Figur 19.5 er vist en strandforskydningskurve for den nordlige del af Vendsyssel, Jammerbugt og Skagerrak. Dette område er præget af en kraftig isostatisk landhævning efter sidste deglaciation.



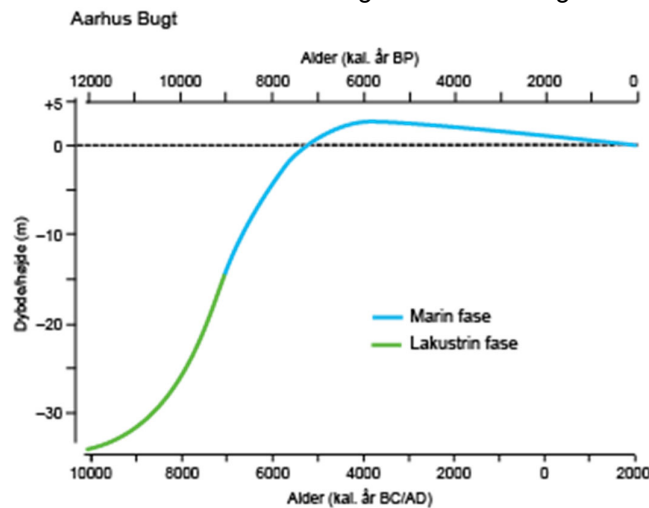
Figur 19.5 Strandforskydningskurve for den nordlige del af Vendsyssel, Jammerbugt og Skagerrak.

I Figur 19.6 er vist en strandforskydningskurve for Aalborg Bugt området. Da Fastlandstiden kulminerede for omkring 11.500 år siden, var det relative havniveau omkring 30 m lavere end i dag.



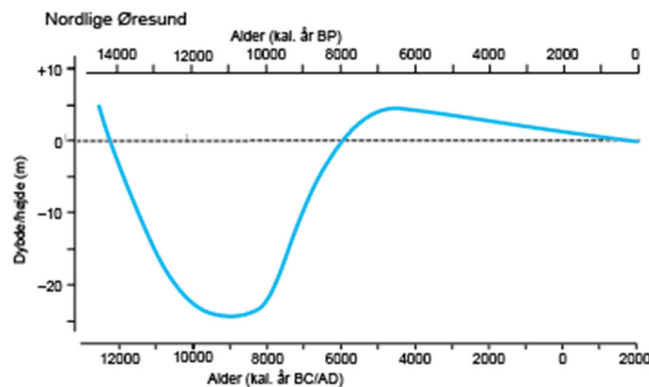
Figur 19.6 Strandforyskydningskurve for Aalborg Bugt området.

I Figur 19.7 er vist en strandforyskydningskurve for Aarhus Bugt området. I Tidlig Holocæn fandtes en stor sø i området og først for omkring 9.000 år siden trængte havet ind i området.



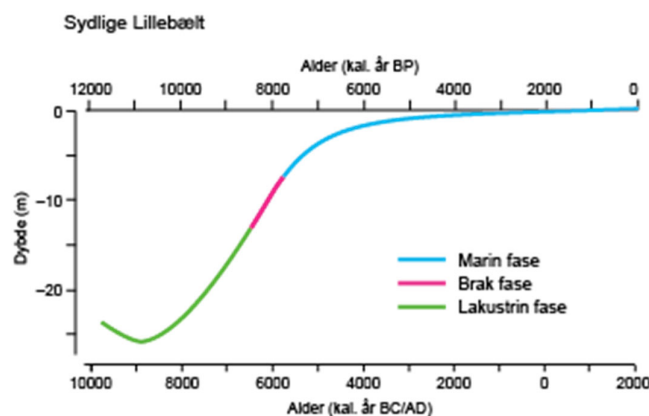
Figur 19.7 Strandforyskydningskurve for Aarhus Bugt området. Modificeret efter Bennike et al. (2021b).

I Figur 19.8 er vist en strandforyskydningskurve for den nordlige del af Øresundsregionen. Da Fastlandstiden kulminerede for omkring 11.500 år siden, var det relative havniveau omkring 25 m lavere end i dag og Øresund var derfor tørt land.



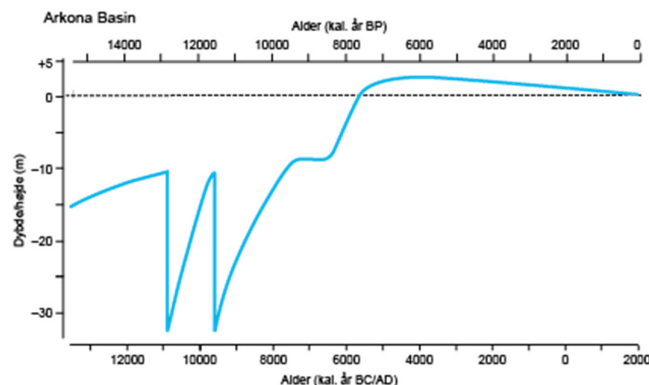
Figur 19.8 Strandforyskydningskurve for den nordlige del af Øresund. Modificeret efter Bennike et al. (2012).

I Figur 19.9 er vist en strandforskydningskurve for den sydlige del af Lillebælt. I området fandtes en stor sø med stigende vandstand indtil for omkring 8.500 år siden. Efter en fase med brakvand indtrådte marine forhold, nogenlunde som i dag.



Figur 19.9 Strandforskydningskurve for den sydlige del af Lillebælt. Modificeret efter Bennike & Jensen (2011).

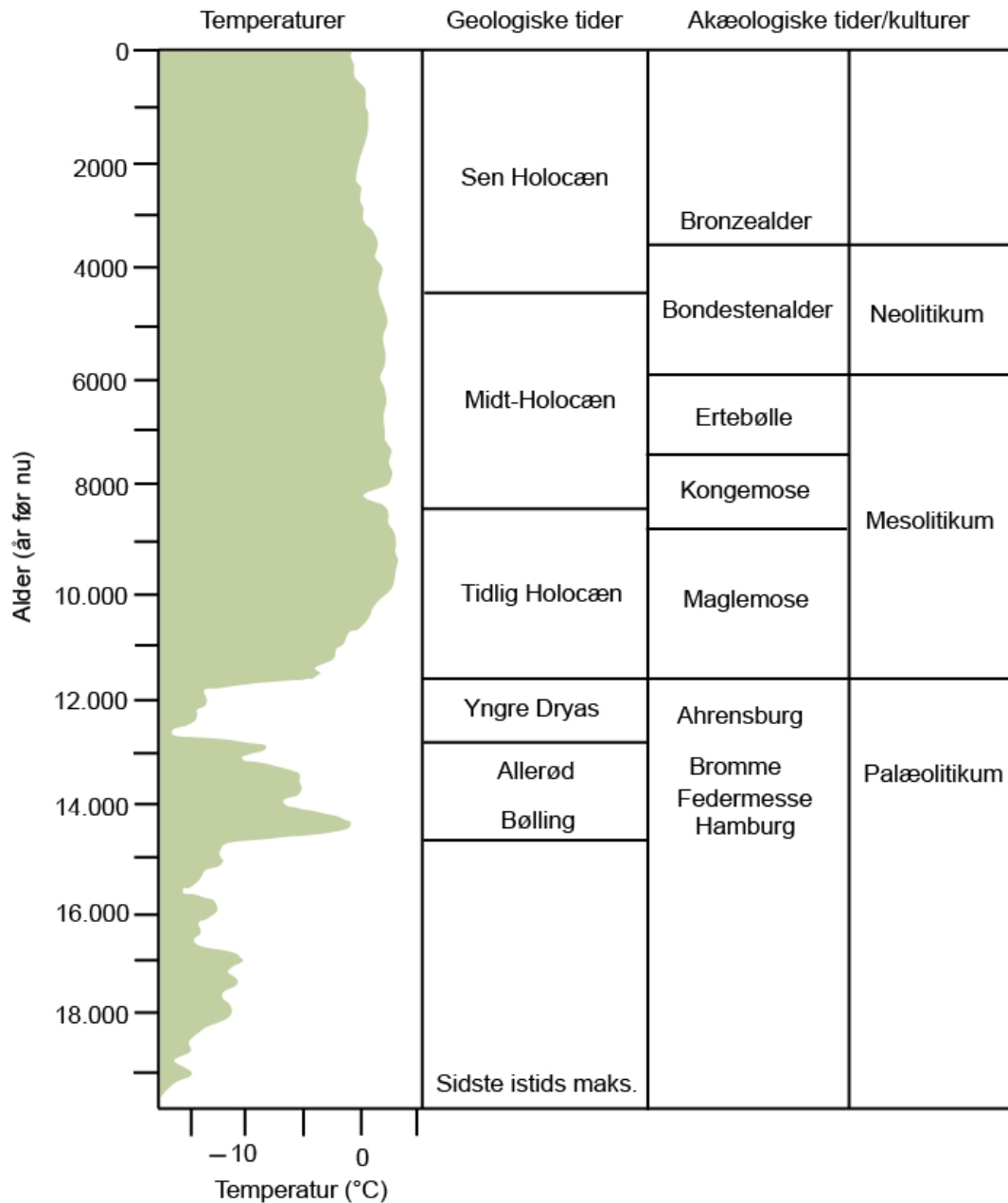
I Figur 19.10 er vist en strandforskydningskurve for den sydvestlige del af Østersøen. Delvis drænering af den Baltiske Issø for ca. 12.900 og 11.600 år siden førte til drastiske fald i vandstanden på omkring 20 m, som blev efterfulgt af hurtig stigning i vandstanden.



Figur 19.10 Strandforskydningskurve for den sydvestlige del af Østersøen. Modificeret efter Bennike & Jensen (1998).

19.2 Vurdering af arkæologiske interesser

Muligheden for arkæologiske interesser knytter sig dels til fordelingen mellem land og hav, dels til temperaturudviklingen og dels til hvornår de forskellige kulturer har været i området. I Figur 19.11 er temperaturudviklingen i Danmark (baseret på grønlandske iskerner) i Sen-Weichsel og Holocæn vist sammen med geologiske og arkæologiske tidsperioder. I det følgende beskrives mulighederne for arkæologiske interesser i henholdsvis Nordsøen og indre danske farvande.



Figur 19.11 Sen-Weichsel og Holocæn temperaturudvikling i Danmark (baseret på grønlandske iskerner) og geologiske samt arkæologiske tidsperioder.

19.2.1 Arkæologiske interesser i Nordsøen

Under sidste istids maksimum var dele af området dækket af isskjolde. Syd for isdækket fandtes en stor isdæmmet sø. Floderne Elben, Eider, Weser og Ems afvandede dele af NV-Europa, og vandet herfra samt smeltevand fra isen samlede sig i en stor sø, hvor der blev aflejret ler og silt. Da isen trak sig nordpå, blev søen dræneret, og området blev dækket af flodsletter. Havniveau var lavt og den vestlige del af Nordsøen fremstod som et stort landområde, det såkaldte Doggerland. Doggerland blev dog gennemskåret af en stor flod, idet

Elben havde udløb mod nord. Oprindeligt var området uden plantevækst, men for 14.700 år siden steg temperaturen markant (se Figur 19.11), og der begyndte at indfinde sig en sparsom plantevækst med dværgbuske, urter og mosser. I sen Allerød tid voksede der bævreasp i regionen. Lokalt var der søer med plantevækst og dyreliv. Det vigtigste landpattedyr i sen Palæolitikum var rensdyr, og de første rensdyrjægere indfandt sig i regionen.

Sidste istid sluttede for 11.700 år siden, hvor temperaturen igen steg markant. Der opstod efterhånden moser med tørvedannelse. På land var der lysåbne skove med birketræer, bævreasp og lokalt fyrretræer. Rensdyrene forsvandt og i stedet kom der kronhjort, rådyr, vildsvin, elg, bison og urokse til regionen i Tidlig Holocæn, svarende til Maglemose Kulturen. De dybere dele af Nordsø-området blev overskyldet af havet i tidligste Holocæn, idet havniveauet fortsat steg (Figur 19.4), og for omkring 8.000 år siden fik Nordsøen nogenlunde den udstrækning, som vi kender i dag.

Det er foreslået, at Doggerland har spillet en stor rolle for forhistoriske kulturer (Coles, 1998; Glørstad et al., 2017). I den hollandske del af Nordsøen er der mange arkæologiske fund (Verhart, 1995), og faunaen af landpattedyr i dette område omfattede kronhjort, rådyr, elg, bison, vildsvin, jærv, odder og bæver. De yngste daterede knoglefund er omkring 8.500 år gamle (van der Plicht & Kitems, 2022). Mere specifikt har Andresen et al. (2022) foreslået, at stenalderfolk måske har levet i området mellem Doggerland og Palæo-Elben, og de har kortlagt en række potentielle hot-spots. I dette område har Prins & Andresen (2019) kortlagt et stort dræningssystem. Indtil videre er der dog ikke fundet nogen *in situ* bopladser fra Stenalderen i den danske del af Nordsøen, men enkelte løsfund viser, at stenalderjægere har færdes i Doggerland (Heinemeier & Rud, 1997; Andersen, 2005; Fischer & Jensen, 2018).

Fund af senglaciale eller Tidlig Holocæne bopladser i Nordsøen ville udfylde et markant hul i vores viden om regionens bosættelsesmønster. I Danmark er alle bopladser fra Maglemosekulturen således knyttet til land eller til søer, og der kendes ingen kyst-bopladser. Måske har stenalderfolk i Tidlig Holocæn levet ved kysten i Nordsøen, og måske findes der bopladser med knoglerester af havpattedyr. Det ville være noget helt nyt i dansk stenalderarkæologi, hvis vi kan finde bopladser fra Tidlig Holocæn med knogler af sæler eller hvaler.

Muligheden for at finde stenalderbopladser i Nordsøen er dog formentlig ringe. Dels er store dele af Nordsøen dækket af tykke lag af Holocæne marine sandede sedimenter, der er aflejret, efter området blev havdækket. Dels er Nordsøen præget af lange frie stræk, et højt energiniveau, store bølger og kraftig brænding ved kysten. Det er også velkendt, at Nordsøen ofte rammes af storme, der genererer ekstra store bølger og oversvømmelser af lavtliggende områder. Det betyder, at eventuelle bopladser har været udsat for kraftig erosion både i kystzonen og på lavt vand under og efter den marine transgression.

Der er dog lokalt bevaret senglaciale søaflejringer og Tidlig Holocæne tørveaflejringer i den danske del af Nordsøen (Krüger et al., 2017; Bennike et al., 2023), så måske kan spor efter bopladser også være bevaret. Det gælder måske om at lokalisere områder nær sådanne sø- og moseaflejringer, hvor Holocæne og recente sandede marine sedimenter enten mangler eller er tynde.

Et andet problem hvad angår muligheden for at finde bopladser i Nordsøen er de relativt store vanddybder. Langt de fleste kendte submarine bopladser i de indre danske farvande ligger på få meters vanddybde. Nær sydspidsen af Langeland er der ved et tilfælde fundet spor efter en boplads på godt 20 meters vanddybde. Dykninger på så dybt vand er vanskelige, og når vanddybden overstiger 25 m særdeles vanskelige (Uldum et al., 2018). Da vanddybden i store dele af Nordsøen overstiger 25 m, sætter dette forhold store begrænsninger for muligheden for at lokalisere bopladser.

19.2.2 Arkæologiske interesser i indre danske farvande

Under sidste istids maksimum var de indre danske farvande dækket af det Skandinaviske Isskjold. Efter den sidste deglaciation bredte havet sig ind i de dybe dele af Kattegat, hvor der opstod et glaciomarint miljø. Også Øresund havde glaciomarine forhold med polartorsk, ringsæl og isbjørn. I Østersøen opstod den Baltiske Issø, som var dæmmet op af isranden mod nord. Plantevæksten på land var præget af dværgbuskheder med polarpil, rypelyng, dværgbirk og forskellige urter, og dyrelivet var domineret af rensdyr. Under den varme Bølling-Allerød periode bredte åbne skove med dunbirk, og lokalt bævreasp, sig. Rensdyr holdt stand og elg og bæver indvandrede.

Under Fastlandstiden, der kulminerede for omkring 11.500 år siden, var det relative havniveau i den centrale del af Kattegat ca. 30 m lavere end i dag. De danske stræder var tørslagne og Østersøen fik forbindelsen til Kattegat over den sydlige del af Midtsverige og blev omdannet til et brakvandshav: Yoldia Havet. Snart førte landhævning i Sverige dog til, at forbindelsen til Kattegat forsvandt, og Østersøen blev igen til en ferskvandssø: Ancylus Søen. I den sydlige og centrale del af Danmark opstod store søer. Dunbirk og bævreasp bredte sig, og snart indvandrede skovfyr og senere hassel.

Havniveauet steg mere end landhævningen og derfor bredte havet sig i Kattegat. For omkring 10.300 år siden bredte havet sig ned i den nordlige del af Øresund, for ca. 9.000 år siden ned i Isefjorden og ind i Aarhus Bugt og for ca. 8.000 år siden var Storebælt og den sydvestlige del af Østersøen marint. I takt med at det relative havniveau steg, blev søerne i den sydlige del af Danmark større og større, indtil de blev omdannet til brakvand og senere havvand. På land indvandrede træerne rød-el, lind, eg, elm og ask og store pattedyr som urokse, kronhjort, rådyr og vildsvin.

Dele af de indre danske farvande kendetegnes af korte frie stræk. Det gælder for eksempel de østjyske fjorde, Lillebælt og området syd for Fyn. Det korte frie stræk betyder lavt energiniveau, små bølger og begrænset brænding ved kysten. Selv under storme er det begrænset, hvor meget havet æder af kysten på beskyttede steder. Der er dog store regionale forskelle i de indre danske farvande, og især i Østersøen kan der opstå ret store bølger.

Der er kortlagt mange submarine bopladser i de indre danske farvande, og enkelte af dem er udgravet i større eller mindre grad. Nogle af de mest kendte og bedst dokumenterede kommer fra Lillebælt, Storebælt, Horsens Fjord, Smålandsfarvandet og farvandet syd for Fyn. Mange af de kendte bopladser stammer fra Ertebølle kulturen og de er typisk fundet på få meters vanddybde, det gælder for eksempel Hjarnø, Ronæs Skov, Tybrind Vig,

Møllegabet og Tudse Hage (Skaarup & Grøn, 2004; Andersen, 2009, 2013; Astrup et al., 2021; Gregory et al., 2021). Argusgrunden nord for Lolland var i en årrække en af de ældste og dybeste submarine bopladser. Den stammer fra Kongemosekulturen, ligger 4-6 m under havniveau og blev opdaget i 1956 (Fisher et al., 2007). I Kalø Vig findes en endnu ældre boplads som er dateret til sen Maglemosekultur, ca. 8.400 år BP. Denne boplads ligger ca. 7 m under havniveau (Fischer & Hansen 2005; Astrup, 2018). En anden Maglemose boplads kendes fra Fløjstrup Skov syd for Aarhus. Den ligger 9–14,5 m under havniveau (Fischer et al., 2018). Argusgrunden og Fløjstrup Skov bopladserne er fundet i forbindelse med sand-sugning. Endelig er der nær sydspidsen af Langeland ved et tilfælde fundet spor efter en boplads på godt 20 meters vanddybde. Dykninger på så dybt vand er vanskelige (Uldum et al., 2018).

Mange bopladser ligger i erosionsområder, for eksempel hvor moræneler er eksponeret på havbunden. Her er kun flint bevaret. Mange andre bopladser ligger begravet under tykke lag af marin gytje. Her er bevaringsforholdene langt bedre, men den slags bopladser er uhyre vanskelige at finde. De kendte bopladser med gode bevaringsforhold er fundet på overgangen mellem erosion og aflejring, hvor der sker en langsom erosion af bopladslag. I øvrigt skal det bemærkes, at submarin tørv er fundet i rigtig mange boringer.

Der er uden tvivl gode muligheder for at finde nye bopladser i de indre danske farvande. De palæogeografiske kort i Figur 19.1 til Figur 19.3 giver et godt billede af, hvor kystlinjen lå til forskellige tider. De giver således et første bud på, hvor der kan være marinarkæologiske interesser, hvis det antages at bopladserne var anlagt nær kysten. I Maglemosetiden var der formentlig også bopladser ved de store søer i den sydlige og centrale del af Danmark.

20. Konklusion og perspektivering

GEUS har for Energistyrelsen gennemført en geologisk screening af det danske havområde med henblik på at etablere et bedre geologisk datagrundlag til havvindudbygning. Formålet har været at opnå større sikkerhed for, at et givent område ved fremtidige udpegninger af havvindområder, geologisk set, er egnet til havvind. Resultaterne fra projektet skal sammen med en screening af natur- og miljøparametre, også igangsat af Energistyrelsen og udført af NIRAS, DCE (Aarhus Universitet) og DTU Vind, indgå i en samlet vurdering af egnede områder til havvind i Danmark med de overordnede mål:

- At planlægge havvind smartere,
- At kortlægge egnede områder til opstilling af havvind,
- At opnå tidligt kendskab til miljø- og naturforhold, så man undgår væsentlige og uhenigtsmæssige overraskelser, der kan fordyre eller besværliggøre opstilling af havvind i udbudsområder, og at kortlægge muligheden for sameksistens mellem havvindmøller og andre arealinteresser bedst.

På den måde forventes screeningen og den geologiske kortlægning at levere et samlet overblik over Danmarks havareal og at identificere de områder, hvor der forventes færrest miljø- og interessekonflikter samt at identificere de områder, hvor der kan forventes behov for særlige undersøgelser, afværgetiltag eller projektilpasninger.

20.1 Den geologiske kortlægning

Med den overordnede geologiske kortlægning af hele det danske havareal der er foretaget i dette projekt, er der etableret en helhedsforståelse af de overfladenære geologiske forhold under havbunden. Fokus har været på at kortlægge tykkelsen af ukonsoliderede og dermed potentielt bløde sedimenter, som kan være en udfordring i forbindelse med fundering af havvindmøller. Der er således tale om resultater, som kan bruges af beslutningstagere, til at vurdere både de enkelte områders egnethed i forhold til opstilling af havvindmøller og graden af geologisk kompleksitet. Kortlægningen giver desuden grundlag for en første vurdering af det forventede omkostningsniveau i relation til fundering.

I den indledende fase af projektet blev der foretaget en analyse af tilgængelige eksisterende data til brug for kortlægningen og derefter af behovet for nye supplerende data. Som en stor og vigtig del af projektet blev der herefter planlagt og gennemført tre kortlægningskampagner af ca. en måneds varighed. Under de to første kampagner blev der indsamlet multikanal sparker seismiske data suppleret med multibeam ekkolod data, side scan sonar og sub-bottom profiler data. Under den tredje kampagne blev der udført vibrocore borer. Det indledende arbejde omfattede også en generel beskrivelse af geologiske forhold med betydning for fundering af havvind og de mulige geotekniske implikationer.

Der blev indsamlet 7.781 km nye seismiske data i projektet, 168 vibrocore borer og 2 CPT-sonderinger som sammen med tilgængelige eksisterende data indgik i den geologiske

kortlægning. I alt blev der tolket 56.388 km seismiske data i projektet. I forbindelse med tolkningen og udarbejdelsen af tykkelseskort for ukonsoliderede sedimenter blev der udarbejdet en beskrivelse af principperne for den geologiske kortlægning, der er foretaget og en overordnet beskrivelse af den regionalgeologiske udvikling i henholdsvis Nordsøen og de indre danske farvande.

Som nævnt ovenfor blev der i kortlægningen fokuseret på mægtigheden af ukonsoliderede og potentielt bløde sedimenter. De ukonsoliderede sedimenter omfatter både sandede aflejringer, som typisk ikke udgør en udfordring og bløde aflejringer af ler, mudder og dynd, som ved store tykkelser kan give funderingsmæssige udfordringer på grund af lave geotekniske styrkeparametre. Der er således tale om en storskala og meget overordnet kortlægning af tykkelsen af ukonsoliderede sedimenter og det har ikke været muligt at foretage en detaljeret differentiering af fordelingen af henholdsvis sand og ler/mudder/dynd. På baggrund af de udarbejdede tykkelseskort og den bagvedliggende geologiske viden er der derfor foretaget en inddeling af det danske havområde i forhold til, i hvilket omfang bløde sedimenter forventes at udgøre en udfordring i forbindelse med fundering af havvindmøller. Der er således opstillet følgende fire kategorier:

1. Sandsynligvis ikke større tykkelser af bløde sedimenter
2. Potentielt større tykkelser af bløde sedimenter
3. Forventeligt større tykkelser af bløde sedimenter
4. Behov for mere viden

Inddelingen er foretaget ud fra en overordnet antagelse om, at tykkelser af bløde sedimenter mellem 0-20 m ikke vil give anledning til større funderingsmæssige udfordringer, at tykkelser af bløde sedimenter mellem 20-40 m potentielt kan give anledning til funderingsmæssige udfordringer og at tykkelser af bløde sedimenter over 40 m forventes at give anledning til funderingsmæssige udfordringer. I praksis, og måske især på sigt, kan det vise sig, at geotekniske eksperter og udviklere af havvind kan have en anden vurdering, ligesom det konkrete valg af funderingstype kan være afgørende for betydningen af tykkelsen af bløde sedimenter.

Kategori 1 omfatter således områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer typisk er mellem 0 og 20 m og ikke forventes at give anledning til større funderingsmæssige udfordringer. Kategori 2 omfatter områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer typisk er mellem 20 og 40 m og potentielt kan give anledning til funderingsmæssige udfordringer, mens kategori 3 omfatter områder, hvor tykkelsen af ukonsoliderede aflejringer typisk er over 40 m og forventes at give anledning til funderingsmæssige udfordringer. Endelig omfatter kategori 4 områder uden data eller områder, hvor datagrundlaget ikke er tilstrækkeligt til en kategorisering i forhold til mulige udfordringer med bløde sedimenter og hvor der derfor er behov for mere viden.

Som supplement til inddelingen af det danske havområde i kategorier i forhold til den forventede tykkelse af bløde sedimenter er der desuden udarbejdet en overordnet vurdering af muligheden for marinarkæologiske interesser i det danske havområde. Vurderingen bygger blandt andet på tre palæogeografiske kort og en række strandforskydningskurver.

20.2 Konklusion og perspektivering

Der er i projektet gennemført en overordnet kortlægning af vigtige overfladenære geologiske enheder i hele det danske havområde med fokus på geologisk alder (stratigrafi) og dannelsesmiljø, som er vigtige parametre i forhold til vurdering af egenskaber og når der senere skal laves detaljerede undersøgelser. Der er således tale om den første fuldt dækkende kortlægning af mægtigheden af ukonsoliderede senglaciale og Holocæne aflejringer, og de kortlagte enheder udgør således i praksis de første og øverste lag, som vil kunne indgå i en egentlig 3D geologisk digital model for det danske havområde.

Samtidig giver resultaterne et godt overblik over hvilke dele af det danske havområde, der ud fra et geologisk perspektiv, er henholdsvis velegnede eller mindre egnede i forhold til fundering af havvindmøller. De detaljerede beskrivelser af de enkelte områder i denne rapport giver desuden kommende udviklere af havvind og beslutningstagere et værdifuldt indblik i, hvor geologien kan forventes at være henholdsvis mere ensartet og forudsigelig kontra mere kompleks og heterogen. Det kan f.eks. være vigtig information i forhold til økonomiske betragtninger i forhold til etablering af havvind i et givent område.

Dermed udgør kortlægningen også et solidt og nødvendigt grundlag for mere detaljerede screeningsstudier forud for beslutning om udpegning af havvindområder. I senere faser vil kortlægningen desuden sammen med sådanne detaljerede screeningsstudier naturligt indgå som grundlag og geologisk forståelsesramme for efterfølgende detailundersøgelser forud for udbud af havvind; en proces som er anvendt med succes ved flere lejligheder.

Med 5-10 km mellem de seismiske linjer i nogle områder er der dog tale om en meget overordnet kortlægning i grov skala, ligesom der ikke er foretaget en kortlægning af geotekniske enheder og -parametre. Der er også stadig områder med lav (eller ingen) datadækning. Det gælder f.eks. i habitatområder, hvor der ikke kunne indsamles nye supplerende data.

Med det overordnede sigte at anviser nye veje til fremtidig optimering af det geologiske grundlag for havvind, er der i projektperioden skabt en stærk og essentiel synergi mellem den geologiske screening og to forskningsprojekter i GEUS. Det ene projekt udforsker vigtige geologiske strukturer i form af begravede tunneldale, og det andet udvikler metodik til at give en overordnet indikation af de geotekniske forhold på et mere kvantitativt niveau. Data indsamlet i den geologiske screening anvendes således i forskningsprojektet NOARG (North Sea tunnel valleys - Architecture, genesis, and prediction), finansieret af Geocenter Danmark, hvor begravede glaciære tunneldale i Nordsøen, der kan være vigtige i geoteknisk sammenhæng, undersøges og karakteriseres. I det EUDP støttede forskningsprojekt WIND-FARM (Wind Infrastructure planning support using a Novel Data-driven inversion Framework for geotechnical property Assessment and Risk Mitigation), bliver der i samarbejde med industrielle partnere udviklet metodikker til site-specifikke estimater af geotekniske parametre på detaljeret niveau, og ved GEUS udvikles nye metoder, der sigter mod at kunne levere overordnede, regionale vurderinger af geotekniske parametre.

I forhold til de videre perspektiver giver den geologiske screening og den geologiske model, der er etableret med kortlægningen af tykkelserne af senglaciale og Holocæne aflejringer i det danske havområde, en række unikke muligheder.

Den omfattende kortlægning og de solide geologiske rammer giver gode muligheder for videre udnyttelse af allerede eksisterende data. Digital skanning af vibrocore kerner og måling af en række fysiske parametre, vil kunne give bedre og mere detaljerede informationer om de gennemborede lag. Sammenstilling af aldersdateringer af prøver i vibrocore kerner på tværs af institutioner, fagdiscipliner og anvendelsesområder vil bidrage yderligere til forståelsen af den geologiske udvikling og til kortlægning af udbredelsen af geologiske enheder og deres egenskaber. Nye anvendelser af eksisterende statistiske, matematiske og modellerings-tekniske metoder giver mulighed for bedre kombineret udnyttelse af geofysiske, geologiske og geotekniske data.

Gennem årtier er der i forbindelse med efterforskning efter olie og gas i Nordsøen indsamlet enorme mængder konventionelle seismiske data. Indsamlingen og processeringen af de konventionelle seismiske data har fokuseret på kortlægning af de geologiske lag til flere kilometers dybde og giver typisk ingen eller kun ringe information om de øverste få hundrede meter af lagserien, som er relevante i forhold til etablering af havvind. Mange af disse konventionelle olie-seismiske data har dog en karakter og en kvalitet, der gør det muligt at foretage en reprocessering, hvor der fokuseres på opløseligheden og datakvaliteten i de øverste lag. Herved vil de mange data kunne udgøre et værdifuldt supplement til den eksisterende kortlægning og geologiske model i Nordsøen, hvor det nuværende datagrundlag stadig er relativt sparsomt og geologien mange steder kompleks og meget varierende.

Store dele af de danske havområder er lavvandede, og havbunden påvirkes af bølger og strøm, herunder daglige tidevandstrømme. Det betyder, at havbundens landskaber og levesteder (geomorfologi og habitater) er diverse og dynamiske og f.eks. kan erosion, transport og aflejring af havbundens sediment, herunder vandrede bundformer, blottægge eller begrave undervandsinstallationer og nedgravede kabelføringer. Bedre forhåndsviden om havbundens sedimentdynamik, herunder erosion omkring fundamenter for havvindmøller og nedgravede kabler, er efterspurgt af branchen for at minimere risikoen, når der etableres havvindmølleparker. Viden om substrat- og naturtyper er desuden essentiel i forbindelse med vurdering af miljøpåvirkninger. I forbindelse med indsamlingen af nye seismiske data er der som en del af den geologiske kortlægning også indsamlet multibeam ekkolod data, side scan sonar og sub-bottom profiler data. Det er data som også anvendes i kortlægningen af havbunden og de indsamlede data udgør således en helt unik mulighed for en overordnet og grovmasket analyse og tolkning af havbundens morfologi, sediment-/substrattyper og naturtyper, som dækker hele det danske havområde.

Endelig giver kortlægningen og den geologiske model det bedst mulige grundlag for fokuseret indsamling af nye data og ny viden i områder, hvor der stadig er behov for at belyse de overordnede geologiske forhold bedre.

I forhold til mere avancerede modelleringsmetoder kan der ligge et forskningspotentiale i bedre korrelation med geotekniske parametre i områder med stor tæthed af geotekniske data og udvikling af metoder til ekstrapolation af egenskaber til områder med ringe geoteknisk datadækning. Som en del af den udvikling er der ligeledes et potentiale for både videre udvikling af nye og forbedrede interpolationsrutiner i områder med lav datadækning, som involverer indarbejdelse af geologisk forhåndsviden (prior information) og videre udvikling af

metoder til inversion af seismiske data for geotekniske parametre og dermed input til egenskaber i en egentlig digital 3D geologisk model.

En 3D geologisk model med information om egenskaber af de geologiske lag vil give mulighed for cost-benefit analyser, både til planlægning af hvor og hvilke nye data der vil give mest værdi i forhold til aktuelle problemstillinger og til overordnede økonomiske vurderinger af anlægsomkostninger. Samtidig vil modellen kunne udbygges med en matrix-klassifikation, hvor de geologiske egenskaber, estimerede geotekniske parametre, havbundsforhold, sedimentdynamik mv. kan indgå i opsætning af scenarier for avanceret risikovurdering.

Det nye og bedre geologiske datagrundlag for havvind-udbygning i Danmark der er etableret i dette projekt, giver således en række unikke muligheder for løbende at optimere og udbygge den eksisterende viden og kortlægning gennem intelligent brug af både eksisterende data og nye data i takt med, at der udføres detaljerede undersøgelser i nye områder. Et vigtigt skridt vil være at etablere en egentlig 3D geologisk digital model og indarbejde geotekniske egenskaber på et overordnet niveau. En sådan model vil være dynamisk og opdaterbar og udgøre en central digital tvilling, der understøtter fremtidige behov for opdateret viden til beslutningsstøtte.

21. Referencer

Ahlrichs, N., Hübscher, C., Andersen, T.R., Preine, J., Bogner, L., & Schäfer, W. 2023: The Langeland Fault System unravelled: Quaternary fault reactivation along an elevated basement block between the North German and Norwegian–Danish basins. *Boreas*, 52(3), 381–401. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bor.12614>

Al-Hamdany, Z. & Jensen, J.B. 2015: Vesterhavet Syd Havvindmøllepark – Geologiske modeller som basis for udpegning af arkæologiske hotspots. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2015/17.

Al Hseinat, M. & Hubscher, C. 2017: Late Cretaceous to recent tectonic evolution of the north German Basin and the transition zone to the Baltic Shield/Southwest Baltic Sea. *Tectonophysics* 708, 28–55.

Allaart, L., Vangkilde-Pedersen, T., Nørgaard-Pedersen, N., Christensen, N. & Leth, J.O. 2023a: Dataoversigt og behov for nye data, indre danske farvande og Østersøen. Bedre geologiske data til havvindudbygning, Energistyrelsen. GEUS Rapport 2023/9.

Allaart, L., Vangkilde-Pedersen, T., Nørgaard-Pedersen, N. & Leth, J.O. 2023b: Dataoversigt og behov for nye data, Nordsøen. Bedre geologiske data til havvindudbygning, Energistyrelsen. GEUS Rapport 2023/14.

Andersen, L.T. 2004: The Fanø Bugt Glaciotectonic Thrust Fault Complex, Southeastern Danish North Sea. Ph.D. thesis 2004. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2004/30, 143 pp.

Andersen, S.H. 2005: En glitterstok fra Dogger Banke i Nordsøen. *Kuml* 2005, 9–16.

Andersen, S.H. 2009: Ronæs Skov. Marinarkæologiske undersøgelser af en kystboplads fra Ertebølle-tid. *Jutland Archaeological Society Publications* 64, 279 pp.

Andersen, S.H. 2013: Tybrind Vig, submerged Mesolithic settlements in Denmark, 527 pp. Aarhus: Aarhus University Press.

Andersen, T.R. Jørgensen, F. & Christensen, S. 2016: Delineation of tunnel valleys across the North Sea coastline, Denmark based on reflection seismic data, boreholes, TEM and Schlumberger soundings. ASEG-PESA 2016: Adelaide, Australia, p. 1-8.

Andrén, T., Jørgensen, B.B., Cotterill, C., Green, S., and the Expedition 347 Scientists. 2015: Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 347, Expedition reports Baltic Sea Paleoenvironment.

Andresen, K.J., Hepp, D.A., H.K. & Spiess, V. 2022: Seismic morphologies of submerged late glacial to Early Holocene landscapes at the eastern Dogger Bank, central North Sea Basin – implications for geo-archaeological Potential. I: Newton, A.M.W., Andresen, K.J.,

Blacker, K.J., Harding, R. & Lebas, E. (eds): Seismic geomorphology: subsurface analyses, data integration and palaeoenvironment reconstructions. Geological Society, London, Special Publications 525, 13-42.

Astrup, P.M. 2018: Sea-level change in Mesolithic southern Scandinavia, 207 pp. Aarhus: Aarhus University Press.

Astrup, P.M., Benjamin, J., Stankiewicz, F., Woo, K., McCarthy, J., Wiseman, C., Baggaley, P., Jerbi, K., Fowler, M., Skriver, C. & Bailey, G. 2021: A drowned Mesolithic shell midden complex at Hjarnø Vesterhoved, Denmark and its wider significance. *Quaternary Science Reviews* 258, 106854.

Barry, K.M., Cavers, D.A. & Kneal, C.W. 1975: Recommended standards for digital tape format, *Geophysics* 40, 344-352.

Bendixen, C., Jensen, J.B., Bennike, O., Boldreel, L.O. 2013: Late glacial to early Holocene development of southern Kattegat. *GEUS Bulletin* 28, 21–24.

Bendixen, C., Jensen, J. B., Boldreel, L.O., Clausen, O.R., Bennike, O., Seidenkrantz, M.-S., Nyberg, J. & Hübscher, C. 2017a: The Holocene Great Belt connection to the southern Kattegat, Scandinavia: Ancylos Lake drainage and Early Littorina Sea transgression. *Boreas*, Vol. 46, 53–68. 10.1111/bor.12154. ISSN 0300-9483.

Bendixen, C., Boldreel, L.O., Jensen, J.B., Bennike, O., Hübscher, C., & Clausen, O.R. 2017b: Early Holocene estuary development of the Hesselø Bay area, southern Kattegat, Denmark and its implication for Ancylos Lake drainage. *Geo-Marine Letters*, 37, 579-591.

Bennike, O. & Jensen, J.B. 1998: Late- and postglacial shore level changes in the south-western Baltic Sea. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 45, 27–38.

Bennike, O., Jensen, J.B., Konradi, P.B., Lemke, W., & Heinemeier, J. 2000: Early Holocene drowned lagoonal deposits from the Kattegat, southern Scandinavia. *Boreas*, 29 (4), 272-286.

Bennike, O., Jensen, J.B., Lemke, W., Kuijpers, A. & Lomholt, S. 2004: Late- and postglacial history of the Great Belt, Denmark. *Boreas* 33, 18–33.

Bennike, O. & Jensen, J.B. 2011: Postglacial relative shore level changes in Lillebælt, Denmark. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 23, 37–40.

Bennike, O., Andreasen, M.S., Jensen, J.B. & Noe-Nygaard, N. 2012: Early Holocene sea-level changes in Øresund, Scandinavia. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 26, 29–32.

Bennike, O., Leth, J.O., Jensen, J.B. & Lomholt, S. 2014: Arctic plant remains of Weichselian age from the Danish North Sea. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 31, 43–46.

Bennike, O., Nørgaard-Pedersen, N. & Jensen, J.B. 2019: The channels in Storebælt, Denmark: implications of new radiocarbon ages. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 43, e2019430106.

Bennike, O., Jensen, J.B., Nørgaard-Pedersen, N., Andresen, K.J., Seidenkrantz, M.-S., Moros, M. & Wagner, B. 2021a: When were the straits between the Baltic Sea and the Kattegat inundated by the sea during the Holocene? *Boreas* 50, 1079–1094.

Bennike, O., Andresen, K.J., Astrup, P.M., Olsen, J. & Seidenkrantz, M.-S. 2021b: Late glacial and Holocene shore-level changes in the Aarhus Bugt area, Denmark. *GEUS Bulletin* 47, 6530, 6 pp.

Bennike, O., Odgaard, B., Wiberg-Larsen, P. & Nørgaard-Pedersen, N. 2023: Submarine Lateglacial lake deposits from Jutland Bank, the North Sea. *Quaternary International* 669, 12–19.

Binzer, K., & Stockmarr, J. 1994: Geologisk kort over Danmark. Geological map of Denmark 1:500 000. Prækvartæroverfladens højdeforhold. Det danske landområde samt Kattegat, indre farvande og farvandet omkring Bornholm. Pre-Quaternary surface topography of Denmark. DGU. DGU Kortserie Bind 44. <https://doi.org/10.22008/FK2/TZLEKA/LAEPNZ>

Björck, S. 1995: A review of the history of the Baltic Sea, 13.0-8.0 ka BP. *Quaternary International* 27, 19–40.

Boldreel, L.O., & Pedersen, S.A.S. 2024: Neotectonic deformations of the lakebeds in Esrum Sø, eastern Denmark, interpreted to indicate a Postglacial pull-apart basin. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 73, 67–88. <https://doi.org/10.37570/bgds-2024-73-04>.

Brandes, C., Steffen, H., Sandersen, P.B.E., Wu, P. and Winsemann, J. 2018: Glacially induced faulting along the NW segment of the Sorgenfrei–Tornquist Zone, northern Denmark: implications for neotectonics and Lateglacial fault-bound basin formation. *Quaternary Science Reviews*, 189, 149–168, doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.03.036.

Brandes, C., Polom, U., Winsemann, J. & Sandersen, P.B.E. 2022: The near-surface structure in the area of the Børglum fault, Sorgenfrei–Tornquist Zone, northern Denmark: Implications for fault kinematics, timing of fault activity and fault control on tunnel valley formation. *Quaternary Science Reviews* 289, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107619>.

Bøe, R., Rise, L. & Ottesen, D. 1998: Elongate depressions on the southern slope of the Norwegian Trench (Skagerrak): morphology and evolution. *Marine Geology* 146, 191-203.

Coles, B.J. 1998: Doggerland: a speculative survey. *Proceedings of the Prehistoric Society* 64, 45–81.

Dansk Standard 1978: Kornstørrelsesfordeling bestemt ved sigteanalyse. Dansk Standardiseringsråd.

DS/EN 2004: Kornstørrelsesfordeling bestemt ved sigteanalyse. Dansk Standardiseringsråd.

Ehlers, J. 1990: Reconstruction of the dynamics of the north – west European Pleistocene ice sheets. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 9, pp. 71-83, 1990.

Eiríksson, J., Kristensen, P.H., Lykke-Andersen, H., Brooks, K., Murray, A., Knudsen, K.L. & Glaister, C. 2006: A sedimentary record from a deep Quaternary valley in the southern Lillebælt area, Denmark: Eemian and Early Weichselian lithology and chronology at Mommark. *Boreas*, Vol. 35, pp. 320/331. Oslo. ISSN 0300-9483.

EMODnet Bathymetry Consortium. 2022: EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2022) .EMODnet Bathymetry Consortium. <https://doi.org/10.12770/ff3aff8a-cff1-44a3-a2c8-1910bf109f85>

Erlström, M. & Sivhed, U. 2001: Intra-cratonic dextral transtension and inversion of the southern Kattegat on the southwest margin of Baltica – Seismostratigraphy and structural development. *SGU Research Paper C 832*.

Fischer, A. & Hansen, J.C. 2005: Mennesket og havet i ældre stenalder. I: Bunte, E. (ed.): *Arkeologi och naturvetenskap*, 276–297, 372–373.

Fischer, A., Richards, M., Olsen, J., Robinson, D.E., Bennike, P., Kubiak-Martens, L. & Heinemeier, J. 2007: The composition of Mesolithic food. Evidence from the submerged settlement of the Argus Bank, Denmark. *Acta Archaeologica* 78, 163-180.

Fischer, A. & Jensen, T.Z.T. 2018: Radiocarbon dates for submarine and maritime finds from early prehistory. In: Fischer, A. & Pedersen, L. (eds): *Oceans of Archaeology*, 203–220.

Gibson, S.M. & Gibbard, P.L. 2024: Late Middle Pleistocene Wolstonian Stage (MIS 6) glaciation in lowland Britain and its North Sea regional equivalents – a review. *Boreas* 53. <https://doi.org/10.1111/bor.12674>

Glørstad, H. 2014: Deglaciation, sea-level change and the Holocene colonization of Norway. *Geological Society, London, Special Publications*. 411. 10.1144/SP411.7.

Graversen, O. 2004: Upper Triassic-Cretaceous seismic stratigraphy and structural inversion offshore SW Bornholm, Tornquist Zone, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 51, 111–136.

Graversen, O. 2009: Structural analysis of superposed fault systems of the Bornholm horst block, Tornquist Zone, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 57, 25–49.

Gregersen, S., & Voss, P.H. 2015: Consistency of postglacial geodynamics for the Kattegat region, southern Scandinavia, based on seismological, geological and geodetic data. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 33, 21-24. <https://doi.org/10.34194/geusb.v33.4480>.

Gregersen, U., Fyhn, M.B.W., Keiding, M., Abramovitz, T., Bjerager, M., Vosgerau, H., Smit, F.W.H., Funck, T., Mathiesen, A., Mørk, F., Schovsbo, N.H., Petersen, H.I., Nielsen, L.H.,

Dybkjær, K., Lauridsen, B.W., Sheldon, E., Olsen, M.L., Pedersen, G.K., Nielsen, C.M., Rasmussen, E.S., Malehmir, A., Papadopoulou, M., Zappalá, S., Markovic, M., Westgate, M., Putnaite, J., Konstantinidis, E., Kucinskaite, K., Ehrhardt, A. and Nørmark, E. 2025: Seismic investigations of eight geological structures for potential storage of CO₂ in Denmark – an introduction. *GEUS Bulletin* 60. 8385. <https://doi.org/10.34194/299dt488>

Gregory, D.J., Bennike, O., Jensen, J.B., Rasmussen, P. & Al-Hamdani, Z. 2021: Development of predictive geoarchaeological models to locate and assess the preservation potential of submerged prehistoric sites using remote sensing, palaeoenvironmental analysis, and GIS. *Heritage* 2021, 4678–4699.

Hansen, L.Ø., Andersen, M., Nørgaard-Pedersen, N., Christensen, N., Al-Hamdani, Z., & Ernstsen, V.B. 2024: Geophysical mapping of seabed substrates and habitata (JAMBAY WP1). *GEUS Rapport* 2024/24.

Heaton, T.J. 2020: Marine20 – the marine radiocarbon age calibration curve (0-55,000 cal BP). *Radiocarbon* 62, 779–820.

Heinemeier, J. & Rud, N. 1997: Danske arkæologiske AMS 14C-dateringer, Aarhus 1996. *Arkæologiske udgravninger i Danmark 1996*, 300–305.

Heinrich, C., Anders, S. & Schwarzer, K. 2018: Late Pleistocene and early Holocene drainage events in the eastern Fehmarn Belt and Mecklenburg Bight, SW Baltic Sea. *Boreas*, Vol. 47, pp. 754–767. <https://doi.org/10.1111/bor.12298>. ISSN 0300-9483.

Hijma, M.P., Cohen, K.M., Roebroeks, W., Westerhoff, W.E. & Busschers, F.S. 2012: Pleistocene Rhine Thames landscapes: geological background for hominin occupation of the southern North Sea region. *Journal of Quaternary Science* 27, 17–39.

Hijma, M.P., Bradley, S.L., Cohen, K.M., van der Wal, W., Barlow, N.L.M., Blank, B., Frechen, M., Hennekam, R., van Heteren, S., Kiden, P., Mavritsakis, A., Meijninger, B.M.L., Reichart, G.-J., Reinhardt, L., Rijdsdijk, K.F., Vink, A. & Busschers, F.S. 2025: Global sea-level rise in the early Holocene revealed from North Sea peats. *Nature* 639. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08769-7>

Hjelstuen, B.O., Sejrup, H.P., Valvik, E. & Becker, L.W.M. 2018: Evidence of an ice-dammed lake outburst in the North Sea during the last deglaciation. *Marine Geology* 402, 118–130.

Houmark-Nielsen, M. 1987: Pleistocene stratigraphy and glacial history of the central part of Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 36, 189 pp.

Houmark-Nielsen, M. & Kjær, K.H. 2003: Southwest Scandinavia, 40–15 ka BP: palaeogeography and environmental change. *J. Quaternary Sci.*, Vol. 18, 769–786.

Houmark-Nielsen, M. 2021: *Istiden i det danske landskab*, 391 s. København: Lindhardt & Ringhof.

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*, Vol 45, pp. 1–45. [10.1111/bor.12142](https://doi.org/10.1111/bor.12142). ISSN 0300-9483.

Huuse, M. & Lykke-Andersen, H. 2000a: Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. *Quaternary Science Reviews* 19, 1233-1253.

Huuse, M. & Lykke-Andersen, H. 2000b: Large-scale glaciotectonic thrust structures in the eastern Danish North Sea. In: Maltman, A., Hambrey, M. & Hubbard, B. (eds): *Deformation of Glacial Materials*. Geological Society, London, Special Publications 176, 293-305.

Hyttinen, O., Quintana Krupinski, N., Bennike, O., Wacker, L., Filipsson, H.L., Obrochta, S., Jensen, J.B., Lougheed, B., Ryabchuk, D., Passchier, S., Snowball, I., Herrero-Bervera, E., Andrén, T. & Kotilainen, A. 2021: Deglaciation dynamics of the Fennoscandian Ice Sheet in the Kattegat, the gateway between the North Sea and the Baltic Sea Basin. *Boreas* 50, 351–368.

Høyer, A.S., Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., Viezzoli, A. & Møller, I. 2015: 3D geological modelling of a complex buried-valley network delineated from borehole and AEM data. *Journal of Applied Geophysics* 122, 94-102.

Håkansson, E. & Pedersen, S.S. 1992: Geologisk kort over den danske undergrund. *Varv* 2, 1 p.

Japsen, P. 2000: Fra Kridthav til Vesterhav. Nordsøbassinets udvikling vurderet ud fra seismiske hastigheder. *Geologisk Tidsskrift*, 2000(2), 1-36. <https://2dgf.dk/xpdf/gt2000-2-1-36.pdf>.

Jensen, K.A. & Knudsen, K.L. 1988: Quaternary foraminiferal stratigraphy in boring 81/29 from the central North Sea. *Boreas* 17, 273-287.

Jensen, J.B. and Hamann, N.E. 1989: Geological mapping of Mesozoic deposits along the eastern margin of the Rønne Graben, offshore Bornholm, Denmark. *Bull. geol. Soc. Denmark*, Vol. 37, 237 - 260.

Jensen, J.B., Bennike, O., Witkowski, A., Lemke, W. & Kuijpers, A. 1997: The Baltic Ice Lake in the southwestern Baltic: sequence-, chrono- and biostratigraphy. *Boreas* 26, 217–236.

Jensen, J.B., Bennike, O., Witkowski, A., Lemke, W. & Kuijpers, A. 1999: Early Holocene history of the southwestern Baltic Sea: the Ancylus Lake stage. *Boreas* 29, 437–453.

Jensen, J.B., Petersen, K.S., Konradi, P., Kuijpers, A., Bennike, O., Lemke, W. & Endler, R. 2002a: Neotectonics, sea-level changes and biological evolution in the Fennoscandian Border Zone of the southern Kattegat Sea. *Boreas* 31, 133–150.

Jensen, J.B., Kuijpers, A., Bennike, O. & Lemke, W. 2002b: Balkat – the Baltic Sea without frontiers. *Geologi, nyt fra GEUS* 2002, 4, 19 pp.

Jensen, J.B., Bennike, O., Lemke, W. & Kuijpers, A. 2005: The Storebælt gateway to the Baltic. *GEUS Bulletin* 7, 45-48.

Jensen, J.B., Gravesen, P. & Lomholt, S. 2008: Geology of outer Horns Rev, Danish North Sea. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 15, 41-44.

Jensen, J.B., Leth, J.O., Borre, S., Nørgaard-Pedersen, N. 2010: Modeller for potentielle sand- og grusforekomster for de danske Farvande – Delområdet Jyske Rev – Lille Fiskerbanke., Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2010/13.

Jensen 2013: Detaljeret bearbejdning af kortlægningsresultater og ressourceopgørelse fra Kriegers Flak med speciel fokus på tolkning af Energinet DK-data fra 2012. *GEUS Rapport* 2013/78.

Jensen, J.B., Moros, M., Endler, R. & IODP Expedition 347 Members. 2017: The Bornholm Basin, southern Scandinavia: a complex history from Late Cretaceous structural developments to recent sedimentation. *Boreas* 46, 3–17.

Jensen, J. B., Prins, L.T. & Bennike, O. 2021: Geology desk study offshore Bornholm, Baltic Sea – Windfarm investigations. *GEUS Rapport* 2021/18.

Jensen, J.B. & Bennike, O. 2022: Geological Screening of Kriegers Flak North and South. Geological seabed screening in relation to possible location of windfarm areas. *GEUS Rapport* 2022/2.

Jessen, A. 1936: Vendsyssels geologi. Danmarks Geologiske Undersøgelse Række 5, bind 2, 195 sider. <https://doi.org/10.34194/raekke5.v2.7010>

Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E. 2006: Buried and open tunnel valleys in Denmark—erosion beneath multiple ice sheets. *Quat. Sci. Rev.* 25 (11–12), 1339–1363. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.11.006>.

Kirkham, J.D., Hogan, K.A., Larter, R.D., Self, E., Games, K., Huuse, M., Stewart, M.A., Ottesen, D.O., Arnold, N.S. & Dowdeswell, J.A. 2021: Tunnel valley infill and genesis revealed by high-resolution 3-D seismic data: *Geology* 49, 1516-1520. <https://doi.org/10.1130/G49048.1>

Kirkham, J., Hogan, K. & Larter, R. 2022: How ancient ice-age valleys could hold the key to global ice-sheet loss. Guest post in: *Carbon Brief. Clear on Climate*. <https://www.carbon-brief.org/guest-post-how-ancient-ice-age-valleys-could-hold-the-key-to-global-ice-sheet-loss/>

Kirkham, J.D., Hogan, K.A., Larter, R.D., Self, E., Games, K., Huuse, M., Stewart, M.A., Ottesen, D., Le Heron, D.P., Lawrence, A., Kane, I., Arnold, N.S. & Dowdeswell, J.A. 2024: The infill of tunnel valleys in the central North Sea: Implications for sedimentary processes, geo-hazards, and ice-sheet dynamics. *Marine Geology* 467, 107185.

Kjær, K.H., Houmark-Nielsen, M., Richardt, N. 2003: Ice-flow patterns and dispersal of erratics at the southwestern margin of the last Scandinavian ice sheet: signature of palaeo-ice streams. *Boreas* 32: 130–148.

Knudsen, K.L. & Lykke-Andersen, A.L. 1982: Foraminifera in Late Saalian, Eemian, Early and Middle Weichselian of the Skærumhede I boring. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 30(3-4), 97-109.

Knudsen, K.L. 1985: Foraminiferal stratigraphy of Quaternary deposits in the Roar, Skjold and Dan fields, central North Sea. *Boreas*, 311-324.

Knudsen, K. L., Conradsen, K., Heier-Nielsen, S., & Seidenkrantz, M.-S. 1996: Quaternary palaeoceanography and palaeogeography in northern Denmark : a review of results from the Skagen cores. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 43, 22–31.

Knudsen, K.L., Conradsen, K., Heier-Nielsen, S., Seidenkrantz, M. 1996: Palaeoenvironments in the Skagerrak-Kattegat basin in the eastern North Sea during the last deglaciation. *Boreas* 25:62–77. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1996.tb00836.x>

Knutz, P.C., Rasmussen, E.S., Dybkjær, K., Laghari, S. & Prins, L.T. 2022: A desk study of the geological succession below a proposed energy island, Danish North Sea. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2022/20*.

Konradi, P.B. 2000: Biostratigraphy and environment of the Holocene marine transgression in the Heligoland Channel, North Sea. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 47, 71–79.

Konradi, P.B., Larsen, B. & Sørensen, A.B. 2005: Marine Eemian in the Danish eastern North Sea. *Quaternary International* 133–134, 21–31.

Kristensen, T.B., Huuse, M., Piotrowski, J.A. & Clausen, O.R. 2007: A morphometric analysis of tunnel valleys in the eastern North Sea based on 3D seismic data. *Journal of Quaternary Science* 22, 801-815.

Krog, H. & Tauber, H. 1974: C-14 chronology of late- and post-glacial marine deposits in North Jutland. *Danmarks Geologiske Undersøgelse Årbog for 1973*, 93–105.

Krüger, S., Dörfler, W., Bennike, O. & Wolters, S. 2017: Life in Doggerland – palynological investigations of the environment of prehistoric hunter-gatherer societies in the North Sea Basin. *E&G Quaternary Science Journal* 66, 3–13.

Kuijpers, A. 1991: Råstofgeologisk undersøgelser i Østersøen mellem Falster og Darss, Øst-tyskland, område 560. DGU Kunderapport 1991/21. Udført for Skov- og Naturstyrelsen.

Kuijpers, A. 1994: Øresund. Thickness of Late and Postglacial sediments. DGU Datadokumentation Report 1994/19. Udført for Skov- og Naturstyrelsen.

Lagerlund, E. & Houmark-Nielsen, M. 1993: Timing and pattern of the last deglaciation in the Kattegat region, southwest Scandinavia. *Boreas* 22, 337–347.

Laier, T., Jensen, J.B., Ion, G., Gulin, M. & Fritche, U. 2005: Digital maps of free gas distribution in marine sediments. WP2 deliverables of the METROL EU project 2003-2005. GEUS Rapport 2005/78.

Laier, T., Jensen, J.B., 2007: Shallow gas depth-contour map of the Skagerrak-western Baltic Sea region. *Geo-Mar Lett.* 27, 127-141.

Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y. & Sambridge, M. 2014: Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(43). <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1411762111>

Lange, D., 1984: Geologische Untersuchungen an spätglazialen und holozänen Sedimenten der Lübecker und Mecklenburger Bucht. Unveröffentlichte Dissertation (B), Institut für Meereskunde Warnemünde, 166 S.

Larsen, B. & Andersen, L.T., 2005: Late Quaternary stratigraphy and morphogenesis in the Danish eastern North Sea and its relation to onshore geology. *Geologie en Mijnbouw*, 84, 2.

Larsen, N.K., Knudsen, K.L., Krohn, C.F., Kronborg, C., Murray, A.S., & Nielsen, O.B. 2009a: Late Quaternary ice sheet, lake and sea history of southwest Scandinavia – a synthesis. *Boreas* 38, 732–761.

Larsen, N. K., Krohn, C. F., Kronborg, C., Nielsen, O. B., & Knudsen, K. L. 2009b: Lithostratigraphy of the late Saalian to middle Weichselian Skaerumhede Group in Vendsyssel, northern Denmark. *Boreas*, 38(4), 762-786.

Leth, J.O. 1996: Late Quaternary geological development of the Jutland Bank and the initiation of the Jutland Current, NE North Sea. *Norges geologiske undersøgelse Bulletin* 430, 25–34.

Liboriussen, J., Ashton, P., & Tygesen, T. 1987: The tectonic evolution of the Fennoscandian Border Zone in Denmark. *Tectonophysics* 137, 21–29.

Lomholt, S., Mikkelsen, D.M., Nørgaard-Pedersen, N., Leth, J.O., Rødel, L.G., Al-Hamdani, Z., Bennike, O. 2017. Marin Råstokortlægning af Aalborg Bugt 2016 - Råstof-, natur- og miljøkortlægning. Udført for Miljøstyrelsen. GEUS Rapport 2017/16.

Lomholt, S., Allaart, L., Stenshøj, R.Ø., Bennike, O., Winther, L.H. & Vangkilde-Pedersen, T. 2024: Rapportering af Miljøstyrelsens råstokortlægning i Nordsøen i 2019-2020 - Råstofundersøgelser i fokusområde Vestkysten. GEUS Rapport 2024/15.

Lykke-Andersen, H., Madirazza, I. & Sandersen, P.B.E. 1996: Tektonik og landskabsdannelse i Midtjylland. *Geologisk Tidsskrift* 3, 1–32.

Marta: <https://data.geus.dk/geusmap/?mapname=marta>

Michelsen, O. & Nielsen, L.H. 1993: Structural development of the Fennoscandian Border Zone, offshore Denmark. *Marine and Petroleum Geology* 10, 124–134.

Mogensen, T.E. & Korstgård, J.A. 2003: Triassic and Jurassic transtension along part of the Sorgenfrei–Tornquist Zone in the Danish Kattegat. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 1, 437–458.

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, 459–526.

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.

Nørgaard-Pedersen, N., Winther, L.H., Stenshøj, R.Ø. & Vangkilde-Pedersen, T. 2023. Rapportering af Miljøstyrelsens råstofkortlægning i Nordsøen i 2019-2020.

Olsen, J., Rasmussen, P. & Heinemeier, J. 2009: Holocene temporal and spatial variation in the radiocarbon reservoir age of three Danish fjords. *Boreas* 38, 458–470.

Ottesen, D., Stewart, M., Brønner, M. & Batchelor, C.L. 2020: Tunnel valleys of the central and northern North Sea (56°N to 62°N): distribution and characteristics. *Marine Geology* 425, 106199. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106199>

Pedersen, S.A.S. 2005: Structural analysis of the Rubjerg Knude Glaciotectonic Complex, Vendsyssel, northern Denmark. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 8, 192 pp.

Pedersen, S.A.S. & Boldreel, L.O. 2015: Thrust-fault architecture of glaciotectonic complexes in Denmark. *GEUS Bulletin*, 33, 17-20. <https://doi.org/10.34194/geusb.v33.4479>

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.

Pérez, L.F., Hansen, L.Ø., Vangkilde-Pedersen, T., Christensen, N., Andersen, M.S., Allaart, L., Rödel, L.G., Andersen, S.B., Haase, E.J., Baltz, A.K., Przyswitt, Z. & Nielsen, C.E. 2023: Survey report for the inner Danish waters and the Baltic Sea around Bornholm, 2022. Geological screening for offshore wind farms, the Danish Energy Agency. *GEUS Rapport* 2023/10.

Phillips, E., Cotterill, C., Johnson, K., Crombie, K., James, L., Carr, S. & Ruiters, A. 2018: Large-scale glacitectonic 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.

Phillips, E., Johnson, K., Ellen, R., Plenderleith, G., Dove, D., Carter, G., Dakin, N. & Cotterill, C. 2022: Glacitectonic evidence of ice sheet interaction and retreat across the western part of Dogger Bank (North Sea) during the Last Glaciation. *Proceedings of the Geologists' Association* 133, 87-111.

Praeg, D. 2003: Seismic imaging of mid-Pleistocene tunnel-valleys in the North Sea Basin: high resolution from low frequencies. *J. Appl. Geophys.* 53 (4), 273-298. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.001>.

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, 105943.

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, Artikel 107347. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107347>.

Prins, L.T., Owen, M. & Jensen, J.B. 2020: Kattegatforbindelse - kyst-kyst anlægstekniske Forundersøgelser. Rapport udført for Sund & Bælt A/S. GEUS Rapport 2020/63.

Prins, L.T., Andresen, K.J., Owen, M. & Knutz, P.C. 2025: A review of subsurface geosystems and de-risking offshore construction in the Danish North Sea. *Marine Geodiversity and geosystem services in Scandinavian seas*. GEUS Bulletin 52, 11 pp.

Rambøll 2013: Kriegers Flak OWF Geophysical Survey Results. Project: Kriegers Flak & Horns Rev 3 - Geo Investigations 2012. Udført for Energinet.dk.

Rambøll, 2024: Energiøen Bornholm I – Integrated Ground Model Report.

Rea, B.R., Newton, A.M.W., Lamb, R.M., Harding, R., Bigg, G.R., Rose, P., Spagnolo, M., Huuse, M., Cater, J.M.L., Archer, S., Buckley, F., Halliyeva, M., Huuse, J., Cornwell, D.G., Brocklehurst, S.H. & Howell, J.A. 2018: Extensive marine-terminating ice sheets in Europe from 2.5 million years ago. *Science advances* 4, eaar8327.

Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., van der Plicht, J. Reimer, R.W., Richards, D.A. Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A. & Talamo, S. 2020: The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kB). *Radiocarbon* 62, 725–757.

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., Ó Cofaigh, C., 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.

Salomonsen, I. & Jensen, K.A. 1994: Quaternary erosional surfaces in the Danish North Sea. *Boreas* 23, 244-253. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1994.tb00946.x>

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F. 2003: Buried Quaternary valleys in western Denmark – occurrence and inferred implications for groundwater resources and vulnerability. *Journal of Applied Geophysics* 53, 229-248.

Sandersen, P.B.E., Jørgensen, F., Larsen, N.K., Westergaard, J.H. & Auken, E. 2009: Rapid tunnel-valley formation beneath the receding Late Weichselian ice sheet in Vendsyssel, Denmark. *Boreas* 38 (4), 834–851. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00105.x>.

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F. 2015: Neotectonic deformation of a Late Weichselian outwash plain by deglaciation-induced fault reactivation of a deep-seated graben structure. *Boreas* 44, 413–431. <https://doi.org/10.1111/bor.12103>

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F. 2016: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2015. GEUS Særudgave, december 2016, bind 1 og 2.

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F. 2017: Buried tunnel valleys in Denmark and their impact on the geological architecture of the subsurface. *GEUS Bulletin*, 38, 13-16.

Sandersen, P.B.E., & Jørgensen, F. 2022: Tectonic impact on Pleistocene and Holocene erosional patterns in a formerly glaciated intra-plate area. *Quaternary Science Reviews*, 293, 107681. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107681>.

Sandersen, P.B.E., Kim, H., Jacobsen, R., Pedersen, J.B., & Hansen, B.G. 2023: Transport of nitrate-containing groundwater to coastal areas through buried tunnel valleys, Denmark. *GEUS Bulletin*, 53, Artikel 8351. <https://doi.org/10.34194/geusb.v53.8351>.

Seidel, E., Steffen, H., Steffen, R., Ahlrichs, N. & Hübscher, C. 2025: Drivers of glacially induced fault reactivation in the Baltic Sea sector of the Tornquist Fan. *Boreas*. <https://doi.org/10.1111/bor.12689>. ISSN 0300-9483.

Skaarup, J. & Grøn, O. 2004: Geology and topography. In: Skaarup, J. & Grøn, O. (eds): *Møllegabet II, a submerged Mesolithic settlement in southern Denmark*. *British Archaeological Reports International Series* 1328, 4-20.

Skov- og Naturstyrelsen 1987: Køge Bugt. Ressourceundersøgelser Fase 1. Geoteknisk Rapport nr. 4.

Skov- og Naturstyrelsen. 1988. Havbundsundersøgelser. Råstoffer og fredningsinteresser. Storebælt. Oversigt.

Steffen, H., Olesen, O. & Sutinen, R. 2021a: Glacially Triggered Faulting. A historic overview and recent developments. I H. Steffen, O. Olesen, & R. Sutinen (red.), Glacially-triggered faulting (s. 3-19). Cambridge University Press.

Steffen, R., Wu, P. & Lund, B. 2021b: Geomechanics of Glacially Triggered Faulting. I H. Steffen, O. Olesen, & R. Sutinen (red.), Glacially-triggered faulting (s. 20-39). Cambridge University Press.

Stewart, M.A., Lonergan, L. & Hampson, G. 2013: 3D seismic analysis of buried tunnel valleys in the central North Sea: morphology, cross-cutting generations and glacial history. *Quaternary Science Reviews* 72, 1–17.

Stewart, I. S., Sauber, J. and Rose, J. 2000: Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1367–1389, doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00094-9.

Szuman, I., Kalita, J. Z., Diemont, C. R., Livingstone, S. J., Clark, C. D., and Margold, M. 2024: Reconstructing dynamics of the Baltic Ice Stream Complex during deglaciation of the Last Scandinavian Ice Sheet, *The Cryosphere*, 18, 2407–2428, <https://doi.org/10.5194/tc-18-2407-2024>.

Uldum, O., Lübke, H. & Benjamin, J. 2018: Investigating prehistoric sites on the seabed. I: Fischer, A. & Pedersen, L. (eds): *Oceans of Archaeology*. Jutland Archaeological Society Publications 101, 109–117.

Ussing, N.V. 1903: Om Jyllands hedesletter og teorierne for deres dannelse. *Det Kongelige danske Videnskabernes Selskabs Forhandling* 4, 1–53.

Ussing, N.V. 1907: Om floddale og randmoræner i Jylland. *Det Kongelige danske Videnskabernes Selskabs Forhandling* 4, 161–213.

van der Plicht, J. & Kuitens, M. 2022: Fossil bones from the North Sea: Radiocarbon and stable isotope ($^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$) data. *Radiocarbon* 64, 633–668.

van der Vegt, P., Janszen, A. & Moscariello, A. 2012: Tunnel valleys: Current knowledge and future perspectives. In: Huuse, M., Redfern, J., Le Heron, D.P., Dixon, R., Moscariello, A. & Craig, J. (eds): *Glaciogenic reservoirs and hydrocarbon systems*. Geological Society, Special Publications, London 368, 75–97.

Vangkilde-Pedersen, T., Pérez, L.F., Nørgaard-Pedersen, N., Winther, L.H., Rödel, L.G., Andersen, S.B., Christensen, N., Allaart, L., Stenshøj, R.Ø., Pedersen, L.L., Everding, L. & Andersen, R. 2023a: Survey report for the Danish North Sea, 2023. Geological screening for offshore wind farms, the Danish Energy Agency. *GEUS Rapport* 2023/25.

Vangkilde-Pedersen, T., Stenshøj, R.Ø., Hansen, K.E., Nørgaard-Pedersen, N., Singhroha, S., Granat, H.J., Pedersen, L.L., Christensen, N., Winther, L.H., & Allaart, L. 2023b: Survey

report for vibrocore investigations, 2023. Geological screening for offshore wind farms, the Danish Energy Agency. GEUS Rapport 2023/37.

Vejbæk, O.V. 1997: Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. *Geologisk Tidskrift* 1997(4), 31 pp.

Velenturf, A.P.M., Emery, A.R., Hodgson, D.M., Barlow, N.L.M., Mohtaj Khorasani, A.M., Van Alstine, J., Peterson, E.L., Piazzolo, S. & Thorp, M. 2021: Geoscience solutions for sustainable offshore wind development. *Earth Science, Systems and Society* 1, 10042.

Verhart, L.B.M. 1995: Fishing for the Mesolithic. *The North Sea: a submerged Mesolithic landscape*. I: Fischer, A. (red.): *Man and Sea in the Mesolithic*, 291–302. Oxford.

Özmaral, A., Abegunrin, A., Keil, H., Hepp, D.A., Schwenk, T., Lantzsch, H., Mörz, T. & Spiess, V. 2022: The Elbe Palaeovalley: Evolution from an ice-marginal valley to a sedimentary trap (SE North Sea). *Quaternary Science Reviews*, 282, 107453.

