

Lokale opdateringer af FOHM-modellens hydrostratigrafi til Kvælstofretentionskortet version 2025

Mette Hilleke Mortensen, Lærke Therese Andersen,
Ingelise Møller, Peter B.E. Sandersen & Anne-Sophie Høyer

Lokale opdateringer af FOHM-modellens hydrostratigrafi til Kvælstofretentionskortet version 2025

Mette Hilleke Mortensen, Lærke Therese Andersen,
Ingelise Møller, Peter B.E. Sandersen & Anne-Sophie Høyer

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning og baggrund	5
1.1	Rammebetingelser for den hydrostratigrafiske model.....	5
2.	Modellering af sen- og postglaciale lag	9
2.1	Konceptuel model	9
2.2	Datagrundlag.....	10
2.3	Prioritering af områder	13
2.4	Modelleringsstrategi.....	16
2.5	Resultater	19
2.6	Sammenligning med den oprindelige (FOHM) model	26
3.	Opdateret hydrostratigrafi i tTEM-kortlagte områder fra MapField	28
3.1	Demosites: Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk på Salling	28
3.2	LOOP2 området i Himmerland	30
4.	Opdateret hydrostratigrafi for Kattegatøer	40
4.1	Nordsamsø.....	40
4.2	Tunø.....	41
4.3	Endelave	42
4.4	Læsø	44
4.5	Anholt	45
5.	Referenceliste	46

1. Indledning og baggrund

Denne rapport beskriver de lokale forbedringer af den nationale hydrostratigrafiske model, FOHM (Miljøstyrelsen, 2020), der er foretaget i relation til kvælstofretentionskortet version 2025 (Højbjerg et al., 2025). I regi af kvælstofretentionsprojektet blev der udført arbejde på FOHM-modellen relateret til 2 overordnede emner: 1) opdatering af FOHM-modellen, som beskrevet i denne rapport og 2) simulering af usikkerhederne på modellen, som beskrevet i Madsen et al., (2025).

De lokale opdateringer af FOHM-modellen blev foretaget i 3 områdekategorier, som er beskrevet i denne rapport (kapitel 2-4): 1) For at kunne vurdere kvælstoftransporten i de øvre lag er FOHM-modellen blevet opdateret og forbedret i områder med store mægtigheder af sen- og postglaciale aflejringer. Disse lag har ikke tidligere været udskilt som selvstændige lag i FOHM. FOHM-modellen er blevet udbygget med 4 ekstra lag i de områder, der vurderes at have de største mægtigheder af post- og senglaciale lag. GEUS har således udpeget og modelleret disse lag i udvalgte områder i Jylland og på Fyn. Udpegningen og modelleringen er beskrevet i kapitel 2. Parallelt med GEUS' modelleringsarbejde af de 5 øvre lag, udførte Geo, for MST, modellering af de samme 5 post- og senglaciale lag nord for Limfjorden. De ny-modellerede lag udført både af GEUS og Geo er indarbejdet i modellen, der er benyttet i kvælstofretentionsprojektet (Madsen et al., 2025). 2) Alle lag i FOHM-modellen er opdateret i udvalgte tTEM-kortlagte områder fra MapField (kapitel 3) samt 3) etablering af hydrostratigrafiske modeller på de 5 Kattegat øer; Anholt, Læsø, Tunø, Endelave og Nordsamsø (kapitel 4).

1.1 Rammebetingelser for den hydrostratigrafiske model

Den hydrostratigrafiske model, der er brugt i kvælstofretentionsprojektet er baseret på FOHM-modellen og de lokale opdateringer beskrevet i denne rapport. I regi af de nationale grundvandskortlægninger er der løbende lavet geologiske og/eller hydrostratigrafiske modeller ved brug af eksisterende og til formålet indsamlede geofysiske data og boringsdata. Det har ført til en række hydrostratigrafiske modeller af forskellig alder. I 2017 blev de hydrostratigrafiske modeller på Fyn, Tåsinge, Langeland og Ærø samlet til én model (herefter kaldet Fyn) og året efter i 2018, blev alle grundvandskortlægningsmodeller i Jylland og på Als samlet i FOHM-projektet. Efterfølgende er FOHM-modellen i Jylland løbende blevet opdateret med nye modeller. Grundvandskortlægningsmodeller på Sjælland, Lolland, Falster, Møn og mindre øer i Smålandsfarvandet og Storebælt er løbende blevet inkorporeret i DK-modellens hydrostratigrafi for Sjællandsmodellen. FOHM-modellen, der udgør rammen for dette arbejde er kendetegnet ved at de sidste opdateringer fra Miljøstyrelsen er udført inden starten af april 2023 for Jylland og Sjælland.

1.1.1 Den hydrostratigrafiske model på Fyn

Det meste af Fyn er udpeget som OSD-områder (Områder af Særlige Drikkevandsinteresser), og der er derfor udført national grundvandskortlægning over det meste af Fyn i perioden

2004 – 2017. I 2017 blev de hydrostratigrafiske modeller fra Fyn samlet i én model af Orbicon (2018). Den hydrostratigrafiske model består af fire kvartære sandlag med lerlag over og under, samt et prækvartært lerlag og kalk, hvilket i alt giver 8 lag udover toppen ved terrænoverfladen (topo) og bunden af modellen (bund) placeret 50 m under Kalk-lagfladen, se Tabel 1-1.

Tabel 1-1: Modellag i den hydrostratigrafiske model for Fyn.

Overordnet gruppe	DK-model lagflade betegnelse*	DK-model lag betegnelse	Litologi	Hydrogeologi
	Topo			
Kvartær	ks1t	KL1	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks1b	KS1	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	ks2t	KL2	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks2b	KS2	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	ks3t	KL3	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks3b	KS3	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	preq	KL4	Ler og silt	Akvitard
Prækvartær	kalk	PL7	Ler	Akvitard
Kalk	bund	Kalk	Kalk	Akvifer

*Lagflade knyttet til bund af lag i samme række

1.1.2 Den hydrostratigrafiske model på Sjælland

Den hydrostratigrafiske model for Sjælland og øerne tager udgangspunkt i en hydrostratigrafisk model fra DK-model 2014 og efterfølgende opdateringer med grundvandskortlægningsmodeller og andre modeller frem til marts 2023 (Stisen et al., 2020). Der er sket en opdatering med lokale og regionale modeller fra ca. 50 områder. Den hydrostratigrafiske model består af fem kvartære sandlag med lerlag over og under, samt et prækvartært lerlag og kalklag inddelt i 3 enheder, hvilket i alt giver 11 lagflader udover toppen ved terrænoverfladen (topo) og bunden af modellen (bund) placeret 50 m under bunden af det Palæogene ler (pl1b-lagfladen), se Tabel 1-2.

Tabel 1-2: Modellag i den hydrostratigrafiske model for Sjælland.

Overordnet gruppe	DK-model lagflade betegnelse*	DK-model lag betegnelse	Litologi	Hydrogeologi
	Topo			
Kvartær	ks1t	KL1	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks1b	KS1	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	ks2t	KL2	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks2b	KS2	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	ks3t	KL3	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks3b	KS3	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	ks4t	KL4	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	ks4b	KS4		
Kvartær	preq	KL5	Ler og silt	Akvitard
Prækvartær	pl1b	PL1	Ler	Akvitard
Kalk	gk1b	GK	Kalk	Akvifer
Kalk	dk1b	BK	Kalk	Akvifer
Kalk	Bund**	SK	Kalk	Akvifer

*Lagflade knyttet til bund af lag i samme række. **Bund er sat til 50 m under pl1b.

1.1.3 Den hydrostratigrafiske model for Jylland

Omkring 90 hydrostratigrafiske modeller fra Jylland er samlet i FOHM-modellen (Figur 1-3), hvoraf de ældste er fra 2004 og nyeste fra 2022. Ved samling af den hydrostratigrafiske model for Jylland ud fra modeller fra Grundvandskortlægningen i 2018, er der opstillet en samlet hydrostratigrafisk model for Jylland, FOHM-modellen (Miljøstyrelsen, 2020). FOHM-modellen består af syv kvartære sandlag med lerlag over og under, 14 prækvartære sandlag med lerlag over og under, samt to kalklag, som samlet er 45 lagflader, se Tabel 1-3. Hvor stensalt ligger højt, er toppen af dette modelleret. De prækvartære lag følger stort set den miocæne stratigrafi opstilling i Kristensen et al. (2015).

Tabel 1-3: Modellag i den hydrostratigrafiske FOHM-model for Jylland.

Overordnet gruppe	FOHM-model lagflade betegnelse	Litologi	Hydrogeologi
	Topo		
Kvartær	0100_Postglacial_toerv_Bund	Ler, silt og tørv	Akvitard
Kvartær	0200_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	0300_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	0400_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	1100_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	1200_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	1300_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	1400_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	1500_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	2100_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	2200_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	2300_Kvartaer_sand_Bund	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	2400_Kvartaer_ler_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	5100_Maadegruppen_Gram_og_Hodde_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	5200_Oevre_Odderup_ODS3_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	5300_Oevre_Arnum_ARL3_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	5400_Nedre_Odderup_ODS2_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	5500_Nedre_Arnum_ARL2_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	5600_Bastrup_BADS6_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	5700_Klintinghoved_KRL6_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	5800_Bastrup_BADS5_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	5900_Klintinghoved_KRL5_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	6000_Bastrup_BADS4_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	6100_Klintinghoved_KRL4_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	6200_Bastrup_BADS3_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	6300_Klintinghoved_KRL3_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	6400_Bastrup_BADS2_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	6500_Klintinghoved_KRL2_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	6600_Bastrup_BADS1_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	6700_Klintinghoved_KRL1_Vejle_Fjord_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	6800_Billund_BDS6_BDS9_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	6900_Vejle_Fjord_VFL6_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	7000_Billund_BDS4_BDS5_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	7100_Vejle_Fjord_VFL4_Bund	Ler og silt	Akvitard

Miocæn	7200_Billund_BDS3_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	7300_Vejle_Fjord_VFL3_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	7400_Billund_BDS2_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	7500_Vejle_Fjord_VFL2_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	7600_Billund_BDS1_Bund	Sand og grus	Akvifer
Miocæn	7700_Vejle_Fjord_VFL1_Bund	Ler og silt	Akvitard
Miocæn	7800_Billund_BDS0_Bund	Sand og grus	Akvifer
Prækvarter	8000_Palaeogen_ler_Bund	Ler	Akvitard
Kalk	8500_Danien_Kalk_Bund	Kalk	Akvifer
Kalk	9000_Skrivekridt_Bund	Kalk	Akvifer
Stensalt	9500_Stensalt_Top	Salt	Akvitard

2. Modellering af sen- og postglaciale lag

De sen- og postglaciale lag er modelleret ind i FOHM-modellen i kvælstofretentionsprojektet ved at tilføje 5 nye lag mellem terræn og bunden af FOHM-modellens oprindelige øverste lag (Tabel 2-1). Da der ikke var ressourcer til at modellere lagene i hele Danmark, blev der indledningsvist lavet en prioritering af områder, der vurderedes at have størst mægtigheder af sen- og/eller postglaciale lag (afsnit 2.3). For at opretholde systematik i tolkningsarbejdet, blev landet inddelt i tiles af 25 x 25 km. Der er kun fokuseret på at modellere områder med mægtigheder større end 2 m, da de øverste 2 m af FOHM-modellen overskrives med information fra jordartskortet i DK-modellen.

Tabel 2-1: De fem nye modellag

Overordnet gruppe	Nret model lagflade betegnelse	Litologi	Hydrogeologi
Kvartær	Lag1_Bund_Post_Glacial_Ler_Tørv_Gytje	Ler, tørv og gytje	Akvitard
Kvartær	Lag2_Bund_Post_Glacial_Sand	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	Lag3_Bund_Post_Glacial_Ler	Ler og silt	Akvitard
Kvartær	Lag4_Bund_Sen_Glacial_Sand	Sand og grus	Akvifer
Kvartær	Lag5_Bund_Sen_Glacial_Ler	Ler og silt	Akvitard

Sideløbende med kvælstofretentionsprojektet blev det meste af Nordjylland nord for Limfjorden modelleret af Miljøstyrelsen i Grundvandskortlægningsregi. Denne modellering inkluderede tilføjelse af de samme 5 lag, som GEUS har modelleret syd for Limfjorden (Tabel 2-1). Derudover blev de post- og senglaciale lag også indarbejdet i modelleringen af de tTEM-kortlagte områder fra Mapfield (afsnit 3).

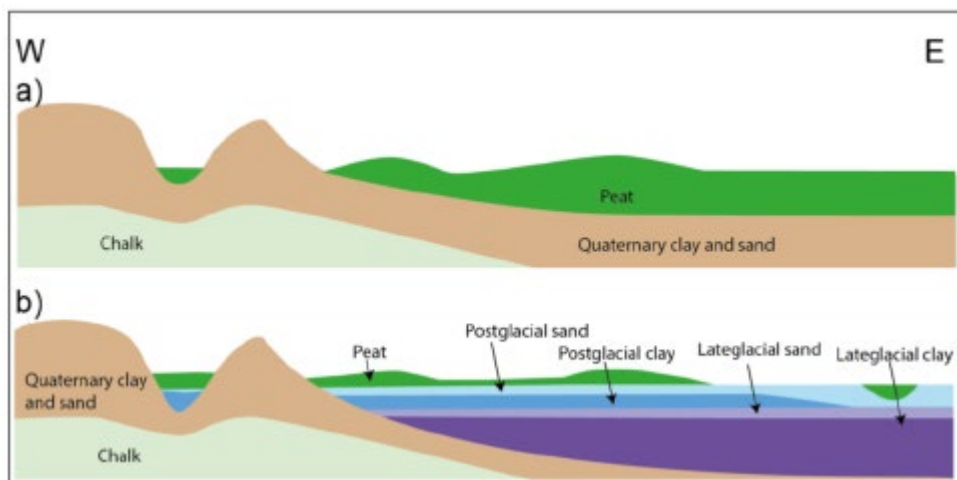
2.1 Konceptuel model

Sen- og postglaciale aflejringer findes i store dele af landet i meget varierende mægtigheder afhængig af forholdene på aflejringstidspunktet. For eksempel findes i det nordlige Jylland senglaciale marine sandede og lerede aflejringer, som blev dannet efter bortsmeltningen af isen i slutningen af Weichsel istiden, da Yoldiahavet dækkede området. Senere i postglacial tid fulgte endnu en transgression af Litorinahavet, hvor der igen aflejredes marint ler og efterfølgende kystnære, sandede aflejringer, da havet trak sig tilbage (Petersen, 1985).

I andre landsdele, som på vestkysten af Jylland, i marskområdet og i større ådale inde i landet, er det hovedsageligt postglaciale salt- og ferskvandsaflejringer, samt tørv, gytje, ler og – sand med organisk materiale, der er modelleret. Langs med vestkysten findes også en del flyvesand, som er afsat i postglacial tid.

Figur 2-1 viser en konceptuel model for a) FOHM-modellen og b) modelleringen i dette projekt. I FOHM-modellen har fokus typisk været på de dybere lag, og de post- og senglaciale lag er derfor stedvist indarbejdet i FOHM-modellens 'tørv og gytjelag' (Tabel 1-3, Figur 2-1a). Dette lag er ikke tolket ensartet og konsistent på landsplan og flere steder er '0100_Postglacial_toerv' brugt som en fællesbetegnelse for flere typer lag (Figur 2-1a) med mindre organisk

indhold end tørv. I dette projekt er den konceptuelle model opstillet således, at de post- og senglaciale lag er udskilt som selvstændige lag (Figur 2-1b, Tabel 2-1).



Figur 2-1. Konceptuelle modeller for henholdsvis a) FOHM-modellen og b) de nye lag i den hydrostratigrafiske model (Høyer et al., 2024).

2.2 Datagrundlag

Der er benyttet en række forskellige datasæt til prioriteringen (afsnit 2.3) og modelleringen (afsnit 2.4 - 2.5). Der findes en del forskelligt kortmateriale, der kan informere om aflejringer med højt organisk indhold. Kortene er baseret på forskellige typer data og undersøgelser og er til en vis grad - men ikke fuldstændigt - overlappende, hvorfor det er valgt at benytte alle de nævnte kort i prioriteringen af, hvilke områder, der skal modelleres (afsnit 2.3).

2.2.1 Eksisterende modeller

De terrænnære lag fra FOHM-modellen er indlæst i projektet, da lagene ud over at bidrage med vejledende tolkninger skal benyttes i den afsluttende lagjustering. FOHM-lagene er downloadet medio oktober 2022. Opløsningen af aflejringerne med potentielt højt organisk indhold var generelt ikke høj nok i FOHM-lagene til at indgå aktivt i tolkningen. Udover FOHM-modellen blev der lavet en indledende evaluering af andre eksisterende lokale modeller. Modellerne har dog generelt haft en større fokusdybde og har derfor ikke haft den nødvendige opløsning i dette interval til at bidrage til tolkningsarbejdet.

Den øverste gridcelle i DK-modellen (Stisen et al., 2020), svarende til de øverste 2 m af modellen defineres ud fra informationen i GEUS' Jordartskort (1:25.000) (Jakobsen et al., 2021). DK-modellens lag, der er kategoriseret som 'tørv og gytje', indbefatter de jordarter, der ses i Tabel 2-2. På nær brunkullet, svarer de øvrige kategorier til jordarter af interesse i forhold til at vurdere udbredelsen af de fem nye lag, der modelleres i kvælstofretentionsprojektet.

Tabel 2-2: Jordarter fra jordartskortet, der er kategoriseret som tørv og gytje i DK-modellen

F200 Ferskvandsdannelser
Ferskvandsgytje
Ferskvandstørv
Oligocæn/miocæn/pliocæn brunkul
Saltvandsgytje
Saltvandstørv
Ferskvandstørv
Saltvandsgytje

2.2.2 Boringer

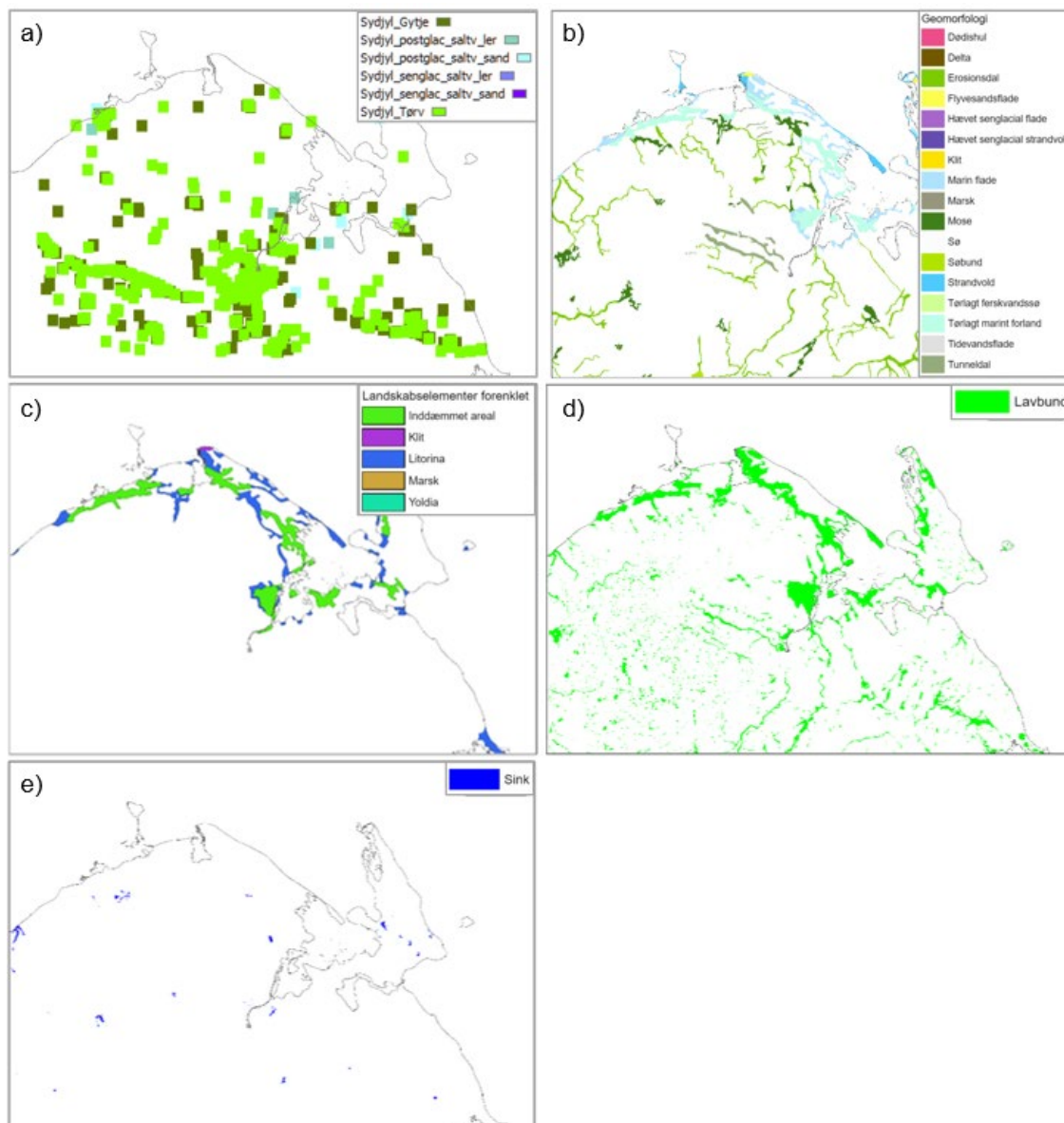
Boredata er downloadet fra boringsdatabasen, [Jupiter](#), for afgrænsede områder, og herefter indlæst i GeoScene3D (I-GIS, 2024). Som støtte for tolkningen er boringerne kvalitetsvurderet ved hjælp af Miljøstyrelsens kvalitetsvurdering (Damsgaard og Makwarth, 2020). Boringerne er inddelt i 7 forskellige kvalitetskategorier. Kategorierne kan vises på kortbladet og er benyttet både til indledende vurdering af datakvalitet i området samt til støtte ved placering af tolkningsprofiler. Yderligere beskrivelse af kvalitetsvurderingsklasserne kan ses i Madsen et al. (2025)

Til at understøtte den geologiske tolkning er der lavet en udsøgning på aflejringer med potentielt højt organisk indhold i Jupiter boringerne. Dette er gjort ved at udsøge boringer med mægtigheder af postglaciale aflejringer (i litologi-klassifikationen angivet som h*) eller senglaciale aflejringer (i litologi-klassifikationen angivet som y*) større end 2 meter. Postglacial ferskvandstørv (ft) og postglacial ferskvandsgytje (fp) kan aflejres som tynde lag imellem sandede og lerede aflejringer. Der er derfor udsøgt den største dybde til bunden af laget i Jupiter, og mægtigheden er herefter beregnet som afstanden mellem terræn og den største dybde. Kun boringer med mægtigheder større end 2 meter indgår i udsøgningen. De udsøgte boringer blev vist på kort i forbindelse med tolkningsarbejdet, som eksemplificeret i Figur 2-2a. I tolkningsarbejdet er der udover oplysningerne i den digitale Jupiter-database, i høj grad gjort brug af de udvidede prøvebeskrivelser og brøndborer-observationer for at bidrage med yderligere information. Disse prøvebeskrivelser er typisk vedhæftet som pdf'er i databasen.

2.2.3 Terrænmodel og geologiske kort

De hydrostratigrafiske flader, som modelleres i forbindelse med kvælstofretentionsprojektet, skal i sidste ende indgå i grundvandsmodelleringen i DK-modellen. For at sikre, at fladerne vil få den rigtige udbredelse, specielt i områder, hvor topografien er varierende, benyttes samme terrænmodel som indgår i DK-modellen, som derfor er indlæst i et 100x100 m grid.

Til brug i den geologiske modellering og/eller prioritering er der derudover benyttet information fra en række geologiske kort, hvor der er fokuseret på aflejringer, der kan forventes at have et højt organisk indhold. Figur 2-2b-e viser relevante temaer fra anvendte kort, eksemplificeret i et område på Nordfyn. For alle kortene vises kun de relevante temaer, der forventes at have et højt organisk indhold i aflejringerne. De udvalgte temaer for de forskellige kort er oplistet i afsnit 2.3.



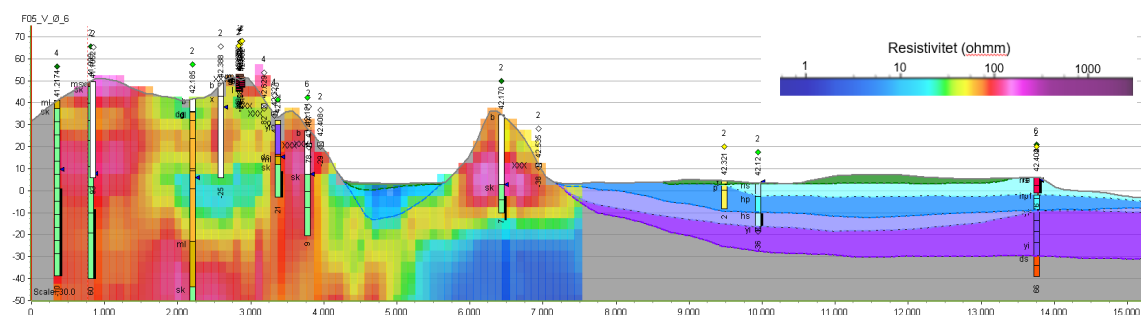
Figur 2-2: Relevante temaer om aflejringer med potentielt højt organisk indhold fra de forskellige geologiske kort, der er brugt under tolkningen og/eller prioriteringen. Eksemplet er fra Nordfyn og dækker et område svarende til 30 x 50 km. A) udsøgning af forekomster af aflejringer med organisk materiale baseret på litologiske beskrivelser i Jupiter borer b) geologiske aflejringsmiljøer kendetegnet ved potentielt højt indhold af organisk materiale baseret på det geomorfologiske kort fra GEUS, c) Landskabselementer med potentielt højt organisk materiale ifølge landskabselement kortet fra DCA, d) LavbundsJORDE ifølge lavbundskortet fra DCA e) Kortlagte organiskrige jorde i SINK projektet.

Figur 2-2b viser de relevante temaer fra GEUS' geomorfologiske kort over Danmark 1:200.000 (Jakobsen, 2022), der fokuserer på de geologiske aflejringsmiljøer. Figur 2-2c viser de relevante temaer fra landskabselementkort (<https://www.dca.au.dk/forskning/den-danske-jordklassificering>) fra DCA (Nationalt Center for Fødevarer og Landbrug). Kortet er

primært indgået i arbejdet med prioritering af modelleringsområder (afsnit 2.3). Figur 2-2d viser lavbundsjordene fra DCA's landsdækkende kort over lavbunds- og højbundsjord, udført i regi af Jordklassificeringen (<https://www.dca.au.dk/forskning/den-danske-jordklassificering>). Temaet for lavbundsjord er inddraget for at bidrage til prioriteringen af områder samt støtte i tolkningen af den horisontale udbredelse af aflejringerne. Figur 2-2e viser de organiske jorde, der er kortlagt i SINK-projektet (Gyldenkerne og Frederiksen, 2015). Rasterdatasættet er fremkommet på baggrund af indsamlede jordprøver fra 1975 – 2014. SINK-kortet bidrager hovedsageligt med meget lokal information.

2.2.4 Geofysik

Der er indlæst og stedvist benyttet geofysiske data fra SkyTEM, MEP og Paces i tolkningsarbejdet. De tolkede lag i modellen er alle relativt terrænnære, hvorfor geofysikken ofte ikke viser tilstrækkelig opløsning til at informere om lagene. På steder med store mægtigheder, specielt omkring Limfjorden kan enkelte strukturer opløses. Et eksempel på dette kan ses på Figur 2-3, hvor bunden af en dalstruktur (ca. 4000 - 5500 m) er afgrænset på baggrund af SkyTEM data.



Figur 2-3: Eksempel, hvor SkyTEM data er benyttet til afgrænsning af dalstruktur (profilafstand 4000-5500 m) ved Limfjorden.

2.3 Prioritering af områder

Der er lavet en prioritering af tiles, der blev udvalgt til tolkning i projektet (Figur 2-1). Prioriteringen er lavet på baggrund af udbredelse og mægtighed af aflejringer med et forventeligt indhold af organisk materiale. Mægtigheden af FOHM-laget 100_Postglaciale_tørve_bund er ikke inddraget i forbindelse med prioriteringen, fordi laget en del steder dækker over flere lag end kun tørven (se afsnit 2.1). Følgende temaer er udvalgt fra de forskellige datasæt/geologiske kort til at vurdere udbredelse og mægtigheder:

1. Udbredelser af laget benævnet 'tørv og gytje' i DK-Modellen
De øverste 2 m i DK-modellen er udarbejdet på baggrund af jordartskortet. Temaerne, der udgør tørv- og gytjelaget i DK-modellen er listet i Tabel 2-2. På nær brunkul, stemmer de øvrige klasser, der indgår i DK-modellens kategorisering af tørv og gytje fint overens med de aflejringer, der er af interesse i kvælstofretentionsprojektet. Eftersom brunkul er sjældent forekommende i overfladen, er informationen således benyttet til at informere om, hvorvidt relevante aflejringer er til stede indenfor en given tile.

2. Udbredelser fra GEUS' geomorfologiske kort (eksemplificeret på Figur 2-2b)
Der er indarbejdet 16 landskabselementer fra det geomorfologiske kort over Danmark. Elementerne er udvalgt efter hvilke, der helt eller delvist kan indeholde organiske aflejringer. Følgende elementer er medtaget:

Tunneldal
Dødishul
Erosionsdal
Hævet senglacial flade
Hævet senglacial strandvold
Marsk
Delta
Strandvold
Marin flade
Søbund og sø
Mose
Klit
Flyvesandsflade
Tørlagt ferskvandssø
Tørlagt marint forland
Tidevandsflade

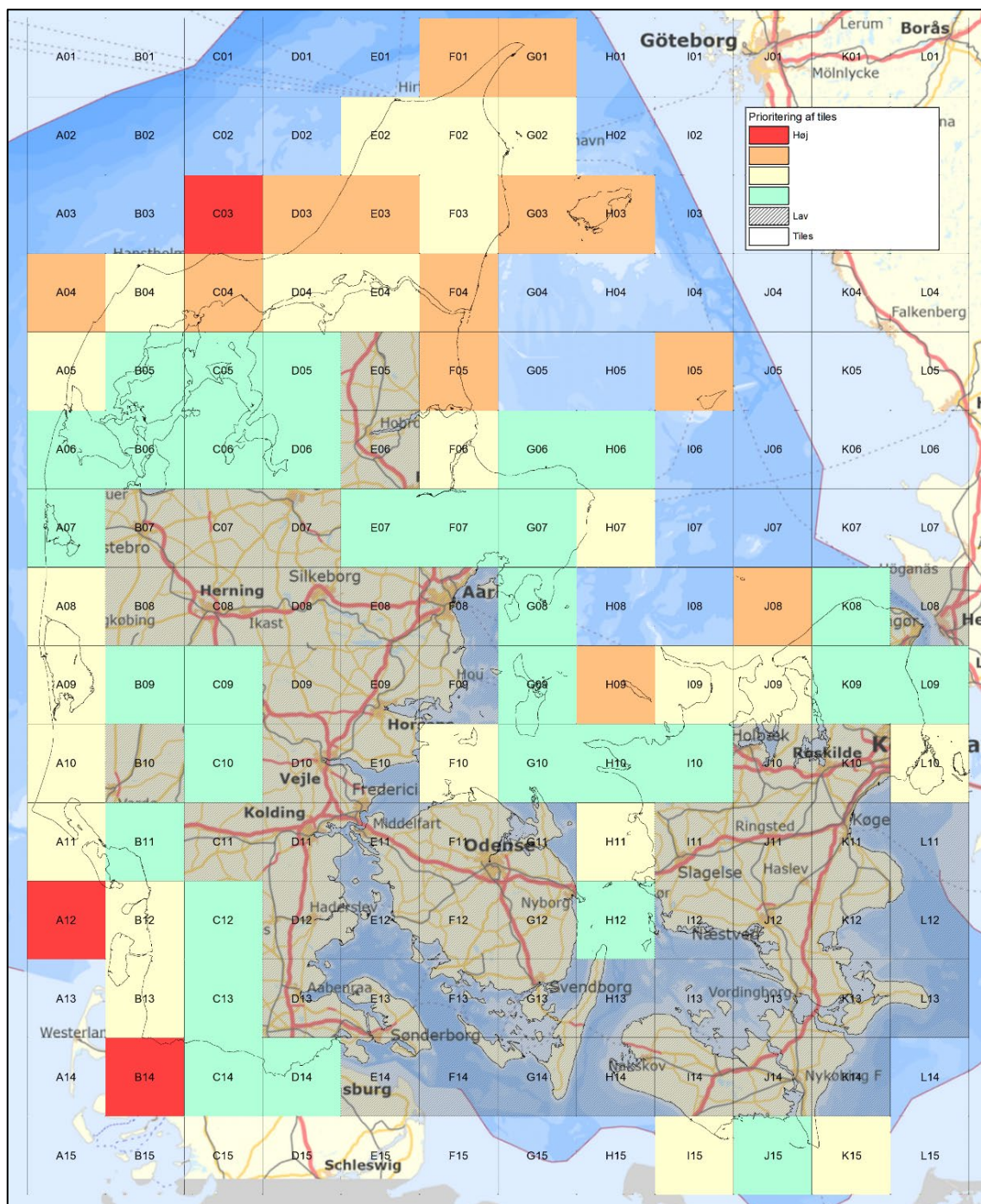
3. Udbredelser fra det forenklede kort over Landskabselementer (eksemplificeret på Figur 2-2c). Fra datasættet med forenklede landskabselementer er følgende landskabstyper medtaget:

Klit
Yoldia
Litorina
Marsk
Inddæmmet areal

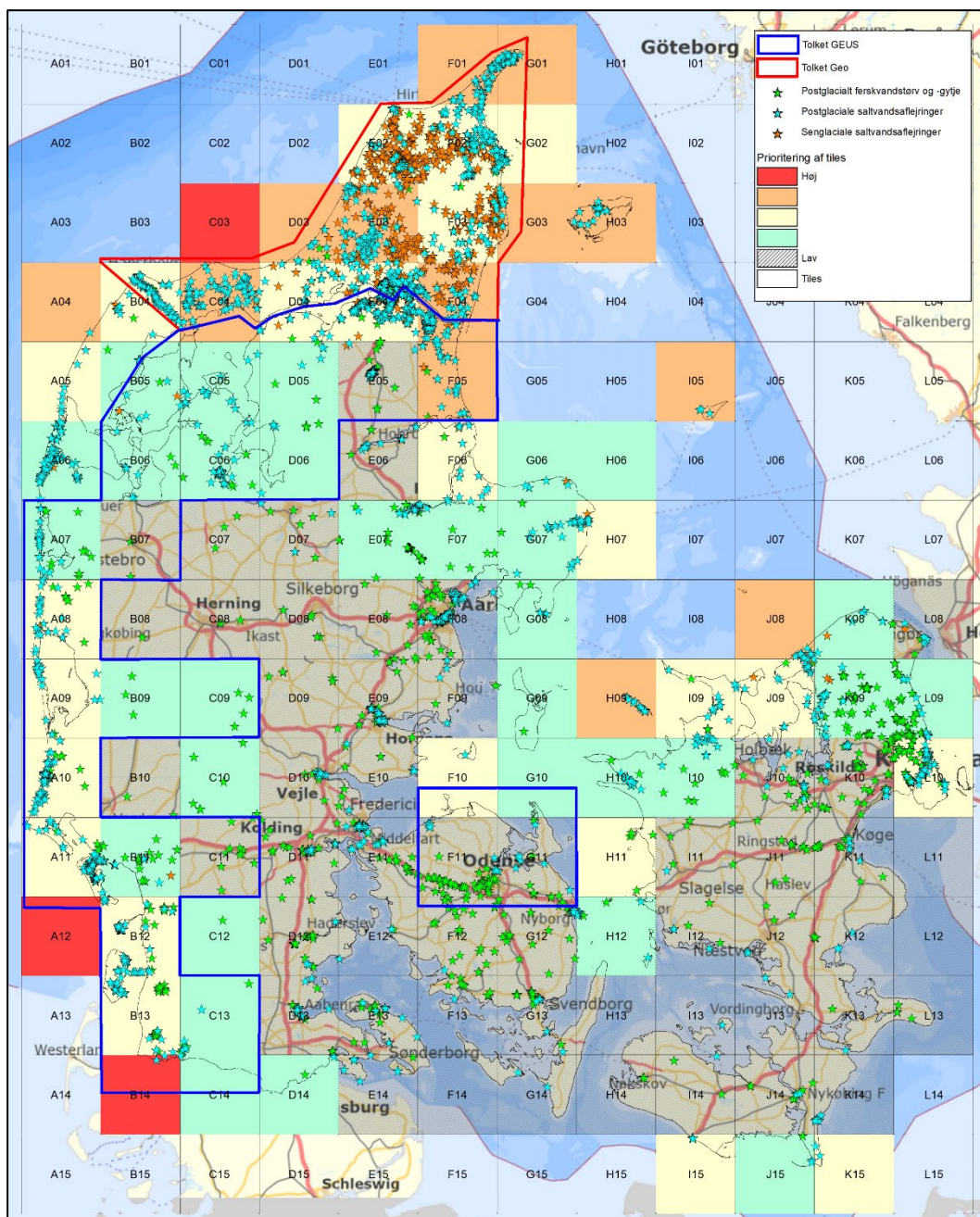
4. Udbredelser af lavbundsarealer ifølge Lavbundskortet fra DCA (eksemplificeret i Figur 2-2d)
5. Udbredelser af organiskholdige jorde fra SINK-datasættet (Gyldenkerne og Frederiksen, 2015). Eksemplificeret i Figur 2-2e)

Arealet af aflejringer med potentielt organisk indhold er beregnet for hvert datasæt indenfor landområdet i en tile, og herefter er den procentvise andel beregnet. Efterfølgende er resultatet adderet for alle datasæt. Tiles med den højeste prioritet er således dem, hvor der er størst enighed mellem datasættene om, at der findes store arealer med aflejringer, der indikerer højt indhold af organisk materiale (Figur 2-4). Informationen om forekomsten af sen- og postglaciale aflejringer i Jupiter er vist sammen med prioriteringskortet på Figur 2-5.

På baggrund af områdeprioriteringen blev det besluttet at fokusere på området omkring Limfjorden, Vendsyssel, Vestkysten samt Nordfyn (Figur 2-5). Området nord for Limfjorden blev modelleret af Geo for Miljøstyrelsen (Figur 2-5) sideløbende med projektet og er efterfølgende inddraget i den geostatistiske simulering af lagfladerne (se Madsen et al., 2025).



Figur 2-4: Prioritering af tiles til modellering af aflejringer med potentielt højt organisk indhold.



Figur 2-5: Prioritering af tiles til modellering af aflejringer med potentielt højt organisk indhold vist sammen med borer fra Jupiter, der indeholder sen- og postglaciale salt- og ferskvandsaflejringer. Figuren viser desuden de tiles, der blev udvalgt til modellering af GEUS (blå) og sideløbende med projektet blev modelleret af Geo (rød).

2.4 Modelleringsstrategi

Der er opstillet en manuel lagmodel med en diskretisering på 100 x 100 m, som input til det efterfølgende grundvandsmodelarbejde. Modellen er opstillet i modellerings-softwaren Geo-Scene3D Builder (I-GIS, 2024), version 12.0.0.697.

Tolkningerne er generelt prioriteret i områder med troværdig boringsinformation vedrørende de nye lag. Typisk er der kun lidt tilgængelig boringsinformation i ådalene, hvilket gør det svært at tolke tykkelserne af lagene langs ådalene. I en del tilfælde er der derfor ikke lavet ny modellering i relevante, større, ådale, grundet manglende datagrundlag til at foretage en troværdig modellering. Udover boringsinformationen har modelløren støttet sig til konceptuel geologisk forståelse, landskabsanalyse, geomorfologi og terrænniveauer ift. at vurdere udbredelserne af lagene. Geofysik har stedvist været brugt som støtte (Figur 2-3).

2.4.1 Tolkningspunkter og lagflader

Da der er foretaget tolkning i flere områder på samme tid og af forskellige modellører, har hver modellør haft sin egen tolkningsdatabase under de lokale tolkninger.

Lagfladetolkning er foretaget ved at sætte tolkningspunkter ved bunden af lagene. Udover tolkningspunkter, der er afsat direkte på lagfladen, er der afsat forskellige typer af støttepunkter for at styre fladerne.

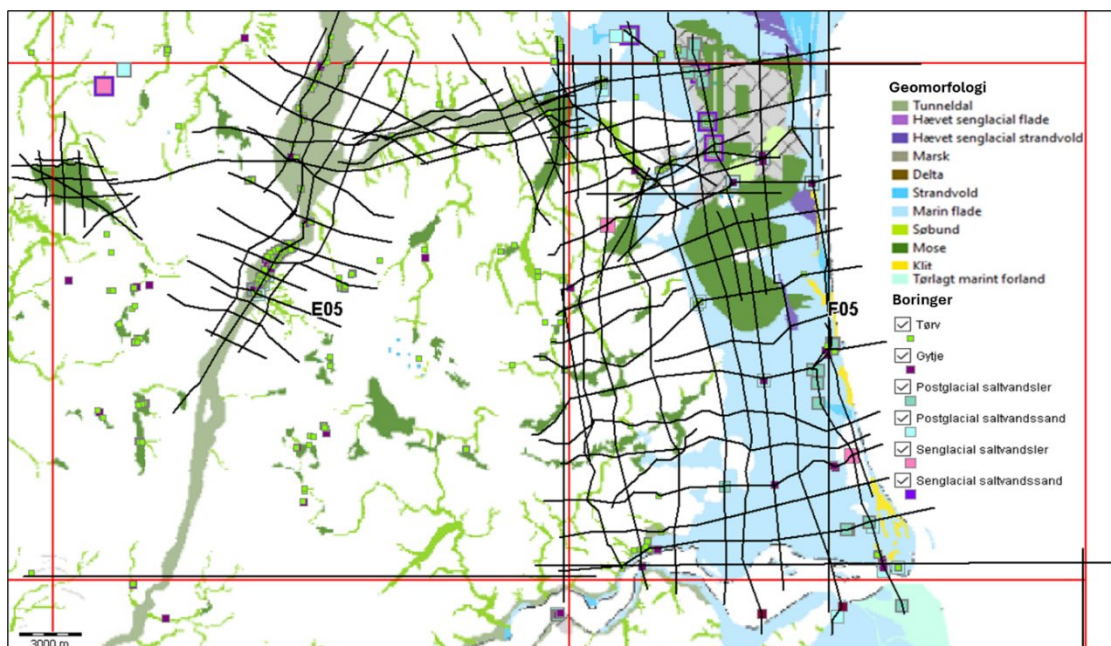
Tolkningspunkter og fladestyrende støttepunkter er markeret i tolkningsdatabaseen på følgende vis:

- Almindelige tolkningspunkter får "pointtype 0" i tolkningsdatabaseen.
- Støttepunkter, der er sat for at lukke lag, som kiler ud for eksempel ved terræn eller mod toppen af det overliggende lag, har fået "pointtype 1" i tolkningsdatabaseen.
- Støttepunkter, der er sat for at trække en flade op/ned, for at ramme laggrænsen i en boring (fx i områder hvor lagene veksler meget i koten), har fået "pointtype 4" i tolkningsdatabaseen.

2.4.2 Tolkningsprofiler

Relevante temaer fra det geomorfologiske kort (afsnit 2.3) og en udsøgning på boringer med lag af sen- og postglaciale aflejringer danner baggrund for profiloptegningen (Figur 2-6).

Tolkningen er foretaget langs faste profiler kombineret med dynamisk profiltolkning for at sikre, at boringer med sen- og postglaciale aflejringer er med i tolkningen. I områder hvor de sen- og postglaciale aflejringer forekommer mere lokalt eller sporadiske, er der kun optegnet lokale faste profiler (Tile E05 på Figur 2-6). I områder hvor der forventes en større udbredelse af de sen- og postglaciale lag, er de faste profiler optegnet i et net med omkring 5 km mellem profilinjerne (Tile F05 på Figur 2-6).



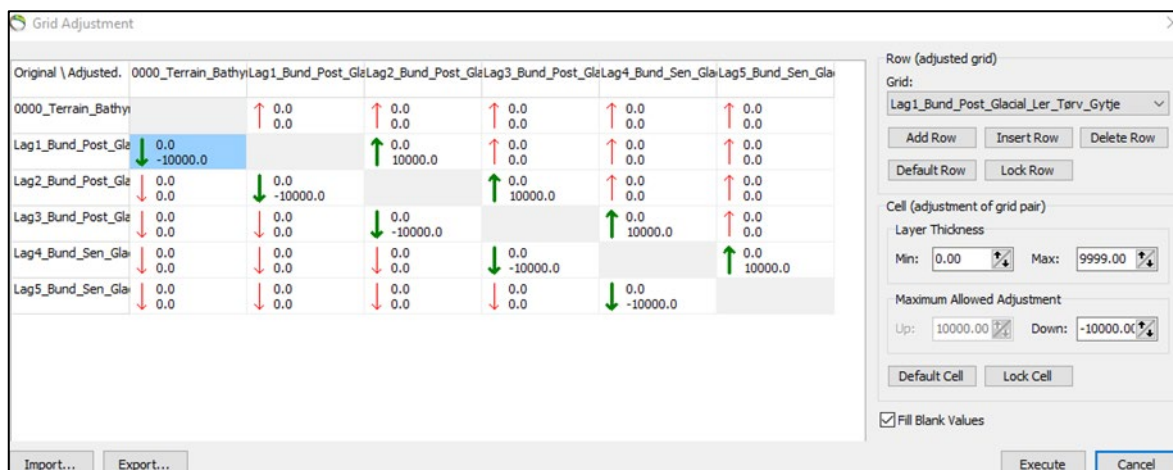
Figur 2-6: Eksempler på profildækning (sorte linjer) fra to forskellige tiles (røde linjer). Til venstre ses Tile E05, hvor postglaciale aflejringer forekommer sporadisk i områder i tunneldalen og til højre ses Tile F05, der er kendetegnet ved store mængtigheder af marine aflejringer og tørv (Lille Vildmose). Beliggenhed af de to tiles kan ses på Figur 2-4 og Figur 2-5. Baggrundskortet viser udvalgte temaer fra det geomorfologiske kort (afsnit 2.3). Boringer med tørv, postglaciale og senglaciale aflejringer er vist på kortet.

2.4.3 Interpolation og fladejustering i GS3D

Tolkningspunkterne er løbende blevet interpoleret under tolkningen med en Kriging ordinary gridrutine i GS3D. Efter endt tolkning af lagflader er der foretaget en manuel tilpasning af variogrammerne før interpolationen af tolkningspunkterne i GS3D. Lagfladerne er interpoleret med en cellestørrelse på 100 x 100 m indenfor scene extent. Der er anvendt en søgeradius på 2500 m for alle lag med undtagelse af tørvlaget, som kun har en søgeradius på 1000 m, fordi tørvlagene kun findes i mindre, afgrænsede områder. Scene extent er angivet med koordinater i hele antal hundreder, for at gridnoderne kommer til at svare til gridnoderne i FOHM-modellen.

Lagfladerne er efterfølgende korrigeret ved hjælp af GS3D's grid adjustment tool, så fladerne hverken krydser hinanden eller terrænfladen. I grid-justeringen er terrænet holdt fast i forhold til alle de andre flader (Figur 2-7).

I GS3D's grid adjustment tool findes funktionen "fill blanks", som er anvendt på alle de tolkede flader. Denne funktion muliggør, at der kun sættes tolkningspunkter, hvor laget reelt eksisterer. Udenfor dette område lægger bunden af det griddede lag sig på den ovenover liggende flade, f.eks. terræn. På denne måde kommer lagfladerne til at eksistere i hele modelrummet, uden at der skal sættes tolkningspunkter i hele modelrummet. Der er benyttet samme terrængrid som i DK-modellen (afsnit 2.2.3).

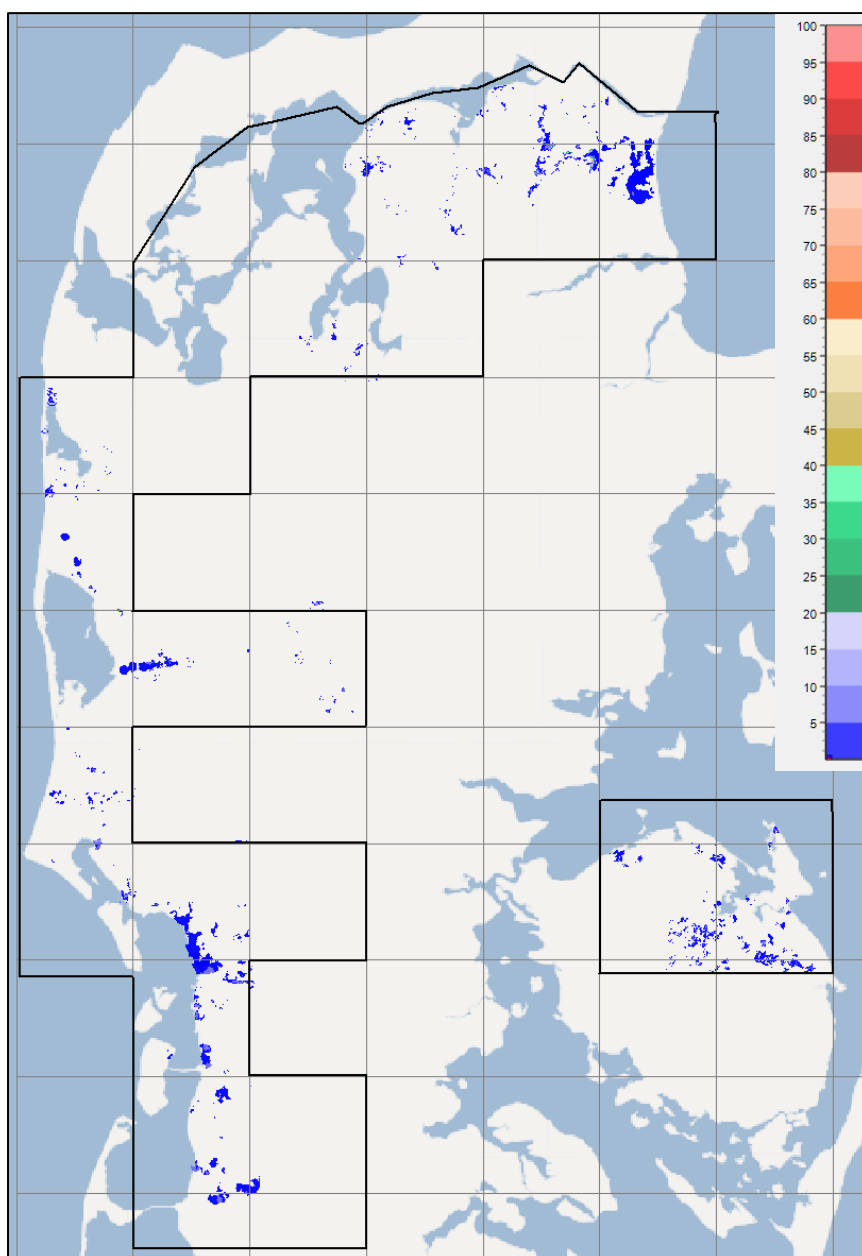


Figur 2-7: Den anvendte gridjustering i GS3D under tolkningen.

2.5 Resultater

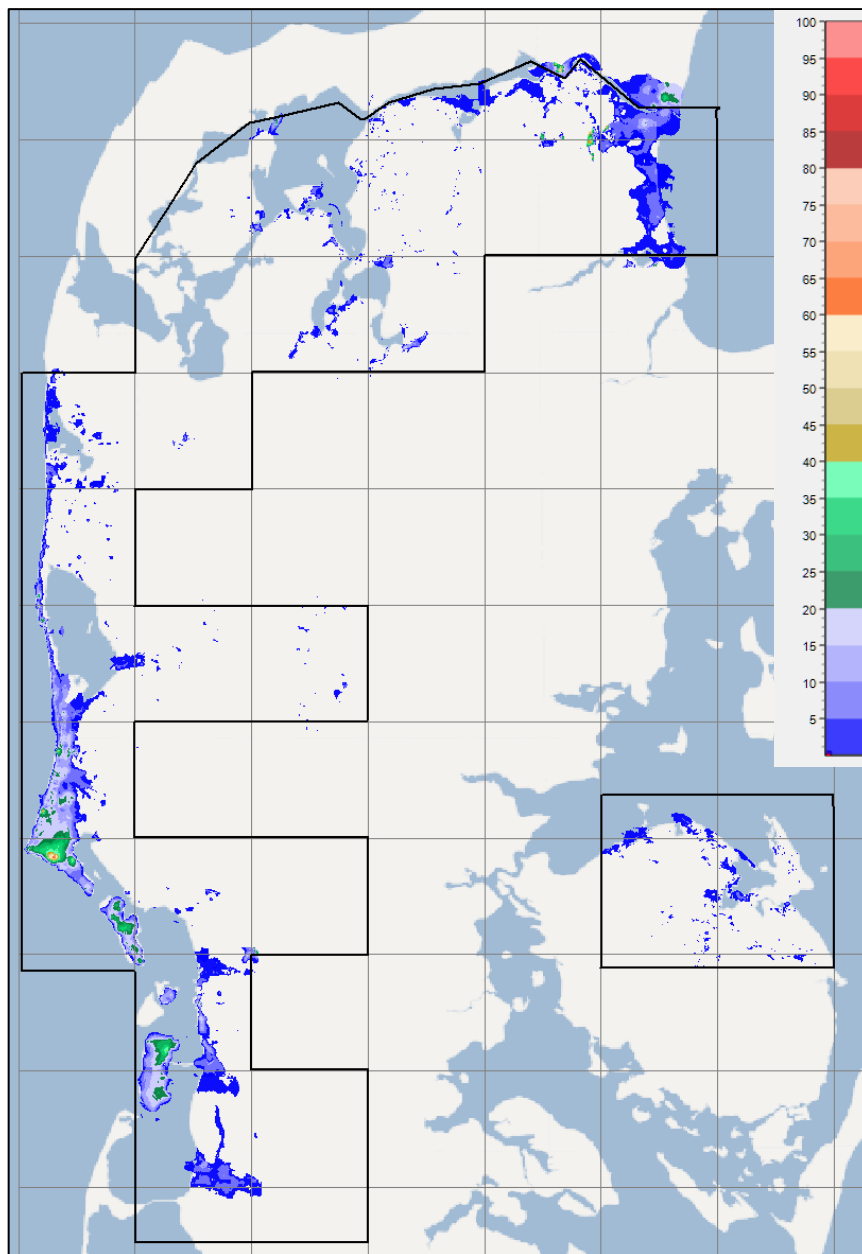
Der er udarbejdet mægtighedskort (isopachkort) over de fem lags udbredelse i de tolkede tiles, samt et kort over den samlede mægtighed af de fem lag (Figur 2-8 til Figur 2-12).

Isopachkortet for postglacialt tørv og - gytje (Figur 2-8) viser, at laget er udbredt i flere af de tolkede områder, men med begrænset mægtighed. Tolkningen har været begrænset i de større ådals-systemer på grund af manglende boringsdata i ådalene. I disse områder forventes derfor større udbredelse og mægtigheder, end der ses på kortet.



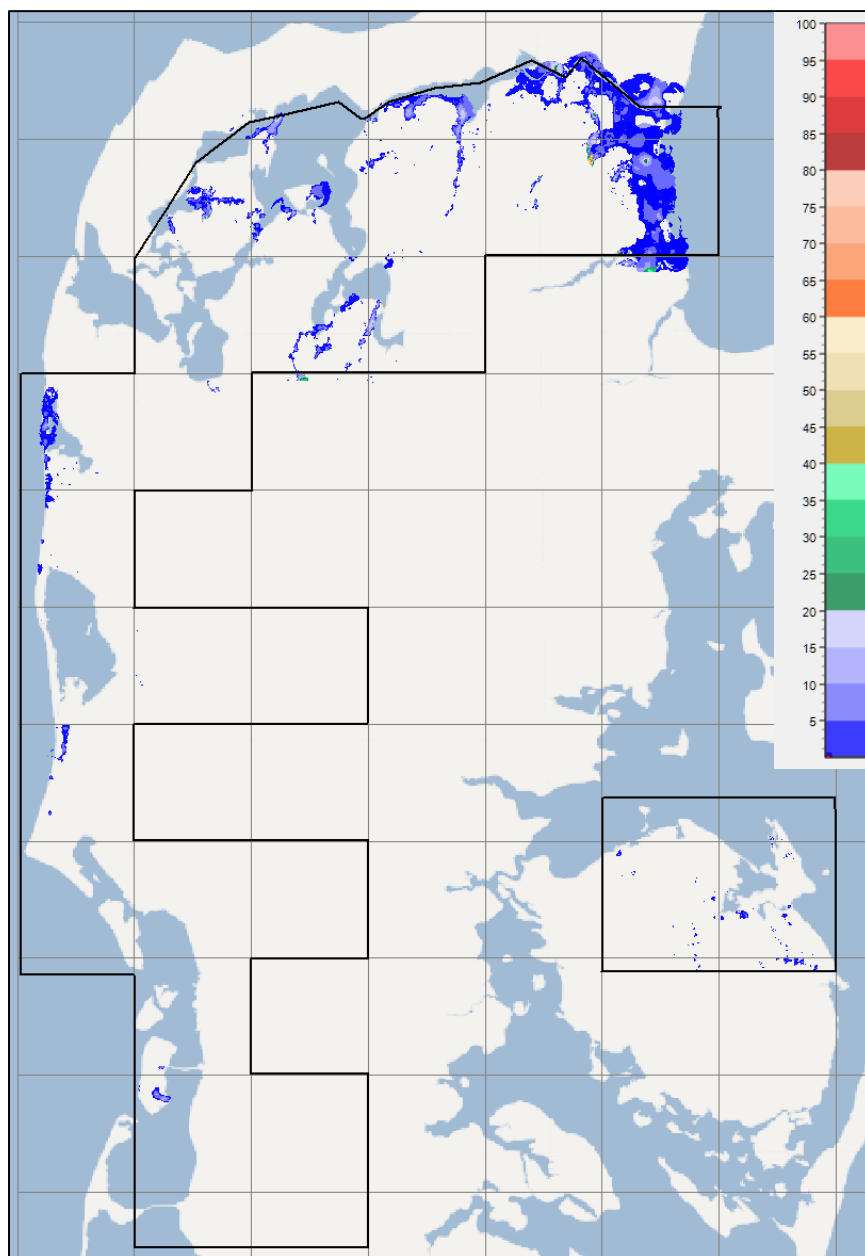
Figur 2-8: Isopachkort over mægtigheden af Lag 1 (Tabel 2-1), postglaciale tørt og -gytje. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af laget (Figur 2-5).

Isopachkortet over det postglaciale sand (Figur 2-9) viser, at de største mægtigheder ses i forbindelse med barrierekomplekserne langs vestkysten. Også ved Limfjorden og den øvrige del af vestkysten ses væsentlige aflejringer. Laget forekommer i næsten alle områder, der er prioriteret i tolkningsarbejdet.



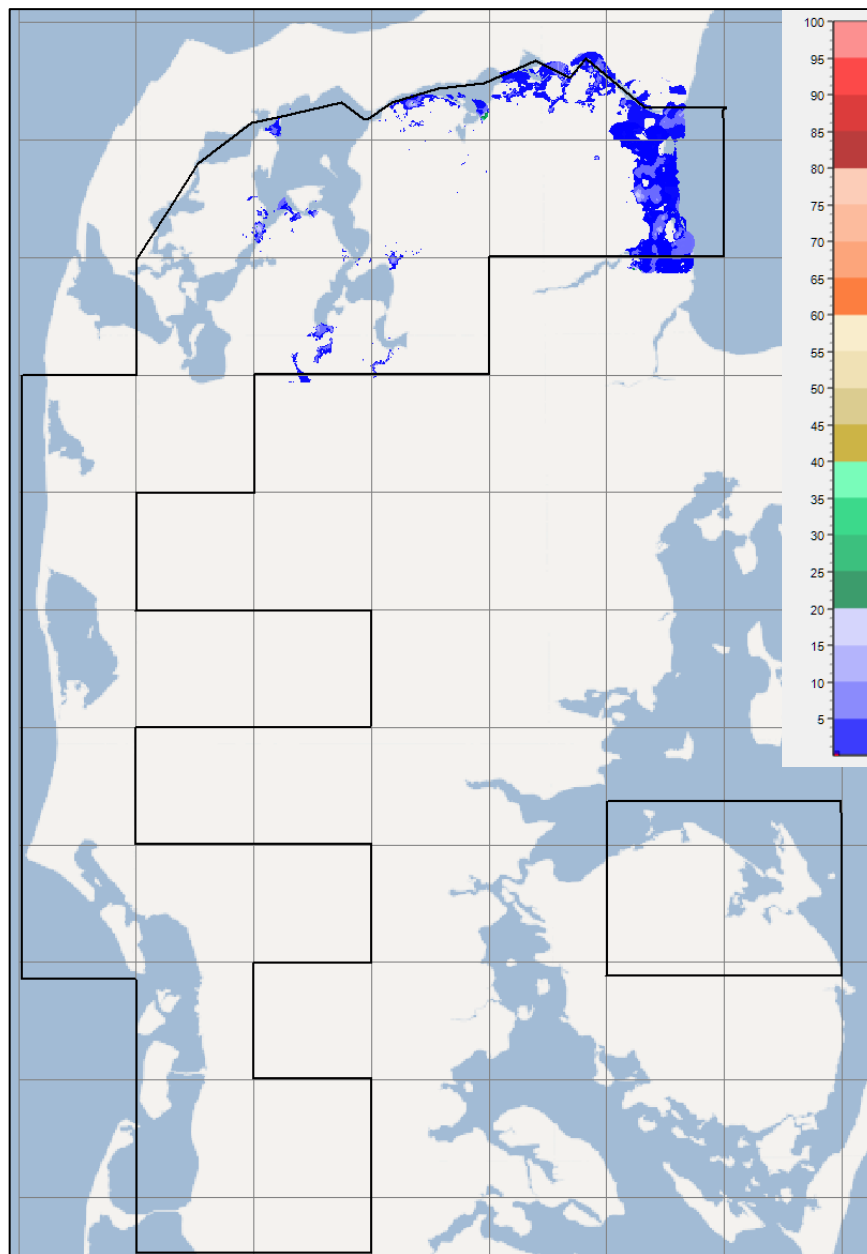
Figur 2-9: Isopachkort over mægtigheden af Lag 2 (Tabel 2-1), postglacialt sand. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af laget (Figur 2-5).

De største mægtigheder af postglacialt ler (Figur 2-10) ses langs Limfjorden og Kattegatky-
sten, hvor aflejringerne overvejende stammer fra Litorina-transgressionen. I de øvrige tol-
kede områder ses begrænsede – og kun lokale - forekomster af postglacialt ler.



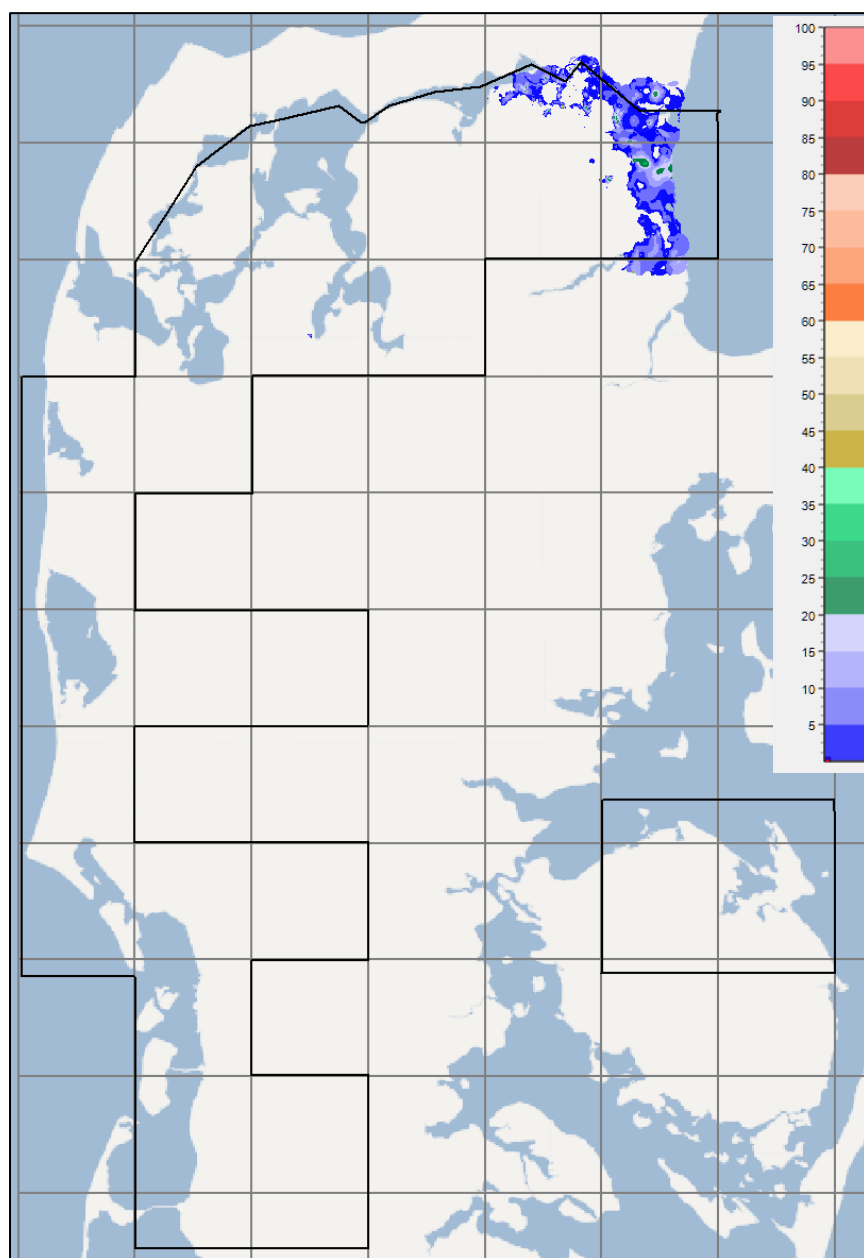
Figur 2-10: Isopachkort over mægtigheden af Lag 3 (Tabel 2-1), postglaciale ler. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af laget (Figur 2-5).

De største mægtigheder af senglacialt sand (Figur 2-11) ses i den østlige del af Limfjorden og langs Kattegatkysten, hvor aflejringerne stammer fra Yoldia-transgressionen. Der er ikke fundet senglaciale sandaflejringer langs Vestkysten. Dette kan til dels skyldes, at der i boreringsbedømmelserne ikke er skelnet mellem postglaciale og senglaciale sand.



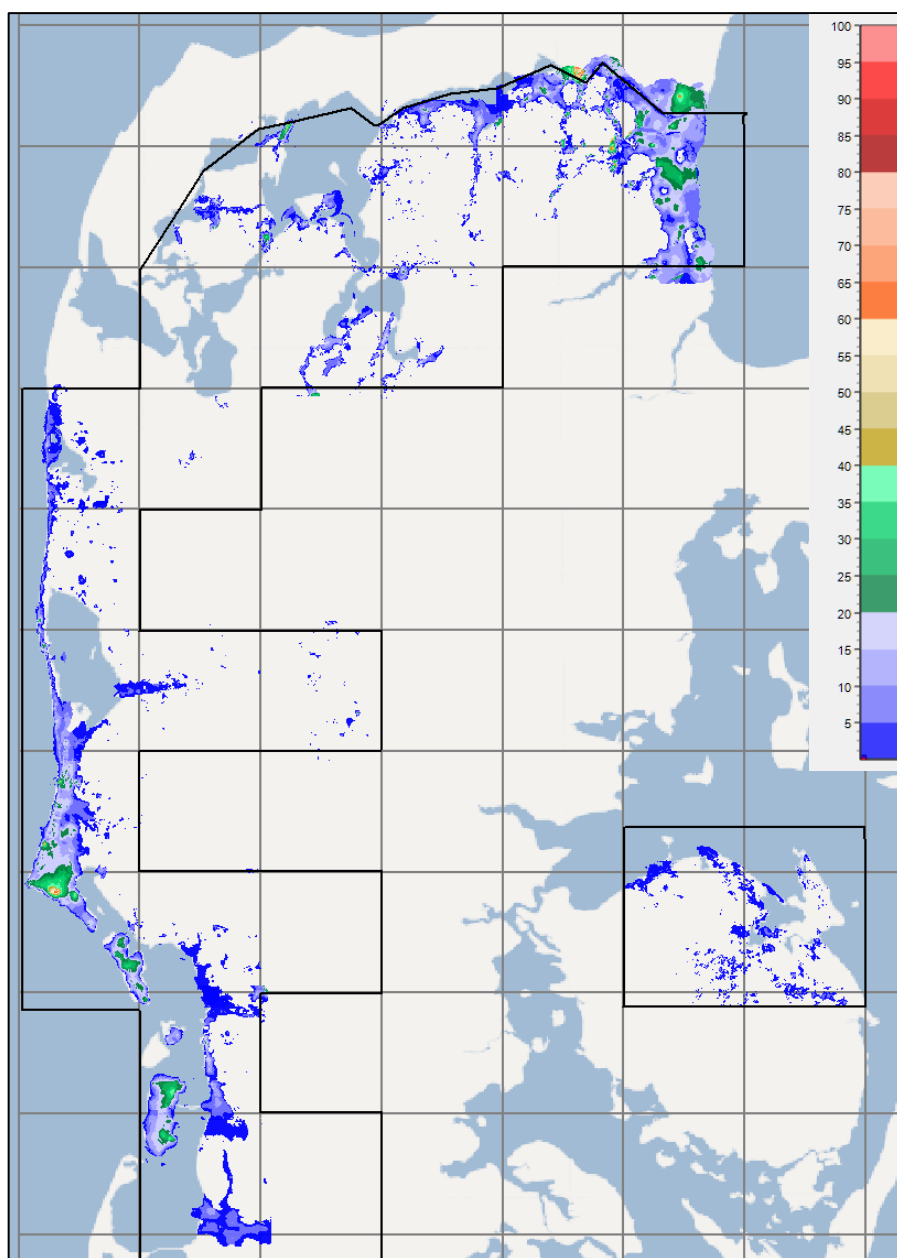
Figur 2-11: Isopachkort over mægtigheden af Lag 4 (Tabel 2-1), seneglacialt sand. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af laget (Figur 2-5).

Senglacialt ler (Figur 2-12) er kun fundet i borer i den østlige del af Limfjorden og langs Kattegatkysten, hvor laget er tolket med mægtigheder op til ca. 20 m.



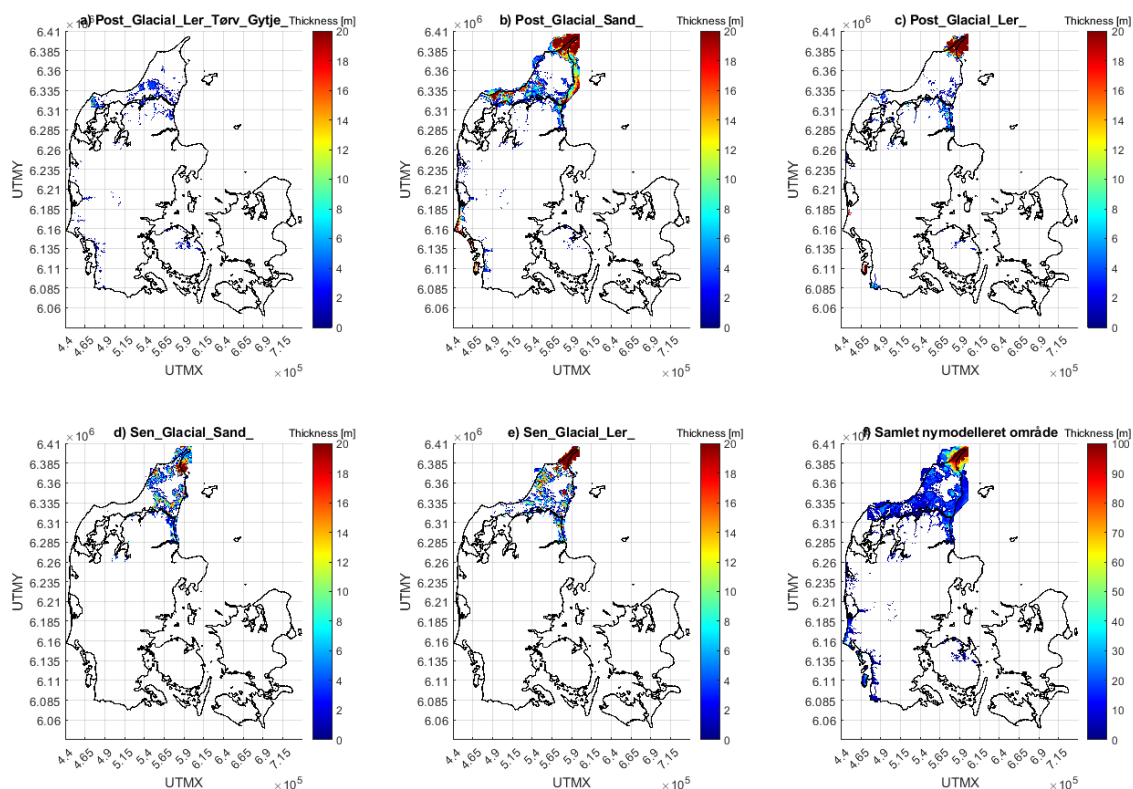
Figur 2-12: Isopachkort over mægtigheden af Lag 5 (Tabel 2-1), senglacialt ler. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af laget (Figur 2-5).

Den samlede mægtighed af de fem tolkede enheder ses i Figur 2-13. De største mægtigheder ses i den østlige del af Limfjorden og i barrieresystemerne langs Vestkysten. Begge steder ses lokale mægtigheder på op til ca. 80 meter.



Figur 2-13: Den samlede mægtighed af de fem tolkede enheder. Den sorte afgrænsning markerer områderne, hvor GEUS har udført tolkninger af lagene (Figur 2-5).

Isopachkortene (Figur 2-8 – Figur 2-13) er udelukkende udarbejdet på baggrund af GEUS' tolkninger syd for Limfjorden og mægtigheder, der på disse kort ses nord for Limfjorden, er derfor interpolationsartefakter. I forbindelse med det geostatistiske arbejde i kvælstofretentionsprojektet er de 5 flader forbundet med de ny-modellerede flader af Geo nord for Limfjorden. Dette arbejde er beskrevet i Madsen et al. (2025). Figur 2-14 viser mægtighederne i hele landet – inklusiv områderne modelleret af Geo.



Figur 2-14: Mægtigheder af de 5 lag og samlet mægtighed i hele landet fra Madsen et al. (2025).

2.6 Sammenligning med den oprindelige (FOHM) model

Sammenlignes den nye hydrostratigrafiske model med den oprindelige FOHM-model, ses det tydeligt, at de to modeller er udarbejdet med basis i to forskellige konceptuelle geologiske forståelsesmodeller (Figur 2-1): Hvor der i FOHM-modellen kun opereres med ét postglacialt lag, kaldet "Tørv", er der i den nye hydrostratigrafiske model modelleret med fem lag. Herved opnås en bedre opløsning af den terrænnære geologi, specielt i områder med gode informationer fra borer i Jupiterdatabasen. Dette har ikke kun en effekt, når der er tale om at kortlægge geologiske lag med et højt organisk indhold og dermed et kvælstofretentions potentiale, men da der både er tale om lag med magasin egenskaber (sandlag) og dæklagsegenskaber (lerlag), vil den nye opdeling også bidrage til en forbedret hydrostratigrafi og sårbarhedskortlægning i de modellerede områder.

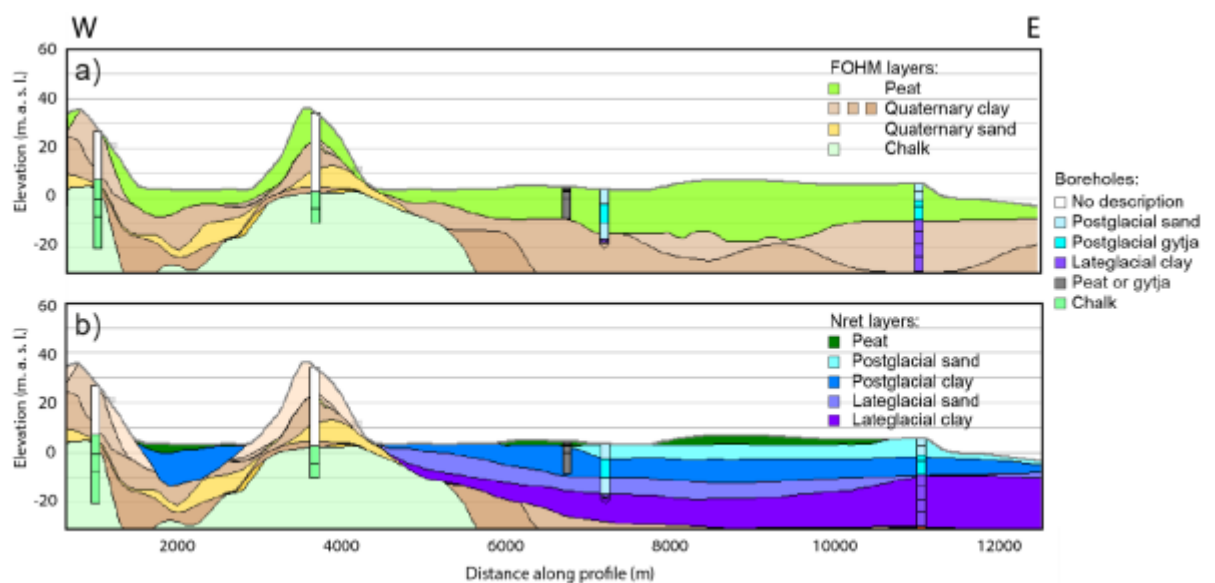
Figur 2-15 viser et eksempel på forskellen mellem den nye hydrostratigrafiske model og den oprindelige FOHM-model. Eksemplet er fra tile F05 (Figur 2-1 og Figur 2-6) og viser et V-Ø strygende profil fra Svanfolk Bakker i vest, krydsende mellem de to søer Birkesø og Toftesø ved lille Vildmose og helt ud til kysten i øst.

På profilet ses, at FOHM-modellen (Figur 2-15a) kun har ét postglacialt lag, kaldet "Tørv", der overlejrer de glacielle - og prækvartære lag. I det viste eksempel indeholder laget "Tørv" alle postglaciale lag uanset om det er tørv, sand eller gytje. Det seneglacielle marine Yoldia ler

(lilla farve i boringen, Figur 2-15) længst mod øst, er i FOHM-modellen tolket sammen med det underliggende lag, som også kan indeholde glaciale lag.

I den nye hydrostratigrafiske model (Figur 2-15b) opløses de geologiske informationer fra boringerne bedre. Det ses, at det øverste tørvelag kun findes lokalt i området, mens de marine sen- og postglaciale sand- og lerlag findes i større mængtigheder og som gennemgående enheder. Lagene under den glaciale flade (bunden af det senglaciale ler (lilla farve), Figur 2-15b) og de prækvartære lag, der i dette område er repræsenteret ved kalk, er de samme i begge modeller.

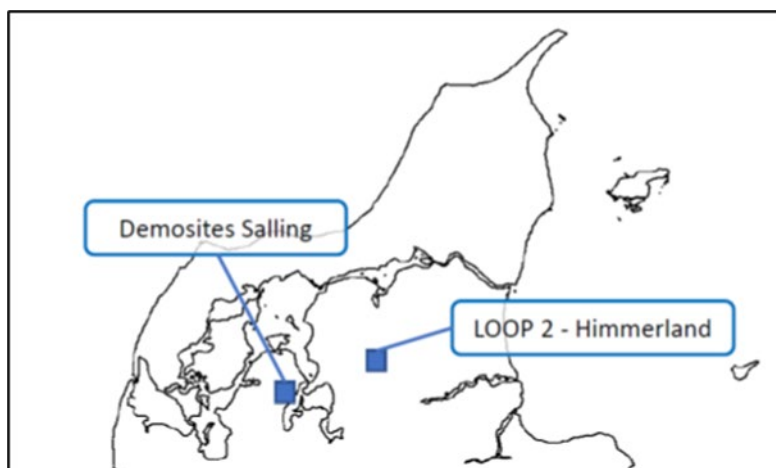
Hen over bakkelandskabet i den vestlige ende af profilet, er der i FOHM-modellen anført et tørvelag, som ikke er tolket i den nye model. Dette formodes at være et artefakt, der er fremkommet efter gridning af den oprindelige model og ikke en reel tolkning.



Figur 2-15: Sammenligningseksempel mellem hydrostratigrafien i FOHM (a) og de ny-mo-dellerede lag i (b). Vertikal overhøjning 30x. Figuren stammer fra Høyer et al., 2024.

3. Opdateret hydrostratigrafi i tTEM-kortlagte områder fra MapField

Der er i dette projekt foretaget en opdatering af FOHM-modellen i udvalgte tTEM kortlagte områder fra forskningsprojektet MapField (Sandersen og Kallesøe, 2021) (Figur 3-1). Områderne blev udvalgt, da disse var de mest relevante af MapField områderne i forhold til kvælstofretentionskravet jævnfør den tidligere version af kvælstofretentionskortet. Der er således lavet ny modellering i LOOP2 Himmerland (Blicher-Mathiesen et al., 2024), samt indlæst en opdatering af FOHM-modellen i de to demosites Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk i Salling (modelleret af NIRAS, 2023). Opdateringen af hydrostratigrafien havde to formål: 1) en forbedring af FOHM-modellen terrænnært i områder med forekomster af sen- og postglaciale lag og 2) en generel forbedring af den hydrostratigrafiske model takket være den væsentlige forbedring i datagrundlaget.



Figur 3-1: Udsnit af Jylland der viser placeringen af demosites på Salling og LOOP2 – Himmerland (Sandersen og Kallesøe, 2021).

3.1 Demosites: Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk på Salling

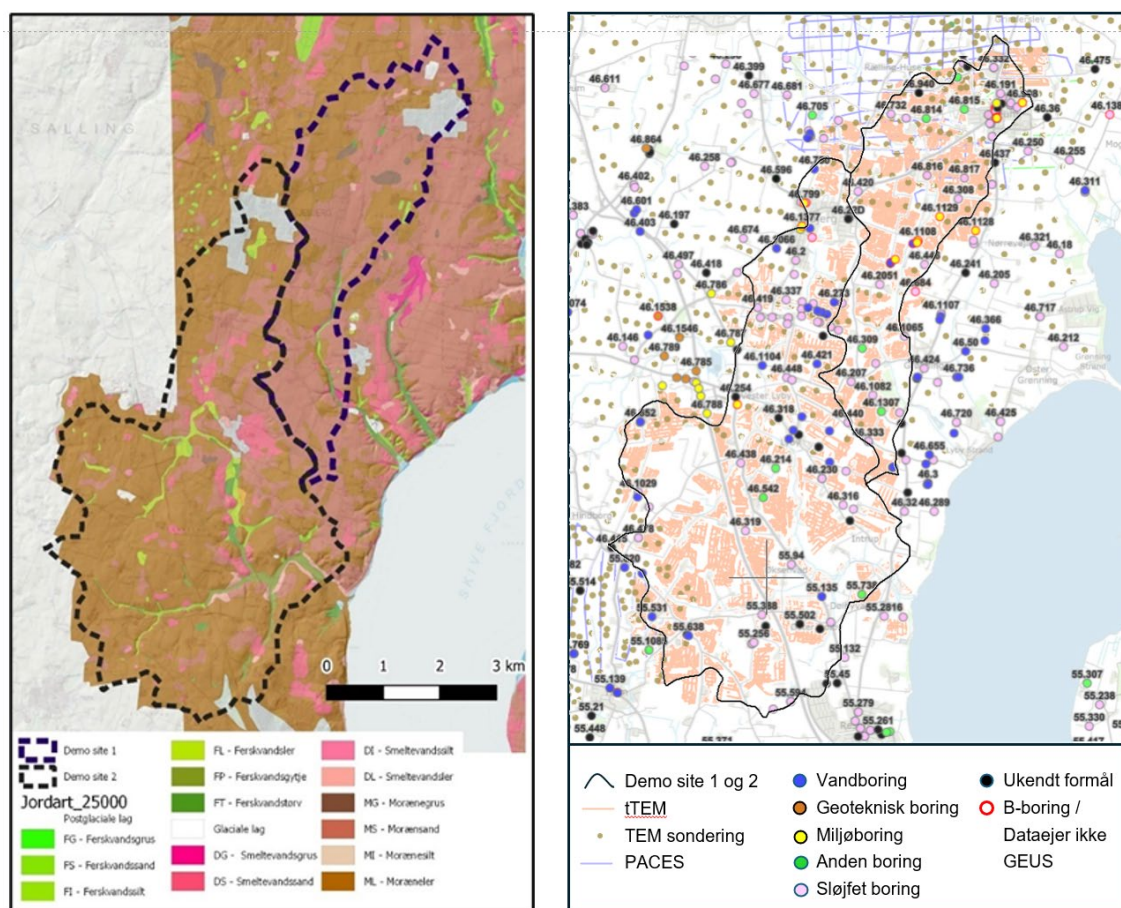
I områderne Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk i Salling i det nordlige Jylland (Figur 3-1 og Figur 3-2) har NIRAS for MST-Aalborg foretaget en opdatering af den gældende FOHM-stratigrafi i forhold til de nye tTEM data. Der er i den henseende foretaget en opdatering i Geoscene3D af FOHM tolkningspunkt-databasen samt generering og justering af nye lagflader iht. gældende praksis i FOHM-modellen (NIRAS, 2023).

I dette projekt er modellen blevet gennemgået dels for at undersøge, om opdateringen inkluderede sen- og postglaciale lag, dels hvad opdateringen ellers har ført til at ændringer for de øvrige modellag. Efter gennemgangen fremgik det, at der ikke er tolket sen- og postglaciale lag i den nye opdatering. Der er dog heller ikke, hverken i det geomorfologiske kort eller i vores SQL-søgning i jupiterdatabasen, fundet mange hits på sen- og postglaciale aflejringer i områderne, og der hvor de eksisterer, er mægtigheden af aflejringerne mindre end 2 m under terræn. Da alle lag under 2 m fra terræn automatisk tilskrives information fra

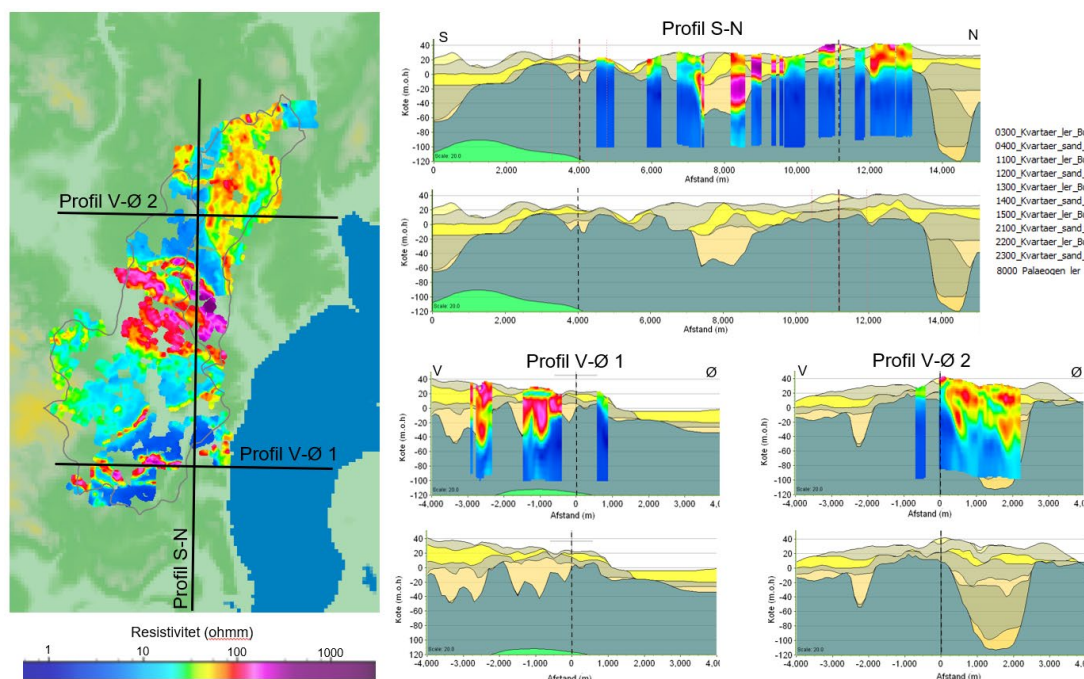
jordartskortet i DK-modellen (afsnit 2.2.1), er det konkluderet, at en yderligere opdatering af de sen- og postglaciale lag ikke er nødvendig i disse områder.

Den opdaterede model har haft fokus på kortlægning og beskrivelse af aflejringerne i tre begravede/delvist begravede dale i området (NIRAS, 2023). Dette forbedrer modellen signifikant. Dette gør sig specielt gældende i den sydlige del, hvor der ikke i den tidligere version af modellen var geofysiske data og kun få boringer til rådighed (Figur 3-2 og Figur 3-3). Dog ville man kunne modellere områder med glacialtektonisk forstyrrede lag bedre. Dette gør sig for eksempel gældende i den store N-S gående begravede dal længst mod NØ (Figur 3-3, Profil V-Ø 2, afstand 500-2000 m), hvor de hydrauliske strømningsveje måske ikke bliver beskrevet optimalt med den tolkning, der ligger nu (Sandersen og Kallesøe, 2021). I dette projekt, har der dog ikke været tid til at retolke modellen med dette for øje.

Området med de opdaterede lag er indlæst i den version af FOHM-modellen, som bliver anvendt i den hydrostratigrafiske simulering og hydrologiske modellering.



Figur 3-2: Til venstre ses de to Demo sites Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk på Salling på et udsnit af jordartskortet i 1:25.000 (Jakobsen og Tougaard, 2021). Jordartskortet beskriver jordarterne i den øverste meter. De grønne farver beskriver postglaciale ferskvandsaflejringer, de røde og brune farver beskriver glaciale aflejringer. Der er ikke beskrevet fund af senglaciale aflejringer i jordartskortlægningen i området. Til højre ses datagrundlaget mht. boringer fra Jupiter og geofysik fra GERDA databaserne.



Figur 3-3: Opdateret hydrostratigrafisk model i Østsalling (Mapfield demo områder) illustreret med et syd-nord orienteret profilsnit og to vest-øst orienterede profilsnit. tTEM mangelagsresistivitetsmodeller er vist i horisontalt snit i kote 0 m.o.h. og på de øverste vertikale profilsnit.

3.2 LOOP2 området i Himmerland

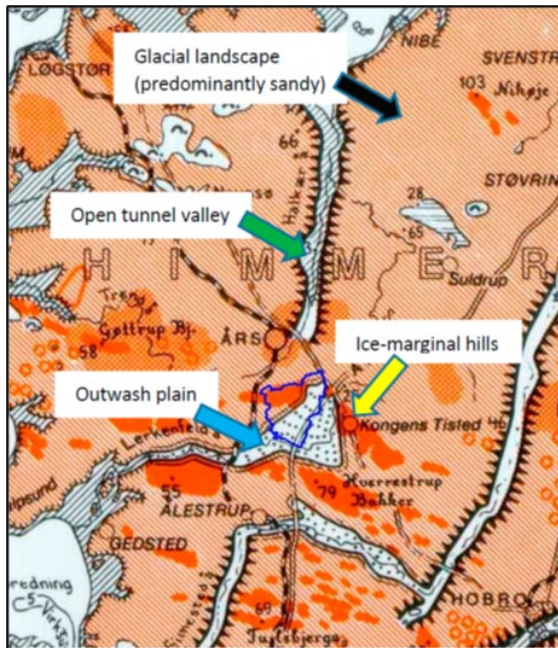
Himmerland LOOP 2 undersøgelsesområdet (Figur 3-1 og Figur 3-4) ligger i et istidslandskab i det nordlige Jylland lige syd for Aars by. Det glacielle landskab er overvejende sandet og karakteriseret ved tilstedeværelsen af fremtrædende åbne tunneldale, smeltevandssletter og israndsbakker. I LOOP2 området findes en lille smeltevandsslette fra sidste istid (Weichsel), som er omgivet af israndsbakker med orienteringer mellem V-Ø og NV-SØ (Figur 3-4).

LOOP 2 Himmerland området blev geologisk tolket i Mapfield projektet (Sandersen og Kallesøe, 2021). I forbindelse med denne tolkning er der opstillet en 'geologisk hændelseskronologi' (Sandersen og Kallesøe, 2021b), som er skitseret i Figur 3-5a. Denne består af 4 geologiske elementer, som beskriver den geologiske lagserie i LOOP2 området:

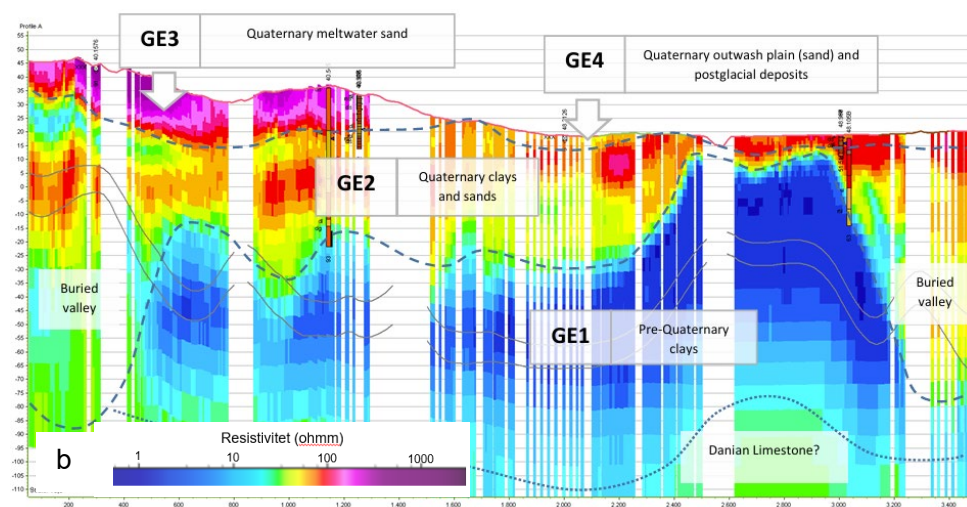
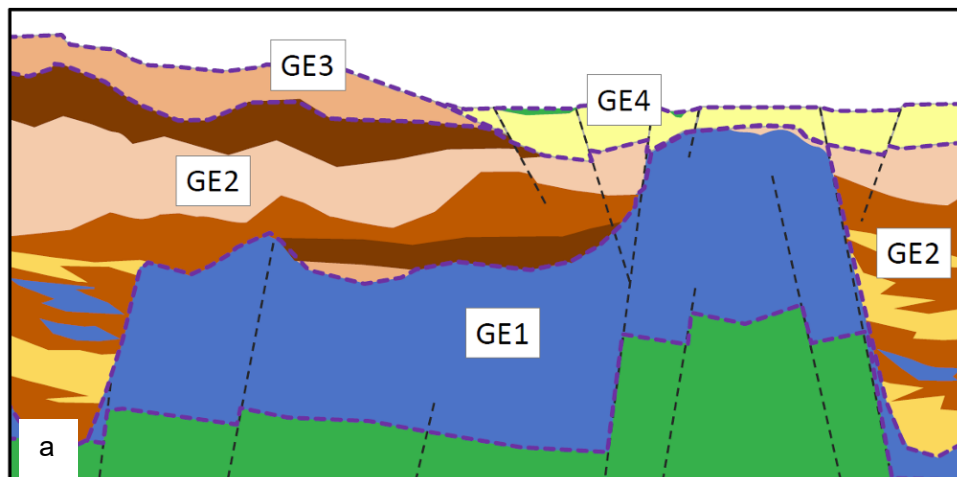
- GE1 - Prækvartære lerlag fra Eocæn og Oligocæn (herunder ses kalken med grøn)
- GE2 - Blandede kvartære lag i og over de begravede dale (heri også flager af prækvartært ler). Dalene vurderes at være eroderet i Elster eller tidligere, men fyldt ud i Saale og/eller Weichsel.
- GE3 - Kvartært sand og ler i glacielle bakker, der også er dannet under Saale og/eller Weichsel istiderne.
- GE4 - Weichsel smeltevandssedimenter og postglacielle aflejringer.

Udover dyb tektonik fra forkastninger i Sorgenfrei Tornquist zonen og fra salttektonik er området også påvirket af glacialtektonik. Som det ses af Figur 3-5a,b, bliver alle lag i FOHM-

modellen helt ned til kalken (grøn) potentielt påvirket af en opdatering i forhold til de nye tTEM data i området.



Figur 3-4: Udsnit af landskabskort (Smed, 1981), som viser de geomorfologiske elementer i området. LOOP 2 modelområdet er vist med blå streg (Sandersen og Kallesøe, 2021)

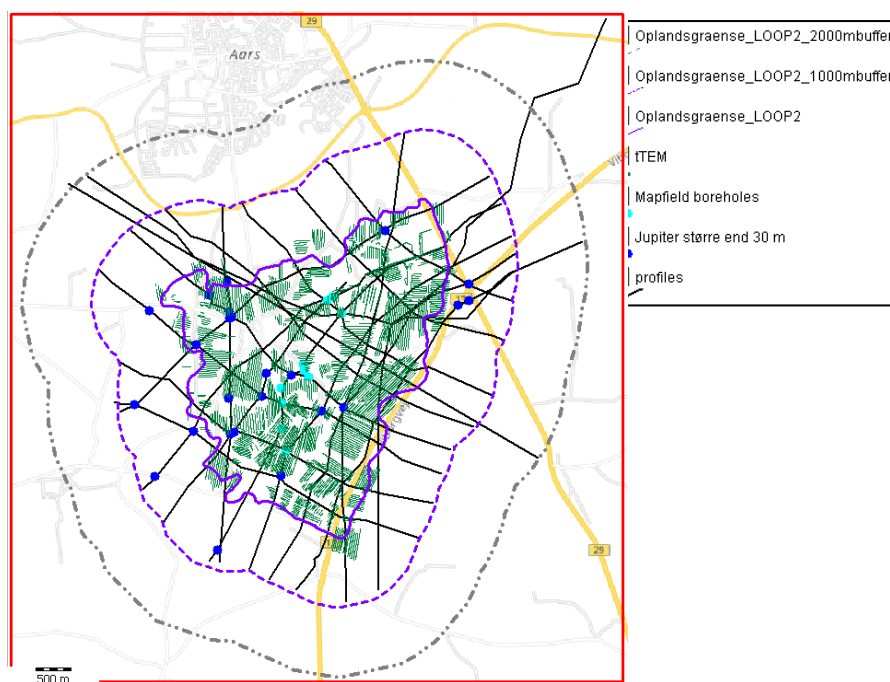


Figur 3-5: a) De geologiske elementer GE1-GE4, der findes i LOOP2 området. b) et NV-SØ

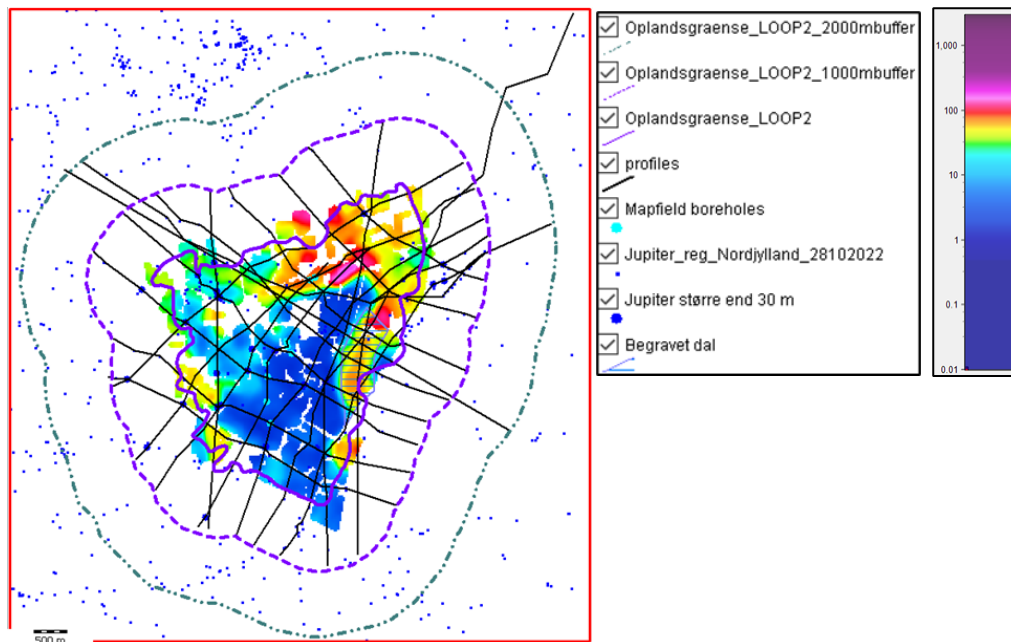
profil som viser tTEM modellerne med tolkning. Resistivitetsskala se Figur 3-3. Figur fra Sandersen & Kallesøe, 2021b.

3.2.1 Datagrundlag og modelområde

Boringerne stammer fra samme Jupiterdatabase-udtræk, som i resten af modelleringen i kvælstofretentionsprojektet (afsnit 2.2.2). Boringerne er vist i Figur 3-6 med særlig signatur for boringer dybere end 30 m og for boringer beskrevet i MapField. De anvendte geofysiske data stammer fra tTEM kortlægningen fra MapField projektet (Figur 3-6). Der er lavet et 3D grid af tTEM resistivitetsmodellerne, som har været anvendt i tolkningen (Figur 3-7). Derudover er jordartskortet, begravede dale, det geomorfologiske kort samt topografien anvendt som støtte i tolkningen. Den nye modellering, hvor tTEM informationen er inddraget, er foretaget indenfor oplandsgrænsen til LOOP2 området (Figur 3-6), mens bufferzonerne er defineret for at sikre sømløse overgange imellem den nye model og FOHM-modellen.



Figur 3-6 viser datagrundlaget, oplandsgrænser og de 20 tolkningsprofiler anvendt i opdateringen af modellen.



Figur 3-7: Horisontalt snit gennem 3D resistivitetsgriddet i kote 0. Griddet viser tydeligt høje modstande i den begravede dal mod øst (skraveret) og i en mindre velafgrænset dal nordligst i det tTEM-kortlagte område.

3.2.2 Geologisk tolkning og modellering

Inden den geologiske tolkning og modellering blev igangsat, blev der foretaget en vurdering/undersøgelse af hvilke flader der evt. kunne genbruges fra MapField projektets model, hvilke FOHM-lag der findes i området, og hvilke lag der er brug for i den nye hydrostratigrafiske model.

3.2.2.1 Antal nødvendige lag

Antallet af nødvendige lag blev vurderet, inden modelleringen startede. Dette er gjort ved at gennemgå områdets data og eksisterende modeller med et flydende profil. Dele af denne gennemgang er beskrevet herunder.

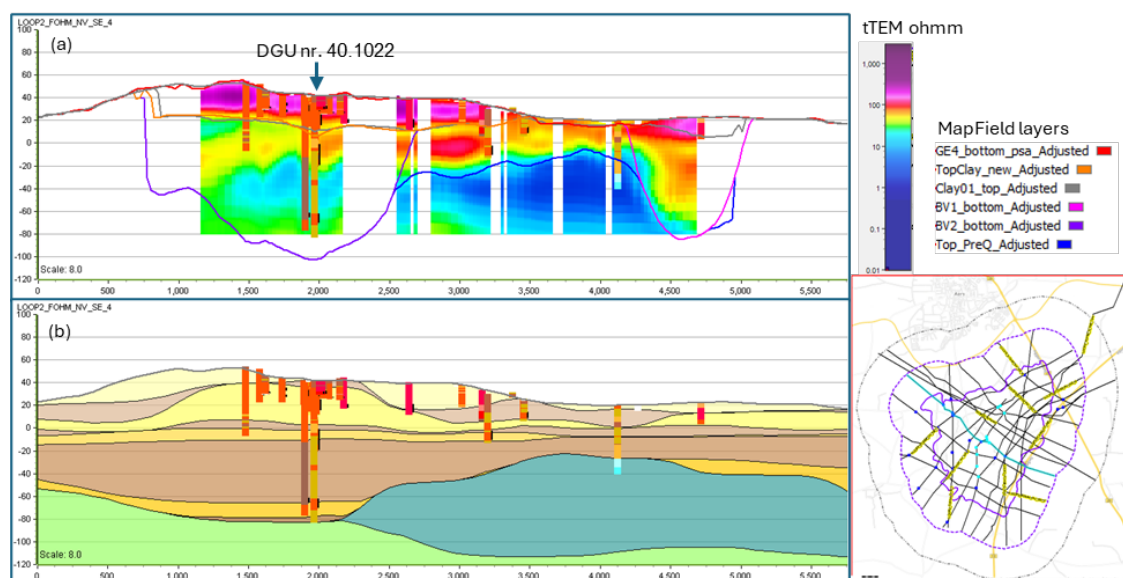
Det øverste sandlag som findes i FOHM i området, er laget 0400 Kvartært_Sand_bund. Dette lag rummer både sand fra smeltevandssletten og de sandede aflejringer øverst på moræneplateauerne (GE3 og GE4 i Figur 3-5). I den opdaterede model vil vi gerne have disse to forekomster i hvert sit lag, som de optræder i MapField projektet. For ikke at komme i konflikt med resten af tolkning i FOHM, bliver der derfor medtaget laget 0200 - Kvartært_Sand_bund, som i den oprindelige FOHM-model ikke fandtes i dette område. Dette lag vil indeholde smeltevandssletteaflejringerne fra GE4, mens plateauaflejringerne (GE3) forbliver i det oprindelige FOHM-lag, laget 0400 Kvartært_sand_bund.

Generelt ses i den sydlige del af området, at prækvartæret ligger noget højere ifølge tTEM-dataene end tolket i den oprindelige FOHM-model, hvilket medfører, at der er brug for færre

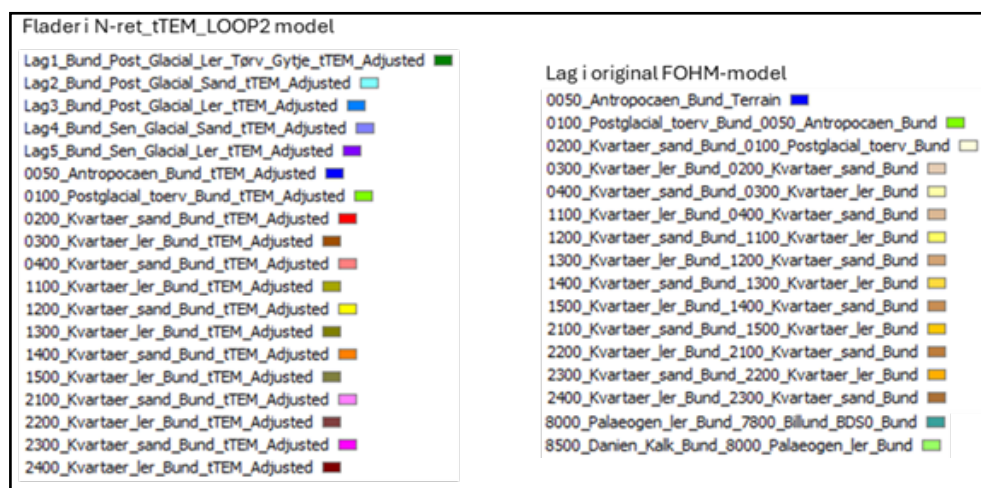
kvartære lag i denne del for at beskrive lagserien. Der ses dog også to begravede dale på hver side af det højtliggende prækvartær. Disse er tolket i MapField projektet (GE2, Figur 3-5), men er ikke umiddelbart at finde i den oprindelige FOHM-model (Figur 3-8).

Boring DGU nr. 40.1022 (Figur 3-8, profilafstand 2000 m) viser, at der findes 5 lag i den vestlige dal. Boringen afslører i alt hele 8 lag, hvoraf flere af sandlagene er så tynde, at tTEM ikke opløser dem. I den østlige dal findes kun omkring 3 lag i dalen. Mellem dalene ses tørve- og gytjelag i borerne samt lave modstande i tTEM modellerne i lavningen.

Konklusionen er, at der bliver brug for 11 kvartære glaciale lag til at beskrive lagserien og herunder prækvartære lag af fed ler og kalk. Den samlede lagserie i den opdaterede model kan ses på figur 3-9. Lagene 2-5 fra kvælstofretentionsmodellen, lag 100, lag 300 og lag 2300 fra FOHM-modellen har dog i praksis ingen reelle tolkningspunkter indenfor modelområdet og ingen tykkelse. Men tages med i modeldatabasen, da modellen skal sættes sammen med disse lag kvælstofretentionsmodellen/FOHM-modellen.



Figur 3-8. V-Ø profil fra midt i LOOP2 området. (a) Profil med lagflader fra MapField modellen (Sandersen & Kallesøe, 2021) samt borer og tTEM data. (b) Profilet med lagene fra FOHM-modellen (Prækvartære lag: grønne farver, Kvartære lag: gule og brune farver).



Figur 3-9: Lag i den opdaterede model (venstre) i forhold til lag i den eksisterende FOHM model (højre). Figuren viser også farvelegenden for tolkningslagene.

3.2.2.2 Lagflader fra MapField projektet

Sandersen og Kallesøe (2021) har tolket mange flader i små områder, men det er valgt kun at "genbruge" tolkningspunkter til flader af lidt større udbredelse. Tolkningspunkterne fra fladerne GE4_bottom_psa, TopClay_new og Top_PreQ, er kopieret over i den nye tomme tolkningsdatabase og anvendt som udgangspunkt for tolkningen af fladerne. Fladerne BV1_bottom og BV2_Bottom er kun brugt som støtte i tolkningen af de begravede dale. I Tabel 3.1 ses hvilke flader, der er kopieret over i hvilke lag i den nye tolkningspunktsdatabase (N-ret-tTEM_LOOP2).

Tabel 3.1. Tabel over information, der er genbrugt fra MapField projektet. Tolkningspunkterne i de lag som er markeret med sort, er overført til den nye tolkningspunktsdatabase. Lagene markeret med rød er kun anvendt som støtte i tolkningen.

Navn i MapField-model	Navn i N-ret-tTEM_LOOP2-model	Bemærkning
GE4_bottom_psa	0200_Kvarter_sand_Bund_tTEM	terrænnært lag
TopClay_new	0400_Kvartaer_sand_Bund_tTEM	terrænnært lag
BV1_bottom		Bund af begravet dal, kun tolket lokalt
BV2_bottom		Bund af begravet dal, kun tolket lokalt
Top_PreQ	2400_Kvartaer_ler_Bund_tTEM	Toppen af prækvartæret

3.2.2.3 Lagflader fra FOHM

Tabel 3-2 viser en oversigt over de originale FOHM-lag indenfor LOOP2 området. Tolkningspunkterne fra disse lag er kopieret over i den nye tolkningspunktsdatabase, i lag med et tilsvarende lagnavn_tTEM.

Tabel 3.2. Tabel over hvilke lag med tilhørende tolkningspunkter, som eksisterer i den oprindelige FOHM-model i LOOP2 området, og hvilke lag der er kopieret over i N-ret-tTEM_LOOP2 modellen.

Navn i FOHM-model	Navn i N-ret-tTEM_LOOP2-model	Bemærkning
0100_POSTGL_Tørv_Bund	0100_POSTGL_Tørv_Bund_tTEM	terrænnært lag
0400_Kvartaer_sand_Bund	0400_Kvartaer_sand_Bund_tTEM	terrænnært lag
1100_Kvartaer_ler_Bund	1100_Kvartaer_ler_Bund_tTEM	Plateau lag
1200_Kvartaer_sand_Bund	1200_Kvartaer_sand_Bund_tTEM	Plateau lag
1300_Kvartaer_ler_Bund	1300_Kvartaer_ler_Bund_tTEM	Plateau lag
1400_Kvartaer_sand_Bund	1400_Kvartaer_sand_Bund_tTEM	Plateau lag
1500_Kvartaer_ler_Bund	1500_Kvartaer_ler_Bund_tTEM	Plateau lag
2100_Kvartaer_sand_Bund	2100_Kvartaer_sand_Bund_tTEM	dalfyld
2400_Kvartaer_ler_Bund	2400_Kvartaer_ler_Bund_tTEM	dalfyld
8000_Palaeogen_ler_Bund	8000_Palaeogen_ler_Bundt_TEM	Prækvaltær
8500_Danien_Kalk_Bund	8500_Danien_Kalk_Bund_tTEM	Prækvaltær
9000_Skrivekridt_Kalk_Bund	9000_Skrivekridt_Kalk_Bund_tTEM	Prækvaltær
9500_Stensalt_Top	9500_Stensalt_Top_tTEM	Prækvaltær

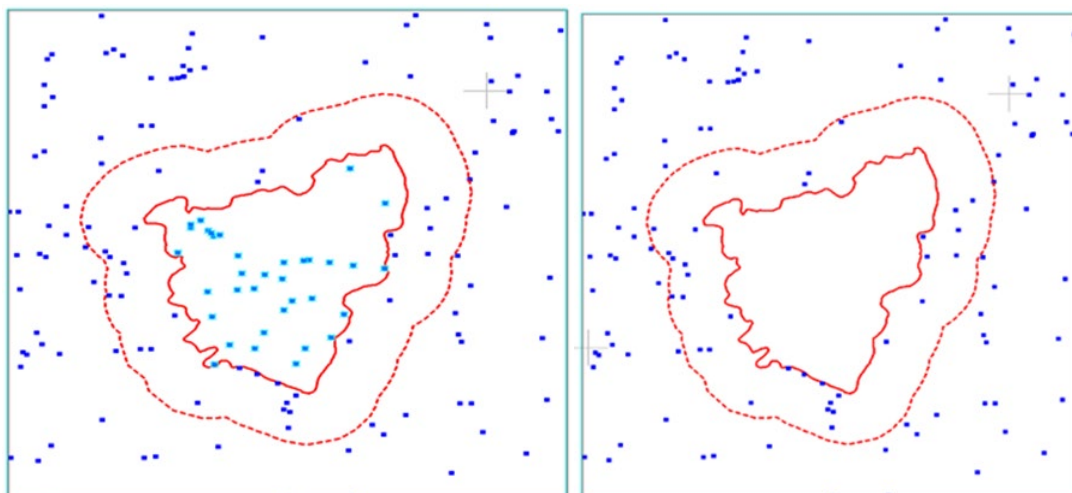
3.2.3 Klargøring af tolkningsdatabasen inden tolkning

Klargøring af den nye tolkningsdatabase, kaldet N-ret-tTEM i LOOP2 området er håndteret således:

- Der er lavet en tom kopi af tolkningsdatabasen for FOHM for at lette datahåndteringen særligt til den efterfølgende beregning af usikkerheder.
- Herefter kopieres alle tolkningspunkter for de valgte lag i MapField tolkningen over i de anførte lag i den nye tolkningspunktsdatabase, se Tabel 3-1.
- Punkterne fra den oprindelige FOHM-model kopieres over i databasen, men kun i det område, som scene extent dækker, se Tabel 3-2.
- Herfra slettes alle punkter fra FOHM indenfor LOOP2 modelområdet, idet det er dette område, der skal opdateres i forhold til tTEM tolkningen.
- Herefter kopieres punkterne fra lag 1 i den nye hydrostratigrafiske modellering (afsnit 2).

3.2.3.1 Metode for kopiering

Figur 3-9 viser et eksempel, hvor punkter fra den originale FOHM-model i lag 1100 kopieres over i ny database, hvorefter punkter slettes indenfor modelområdet. Der er oprettet en bufferzone på 1000 m udenom modelområdet (oplandet til LOOP2-området), hvor der både tolkes nye punkter, og hvor der vil være originale FOHM-punkter. Indenfor denne zone tilpasses den nye tolkning med den omkringliggende tolkning, så der kommer sømløse overgange.



Figur 3-9: Eksempel på kopiering af FOHM-punkter over i den nye model. Til venstre ses punkter i den originale FOHM-model for laget 1100_Kvartaer_ler_Bund, hvor punkterne indenfor LOOP2-oplandsområdet (rød streg) er markeret. Til højre ses også punkter i den originale FOHM-model for laget 1100_Kvartaer_ler_Bund, men her er punkterne slettet indenfor LOOP2-oplandsområdet. Med stiptet rød streg er bufferzonen på 1000 m uden om LOOP2-oplandsområdet markeret.

3.2.4 Modelleringsstrategi

Der er opstillet en manuel lagmodel med en diskretisering på 100x100 m, som input til det efterfølgende grundvandsmodelarbejde. Modellen er opstillet i modellerings-softwaren Geo-Scene3D (GS3D).

3.2.4.1 Tolkningspunkter og lagflader

Lagfladetolkning er foretaget ved at sætte tolkningspunkter ved bunden af lagene. Udover tolkningspunkter, der er afsat direkte på lagfladen, er der afsat forskellige typer af støttepunkter for at styre fladerne.

Tolkningspunkter og fladestyrernde støttepunkter er markeret i tolkningsdatabasen på følgende vis:

- Almindelige tolkningspunkter får "pointtype 0" i tolkningsdatabasen.
- Støttepunkter, der er sat for at lukke lag, som kiler ud for eksempel ved terræn eller mod toppen af det overliggende lag, har fået "pointtype 1" i tolkningsdatabasen.
- Støttepunkter, der er sat for at trække en flade op/ned, for at ramme laggrænsen i en boring (fx i områder hvor lagene veksler meget i koten), har fået "pointtype 4" i tolkningsdatabasen.

Tolkningen er foretaget langs faste profiler. Området er derefter gennemgået med et flydende profil for at sikre, at alle borerer mellem linjerne er med i tolkningen.

3.2.4.2 Interpolation og fladejustering i GS3D

Tolkningspunkterne er løbende blevet interpoleret under tolkningen med en Kriging ordinary gridroutine i GS3D og en cellestørrelse på 100 x 100 m indenfor scene extent. Der er anvendt en søgeradius på 2500 m for alle lag med undtagelse af tørvelaget og smeltevandssandlaget "0200_Kvartær_sand_Bund_tTEM", som har fået en søgeradius på hhv. 1000 m og 1500 m, idet begge disse lag kun findes i mindre, afgrænsede områder indenfor modelområdet.

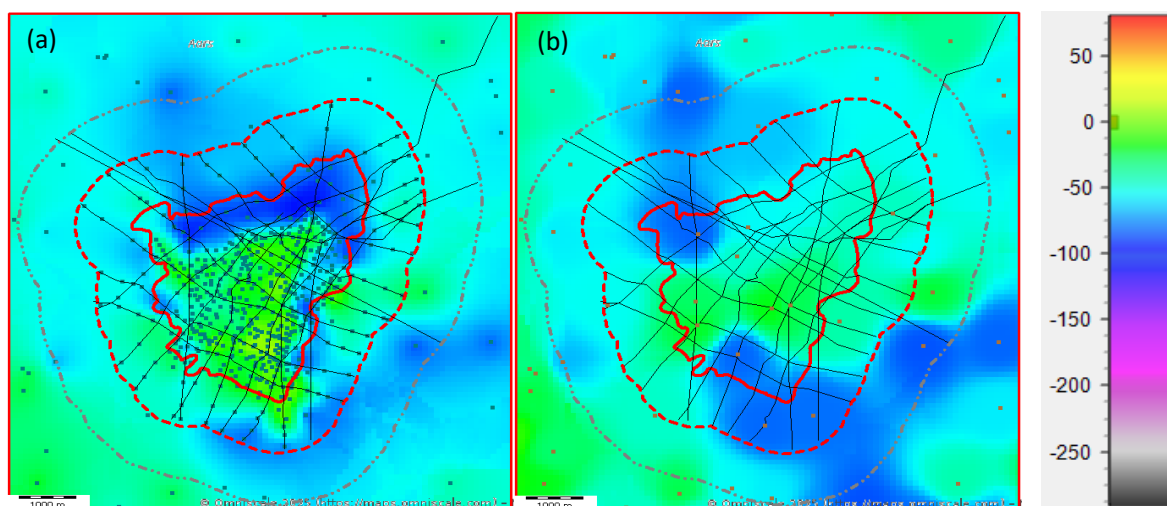
Laget "2200_Kvartær_ler_Bund_tTEM" er det nederste lag i de begravede dale i området. Bunden af dette lag er derfor sammenfaldende med bunden af laget "2400_Kvartær_ler_Bund_tTEM" indenfor oplandet samt i 1000 m-bufferzonen. Dette lag var ikke tolket i den oprindelige FOHM-model.

Der findes tolkningspunkter for lagene 8000, 8500, 9000 og 9500 i den oprindelige FOHM-model, disse er beholdt som de var, idet der ikke er fundet grundlag for en opdatering. Lagene mellem lag 2400 og lag 8000 i den oprindelige FOHM-model findes ikke i modelområdet og der findes ingen grundlag for en opdatering af lagene i modelområdet.

Løbende og efter endt tolkning, er lagfladerne korrigeret i GS3D's grid adjustment tool således, at fladerne ikke krydser hinanden. I grid-justeringen er terrænet og laget 2400 holdt fast i forhold til alle de andre flader. Desuden er funktionen "fill blanks" anvendt.

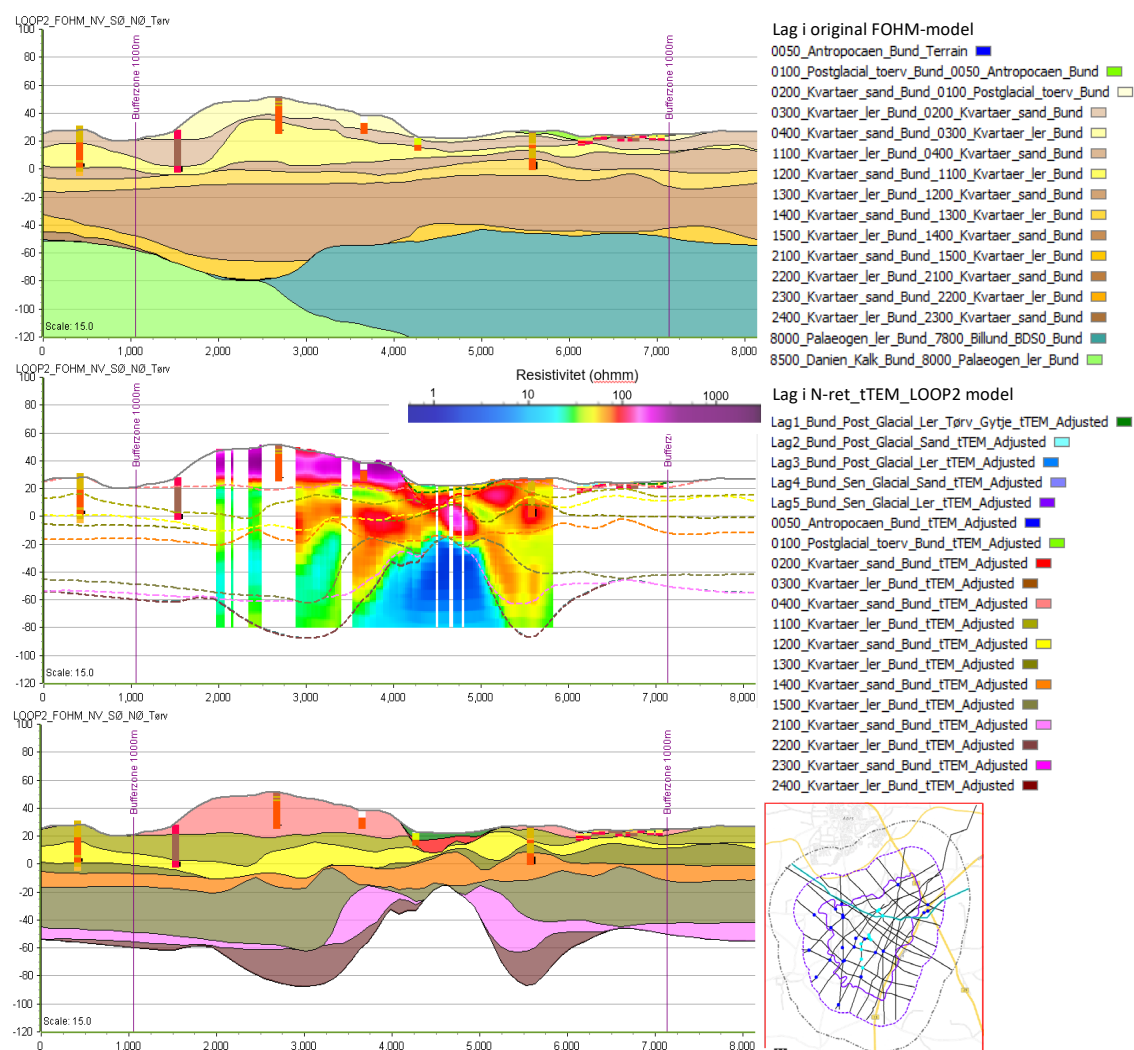
3.2.5 Resultater af den geologiske modellering

De nye tTEM data har gjort det muligt at tolke geologien med en højere opløselighed i området og dermed tilføje flere detaljer til den geologiske model af området. De mest markante ændringer i den geologiske tolkning af området er det højtliggende prækvartær i den sydlige og midterste del af området, de to begravede dale, som skærer sig ned i prækvartæret, og højere opløsning af dallagene i modellen, se Figur 3-10 og 3-11.



Figur 3-8: Figurer af den prækvartære overflade i N-ret_tTEM_LOOP2 modellen (a) og den originale flade i FOHM-modellen (b) med tilhørende tolkningspunkter. Bemærk, at der er langt flere tolkningspunkter i den nye model.

Derudover er der tilføjet en opdeling af det øverste kvartære sandlag i et plateau (0400_Kvartaer_sand_Bund_tTEM) og den yngre smeltevandsslette (0200_Kvartaer_sand_Bund_tTEM), se figur 3-12. Dette er gjort med baggrund i den opdeling i geologiske elementer som Sandersen og Kallesøe (2021b) lavede i MapField projektet. Det er dog også klart fra denne kortlægning, at med en udvidelse af området med tTEM data, ville man kunne opnå en bedre opløsning af dalflankerne i kanten af modellen, da dalene tilsyneladende er brede og da flankerne af begge dale ligger udenfor modelområdet (se Figur 3-10 og 3-11).



Figur 3-9: Viser et NV-SØ strygende profil gennem modelområdet hen over de to begravede dale og tørveområdet imellem de begravede dale i den nordlige del af området. Der vises tre versioner af samme profil. Øverst ses den originale FOHM-model. Herunder ses samme profil, men med tTEM, borer og lagfladerne i den nye tTEM tolkning. Det nederste profil viser de tolkede lag i den nye tTEM opdatering. På profilet er 1000 m-buffere vist. Modelområdet stopper hvor tTEM dataene stopper. Bemærk, at de nye tolkede flader er sammenfaldende med FOHM-lagenes top og bund ved 1000 m-bufferzonen. På den anden side af denne zone er det FOHM-lagene der gælder. Det er her de to modeller bliver sat sammen.

4. Opdateret hydrostratigrafi for Kattegatøer

I forbindelse med udarbejdelsen af Kvælstofretentionskortet version 2025 er det besluttet, at modelleringen skal dække øerne i Kattegat. Da de eksisterende hydrostratigrafiske modeller ikke dækker øerne i Kattegat er der lavet en opdatering af hydrostratigrafien for Nordsamsø, Tunø, Endelave, Anholt og Læsø. Idet Samsø, Tunø og Endelave ligger inden for udstrækningen af modelleringsgriddet for FOHM-modellen for Jylland og en hydrostratigrafisk model for Sydsamsø allerede er lagt ind i FOHM-modellen, vil hydrostratigrafiske modeller for Nordsamsø, Tunø og Endelave blive indbygget i en version af FOHM-modellen, som vil blive anvendt i dette projekt til hydrologisk modellering og simulering. Under Nordsamsø, Tunø og Endelave består FOHM's hydrostratigrafi kun af Prækvartære lag og det mest terrænnære lag består af Palæogen ler overlejrende Danien Kalk og Skrivekridt.

De hydrostratigrafiske modeller for Anholt og Læsø vil blive sat sammen i deres eget model-grid og køres i en separat hydrologisk model.

Til denne opdatering af Kattegatøerne er der taget udgangspunkt i basale hydrostratigrafiske modeller, som er opstillet af Hydrologisk afdeling, GEUS, i forbindelse med etableringen af Hydrologisk informations- og prognosesystem, HIP, (<https://klimatilpasning.dk/kommuner-og-forsyning/vaerktoej/hip>) i 2021. Desuden er der for Endelave lavet en ny, men grov, modellering på baggrund af tTEM information stillet til rådighed af Region Midtjylland. Opdateringerne er foretaget i august 2023.

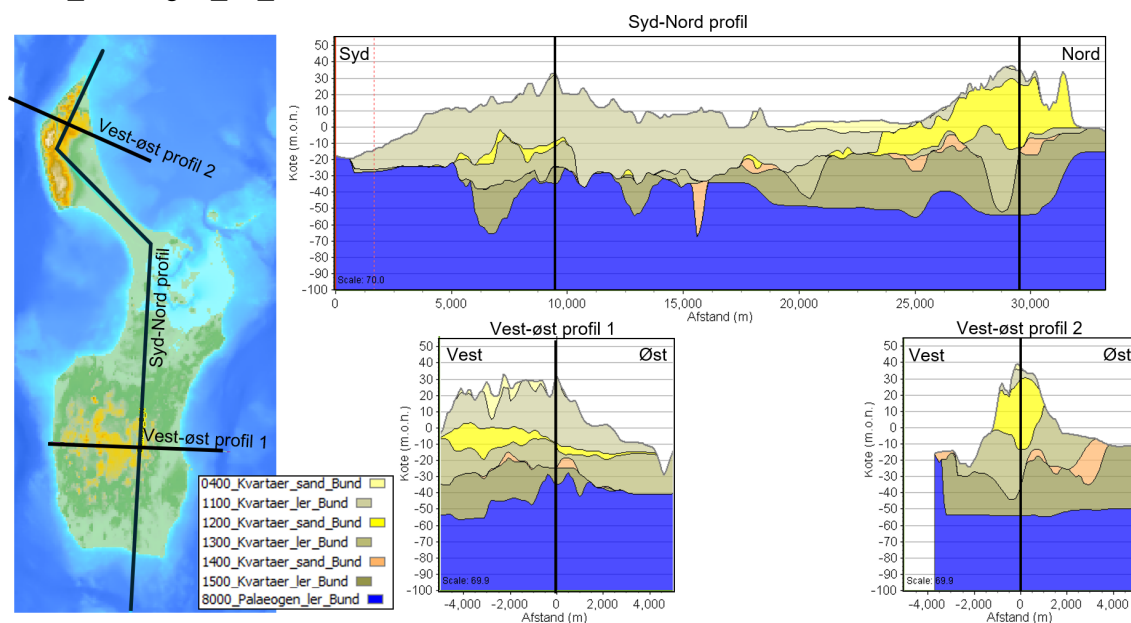
4.1 Nordsamsø

Som led i Grundvandskortlægningen er der opstillet en hydrostratigrafisk model for Sydsamsø i 2012 (Thomsen et al., 2012), som er lagt ind i FOHM hydrostratigrafien for Jylland (Tabel 1-3). I forbindelse med HIP projektet blev der skaffet en ældre hydrostratigrafisk model for Nordsamsø (Rambøll, 2004). Begge modeller er udarbejdet af Rambøll. Inden modellen for Sydsamsø blev lagt ind i FOHM-modellen, er de to modeller for Samsø samlet i en fælles tolkningspunktsdatabase og derefter griddet i fælles lagflader i forbindelse med HIP projektet. Der er lavet en vurdering af hvorledes HIP-modellens lag passer sammen med de lag, der er lagt ind i FOHM-modellen for Sydsamsø. Nordsamsø-delen af HIP-modellen er derefter læst ind i FOHM-modellen i de tilsvarende hydrostratigrafiske lag.

Samsømodellen består af tre kvartære sandlag og tre kvartære lerlag, som overlejrer Palæogen ler, se Figur 4-1. De seks kvartære lag er lagt ind som lagfladerne:

- 0400_Kvartær_sand_bund (øverste sandlag),
- 1100_Kvartær_ler_bund (øverste lerlag),
- 1200_Kvartær_sand_bund (mellemste sandlag),
- 1300_Kvartær_ler_bund (mellemste lerlag),
- 1400_Kvartær_sand_bund (dybeste sandlag) og
- 1500_Kvartær_ler_bund (dybeste lerlag over det palæogene ler).

De kvartære lag er trykket ned i det palæogene ler, som nedadtil afgrænses af FOHM laget 8000_Palæogen_ler_bund. Da denne lagflade alle steder i området omkring Samsø ligger dybere end de dybest liggende nye kvartære lag er der ikke udført justeringer af lagfladen 8000_Palæogen_ler_bund.



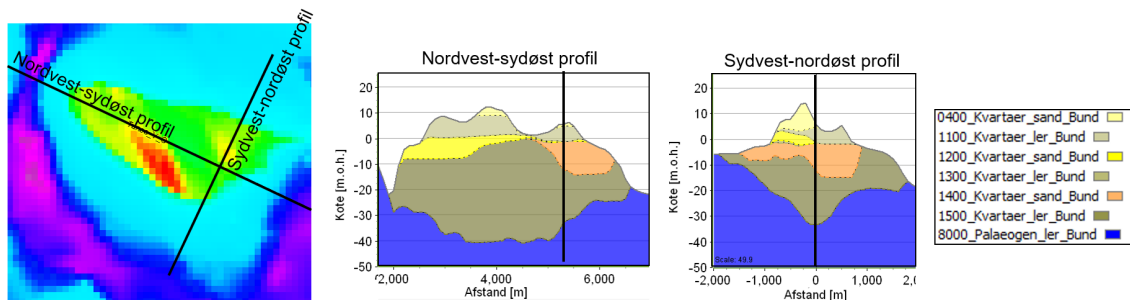
Figur 4-1: Samsø hydrostratigrafisk model set i et syd-nord orienteret profilsnit og to vest-østlige orienterede profilsnit. Topografi og bathymetri er vist på kortet til venstre.

4.2 Tunø

Den hydrostratigrafiske model for Tunø er opstillet i HIP projektet og har taget udgangspunkt i et profilsnit fra Thorling og Thomsen (2000). I HIP modellen er der modelleret tre kvartære sandlag med to mellemljrede kvartære lerlag. Disse fem lagflader er trykket ned i et tykt morænelerslag. Der er ud fra borerer modelleret en bund til det dybest liggende morænelerslag, så alle lag kunne lægges ind i FOHM stratigrafien og trykkes ned i det prækvartære palæogene ler, som underlejrer de kvartære aflejringer i området. I FOHM-stratigrafien, se Figur 4-2, er de seks kvartære lag lagt ind som:

- 0400_Kvartær_sand_bund (øverste sandlag),
- 1100_Kvartær_ler_bund (øverste lerlag),
- 1200_Kvartær_sand_bund (mellemste sandlag),
- 1300_Kvartær_ler_bund (mellemste lerlag),
- 1400_Kvartær_sand_bund (dybeste sandlag) og
- 1500_Kvartær_ler_bund (dybeste lerlag over det palæogene ler).

Lagfladen, 8000_Palæogen_ler_bund, som udgør bunden af det Palæogene ler, er uændret, da den ligger væsentlig dybere end bunden af det tredje morænelerslag.



Figur 4-2: Tunø hydrostratigrafisk model set i et nordvest-sydøst og sydvest-nordøst profil. Topografi og bathymetri er vist på kortet til venstre.

4.3 Endelave

I forbindelse med grundvandsundersøgelser er der i 2002 opstillet en simpel geologisk model bestående af fire modellag, hvoraf to er sandmagasinlag (Kirkeby og Pallesen, 2002). Den ældre model er ikke inddraget ved opstillingen af HIP-modellen i 2021, hvor en tilsvarende hydrostratigrafi er anvendt. Efter opstillingen af HIP-modellen har Region Midtjylland i efteråret 2022 fået udført en tTEM kortlægning af hele øen og de har stillet disse data til rådighed for modelopdateringen. Samtidig har de stillet en tolkning af den lagflade, som definerer bunden af den kvartære lagserie til rådighed. Da der var kommet nye data med en tæt datadækning af øen, blev det besluttet at lave en ny hydrostratigrafisk model for Endelave. Det var kun muligt at allokere få ressourcer til modelleringen, så det blev en relativ grov tolkning af de nye data og deres sammenhæng med eksisterende boringsdata. Modelleringen er udført i august 2023.

4.3.1 Ny hydrostratigrafisk model for Endelave

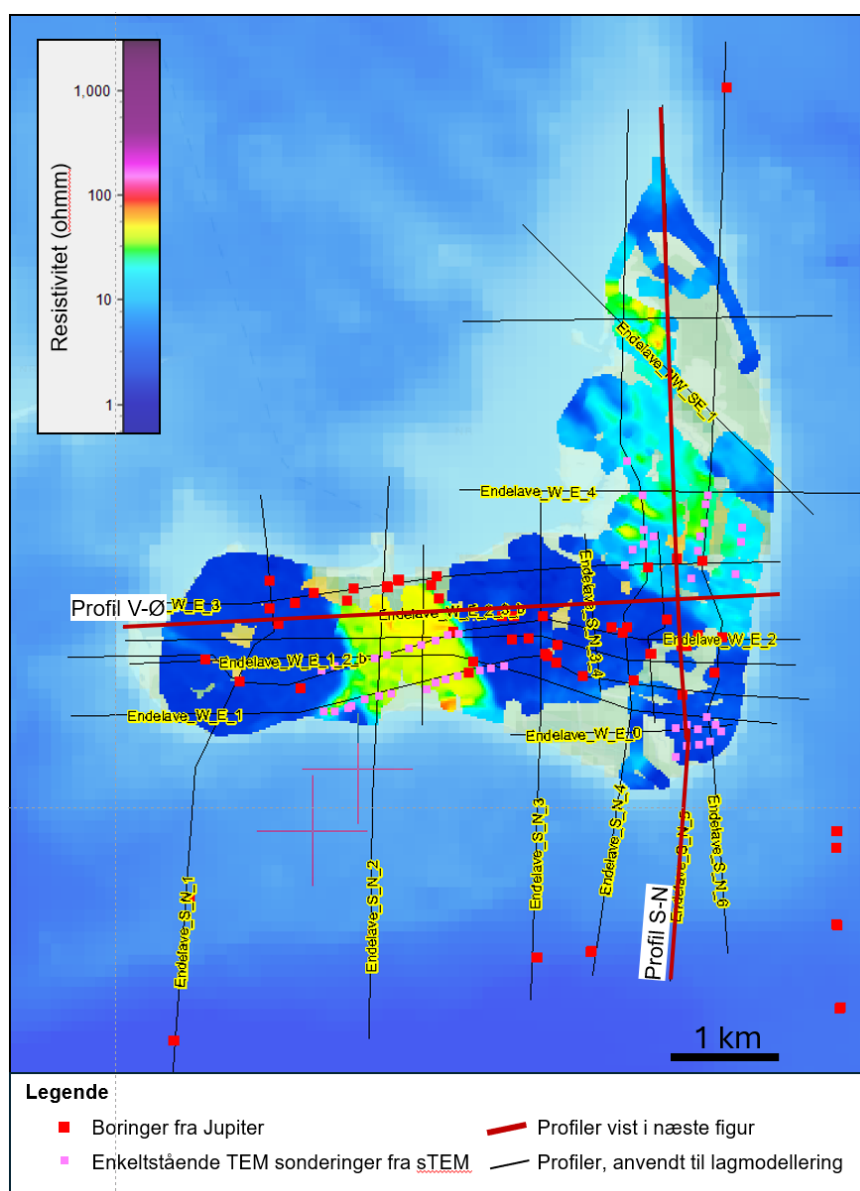
Den nye hydrostratigrafiske model tager udgangspunkt i hydrostratigrafien opstillet i HIP-modellen og er udvidet med flere lerlag og et dybtliggende sandlag over det dybeste kvartære lerlag, som definerer bunden af den kvartære lagserien og skærer ned i det palæogene ler.

Den nye hydrostratigrafi indplaceret i FOHM lag udgøres af lagene:

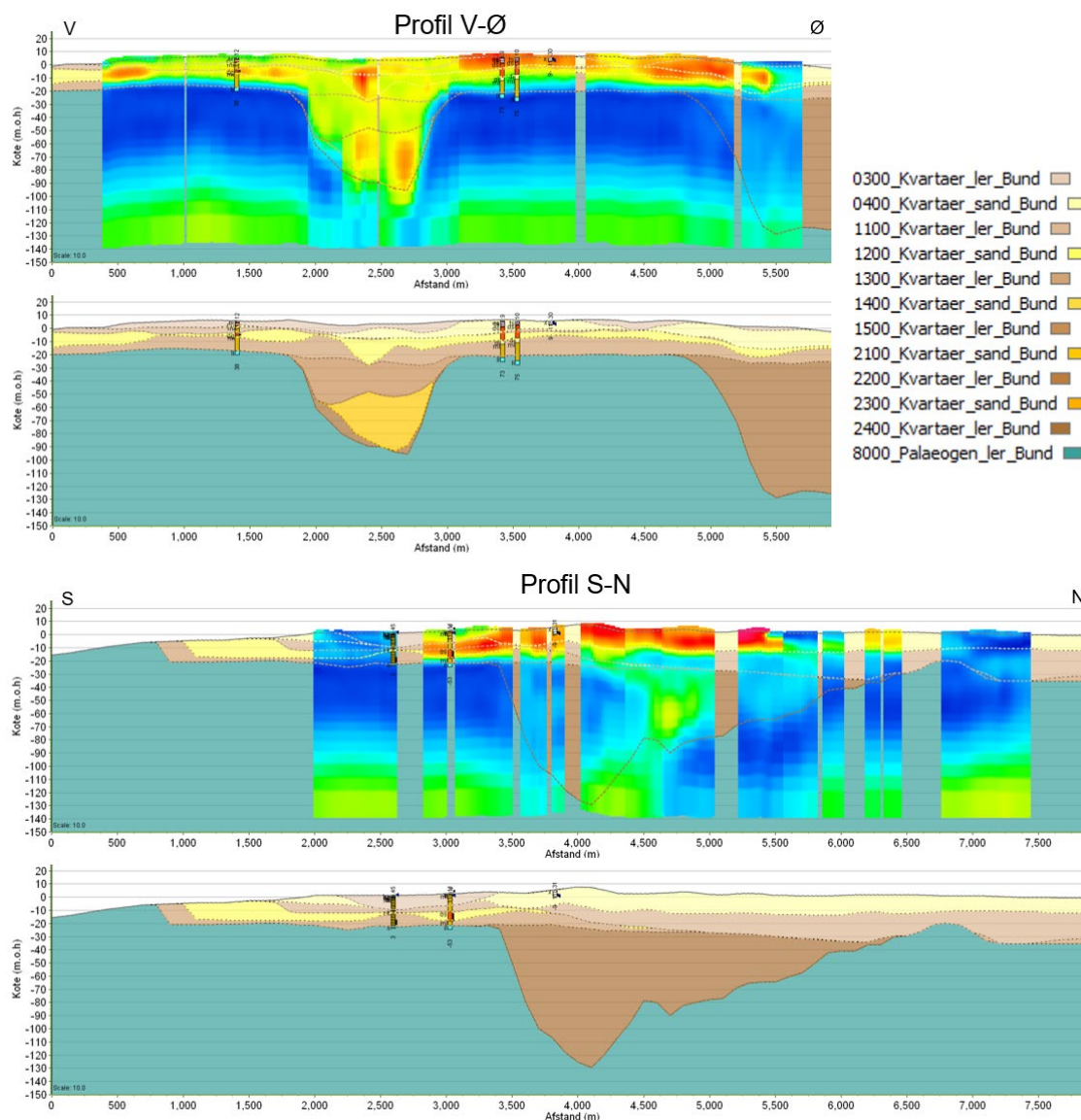
- 0300_Kvartær_ler_bund (første og øverste lerlag),
- 0400_Kvartær_sand_bund (første og øverste sandlag),
- 1100_Kvartær_ler_bund (øverste lerlag),
- 1200_Kvartær_sand_bund (andet sandlag),
- 1300_Kvartær_ler_bund (andet lerlag),
- 1400_Kvartær_sand_bund (tredje sandlag, men ikke brugt),
- 1500_Kvartær_ler_bund (tredje lerlag og øverst i begravet dal mod vest),
- 2100_Kvartær_sand_bund (sandlag i begravet dal),
- 2400_Kvartær_ler_bund (nederste lerlag i begravede dale og direkte over det palæogene ler).

Disse kvartære lag er trykket ned i det palæogene ler, som nedadtil afgrænses af FOHM laget 8000_Palæogen_ler_bund. Da denne lagflade alle steder i området omkring Endelave ligger dybere end de dybest liggende nye kvartære lag er der ikke udført justeringer af lagfladen 8000_Palæogen_ler_bund.

De nye lagflader er modelleret med udgangspunkt i resistivetsstrukturer i 3D resistivetsgrid generet af 1D SCI mangelagsmodeller (smooth modeller) fra et tTEM datasæt, som dækker hele øen (Figur 4-3). Der er suppleret med data fra et TEM instrument med en opsætning, som resulterer i en større indtrængningsdybde end tTEM til bedre kortlægning af bunden af de begravede dalstrukturer, som skærer sig ned i det palæogene ler. Modelleringen er yderligere foretaget med støtte i litologisk information fra borer registreret i Jupiter (Figur 4-3). Der er oprettet en række faste profiler i to orienteringer på øen, hhv. vest-øst og nord-syd, samt et flydende vest-øst profil til tjek af uhensigtsmæssige forløb af de tolkede flader mellem de faste profiler. To profilsnit er vist som eksempler fra den hydrostratigrafiske model i Figur 4-4.



Figur 4-3: Kort over datadækning på Endelave med tTEM fra 2022 og TEM med større indtrængningsdybde fra 2022 og borer fra Jupiter. Udstrækningen af tTEM-kortlægningen er vist som en interpoleret resistivetsflade i koten - 25 m o.h.



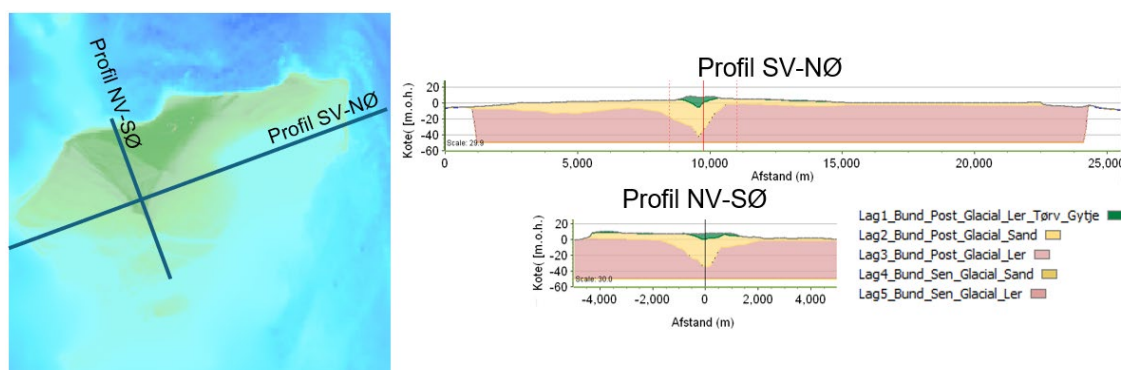
Figur 4-4: Profilsnit i vest-østlig retning (øverst) og syd-nordlig retning (nederst). I det øverste profil i hvert sæt af profiler er resistivitetsgrid fra mangelagstolkninger af tTEM data vist. Skala for resistivitet er vist i Figur 4-3. Boringer fra Jupiter er vist med standard GEUS farver og symboler: ml = moræneler, dl = smeltevandssler, ds = smeltevandssand og ll = Lillebæltssler.

4.4 Læsø

Med udgangspunkt i (Orbicon, 2008) er der i HIP opstillet en hydrostratigrafisk model for Læsø bestående af 3 lag. Disse tre lag er alle post- og senglaciale tørve-, ler- og sandlag. Disse lag er indplaceret i FOHM stratigrafien, se Figur 4-5, således at:

- Lag1_Bund_Post_Glacial_ler_tørv (øverste ler- og tøvelag),
- Lag2_Bund_Post_Glacial_sand (første og øverste sandlag), og
- Lag5_Bund_Sen_Glacial_ler (nederste lerlag).

De tre lag trykkes ned i et lerlag, som har udbredelse under hele havbunden i hele modelområdet dækkende både Læsø og Anholt.



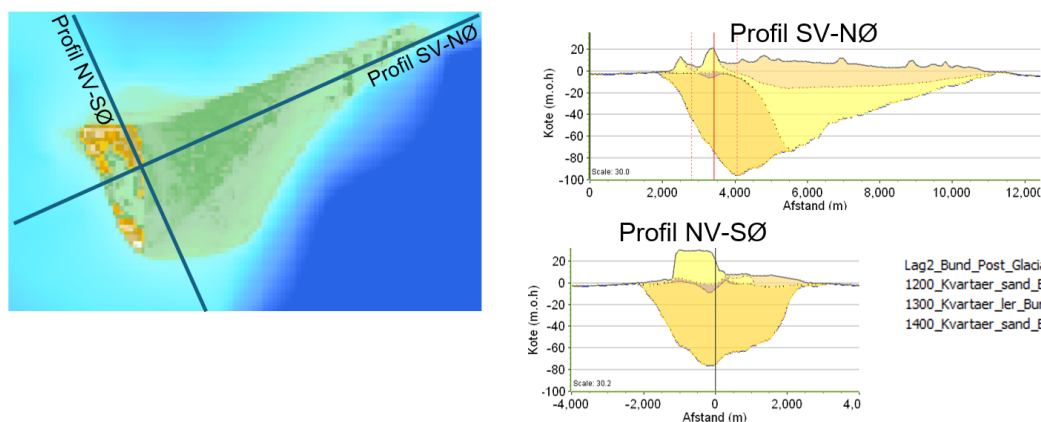
Figur 4-5: Læsø hydrostratigrafiske model illustreret på to profilsnit. Topografi og bathymetri er vist på kortet til venstre.

4.5 Anholt

Med udgangspunkt i Clemmensen et al. (2012) og Schrøder (2015) er der i HIP opstillet en model med et postglacialt sandlag, to kvartære sandlag og et lerlag. Bunden af det dybest-liggende sandlag er ikke en litologisk grænse, men en hydrologisk grænse, da lagfladen markerer overgangen fra ferskvand til saltvand (Schrøder 2015). De hydrostratigrafiske lag er indplaceret i FOHM stratigrafien, se Figur 4-6:

- Lag2_Bund_Post_Glacial_sand (første og øverste sandlag, postglacialt marint forland),
- 1200_Kvartær_sand_bund (øverste kvartære sandlag)
- 1300_Kvartær_sand_bund (kvartær lerlag) og
- 1400_Kvartær_sand_bund (dybest liggende kvartære sandlag, ikke litologisk bund).

De fire lag trykkes ned i et lerlag, som har udbredelse under hele havbunden i hele modelområdet dækkende både Læsø og Anholt.



Figur 4-6: Hydrostratigrafisk model for Anholt illustreret med to profilsnit. Topografi og bathymetri er vist på kortet til venstre.

5. Referenceliste

Blicher-Mathiesen, G., Thorsen, M., Wienke, J., Petersen, R.J., Andersen, H.E., Frederiksen, R.R., Jensen, P.G., Hansen, B., Thorling, L., 2024. Landovervågningsoplande 2023, NOVANA. DCE- Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet.

Clemmensen, L., Nielsen, L., Konnerup-Madsen, J., 2012. Anholt. Geoviden, Geologi og Geografi , Geocenter Denmark 1.

Damsgaard, A., Makwarth, S., 2020. Quality assessment of boreholes within the Jupiter database Gitlab. https://gitlab.com/mst-gko/borehole_quality.

Gyldenkerne, S., Frederiksen, P., 2015. The Danish SINK's project. Final report on the Danish monitoring project for Land Use, Land Use Change and Forestry under the Kyoto Protocol. Aarhus University, Department of Environmental Science.

Højberg, A. L., Thodsen, H., Børgesen, C. D. (red.) Andersen, A. H., Andersen, L. T., Audet, J., Bach, E. O., Christiansen, D., T., Christiansen, D. A., Conde, J., T., Falk, F. A., Frederiksen, R. R., Giannini-Kurina, F., Gudbjerg, J., Hansen, B., Henri, C. V., Henriksen, E. S., Hermansen, N., Hoffmann, C. C., Høyer, A. -S., Iversen, B. V., Jakobsen, R., Jørgensen, M. S., Kim, H., Kjeldgaard, A., Koch, J., Kronvang, B., Larsen, S. E., Liu, J., Madsen, R. B., Martin, N. L., Molis, M., Mortensen, M. H., Motevalli, A., Muff, E., Møller, I., Ondracek, M., Petersen, R. J., Pugliese, L., Rosenkrantz, A., Sandersen, P. B. E., Schneider, R. J. M., Sonnenborg, T. O., Stisen, S., Sørensen, P. B., Thorling, L., Tornbjerg, H., Trolborg, L., Uldall-Jessen, L., Voutchkova, D., Aamand, J. 2025. National kvælstofmodel - version 2025. Udvikling af nye kvælstofretentionskort. Metode rapport. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland. GEUS særudgivelse

Høyer, A.-S., Sandersen, P.B.E., Andersen, L.T., Madsen, R.B., Mortensen, M.H., Møller, I., 2024. Evaluating the chain of uncertainties in the 3D geological modelling workflow. Engineering Geology 343, 13.

I-GIS, 2024. GeoScene3D.

Jakobsen, P.R., 2022. Geomorfologisk kort over Danmark 1:200 000, version 3. GEUS. <https://doi.org/10.22008/FK2/0U6ERA>

Jakobsen, P.R., Tougaard, L., Anthonsen, K.L., 2021. Danmarks Digitale Jordartskort 1:25.000 Version 6.0. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2020/18.

Kirkeby, T.S., Pallesen, T., 2002. Grundvandsundersøgelser på Endelave. Vejle Amt. Jord- og Grundvandsafdelingen.

Kristensen, M., Vangkilde-Pedersen, T., Rasmussen, E.S., Dybkjær, K., Møller, I., Andersen, L.T., 2015. Miocæn 3D, opdateret 2015. Den rumlige geologiske model. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2015/90

Madsen, R.B., Møller, I., Falk, F., Høyer, A.-S., 2025. Kvantificering og geostatistisk simulering af usikkerhederne på den nationale hydrostratigrafiske model. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2025/18

Miljøstyrelsen, 2020. Samling af geologiske modeller i Jylland. FOHM - fælles offentlig hydrologisk model. Rapport.

NIRAS, 2023. Opdatering af hydrostratigrafisk model ved Salling, Lokal modelopdatering ved inddragelse af tTEM data i MapField demo sites.

Orbicon, 2018. Hydrostratigrafisk model for Fyn, Odense Kommune. Rapport til Miljøstyrelsen.

Orbicon, 2008. Geologisk opsamlingsrapport for Aktivitetsområde 1438, Læsø.

Petersen, K.S., 1985. Late Weichselian and Holocene Marine Transgressions in Northern Jutland, Denmark. E&G Quaternary Science Journal 35, 71–78.

Rambøll, 2004. Nordsamsø. Hydrologisk model. Slutafrapportering fra Rambøll. Fase 1. Konceptuel geologisk model og konceptuel hydrogeologisk model. Samling af 7 notater.

Sandersen, Peter B.E., Kallesøe, A.J., 2021. Geological mapping in MapField LOOP-areas and demo sites. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2021/36.

Sandersen, P. B. E., Kallesøe, A.J., 2021. MapField study area LOOP 2: Establishing a geological event chronology. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2021/30.

Schrøder, N., 2015. The Kattegat Island of Anholt: Sea-Level Changes and Groundwater Formation on an Island. The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies 14.

Smed, P., 1981. Landskabskort.

Stisen, S., Ondracek, M., Trolborg, L., Schneider, R.J.M., John van Til, M., 2020. National Vandressource Model - Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. Copenhagen. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2019/31.

Thomsen, P., Pedersen, B., Bitsch, K., Madsen, H.B., Andersen, T.R., Nielsen, M.R., Kudsk, J.S., Madsen, T.M., Thomsen, L.H., Madsen, H.B., Sørensen, J., 2012. Sydsamsø Delaftale 28 med SSV, grundvandskemi, geologisk model, hydrologisk model og arealanvendelse.

Thorling, L., Thomsen, R., 2000. Tunø - Status 1989 - 1999. Teknisk rapport. Århus Amt.