

Geologisk 3D-modellering i Ribe-området

Peter B.E. Sandersen, Mette Hilleke Mortensen,
Ingelise Møller, Thomas H. Lorentzen & Anne-Sophie Høyer

Geologisk 3D-modellering i Ribe-området

Peter B.E. Sandersen, Mette Hilleke Mortensen,
Ingelise Møller, Thomas H. Lorentzen & Anne-Sophie Høyer

Titel:

Geologisk 3D-modellering i Ribe-området

Forfattere:

Sandersen, P.B.E., Mortensen, M.H., Møller, I., Lorentzen, T.H. & Høyer, A.-S.

Rapporten er udført for:

DIN Forsyning A/S
Ulvsundvej 1
6715 Esbjerg N

Repro: GEUS
Digital version.

19. august 2025

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Universitetsbyen 81, Bygning 1872,
DK-8000 Aarhus C
Telephone: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk

Indhold

1.	Indledning	7
2.	Formål med kortlægningen	9
2.1	Modelområde	9
2.2	Særlige problemstillinger.....	10
3.	Datagrundlag	11
3.1	Boredata	11
3.2	Højdemodeller	12
3.3	Geofysiske data.....	13
3.3.1	SkyTEM-kortlægninger.....	13
3.3.2	TEM40-kortlægninger.....	14
3.3.3	tTEM-kortlægninger.....	15
3.3.4	Seismiske data	15
3.4	Grundvandskemiske data	15
3.5	FOHM og lokale geologiske/hydrostratigrafiske modeller	15
4.	Geologisk forståelsesmodel	19
4.1	Formål og fokusområde for geologisk forståelsesmodel	19
4.2	Strukturelle rammer.....	19
4.3	Overordnet landskabsbeskrivelse	22
4.4	Geologisk opbygning.....	27
4.4.1	Prækvarteret.....	27
4.4.1.1	Palæogen.....	27
4.4.1.2	Miocæn	29
4.4.2	Kvarteret	31
4.4.2.1	Begravede dale.....	34
4.4.3	Glacialtektonik	36
4.5	Fokuspunkter for den geologiske modellering	37
4.6	Sammenfatning	37
5.	Indledende konceptuel geologisk model	39
5.1	Indledning	39
5.2	Indledende konceptuel geologisk model.....	39
5.3	Valgte lagflader i Ribemodellen	41
5.3.1	Top Kalk og top Palæogen/Bund Miocæn	41
5.3.2	Den miocæne lagserie.....	41
5.3.3	Præ-Holstein glacial lagserie og marin Holstein lagserie	41
5.3.4	Saale lagserie	42
5.3.5	Marin Eem lagserie.....	42
5.3.6	Weichsel hedeslette og postglaciale ferskvandsaflejringer	42

6.	Modelopstilling i GeoScene3D	43
6.1	Indledning.....	43
6.2	Data.....	43
6.3	Tolkningspunkter.....	44
6.4	Geologiske profiler.....	44
6.4.1	Tolkningsusikkerhed.....	46
6.5	Interpolation.....	47
6.6	Bearbejdelse af lagflader og lag.....	48
6.6.1	Merging og justering af lag.....	49
6.6.2	Sammenkobling med FOHM-lag udenfor Ribemodelområdet.....	50
6.6.3	Solid layers.....	51
6.6.4	Fladekort og tykkelseskort.....	51
7.	Geologiske tolkninger	53
7.1	Geologisk opbygning.....	53
7.1.1	Den overordnede geologiske opbygning.....	53
7.1.1.1	Isopachkort for 'Miocæn sand/ler'.....	58
7.1.1.2	Isopachkort for 'Miocæn ler – Mådegruppen'.....	59
7.1.1.3	Isopachkort for 'Præ-Holsteinler/sand og Holstein sand'.....	60
7.1.1.4	Isopachkort for 'Holstein-ler'.....	62
7.1.1.5	Isopachkort for 'Saale sand/ler'.....	63
7.1.1.6	Isopachkort for 'Saale dalfyld'.....	65
7.1.1.7	Isopachkort for 'Weichsel sand'.....	66
7.1.1.8	Lagserien langs udvalgte profiler.....	66
7.1.2	Lagserien og den geologiske opbygning indenfor lokale områder.....	68
7.1.2.1	Palæogenet og miocænet.....	68
7.1.2.2	Holstein- og præ-Holstein-aflejringerne.....	74
7.1.2.3	Saale dalfyld.....	83
7.1.2.4	Saale sand/ler.....	84
7.1.2.5	Weichsel hedesletteaflejringer.....	84
7.1.3	Topografi og tektonik.....	85
7.1.3.1	Området som helhed.....	85
7.1.3.2	Deformationer af de nordlige hedesletter.....	86
7.1.3.3	Deformationer af de sydlige hedesletter.....	92
7.1.3.4	Deformationernes årsag.....	97
7.2	Usikkerhedsvurderinger.....	100
8.	Voxelmodellering af Saale aflejringerne	103
8.1	Voxelmodelleringsmetoden.....	103
8.2	Boringsinformation.....	104
8.2.1	Litologisk information fra boringer.....	104
8.2.2	Hydrologisk information fra boringer.....	107
8.2.3	Udbredelse af information i rummet.....	111
8.2.3.1	Flere boringer i én celle.....	111
8.2.3.2	Udbredelse af boringsinformation.....	111
8.3	SkyTEM information.....	112

8.3.1	Resistivitet-litologi forhold for Saale aflejringerne	113
8.3.2	Voxel-modellering baseret på TEM resistivetsmodeller.....	120
8.3.2.1	Udbredelse af TEM information i rummet.....	122
8.4	Resultat af voxelmodelleringen.....	124
9.	Supplerende information til den hydrologiske model	127
9.1	Opdateret konceptuel geologisk model.....	127
9.2	Inddeling af Ribe-modelområdet i 'tektoniske zoner'	127
9.3	Vurdering af anisotropi for hydraulisk ledningsevne i miocænet under Måde gruppen.....	130
9.3.1	Vurdering af hydraulisk ledningsevne for facies	132
9.3.2	Anisotropi for hydraulisk ledningsevne i tektoniske zoner	133
9.4	Voxelmodel til brug for hydrologisk modellering	139
10.	Referencer	141
	Bilag 1: Udbredelsesmatricer for boringsinformationen i voxelmodelleringen.....	147

1. Indledning

DIN Forsyning ønsker at undersøge mulighederne for i fremtiden at kunne indvinde mere grundvand i et område nord, øst og syd for Ribe. Der er derfor igangsat en kortlægning, som er planlagt at omfatte geofysisk kortlægning, udførelse af prøveboringer, opstilling af en rumlig geologisk model, samt opstilling af en grundvandsmodel.

SkyTEM Aps har udført geofysiske målinger, mens Aarhus Universitet har varetaget processing og tolkning af de målte data. GEUS' aktiviteter omfatter udførelse af den geologiske model og opstilling af grundvandsmodellen. Herudover har GEUS bidraget med sparring undervejs i projektførelsen.

Nærværende rapport omfatter opstillingen af den rumlige geologiske model. Foruden teksten i denne rapport udgøres af rapporteringen af en digital 3D geologisk model opstillet i GeoScene3D (www.i-gis.dk). Den geologiske modelopstilling følger overordnet beskrivelser og anbefalinger i Geovejledning 2018/1 (Sandersen et al., 2018).

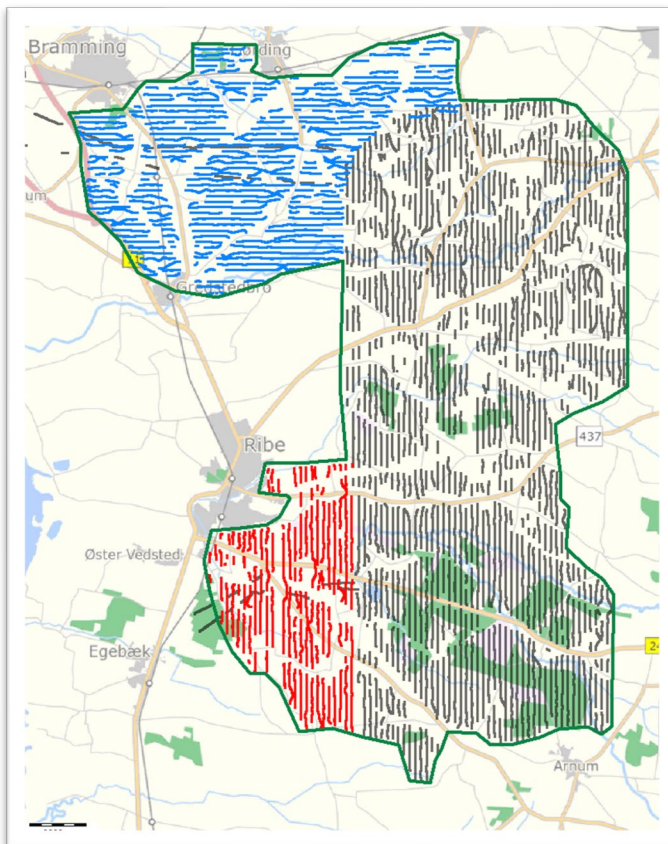
Peter Sandersen har udført de geologiske tolkninger og det geologiske modelarbejde i GeoScene3D, mens Mette H. Mortensen har udført interpolationer og lagtilpasninger i GeoScene3D, samt sammenkoblingen med lagene i den omkringliggende FOHM-model (Fælles Offentlig Hydrostratigrafisk Model). Ingelise Møller har udført betragtninger over faciesvariationerne i miocænet, samt resistivitets-litologi forholdene for Saale aflejringerne. Thomas Lorentzen har med støtte fra Mette H. Mortensen og Anne-Sophie Høyer udført voxelmodellering af Saale aflejringerne. Anne-Sophie Høyer har, foruden varetagelse af projektledelsen, udført kvalitetssikring på såvel rapporttekst som GeoScene3D model.

2. Formål med kortlægningen

DIN Forsyning har til opgave at finde nye, supplerende grundvandsressourcer i Ribe-kortlægningsområdet for at imødekomme en forventet fremtidig øget efterspørgsel på rent drikkevand. DIN Forsyning har ønsket, at en ny kortlægning rettes mod mulige grundvandsmagasiner i områdets miocæne aflejringer af kvartssand og -grus, samt mod sand og grus i de interglaciale aflejringer og i de begravede dale. For at sikre en stabil, fremtidig vandindvinding har grundvandets sårbarhed overfor forurening fra overfladeaktiviteter og fra uønskede, naturligt forekommende kemiske forbindelser stort fokus i kortlægningen.

2.1 Modelområde

Det geologiske modelområde omfatter som minimum områderne med nye SkyTEM data (se området afgrænset med grøn streg på Figur 2-1). Herudover er der inddraget en bufferzone på 500 til 1000 m rundt om de SkyTEM-kortlagte områder, samt inddraget dele af ældre nabo-kortlægninger (se senere beskrivelse i kapitel 6). Denne bufferzone har til hensigt at gøre overgangen til den omkringliggende FOHM-model så jævn som mulig. De geologiske tolkninger i bufferzonen udenfor området markeret med grøn streg vil derfor være mindre pålidelige end i områderne indenfor (se senere; kapitel 6).



Figur 2-1. Det primære geologiske modelområde defineret som området dækket af de nye SkyTEM-kortlægninger i Ribe-området (grøn streg) – bestående af: Ribe Øst (sorte streger), Hunderup (blå streger) og Lustrup (røde streger).

2.2 Særlige problemstillinger

På baggrund af tidligere erfaringer i regionen vurderes der som udgangspunkt at være særlige udfordringer i forbindelse med:

Begravede dale:

Nedskårne, begravede dale, som hovedsageligt er dannet ved erosion under kvartærtidens iskapper, kan gennemskære større eller mindre dele af lagserien. Dette kan medføre, at dybe grundvandsmagasiner kortsluttes, og at der derved skabes risiko for, at overfladeforurening kan trænge ned til det dybe grundvand (se f.eks. Sandersen & Jørgensen, 2003).

Interglaciale lagserier:

Tykke lagserier af marine, interglaciale aflejringer er tidligere fundet i området. Disse aflejringer kan have et højt indhold af organisk materiale, som kan medføre udfordringer for vandkvaliteten med forhøjede værdier af naturligt forekommende stoffer, såsom fosfor og opløste organiske forbindelser (se f.eks. Bruun-Petersen, 1990).

Vekslede lagserier af miocænt sand, silt og ler:

Den miocæne lagserie i området er kendt fra dybe borer i regionen, og i disse ses vekslede aflejringer af sand, silt og ler. Aflejringerne stammer fra en fluktuerende kyst gennem miocænet, hvor deltasystemer har vekslet med aflejringer langs barriereøer, i laguner, på dybere vand samt i flodsystemer på land (Rasmussen et al., 2020). Aflejringerne indhold af silt vil typisk ses som høje elektriske modstande i TEM-målingerne og vil derfor ikke kunne skelnes fra sand og grus. Et højt indhold af silt og ler i de sandede sekvenser kan have negativ indvirkning på grundvandsmagasinerne ydelser.

Deformationer af lagserien:

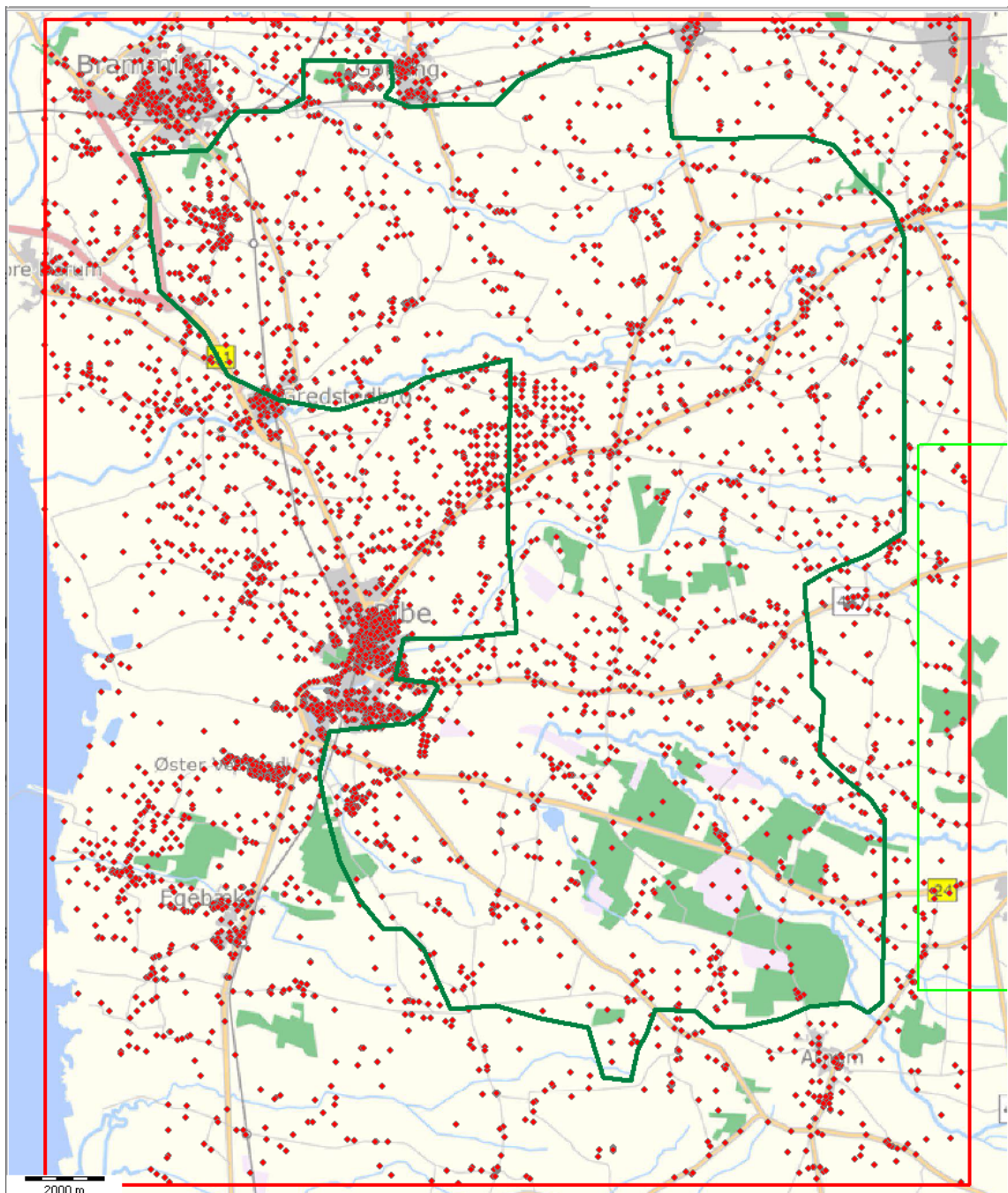
Deformationer af lagserien er kendt i regionen. Specielt glacialtektonik er kendt fra Tønderområdet (se f.eks. Jørgensen et al., 2014) og fra havet ud for Rømø (Andersen et al., 2005), hvor der kan ses større glacialtektoniske komplekser med storskala folder og overskydninger skabt af direkte tryk fra istidernes gletschere. Disse deformationer skaber usammenhængende lagserier, som kan muliggøre nedsivning af overfladeforurening til dybe magasiner, samt skabe begrænsninger i grundvandsmagasinerne udbredelser.

Foruden ovennævnte kan der i Sønderjylland forekomme dybe forkastninger, som har været aktive i geologisk set nyere tid, og som har skabt deformationer af såvel den dybe som den overfladenære lagserie (se f.eks. Sandersen & Jørgensen, 2015, 2022). Denne forkastningsaktivitet sættes i forbindelse med trykaflastningen fra kvartærtidens iskapper. I lighed med de glacialtektoniske deformationer kan denne forkastningsaktivitet medføre fortsatte og på anden vis deformerede lagserier, og dermed risiko for nedsivning af overfladeforurening.

3. Datagrundlag

3.1 Boredata

Boredata fra Jupiterdatabasen (Hansen & Pjetursson, 2011) er anvendt dels via Geocloud i GeoScene3D, dels som direkte søgninger via GEUS' hjemmeside (<https://data.geus.dk/JupiterWWW/index.jsp>).

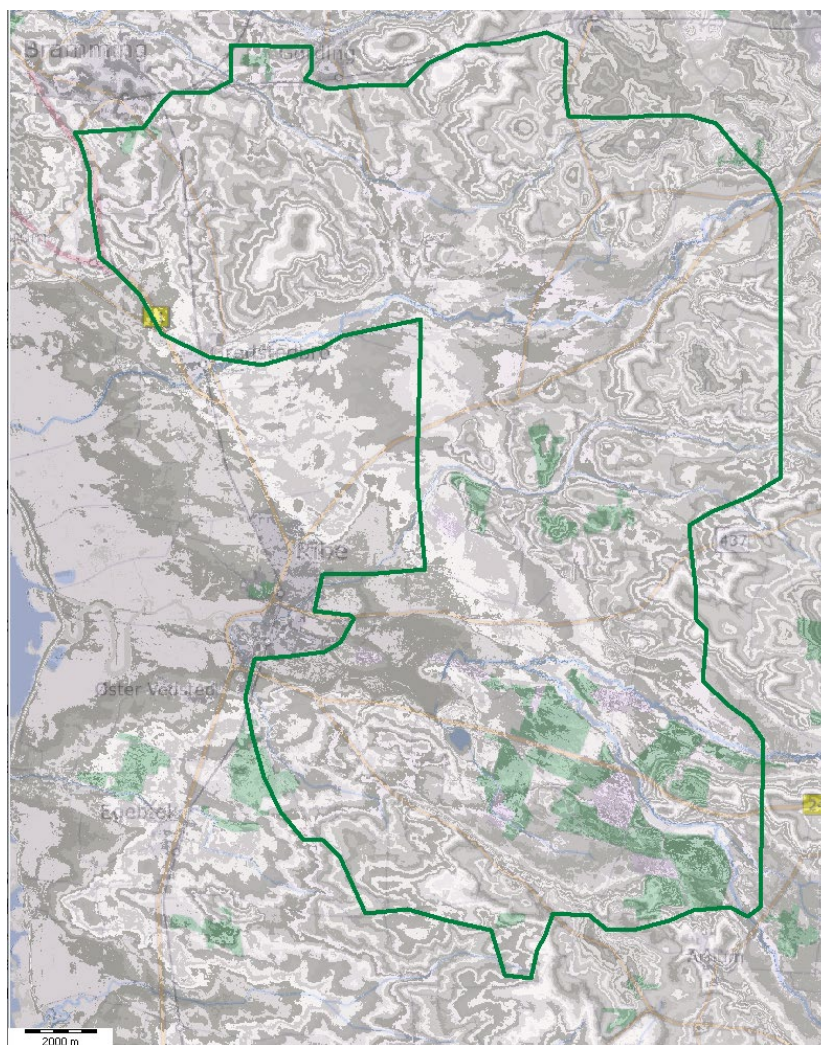


Figur 3-1. Boringer fra Jupiter-databasen, som indgår i den geologiske modellering (røde prikker).

Til brug for den geologiske tolkning er der ikke brugt en systematisk kvalitetsvurdering/rating af samtlige borer i modelområdet (som anbefalet i Geovejledning 2018/1), da der i forbindelse med de geologiske tolkninger er foretaget opslag i Jupiter for udvalgte borer langs profilerne. Ved disse opslag er den beskrevne lagserie gennemgået og vedhæftede PDF-filer i Jupiter gennemset for supplerende information. Borningsrating er dog udført og benyttet i den geostatistiske voxelmodellering af Saale aflejringerne.

3.2 Højdemodeller

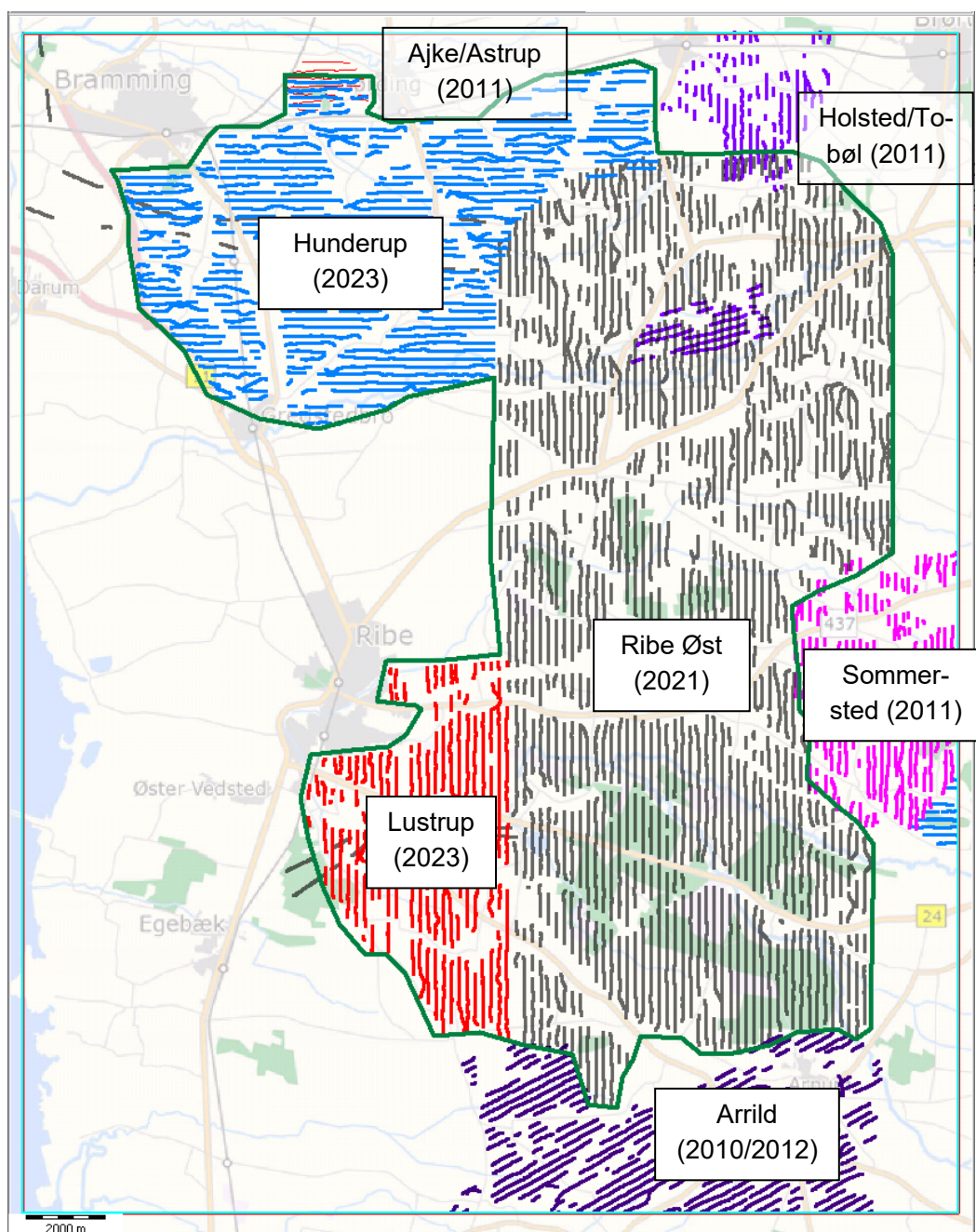
Ved den geologiske modellering i GeoScene3D er der anvendt en standard højdemodel tilgængelig i GeoScene3D (I-gis; GeoCloud), mens der for detailstudier af terrænet er anvendt LiDAR-baserede højdemodeller fra Dataforsyningen.dk (Figur 3-2; data fra 2007-kortlægningen; 1,6 m). For sidstnævnte korts vedkommende er fokus ikke de eksakte koteværdier, men i stedet mønstrene i kotevariationerne, som fremhæver trends i terrænet.



Figur 3-2. Terrænkort baseret på LiDAR-data (dataforsyningen.dk). Der er anvendt en gråtoneskala med skift for hver meter vertikalt. Se tekst for forklaring.

3.3 Geofysiske data

3.3.1 SkyTEM-kortlægninger

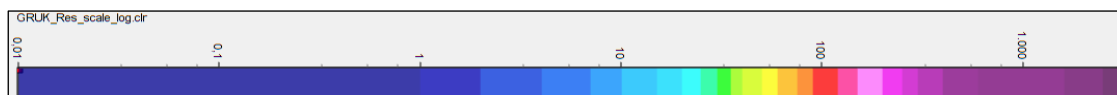


Figur 3-3. SkyTEM-kortlægninger indenfor/lige udenfor modelområdet. Årstal angiver år for kortlægning eller år for upload til Gerda.

Ribe Øst-, Hunderup- og Lustrup-kortlægningerne er udført af DIN Forsyning i perioden 2021-2023, og disse datasæt udgør de primære geofysiske data i den geologiske model (se Figur 3-3). Processerede data er leveret på Gerda-format af Aarhus Universitet. Data er endnu ikke uploadet til Gerda-databasen.

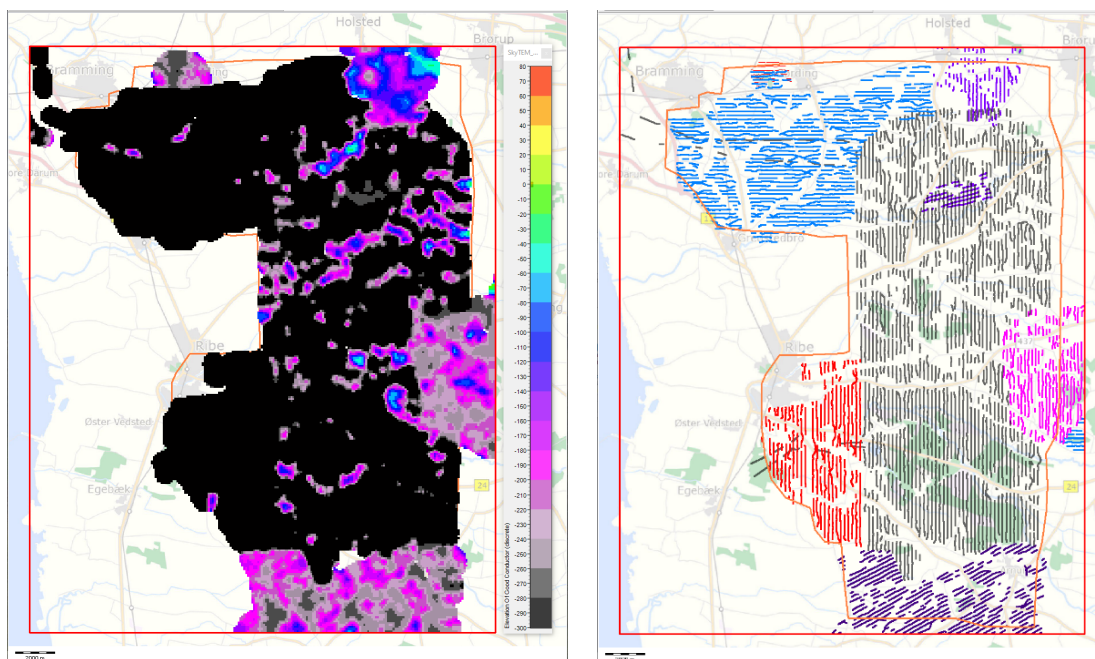
Aike/Astrup, Holsted/Tobøl, Sommersted og Arrild er udført i perioden 2010-2012 (se Figur 3-3). Alle datasæt er downloadet fra Gerda-databasen.

Farveskalaen, som bruges i modelleringen, er vist i Figur 3-4.



Figur 3-4. Farveskala anvendt for TEM-data.

Depth Of Investigation (DOI) for SkyTEM-modellerne er beregnet for 'upper' og 'lower', og heraf er 'lower' vist i Figur 3-5. Som det fremgår af figuren, har de ældre kortlægninger en knapt så dybtliggende DOI (ca. kote -120 til -240 m) som de nye kortlægninger foretaget i forbindelse med Ribeprojektet (ca. kote -300 m).



Figur 3-5. Depth Of Investigation (DOI) for SkyTEM (til venstre) og SkyTEM-surveys til højre.

3.3.2 TEM40-kortlægninger

Ifølge Gerda-databasen findes der et mindre, højmoment TEM40-datasæt ved Lustrup. Dette datasæt er indlæst i Gerda i 2007, og da det i dag er dækket af den nye SkyTEM ved Lustrup, indgår datasættet ikke i den geologiske modellering.

3.3.3 tTEM-kortlægninger

Der er udført en mindre tTEM kortlægning nord for Spandet i den sydlige del af modelområdet (Figur 3-6). Data er uploadet til Gerda i januar 2024. På grund af det sene tidspunkt for upload i forhold til den geologiske modellering, indgår data ikke i selve den geologiske model, men data indgår i de geologiske vurderinger.

3.3.4 Seismiske data

Der er fire reflektionsseismiske linjer, som ligger indenfor eller lige udenfor det geologiske modelområde og derfor er interessante for de geologiske tolkninger (Figur 3-7). De fire linjer er: Hove 1-12 og Hove 2-12 udført i 2013 (Rambøll, 2013), HV4, som er udført i 2007 (COWI, 2007), samt SV1 udført i 2008 (Cowi, 2008). Alle fire linjer er udført i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning.

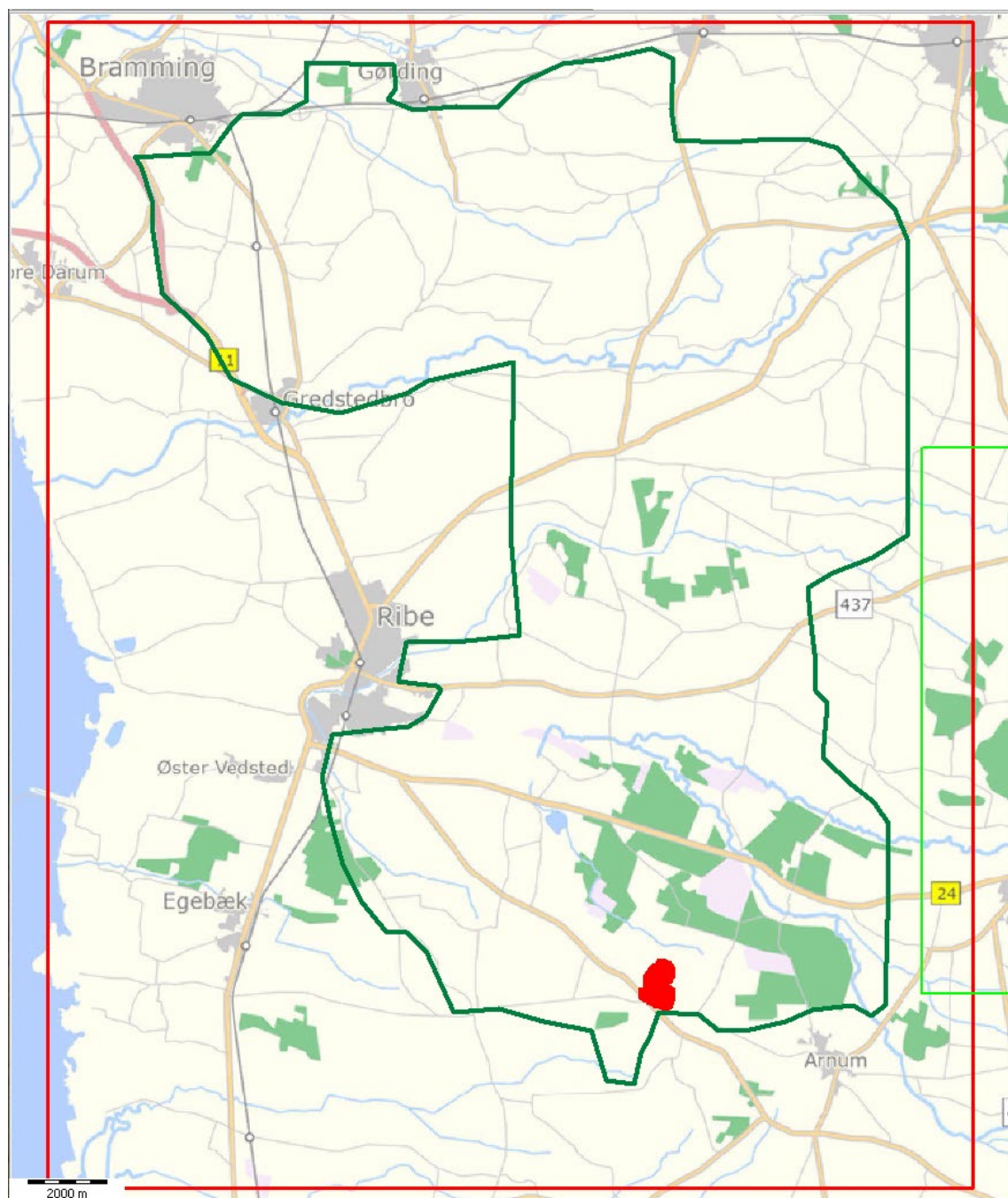
3.4 Grundvandskemiske data

Da det ikke har været en del af arbejdet at udarbejde en grundvandskemisk oversigt over kortlægningsområdet, er grundvandskemiske data kun anvendt i begrænset omfang i forbindelse med den geologiske modellering. Grundvandskemiske parametre såsom f.eks. klorid, er for udvalgte borer tilgået via Jupiterdatabasen som støtte for de geologiske tolkninger.

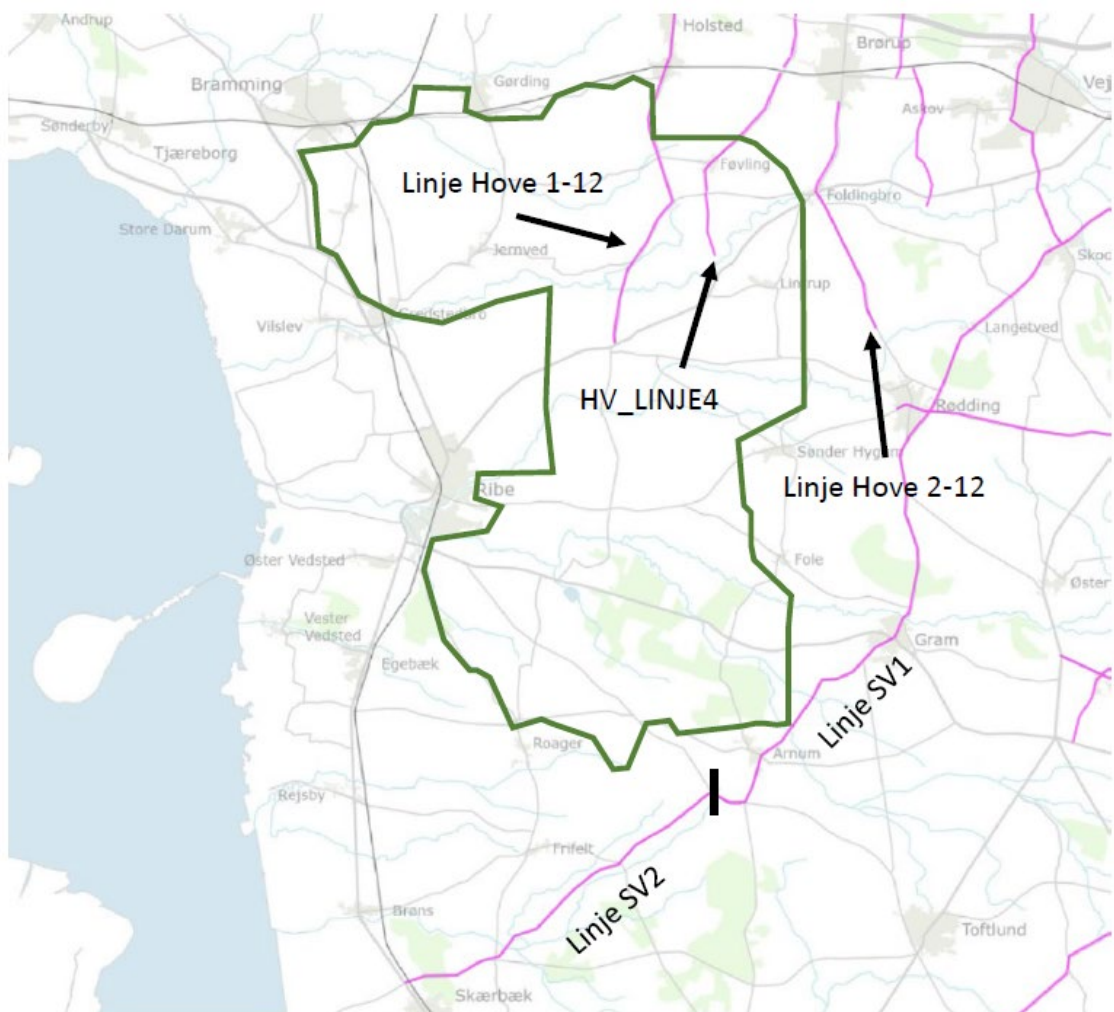
3.5 FOHM og lokale geologiske/hydrostratigrafiske modeller

FOHM-modellen er udarbejdet af Miljøstyrelsen og er baseret på en række lokale geologiske og hydrostratigrafiske modeller (se www.geus.dk eller via det direkte link: <https://data.geus.dk/geusmap/?mapname=fohm#baselay=baseMapDa&optlay=&extent=13489.969135802588,5907940.972222221,1217638.1172839506,6497667.824074074>). De lokale modeller er sammentolket til en landsdækkende model med en fast hydrostratigrafisk lagserie, hvor antallet af lag, som forekommer et givent sted i Danmark, vil variere afhængigt af den lokale geologi.

FOHM-modellens lag er downloadet og brugt som ramme-model for den nye Ribemodel. Proceduren for dette er beskrevet nærmere i afsnit 6.



Figur 3-6. tTEM-kortlægning ved Spandet (rød markering).



Figur 3-7. Grundvandsseismiske linjer ved/i det geologiske modelområde (grøn polygon). Se tekst for forklaring

4. Geologisk forståelsesmodel

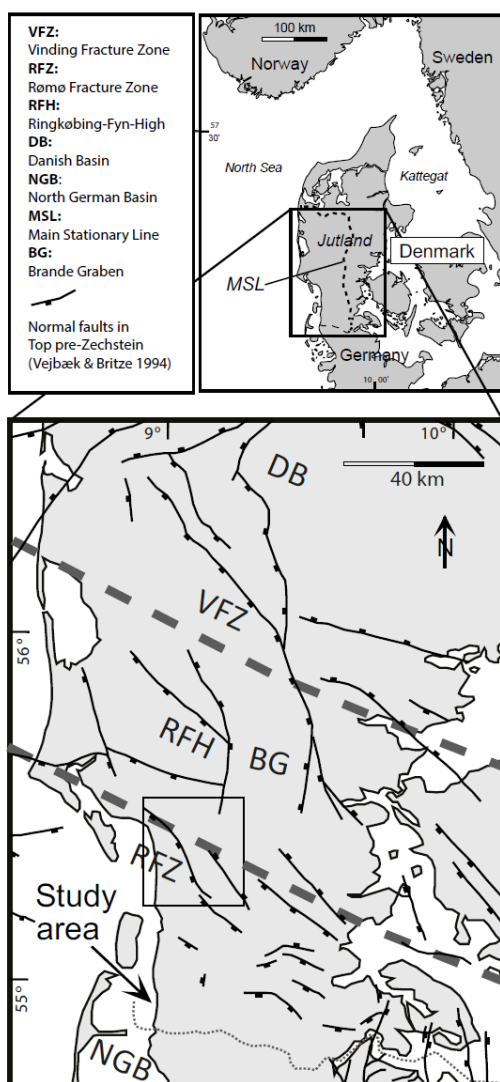
4.1 Formål og fokusområde for geologisk forståelsesmodel

Forud for opstillingen af den geologiske model er der udarbejdet en geologisk forståelsesmodel, som jævnfør Geovejledning 2018/1 (Sandersen et al. 2018) har til formål at give et indledende og overordnet overblik over geologien i modelområdet baseret på eksisterende viden, og dermed sætte rammerne for den efterfølgende geologiske modellering. De nye data, som er indsamlet i området, vil derfor ikke være en del af den geologiske forståelsesmodel.

Den røde ramme på Figur 3-6 viser det valgte fokusområde for den geologiske forståelsesmodel.

4.2 Strukturelle rammer

Fokusområdet er beliggende på sydflanken af den VNV-ØSØ orienterede Ringkøbing-Fyn-Højderyg (RFH) nordligt i det Nordtyske Bassin (Figur 4-1). Højderyggen blev dannet i slutningen af Karbon og starten af Perm (Vejbæk 1997). De dybe krystalline bjergarter under bassinet og højderyggen er prækambriske og disse overlejres af palæozoiske sedimenter (Lyngsle 2007). Med en orientering omtrent parallelt med RFH ligger Rømø Forkastningszonen (RFZ), som udgør en overgangszone mellem det Nordtyske Bassin (NGB) og RFH på samme måde som Vinding Forkastningszonen (VFZ) gør det nord for højderyggen (Figur 4-1). Forkastningerne, som er tegnet ind på Figur 4-1, forsætter toppen af præ-Zechstein bjergarterne. I Sen Karbon til tidlig Perm skete der sideværts bevægelser langs RFH, hvilket medførte, at individuelle blokke roteredes i forhold til hinanden (EUGENO Working Group 1988). I Zechstein blev der aflejret tykke saltlag i bassinet såvel syd og nord for RFH, og senere bevægelser i saltet grundet densitetsforskelle i lagserien skabte deformationer af både saltet og aflejringerne ovenover. Bevægelser i saltet har været medvirkende til indsynkning af lagserien nord for Tønder, hvilket har været medvirkende til dannelsen af Tøndergraven. De fleste forkastninger i sedimentpakken ovenover har ifølge Clausen et al. (2012) ikke kontakt til forkastninger i top præ-Zechstein på grund af det mellemliggende salt.



Figur 4-1: Strukturelle elementer i det dansk-norske Bassin (modificeret efter Sandersen & Jørgensen, 2015). Forkastninger ved Top præ-Zechstein er indtegnede som sorte streger. Fokusområdet for den geologiske forståelsesmodel er markeret med grå rektangel.

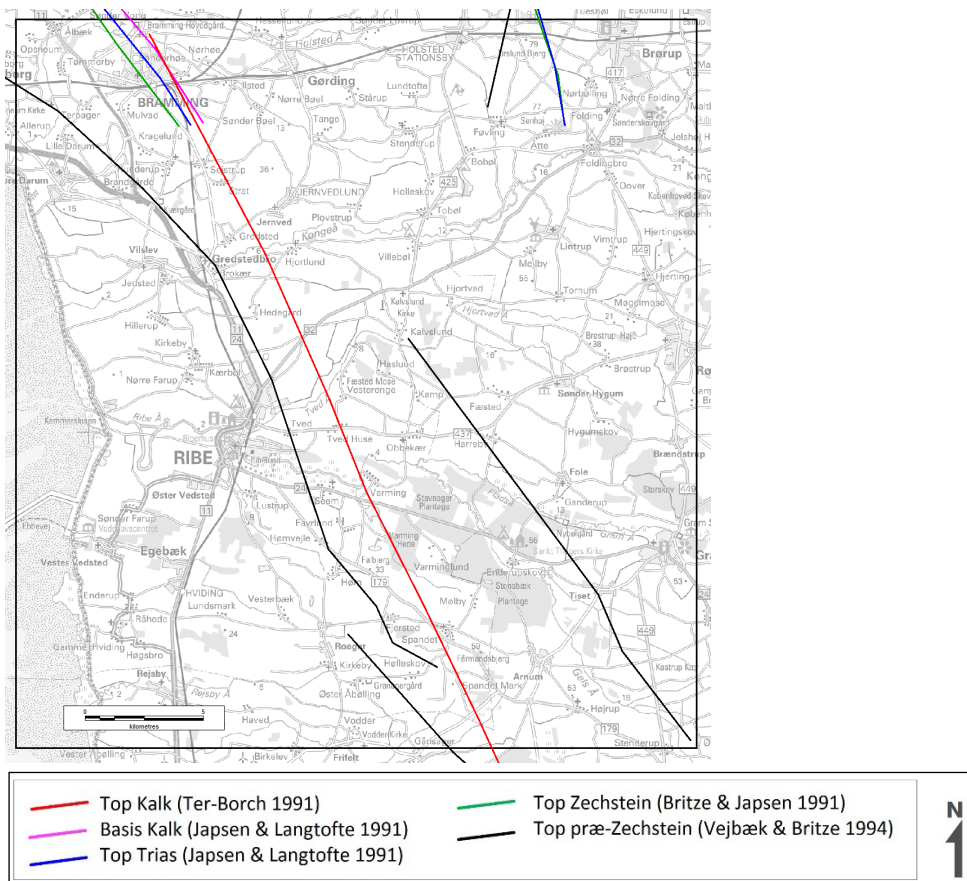
Tøndergravens udformning ses tydeligt i kalkoverfladens struktur som en VNV-ØSØ orienteret gravsænkning på tværs af Sønderjylland (Figur 4-3). Flere af forkastningerne, som ses i kalkoverfladen, har offsets på flere hundrede meter. At forkastningerne har været aktive i Neogen afspejles f.eks. i tykkelsen af de miocæne Hodde og Gram Formationer, og nogle af forkastningerne har forsat lagserien til mindst toppen af Miocæn (Friborg et al. 2002, Jørgensen et al. 2012).

Ifølge Sandersen & Jørgensen (2015) er den seneglaciale hedeslette ovenover Tøndergraven deformeret som følge af sideværts bevægelser langs forkastningerne i Tøndergraven i tidlig Holocæn. Dette tolkes at skyldes reaktivering af dybe forkastninger som følge af vægtaflastning i forbindelse med bortsmeltningen af det sidste isdække i Weichsel. Tilsvarende tektonisk påvirkning af den overfladenære geologi i kvartæret er beskrevet fra andre dele af Danmark (se f.eks. Sandersen et al., 2021). Nye undersøgelser af trends i orienteringer af forkastninger, begravede dale og topografiske dale peger på, at aktiv tektonik som følge af

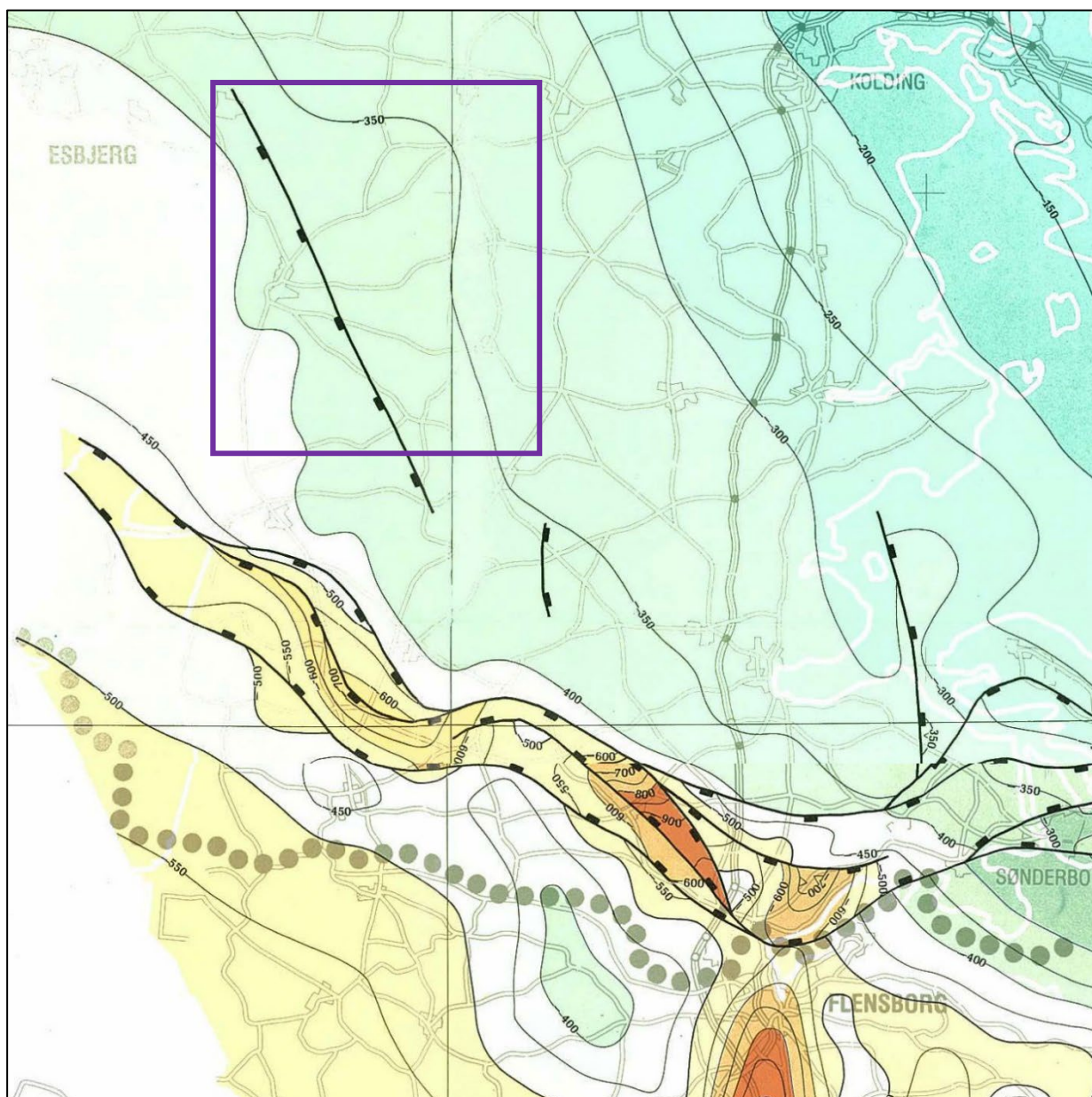
iskappernes be- og aflastning af undergrunden har haft indflydelse på erosionsmønstrene gennem store dele af kvartæret (Sandersen & Jørgensen, 2022).

Indenfor fokusområdet er der tidligere kortlagt flere større forkastninger (Figur 4-2). De dybeste er forkastninger, der forsætter top præ-Zechstein overfladen og som forløber NV-SØ til NNV-SSØ midt gennem fokusområdet (sorte streger). Omtrent parallelt hermed er en forkastning, som forsætter toppen af Kalkgruppen (rød streg; se også Figur 4-3). Mod nordvest, ved Bramming, ses tilsyneladende parallelle NNV-SSØ-forkastninger, som forsætter Top Zechstein, Top Trias, Basis Kalk og Top Kalk, men der er her formodentlig tale om én forkastning, som forsætter alle de nævnte grænseflader. Mellem Holsted og Brørup i fokusområdets nordøstlige del ses et par ca. N-S orienterede forkastninger, som forsætter Top præ-Zechstein, Top Zechstein og Top Trias. Disse udgør sandsynligvis forkastninger relateret til Brandegravens vestlige afgrænsning (Figur 4-1).

Det kan således forventes, at lagserien helt til terræn kan være forkastet/deformeret i områder med aktiv tektonik, og at erosionen – såvel under istiderne som i de mellemliggende mellemistider – i et vist omfang kan være påvirket af forkastninger.



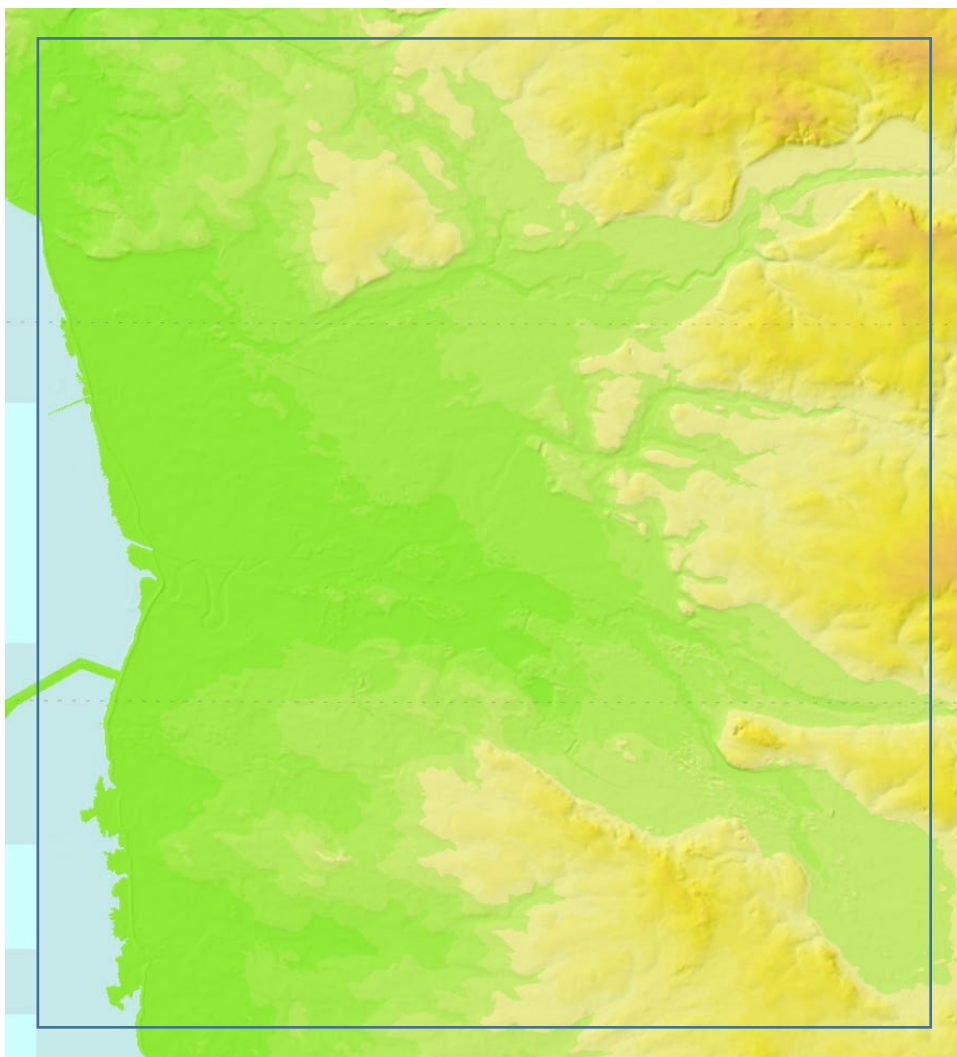
Figur 4-2: Forkastninger kortlagt indenfor fokusområdet.



Figur 4-3: Toppen af kalkoverfladen (Ter-Borch, 1991). Lilla rektangel angiver omtrentlig placering af fokusområdet for forståelsesmodellen. Signaturen på kurverne er meter under havet.

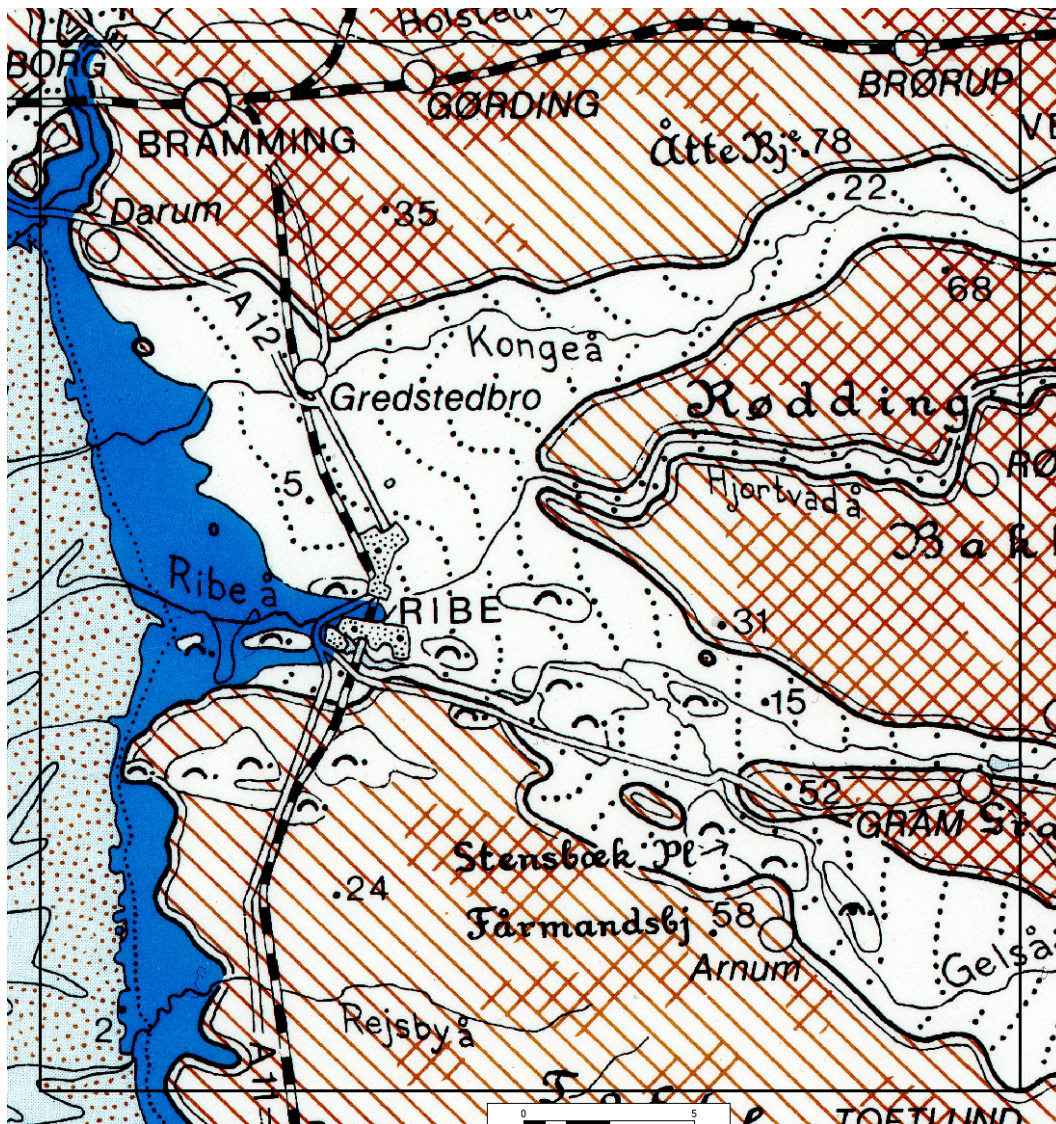
4.3 Overordnet landskabsbeskrivelse

Terrænet i fokusområdet varierer fra ca. 80 m o.h. i bakkerne mod øst og ned til kysten i kote 0 mod vest (Figur 4-4). Landskabet kan overordnet deles i tre: 1) Bakkeøer, 2) Hedesletter, og 3) Marskland (Figur 4-5).



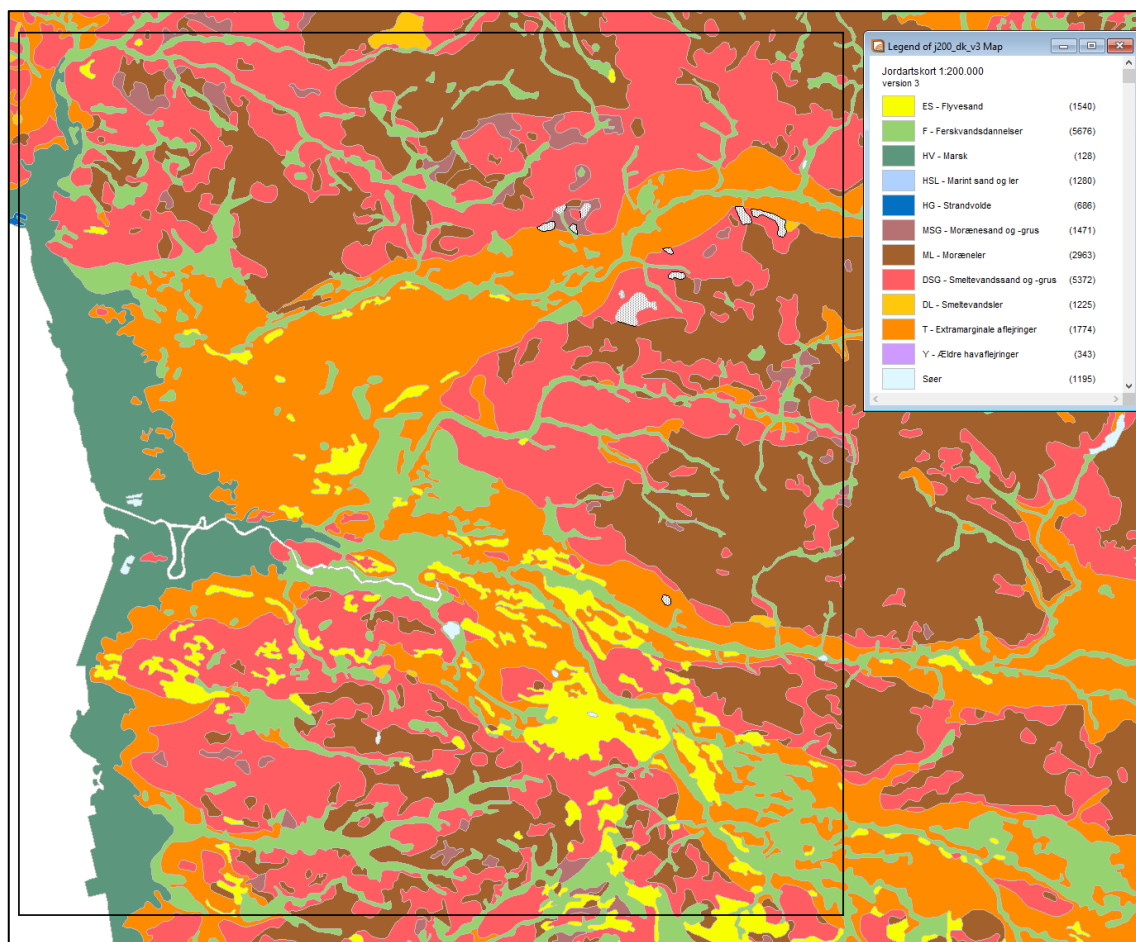
Figur 4-4. Højdemodel. Brune områder: op til ca. 80 m o.h.; grønne områder: ned til 0 m o.h.

Bakkeøerne har et uroligt relief, som er præget af erosionsdale og relativt store forskelle i koter. Bakkeøerne har de største koter mod øst, og generelt ses en aftagen i kote mod vest (Figur 4-4). Bakkeøerne er omgivet af hedesletter, som hælder i vestlige retninger mod kysten. Bakkeøerne er fra næstsidsite istid (Saale) og udgør vekslende sandede og lerede morænelandskaber (Figur 4-5). Mod nord haves Holsted Bakkeø, mod øst Rødding Bakkeø, og mod syd Toftlund Bakkeø. Hedesletterne mellem bakkeøerne udgør mod nord en smal VSV-ØNØ orienteret slette fra Vejen til Gredstedbro, hvorpå Kongeåen løber (Figur 4-5). Mod syd haves en VNV-ØSØ orienteret, lidt bredere hedeslette, hvor Gelså og Gram å mødes lidt sydøst for Ribe. De to hedesletter løber sammen omkring og nord for Ribe. Marsklandet dækker de vestligste dele af hedesletten vest for Ribe og Gredstedbro, mens marsken mod syd og nord jævner Figur 4-5 grænser direkte op til bakkeøerne.



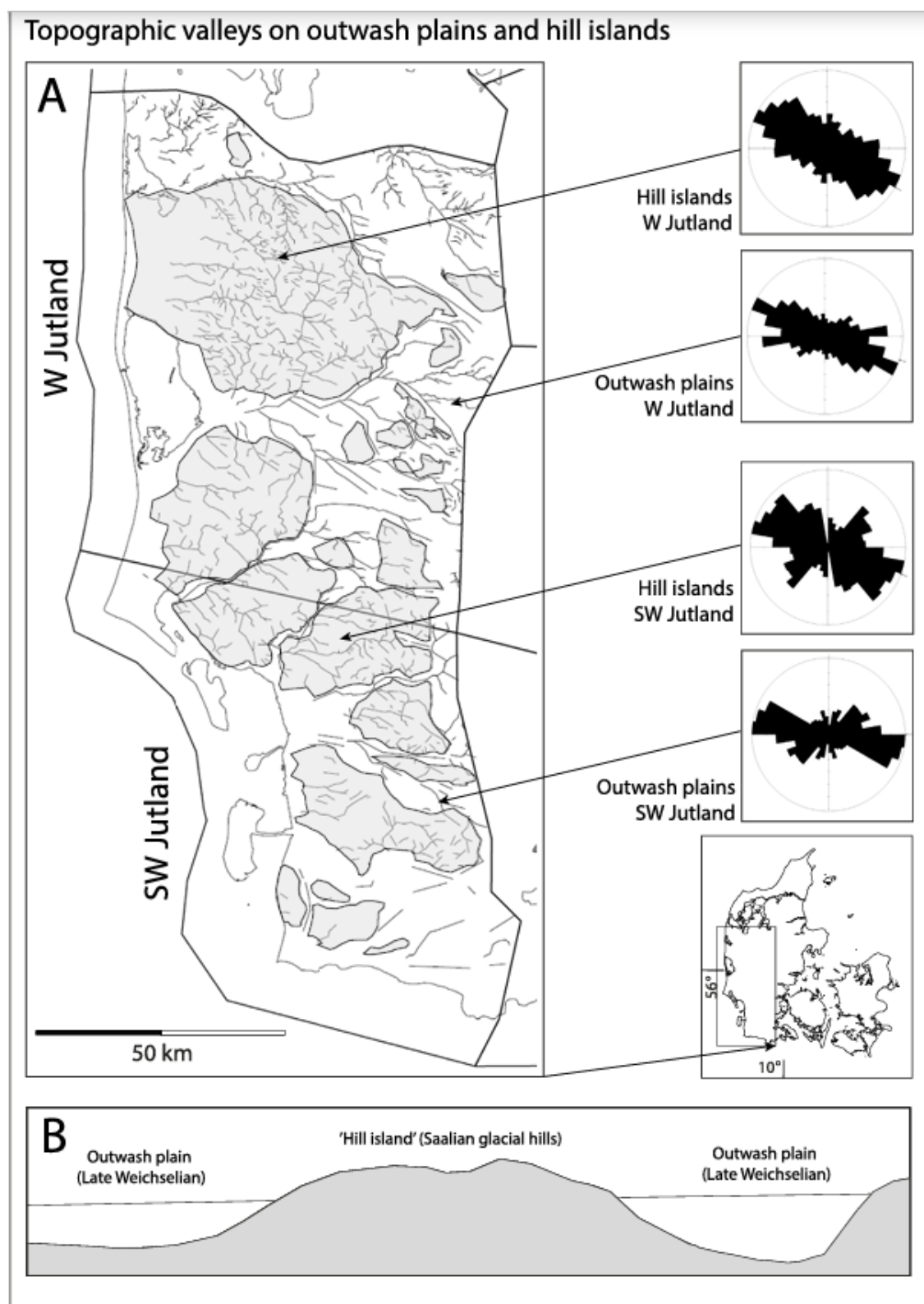
Figur 4-5: Landskabskort over Danmark. Blad 3, Sønderjylland, Fyn (Smed 1982). Brun skråskravering=Saale morænelandskab, overvejende sandet; Brun krydsskravering= Saale morænelandskab, overvejende leret; Hvid bund med priksignatur=hedeslette; Blå signatur=Marsk)

Jordartskortet i Figur 4-6 underbygger, at der er tale om vekslende sandede og lerede morænelandskaber på bakkeøerne, mens hedesletterne er domineret af ekstramarginale aflejringer af sand og grus. Sammenlignes kortet med landskabskortet (Figur 4-5), er der lidt uoverensstemmelser med hensyn til udbredelsen af marsken og placeringen af Toftlund bakkeøes nordvestlige afgrænsning. Rundt om Toftlund bakkeøes vestlige del ses et bånd af ekstramarginale aflejringer. Forskellene i afgrænsningen skyldes sandsynligvis de meget små højdeforskelle (Figur 4-4). Langs de nuværende åer haves ferskvandsaflejringer, og øst og nordøst for Ribe ses større områder med ferskvandsaflejringer.

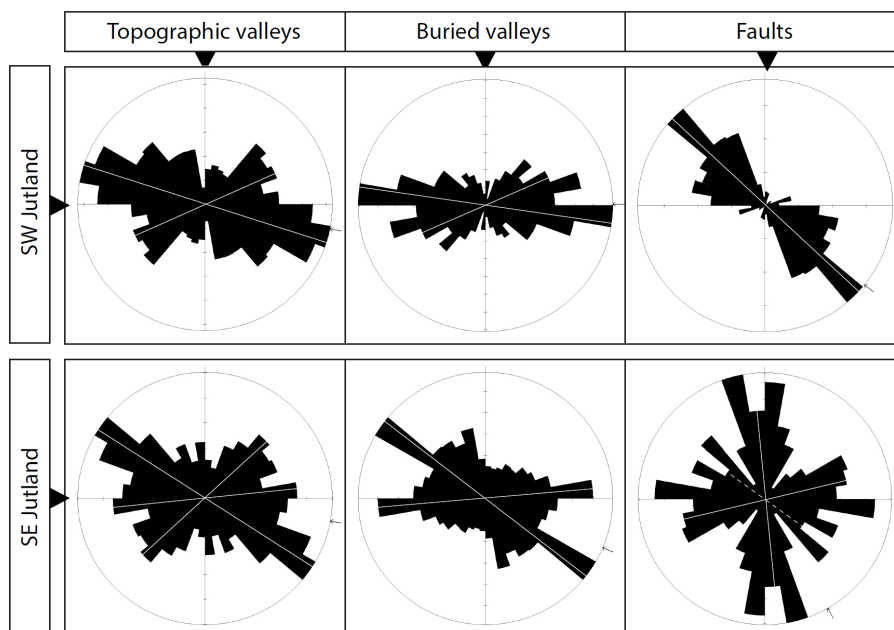


Figur 4-6: Jordartskort 1:200.000 (GEUS; v3)

Ifølge Sandersen & Jørgensen (2022) er der tegn på, at erosionsdalene i det nuværende terræn i Vestjylland vest for Hovedopholdslinjen er præget af stort set de samme orienteringer, uanset om man ser på bakkekøerne eller på hedesletterne (Figur 4-7). Den nordlige del af området ('W Jutland') domineres af VNV-ØSØ-orienteringer for såvel hedesletter som bakkekøer, og for Sydvestjylland ('SW Jutland') er der suppleret med en VSV-ØNØ/SV-NØ-orientering. Disse konsistente orienteringer tolkes som værende et udtryk for, at erosionen i nogen grad er styret af overordnede faktorer, som ikke er relateret til hverken alder eller geologisk dannelse af de overfladenære lag. Ser man også på Sønderjylland henholdsvis vest og øst for Hovedopholdslinjen ('SW Jutland' og 'SE Jutland'), ses samme tendens for de topografiske dale (Figur 4-8). Da der samtidig kan ses gode korrelationer mellem topografien og forkastninger i området tolkes det, at erosionsmønstrene i løbet af kvartæret har været påvirket af aktive forkastninger (Sandersen & Jørgensen, 2022).



Figur 4-7: Orienteringer af topografiske dale på henholdsvis bakkeøer og hedesletter. Se tekst for forklaring. Fra Sandersen & Jørgensen (2022).



Figur 4-8: Orienteringer af topografiske dale, begravede dale og forkastninger i Sydvest- og Sydøstjylland (henholdsvis vest og øst for Hovedopholdslinjen (MSL; Figur 4-1). Se tekst for forklaring. Fra Sandersen & Jørgensen (2022).

4.4 Geologisk opbygning

4.4.1 Prækvartæret

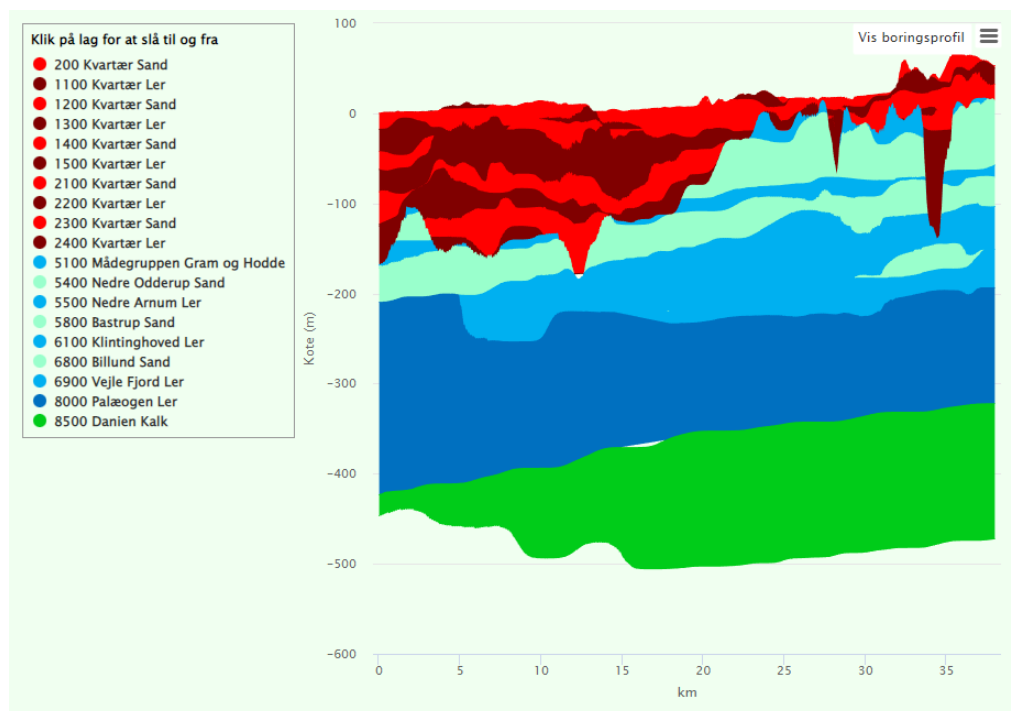
Den del af den prækvartære lagserie, som er af interesse for vandindvinding indenfor fokusområdet, er illustreret på Figur 4-9, som er et profilsnit gennem FOHM-modellen ca. fra SV til NØ omtrent fra Rejsby til Rødding. Profilet viser nederst Danienkalk (lag 8500) og herover palæogent ler (lag 8000). Over disse lag haves en Miocæn lagserie, som kan omfatte Vejle Fjord Ler (lag 6900), Billund Sand (lag 5800), Klittinghoved Ler (lag 6100), Bastrup Sand (lag 5800), Nedre Arnum Ler (lag 5500), Nedre Odderup Sand (lag 5400) samt Mådegruppen (Gram og Hodde Formationerne; lag 5100). Kalken ligger for dybt til at kunne udgøre et potentielt grundvandsmagasin, og toppen af det fede og mere end 100 m tykke lag af palæogent ler ovenover udgør derfor reelt den nedre grænse for grundvandsinteresserne i området.

På profilet i Figur 4-9 ses en generel tendens til, at de prækvartære lag hælder mod sydvest. Prækvartæroverfladen på profilet viser et markant relief på mere end 150 m, hvilket også kan ses på GEUS' prækvartærkort (Figur 4-10). Prækvartæroverfladen på Figur 4-10 viser, at prækvartæroverfladen generelt ligger højt under bakkeøerne og dybere under hedesletterne.

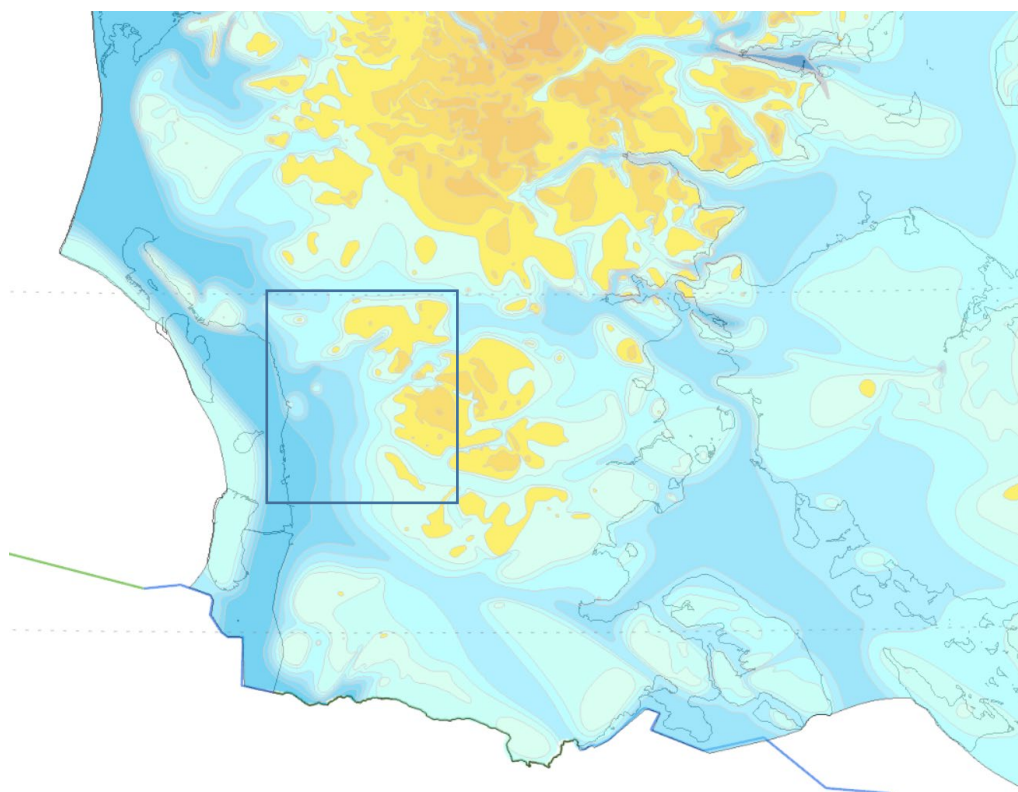
4.4.1.1 Palæogen

Overfladen af kalken viser, at kalken kan forventes at ligge mellem ca. kote -325 til -450 indenfor fokusområdet, og at fladen hælder i vest-sydvestlig retning (Figur 4-3). Det ovenover liggende palæogene ler er beliggende mellem ca. kote -250 og -200 m (se profilet fra

FOHM-modellen i Figur 4-9). Palæogenet består nederst af Danienkalk og herover af palæogen ler, som ikke vil blive beskrevet nærmere her.



Figur 4-9: Geologisk profil gennem Miljøstyrelsens FOHM-model fra Rejsby mod sydvest (til venstre) og til Brørup i nordøst (til højre). Legenden viser lagene, som er defineret i FOHM.



Figur 4-10: Prækvarteroverfladen i Sønderjylland. Udsnit. (Binzer & Stockmarr, 1994). Blåt rektangel angiver fokusområdets placering. Orange farver angiver koter mellem 0 og 50 m, mens de blå farver angiver koter mellem 0 og -175 m.

4.4.1.2 Miocæn

Den miocæne lagserie er grundigt beskrevet i Rasmussen et al. (2010), og er illustreret på Figur 4-11, som viser den miocæne lagserie, som den er tolket i et profilsnit fra Ribe til Rødding. Grænsen mellem det paleocæne/eocæne ler og aflejringerne fra Oligocæn/Miocæn udgør en erosionsdiskordans, og den oligocæne/miocæne lagserie repræsenterer en overgang fra åbne marine forhold til mere kystnære forhold og senere kontinentale forhold. Dette viser sig i form af et stadig større indhold af silt og sand, og lagserien viser hyppige variationer i aflejningsmiljøet. I det følgende gennemgås kortfattet de enkelte miocæne formationer i Ribe Gruppen og Mådegruppen, som beskrevet af Rasmussen et al., 2010.

Ribe Gruppen

Ribe Gruppen er ældst og består af Vejle Fjord, Billund, Klintinghoved, Bastrup, Arnum og Odderup Formationerne fra Nedre Miocæn. Der ses tre cykler med skiftende ler- og sanddominans, og hvor der i den øverste cyklus er forekomst af kullag. Ribe Gruppen blev aflejret i deltasystemer, som bredte sig fra nord mod syd og sydvest. Den nedre grænse til de underliggende oligocæne aflejringer er skarp og der kan her forekomme et grus/sandlag. Billund Formationen kan formodentlig ikke findes i fokusområdet. Ribe Gruppen har en samlet tykkelse på 200 m eller mere.

Vejle Fjord Formationen (VFF) udgøres overvejende af mørk brun, leret silt, og er stedvist lamineret, grøngrå sand og mørkbrun leret silt med tynde sandlag. Sedimenterne i VFF blev aflejret i brakt til fuldt marint miljø. I Sønderjylland, hvor Billund Formationen er fraværende, overlejres VFF af den lerholdige Klintinghoved Formation. VFF forventes at være omkring 30 m tyk indenfor fokusområdet.

Klintinghoved Formationen (KF) består af mørk brun, siltet ler med indlejrede lag af sand med skarpe afgrænsninger. Sandet er homogent eller fint lamineret, hvor der ofte kan ses tidevandspræg.

KF aflejredes i et marint miljø ved vanddybder på mellem 15 og 60 m, og hvor der var kraftig påvirkning af tidevand og storme. KF's øvre grænse kan være både skarp og gradvis. KF når tykkelser på over 100 m i fokusområdet.

Bastrup Formationen (BF) består overvejende af gråt, mellem- til grovkornet sand med indlejrede gruslag. Sandet domineres af kvarts med indhold af glimmermineraller, og der ses såvel opad finende som opad grovende sekvenser.

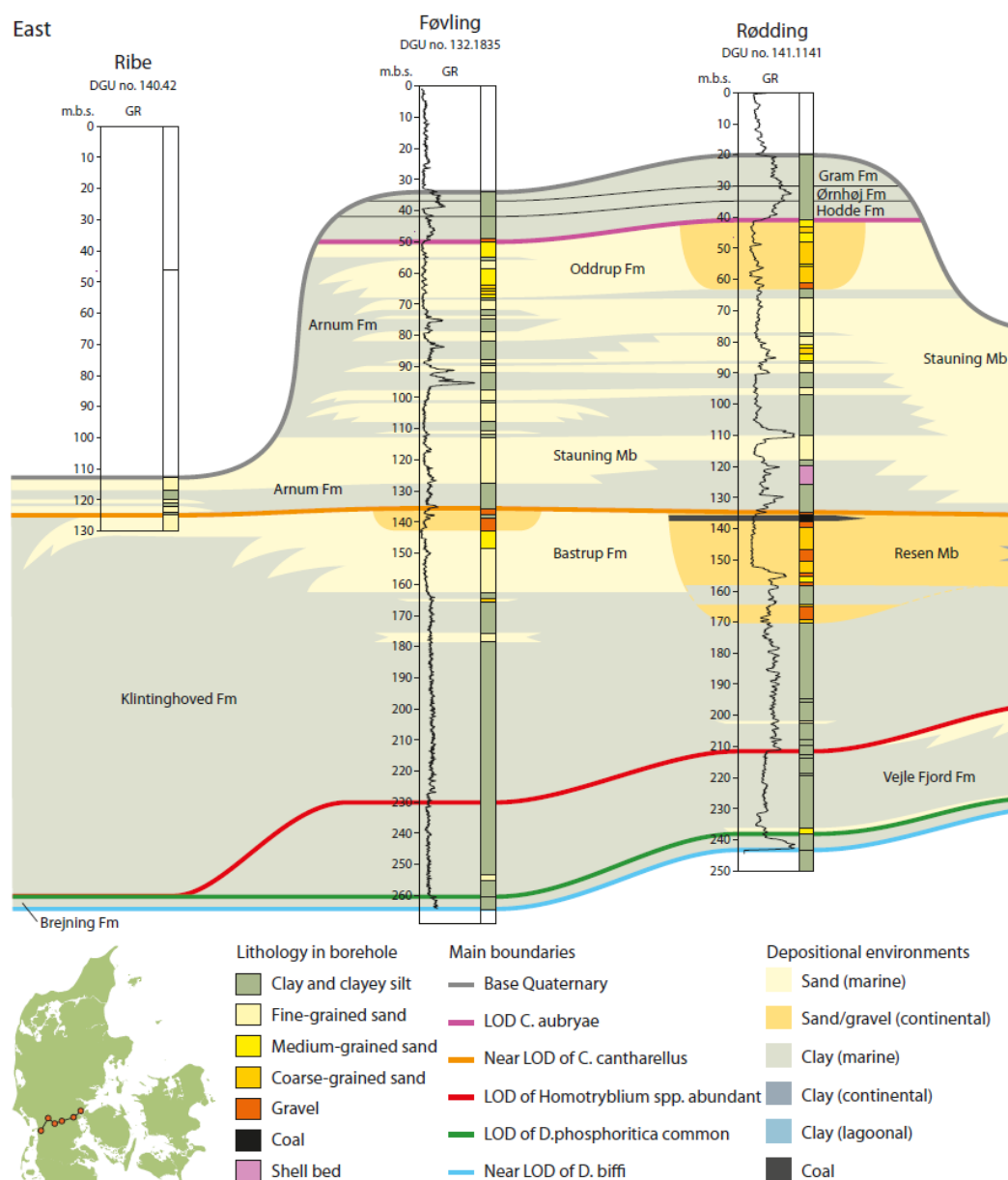
Aflejningsmiljøet har været deltaisk og fluvial med point bars og kanaler, og indlejret ler tolkes at repræsentere flodsletteaflejringer. Den nedre grænse kan være både skarp og gradvis, mens den øvre grænse til Arnum Formationens mere finkornede sedimenter typisk er skarp. BF er op til 25 m tyk indenfor fokusområdet.

Arnum Formationen (AF) består af mørkebrun siltet ler med stedvise skalrige lag og tynde, laminerede og finkornede sandlag. De tynde sand- og siltlag kan have et højt indhold af tungmineraller og glaukonit.

AF er aflejret i fuldt marint miljø, men dog ikke med havdybder større end at sedimenterne kunne påvirkes af strøm- og bølgeaktivitet. AF veksler med de sandede Bastrup og Odderup Formationer, men kan ifølge Figur 4-11, nå en samlet tykkelse på op til 50-60 m.

Odderup Formationen (OF) består af fin- til grovkornet sand med indlejring af tynde lerlag og brunkulslag. Formationen er opdelt i to 'members', Stauning og Fasterholt, hvor sidstnævnte er kulholdig og ikke forventes at findes i Sønderjylland. Formationen er kvartsrig med et vist glimmerindhold og med stedvist højt indhold af tungminerale.

OF blev aflejret i nedre til øvre strandplan i et prograderende kystmiljø. Den øvre grænse til Hodde Formationen er fremtrædende og ofte udformet som et gruslag. Tykkelsen af OF er varierende indenfor fokusområdet, men forventes at kunne være op til eller mere end 50 m.



Figur 4-11: Den miocæne lagserie fra Ribe til Rødding, repræsenteret ved tre dybe borer (Fra Rasmussen et al. 2010).

Måde Gruppen

Måde Gruppen består af Hodde, Ørnhøj og Gram Formationerne. Den samlede tykkelse af Måde Gruppen forventes at være op til omkring 25 m indenfor fokusområdet.

Hodde Formationen (HF) består af mørk brun organiskholdig, siltet ler med tynde sandlinser. I den øvre del forekommer lamineret, siltet ler med glaukonit, mens den basale del af formationen består af et gruslag.

HF er aflejret i et fuldt marint miljø, og det basale gruslag repræsenterer den indledende transgression. Den øvre grænse er defineret af et skrap skift til Ørnhøj Formationens grønne ler. Tykkelsen af HF forventes at ligge på omtrent 5 m indenfor fokusområdet.

Ørnhøj Formationen (ØF) består af grønt og brunt ler med høje koncentrationer af glaukonit aflejret i et marint miljø, hvor sedimenttilførslen var begrænset.

Havdybden var antagelig mere end 100 m og ØF repræsenterer en udbredt transgression i Miocæn. Den øvre grænse til Gram Formationen er defineret ved et farveskift fra grønligt til mørkebrunt. Tykkelsen af ØF forventes at være på op til 5 m indenfor fokusområdet.

Gram Formationen (GF) består overvejende af mørk brun ler, som gradvist bliver mere siltet op efter. I den øvre del ses tynde sandlag indlejret. Siderit konkretioner er hyppige i den nedre del, og pyritindholdet er højt.

GF er aflejret i fuldt marint miljø med vanddybder op til omkring 100 m, men i den øverste del af formationen haves indslag af stormlag, som peger på, at kysten begynder at progredere. Det forventes at GF er op til ca. 10 m tyk indenfor fokusområdet.

Toppen af miocænet udgør prækvartæroverfladen i fokusområdet (se også Figur 4-10). På profilet i Figur 4-11 ses det, at borerne DGU nr. 132.1835 og 141.1141 anborer miocænet kun 20 til 30 m under terræn, i modsætning til DGU nr. 140.42 i Ribe mod vest, hvor miocænet ligger så dybt som ca. 110 meter under terræn. I sidstnævnte boring er Mådegruppen borte-roderet og hovedparten af Arnum og Odderup Formationerne ligeså – i alt omtrent 100 m aflejringer.

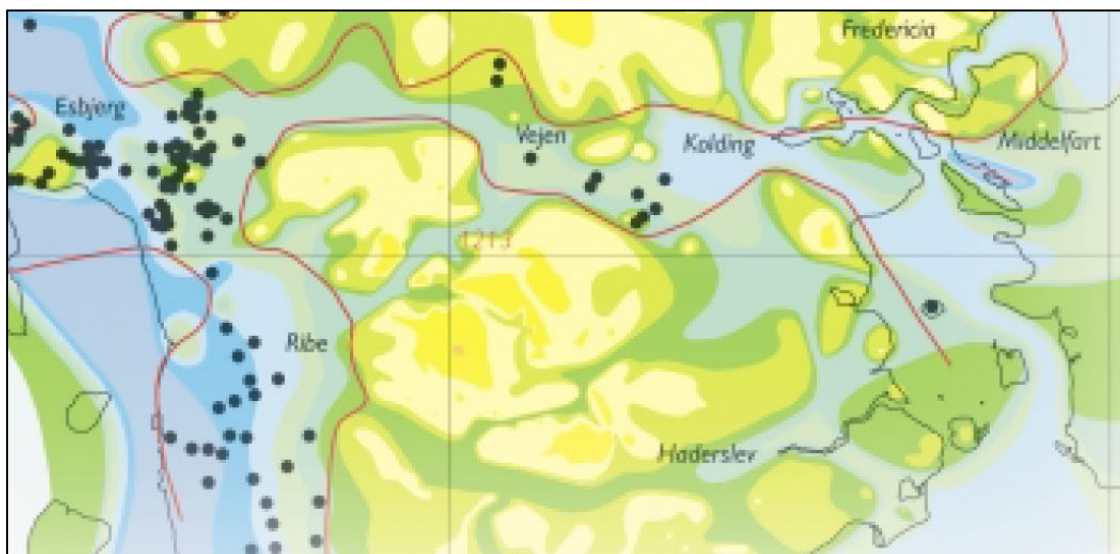
4.4.2 Kvartæret

I det sydlige Jylland er der fundet spor efter fire istider (Menap, Elster, Saale og Weichsel) og tre mellemistider (Cromer, Holstein og Eem), hvilket repræsenterer godt og vel et interval på 1 million år (Gravesen et al., 2004). Istidsaflejringerne består af moræne- og smeltevandsaflejringer, samt marint ler, mens aflejringer fra mellemistider og interstadialer består af ferskvandssedimenter og marint sand og ler. Oplysninger om Menap istiden er få, og kendskab til isudbredelser haves derfor ikke. Cromer mellemistiden kendes fra aflejringer ved Ølgod (Houmark-Nielsen et al., 2006), men sådanne aflejringer er ikke med sikkerhed fundet indenfor fokusområdet. Fund af interstadiale sedimenter ved Ølgod fra starten af Elster istiden vidner om korte tidsafsnit med varmere forhold (Ølgod I og II). Under Elster glaciationen

kendes tre isfremstød fra nordlige, nordøstlige og sydøstlige retninger (Houmark-Nielsen, 2011).

I det sydvestlige Jylland haves en marin lagserie, hvor sedimentationen begynder i slutningen af Elster og fortsætter gennem det meste af Holstein interglacial (Knudsen, 1994). Denne lagserie, som viser overgangen fra arktiske til boreale forhold, kan blandt andet findes i boring DGU nr. 140.82b ved Inder Bjergum udenfor Ribe, og her kunne grænsen mellem de arktiske aflejringer fra Elster og de boreale marine aflejringer fra Holstein fastslås til kote -45 m (Knudsen, 1987). Elster sedimenterne ved Inder Bjergum består overvejende af ler og fint finsand – stort set svarende til Holsteinsedimenterne, som består af siltet ler og ler. Det interglaciale ler fra Holstein har typisk et højt indhold af glimmer og planterester, hvilket gør, at aflejringerne kan være svære at skelne fra de miocæne aflejringer (Knudsen, 1987). Det såkaldte 'Esbjerg Yoldia ler' (Jessen, 1922) omtrent i kote 0 ved Esbjerg kan ifølge Knudsen (1987) korreleres med Sen Elster sedimenterne ved Inder Bjergum, men koteforskellen betyder, at lagene ved Esbjerg formodentlig er dislocerede.

Fund af marine Holsteinaflejringer i det sydvestlige Jylland viser et bredt N-S til NNW-SSØ orienteret trug med store tykkelser af marint Holstein (Figur 4-12). Knudsen (1987) bemærker, at områderne med tykke serier af marine aflejringer er sammenfaldende med områder, hvor prækvartæret ligger dybt, og havets udbredelse har sandsynligvis været styret af reliefet i prækvartæroverfladen.



Figur 4-12: Fund af marine aflejringer fra Holstein (sorte prikker) og den formodede udbredelse af Holsteinhavet (rød afgrænsning). Det bagvedliggende kort illustrerer prækvartæroverfladens højdeforhold (se Figur 4-10). Udsnit; fra Konradi (2001).

Under Saale glaciationen kendes til tre større isfremstød: 'Det Norske Fremstød' fra nord var det første, som formodentlig dækkede den sydlige del af Jylland. Der blev aflejret en sandet, kvartsholdig moræne med indhold af materiale med tydelig nordlig oprindelse (Houmark-Nielsen, 2011). Herefter kom 'Drenthe' fremstødet fra nordøst, hvor der aflejredes grove smeltevandssedimenter og moræner med bjergartsfragmenter fra den mellemste del af Sverige. Der er fundet tegn på, at der under Drenthe fremstødet muligvis også er sket lokale isfremstød fra nordvestlige til vestlige retninger (Sjørring & Frederiksen, 1980). Endelig kom

'Warthe' fremstødet fra øst/sydgøst (Figur 4-13), og der blev aflejret lerede, kvartsfattige og kalkrige moræner fra det baltiske område.



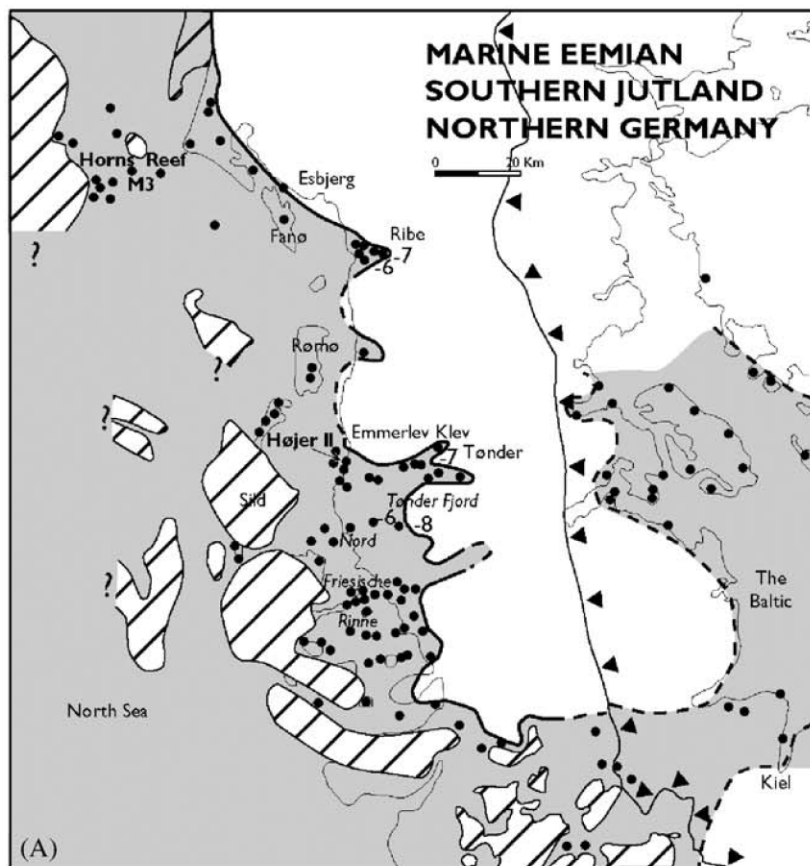
Figur 4-13: Fordelingen af endemoræner fra Saale (Drenthe og Warthe), Mellem Weichsel (Ristinge) og Sen Weichsel (Hovedfremstødet og det ungbaltiske fremstød). Fra Houmark-Nielsen (2011); numre referer til specifikke lokaliteter i artiklen.

Ovenover Holsteinlagene ved Inder Bjergum findes et tyndt lag af ikke-marint, siltet ler, der henføres til Saale, og herover haves marint Eem på et par meters tykkelse (Knudsen, 1987). Nordøst for Ribe findes der et lag af moræneler mellem de to interglaciale, marine lagserier (Mertz, 1977).

Udbredelsen af transgressionen i Eem i det sydlige Jylland og i det nordlige Tyskland er vist på Figur 4-14. Tykkelsen af uforstyrrede Eem-sedimenter i Sydvestjylland er ifølge Knudsen (1994) op til omkring 10-15 m, forekommende mellem kote -10 og -30 m. I fokusområdet er udbredelsen af Eem-aflejringer dog begrænset (se Figur 4-14). Alle marine Eem-sedimenter er aflejret på forholdsvist lavt vand fra tidevandszonen og til dybder af ca. 30 m, og ofte startes sedimentationen i Eem med ferskvandsler, gytje eller tørv (Knudsen, 1987; Penney, 1990).

Fokusområdet ligger placeret vest for Hovedopholdslinjen og er således ikke påvirket af isfremstød i Sen Weichsel (Figur 4-13). Dog er der mulighed for, at Ristinge fremstødet i Mellem Weichsel strakte sig langt ind over den sydlige del af Jylland, som vist på Figur 4-13. I Sønderjylland er bakkerne ved Vongshøj og den tolkede dødsmorfologi på Tinglev hedeslette set som et resultat af Ristingefremstødet (f.eks. Houmark-Nielsen, 2007; 2011). Efterfølgende tolkninger af det urolige terræn på Tinglev hedeslette som værende et resultat af indsynkning i starten af Holocæn som følge af isaflastningen, har sat spørgsmål ved

tolkningen af Ristinge fremstødet i denne del af Sønderjylland (Sandersen & Jørgensen, 2015). Houmark-Nielsen (2010) beskriver en lokalitet ved Enderupskov sydøst for Ribe, hvor indikationer på Ristingefremstødet kan iagttages, og det betyder i givet fald, at Ristingefremstødet muligvis har nået fokusområdet.



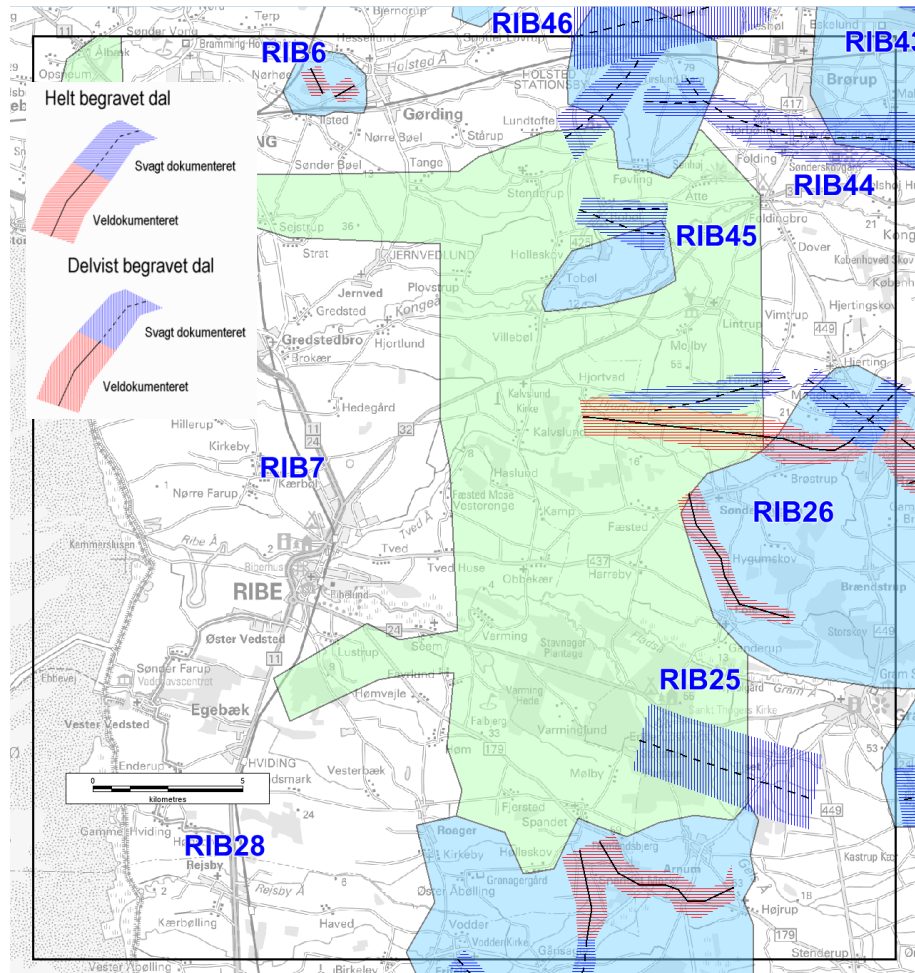
Figur 4-14: Palæogeografi af Eem-havet i Sydvestjylland og Nordtyskland. Sorte prikker angiver punktobservationer. Fra Konradi et al. (2005).

4.4.2.1 Begravede dale

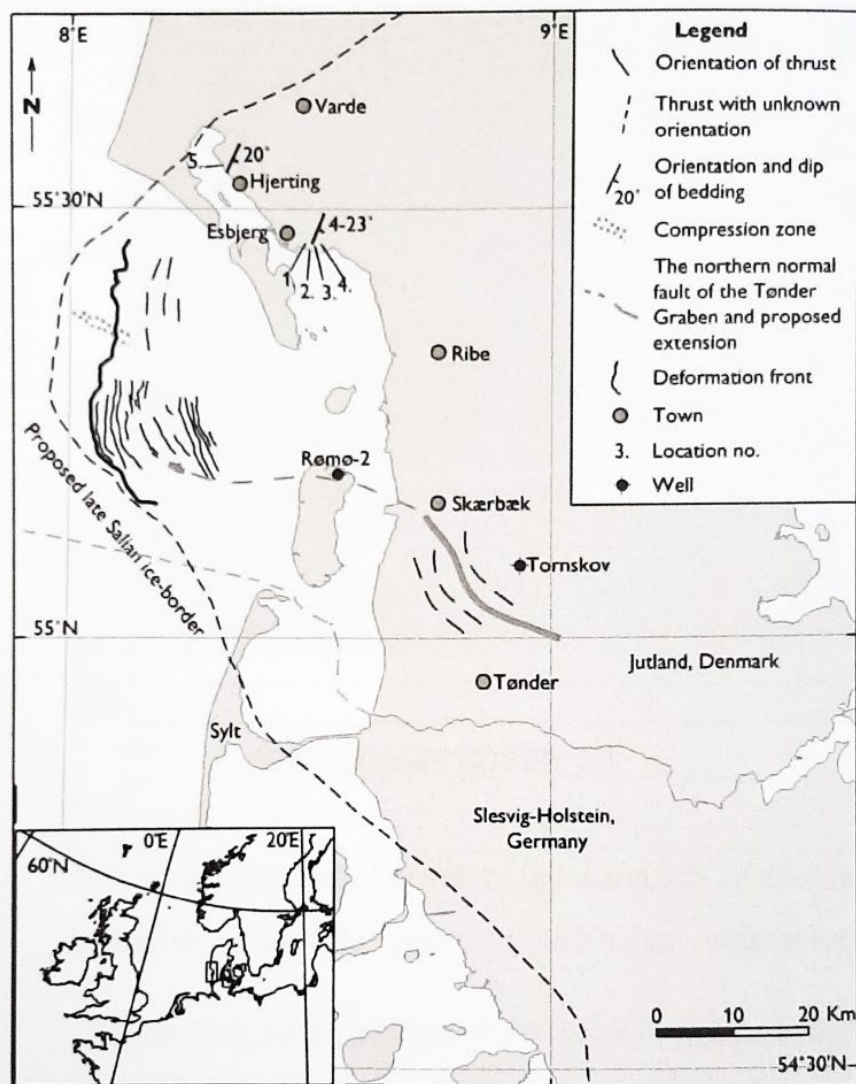
Begravede dale kan have stor betydning for vandindvindingen, da de kan indeholde betydelige grundvandsmagasiner, men da dalene udgør erosioner ned i underliggende lagserier, kan dalfyldet være årsag til øget sårbarhed af grundvandet, fordi forurenende stoffer vil kunne trænge ned til dybere grundvandsmagasiner (Sandersen & Jørgensen, 2003, 2016). Transport af grundvand til større dybder via begravede dale kan dog vise sig at være en fordel, fordi der på den måde kan skabes cirkulation af grundvand i dybe grundvandsmagasiner, som ellers ville være afsnørede og som følge deraf forringet grundvandskvalitet. De begravede dale kan findes overalt i Danmark, men dimensionerne og orienteringerne varierer meget.

Indenfor fokusområdet er der tidligere kortlagt en række begravede dale primært på baggrund af TEM-kortlægninger (se Figur 4-15). Flere af disse er dog svagt dokumenterede, og flere steder er dalfyldet tolket til at være meget kompliceret opbygget. De kortlagte dales orienteringer ligger typisk i intervallerne VNV-ØSØ til NV-SØ og VSV-ØNØ til SV-NØ.

Dybderne er varierende, men i alle tilfælde er det tolket, at dalene er eroderet ned i miocæne aflejringer. Dalenes aldre er Saale eller ældre. I forbindelse med nærværende kortlægning er billedet af områdets begravede dale opdateret og derfor er det valgt ikke at beskrive de tidligere kortlagte dale her. I stedet henvises til daleprojektets rapport fra 2016 (Sandersen & Jørgensen, 2016).



Figur 4-15: Kortlagte begravede dale (Ultimo 2021). www.begravede.dale.dk.



Figur 4-16: Foreslået sen Saale isrand (Warthe). Fra Andersen (2004).

4.4.3 Glaciale tektonik

Bortset fra et muligt isfremstød i Mellem Weichsel (Ristinge), som beskrevet i det foregående, har Weichsel-istidens gletschere ikke sat deres præg på fokusområdet, udover at bidrage med smeltevandsaflejringer til hedesletterne mellem bakkeøerne, og glacialtektonik skal derfor primært relateres til tidligere glaciationer. Figur 4-16 viser Sen Saale isfremstødet (Warthe), og her er foruden Fanø glacialtektoniske kompleks (Andersen, 2004) også indtegnet glacialtektonik ved Esbjerg (Rasmussen, 1966) og mellem Skærbæk og Tønder (se Jørgensen et al. 2013), som tolkes at kunne henhøres til samme isfremstød. Ældre isfremstød er det svært at finde sikre vidnesbyrd på. Ifølge Andersen (2004) ligger det nederste glideplan (décollement-zone) for de glacialtektoniske deformationer ved Skærbæk og Tønder mellem kote -100 og -150 m, og stratigrafisk set ved bunden af Måde Gruppen. Dette bekræftes af Jørgensen et al. (2012).

4.5 Fokuspunkter for den geologiske modellering

På baggrund af den geologiske forståelsesmodel kan følgende indledende fokuspunkter for den 3D geologiske modellering opridses:

- Toppen af palæogenet udgør den nedre grænse for modelleringen
- Den miocæne stratigrafi er velkendt ud fra dybe borer
- Der kan være problemer med adskillelse af de kvartære og miocæne lagpakker, f.eks. i de begravede dale, hvor kvartært oparbejdede miocæne aflejringer kan være vanskelige at skelne fra faststående Miocæn. Hertil kommer, at Holsteinaflejringerne i lighed med de miocæne aflejringer typisk indeholder glimmer og organisk stof.
- Litologiske variationer i de relativt tykke, sandede miocæne lagpakker vil være vanskelige at kortlægge med SkyTEM, og her vil informationer fra borer bidrage med vigtig viden
- Tektonik relateret til de kendte, dybe forkastninger i området formodes at have sat et vist præg på lagserien og topografien i området. Forkastninger har formodentlig påvirket erosionsmønstrene i hele kvartæret. Udpegning af eventuelle vertikale sammenhænge mellem forkastninger, begravede dale og topografi bør tildeles opmærksomhed ved modelleringen, da det kan have stor indflydelse på grundvandets sårbarhed.
- Der er mange begravede dale, som er nederoderet i lerlag og måske gennemskærer disse. Dalene er derfor vigtige at inkludere i den geologiske model.

4.6 Sammenfatning

Fokusområdet er strukturelt set beliggende på sydflanken af Ringkøbing-Fyn-højderyggen og nord for Tøndergraven, og flere forkastninger er kortlagt i den dybe del af lagserien. Ligeledes er der flere indikationer i den sydlige del af Jylland på, at tektoniske bevægelser i undergrunden har sat deres præg på lagserien helt til terræn.

Kalkoverfladen og de ovenover liggende palæogene og neogene aflejringer hælder mod vest/sydvest, og mod vest i fokusområdet ses en bred og dyb erosion, som har fjernet i størrelsesordenen 100 meter af den neogene lagserie. Neogenet i Jylland består af vekslende sandede og lerede aflejringer fra Miocæn afsat i skiftende marine og kontinentale miljøer relateret til en kystlinje omtrent NV-SØ gennem Jylland, men aflejringerne indenfor fokusområdet er altovervejende marine.

I kvartæret har fokusområdet været præget af flere istider og mellemliggende, varme mellemistider. Særegent for fokusområdet er de tykke marine sedimenter fra Holstein mellemistiden i den vestlige del. Et sammenfald mellem den dybe erosion af miocænet og de tykke forekomster af marint Holstein peger på dyb og omfattende erosion forud for Holstein mellemistiden. Den eksisterende viden om kvartæret før Holstein mellemistiden er begrænset, bortset fra, at der i borer i fokusområdet er fundet glaciale sedimenter fra Elster-istiden og marine Holstein-aflejringer herover. I samme borer er der kun fundet ganske tynde lag fra den efterfølgende Saale istid. Anderledes ser den østlige del af fokusområdet ud. Her har Saale-istiden og formodentlig også forudgående istider sat deres præg på bakkeøerne, som domineres af sandede og lerede morænelandskaber. Glaciale tektoniske deformationer af

lagserien er forventelige i Saale. Under istiderne har smeltevand under højt tryk under gletscherne eroderet dybe tunneldale, som i dag er fyldt helt eller delvist op med yngre materialer. Indenfor fokusområdet er der kortlagt flere begravede dale, som alle er fra Saale eller ældre istider.

I den efterfølgende Eem mellemistid steg havet, og resultatet var, at der blev aflejret marine aflejringer af få meters tykkelse og i begrænsede områder langs Vestkysten. Den sidste istid, Weichsel, har stort set kun sat sit præg på lagserien i form af sandede hedesletteaflejringer mellem bakkeøerne, mens bakkeøerne selv blev udsat for eksponering for vind og vejr og dermed erosion og sporadisk aflejring af flyvesand.

5. Indledende konceptuel geologisk model

5.1 Indledning

På baggrund af den geologiske forståelsesmodel kan der opstilles en foreløbig konceptuel model for områdets geologiske opbygning og lagfølge. Formålet med den foreløbige konceptuelle model er at definere den lagserie, som den rumlige geologiske model forventeligt kommer til at bestå af, samt den forventede indbyrdes sammenhæng mellem lagene.

For at sikre, at den nye Ribe-model uden større problemer kan kobles sammen med FOHM-modellen, søges det at tilpasse Ribe-modellens lagfølge så godt som muligt til FOHM-modellens lag. Det er derfor vigtigt at definere en række lagflader i Ribe-modellen, som også anvendes i FOHM-stratigrafien. Lagene indenfor og udenfor Ribe-modellen behøver i realiteten ikke at matche fuldstændigt, da det er muligt at have lag med 0-tykkelser, men det er vigtigt, at flader og lag passer ind det rigtige sted i stratigrafien.

Lagfladerne i FOHM for Ribe-området fremgår af figuren herunder (Figur 5-1), og det er denne liste, der tages udgangspunkt i for Ribe-modellen.

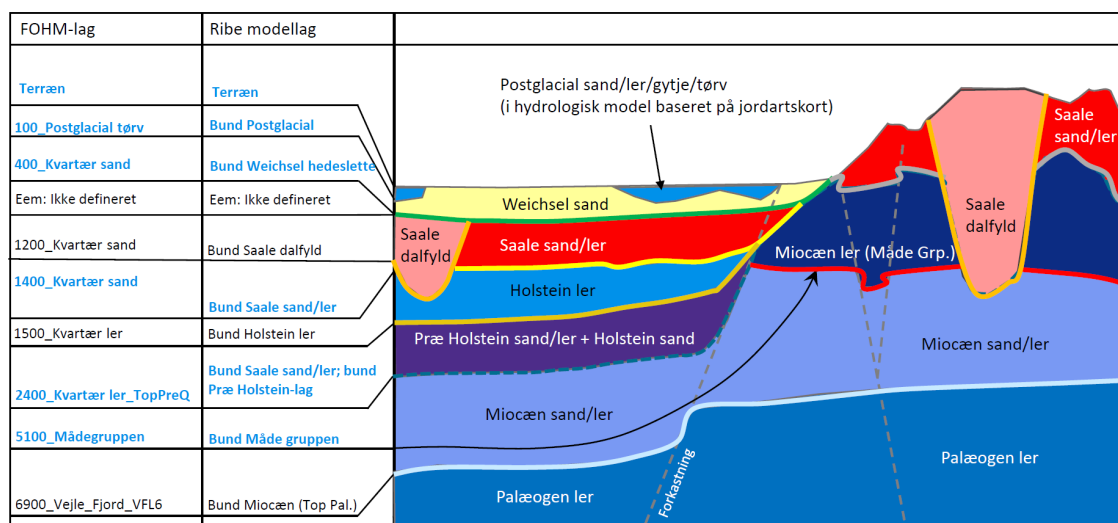


Figur 5-1. Lag i FOHM-modellen i Ribe-området (se også Figur 4-9).

5.2 Indledende konceptuel geologisk model

Den indledende konceptuelle model er vist i Figur 5-2, som udgør en principskitse af et geologisk profil fra sydvest til nordøst gennem modelområdet.

Den prækvartære lagserie består nederst af kalk og herover palæogent marint ler. Herover haves en tyk miocæn lagserie af vekslende sand og ler, som repræsenterer sedimentation over en lang periode i miocænet relateret til en fluktuerende kystlinje (Figur 4-11). Den miocæne lagserie sluttet af med lerede formationer, som tilsammen udgør den yngste del af miocænet (Mådegruppen) (Figur 4-11). Som det kan ses på den venstre del af profilskitzen, så er det øverste af miocænet borteroderet mod vest, og det vurderes som udgangspunkt, at der er en sammenhæng med lokaliseringen af en dyb forkastning (se beskrivelsen i kapitel 4). Den miocæne lagserie forventes således at være beliggende højest i kote mod øst under områdets bakkepartier. Prækvartæroverfladen består således i grove træk af ler i Mådegruppen i bakkepartierne, og sandede og lerede miocæne formationer i de lavtliggende områder.



Figur 5-2. Indledende konceptuel model for Ribe-området vist som en principskitse af et ca. SV-NØ orienteret geologisk profilsnit. Lagbetegnelserne til venstre på figuren viser blot princippet i lagtilhørsforholdene til henholdsvis FOHM-modellen og Ribe-modellen; se senere tekst for de endelige navne i Ribe-modellen.

Den kvartære lagserie er tilsvarende forskellig i henholdsvis bakkelandet og under sletterne: Mod vest haves dybtliggende kvartære aflejringer, hvor de dybeste udgøres af ældre kvartære aflejringer og herover marint Holstein-ler. Det marine Holstein-ler findes ikke i bakkepartierne, hvor der her i stedet er en yngre sandet og leret lagserie – sandsynligvis fra Saale. Over Holsteinleret haves en lagserie af Saale sand og ler og herover hedeslettesand fra Weichsel og postglaciale ferskvandsaflejringer. Nederoderet i lagserien flere steder i området er dalstrukturer, som hovedsageligt er udfyldt af sandede og grusede aflejringer. Det forventes, at disse som minimum har en Saale alder. Nogle af disse dale er dybe og eroderer ned i de miocæne aflejringer.

Som det er antydnet på Figur 5-2, så forventes der foruden den førnævnte forkastning også andre forkastninger i området.

5.3 Valgte lagflader i Ribemodellen

5.3.1 Top Kalk og top Palæogen/Bund Miocæn

Toppen af kalken er beliggende i kote -350 til -400 m (Figur 4-3), hvilket er en dybde, der gør kalken uinteressant i vandindvindingsammenhæng. Herover haves palæogent ler, hvis top er beliggende mellem ca. kote -200 til -300 m. Toppen af dette ler udgør – som tidligere nævnt – den nedre grænse for grundvandsinteresserne i området, og da den ældste del af miocænet ligeledes er leret, ligger grænsen derfor reelt højere. I FOHM er fladen '6900_Vejle_Fjord' valgt som den nedre grænse for grundvandsinteresserne, og samme valgt er taget for Ribe-modellen. Som det beskrives senere i denne rapport, viser SkyTEM-målingerne i området, at der haves en god elektrisk leder i det forventede koteinterval for top Palæogen. Men da det palæogene ler og forekomster af umiddelbart ovenover liggende miocænt ler ikke med sikkerhed kan adskilles fra hinanden, er bunden af miocænet/top Palæogen valgt ved en elektrisk modstand på 10 ohmm (fladen '6900_Vejle_Fjord').

5.3.2 Den miocæne lagserie

De vekslende lag af miocænt sand og ler over det dybe ler og under Mådegruppen består reelt af en række formationer (se Figur 4-11). Disse formationer er velbeskrevne fra boringer (Rasmussen et al., 2010) og er defineret i FOHM-modellen (se Figur 5-1). Dog viser SkyTEM, at de vekslende lag af sand og ler ikke kan opløses med metoden. Det betyder, at formationerne ikke kan udskilles i modellen, og at kun bunden (flade '6900_Vejle_Fjord_VFL6') og toppen (flade '5100_Mådegruppen') kan modelleres. Hvor Mådegruppen ikke findes, ligger toppen af det miocæne sand og ler ved skiftet til den kvartære lagserie.

Prækvartæroverfladen ('2400_Kvartær_ler_TopPreQ') udgøres derfor af toppen af Mådegruppen, hvor denne findes, og toppen af de sandede og lerede miocæne formationer, hvor Mådegruppen er borteroderet. Alternativt kan prækvartæroverfladen ses som bunden af de kvartære lag udenfor bakkerne og bunden af Saale-lagene indenfor bakkerne (se Figur 5-1).

5.3.3 Præ-Holstein glacial lagserie og marin Holstein lagserie

Den marine Holstein lagserie er forholdsvis veldefineret, og her udgøres henholdsvis toppen og bunden af fladerne '1400_Kvartær sand' og '1500_Kvartær_ler'. Mellem den marine Holstein lagserie og toppen af det miocæne sand og ler er der i boringer fundet kvartære aflejringer, som repræsenterer glaciære aflejringer fra Elster eller ældre. I forbindelse med den geologiske modellering er der derfor introduceret en supplerende modelflade i Ribemodellen, som definerer bunden af præ-Holstein lagseriens bund, hvilket reelt udgør Prækvartæroverfladen (se nærmere beskrivelse i Kapitel 6).

5.3.4 Saale lagserie

Ovenover Holstein-lagene og over den miocæne Måde-gruppe i bakkerne haves der vekslende sand og ler, som antages at være fra Saale. I bakkerne defineres toppen af disse lag at være terrænet og bunden udgøres af toppen af Måde-gruppen. På sletterne udgøres bunden af Saale-lagene ved toppen af Holstein-aflejringerne, mens toppen af Saale-lagene udgøres af bunden af Weichsel-hedesletten (flade '400_Kvartær_sand').

Begravede dale skærer sig ned i denne lagserie – og stedvist dybere, og bunden af dalfyldet defineres som flade '1200_Kvartær_sand', mens toppen udgøres af flade '400_Kvartær_sand'.

5.3.5 Marin Eem lagserie

Der er ikke udskilt en Eem-lagserie i FOHM-modellen, og tilsvarende er det heller ikke gjort i Ribe-modellen, da Eem-lag ikke med sikkerhed er fundet. Eem-lag findes tæt ved Ribe by og videre mod vest, men eventuelle Eem-lag indenfor modelområdet kan ikke udskilles mellem Saale-lagene og Weichsel-lagene. Eventuelle Eem-forekomster i form af lavmodstandslag i dette niveau vil i stedet modelleres som Saale-lag.

5.3.6 Weichsel hedeslette og postglaciale ferskvandsaflejringer

Weichsel hedesletten defineres med flade '400_Kvartær_sand' som bund og terrænet som top. Denne flade er dog ikke modelleret i FOHM-modellen i Ribe-området, men er defineret som et lag i FOHM. Mellem '400_Kvartær_sand' og terræn findes forekomster af postglaciale ferskvandsaflejringer, som det er skitseret på Figur 5-2, men disse lag er ikke modelleret særskilt på grund af deres sporadiske forekomst. Disse ferskvandslag vil i stedet blive håndteret i grundvandsmodellen med baggrund i jordartskortet.

6. Modelopstilling i GeoScene3D

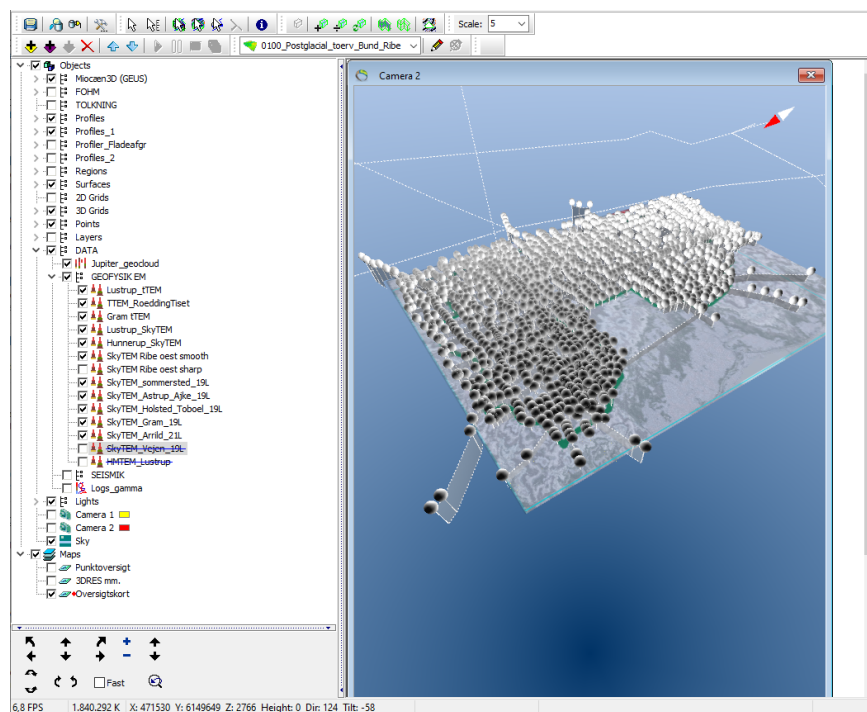
6.1 Indledning

Den rumlige geologiske model er opstillet i GeoScene3D Builder, version 12.0.0.680 (www.i-gis.dk).

6.2 Data

Følgende data er importeret til GeoScene3D-projektet (Figur 6-1):

- SkyTEM-data (1D) fra Ribe Ø, Lustrup og Hunderup, er importeret direkte i GeoScene3D som Firebird-databaser.
- SkyTEM-data (1D) for de øvrige kortlægninger i og udenfor modelområdet (Figur 3-3) er downloadet fra Gerda-databasen og indlagt i GeoScene3D som Firebird-databaser.
- Alle SkyTEM-kortlægninger er samlet under et og der er udarbejdet middelmodstandskort for hele området i 5 m-intervaller samt et interpoleret 3D-grid (GEUS ODV-gridder udarbejdet af Lars Nebel)
- Boredata er loadet via GeoCloud
- tTEM-data fra Spandet er downloadet fra Gerda-databasen og importeret i GeoScene3D. tTEM-kortlægninger ved Gram og Rødding-Tiset ligger udenfor modelområdet, men er ligeledes importeret i GeoScene3D



Figur 6-1. Screenshot af Objects-kolonne i GeoScene3D-projektet (til venstre).

6.3 Tolkningspunkter

Ved tolkninger i den rumlige geologiske model bruges Geovejledning 2018/1 som guide (Sandersen m.fl., 2018). Af de syv typer af tolkningspunkter beskrevet her i, anvendes kun nummer 1 til 3 markeret med grønt i Tabel 1 ('Point type 1-3' i GeoScene3D).

Tabel 1. Tolknings- og hjælpepunkter (Geovejledning 2018/1)

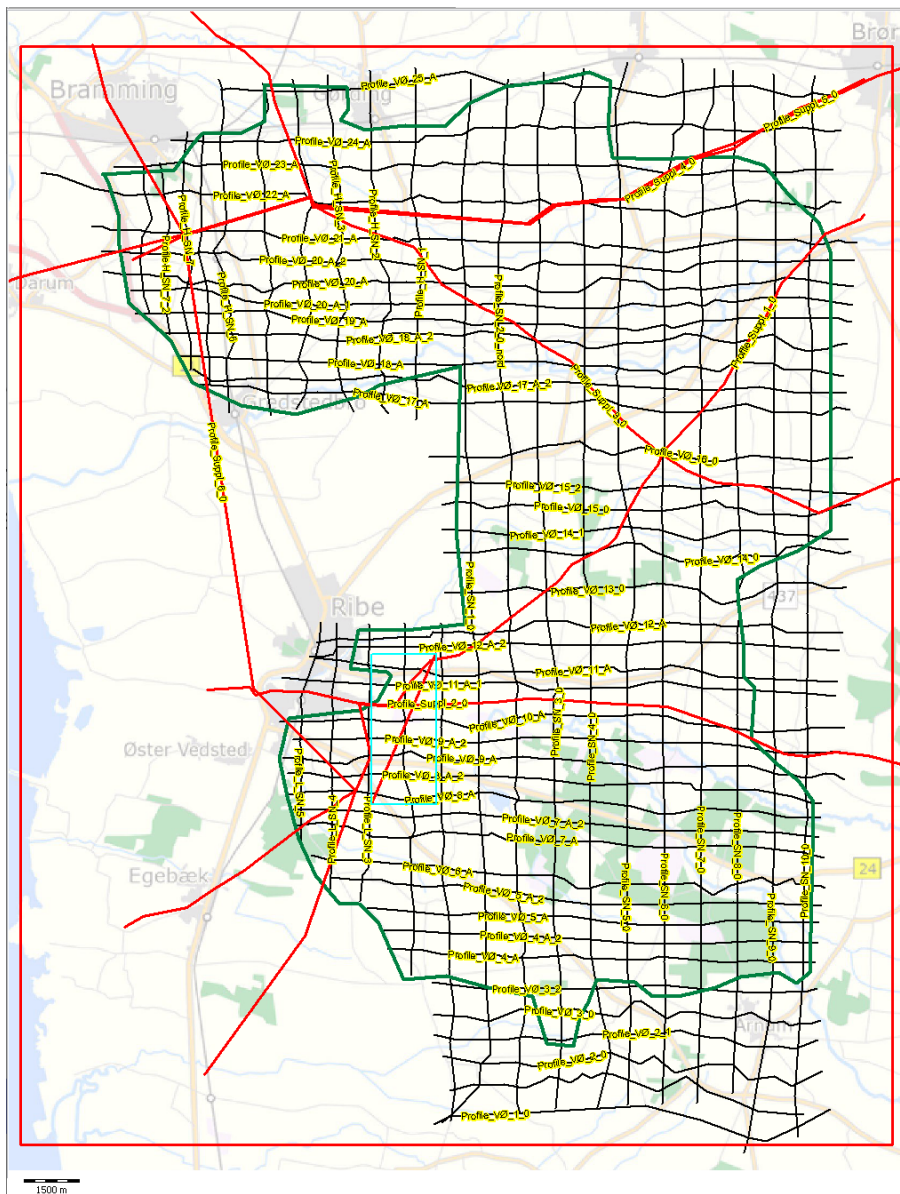
Punkt-type nr.	Punkttype	Kategori	Beskrivelse
1	Snappede tolkningspunkter	Tolkningspunkter	Tolkningspunkt for position af en flade i rummet. Et snappede tolkningspunkt er tilknyttet et datapunkt i modelrummet. Dette vil normalt være en laggrænse i en boring, men kan også sættes i en geofysisk sondering eller på et seismisk profil
2	Frie tolkningspunkter	Tolkningspunkter	Tolkningspunkt for position af en flade i rummet og har i modsætning til det snappede tolkningspunkt ingen præcis rumlig tilknytning til data. Et frit tolkningspunkt sættes baseret på data eller generel geologisk viden
3	Styrepunkter	Hjælpepunkter	Et styrepunkt er et frit punkt, der alene benyttes som styringspunkt når tolkningspunkterne skal interpoleres til grids. Styrepunkter angiver i udgangspunktet ikke en tolkning, men anvendes når man ønsker at styre sit grid på en forudbestemt måde – eksempelvis hvis man vil tvinge sin lagflade til at krydse en anden lagflade
4	Afgrænsningspunkter	Hjælpepunkter	Afgrænsningspunkter kan benyttes, hvis en flades afgrænsning ønskes defineret
5	Negativpunkter	Hjælpepunkter	Negativpunkter kan placeres, hvor eksistensen af et givent lag eller laggrænse kan udelukkes
6	Maksimumkotepunkter	Hjælpepunkter	Maksimumkotepunkter kan sættes, hvor en laggrænse forventes at være til stede, men hvor den ligger dybere end data giver information om. Punktet angiver derfor den højeste kote for den tolkede laggrænse.
7	Minimumkotepunkter	Hjælpepunkter	Minimumkotepunkter kan sættes, hvor der f.eks. er data, der ikke opløser geologien øverst i lagsøjlen (f.eks. ved 'B', brønd). Punktet angiver derfor den dybeste kote (maksimumdybde) for en laggrænse, der ikke ses i datapunktet, men som ud fra data kan udelukkes at befinde sig dybere

6.4 Geologiske profiler

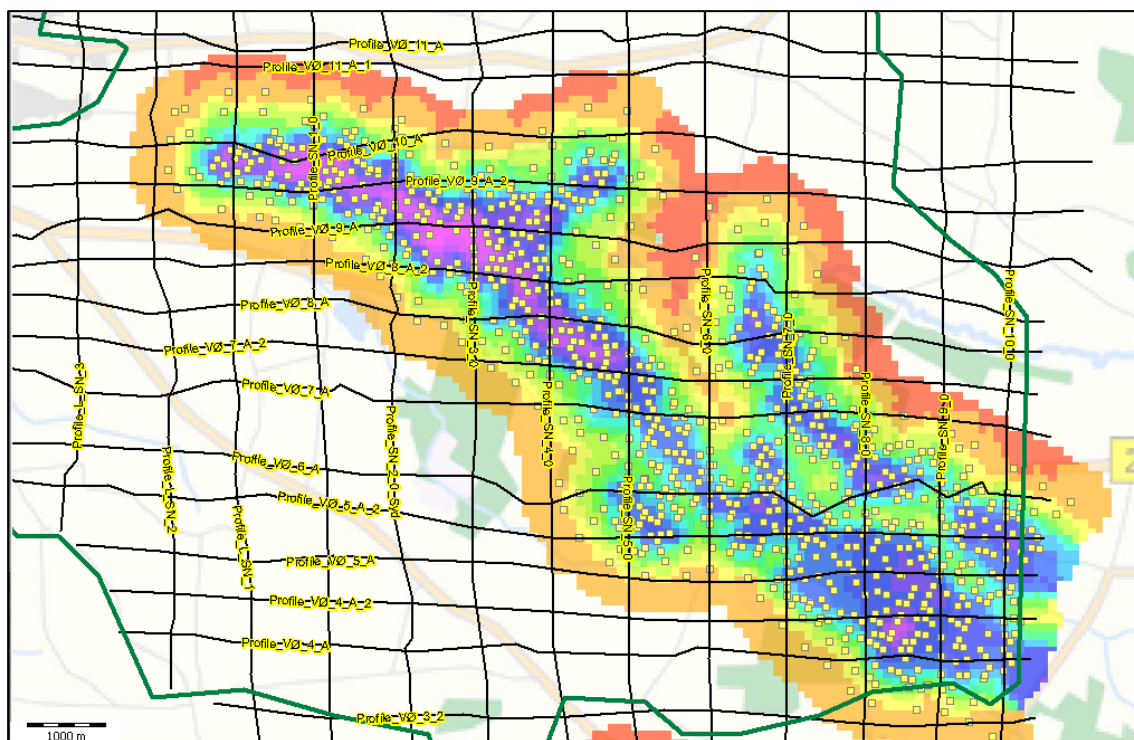
Den geologiske model er bygget op omkring punkttolkninger af de enkelte modelflader langs en række faste profiler: 41 stk. V-Ø og 25 stk. S-N profiler samt 7 stk. supplerende profiler (Figur 6-2).

Udover disse profiler er der oprettet en række flytbare profiler, som er blevet placeret ved lag eller strukturer, som krævede et tættere net af tolkningspunkter, eller som lå med en skæv vinkel til V-Ø og S-N-profilerne – f.eks. på tværs af eller langs med begravede dale eller

forkastninger. Med de flytbare profiler sikres, at der også tilføjes tolkningspunkter i områderne mellem profilerne i det ortogonale profilnetværk. Ved de flytbare profiler er der foretaget punkttolkninger langs profiler med 100-500 m afstand (se eksempel i Figur 6-3).



Figur 6-2. Lokalisering af V-ø og S-N-profiler (sort streg) samt supplerende profiler (rød streg).



Figur 6-3. Eksempel på tolkningspunkt-tæthed for en flade med store vertikale variationer. Flade '1200' (begravede dale) i områdets sydlige del. Tolkingspunkter er sat langs de viste profiler, samt langs flytbare profiler med en orientering ca. vinkelret på dalstrukturerne (SV-NØ orienteret flytbart profil er ikke vist).

Der er ligeledes oprettet en række 'ad-hoc'-profiler, f.eks. til at styre en flades udbredelse/skæring med andre flader. Fordi de flytbare profiler og ad-hoc-profilerne er midlertidige, er de ikke gemt i GeoScene3D-projektet.

6.4.1 Tolkingsusikkerhed

I forbindelse med indsættelsen af tolkningspunkter på flader langs profilerne er der foretaget en kvalitativ usikkerhedsvurdering for hvert tolkningspunkt (Tabel 2).

Tabel 2. Usikkerhedsklasser for tolkningspunkter

Usikkerheds-klasse	Primær begrundelse	Sekundære begrundelser
0 - Udenfor kategori	Hjælpepunkter, som er sat for at styre interpolationen,	Hjælpepunkter afsat for at afgrænse en flade mod et andet lag/terræn
1 - Lille	Punkter sat i pålidelige, velbeskrevne boringer med snap til laggrænser	Punkter sat ved/i boringer med mindre gode beskrivelser, men hvor lagserien vurderes velkendt. Punkter sat ved geofysik, som viser meget store modstandskontraster (TEM).
2 - Mellem	Punkter sat ved geofysiske data (uden snap)	Punkter sat ved boringer som ikke er velbeskrevne, men hvor lagserien vurderes velkendt.
3 - Stor	Punkter sat i områder med meget få data. Her baseres tolkningen i høj grad på omkringliggende data.	Punkter sat i områder med upålidelige data. Her baseres tolkningen i høj grad på omkringliggende data.

Efter aftale med DIN Forsyning er usikkerhedsvurderingerne ikke bragt i anvendelse i forbindelse med den hydrologiske model, og der henvises i stedet blot til Ribemodellens Geo-Scene-projekt, hvor usikkerhedsattributterne kan visualiseres efter behov.

6.5 Interpolation

Scene-extent er afrundet til hele 100 m (Tabel 3). Alle punkter i hver lagflade er griddet med Inverse Distance Weighting (IDW) i 100 m grids, med indstillinger for interpolation valgt til at følge Miljøstyrelsens generelle indstillinger i FOHM; Tabel 4. Søgeradius er sat til 1000 m.

Tabel 3: Scene-extent for Ribemodellen

X min	477.800	Y min	6.119.200
X max	501.500	Y max	6.149.100
Bredde	23.700 m	Højde	29.900 m
Areal	708,63 km ²		

Tabel 4: Interpolationsindstillinger for Ribemodellen

Interpolation Wizard (0400_Kvartaer_sand_Bund_Ribe)

Algorithm

Source Data

Region

Settings

Search

Grid Geometry

Destination

Finish

Settings

In this page the selected algorithm is configured.

Exponent: 4.00

Smooth Factor: 200.00

Point Limits

☐ None

☒ Max Quadrant Count 3

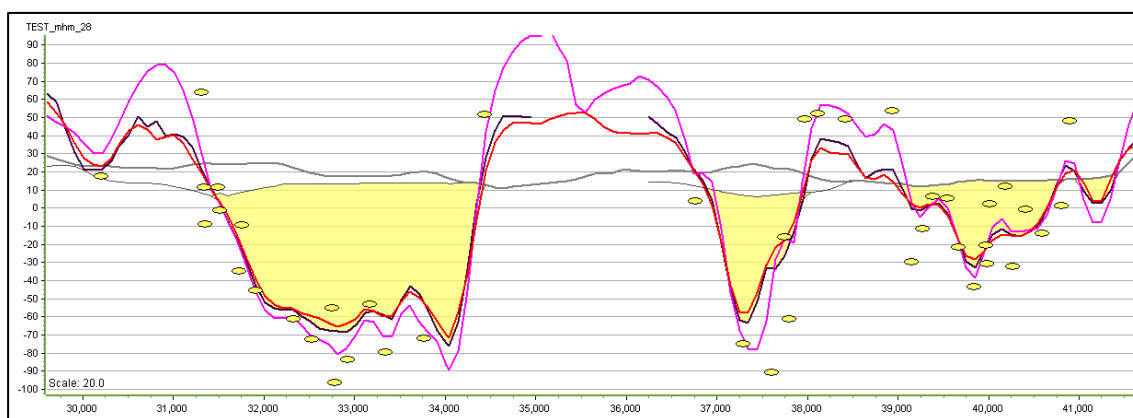
☐ Max Count 1

Interpolationsproceduren, som er beskrevet ovenfor, er valgt på baggrund af forskellige tests af IDW og Kriging. IDW bruger de geografisk placerede værdier (tolkningspunkter) til at beregne værdien på en lokation uden tolkningspunkter, og hvor tolkningspunkterne tættest på dette sted vægter højere end punkterne længere væk. Med IDW har hvert tolkningspunkt således en lokal indflydelse, som aftager med afstanden. Kriging, derimod, vægter tolkningspunkternes værdier ud fra en analyse af trends i datasættet, som derved kræver en indledende analyse af data, hvor der i et variogram vælges indstillinger, der – så godt som muligt – tilpasser variogrammet til en funden trend i datapunkterne. IDW bruger således en simpel algoritme baseret på afstand, mens Kriging kan håndtere trends og anisotropi i data. I praksis er det dog svært at tilnærme variogrammet til data i Kriging, fordi der er tale om et meget stort område, hvor geologien er meget varierende.

Figur 6-4 viser et tilfældigt valgt eksempel på forskellene mellem Kriging og IDW (Standardindstillinger og FOHM indstillinger). Som det kan ses af fladerne under terræn, tilpasser

Kriging lidt bedre de dybe punkter end IDW, men generelt har begge interpolationsmetoder vanskelighed ved at nå den fulde dybde i de begravede dale.

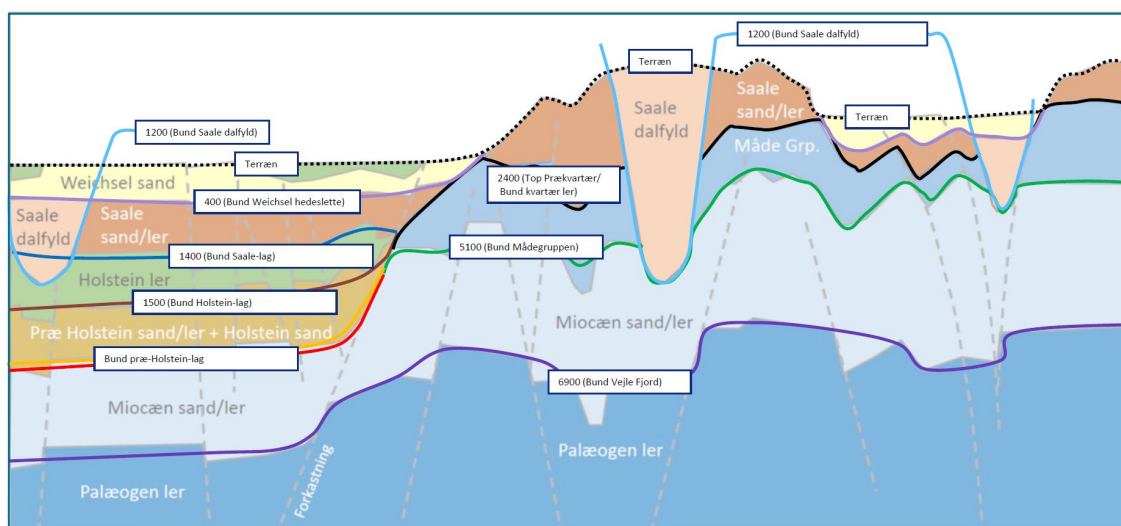
Valget af interpolationsmetode er landet på IDW, fordi det er den mest simple metode, og fordi der ikke skal foretages tilpasning til et variogram, som kan være vanskelig at relatere til geologien. De generelle vanskeligheder med at tilpasse til dybe tolkningspunkter i smalle, dybe strukturer kan ingen af de to interpolationsmetoder løse. Skal dette problem løses, vil det kræve, at der indsættes en række fiktive punkter endnu dybere end den tolkede bund af strukturen. Dette er dog ikke gjort i Ribemodellen, da en sådan tilpasning i 3D er ganske tidskrævende. Alternativt vil der kunne udføres modellering af den griddede flade, som kan trykkes yderligere nedad f.eks. i dalstrukturer. En ulempe ved denne metode er dog, at disse supplerende tolkninger ikke manifesteres i tolkningspunktverdier, men kun i griddet. Dette vil potentielt kunne udgøre en udfordring ved fremtidige modelopdateringer. Endelig vil der muligvis kunne tages højde for problemstillingen i den hydrologiske model.



Figur 6-4. Forskellige interpolationsrutiner eksemplificeret ved vilkårligt snit gennem flade '1200': IDW med FOHM indstillinger (rød linje), Kriging (lilla linje); IDW med standardindstillinger (sort), terræn (grå). Gul skraveret repræsenterer 'dalfyld' ved IDW med standardindstillinger. Buffer for tolkningspunkter på profilet er 100 m.

6.6 Bearbejdelse af lagflader og lag

Tolkningsfladerne i modellen består hver især af et antal tolkningspunkter, som er sat ved tolkning af laggrænsens beliggenhed ud fra data. Da nogle af de tolkede lagflader kun findes i dele af området – f.eks. de marine aflejringer fra Holstein og Saale dal-erosionerne – har det været nødvendigt efterfølgende at udbrede tolkningsfladerne til hele modelområdet med en tykkelse på 0 i de områder, hvor laget ikke findes. Dette er sket enten ved at sammenmelte griddede flader eller ved at kopiere tolkningspunkter fra andre lagflader.



Figur 6-5. Den reviderede konceptuelle geologiske model (se nærmere beskrivelse i afsnit 9.1) med skematisk illustration af, hvordan de tolkede lagflader er sammenhørende på tværs af området (se afsnit 6.6.1).

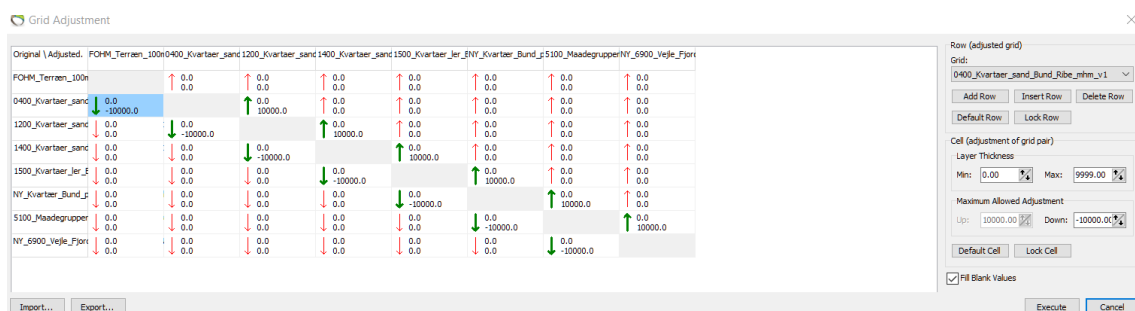
6.6.1 Merging og justering af lag

For at sikre fuld udbredelse af lagene i modelområdet er der foretaget merging ('sammen-smeltning') af punkter på følgende måde:

- **Bund af Weichsel hedeslette:** Lag 400 merges med terræn (100 m FOHM terræn) ved at områder, hvor lag 400 ikke forekommer udfyldes med terrænværdien (fill blanks)
- **Bund af Saale dalfyld:** Lag 1200 merges på tilsvarende måde med den netop dannede lag '400+terræn' flade.
- **Prækvarteroverfladen:** Punkter fra bunden af præ-Holstein-lagene mod vest merges med punkter fra lag 2400 (Top Prækvarter) mod øst
- **Bund af Saale-lag:** Punkter fra Lag 1400 merges med punkter fra den netop dannede prækvarteroverflade.
- **Bund af Holstein-lag:** Punkter fra Lag 1500 merges med punkter fra lag 2400 (prækvarteroverfladen).
- **Bund af Mådegruppen:** Punkter fra Lag 5100 merges med punkter fra lag 2400 (prækvarteroverfladen, hvor Mådegruppen ikke findes; se ovenfor).
- **Bund af miocænet:** Lag 6900 dækker hele modelområdet og skal ikke merges med andre lag

Hvis der er overlap mellem to punktskyer i forbindelse med merging, er der foretaget en manuel tolkning af laggrænse. Punkterne for hver flade er efterfølgende griddet med IDV som beskrevet tidligere.

GeoScene3Ds Toolbox bruges til lagjustering (Figur 6-6). Prioriteterne i lagjusteringen fremgår af figuren. Det er valgt ikke at låse prækvarteroverfladen i lagjusteringen, for at sikre, at Saale dalene skærer rigtigt ned i de miocæne aflejringer.



Figur 6-6. Lagjustering i GeoScene3D (Grid adjustment).

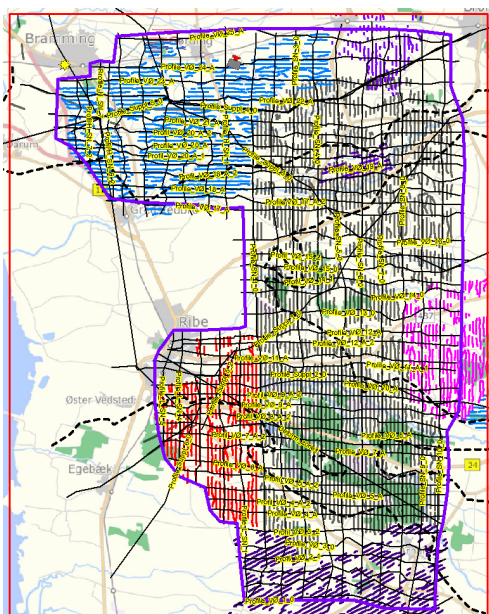
I Tabel 5 ses navnene for de tolkede og bearbejdede lag i Ribemodellen og navnene for de lagflader, som er sammenkoblede med lagene i FOHM-modellen (se 6.6.2).

Tabel 5. Navngivning af de endelige flader for den sammenkoblede model, som vises i GeoScene 3D-projektet

Fladenavne i Ribe-modellen (GS3D)
Flader modelområde
400_Ribe_Kvartær_Sand
1200_Ribe_Kvartær_Sand
1400_Ribe_Kvartær_Sand
1500_Ribe_Kvartær_Ler
2400_Ribe_Top_Prækvartær_Kvartær_Ler
5100_Ribe_Mådegruppen_Gram_Hodde
6100_Ribe_Klintinghoved_KRL4_30ohmm
6900_Ribe_Vejle_Fjord_VFL6
Flader modelområde og FOHM
400_Ribe_Kvartær_Sand_med_FOHM
1200_Ribe_Kvartær_Sand_med_FOHM
1400_Ribe_Kvartær_Sand_med_FOHM
1500_Ribe_Kvartær_Ler_med_FOHM
2400_Ribe_top_prækvartær_Kvartær_Ler_med_FOHM
5100_Ribe_Mådegruppen_Gram_Hodde_med_FOHM
6100_Ribe_Klintinghoved_KL4_30_ohmm_med_FOHM
6900_Ribe_Vejle_Fjord_VFL6_med_FOHM
Punktdatabase
0400_Ribe_Kvartaer_sand
1200_Ribe_Kvartaer_sand
1400_Ribe_Kvartaer_sand
1500_Ribe_Kvartaer_ler
2400_Ribe_top_prækvartær_Kvartaer_ler
5100_Ribe_Maadegruppen_Gram_Hodde
6100_Ribe_Klintinghoved_KRL4
6900_Ribe_Vejle_Fjord_VFL6

6.6.2 Sammenkobling med FOHM-lag udenfor Ribemodelområdet

De justerede grids for Ribemodel-lagfladerne er klippet langs en polygon ('region' i GeoScene3D), som ses på Figur 6-7. De dele af fladerne, som ligger udenfor polygonen blankes (tildes værdien 0).



Figur 6-7. Afgrænsning af Ribemodelområdet til brug for klip og efterfølgende merging med FOHM lag (lilla polygon).

For de respektive FOHM-lag er der foretaget et klip svarende til det ovenfor beskrevne, men her er grids indenfor Ribemodelområdet fjernet. Herefter er de to grids koblet sammen. Det betyder, at der enkelte steder kan ses et spring i kote lige ved grænsen til den modellerede Ribe-region, hvis der er stor forskel i kote mellem den nye Ribe model og FOHM modellen (f.eks. overgangen til den begravede dal i den sydøstlige del af området). De endelige flader for den sammenkoblede model, som vises i GeoScene 3D-projektet, er navngivet som vist i Tabel 5.

6.6.3 Solid layers

Såkaldte 'Solid layers' kan tændes og slukkes i GeoScene3D. Solid layers udgør en grafisk fremstilling af de enkelte lag med valgte farver fra bund til top af laget, som kan anvendes til overordnede præsentationer langs profilsnit (se f.eks. Figur 8-16).

6.6.4 Fladekort og tykkelseskort

I GeoScene 3D er der genereret tre typer kort:

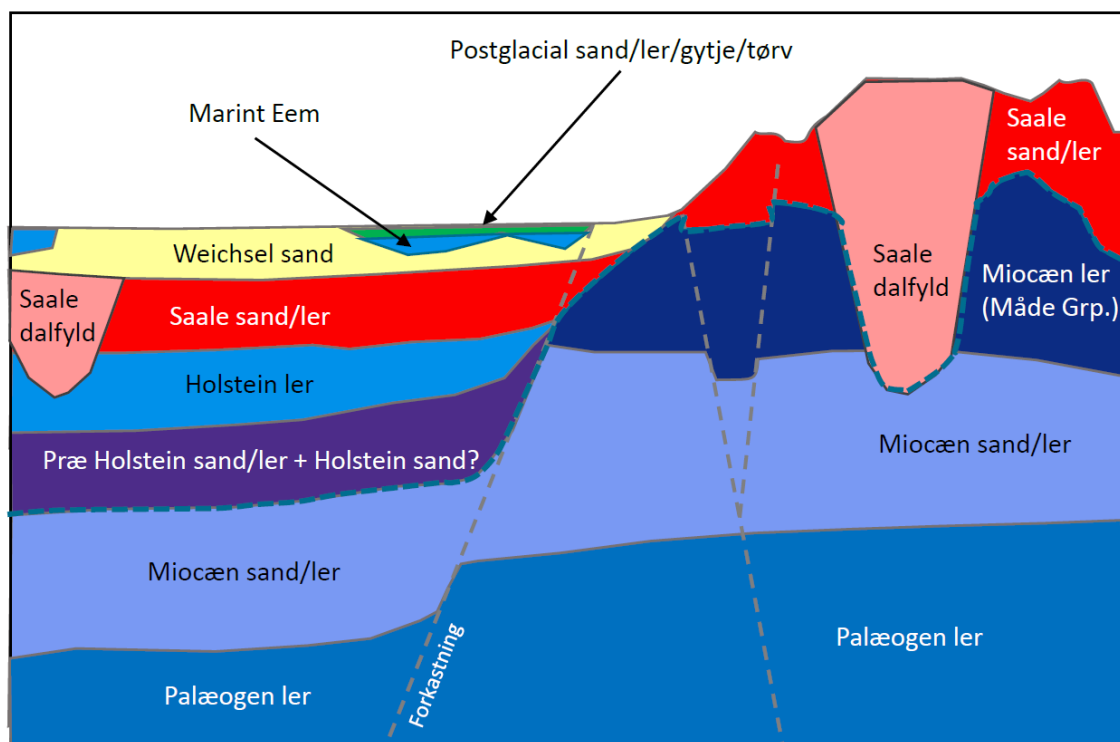
- Fladekort gennem SkyTEM 3D-griddet for specifikke koteniveauer (SkyTEM middelmodstandskort; se Figurerne 7-2 til 7-7). Yderligere middelmodstandskort kan genereres i GeoScene3D-projektet.
- Konturerede fladekort for specifikke lagflader (se Figur 7-9). Yderligere fladekort kan genereres i GeoScene3D-projektet.
- Tykkelseskort (isopach-kort) defineret som differencen mellem et lags top og bund (se Figur 7-8, samt Figurerne 7-10 til 7-15).

7. Geologiske tolkninger

7.1 Geologisk opbygning

I det følgende (afsnit 7.1.1) gennemgås den færdige geologiske models lag som 5-m Sky-TEM-middelmødsstandskort og med skitserede geologiske tolkninger (Figur 7-2 til Figur 7-7), tykkelseskort (isopachkort) og fladekort (Figur 7-8 til Figur 7-15) samt fem repræsentative profilsnit (Figur 7-16 til Figur 7-20), da det giver et overblik over de enkelte lags rumlige udbredelse. Herefter (afsnit 7.1.2) gennemgås de geologiske tolkninger i lokale områder mere detaljeret og til slut beskrives områdets topografi og tektonik mere detaljeret (Afsnit 7.1.3).

7.1.1 Den overordnede geologiske opbygning

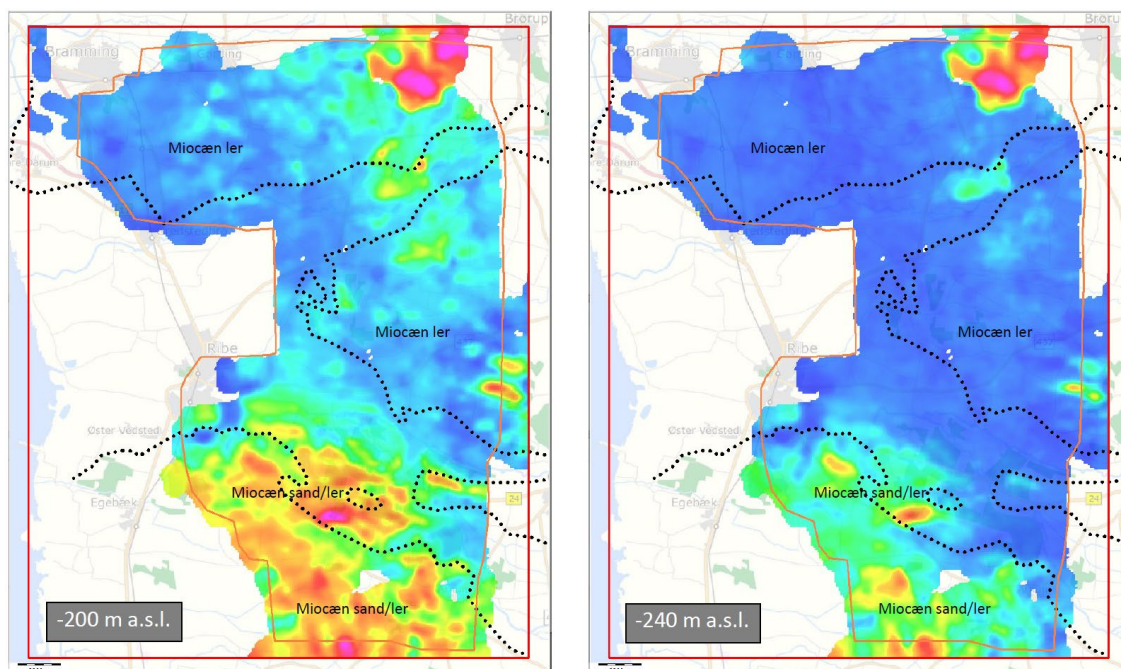


Figur 7-1. Ribeområdets lagserie skitseret i form af den indledende konceptuelle geologiske model (Figur 5-2).

Den indledende konceptuelle geologiske model (Figur 7-1) viser i simplificeret form lagfølgen, som den kan findes i modelområdet.

På Figur 7-2 ses middelmødsstanden for SkyTEM mellem kote -240 og -200 m. Intervallet er nederst domineret af lave modstande svarende til ler, og hvor der oppefter ses højere modstande mod syd. Der ses en ca. NV-SØ orienteret afgrænsning mellem de to områder. De lave modstande tolkes som repræsenterende den nederste del af miocænet, som jf.

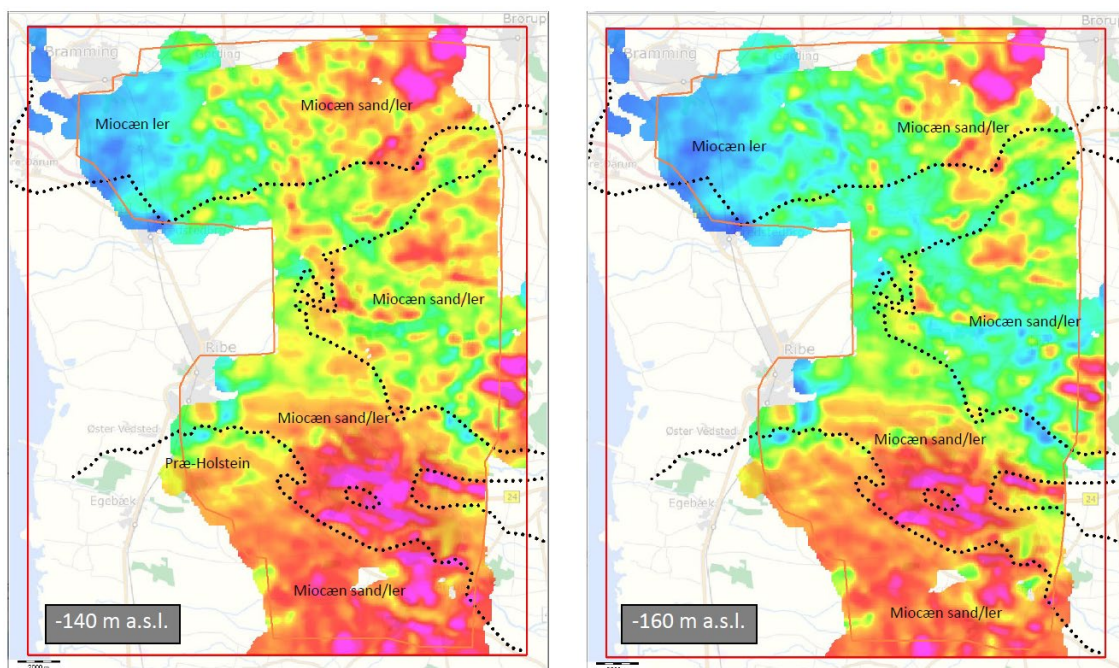
Rasmussen et al. (2010) består af Vejle Fjord og Klintinghoved Formationerne (se f.eks. Figur 4-11), samt de øvre dele af det palæogene ler (samlet betegnet som 'Palæogent ler'; se tidligere beskrivelse). Mod syd tolkes det, at mere sandede dele af den dybe Miocæn-lagserie er skyld i de højere elektriske modstande, sandsynligvis svarende til Bastrup Sand (Figur 4-11). På profil 'Suppl_4_0' i Figur -19 ses, at det 'Palæogene ler' ligger dybt i den sydlige del og mindre dybt i den nordlige del, og at der omtrent midt på profilet er en ca. 50-60 m 'skrænt'. Da grænsen mellem det sandede og det lerede forløber ca. NV-SØ kunne der her være tale om sammenhæng med en forkastning, som kunne forklare Bastrup Sandets dybe forekomst.



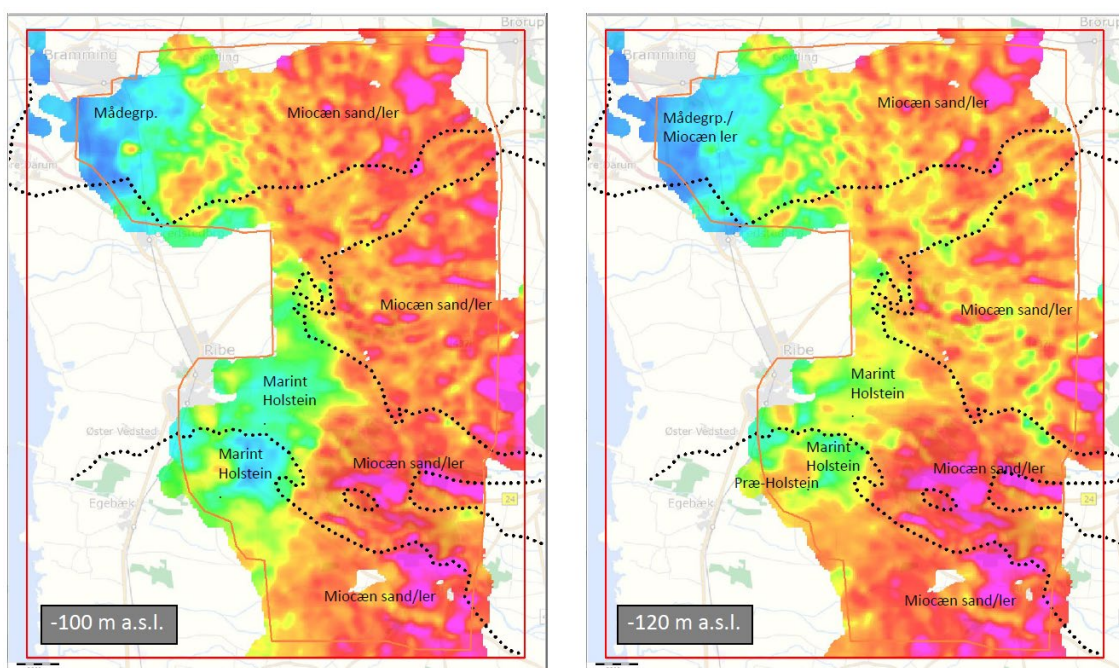
Figur 7-2. SkyTEM middelmotstandskort for kote -200 og -240 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakkeø og hedeslette i terrænet.

I koteintervallet mellem -160 og -140 m (Figur -3) bliver det sydlige område mere og mere domineret af høje elektriske modstande, mens områderne mod nord i stigende grad viser vekslende modstandsforhold. Mod nordvest ses dog stadig dominans af lave modstande. I Lustrup-området ses høje modstande, som i borerer er tolket til at udgøre kvartære, præ-Holsteinlag.

I koteintervallet -120 til -100 m dominerer det miocæne sand/ler hele den østlige og centrale del af området. Ved Bramming mod nordvest ses Mådegruppen lige ovenover det dybere miocæne ler. Som det kan ses på profil Suppl_5_0 (Figur 7-20), så er laget 'Miocænt sand/ler' relativt tyndt i dette område og jf. modstandsbilledet er det domineret af ler. Mod sydvest ses præ-Holsteinlag og med stigende tykkelser af marint Holstein-ler ovenover.



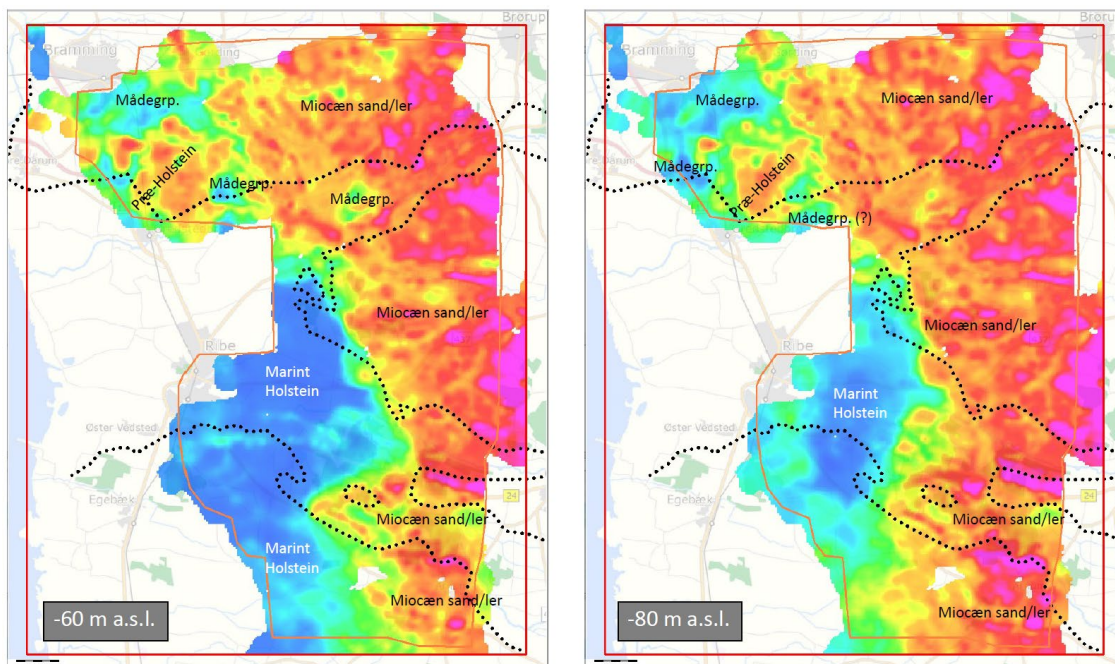
Figur 7-3. SkyTEM middelmådsstandskort for kote -140 og -160 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakke og hedeslette i terrænet.



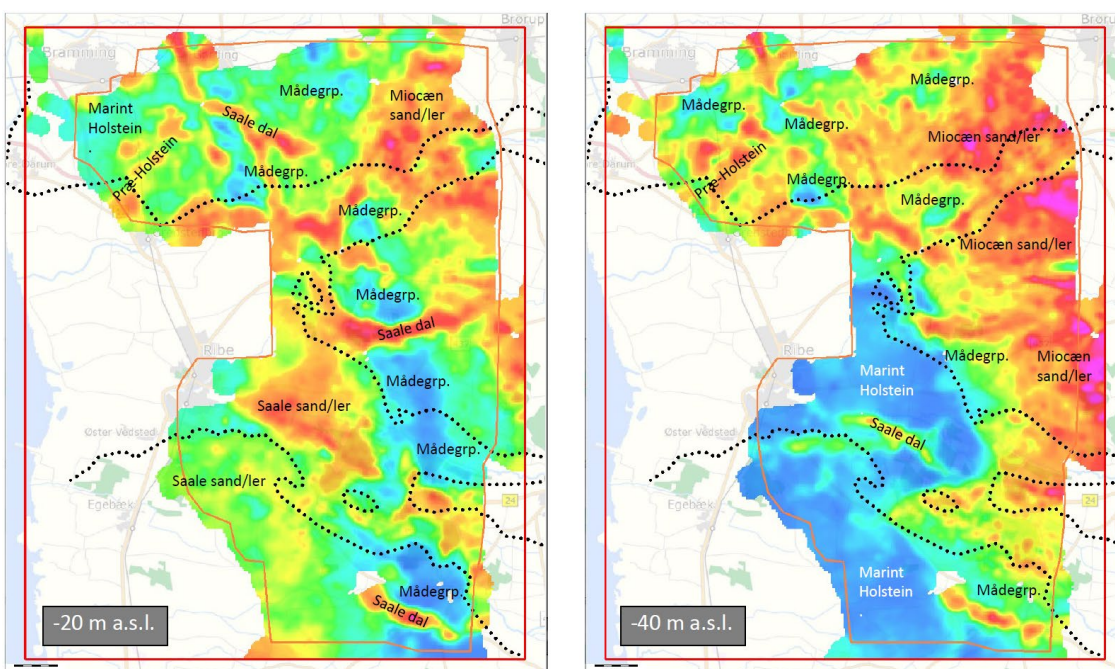
Figur 7-4. SkyTEM middelmådsstandskort for kote -100 og -120 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakke og hedeslette i terrænet.

I intervallet -80 til -60 m udbygges billedet og det marine Holsteinler mod sydvest viser stor udbredelse, og en skarp afgrænsning til det miocæne 'bagland' mod øst. Holstein-kystlinjen mod øst, som ses tydeligt i -60 m-intervallet, er domineret af en NV-SØ til NNV-SSØ orientering: Dette 'lineament' kan forlænges mod nordvest, men her definerer det afgrænsningen mellem Mådegruppen mod vest og de ældre miocæne sand/ler-aflejringer mod øst. Igen ses et sammenfald med forkastningsorienteringerne (se f.eks. Figur 4-2).

Mod nordvest ses præ-Holstein højresistive aflejringer i et område mellem forekomster af Måde-gruppen, hvilket skyldes, at koten for toppen af Mådegruppen er meget varierende (se f.eks. Figur 7-20).



Figur 7-5. SkyTEM middelmådsmodstandskort for kote -60 og -80 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakkeø og hedeslette i terrænet.

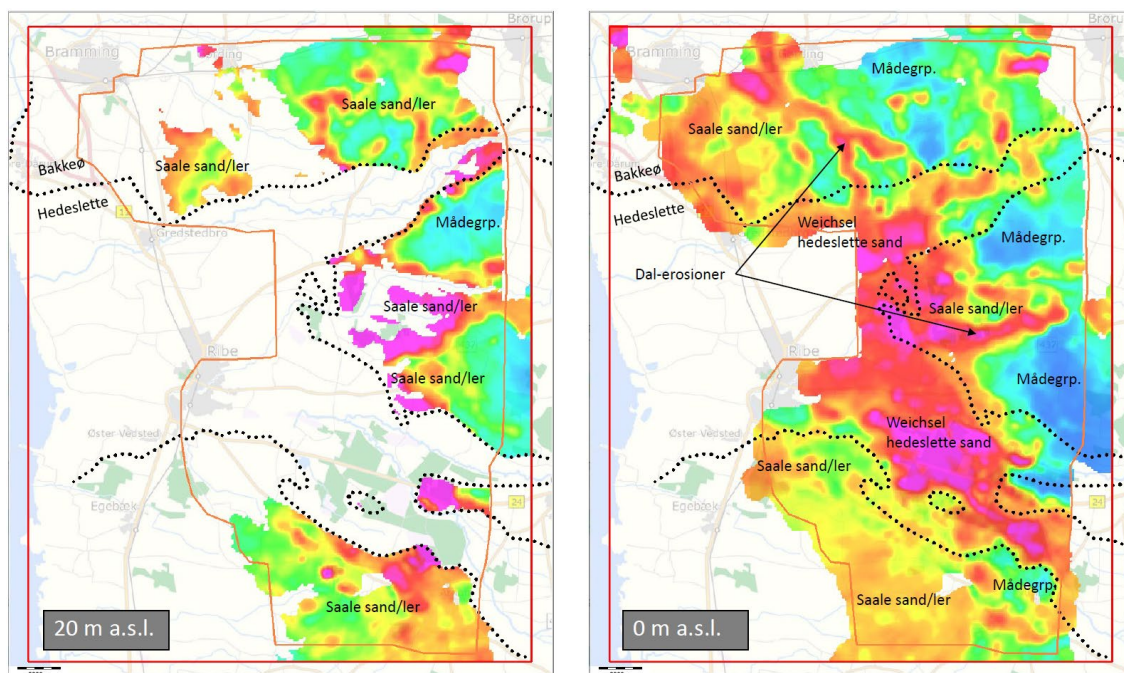


Figur 7-6. SkyTEM middelmådsmodstandskort for kote -20 og -40 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakkeø og hedeslette i terrænet.

I intervallet -40 m ses det marine Holsteinler tydeligt mod sydvest og der ses en dal-lignende V-Ø orienteret struktur syd for Ribe, som ser ud til at være udfyldning af en depression i Holsteinleret snarere end en udfyldning af en dalerosion, som den der ses lige nordøst for.

Holsteinleret er delvist deformeret. Længere mod øst begynder Mådegruppen at vise sig, og der ses udbredt forekomst af miocænt sand/ler. Mod nord ses Mådegruppen i spredte områder, og dal-erosioner udfyldt med højresistive sedimenter ses som aflange strukturer.

I koteintervallet -20 m er Holsteinlagene forsvundet mod sydvest, og ovenover haves sandede og lerede sedimenter fra Saale. Holsteinaflejringer ses nu helt mod nordvest ved Bramming. Der er tegn på, at Holsteinleret i nogen grad er deformeret. Dalstrukturene står tydeligere i dette interval – specielt hvor de er eroderet ned i Mådegruppen. Mådegruppen står tydeligt som et NNV-SSØ-gående strøg.

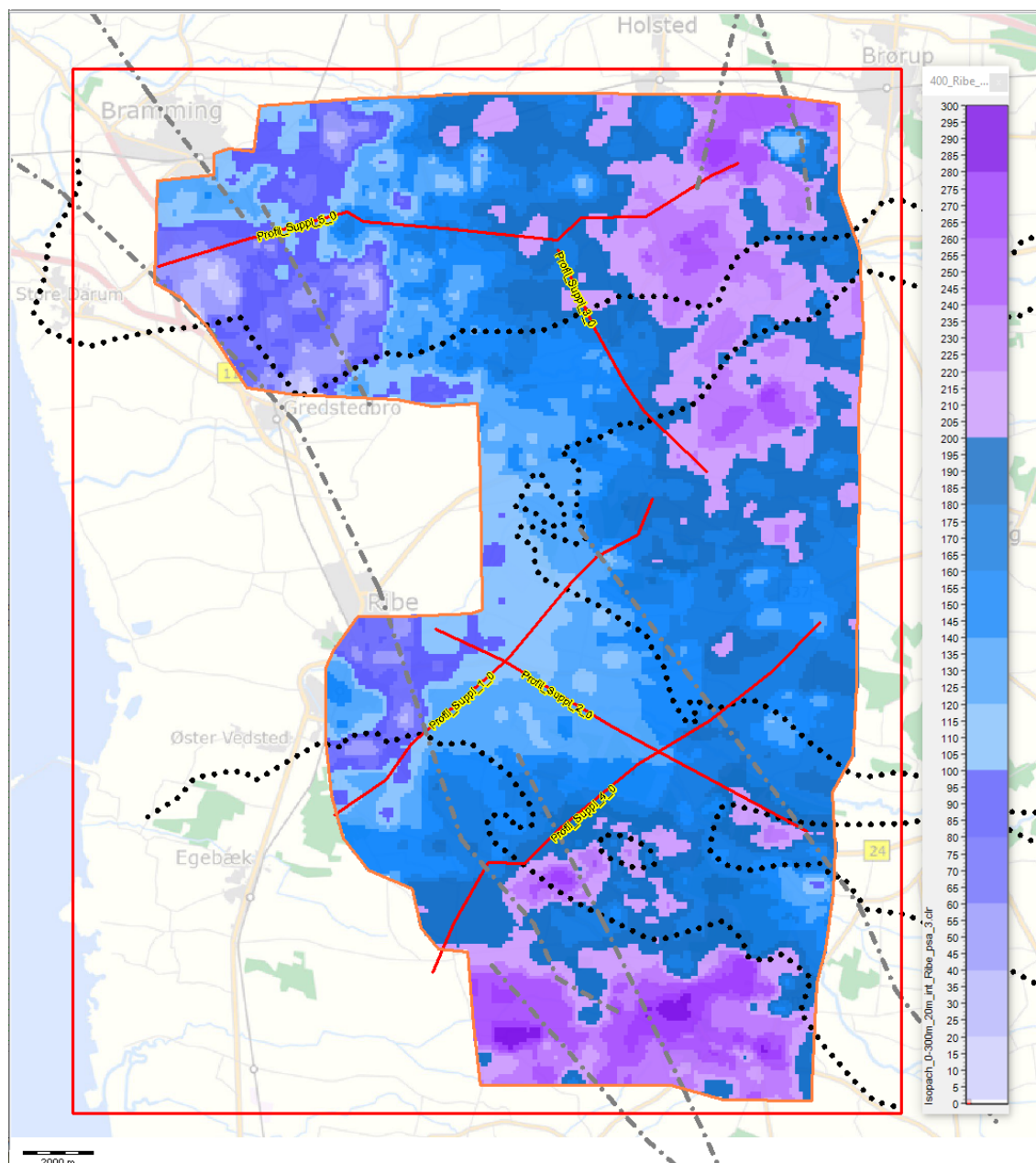


Figur 7-7. SkyTEM middelmiddstandskort for kote +20 og 0 m. Farveskala for SkyTEM, se Figur 3-4. Geologiske tolkninger er vist med tekstlabels. Prik-linje udgør grænsen mellem bakkeø og hedeslette i terrænet.

I intervallet 0 m udgøres områdets nordøstlige og østlige dele af Mådegruppen, som opefter i kote rykker længere mod øst. De sydvestlige og nordvestlige dele af området udgøres af Saale sand/ler. Hedesletten mellem bakkeøerne domineres af sandede aflejringer med høje modstande. Flere af dalerosionerne står stadig tydeligt frem som smalle højmodstandsstrukturer.

I intervallet +20 m ses kun resistiviteter for bakkeøerne. Mådegruppen står tydeligt frem på Rødding bakkeø, mens der såvel mod syd og nord er tale om glaciære aflejringer af sand og ler fra Saale.

7.1.1.1 Isopachkort for 'Miocæn sand/ler'.

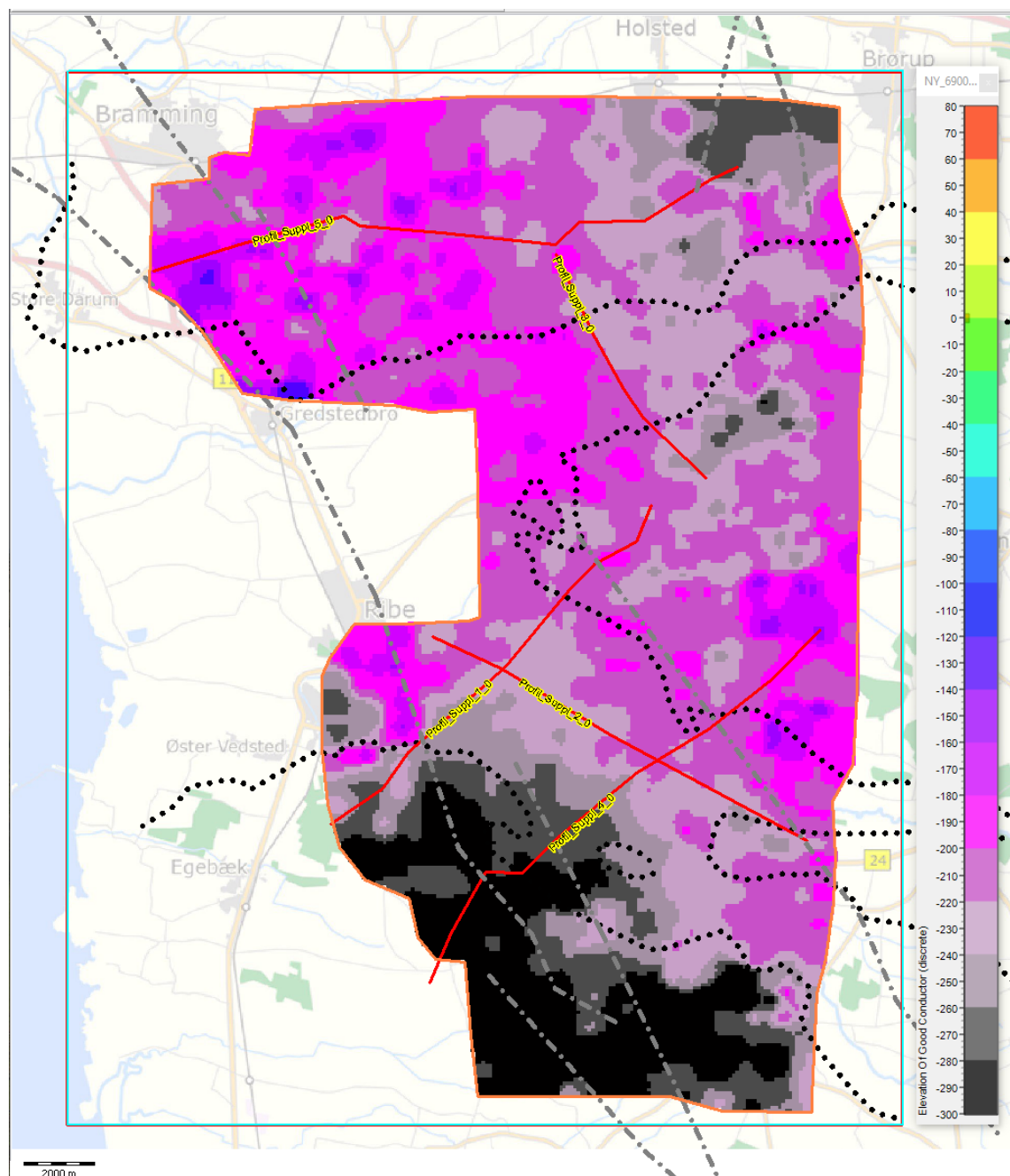


Figur 7-8. Isopachkort for 'Miocæn sand/ler'. Tykkelse af lag afgrænset øverst af flade 5100 og nederst af flade '6900'. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

Isopachkortet for 'Miocæn sand/ler' (Figur 7-8) viser den samlede tykkelse af de miocæne lerede og sandede lag over det 'palæogene ler'. Som nævnt tidligere, er den nederste del af miocænet domineret af ler med lave modstande, så reelt udgør bunden af laget flere steder toppen af det ældste miocæne ler. Der er valgt en afskæringsmodstand på 10 ohmm.

Som det ses, er tykkelserne mellem 200 og 300 meter i den sydlige og nordøstlige del, mens tykkelserne i den vestlige/nordvestlige del ligger under 100 m. I områderne herimellem haves tykkelser på 100-200 m. For områdets nordlige og centrale del ses der en vis NV-SØ/NNV-

SSØ trend i tykkelsesfordelingen med en successivt tyndere lagserie mod vest. Denne orientering svarer omtrent til orienteringen af de dybe forkastninger.



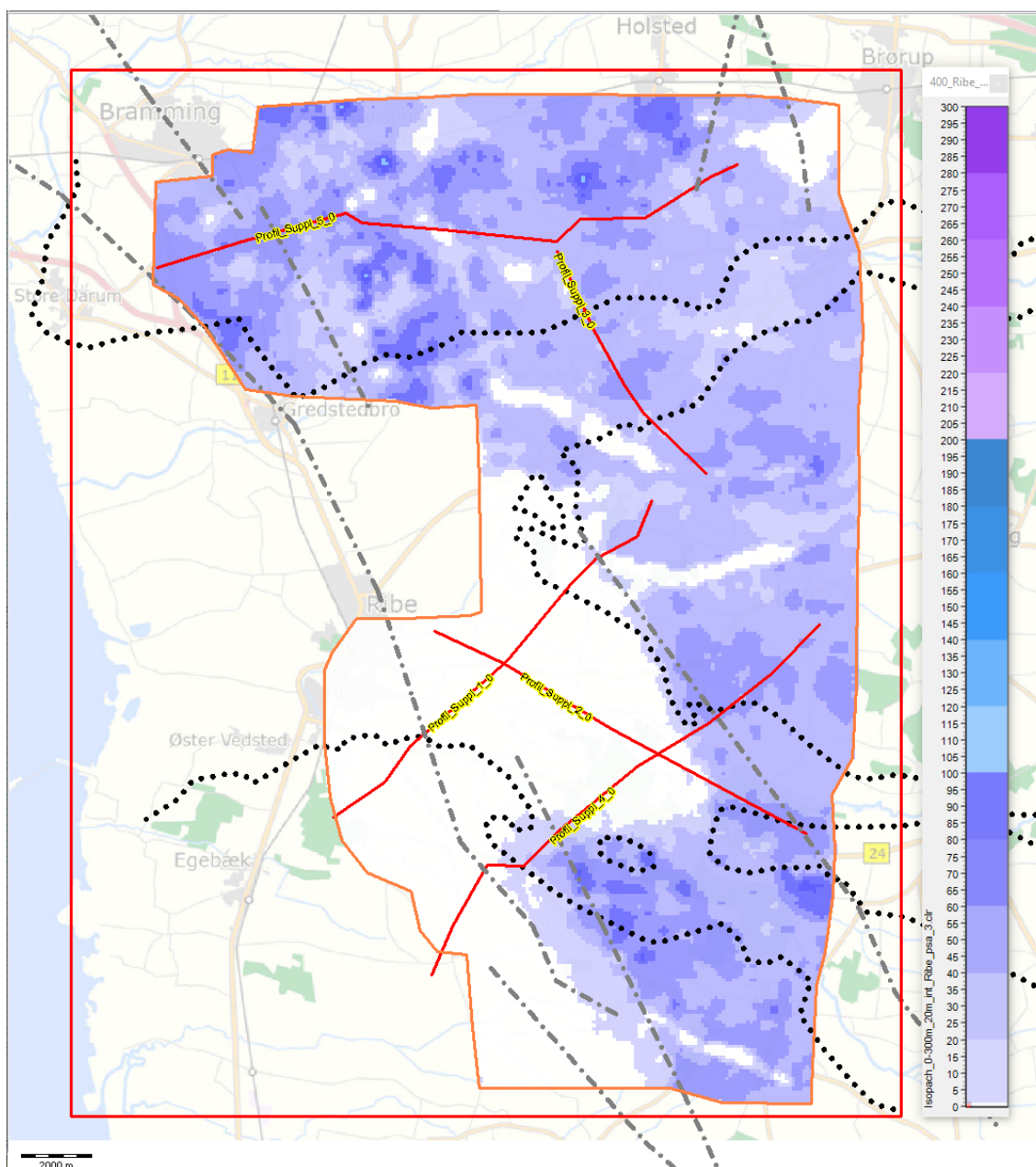
Figur 7-9. Kote for bund af 'Miocæn sand/ler' (flade '6900'). Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

Figur 7-9 viser koten for bunden af det miocæne sand og ler, og her genfindes samme NV-SØ/NNV-SSØ trend som for isopachkortet. På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er det miocæne sand/ler vist med lyseblå farve.

7.1.1.2 Isopachkort for 'Miocæn ler – Mådegruppen'.

Isopachkortet for Mådegruppen viser, at laget typisk er 20-40 meter tykt (Figur 7-10). Mod nordvest og sydvest findes der dog afgrænsede områder, hvor tykkelserne når over 60 m.

Specielt mod nordvest ses der store lokale variationer i lagets tykkelse. Stedvist ses aflange områder, hvor tykkelsen er tæt på 0, hvilket skyldes dale, som er eroderet gennem Mådegruppen (se f.eks. Profil Suppl_1_0; Figur 7-16). På profilerne i 7.1.1.8 er den miocæne Mådegruppe vist med mellemlå farve.

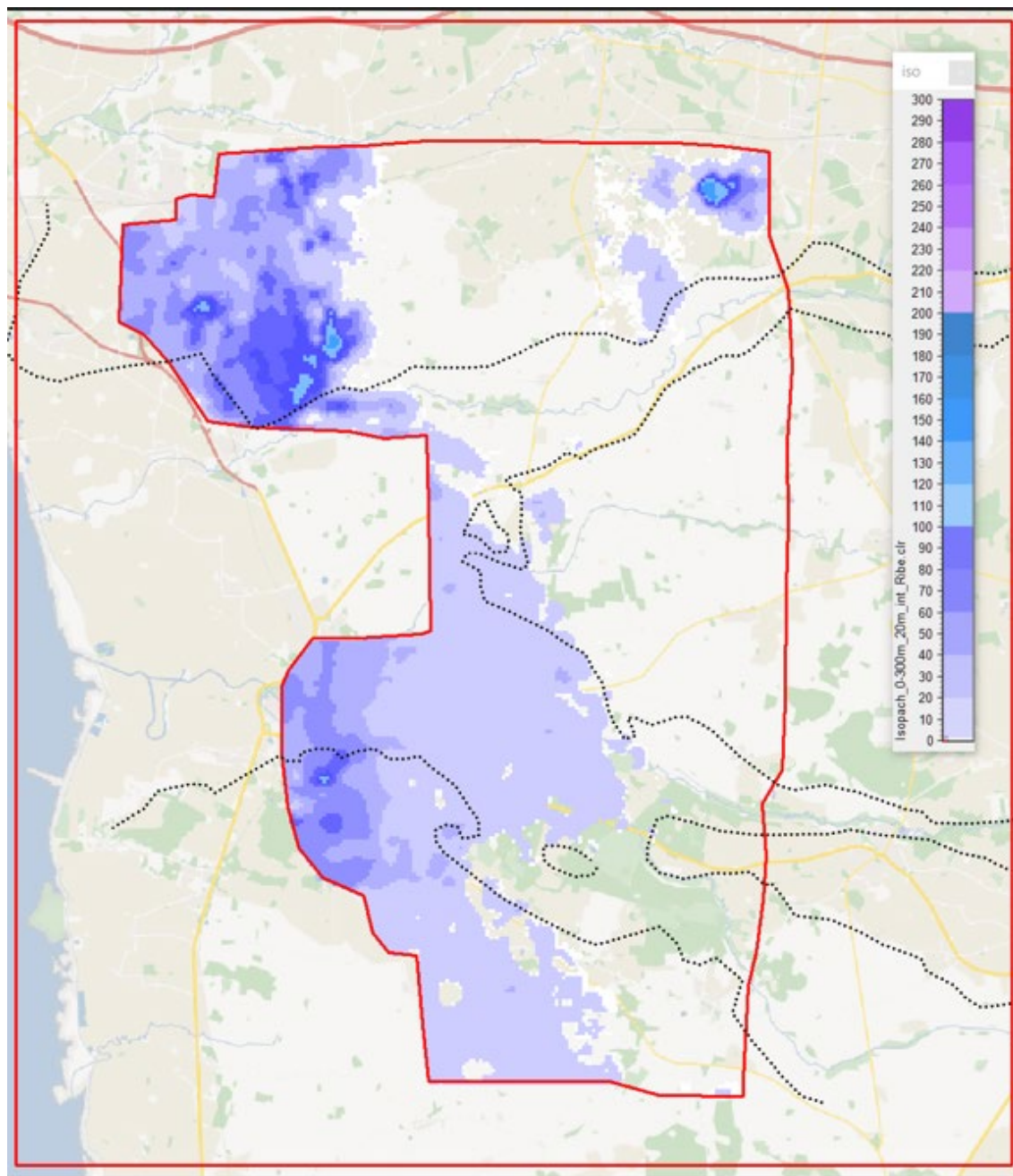


Figur 7-10. Isopachkort for 'Miocæn ler – Mådegruppen'. Tykkelse af lag afgrænset øverst af flade 2400 og nederst af flade '5100'. 'Miocæn ler - Mådegruppen' findes kun mod vest. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakke-øer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

7.1.1.3 Isopachkort for 'Præ-Holsteinler/sand og Holstein sand'.

Laget 'Præ-Holsteinler/sand og Holstein sand' udgør dybe sandede facies af de marine Holstein lag samt vekslende lerede og sandede glaciaie lag fra Elster og evt. ældre glaciationer.

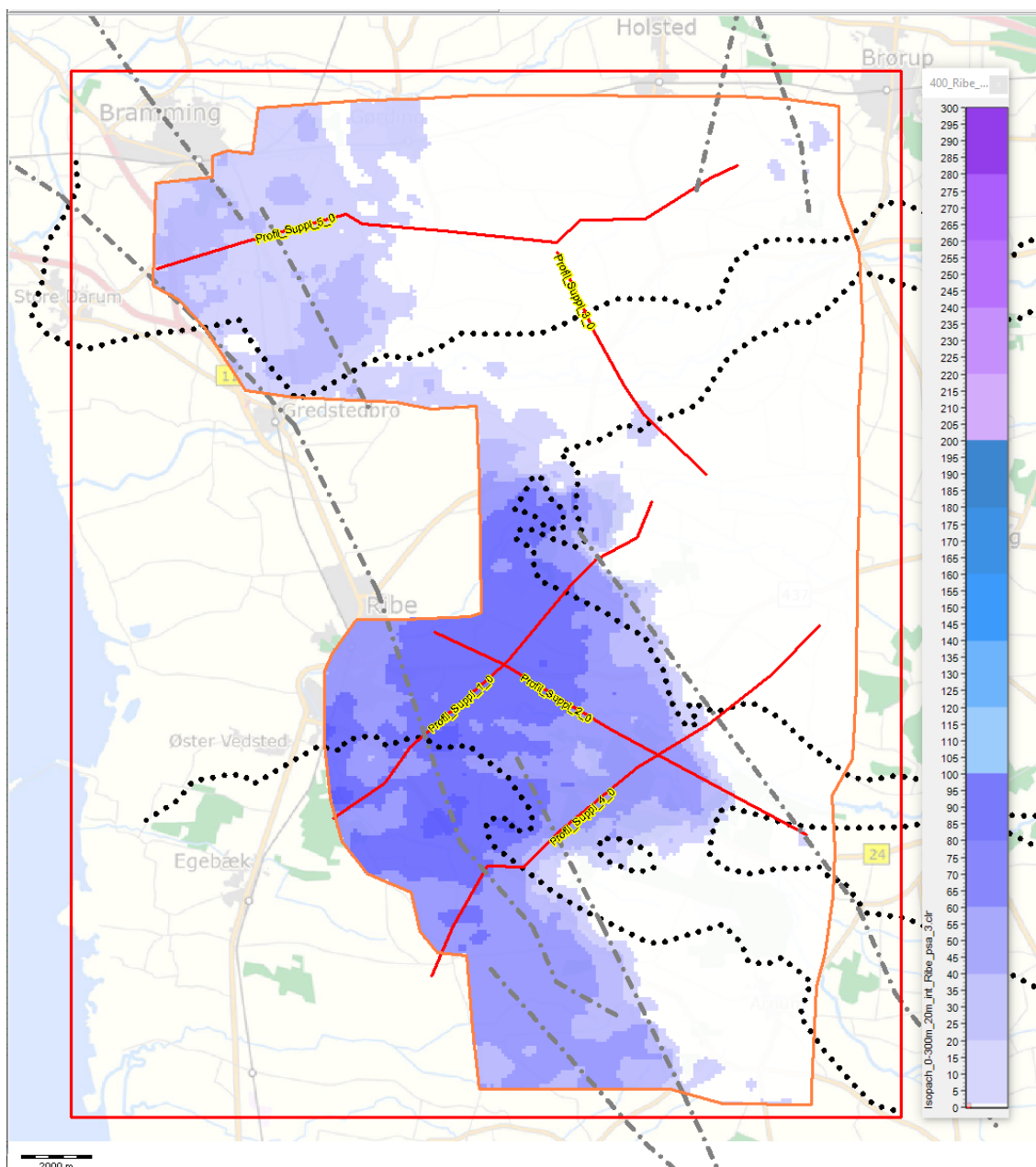
Det sandede Holstein er adskilt fra Holsteinleret ovenover, fordi SkyTEM informationen ikke kan adskille Holsteinsandet fra de glaciale aflejringer under Holsteinleret.



Figur 7-11. Isopachkort for 'Præ-Holstein-ler og sand/Holstein sand'. Tykkelse af lag afgrænset øverst af flade 1500 og nederst af flade 'Ny_Kvartær_Bund_præ_Holstein.....' (svarende til Prækvartæroverfladen. 'Præ-Holstein-aflejringerne' findes kun mod vest. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

Det kortlagte lag er afgrænset til områdets vestlige dele, hvor det opnår tykkelser på op til omkring 100 m syd for Ribe (Figur 7-11). Der ses en tydelig NV-SØ/NNV-SSØ-orientering af forekomsterne, hvilket svarer til orienteringen af de dybe forkastninger. Mod nordvest ses et mindre område med stor tykkelse, hvilket muligvis repræsenterer en ældre daludfyldning, men datadækningen er her dårlig og tolkningerne er usikre. Der findes dog dybe boringer her med tykke kvartære aflejringer.

På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er præ-Holsteinlagene/Holsteinsandet vist med brun-orange farve.

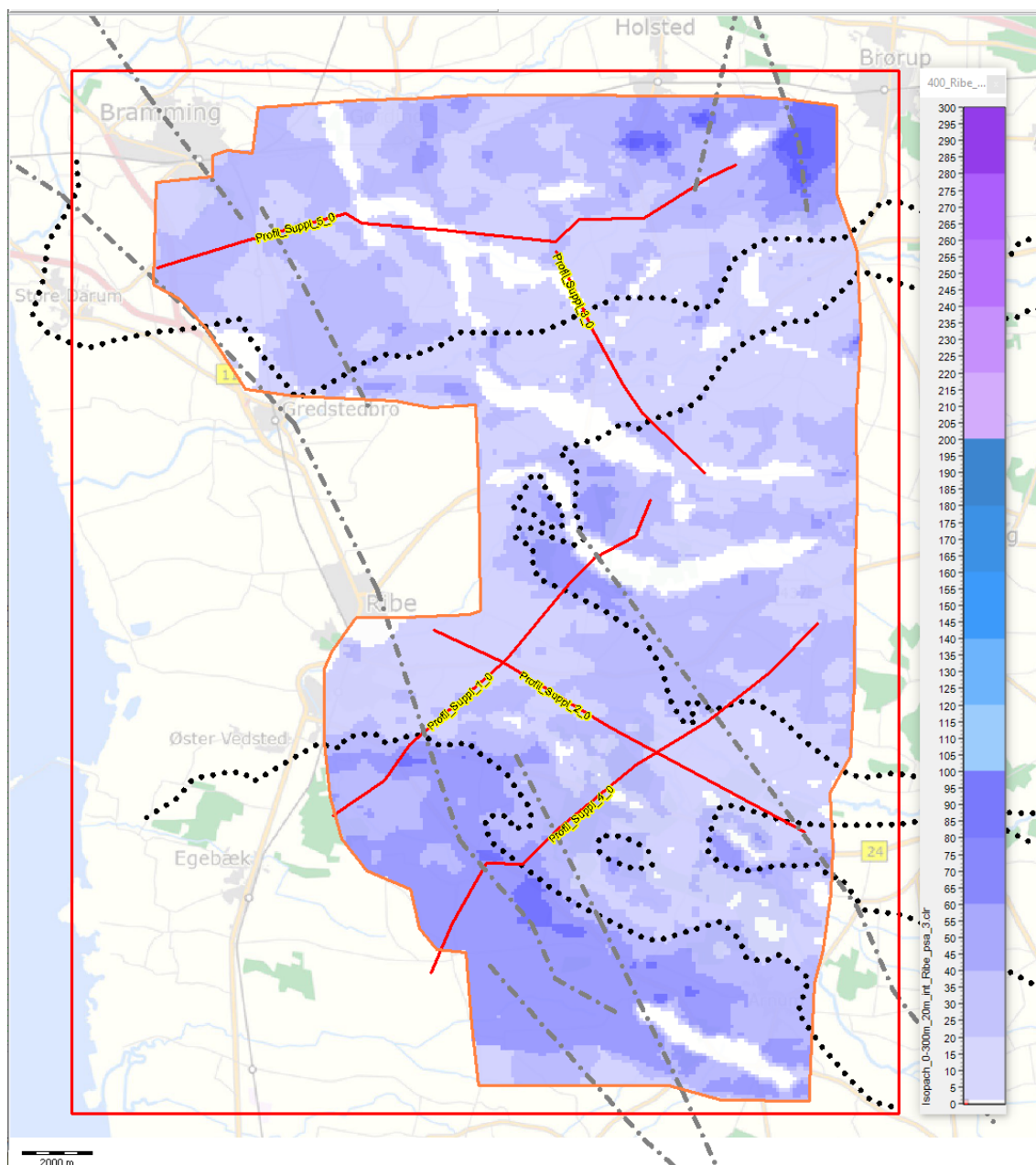


Figur 7-12. Isopachkort for 'Holstein-ler'. Tykkelse af lag afgrænset øverst af flade 1400 og nederst af flade 1500. Holstein-aflejringerne findes kun mod vest. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

7.1.1.4 Isopachkort for 'Holstein-ler'.

Holstein-leret har omtrent samme udbredelse som præ-Holsteinlagene nedenunder. Orienteringen er ligeledes den samme. Dog ses der størst tykkelser mod sydvest (typisk 60-80 m) og mindst tykkelser mod nordvest (op til 40 m). Mindre, afgrænsede forekomster kan findes

mod øst, f.eks. på Profil_Suppl_3_0 (Figur 7-18) ved ca. afstand 5.400 m. Der kan her være tale om forekomster, der repræsenterer mindre fjordarme. På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er Holsteinleret vist med grønlig farve.



Figur 7-13. Isopachkort for 'Saale sand/ler. Tykkelse af lag afgrænset 1) øverst af flade 400/1200 og nederst af flade 1400 mod sydvest, hvor der findes Holstein-aflejringer, og 2) af terræn øverst og nederst af flade 1400 mod nord, øst og syd, hvor Holsteinaflejringer ikke findes; se tekst for forklaring. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakke-øer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

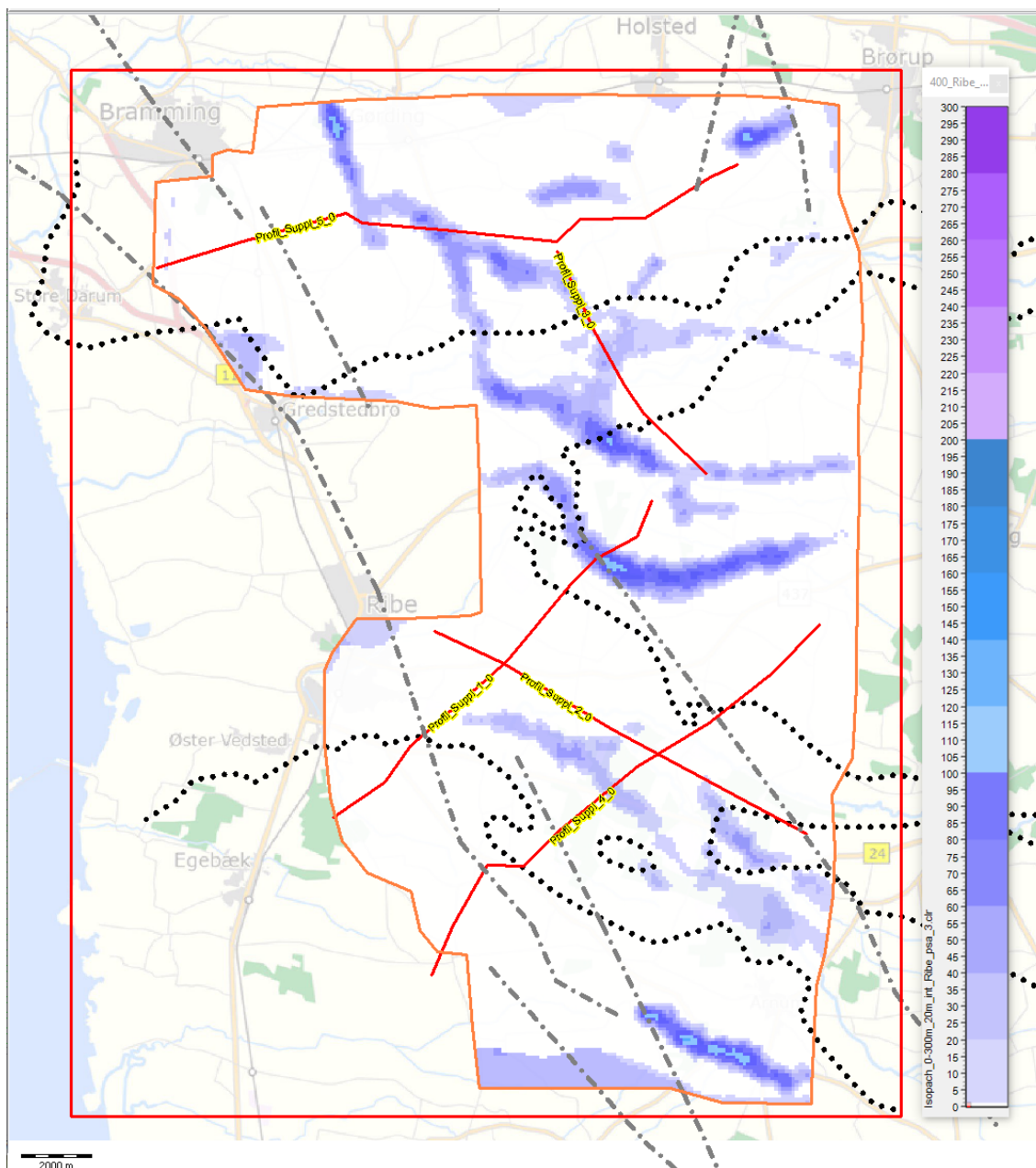
7.1.1.5 Isopachkort for 'Saale sand/ler.

Tykkelserne af 'Saale sand/ler' varierer, men med en dominans af tykkelser på op til 20 m (Figur 7-13). I de sydlige, centrale og nordøstlige dele ses områder med tykkelser på mellem

40 og 80 m, og der ses mindre områder mod nordøst, hvor der er tykkelser tæt på 100 m. Disse er dog behæftet med nogen usikkerhed pga. begrænset datadækning.

Stedvise forekomster af lag beskrevet som 'Holstein sand' ovenover det marine Holsteinler er inkluderet i laget 'Saale sand/ler', fordi TEM ikke kan skelne sandet fra Saale-lagene.

På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er Saale sand/ler vist med brun farve.

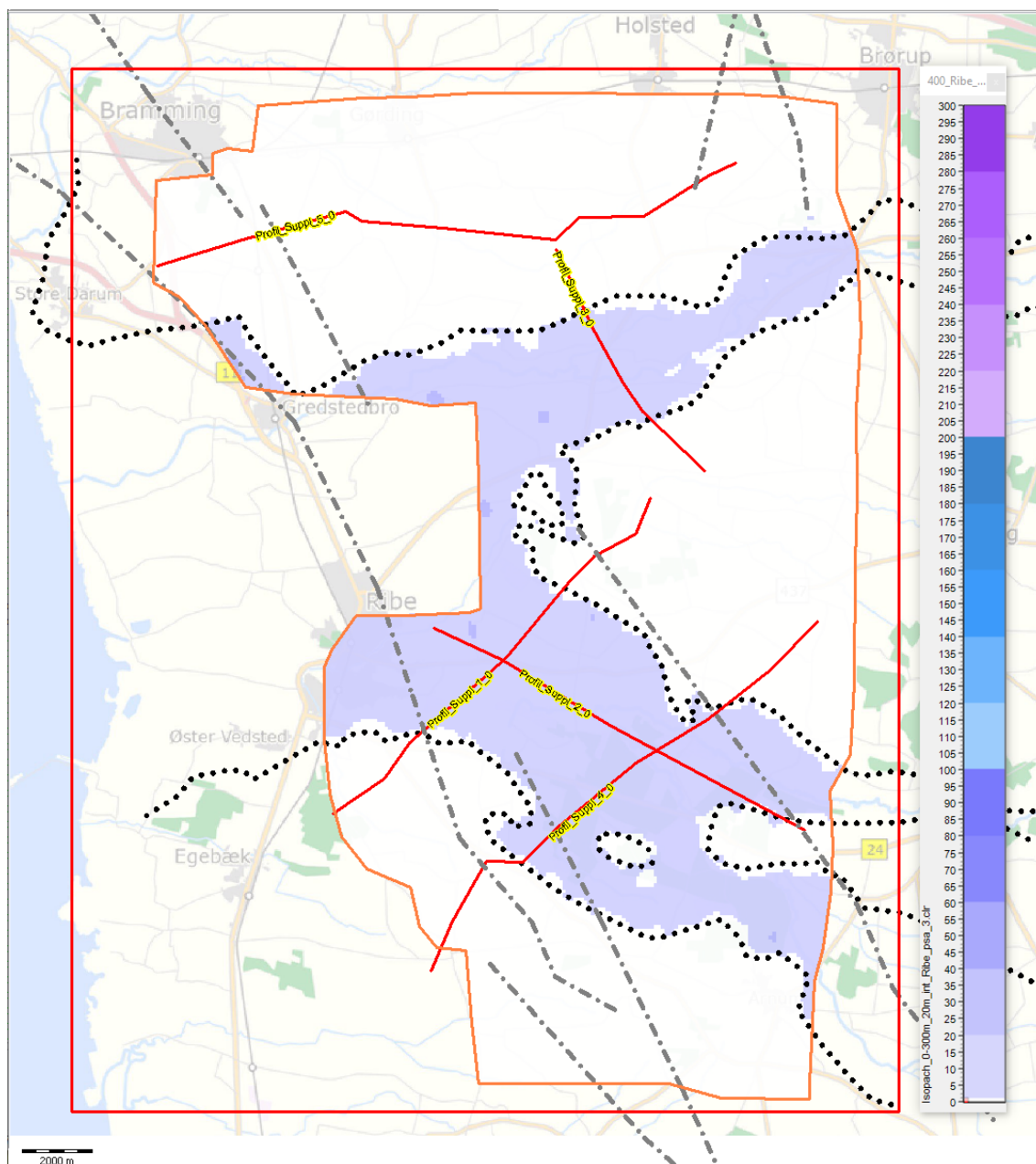


Figur 7-14. Isopachkort for 'Saale dalfyld'. Tykkelse af lag afgrænset af øverst flade 400 og nederst flade 1200. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

7.1.1.6 Isopachkort for 'Saale dalfyld'.

Laget 'Saale dalfyld' er karakteriseret ved smalle og aflange områder, hvor lagtykkelserne stedvist når over 100 m (Figur 7-14). Under hedesletterne skæres dalfyldet i toppen af det ovenover liggende 'Weichsel sand' (se Figur 7-18), mens dalfyldet i bakkekørerne går helt til terræn (se Figur 7-16 og Figur 7-20).

På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er Saale-dalfyldet vist med gul farve.



Figur 7-15. Isopachkort for 'Weichsel sand'. Tykkelse af lag afgrænset øverst af terræn og nederst af flade 400. Profiler, som er vist med røde streger anvendes i den følgende gennemgang af lagserien. Sort priksignatur angiver grænsen mellem bakkeøer og hedesletter, grå 'prik-streg linjer' angiver dybtliggende forkastninger (se Figur 4-2).

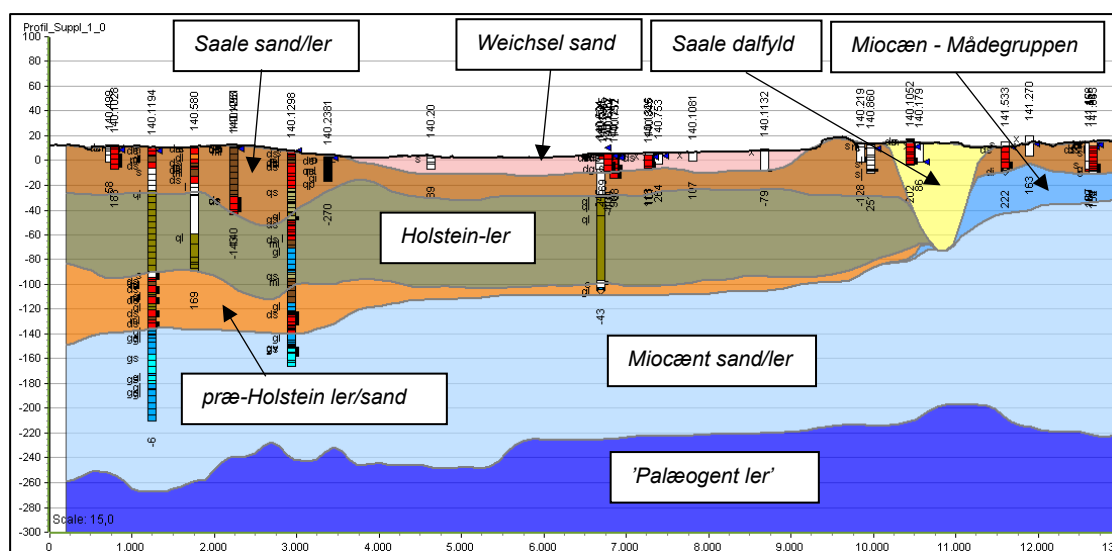
7.1.1.7 Isopachkort for 'Weichsel sand'.

Laget 'Weichsel sand' udgør sandet i hedesletterne mellem bakkeøerne, hvilket tydeligt ses på Figur 7-15. Bunden af sandet er generelt usikkert bestemt, da der typisk er tale om ældre, sandede aflejringer nedenunder, og grænsen mellem lagene derfor er vanskelig at tolke ud fra såvel geofysikken som fra boredata.

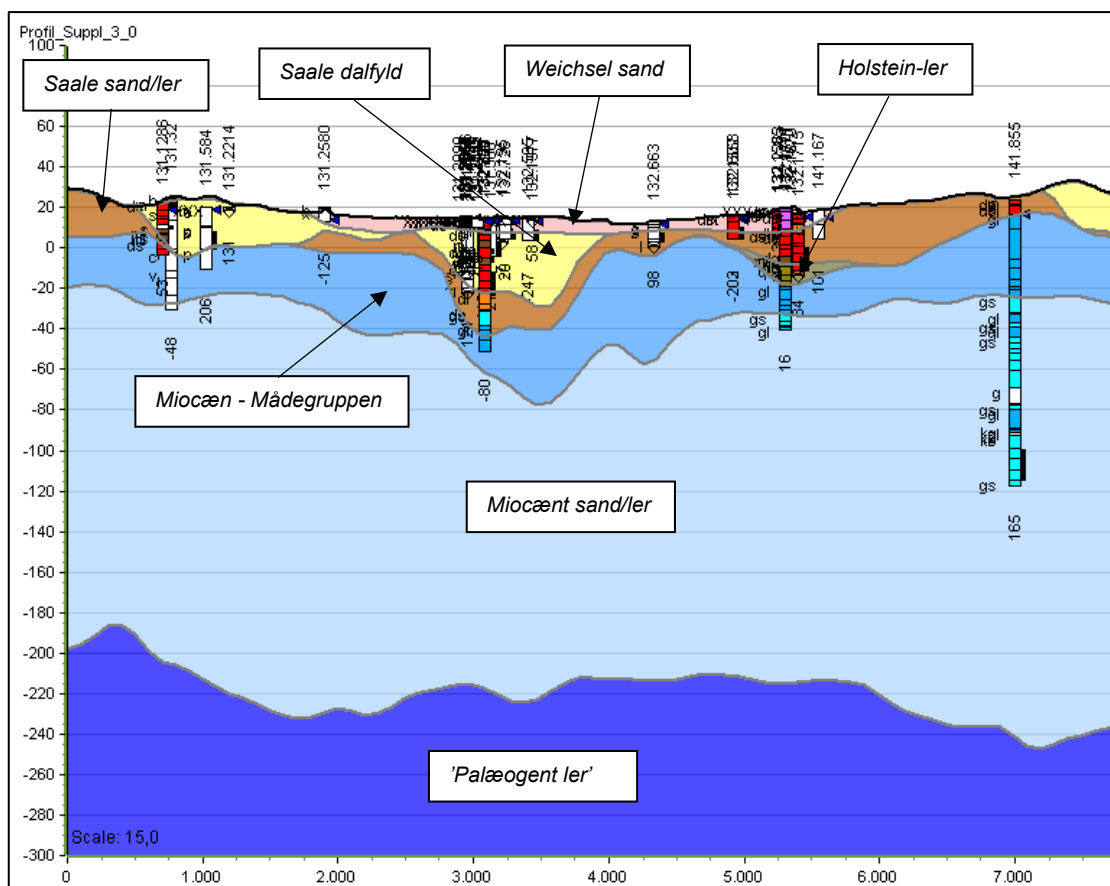
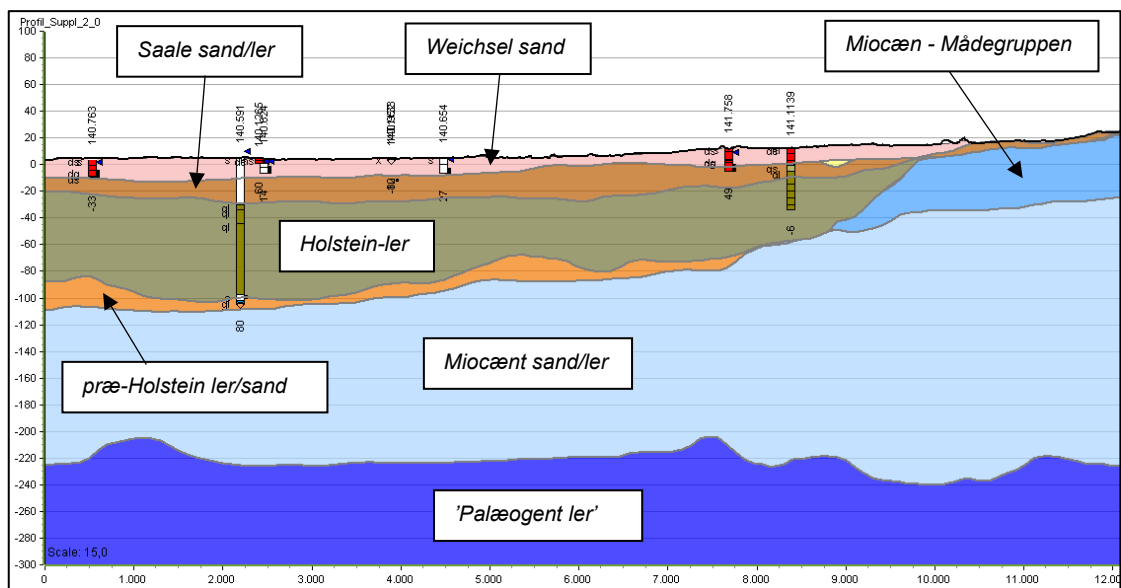
På profilerne i 7.1.1.8 og i Geoscene projektet er Weichsel-lagene vist med lyserød farve.

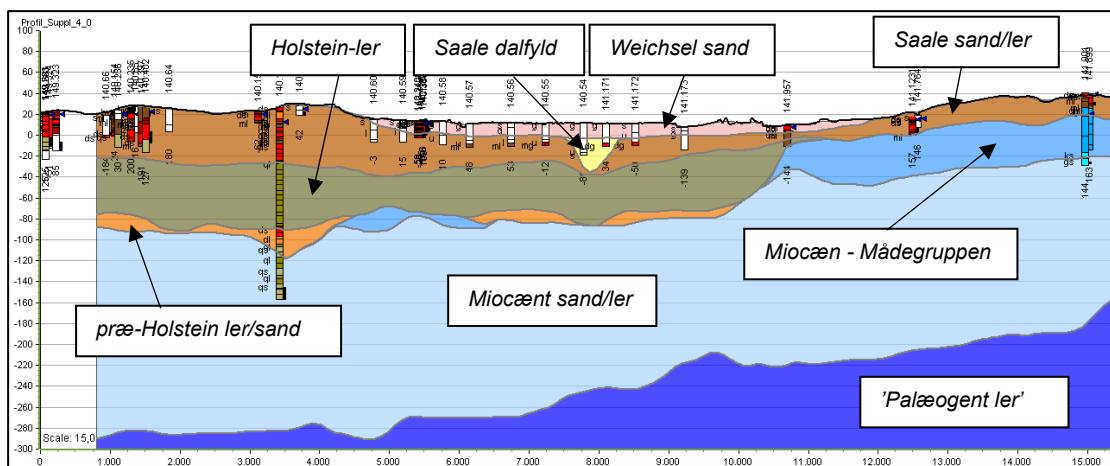
7.1.1.8 Lagserien langs udvalgte profiler

For at give et hurtigt overblik over lagernes udbredelse er det på profilerne nedenfor valgt kun at vise de tolkede lag og boreriger langs en 100 m buffer. Bemærk, at alle profiler har samme overhøjning (15X), men profilernes længde varierer (se Figur 7-15).

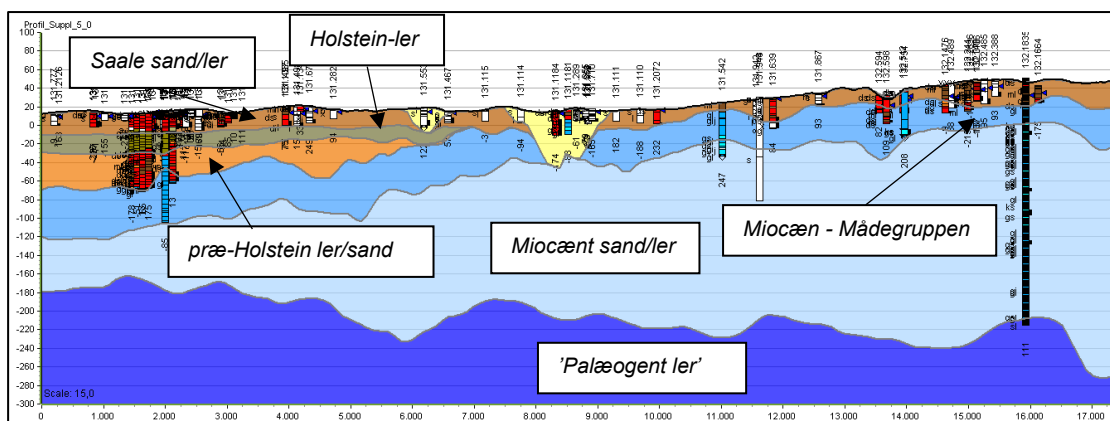


Figur 7-16. Profil_Suppl_1_0. For lokalisering, se f.eks. Figur 7-15.





Figur 7-19. Profil_Suppl_4_0. For lokalisering, se f.eks. Figur 7-15.



Figur 7-20. Profil_Suppl_5_0. For lokalisering, se f.eks. Figur 7-15.

7.1.2 Lagserien og den geologiske opbygning indenfor lokale områder

7.1.2.1 Palæogenet og miocænet

Palæogenet og den dybe, lerede del af miocænet

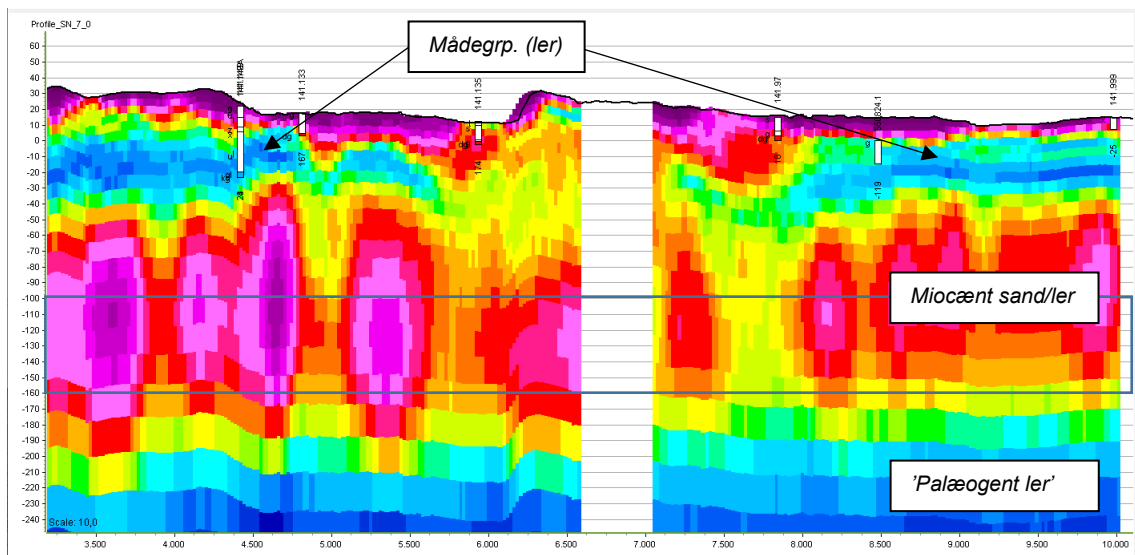
Den dybe del af lagserien er gennemboret i Arnum-boringen (Dapco, Arnum no.1; DGU nr. 150.24; Sorgenfrei & Buch, 1964), og her lå toppen af Bryozokalken fra Danien i kote -361 m, mens toppen af palæogenet blev anført i kote -224 m. Det palæogene ler består af mørkegråt, brunt og grønt paleocænt og eocænt ler. Ifølge Rasmussen et al. (2010) består den dybe del af miocænet i modelområdet af Vejle Fjord og Klintinghoved Formationerne. Disse er overvejende lerede og har lave elektriske modstande (se beskrivelse i afsnit 4.4.1.2). Det palæogene ler og de dybe lerede aflejringer i miocænet er som tidligere nævnt modelteknisk slået sammen, da overfladen af disse udgør den nederste grænse for vandindvindingsinteresserne. Kortet i Figur 7-9 viser koten for denne overflade, og her ses det, at fladen ligger dybest mod sydvest og nordøst – ned til kote -300 m – mens den i et NNV-SSØ

strøg i midten danner en slags højdedrag, hvor fladen ligger op til ca. 150 m højere. Orienteringen af højdedraget svarer til orienteringen af de dybe forkastninger (se Figur 4-2).

Den sandede og lerede del af miocænet

Miocænet ovenover består af vekslende sandede og lerede facies, som beskrevet tidligere. I den geologiske model er de miocæne lag - primært Vejle Fjord, Bastrup, Klintinghoved, Arnum og Odderup Formationerne – samlet i ét lag, 'Miocænt sand og ler', fordi formationerne ikke kan skilles ad i SkyTEM-modellerne. Hertil kommer, at kun få borer har fået udført biostratigrafi, som er en forudsætning for at kunne henhøre et lag til en bestemt formation med sikkerhed. Formationerne er gennemboret i f.eks. Føvling-boringen DGU nr. 132.1835 og Rødding-boringen DGU nr. 141.1141 (se Figur 4-11). Tykkelsen af denne del af den miocæne lagserie kan ses i Figur 7-8. Ser man bort fra den allersydligste del af modellen, så falder tykkelsen fra 300 m mod øst og til 100 m og derunder mod vest-sydvest. Mod vest, i Ribe, er der i boring DGU nr. 140.42 tale om borterosion af tæt på 100 m af den miocæne lagserie, og det tolkes at gælde for hele det område mod vest/sydvest, hvor der senere blev aflejret tykke lag af marine Holstein-aflejringer (se senere). I Bramming-Hundrup-området mod nordvest, derimod, er den sandede og lerede del af miocænet ikke borteroseret. Ribe-modellens sydlige del er baseret på tolkninger af ældre TEM, og her vil små forskelle i det dybe lers modellerede elektriske modstand kunne betyde store variationer for tolkningen af bunden af de miocæne lag, så tolkningerne her skal tages med et vist forbehold.

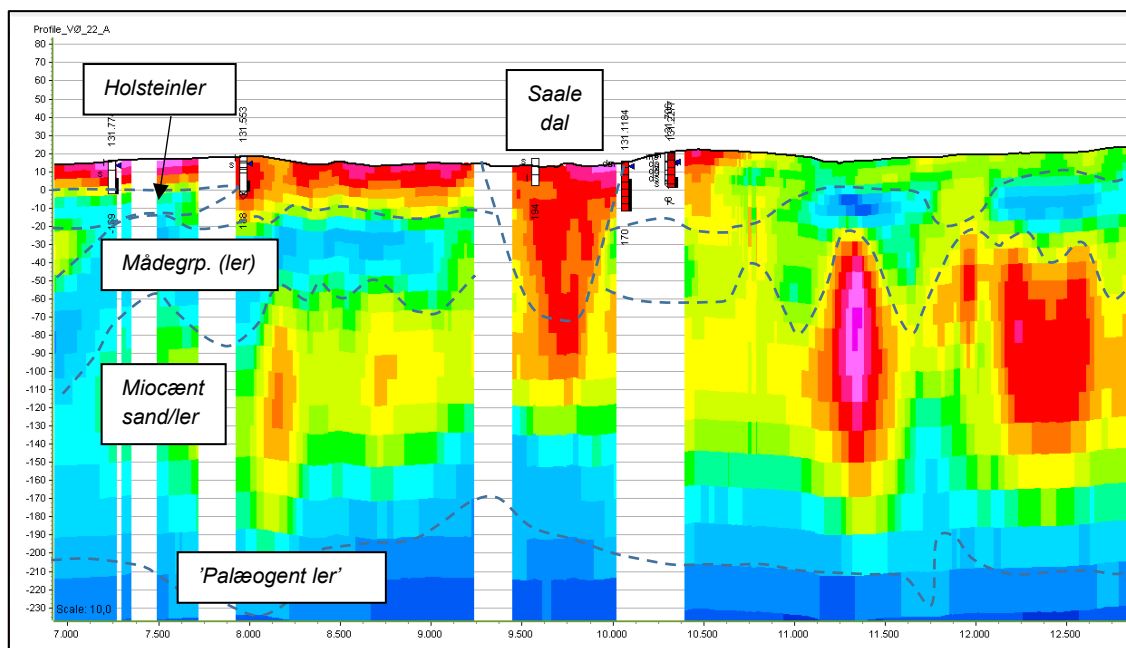
Generelt kan der ikke udskilles enkelte lag med forskellig elektrisk modstand i lagpakken, når der ses langs modelprofilerne. Dette skyldes, at modstandskontrasterne mellem de enkelte sandede og lerede lag, som kan erkendes i borerne, er så små, at SkyTEM-modellerne ikke kan opløse dem. Men ser man på middelmodstandskortene i intervallet -160 m til -100 m (Figur 7-3 og Figur 7-4), så viser de, at den sandede og lerede miocæne lagpakke har et 'spættet' billede, som kunne pege på horisontale lag/faciesvariationer. På Figur 7-21 kan det dog ses, at der i dette interval er smalle, vertikale 'søjler' med lavere modstande, og at det er disse forekomster, som danner det spættede billede. Forklaringen på det spættede modstandsbillede skal formodentlig - i stedet for faciesvariationer i lagserien - findes i variationer i koten for såvel toppen som bunden af lagserien. Disse to laggrænser varierer meget kotemæssigt, og hvor leret i henholdsvis bund og top kommer tæt på hinanden, ser det ud til, at TEM-modellerne ikke helt kan 'nå' de forventede høje modstande for sandet mellem leret ovenover og nedenunder. Der fås derfor pletter med lavere modstande i en ellers høj-resistiv lagserie. Variationerne i koten for leret skyldes formodentlig de talrige forkastninger, som rækker fra bund til top af den miocæne lagserie (se senere beskrivelser).



Figur 7-21. Profil_SN_7_0 fra 3300 m til 10000 m i modelområdets sydøstlige hjørne. Profilet viser SkyTEM-modeller og borer. Blå rektangel markerer intervallet fra -160 til -100 m. For lokalisering af profilet se Figur 6-2.

En anden faktor, der kan have indflydelse, er IP-effekter (pers. medd. Anders Vest, HGG). Denne effekt betyder, at der under lag med lave elektriske modstande kan fås unormalt høje modellerede modstande nedenunder. Et eksempel på dette ses til højre på profilet i Figur 7-22 ved 11.300-11.700 m, hvor der under Mådegruppens lave modstande mellem kote 0 og -20 m ses et vertikalt område med meget høje modstande, som adskiller sig fra det omkringliggende.

De ovenfor beskrevne modstandsvariationer er forekommende i stort set hele modelområdet, og det kan være svære at afgøre, hvornår det er den ene eller den anden årsag, der ligger til grund. Der skal derfor tages hensyn til disse fænomener ved de geologiske tolkninger, og det understreger, at en maskinel oversættelse af resistiviteter til litologi for lagserier som disse uvægerligt vil blive fejlbehæftet.

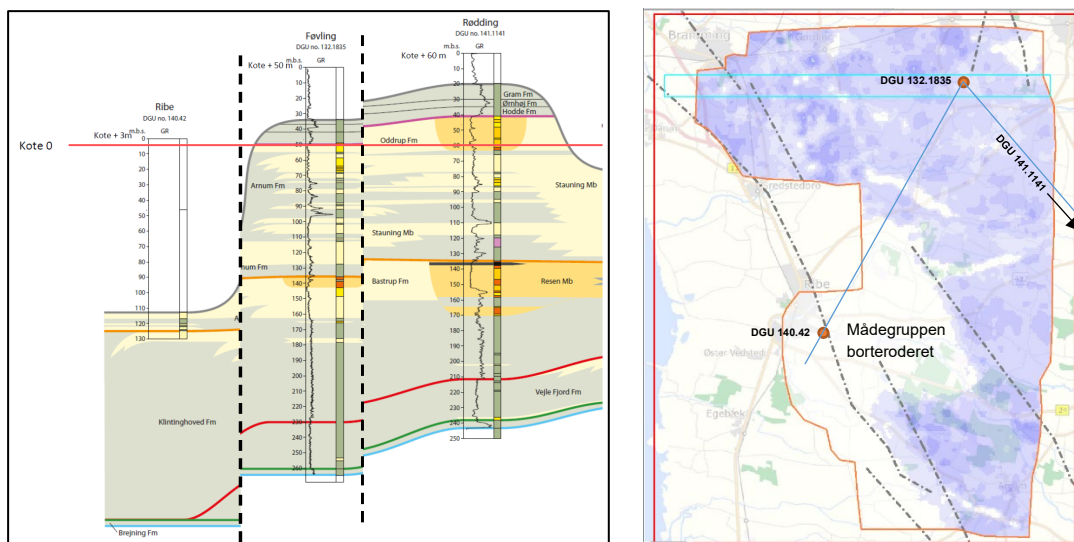


Figur 7-22. Profil_V0_22_A fra 7000 m til 12800 m i modelområdets nordvestlige del. Profilet viser SkyTEM-modeller og borer. For lokalisering af profilet se Figur 6-2.

Mådegruppen

Leret i Mådegruppen (Hodde-, Ørnhøj- og Gram-formationerne) træder tydeligt frem i Sky-TEM-modellerne med lave modstande, som det kan ses flere profileksemples på disse sider. Tykkelsen af Mådegruppen, som ses på Figur 7-10, ligger typisk mellem 20 og 40 m, hvor erosioner, foldninger og forkastninger kan skabe lokale variationer (se senere). Bemærkelsesværdigt er det, at Mådegruppen ikke findes i den vestlige/sydvestlige del af modelområdet, og at afgrænsningen er knivskarp og med NNV-SSØ og VSV-ØNØ orienteringer. NNV-SSØ-orienteringen er sammenfaldende med den overordnede orientering af områdets forkastninger.

På Figur 4-11 ses det, at der i boring DGU nr. 140.42 i Ribe er tale om borterosion af næsten 100 meter af den miocæne lagserie, inklusive Mådegruppen. På Figur 7-23 er korrelationspanelet fra Rasmussen et al. (2010) justeret efter kote 0 fremfor Top Bastrup, hvilket betyder, at den miocæne lagserie i Ribe-boringen kommer til at ligge ca. 45 m dybere end længere mod øst ved Rødding. På figuren er der indtegnet to tentative forkastninger gennem den miocæne lagserie som den mest plausible forklaring på koteforskellen. Den vestligste af de to tentative forkastninger ser ud til at kunne forklare koteforskellen på ca. 35 m for den miocæne lagserie set fra vest mod øst. Med andre ord ser det ud til, at en eller flere forkastninger i området er medvirkende til, at store dele af de miocæne aflejringer er borteroserede mod vest/sydvest og at de miocæne formationer ligger dybere i dette område. Timingen af erosionen kan sættes til et sted mellem den allersidste del af Miocæn og Holstein, men nok mest plausibelt i kvartæret og sandsynligvis under Elster glaciationen.

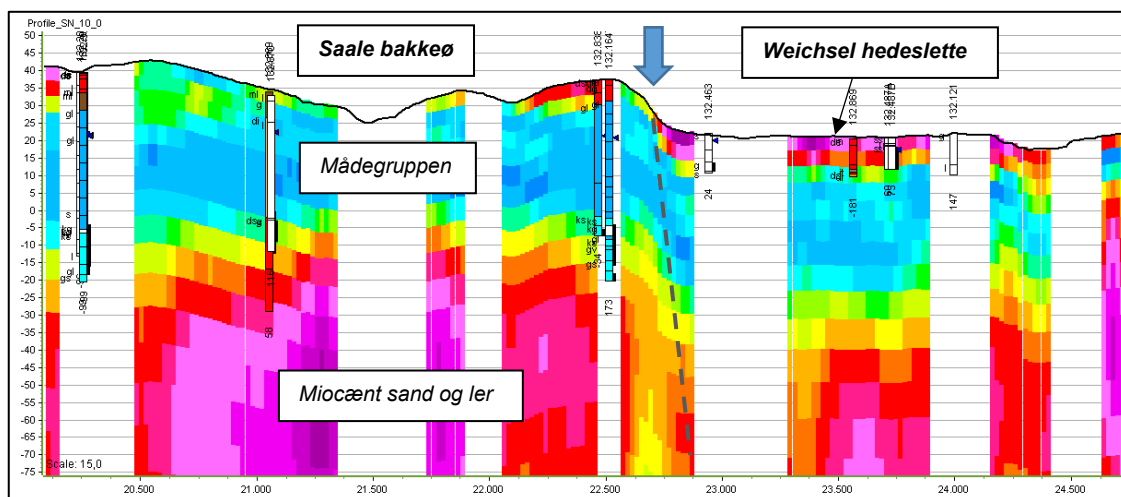


Figur 7-23. Korrelationspanel fra Rasmussen et al. (2010). I forbindelse med Ribe-modelleringen er panelet til venstre justeret efter kote 0 fremfor efter Top Bastrup, som det er gjort af Rasmussen et al. Lodrette stiplede linjer angiver tentative forkastninger. Til højre isopach-kort for Mådegruppen (se Figur 7-10) med indtegnede, dybe forkastninger og placeringen af de to vestligste borer fra panelet til venstre.

Profil VØ_22_A (Figur 7-28) går ca. V-Ø omtrent centralt gennem Hunderup SkyTEM-kortlægningen. Profilet viser en stærkt deformeret miocæn Mådegruppe, hvor topkoten varierer mellem kote +20 og -80 m langs profilet (se tentative tolkninger tegnet med stiplede linjer). Den ældre miocæne lagserie under Mådegruppen og de yngre 'Præ-Holsteinlag' forventes også at være deformeret. Som det er skitseret på profilet, tolkes deformationerne at skyldes forkastninger, som derfor får afgørende indflydelse på såvel den geografiske som den kote-mæssige forekomst af lagene i dette område. I de nedforkastede områder ses forekomster af præ-Holstein-lag – eksempelvis mellem 5.200 og 7.000 m på profilet. I 2D-snittene, som profilerne udgør, kan det derfor fejlagtigt tolkes, at der er tale om begravede dale med sandet fyld. Det er ikke tilfældet, da middelmodstandskortene ikke viser aflange strøg med høje modstande, men i stedet irregulære, men stedvist skarpt afgrænsede områder med høje modstande (præ-Holstein) omgivet af lave modstande (Mådegruppen); se f.eks. Figur 7-6 og Figur 7-5 i modelområdets nordvestlige del.

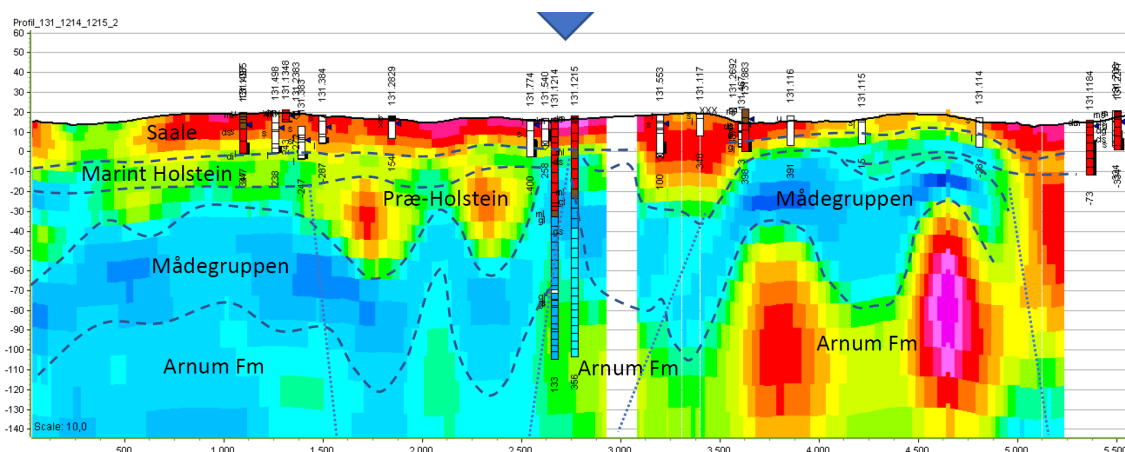
Afhængig af profilernes orientering i forhold til deformationerne, kombineret med zoomniveau og overhøjning kan deformationerne af Mådegruppen se meget forskellige ud. Stedvist er forkastninger af lagserien tydelige, mens der andre steder er tale om folder eller tilsyneladende løsrevne, hældende lavmodstandslag. Da SkyTEM-data er indsamlet langs linjer med i størrelsesordenen 200 meters afstand, og da der ikke er tale om total fladedækning med data, vil en 3D tolkning af de komplekse strukturer være vanskelig at udføre i detaljer.

På Figur 7-28 ses det, at den prækvartære del af lagserien er tydeligt mere deformeret end Holsteinlagene ovenover, hvilket betyder, at deformationerne af miocænet – eller i det mindste hovedparten af den – skal placeres i Elster eller tidligere. Deformationerne kan enten skyldes bevægelser langs de dybe forkastninger, eller der kan være tale om glacialtektonik. Glacialtektonik er beskrevet i regionen (f.eks. Andersen 2004, Jørgensen et al., 2014) og kunne derfor også forekomme i modelområdet. Men som for eksempel illustreret på Figur 7-28 er der mest tale om normalforkastninger og ingen overskydninger, og der er heller ikke fundet tegn på hill-hole-par (dislocerede voluminer; Aber & Ber, 2007).



Figur 7-24. Profil_SN_10_0 fra afstand 20000-24700 m i modelområdets nordøstlige del. Profilet viser SkyTEM-modeller og borer. Tentativ forkastning indtegnet med grå stiplede linje. For lokalisering af profilet se Figur 6-2.

Profilet på Figur 7-24 går S-N NV for Rødding og viser kanten af bakkeøen mod syd og hedesletten mod nord. Der ses en tydelig fleksur/forkastning ved skrænten (markeret med blå pil). Tykkelsen af Mådegruppen er nogenlunde konstant 35-45 m med en tilsyneladende fortykkelse lige ved fleksuren. Oversiden af lavmodstandslaget ligger i kote +35 m på bakkeøen ovenfor skrænten, mens den ligger i kote +15 m under hedesletten, hvilket betyder en forsætning af laget med ca. 20 m ved overgangen fra bakkeø til hedeslette. Hedesletten mellem bakkeøerne ser således ikke ud til at være et resultat af smeltevandserosion, men i stedet en sænkning af området. På dette profil ser Mådegruppen ikke ud til at være eroderet, og de ca. 10 meter Weichsel smeltevandssand ligger muligvis konformt direkte på miocænet. Da skrænten ikke synes at være påvirket af glacialtektonik og Mådegruppen ikke ser ud til at være eroderet, er den tektoniske hændelse sandsynligvis sket efter Saale og inden dannelsen af Weichsel-hedesletten.

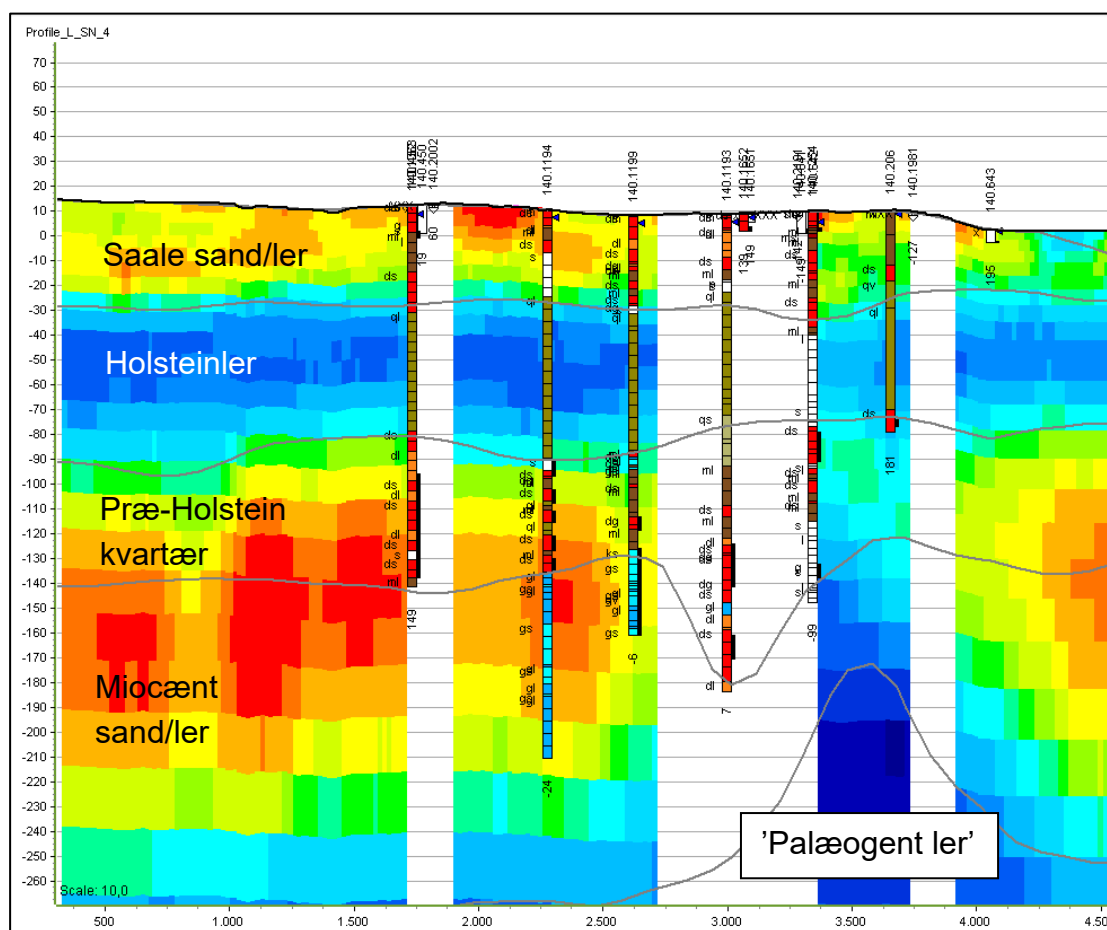


Figur 7-25. V-Ø profil syd for Bramming og Gørding (ca. 200 m syd for Profil VØ_22_A). Profilet viser SkyTEM-modeller og borer. Tentative forkastninger er indtegnet med blå stiplede linjer.

Ovenstående profil går V-Ø syd for Bramming og Gørding, ca. 200 m syd for profil VØ_22_A. Boringerne DGU 131.1214 og 1215 ligger centralt på profilet (markeret med blå trekant) og har en indbyrdes afstand på ca. 300 m. I DGU 131.1214 udgøres miocænet øverst af Gram og Hodde Formationerne (Mådegruppen) og nederst af Arnum Formationen, mens DGU

131.1215 udelukkende består af Arnum. Disse indplaceringer i stratigrafien betyder, at toppen af Arnum ligger i kote -25 m i DGU 131.1215, mens den i DGU 131.1214 ligger i ca. kote -70 m. Dette bekræfter billedet fra SkyTEM-modellerne, at lagserien på dette sted er kraftigt deformeret. Som det kan ses lige under de to boreriger på profilet, er der tale om en relativt stor projicering af borerigerne ind på profilet (133-356 m) og dette skyldes, at borerigerne ligger i et område, hvor der ikke er SkyTEM. Et perfekt match mellem borerigerne og SkyTEM-modellerne skal derfor ikke forventes, men fokus ligger på, at begge datasæt afspejler en kraftigt deformeret lagserie.

Toppen af Mådegruppen varierer tilsyneladende mellem kote 0 og -60 m langs profilet, og at det gælder hele den miocæne lagserie bekræftes af borerigerne, hvor toppen af Arnum varierer med 45 m over få hundrede meter.



Figur 7-26. Udsnit af den sydlige del af profil L_SN_4. Se tekst for forklaring. For lokalisering af profilet se Figur 6-2.

7.1.2.2 Holstein- og præ-Holstein-aflejringerne

Præ-Holstein-aflejringer

På Figur 7-11 ses tykkelsen og udbredelsen af de kvartære aflejringer ældre end det marine Holstein. Lagserien er heterogen og består af glaciale aflejringer af moræneler og smeltvandssand, -grus og -ler, samt sandede facies af det marine Holstein (se Figur 7-26). Reelt kan SkyTEM ikke opløse lagserien, så tolkningen af tykkelse og udbredelse hviler

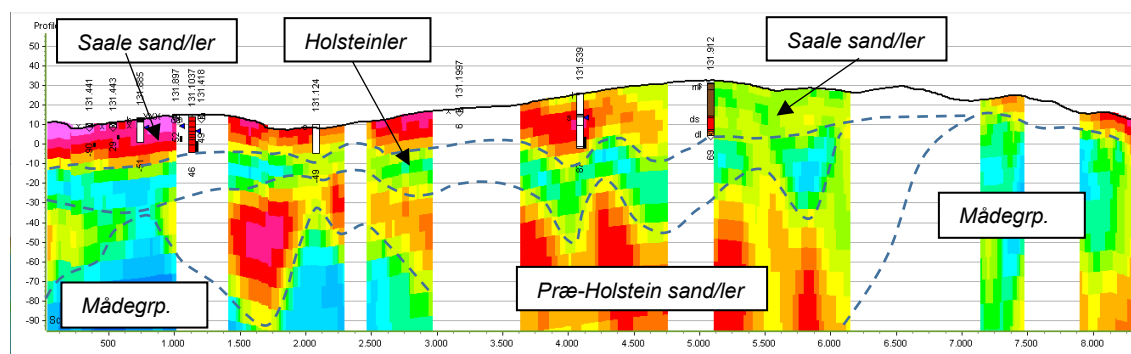
udelukkende på boredata. De største tykkelser ses mod sydvest og nordvest. Mod øst kiler lagene ud, og da antallet af borer er begrænset, vil denne tolkning være behæftet med nogen usikkerhed. I Hunderup-området mod nord ses ganske store variationer i lagenes samlede tykkelse på grund af folder, forkastninger og erosion (se f.eks. Figur 7-25).

Holstein-aflejringer

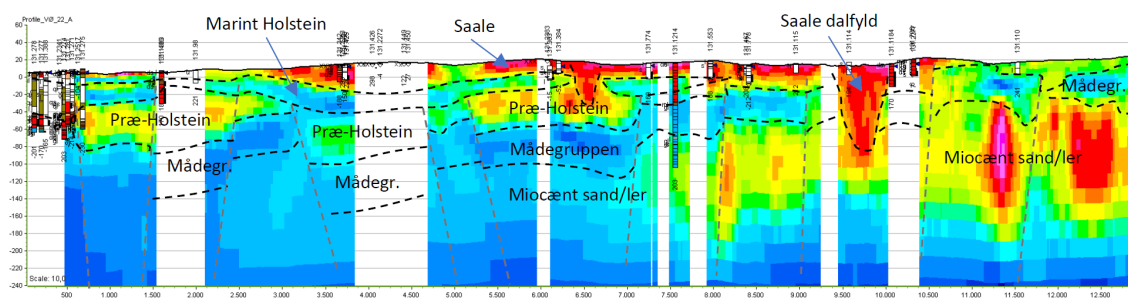
Som det ses af Figur 7-36 så startede aflejringen af de marine aflejringer ved Ribe allerede i den sidste del af Elster, og en skelnen mellem de marine aflejringer fra henholdsvis Elster og Holstein kan kun ske ved at analysere indholdet af mikrofossiler (Knudsen, 1987). I Ribe-modellen betragtes 'Holsteinleret' derfor som den samlede tykkelse af de marine aflejringer med lave elektriske modstande i områdets vestlige del. Dog er der nogle steder tale om ganske tykke sandlag enten i toppen eller i bunden af Holsteinlagene, f.eks. 22 m fint sand i toppen af DGU 149.581 og ca. 70 m sand (QS) i bunden af DGU 140.985. I forhold til tolkningerne i den geologiske model, afgrænses Holstein-lagene som de lerede og stedvist siltede lag (QL/QI), mens dybtliggende QS/QI henføres til de kvartære lag nedenunder og QS ovenover til de yngre glaciære sedimenter ovenover. På den måde adskilles sand og lerlag, men i modellen kan Holsteinlagene derved stedvist komme til at fremstå tyndere end de reelt er. Holsteinlagene er i modsætning til miocænet generelt kalkholdige, hvilket er en god indikator på steder, hvor lagserien ikke er veldefineret.

I boring DGU 140.985, som er beliggende ca. midt mellem Ribe og Arnum, er der lerkulper i det dybe sand, og Peter Konradi, DGU, skriver ved den mikropalæontologiske analyse af prøven fra 164 m, at leret – såfremt det ikke er 'faldet ned' fra lag ovenover - sandsynligvis er en lagunefacies bag en barriere (<https://data.geus.dk/JupiterWWW/document.jsp?fileid=731025>). For det dybereliggende sand skriver Konradi, at der er en meget sparsom fauna, som sandsynligvis repræsenterer mere kystnære forhold. Boring DGU 140.985 ligger ca. 2,5 km fra DGU 140.1288, som på lignende vis viser en meget tyk Holstein-lagserie, hvor den nederste halvdel er overvejende sandet. Prøvebeskrivelsen i sidstnævnte boring er dog mangelfuld. Holstein-lagserien i disse to borer er tykkere end gennemsnittet, og kunne derfor tænkes at udgøre en tidlig udfyldning af en åben dalstruktur (fjord).

Figur 7-27 udgør den vestlige del af profil VØ_20_A_1 lokaliseret i Hunderup-området midt mellem Gredstedbro og Bramming. Her ses det tydeligt, at Holsteinleret er foldet og måske forkastet. På dette snit ses, at lagets overfladekote varierer med 10-20 m. Endnu større kotevariationer ses nedenunder i Mådegruppens ler.



Profilen i Figur 7-28 viser den vestlige del af profil VØ_22_A, som ligger et par km længere nordover end Figur 7-27. På figuren er der indtegnet tentative lagtolkninger og mulige forkastninger. I lighed med det foregående profil er det marine Holstein deformeret, men tilsyneladende kun i mindre grad end de underliggende lag. På profilet er det tolket, at den miocæne lagserie er gennemforkastet, hvilket tydeligst ses for Mådegruppen, men tydeligvis er også præ-Holsteinlagene forkastet på tilsvarende vis (se den venstre halvdel af profilet). Der ses mulige forsætninger af Mådegruppen på op til 50 meter (se ved 3000-3500 m på profilet). På andre profiler i Hunderup-området ser det ud til, at lagserien er foldet, hvorimod på den ovenstående profil tydeligvis er tale om forkastninger. Den forskellige fremtoning afhænger i høj grad af, hvordan profilet skærer gennem den deformerede lagserie. Med Sky-TEM metodens store footprint, midlinger og hvordan det aktuelle profil ligger, så vil deformationerne fremtræde meget forskelligt.



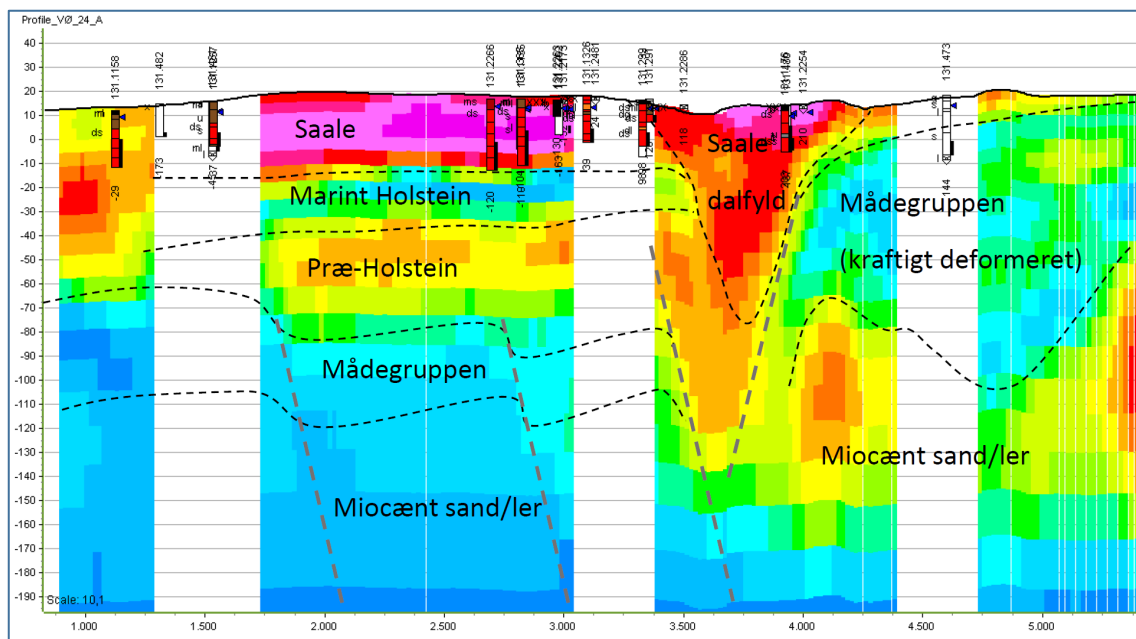
Figur 7-28. Udsnit af profil VØ_22_A (10X overhøjning) gennem Hunderup-området i modelområdets nordlige del. Tentative geologiske tolkninger af laggrænser er indsat med stiplede sorte linjer, mens mulige forkastninger er indtegnet med tynde, grå stiplede linjer.

Hvorvidt deformationerne af Holsteinleret i Hunderup-området skyldes bevægelser langs dybe forkastninger eller glacialtektoniske deformationer kan ikke umiddelbart afgøres, da der ikke kan ses nogen entydig strukturel orientering af Holsteinleret i TEM-middelmålingskortene (Figur 7-6, Figur 7-7). For lagene under Holsteinleret ses afgrænsninger med orienteringer mellem NV-SØ og NNV-SSØ samt vinkelret her på (se Figur 7-3 til Figur 7-6), hvilket peger på, at dybe forkastninger har stor indflydelse på udbredelsen og den kotemæssige placering af de enkelte lag.

På Figur 7-29 ses den vestlige del af profil VØ_24_A, som er beliggende et par km nordligere end profilet i Figur 7-28. På profilet ses øverst i lagserien en dalerosion, som kan henføres til Saale. Dalen er eroderet ned i lagserien på grænsen mellem den miocæne Mådegruppe mod øst og Holsteinleret mod vest. Dalen når ned i præ-Holstein lagene underneden. På dette sted ser det ud til, at Mådegruppen er kraftigt nedforkastet mod vest, men muligvis også kraftigt eroderet, da de elektriske modstande ikke er så lave som forventet. Under Saale dalen ser det ud til, at der findes en kile af højmodstandslag, som har en lidt lavere modstand end Saale-dalens fyld, og da Holsteinlagene delvist rækker ind over disse lag, ser det ud til, at der her er tale om lag ældre end Holstein, som er kraftigt deformeret i den forkastede zone.

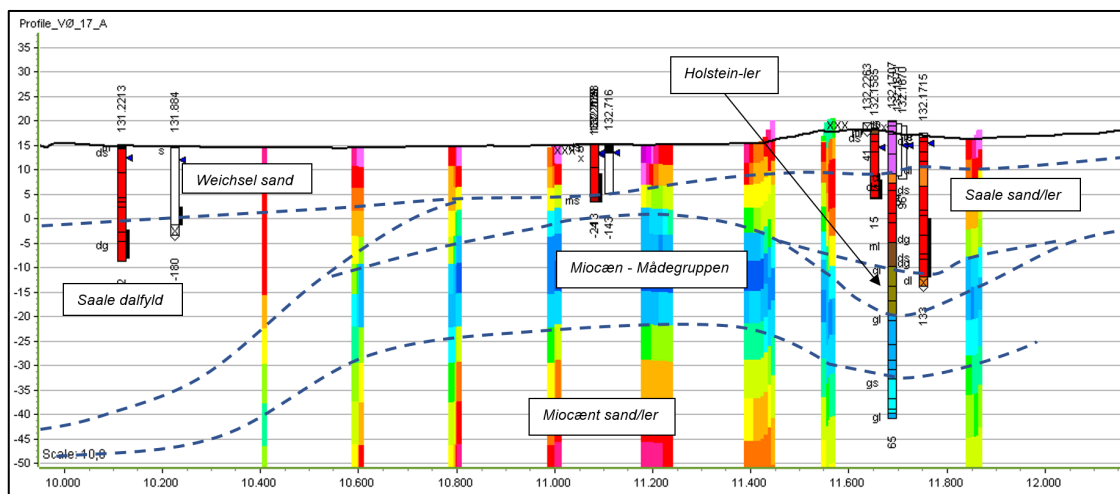
- muligvis en ældre dalerosion. Forkastningerne, der er indtegnet, er tentative, men den markante nedforkastning af Mådegruppen kunne være en nordlig forlængelse af forkastningen ved 7000 m skitseret på profilet i Figur 7-28.

En mere detaljeret udredning af forløbet af forkastningerne i området vil være vanskelig på grund af kombinationen af deformationerne af lagserien og begrænsningerne i hvor godt de litologiske skift langs forkastningerne opløses i data.



Figur 7-29. Udsnit af profil_VØ_24_A (10X overhøjning) V-Ø gennem modelområdets nordlige del. Tentative geologiske tolkninger af laggrænser er indsat med stiplede sort linje, mens mulige forkastninger er indtegnet med grå stiplede linjer.

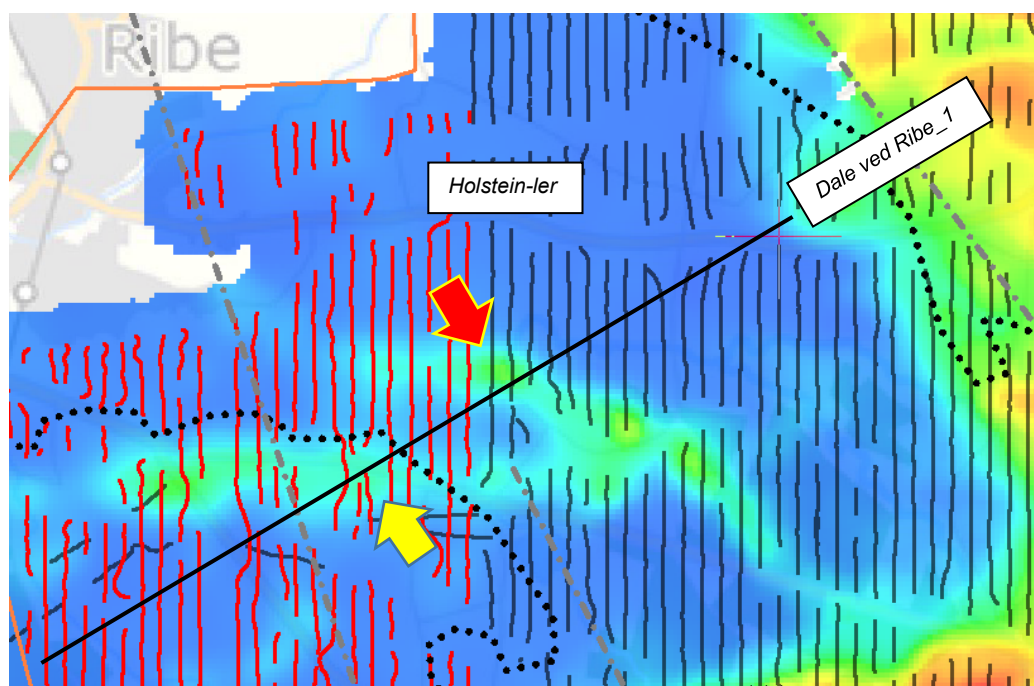
Umiddelbart kan der ikke ses en forsætning i toppen af den dybe gode leder på Figur 7-29 (ca. i kote -190 m), som svarer til forsætningen af Mådegruppen ovenover. Dette kan ikke umiddelbart forklares, men hvis der er tale om primært sideværts bevægelser langs den dominerende forkastning vil der ikke nødvendigvis kunne ses en forsætning af de dybtliggende lag.



Figur 7-30. Udsnit af profil_VØ_17_A (10X overhøjning). For lokalisering, se f.eks. Figur 6-2.

Øst for den kortlagte Holstein-kystlinje er der ved Tobøl en enkelt boring, som gennemborer Holstein interglaciale aflejringer: DGU nr. 132.1707 (se profil i Figur 7-30). Koteniveauet for toppen svarer nogenlunde til en forventet insitu-placering (kote -10 til -20 m), men tykkelsen er væsentligt mindre end længere mod sydvest. Holsteinaflejringerne i boringen hviler på miocæne aflejringer, der beskrives som Hodde og herunder Arnum Fm.

At Holsteinaflejringerne ligger på højtliggende miocænt ler peger på, at der bag Holsteinkysten har været mindre fjorde, som er udviklet i lavninger i det miocæne ler. En korridor til havet mod vest må have eksisteret, men den er altså ikke fundet med sikkerhed. Men da tolkningen af lavmodstandsaflejringerne type udelukkende på baggrund af modstandsniveauet er svær, kan der godt være tale om, at Holsteinler og Mådegruppe-ler kan forveksles langs Holsteinkystzonen – specielt i smalle fjordarme. Alternativt kan forekomsten af Holstein i ovennævnte boring forklares ved, at forekomsten af Holstein i ovennævnte boring udgør en flage, som er disloceret i Saale. Men en placering øst for Holsteinkysten taler dog imod dette, da isbevægelsesretningerne i Saale fortrinsvist var fra østlige retninger.



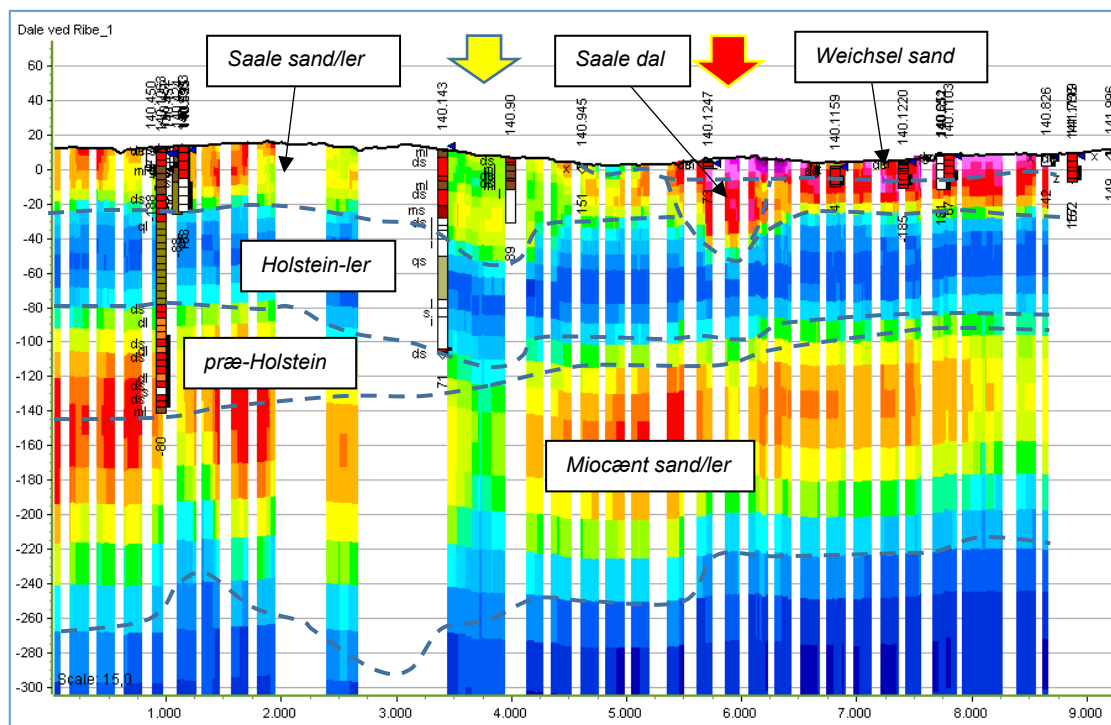
Figur 7-31. Oversigtskort med placering af profil vist i Figur 7-32. Baggrundskort udgøres af TEM middelmodstandskort (kote -50 m) og herunder nedtonet topografisk kort. Profilet er ca. 9 km langt. Pile angiver aflange strukturer med højere elektriske modstande.

I Lustrup-området syd og sydøst for Ribe ses aflange strukturer med højere modstande end de omkringliggende lav-resistive Holsteinlag (Figur 7-31). Orienteringerne af de to strukturer er henholdsvis V-Ø og VNV-ØSØ og de ser ud til at krydse hinanden. På profiludsnittet i Figur 7-32 ser man, at strukturen ved den gule pil er udfyldt med vekslende smeltevandssand og moræneler, og at den ligger et sted, hvor både over- og underkant af Holstein-aflejringerne ligger ca. 30 m dybere end udenfor strukturen. Der er således her tale om en synklinal i Holsteinleret i modsætning til strukturen ved den røde pil, hvor der tydeligvis er tale om en dal-erosion, da Holsteinlerets tykkelse underneden er mindre end udenfor strukturen. Denne dal-erosion ligger samtidig et sted, hvor den kotemæssige placering af Holsteinlerets bund ændres vertikalt i størrelsesordenen 10 m fra vest mod øst. Det tolkes derfor, at den V-Ø

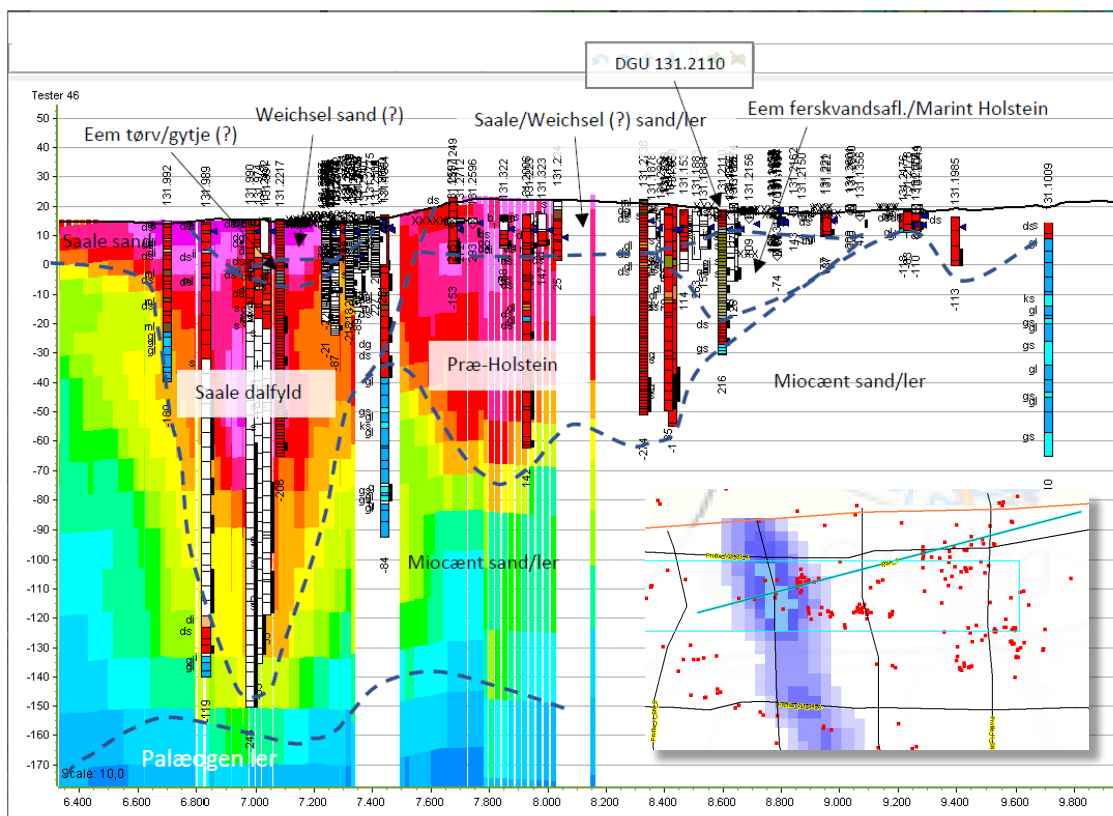
orienterede struktur udgør en foldning af Holsteinlagene og at dette skyldes en glacialtektonisk påvirkning fra et isfremstød fra nord under Saale-glaciationen. Dalerosionen, derimod, har en anden orientering og ser ud til at være lokaliseret over en forkastning.

Profil L_SN_3, som forløber S-N syd for Ribe (Figur 7-33), er placeret parallelt med den glacialtektoniske deformationsretning, og her ses folderne igen meget tydeligt. Boring DGU 140.1298 viser en meget heterogen lagserie med tegn på flager, hvilket synes at understøtte, at der er tale om glacialtektonik. Den gule pil midt på profilet viser den samme synklinale, som på Figur 7-32.

Timing mellem den glacialtektoniske hændelse og dalerosionen er usikker, men i begge tilfælde er der tale om Saale. Da orienteringen af 'foldestrukturen' er V-Ø kunne der enten være tale om det første isfremstød fra nord, som sandsynligvis nåede ned syd for den danske grænse eller det efterfølgende Drenthe-fremstød fra nordøstlig retning (se f.eks. Houmark-Nielsen, 2011). Dalerosionens VNV-ØSØ-orientering, derimod, vil passe bedst med det yngste isfremstød, Warthe, som nåede området fra østlige til sydøstlige retninger (se f.eks. Andersen, 2004, Høyer et al., 2013).



Figur 7-32. Profil orienteret VSV-ØNØ syd for Ribe (15X overhøjning). For lokalisering, se Figur 7-31. Farvede pile angiver lokalisering af lag med højere elektriske modstande end det omkringliggende marine Holstein.



Figur 7-35. Profilsnit ved Gørding (VSV-ØNØ). Tentative tolkninger indtegnet med stiplede blå linjer. Profilet er beliggende ved Gørding i områdets nordvestlige del (se blå streg på indsat kortudsnit; blå raste signatur udgør dalfyld; se Figur 7-14).

Ved Gørding øst for Bramming er der udpeget to korte, ca. 750 m brede, helt begravede dalstykker med henholdsvis en NNV-SSØ og en VSV-ØNØ-orientering (www.begravede-dale.dk). Med den nye SkyTEM i Ribe Øst og Hunderup-områderne er dalene bekræftet. Den vestlige dals bund når jf. SkyTEM måske så dybt som kote ca. -150 m, mens den østlige kun når ca. til kote -80 m, jf. Figur 7-35.

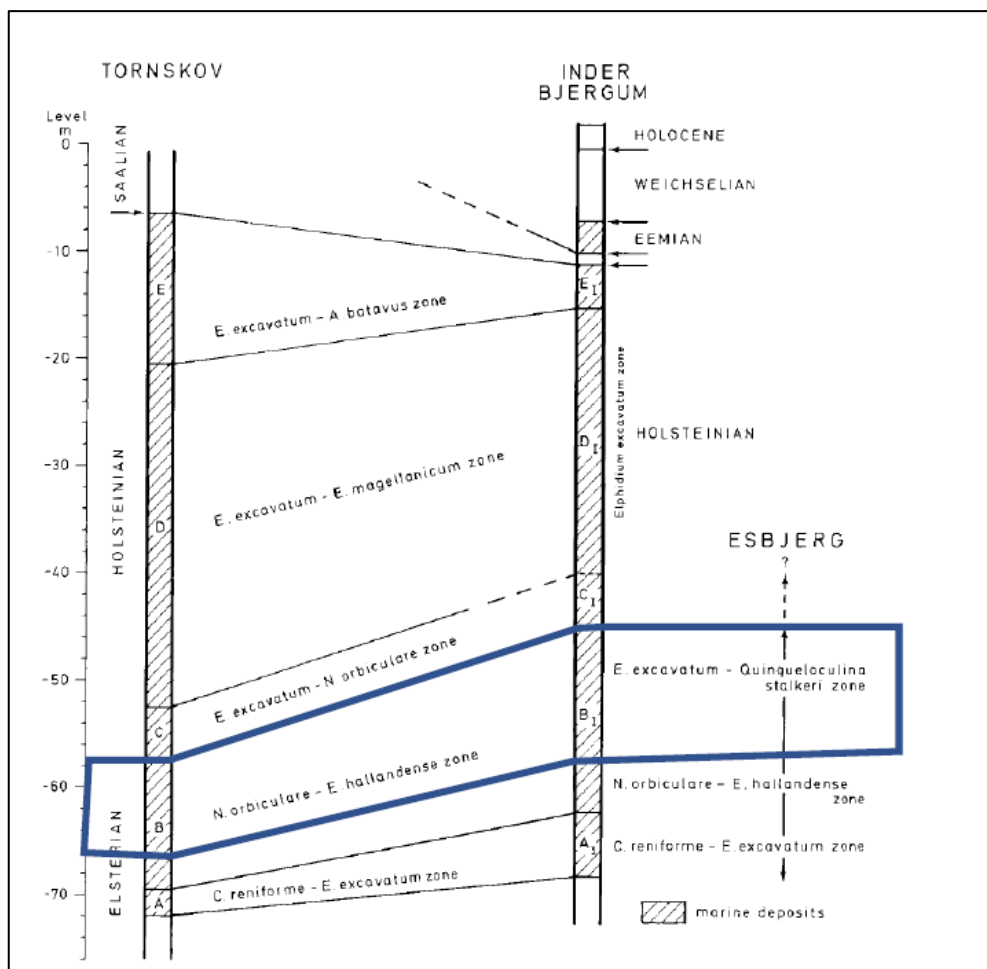
En dyb boring i den vestlige, NNV-SSØ orienterede dal (DGU nr. 131.990) viser kvartære aflejringer af primært smeltevandssand, hvoraf hovedparten er vurderet at være omlejrrede miocæne aflejringer (geus.dk/jupiter). Et ca. 1 m tykt lag omkring kote 0 er tolket som værende interglacialt ferskvandssilt. I den østlige dal viser boring DGU nr. 131. 2110 i Gørding interglacialt ferskvandssand og -tørv fra kote ca. +13 til +11 m. Disse lag er af Ole Bennike (Jupiterdatabasen) tentativt henført til Eem. Herunder og ned til ca. kote -20 m haves interglacialt saltvandsler og -sand. I boring DGU 131. 2103 i Gørding er der mellem ca. kote +8 til -7 m også fundet saltvandsler og saltvandssilt, og herover ca. 13 m moræne og smeltevandssand. Alderen af de marine aflejringer er ikke fastlagt i disse boringer. Det er de i stedet i boring DGU 131. 850 ved Gørding Vandværk. Her har Peter Konradi dateret ca. 2 m saltvandsler ca. ved kote +2 m til 'Holstein, øvre del af nedre serie'. Det ser således ud til, at en fjord af Holsteinhavet har fundet vej ind i landet mod øst i en eksisterende dal. Dateringen af de marine aflejringer i boring DGU 131.850 viser entydigt Holstein, hvilket understreger, at morænen ovenover i boring DGU 131.2103 må være fra Saale. Forekomsten af ferske Eem-lag i boring DGU 131.2110 tæt ved, peger på en ganske lokal forekomst. Lagene ovenover Eem-lagene må derfor udgøres af nedskylsaflerjinger fra Weichsel.

De marine lag i den østlige, VSV-ØNØ-orienterede dal ligger en del højere i kote end forventet – helt op til kote +11 m. Det undersøgte marine lag i boring DGU 131.850, som ifølge Konradi er fra den øvre del af den nedre marine Holsteinserie, findes derimod mellem ca. kote -46 og -66 m i borerne ved Tornskov og Inder Bjergum ved Ribe (se Figur 7-36). Det betyder, at de daterede marine lag ligger i størrelsesordenen 50 meter højere. Hvis man ser på borerne ved Bramming, så findes der her en Holstein-lagserie, som er op til 20 m tyk og ligger fra ca. kote 0 og ned til kote -20, og som kan følges over flere kilometer. Lagserien er undersøgt af Peter Konradi, som fx i boring DGU 131.1029, hvor der er en fuld marin serie svarende til borerne ved Inder Bjergum (Figur 7-36 til -30), men hvor lagserien tilsyneladende er kondenseret til kun ca. 20 meter i Hunderup-området. Overkanten af Holsteinlagene ved Bramming svarer fint til niveauet for forekomsten af Holstein i dalen ved Gørding, om end dele af lagserien her stedvist ligger så højt som kote +11 m. Så bortset fra lokale deformationer dannet under Saale glaciationen, så ligger Holsteinaflejringerne generelt med en overkant ca. i kote 0. Dette står i kontrast til niveauet ved Ribe, hvor overkanten ligger ca. i kote -20 m, og hvor Holsteinlagene er 60 meter tykke.

Knudsen (1987) nævner, at den marine lagserie ved Esbjerg (den nedre del af Elster-Holstein-lagserien), som kan korreleres med lagserien i Ribe-området, ligger meget højt, ca. omkring kote 0, og at lagene er dislocerede. Tilsyneladende svarer denne kotemæssige placering godt med Holstein-lagene i Hunderup-området. Med andre ord, så kan der ses en væsentlig forskel i tykkelse og kotemæssig placering af Holsteinlagene i Hunderup i forhold til Ribe og Lustrup områderne. Med den kondenserede Holstein-lagserie i Hunderupområdet kunne der eventuelt være tale om en hævnings relativt i forhold til områderne mod syd i løbet af Sen Elster/Holstein.

Den østlige dal ved Gørding har en orientering, som er vinkelret på den vestlige dal og en mere begrænset dybde, og det formodes derfor, at der er tale om to forskellige dal-generationer. I dalen mod øst findes ferske Eem-lag over marine Holstein-lag, mens der i den vestlige dal kun er lag med Eem alder uden marine lag nedenunder. Der kan således indtegnes tentative tolkninger af dalenes indbyrdes relationer, hvor dalen mod vest er eroderet på tværs ned i dalen mod øst. En mulig fortsættelse af den østlige dal videre mod SSV kan ikke tolkes ud fra SkyTEM-data. Det større dalsystem, som kan ses på Figur 7-14, forventes derfor at være dannet i Saale og udgør i dag et system af dale med et overordnet SØ-NV forløb og med fyld domineret af højmodstandslag i form af primært sand og grus. Dalfyldet forventes derfor at være dannet i Saale og fyldet udgøres af grove smeltevandsaflejringer. Der er ikke fundet marine, interglaciale aflejringer andre steder i Saale-dalsystemet, hvilket taler for en vis robusthed i tolkningen på Figur 7-35. Da den østlige dal ved Gørding indeholder Holsteinaflejringer er den sandsynligvis dannet i Elster og efterfølgende udfyldt i perioden fra Sen Elster til Weichsel.

I Ribemodellen er den østlige dal ikke udskilt; det er kun dalene fra Saale, der er det. Dalen ved Gørding er ældre, og aflejringerne indgår derfor i præ-Holsteinlaget. Derfor ses kun Saale-dalen på Figur 7-35.



Figur 7-36. Korrelation mellem borerne ved Inder Bjergum (Ribe) og Tørnskov. Den øvre del af den nedre marine Holstein-serie er fremhævet med blå. Figur fra Knudsen (1987).

7.1.2.3 Saale dalfyld

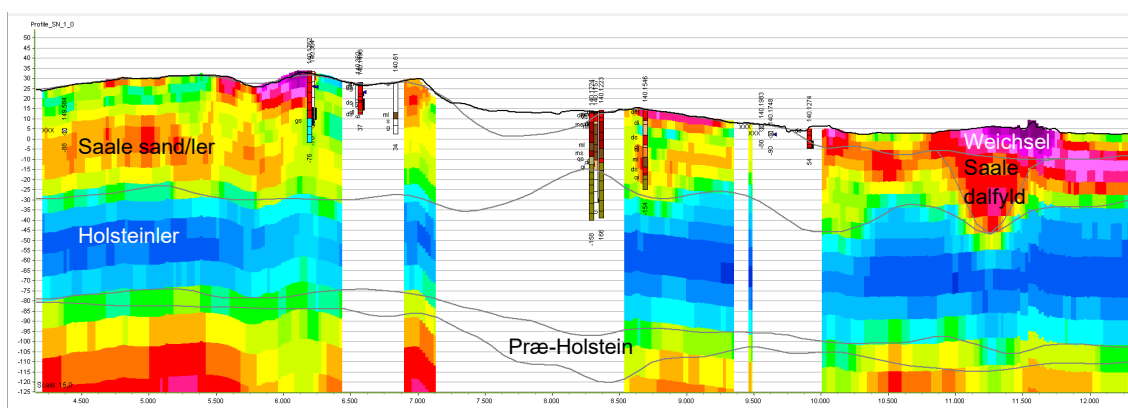
I modelområdet er der kortlagt en række dalerosioner (Figur 7-14), som langt overvejende er udfyldt med højmodstandslag, svarende til sand og grus. Stedvist er dalene eroderet ned i marine Holsteinaflejringer, hvilket fastlægger alderen til Saale. I områdets centrale og nordlige dele er dalene primært eroderet ned i bakkeøerne og flere af dem udgør et sammenhængende netværk. Alle dale i området kan derfor med stor sikkerhed henføres til Saale, men det kan ikke afvises, at erosionen af de dybeste dale er startet tidligere. Da dalfyldet fremstår ensartet og dalenes orienteringer følger nogenlunde samme trends, vurderes en Saale alder mest plausibel for alle dalene. Som det er beskrevet tidligere, peger dalenes overordnede orienteringer på en dannelse under det yngste isfremstød i Saale, Warthe, fra østlig/sydøstlig retning.

Orienteringen af dalene følger VNV-ØSØ til NNW-SSØ trends, og stedvist – specielt i Hunderupområdet – slår dalene markante knæk – tilsyneladende ved/over forkastninger - og i den sydlige del følger dalene trenden i den VNV-ØSØ-forløbende forkastningszone. Sammenhængen mellem erosion og forkastningsaktivitet er således tydelig, hvilket understøtter betragtningerne for hele det danske område beskrevet i Sandersen & Jørgensen (2022).

Ved kortlægningen af begravede dale i Danmark (begravededale.dk) er der som tidligere beskrevet kortlagt en række dale i og omkring modelområdet (Figur 4-15). Flere af disse dale blev tolket på baggrund af et sparsomt datagrundlag, og en retolkning og opdatering kan nu foretages ud fra de nye data og tolkninger i Ribe-området. Specielt den nye viden om forkastninger i området betyder, at hvor der f.eks. i den sydlige del af modelområdet (se Figur 4-15; RIB25) tidligere blev tolket en bred VNV-ØSØ-orienteret dalstruktur, er det nu tydeligt, at der i stedet er tale om en forkastningszone med kraftigt deformerede lag i forhold til lagene udenfor. I den nye SkyTEM kan det nu ses, at der i forkastningszonen findes smalle og knapt så dybe dalstrøg, som ser ud til at være styret af strukturerne i undergrunden.

7.1.2.4 Saale sand/ler

Ovenpå Holsteinaflejringerne mod vest og over de prækvartære lag i bakkekørerne haves en heterogen, sandet og leret lagpakke, som henføres til Saale.



Figur 7-37. Udsnit af den sydlige del af Profil SN_1_0.

Som det f.eks. kan ses på Figur 7-37, er Saale lagserien tydeligvis meget heterogen med vekslende, afgrænsede forekomster af høj- og lavmodstandslag. Boredata viser meget vekslende litologier, hvor der stedvist er tegn på flager. Den bølgede overflade af Holstein-aflejringerne mellem 8.000 og 11.000 m peger på glacialtektonisk deformation fra nordlig retning (se tidligere beskrivelser), og generelt bærer Saale lagserien – med undtagelse af Saale dalfyldet – præg af deformation. Denne heterogenitet har medført, at der er foretaget en statistisk voxelmodellering af Saale-lagene med henblik på en bedre gengivelse af heterogeniteterne end ville være muligt med en lagmodel; se afsnit 6.

7.1.2.5 Weichsel hedesletteaflejringer

De lavest beliggende områder udgøres af hedesletter, hvis sedimenter er helt domineret af høje modstande, der tolkes som sand og grus. Hedesletterne er fra Weichsel og er beliggende mellem bakkekørerne. Tykkelsen af hedesletteaflejringerne varierer, men da grænsen til underliggende og ældre lag af sand ikke kan bestemmes ud fra data, er den nedre grænse for sandet dårligt bestemt (se tidligere beskrivelse).

Aflejringerne i hedesletterne transporterendes mod vest med smeltevand, da Weichsel-isen stod ved Hovedopholdslinjen længere mod øst. Den smalle slette mellem Holsted Bakke mod nord og Rødding bakke mod syd har en tydelig VSV-ØNØ orientering, og SkyTEM-kortlægningen har vist, at dele af afgrænsningerne mellem bakke og slette udgøres af

forkastninger (Figur 7-24) med samme orientering som bakkeskrænten, og at lagene under sletten er nedforkastet i størrelsesordenen 20 m. Under sletten er lagserien kraftigt deformeret i en zone, der er afgrænset til slettens udbredelse. Noget tilsvarende gælder for sletten mellem Toftlund og Gram Bakke mod syd, som har en VNV-ØSØ orientering. Under denne slette ligger en forkastningszone med samme overordnede orientering. Hedesletterne er derfor dannet ved aflejring af sand og grus ovenover deformerede og nedforkastede lag. Forekomsten af en hedeslette netop her ser derfor ud til at være et resultat af bevægelser langs dybe forkastninger snarere end alene smeltevandserosion og efterfølgende aflejring.

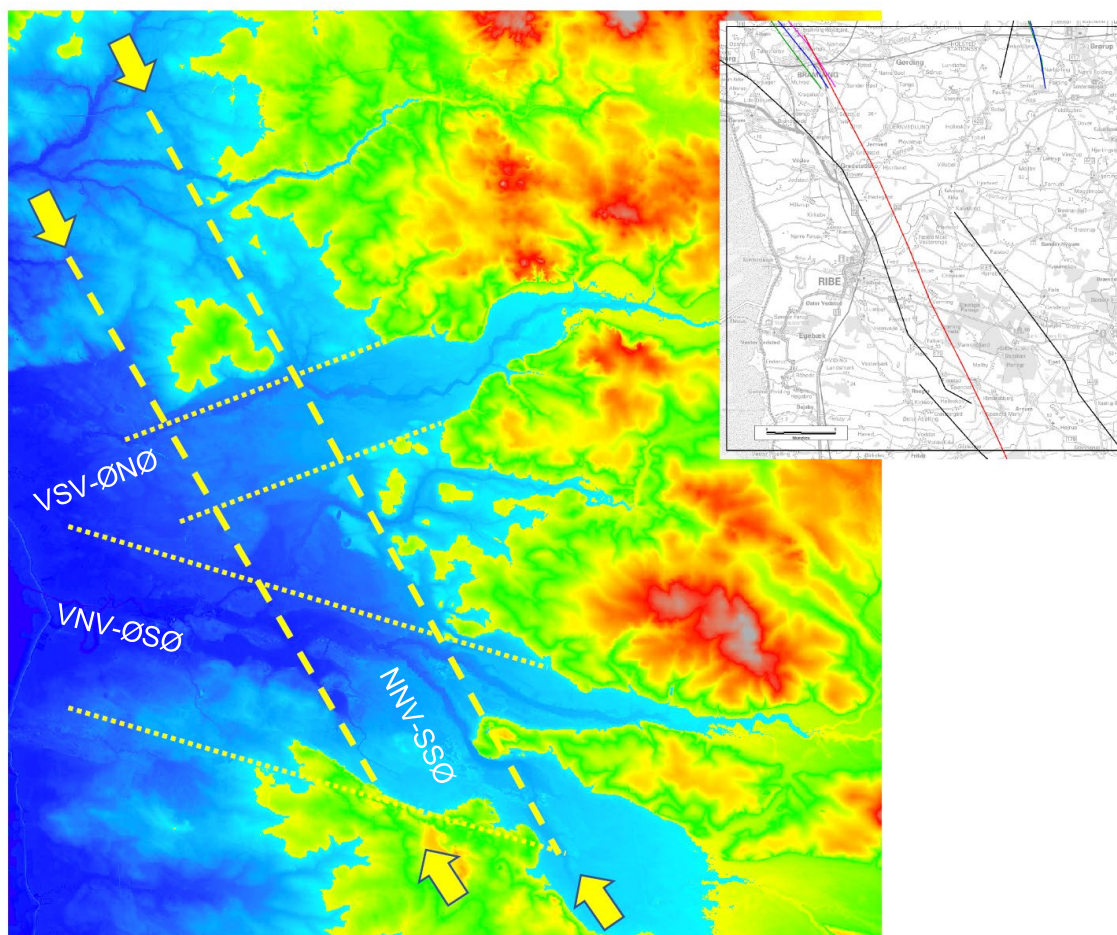
Stedvist på hedesletterne er der aflejret postglaciale ferskvandsaflejringer i form af tørv, gytje, sand og ler (se Figur 4-6). Særligt store områder ses ved Ribe og områderne nordøst for. Mod vest – udenfor modelområdet – dækkes hedesletteaflejringerne af marsken.

7.1.3 Topografi og tektonik

Som supplement til den overordnede gennemgang af landskabsformerne i den geologiske forståelsesmodel (Kapitel 4), er der udført en tolkning af topografien i udvalgte delområder. Tolkningerne fokuserer på sammenhængen mellem landskabsformer i det nuværende terræn og de dybe forkastninger. Betragtningerne er kvalitative og baserer sig på tolkninger af kurvemønstre på topografiske fladekort (digitale højdemodelldata) og profiler gennem GeoScene3D modellen, hvor kun terrænet vises. Da mange af iagttagelserne fokuserer på ganske små ændringer i hældninger eller kotemæssig placering for terrænet er samtlige profiler lavet med meget stor overhøjning (x100).

7.1.3.1 Området som helhed

Når man ser på modelområdets og tilstødende områders topografi, så springer det i øjnene, at der er mange lineamenter i form af retlinede åløb ofte med retvinklede knæk, retlinede bakkedrag samt skarpe afgrænsninger mellem bakker og sletter (se Figur 7-38). Som det er illustreret på figuren, synes tre orienteringer at være foretrukne: NNV-SSØ, VNV-ØSØ og VSV-ØNØ. På Figur 7-38 er der indsat et lille kort med tidligere kortlagte dybe forkastninger indenfor området, og her ses tegn på et sammenfald med orienteringen af NNV-SSØ-forkastningerne. Disse forkastninger rækker helt ned til Top præ-Zechstein (se tidligere beskrivelser), og ser således ud til at have haft en indflydelse på det nuværende landskab.

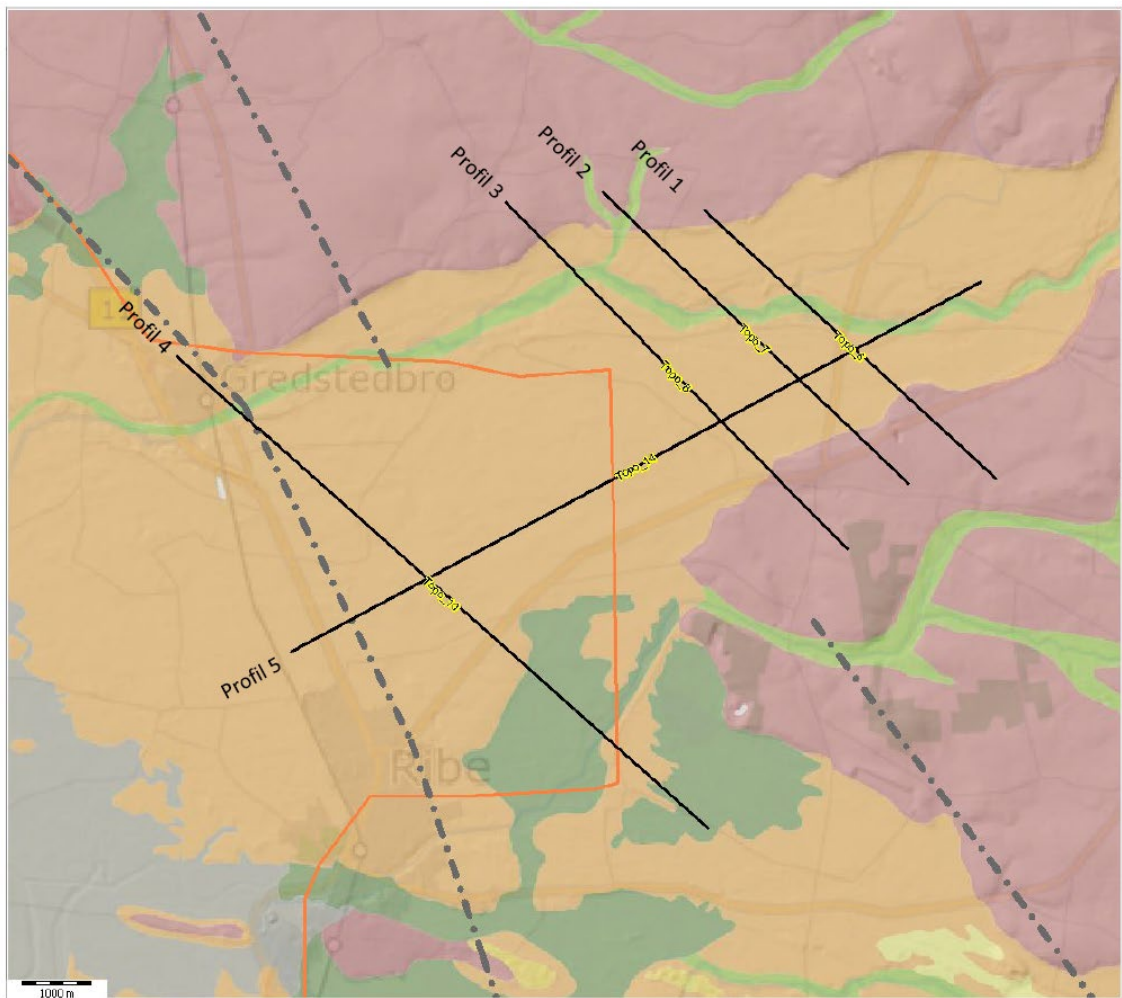


Figur 7-38. Digital højdemodel for Ribe-området. Røde/grå farver repræsenterer de højeste koter; blå de laveste. I kortudsnittet øverst til højre ses et almindeligt geodætisk kort med indtegning af tidligere kortlagte forkastninger (se Figur 4-2).

7.1.3.2 Deformationer af de nordlige hedesletter

Ser man nærmere på hedesletterne i modelområdet, er der flere former for uregelmæssigheder i topografien og i den overfladenære lagserie. Hedesletterne fra den sene del af Weichsel er dannet af sand og grus ført med af smeltevand fra isdækket, som stod ved Hovedopholdslinjen ca. 50 km længere mod øst (se tidligere beskrivelse).

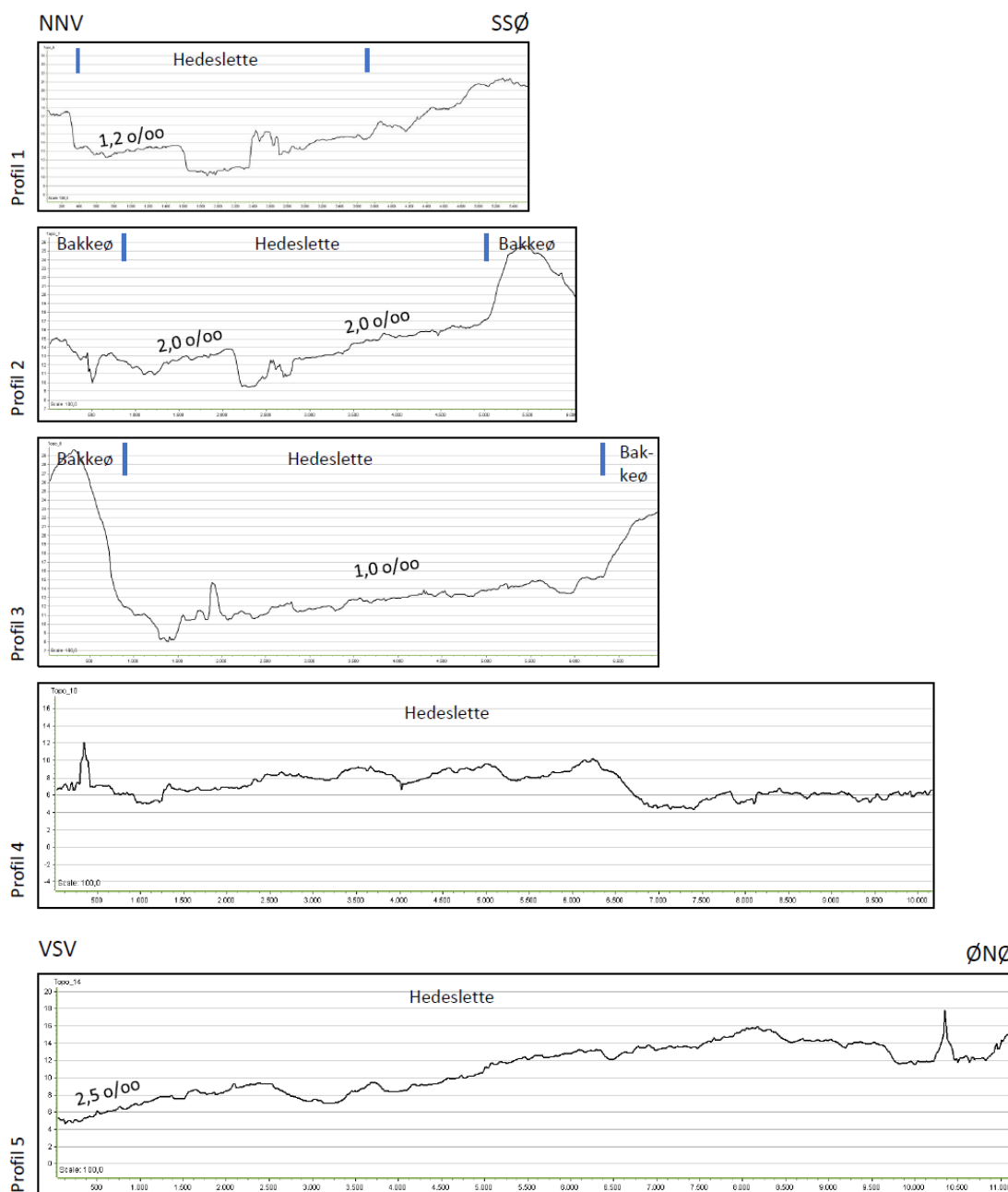
Hedesletter har normalt en svag hældning på nogle få promille – størst tættest på den tidligere isrand. De distale dele længst væk fra isranden kunne sjældent opnå hældninger større end 1,5 o/oo. Typisk vil der under dannelsen være tale om erosion og aflejring i flettede flodsystemer med meget skiftende løb, og der ville stedvist kunne dannes brede eller smalle nedskårne løb afhængig af vandføring og grundvandsstand. Erosionsrester af tidligere dele af sletten samt relativt dybt nedskårne flodløb vil kunne forventes, men sletterne vil have en ensartet hældningsretning mod de vestligt liggende, lave områder, som nu er dækket af marsk og hav. Større lavninger uden afløb i hedesletterne samt større variationer i hældninger forventes ikke. Da isen var smeltet bort i senglacial tid ophørte smeltevandstilførslen og dermed sedimentationen på sletten. De postglaciale vandløb fandt herefter deres leje – mest sandsynligt ved at overtage de senglaciale smeltevandsrender. Hedeslettens form kunne derefter reelt kun ændres ved erosion langs åløbene eller ved sandflugt.



Figur 7-39. Den nordlige hedeslette syd og øst for Grædstedbro. Baggrundskortet er et almindeligt topografisk kort med et jordartskort ovenover (1:200.000). Rødbrun farve udgør bakkeøer, orange farve hedesletten og de grønne farver de postglaciale ferskvandsaflejringer.

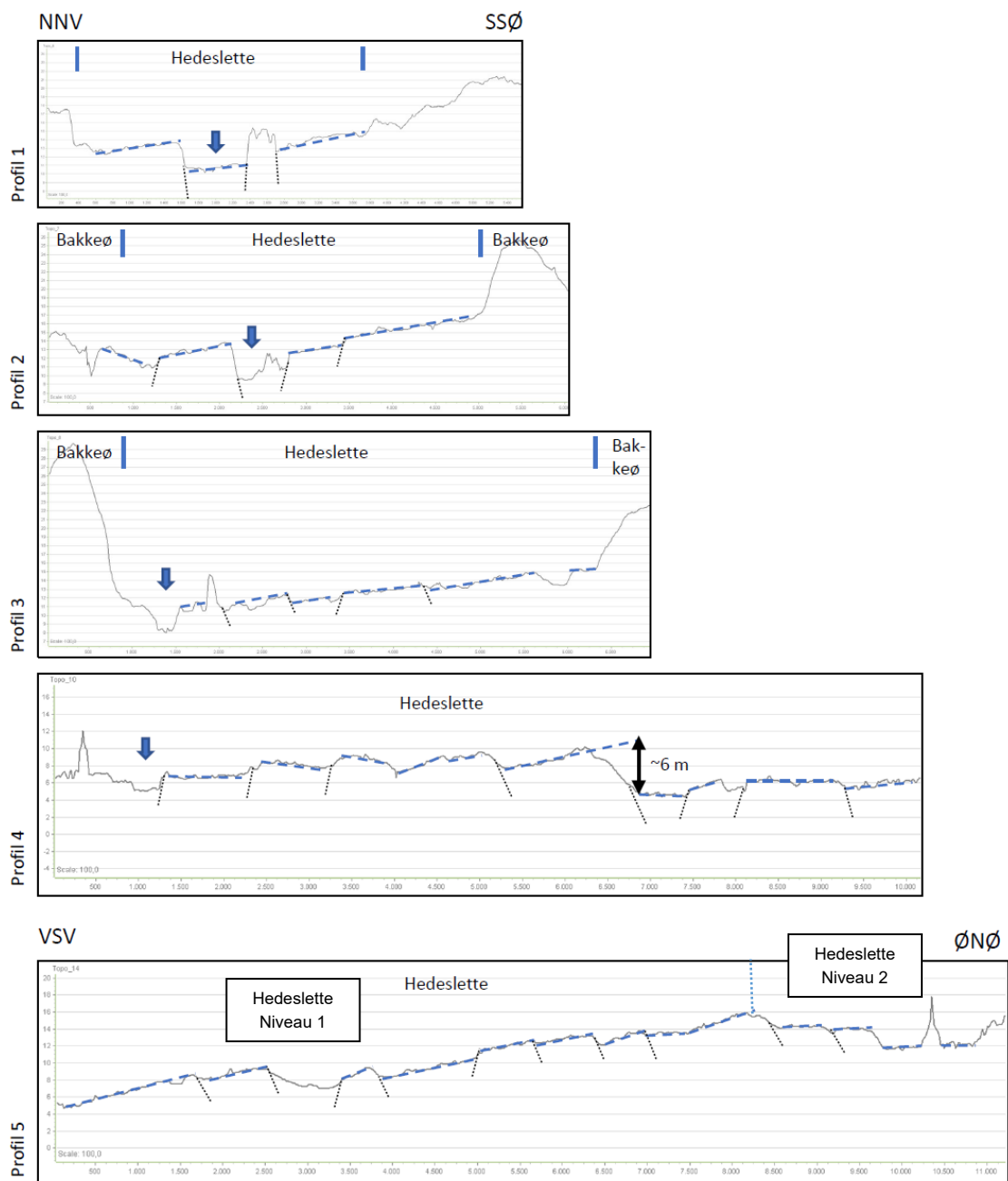
Hedesletten ved Grædstedbro (Figur 7-39) er orienteret VSV-ØNØ og er dannet mellem Holsted bakkeø og Rødding bakkeø. Smeltevandet blev tilført fra øst og løb mod vest-sydvest. Mod nord ved Grædstedbro ses det nuværende løb for Kongeåen og mod syd, øst for Ribe, ses to større, lavereliggende områder med ferskvandsaflejringer.

Figur 7-40 viser fire profiler på tværs af hedesletten (Profil 1-4) og et langs med den oprindelige strømningsretning (Profil 5). Bemærkelsesværdigt er det, at der i slettens østlige del (Profil 1 til 3) ses en markant hældning af sletten i nordlig retning. Hældningen er op til 2 o/oo, og det ses, at slettens koteniveau har flere spring. Profil 5 burde vise en kontinuert og begrænset hældning af sletten fra ØNØ mod VSV, men i stedet ses hældninger på op til 2,5 o/oo mod nord ind mod bakkeøen og tydelige kotemæssige knæk. På Figur 7-41 er slettens overflade fremhævet med blå stiplede linjer for at tydeliggøre slettens variationer, og forslag til mulige forkastninger af hedeslettens aflejringer er indtegnet med grå, prikkede streger.

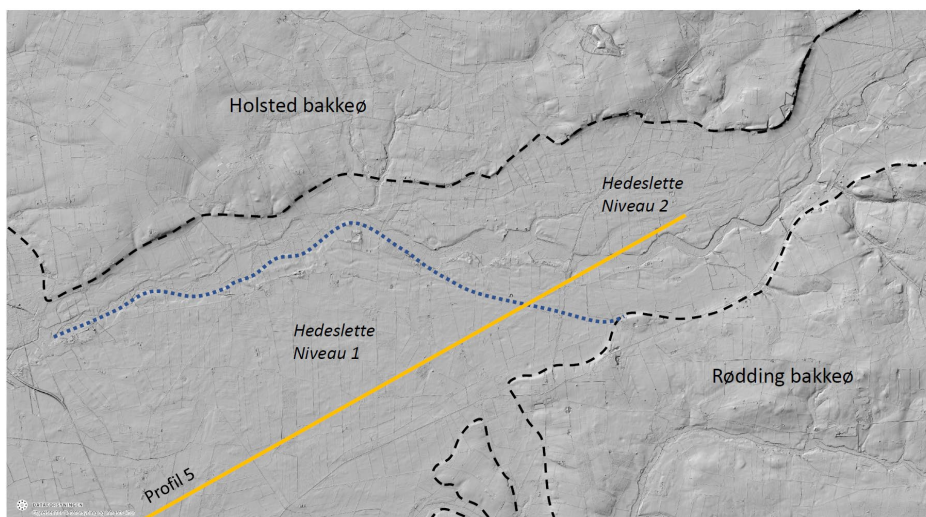


Figur 7-40. Terrænkote for den nordlige hedeslette vist langs fem profiler. For lokalisering, se Figur 7-39. Afgrænsningen mellem bakkeø og hedeslette er vist øverst på profilerne. Stedvist er slettens hældning påført i promille. Bemærk overhøjningen på x100.

Som det kan ses af figuren, ser det ud til, at hedeslettens overflade er inddelt i mindre områder med varierende hældninger, hvor disse flere steder overstiger det forventede for en distal hedeslette. De blå pile på Figur 7-41 viser den nuværende placering af Kongeåen, og det ses, at åløbet vestover gradvist rykker mod nord op mod bakkeøen og ligger ganske tæt på denne ved Grædstedbro. Dette ses tydeligt på Figur 7-39, hvor det også kan ses, at åløbet har et meget retlinet forløb ved Grædstedbro. Hedesletten ser således ud til at være kippet mod nord og åen har således i postglaciertid fundet sin plads det sted, hvor kipningen har medført, at sletten ligger lavest.

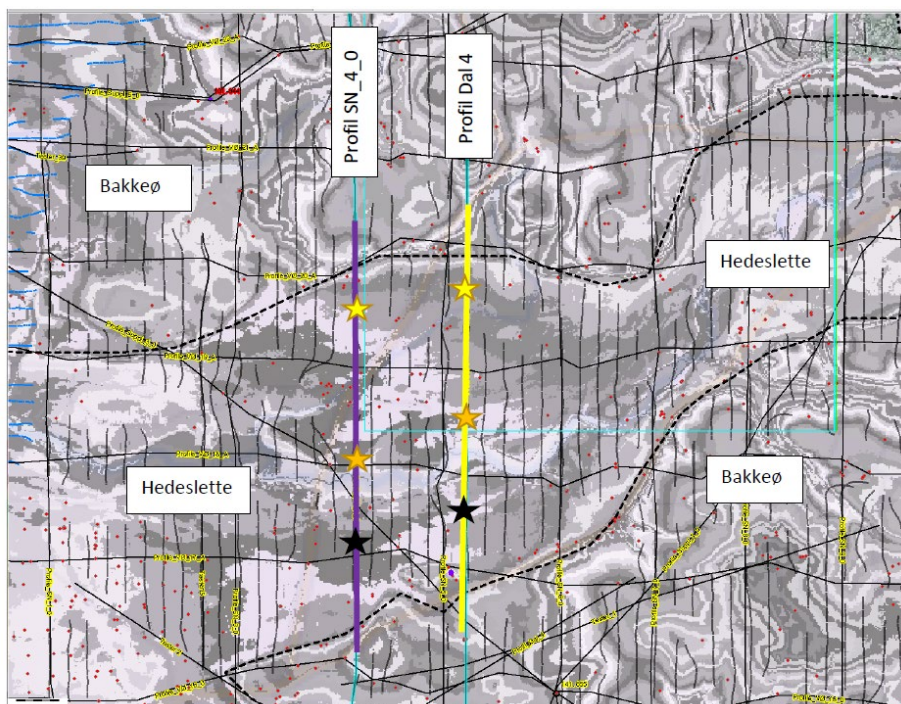


Figur 7-41. Terrænkote for den nordlige hedeslette vist langs fem profiler (se også Figur 7-40). Hedeslettens overflade er fremhævet med stiplede linjer, og der er indtegnet tentative, overfladenære forkastninger af hedesletteaflejringerne. Blå pile viser placeringen af det nuværende åløb (Kongedænen). For lokalisering, se Figur 7-39. Afgrænsningen mellem bakkeø og hedeslette er vist øverst på profilerne. Bemærk overhøjningen på x100.



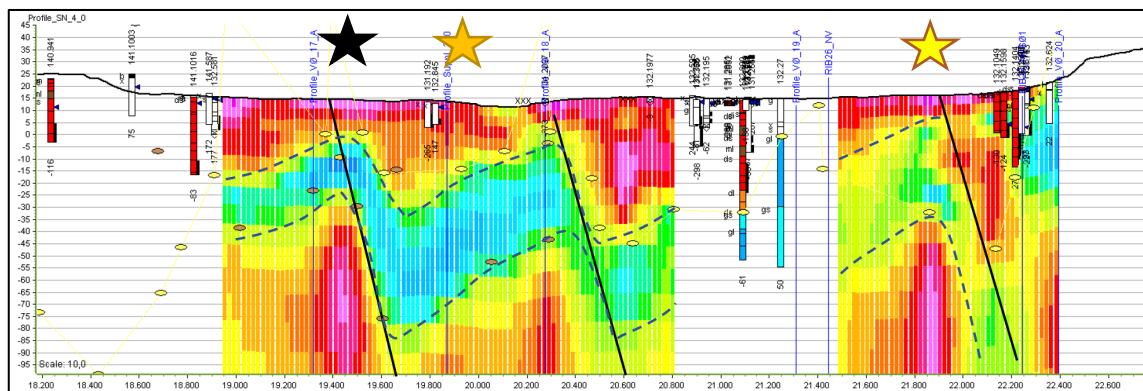
Figur 7-42. LiDAR-baseret skyggeort af den nordlige hedeslette (Dataforsyningen.dk). Orange streg angiver placering af profil 5 på Figur 7-39.

På Figur 7-41 og Figur 7-42 ses, at det nuværende terræn har to kotemæssige niveauer, hvor Niveau 1 ligger højest og hælder primært mod sydvest, mens Niveau 2 ligger en anelse lavere og hælder mod nord. Grænsen mellem de to områder er vist med en blå stiplede linje på Figur 7-42, og ved afstand 8.500 m på Profil 5 i Figur 7-41. Afstrømningen på Niveau 2 ser således ud til at have mødt en fysisk barriere ved overgangen til Niveau 1, samtidig med at hældningen på sletten i Niveau 2 er mod nord snarere end den forventede hældning mod VSV. Dette har tvunget afstrømningen mod nord udenom Niveau 1, som derved kan anses for ældre end Niveau 2.

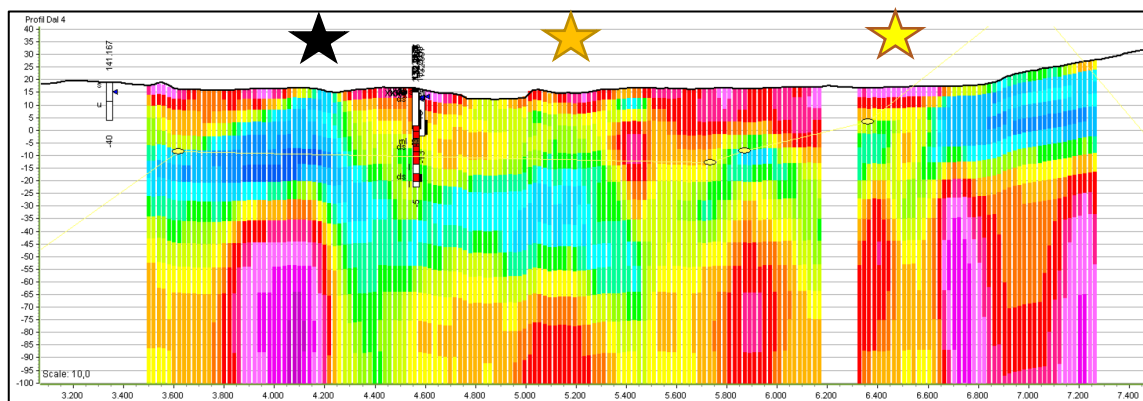


Figur 7-43. Nordøstlige hedeslette; oversigtskort. Kortet viser lokaliseringen af de to profiler i figurene herunder (lilla streg: Figur 7-44 og gul streg: Figur 7-45). På de to profiler er placeret tre stjerner, som angiver placeringen af antiklinaler i Mådegruppens overflade. Baggrundskortet viser gråtoner for topografien i området, Ribemodellens profiler (tynd sort streg), grænsen mellem bakkeø og hedeslette (sort stiplede linje).

Underneden Hedeslette Niveau 2 kan der ses en kraftigt forstyrret lagserie, som viser tegn på forkastninger, som forsætter Mådegruppen op til i størrelsesordenen 40 m (se Figur 7-43, Figur 7-44 og Figur 7-45). Forsætninger af denne størrelsesorden er usædvanlig og profilerne viser, at der ikke kan påvises tegn på forsætninger af terrænet ovenover af tilnærmelsesvist samme størrelsesorden, hvilket tydeligt viser, at de store forsætninger langs forkastningerne er ældre end Hedeslette Niveau 2. Et plot af antiklinalernes placering på profilerne med stjerner viser også, at orienteringen af antiklinalerne er ca. VSV-ØNØ (Figur 7-43), svarende til den overordnede orientering af hedesletten. Paradoksalt nok viser profilerne, at Mådegruppens lag er brudt op og kipper mod syd (Figur 7-44), mens terrænet ovenover kipper mod nord (Figur 7-41; Profil 1-3). Som det blev vist tidligere på Figur 7-24, er hedeslettens afgrænsning mod bakkeøerne også styret af forkastninger.



Figur 7-44. Udsnit af Profil_SN_4_0. Profilet viser SkyTEM og borer. Stiplet sort streg viser afgrænsningen af Mådegruppen, mens sorte linjer viser tentative forkastninger.



Figur 7-45. Udsnit af 'Profil_Dal 4' som er beliggende tæt ved SN_5_0. Profilet viser SkyTEM og borer.

På baggrund af ovenstående kan det skitseres, at hedesletten og lagene nedenunder sandsynligvis er påvirket af bevægelser i undergrunden, som har:

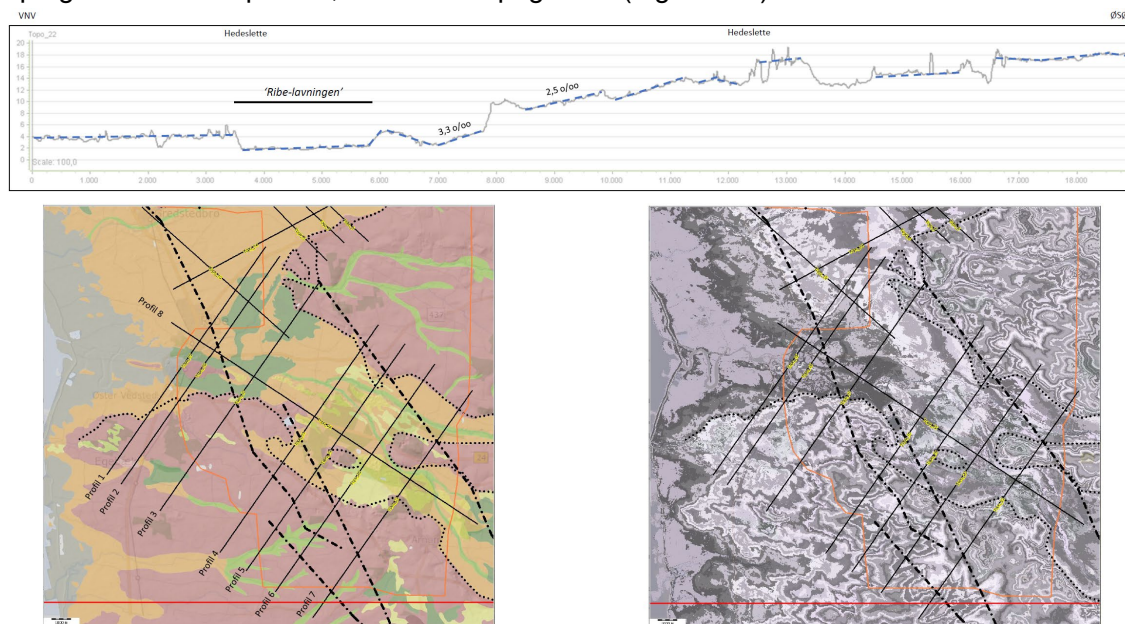
- skabt en kraftigt forkastet Mådegruppe under sletten
- haft stor indflydelse på hedeslettens udbredelse
- skabt en todeling af hedesletten (Niveau 1 og 2)
- skabt en opdeling af hedesletten i mindre områder med forskellig grad af hældning og med forskellig orientering

- tvunget den senglaciale og senere postglaciale drænering på hedesletten i nordlig retning, op mod bakkeøen

Bevægelserne, som har deformeret hedesletten er sandsynligvis sket i senglacial tid, mens forkastningsaktiviteten med de store forsætninger under og langs hedesletten er sket tidligere i kvartæret.

7.1.3.3 Deformationer af de sydlige hedesletter

På samme måde som for den nordlige hedeslettes vedkommende, er der for den sydlige optegnet en række profiler, som viser topografien (Figur 7-46).



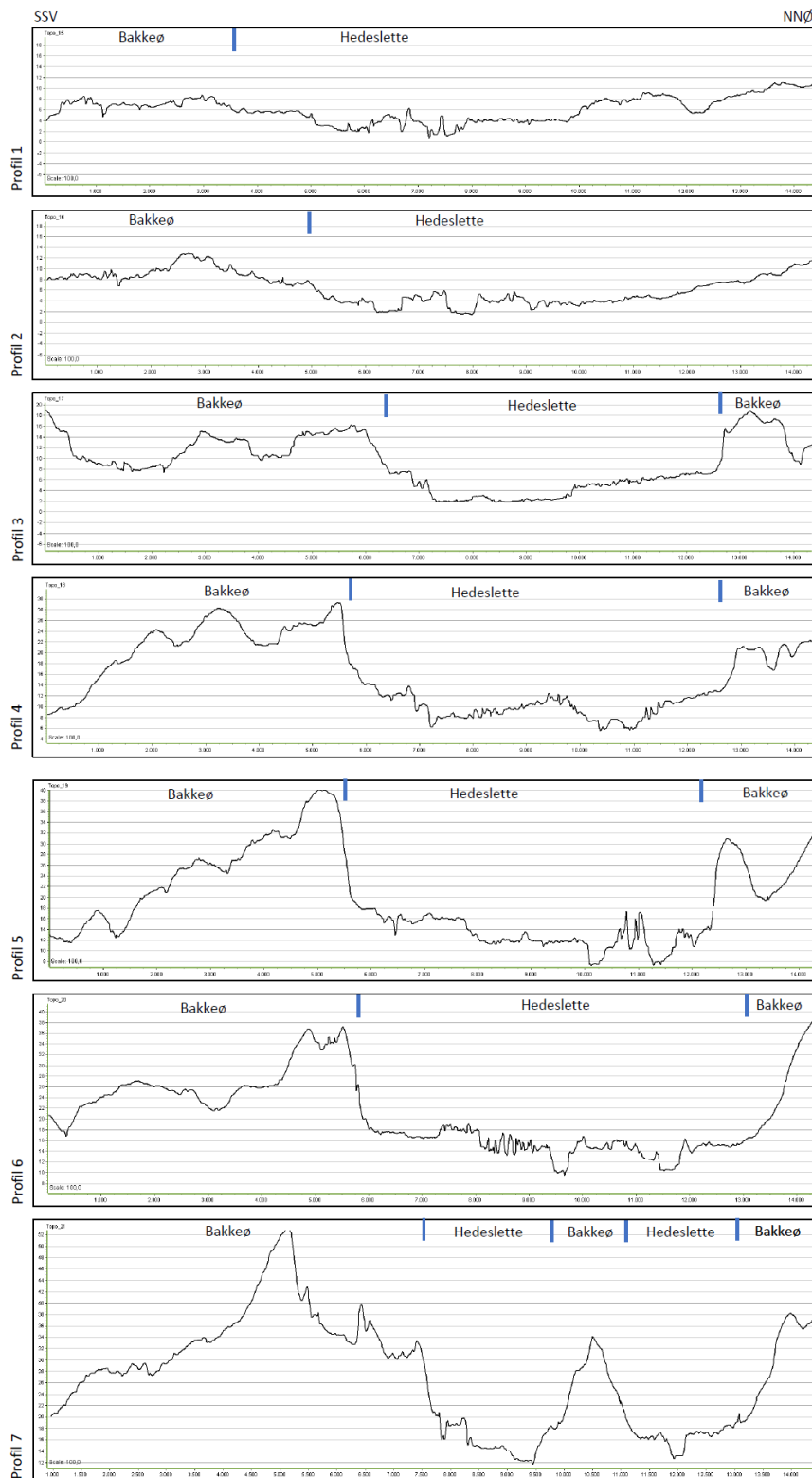
Figur 7-46. Profiler gennem den sydlige hedeslette øst og sydøst for Ribe. Øverst ses Profil 8, som forløber VNV-ØSØ, og kortene underen viser lokalisering af profilerne på baggrund af et jordartskort (til venstre) og et kort med 1-m højdekurver baseret på LiDAR data (til højre). Profil 1 til 7 ses på Figur 7-47 og Figur 7-48. Overhøjning x100.

Profil 1 til 3 (Figur 7-48) krydser den lavning omkring Ribe, som ses med grøn farve på Figur 7-46 (jordartskortet nederst til venstre; lidt over kortudsnittets midte). Denne 'Ribe-lavning' står med skarpe afgrænsninger mod den omkringliggende hedeslette. Ribe-lavningen findes ikke længere mod sydøst end Profil 3. I de lave områder omkring Ribe findes der postglaciale ferskvandsaflejringer på op til omkring 3 meters tykkelse og i byområdet findes der herover fyldaflejringer i varierende omfang (Mertz, 1977). På alle profilerne ses hedesletten at have varierende hældninger, samt markante knæk og koteforskelle.

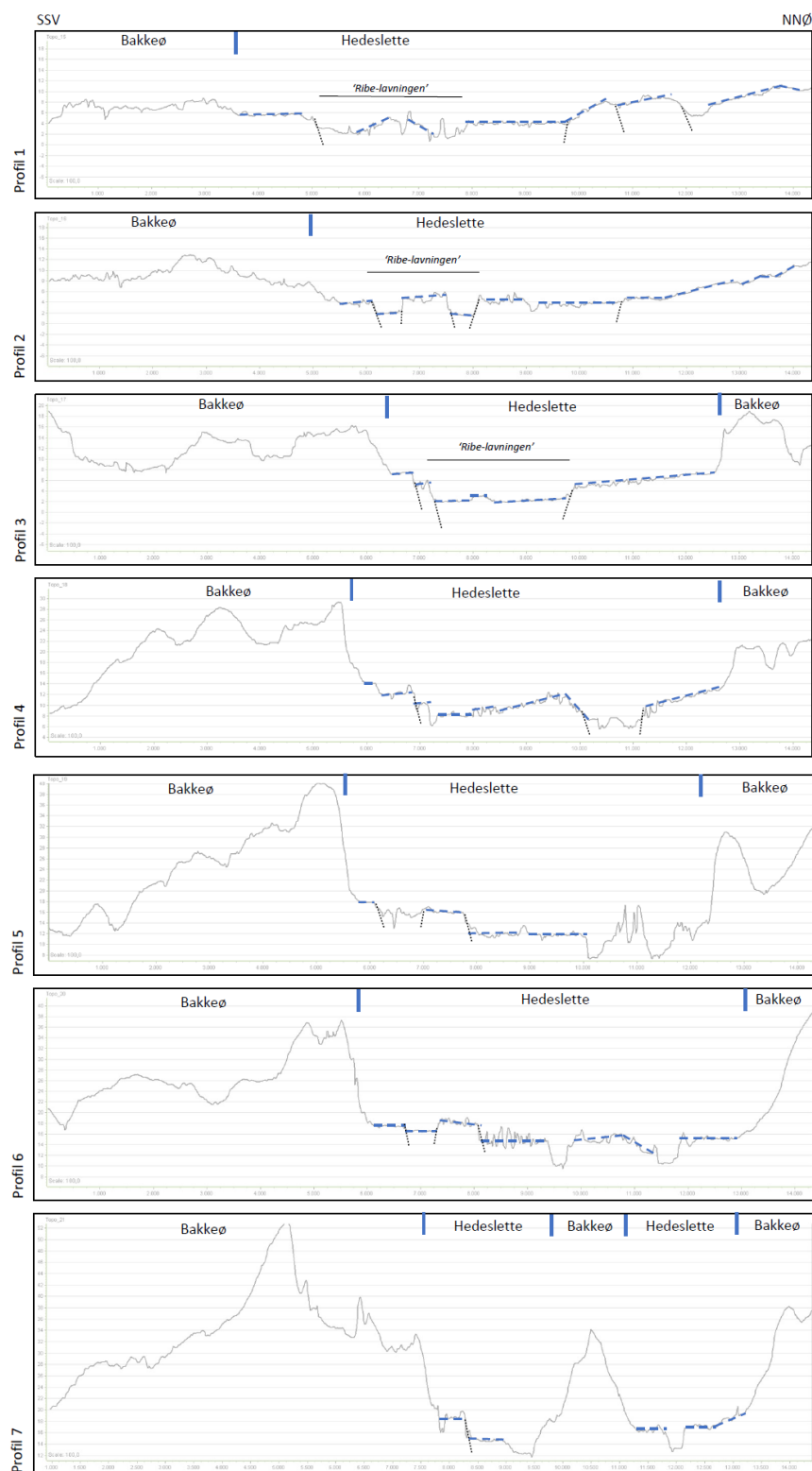
På Profil 8, som går vinkelret på de øvrige profiler (Figur 7-46), ses en meget svag hældning i de vestlige og sydøstlige dele af hedesletten (<1 o/oo), mens der herimellem ses meget store hældninger på op til >3 o/oo (mellem 7.000 og 12.000 m). I alt ses et kotefald på 10 m over de 5 km, svarende til en gennemsnitlig hældning på 2 o/oo.

På Figur 7-49 ses et SSV-NNØ-profil med SkyTEM og boredata gennem den sydlige hedeslette. Placeringen af profilet svarer ca. til den nordlige 2/3 af Profil 4 i Figur 7-48. Mellem 2.500 og 6.000 m ses en meget kompliceret lagserie, hvor et lavmodstandslag ligger i springende koter. Ifølge data er der sandsynligvis tale om den miocæne Mådegruppe, som i

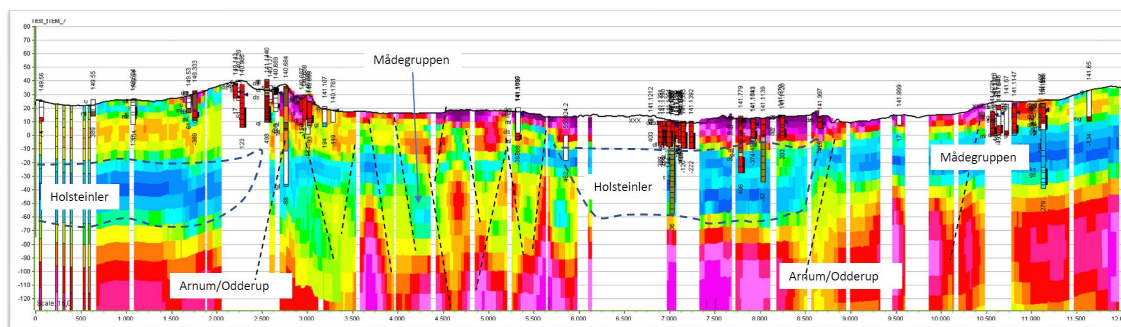
denne ca. 3½ km brede zone er kraftigt deformeret. Grænsende op til denne mod sydvest og nordøst haves Holsteinaflejringer, som kun ser ud til at være deformeret i begrænset omfang. Mod nordøst, fra 8.500 m, haves Mådegruppen, hvor der kun ses tegn på få forkastninger.



Figur 7-47. Terrænkote for den sydlige hedeslette vist langs syv profiler. For lokalisering, se Figur 7-46. Afgrænsningen mellem bakkeø og hedeslette er vist øverst på profilerne. Bemærk overhøjningen på x100.



Figur 7-48. Terrænkote for den sydlige hedeslette vist langs syv profiler (se også Figur 7-47). Hedeslettens overflade er fremhævet med stiplede linjer, og der er indtegnet tentative, overfladenære forkastninger af hedesletteaflejringerne. For lokalisering, se Figur 7-46. Afgrænsningen mellem bakkeø og hedeslette er vist øverst på profilerne. Bemærk overhøjningen på x100.

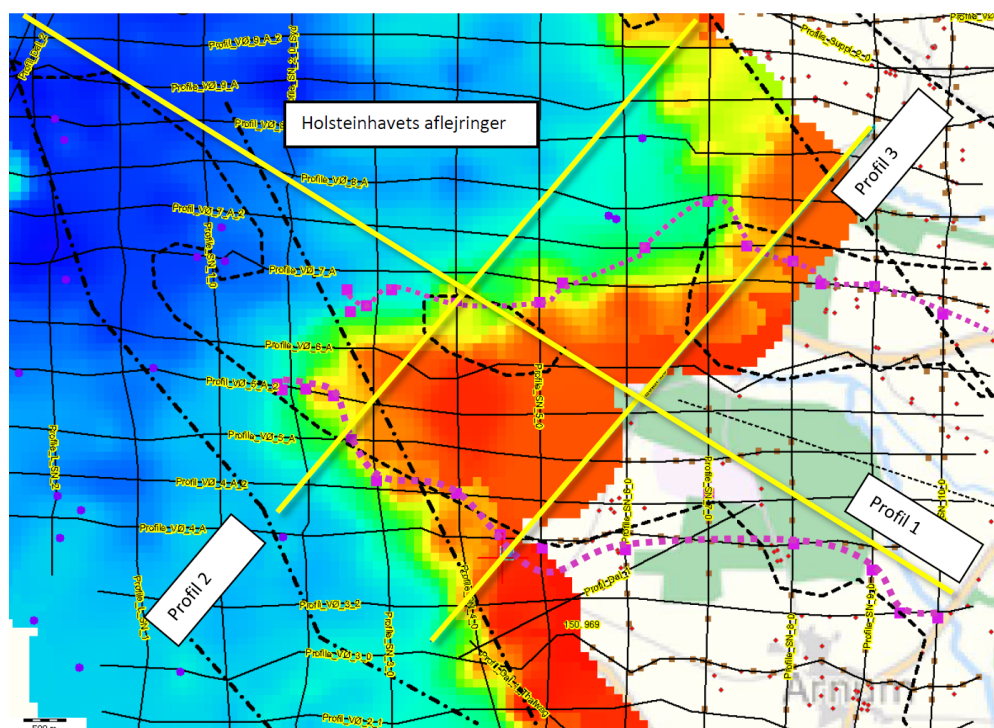
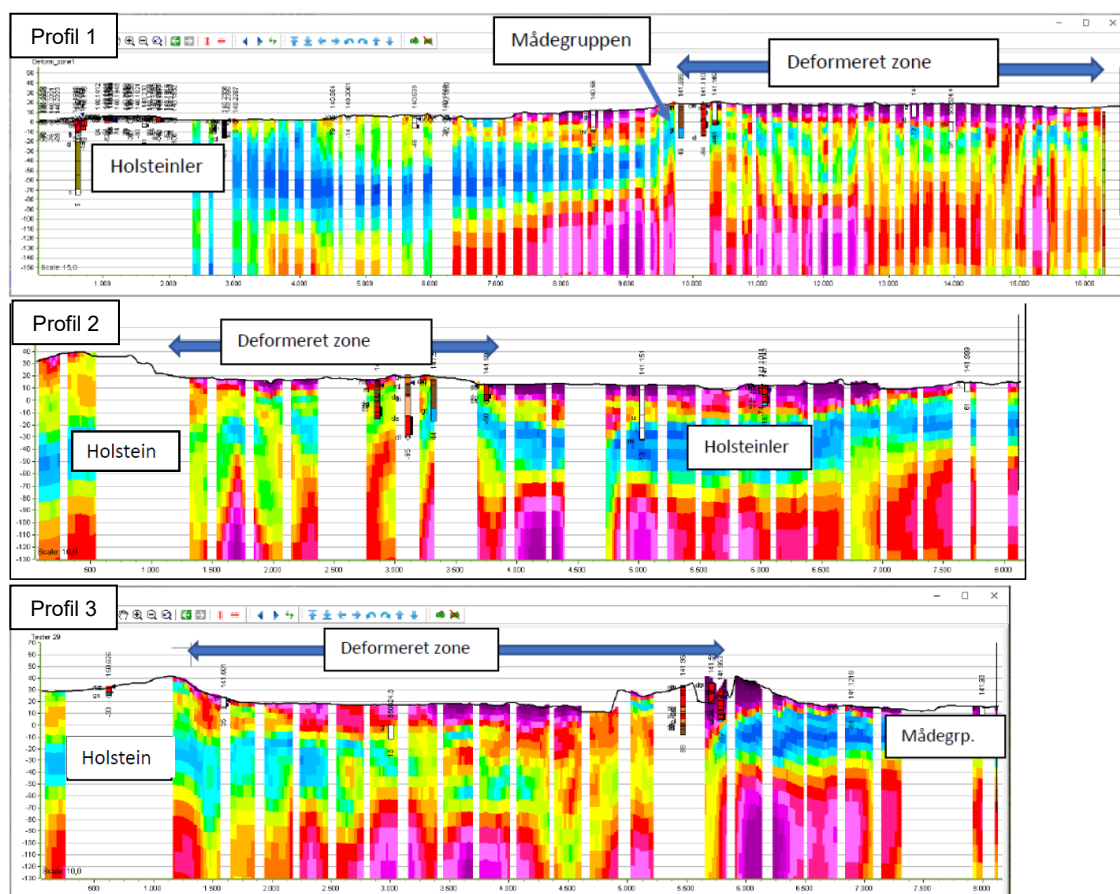


Figur 7-49. Profil SSV-NNØ gennem den sydlige hedeslette. Lokalisering af profilet svarer ca. til den nordlige 2/3 af Profil 4 (Figur 7-46).

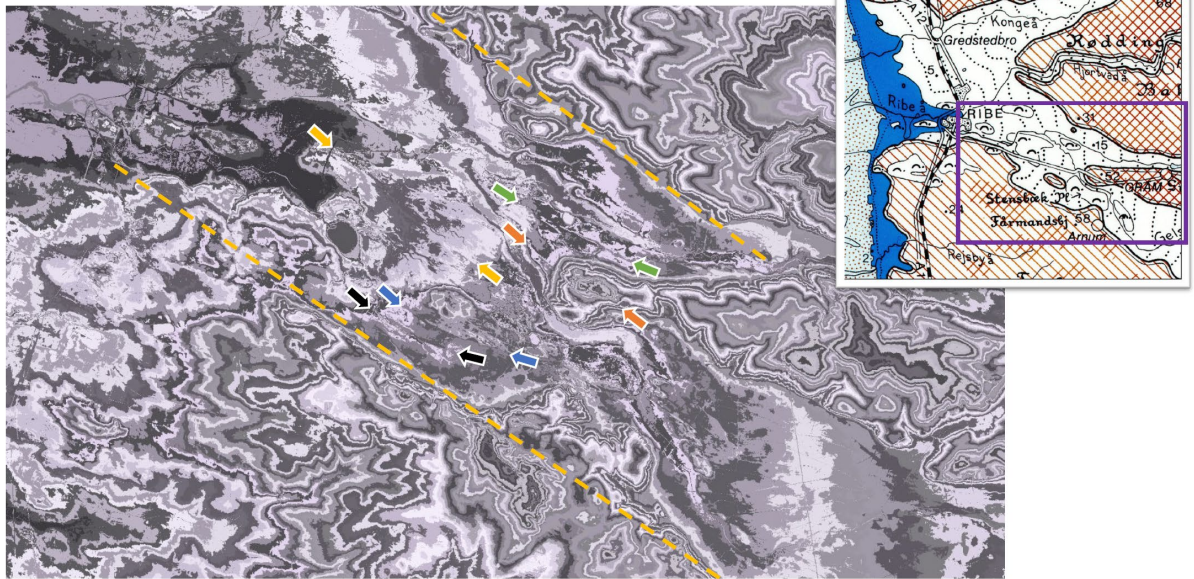
Den sydlige del af den deformerede zone ligger omtrent på grænsen mellem bakkeø og hedeslette. Afgrænsningen mod nordvest svarer omtrent til, hvor der er et skift til Holsteinhavets aflejringer. Henholdsvis sydvest og nordøst for den kraftigt deformerede zone er Mådegruppen borteoderet, og lavmodstandslagene består her af Holsteinhavets ler, som det kan ses på profilet i Figur 7-49.

Lagserien indenfor den deformerede zone viser øverst op til ca. 20 meter højmodstandsaflejringer svarende til sand/grus, hvoraf det meste tolkes som kvartært hedeslettesand; se Figur 7-50. Herunder ses en komplekst opbygget lagserie af irregulære lavmodstandslag med partier af højmodstandslag. Lavmodstandslaget er i den nordlige del af deformationszonen fx i borerne DGU 141.595, 1411.809 og 141.196 tolket som Gram- og Hoddeler (Mådegruppen). Der er ikke borer, der når det deformerede ler centralt indenfor deformationszonen, men ud fra de nævnte borer, resistivitetssignaturen og den kotemæssige placering formodes det, at der er tale om ler i Mådegruppen. Højmodstandslagene under de deformerede Mådegruppe-lag forventes at udgøre Arnum Formationen. Det forventes også, at denne del af lagserien er deformeret, men dette kan ikke udredes af resistivitetsbilledet. Mådegruppen udenfor deformationszonen ligger relativt uforstyrret, om end der stedvist ses tegn på forkastninger (Figur 7-49; til højre på profilet). Profil 2 og 3 i Figur 7-50 har samme orientering som profilet i Figur 7-49 og de viser stort set samme opbygning, men tilsyneladende er deformationszonen bredere mod sydøst end mod nordvest. Dette kan dog skyldes, at Mådegruppen er borteoderet i de nordvestlige dele, og at det derfor kan være vanskeligt at erkende eventuelle deformationer i de dybere, sandede miocæne lag, som nu ligger under Holsteinleret.

Profil 1 i Figur 7-50 viser tydeligt, at Mådegruppens udbredelse brat stopper mod nordvest; se ved afstand 9.500 m. Mod sydøst (til højre) ses tydeligt den deformerede zone med Mådegruppens lave elektriske modstande i SkyTEM, og mod nordvest (til venstre) ses Holsteinlerets lave modstande som et udbredt og tilsyneladende kun svagt deformeret lag. Grænsen mellem de to lagtyper defineres af en erosionsdiskordans og sandsynligvis en forkastning. Fra denne forkastning og nordvestover ses en stor hældning af terrænet, hvilket svarer til den kraftige hældning, der kunne ses i topografien midt på profilet i Figur 7-46.



Figur 7-50. Profiler gennem den sydligt beliggende deformationszone. Lavmodstandslagene i den deformerede zone udgøres af Mådegruppen, jævnfør data på Profil 1. Lilla punkter udgør den omtrentlige afgrænsning af den deformerede zone.



Figur 7-51. Terrænet over den sydlige forkastningszone vist som et 1-m konturkort. De to orange stiplede linjer markerer den samlede zone, hvori der ses deformationer; dog er den sydlige del kraftigst deformeret. De eksakte koter for terrænet er ikke i fokus på denne figur; det er i stedet lineamenterne i hedeslettens overflade, som her er eksemplificeret med pile udvalgte steder.

På Figur 7-51 ses et topografisk kort med 1-m iso-kurver for området ved den sydlige forkastningszone. Der ses tydelige lineamenter i overfladetopografien med orienteringer omkring VNV-ØSØ, hvoraf nogle få udvalgte er markeret med farvede pile. Disse lineamenter tolkes at være et udtryk for forkastninger, som når helt til terræn.

Forkastninger i den sydlige deformationszone ser således ud til at have:

- skabt deformationer af hedeslettens overflade
- skabt en opdeling i mindre områder med forskellig grad af hældning og med forskellig orientering
- medvirket til at definere hedeslettens udbredelse
- skabt en tre-delning af hedesletten i et højere- og et lavereliggende område med et 'stejlere' område i mellem
- skabt kraftige deformationer af Mådegruppe under hedesletten

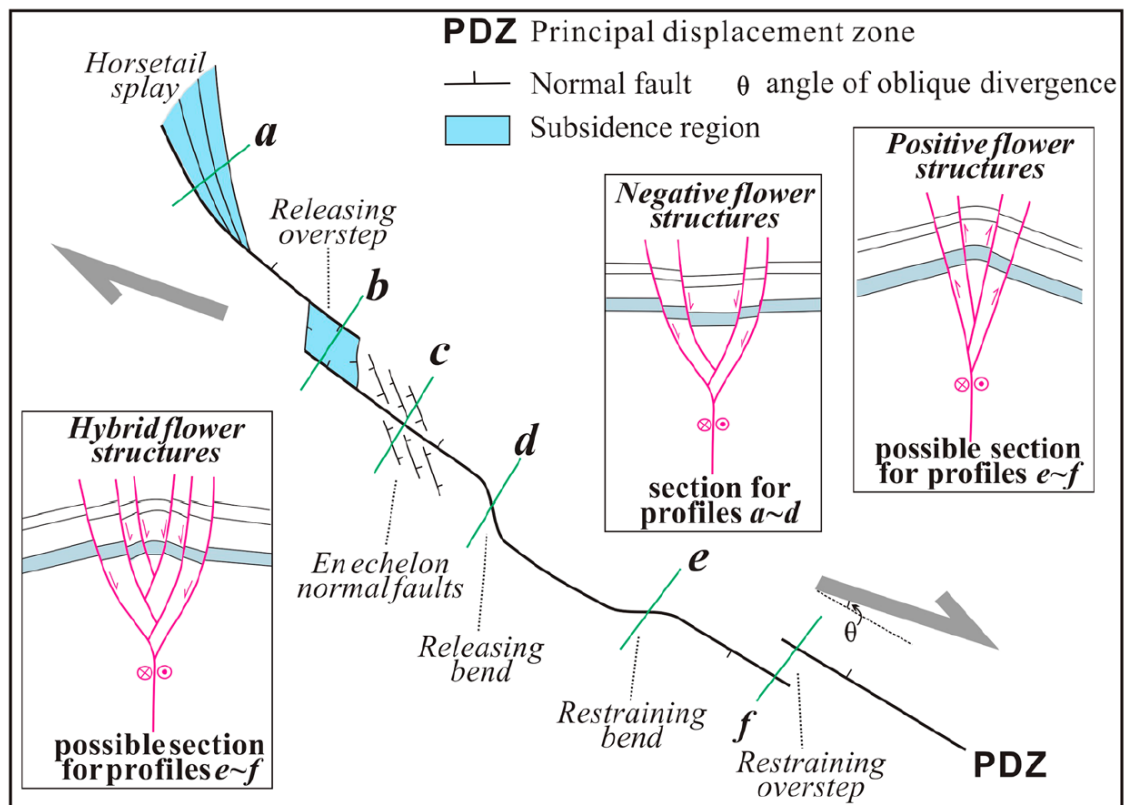
7.1.3.4 Deformationernes årsag

Som beskrevet tidligere i dette kapitel, er der flere steder tegn på, at foruden de miocæne lag, så er også de marine Holsteinlag og de ældre kvartære aflejringer nedenunder flere steder deformeret. Dog ses der en tydelig forskel i intensitet af deformationerne. Det står dog klart, at der må være tale om forskellige tektoniske hændelser, som er adskilt i tid:

- De miocæne aflejringer er stedvist kraftigt deformerede (tektonisk hændelse i sen Miocæn eller i det tidlige Kvartær)

- De ældre kvartære lag og Holsteinlagene er i mindre grad deformerede, og det er tydeligt, at størrelsen af forsætninger aftager opad i lagserien (tektonisk hændelse i den ældste del af kvartæret og/eller efter aflejringen af Holsteinlagene)
- Terrænet er tydeligvis deformeret, men kun i en meget mindre grad end lagene nedenunder (tektonisk hændelse i senglaciertid/postglaciertid)

Det er sandsynligt, at nogle af deformationerne af Holsteinlagene og de glaciale aflejringer ovenover kan være forårsaget af isbevægelser i Saale (se tidligere beskrivelser).

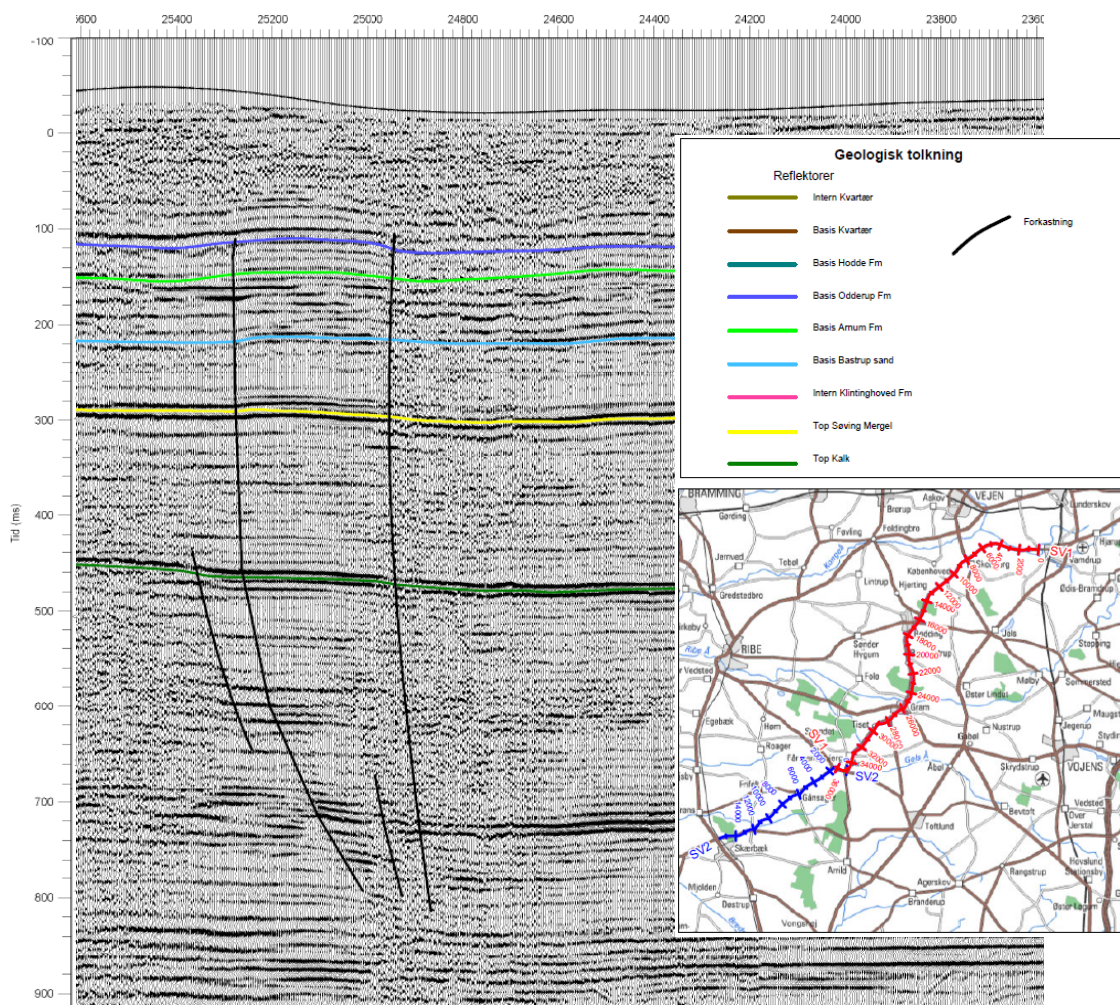


Figur 7-52. Tre typer af 'flower-strukturer' over en forkastning med sideværts bevægelse. Fra Huang & Chi-yang, (2017).

De beskrevne deformationer af og under hedesletterne skyldes sandsynligvis gentagne bevægelser langs dybe forkastninger under de deformerede områder. Den simpleste model til at forklare de store deformationer af Mådegruppe-lagene er dannelsen af såkaldte flower-strukturer. Flower-strukturer dannes ovenover dybe forkastninger ved sideværts bevægelser, og der skelnes mellem tre typer: Negative, positive og hybride former (Huang & Chi-yang, 2017; Figur 7-52). Den negative form dannes når der er tension på tværs af forkastningsplanet, hvorved der sker indsynkning ovenover, mens den positive form dannes når der er kompression, som medfører dannelse af antiformer (antiklinaler). Hybride former, som indbefatter både positive og negative former kan dannes over et ujævnt forkastningsplan, hvor kompression og tension skifter. I alle tilfælde sker den sideværts bevægelse i de dybe konsoliderede lag, mens der i de ukonsoliderede sedimenter ovenover sker en spredning af energien over et større volumen med dannelse af en række sekundære forkastninger til følge – typisk med skæve vinkler i forhold til hovedforkastningen (se Figur 7-52). Da der er tale om primært sideværts bevægelser, vil forkastningerne ikke nødvendigvis kunne ses på de

seismiske profiler fordi det vertikale offset er lille. Men på grund af at flowerstrukturen breder sig ud i de overfladenære lag, vil tensionen og kompressionen her kunne skabe store offsets.

Flowerstrukturer kan ikke med sikkerhed tolkes ud fra den tilgængelige seismik (Figur 3-7), men på de to eksempler fra området vist i Figur 7-53 og Figur 7-54 ses dybe forkastninger, som tydeligvis forsætter den miocæne lagserie. På Figur 7-53 ses der en antal forkastninger lokaliseret ved Gram, som forsætter Top Arnum med i størrelsesordenen 10 m (mørkeblå streg; 'Basis Odderup'). Lagseriens øvre dele er kompliceret opbygget og kan ikke entydigt opløses i seismikken, men der er tegn på en opbrudt lagserie. Forkastningerne ligger omtrent i den sydlige forkastningszones forlængelse mod sydøst.

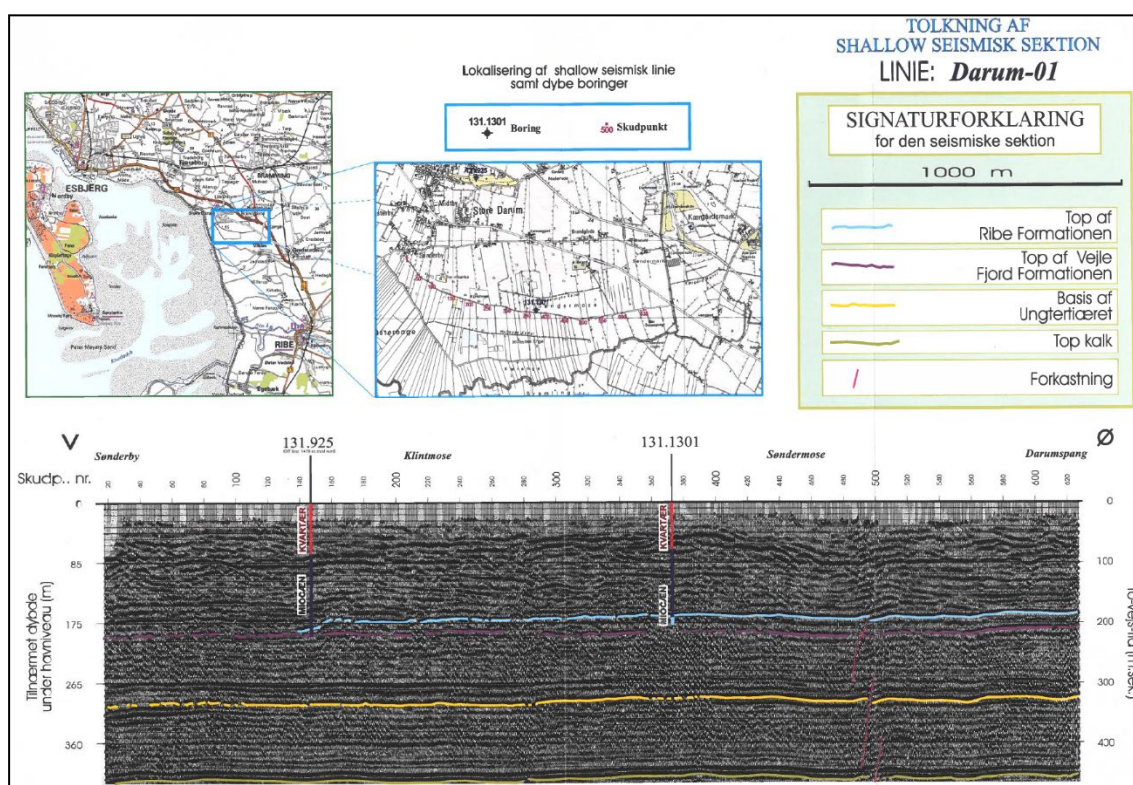


Figur 7-53. Udsnit af shallow-seismisk profil SV1 ved Gram (COWI, 2008)

Det seismiske profil i Figur 7-54 ligger lige udenfor modelområdets nordvestlige kant, og her ses der ved skudpunkt 500 en dyb forkastningszone, som rækker op i miocænet, hvor lagserien omkring er kompliceret opbygget og tilsyneladende deformeret. Forkastningen ses tydeligt selvom offset er lille, men deformationerne i lagseriens øvre dele er markante.

Ved gentagne reaktiveringer af de dybe forkastninger forventes det, at eksisterende forkastninger i de øvre dele i et vist omfang genbruges.

Reaktiveringerne af de dybe forkastninger tolkes primært at skyldes glacialt induceret forkastningsaktivitet som følge af de gentagne be- og aflastninger fra iskappernes vægt i Pleistocæn (se f.eks. Stewart et al. 2000). Den tektoniske aktivitet været størst ved afslutningen af de enkelte istider. Glacialt induceret forkastningsaktivitet har formodentlig været ganske aktiv i store dele af Danmark (Sandersen et al. 2021) og for Sønderjyllands vedkommende er der beskrevet bevægelser langs Tøndergravens dybe forkastninger med dannelse af store lavninger til følge (Sandersen & Jørgensen, 2015). Glacialt inducerede bevægelser i undergrunden ved istidernes afslutning er også beskrevet i andre områder, som tidligere har været dækket af iskapper (Steffen et al. 2021). Basalt set er der tale om en simpel mekanisme, der handler om masse-ligevægt, men som det kan ses af Ribemodellen, så er konsekvenserne for opbygningen af geologien i området ganske markant.



Figur 7-54. Shallow-seismisk profil St. Darum (Darum-01) (Friborg & Thomsen, 1999)

7.2 Usikkerhedsvurderinger

Som beskrevet tidligere er der udført en usikkerhedsvurdering på alle tolkningspunkter på de enkelte flader. Disse vurderinger ligger i GeoScene3D-projektet, men er som nævnt ikke taget i aktiv anvendelse.

En mere overordnet og kvalitativ vurdering af usikkerhederne på de geologiske tolkninger kan sammenfattes i nedenstående punkter. Disse usikkerheder er så vidt muligt indarbejdet i usikkerhedsvurderingen på de enkelte tolkningspunkter.

- **Data:**
 - Boredata: Detaljerne i boringernes litologiske beskrivelser er varierende afhængig af alder og formål med boringen. I den ene yderlighed er DAPCO-boringer og markvandingsboringer, som sjældent er grundigt beskrevet, og i den anden yderlighed er undersøgelsesboringer med hyppig prøvetagning, borehulslogs og biostratigrafiske analyser. Ved modelleringen har dette størst betydning ved korrelation af lagserien, hvor f.eks. dårligt beskrevne lag fra Holstein interglacial vil kunne forveksles med miocæne aflejringer – specielt i de områder, hvor lagserien er kompliceret opbygget og hvor lagene ligger tæt på hinanden. Generelt er interne korrelationer af den miocæne lagserie ældre end Mådegruppen vanskelige at foretage uden biostratigrafiske analyser. Specielt i de deformerede dele af lagserien kan en skelnen mellem Mådegruppen og lerlag i Arnum Formationen også være vanskelig, hvis beskrivelserne er dårlige. Her kan kombinationen med SkyTEM dog som oftest hjælpe, fordi Mådegruppens ler viser lavere elektriske modstande end leret i Arnum Formationen.
 - Geofysiske data: Resistivitetsvariationerne i de miocæne aflejringer under Mådegruppen kan ikke – eller kun vanskeligt - opløses i SkyTEM, og lagserien fremstår generelt som højmodstandslag på trods af, at boringer viser en vekslen mellem sand, silt og ler. Det er et generelt problem, som skyldes små resistivitetskontraster, vekslende litologier og kortlægningsdybden. De helt lave modstande i den dybe del af lagserien kortlægges dog bedre, men her er problemet, at der kun meget vanskeligt kan skelnes mellem palæogent ler og leret i de ældste miocæne formationer. Som nævnt i det foregående forekommer der IP-effekter i SkyTEM-data, som vanskeliggør tolkningerne – specielt i de deformerede lagserier. Indenfor modelområdet er der ældre TEM-data, som ikke har samme kvalitet som de nye data, hvilket i disse områder gør tolkningerne af lagserien mere usikre. Dette gælder specielt i områdets sydlige og nordlige dele.
- **Tolkninger af strukturer:**
 - De tektoniske deformationer af lagserien er typisk tydelige på 2D-profilerne som folder og forkastninger, der forstyrrer lagserien. Set i 3D er disse strukturer dog oftest langt mere komplicerede og reelt meget vanskelige at følge fra profil til profil. Der er derfor ikke gjort nogen forsøg på at kortlægge de enkelte forkastninger, men i stedet er der udført mere overordnede betragtninger over strukturerens orienteringer og lokalisering (se afsnit 8.10 og 9.2).
- **Tolkninger langs modelranden:**
 - Modelområdet er defineret der, hvor der er indsamlet ny SkyTEM-data, samt mindre områder med ældre TEM-data. Langs modelområdets kant sker der derfor et skift til områder med få data, hvilket betyder, at lagserien stedvist ikke kan korreleres særlig godt med områderne udenfor og at den strukturelle opbygning her ikke kan udredes i detaljer.
- **Tolkninger i datatynde områder:**
 - Tolkninger i datatynde områder er et generelt problem, da billedet af de reelle geologiske forhold vil være mangelfuldt. I disse områder kan der forekomme variationer i lagfladernes forløb, som ikke umiddelbart kan forklares ud fra den konceptuelle geologiske forståelse. Dette gælder specielt for modelområdets

nordøstlige del, hvor TEM-data udgøres af ældre kortlægninger med en dårlig datadækning.

- **Den konceptuelle geologiske model**

- Den konceptuelle geologiske model udgør en central del af den geologiske modellering, da den gengiver den overordnede geologiske forståelse af lagserie og strukturer i modelområdet. Den konceptuelle model er undervejs i projektet blevet mere detaljeret efterhånden som modelleringen er skredet frem (se Figur 5-2 og Figur 9-1). Ribemodellens usikkerhedsvurderinger tager derfor udgangspunkt i den geologiske opbygning, som den konceptuelle model viser. En teoretisk usikkerhed på for eksempel, hvorvidt Holsteinlagene findes i området eller ej, er således ikke inkluderet. Omvendt skulle nye lag, der dukker op ved fremtidige kortlægninger i området, gerne kunne indpasses i den konceptuelle models lagserie, da den konceptuelle model også gengiver en forventet kronologisk rækkefølge for lagserien. Eksempelvis er der ikke kortlagt lag fra Eem mellemistid indenfor modelområdet, men hvis det senere sker, så vil et Eem-lag kunne lægges ind mellem Saale og Weichsellagene.

8. Voxelmodellering af Saale aflejringerne

For Saale-lagene blev det i samråd med DIN Forsyning besluttet at udføre voxelmodellering, da lagene er for heterogene til at kunne opløses tilstrækkeligt med lagmodellering. Saale aflejringerne er hovedsageligt sandede (smeltevandssand og morænesand) med stedvise meget varierende mægtigheder af ler. Saale-lagene er glacialtektonisk og neotektonisk forstyrrede og aflejringerne kan derfor ikke forventes at være gennemgående indenfor modelområdet.

Voxelmodellen er modelleret med en opløsning på 100*100*5 m og er modelleret ved hjælp af en metode, som er nyudviklet af GEUS i regi af Geocenter Danmark projektet "DECODE-3D". Selve modelleringen er udført i Matlab, mens modellen efterfølgende er overført til Geoscene3D og visualiseret her. I det følgende vil vi kort beskrive hovedpunkterne i metoden (afsnit 8.1), hvordan data er indarbejdet i modelleringen (afsnit 8.2 – 8.3) og vise resultatet af modelleringen (afsnit 8.4).

8.1 Voxelmodelleringsmetoden

I projektet DECODE-3D udvikles et 3D-voxelmodellerings-framework og -værktøj med et mål om at kunne samle alle tilgængelige informationer i én model samt kvantificere usikkerheder. Der anvendes en probabilistisk metode, der er baseret på ønsket om at udtrykke alle informationer som sandsynligheder, hvilket giver mulighed for at regne på og kombinere den tilgængelige information.

I Ribe-modellen arbejder vi med to litologiske klasser bestående af en sand-klasse (grovkornet materiale – altid symboliseret med gul farve) og en ler-klasse (finkornet materiale - altid symboliseret med brun farve). Vores information beskrives ved sandsynlighedsfordeling i hver celle, dvs. som en sandsynlighed af hhv. sand- eller ler-klassen.

De forskellige informationskilder skal dermed oversættes til sandsynlighed for de litologiske klasser. Nogle typer af information er direkte information om modelparametrene, f.eks. litologiske beskrivelser fra borer. Resistivitetsmodeller fra TEM data er derimod ikke direkte litologi-information, men siger indirekte noget om litologien. For de indirekte data skal der defineres en sammenhæng mellem data og de litologiske klasser for at kunne lave oversættelsen til sandsynligheder. I det probabilistiske framework behøver denne ikke at være entydig, da dette igen beskrives som sandsynlighedsfordelinger, og kommer til udtryk som usikkerhed i modellen. I oversættelsen indgår også en usikkerhed, der er forbundet med informationerne, dvs. hvor sikker vi er på et stykke information. Her anvendes der forskellige kvalitetsklasser med definerede sandsynlighedsfordelinger, der repræsenterer usikkerheden.

Når data er beskrevet som sandsynligheder, bliver disse sandsynligheder bredt ud i rummet i en geologisk informeret interpolation. Baseret på den generelle viden om geologien i et område eller en geologisk enhed, vælges der afstande i alle tre dimensioner, der definerer, hvor langt givne data har indflydelse på modellen.

Når data fra hver datakilde individuelt er blevet spredt ud i rummet i et fælles voxelgrid, kan informationen kombineres i en fælles sandsynlighedsfordeling, der inddrager al information. Når information kommer fra uafhængige kilder, kan den fælles sandsynlighedsfordeling beregnes vha. ligning 8.1:

$$P(lith)_{joint} = \frac{\prod_{i=1}^n P_i(lith)}{k}$$

Hvor $P(lith)_{joint}$ er den fælles sandsynlighedsfordeling for litologi klasserne, $P_i(lith)$ er sandsynlighedsfordelingerne af den i 'te datakilde og k er en normaliseringskonstant.

Modellen består herefter af sandsynlighedsfordelinger for hver celle i det modellerede område. Herefter kan den mest sandsynlige model (MODE-modellen) findes, og der beregnes en entropi som et simpelt mål for usikkerheden. I Ribe-modellen anvendes MODE-modellen som den endelige model.

I Ribe-området er der anvendt data fra boringer i Jupiter-databasen, de tilgængelige SkyTEM data (både nye og eksisterede data fra Gerda databasen), samt topografi og top- og bundflader for Saale-lagserien, der definerer udbredelsen af den modellerede enhed. Valg og håndtering af både oversættelse af data til sandsynlighed og udbredelsen i rummet varierer fra datakilde til datakilde. I de følgende afsnit beskrives disse valg og deres betydning for modellen. Placeringen af boringer og TEM-data vises på Figur 8-1. Boringerne på figuren er alle de boringer, der har en tilstrækkelig kvalitet til at indgå i beregningen (MST kvalitet større eller lig med 2). Boringer er markeret med Pink, hvor celler med TEM-data er markeret med grøn, rød, sort, gul og blå, baseret på hvilke resistivitetsmodeller data tilhører.

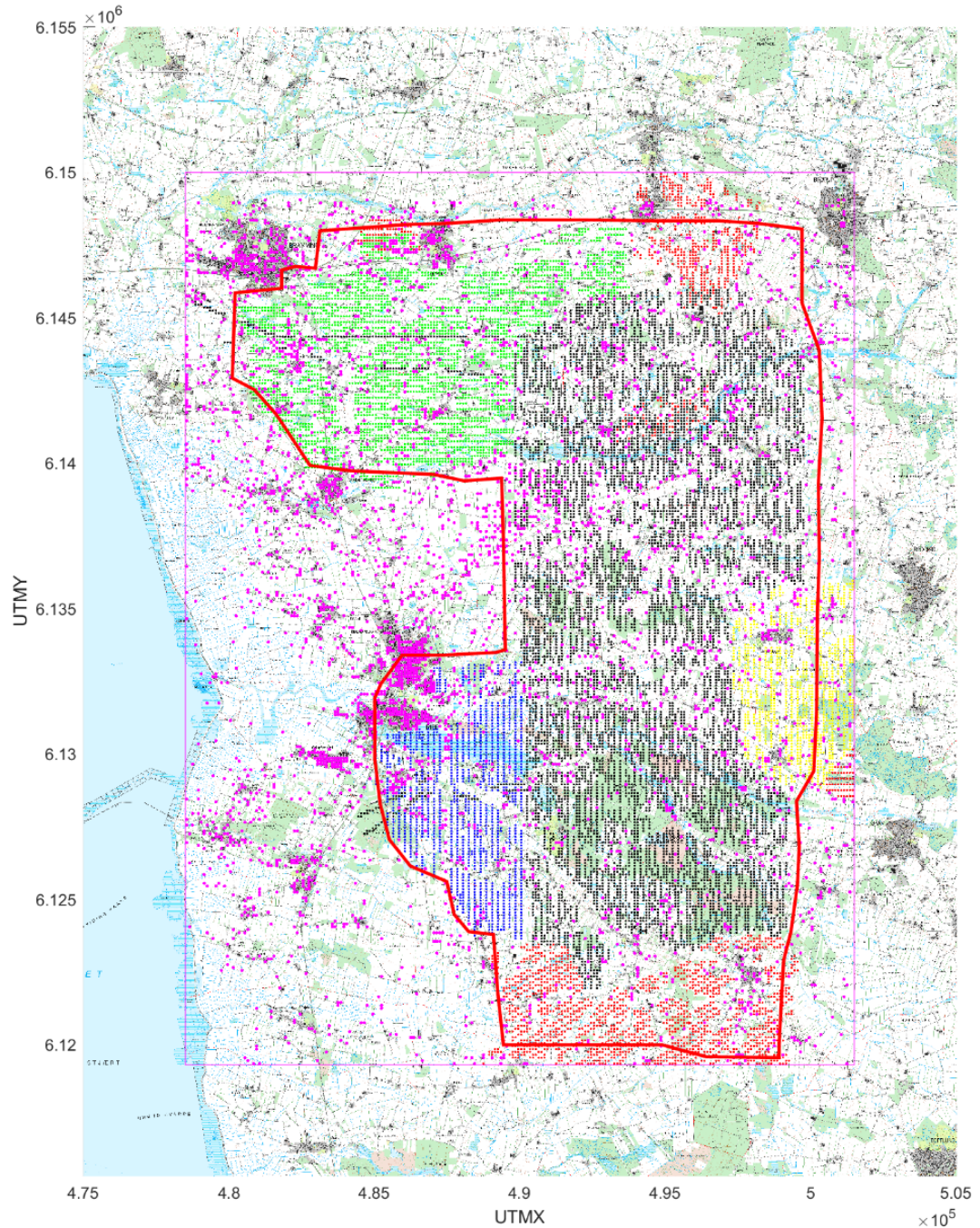
8.2 Boringsinformation

Information fra boringer stammer fra de digitalt tilgængelige data fra Jupiter databasen. Her findes litologiske beskrivelser, samt information om filtersætning, vandproduktion og prøvepumpninger. Al denne information er sammen med kvaliteten af boringerne inddraget og oversat til sandsynligheder for henholdsvis sand- og ler-klasserne.

8.2.1 Litologisk information fra boringer

Litologisk information fra boringsbeskrivelser er den eneste såkaldte direkte datakilde i området. Da det er direkte observationer af litologi, kan det direkte oversættes til sandsynligheder ved at gruppere de litologiske beskrivelser i de to litologi klasser, der modelleres. Gruppering er lavet baseret på, om litologien er forventet at være vandførende eller ej, samt at gruppering også passer i forbindelse med resistivitetsfordelingerne (se afsnit 8.3.1). DGU-symbolerne tilhørende hver klasse er listet i Tabel 6. Det kan ses, at alle moræneaflejringer er klassificeret som tilhørende den lerede litologiklasse. Dette valg er taget, da der i resistiviteten ikke kan skelnes mellem fine (ML, MI) og grove (MS, MG, MZ) moræne aflejringer (Se afsnit 8.3.1).

Tabellen indeholder alle de DGU-symboler, der eksisterer i borer i området. Flere litologier er endt i den uklassificerede kategori, da disse ikke har relevans for Saale enheden, og ikke tydeligt passer i nogen kategori. Den uklassificerede kategori indeholder også beskrivelser, der er noteret som ukendte eller manglede. Denne klasse er implementeret med uniform sandsynlighedsfordeling, hvilket betyder at disse klasser ikke bidrager med information.



Figur 8-1. Kort over data anvendt i voxel modelleringen. Borer er markeret med pink, hvor celler med TEM sonderinger er markeret med grøn, rød, sort, gul, og blå, repræsenterende hvert individuelt survey/inversion (se også Figur 3-3, der også angiver navne på SkyTEM surveys).

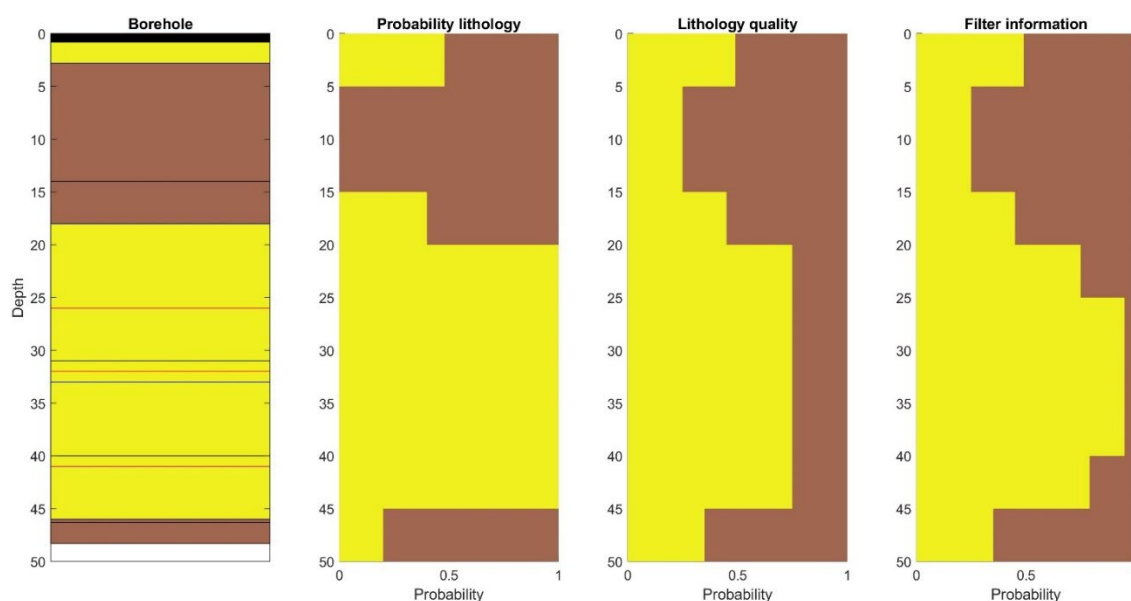
Tabel 6. DGU-symboler og deres fordeling i de to litologigrupper.

Litologi klasse	DGU-symboler	Klasse sandsynligheder
Sand klasse	TG, TS, YG, YS, Z, DG, DS, DZ, ES, FS, G, HG, HS, IS, QG, QS, S, GS, KG, KS, Q, VS	P_sand=1 P_ler=0
Ler klasse	TL, YI, DI, DL, DV, FL, FV, HI, HL, HV, IV, L, QI, QL, QV, I, II, IL, TI, CJ, CL, GI, GL, J, LL, NJ, PL, SL, VI, WL, ML, MI, MS, MG, MZ, MV, FT, FP, IP, IT, P, T, TP, HP, C, QP, QT, GC, GP	P_sand=0 P_ler=1
Uklassificeret	BK, CW, K, NW, SK, TK	P_sand=0.5 P_ler=0.5

Herefter bliver boringer diskretiseret til at følge det definerede voxelgrid, dvs. at det skal håndteres, når laggrænser skærer midt i en celle. Først bliver der korrigeret for variationer i kote mellem voxelgrid og boringer, hvorefter sandsynlighedsfordelingen bliver beregnet som et vægtet gennemsnit af de litologi-klasser, der er beskrevet i intervallet af en celle. Sandsynligheden for en litologi-klasse i en celle kan derfor udregnes simpelt efter formlen

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n s * d_i}{dz}$$

Hvor P_i er sandsynlighed for den i 'te litologi klasse, s er classesandsynligheden (se Tabel 6) for den i 'te litologi klasse, d_i er tykkelsen af den i 'te litologi klasse i cellen og dz er tykkelsen af cellen. Et eksempel på en boring (Figur 8-2A), der er blevet diskretiseret til 5 meter tykke celler kan ses i Figur 8-2B. Det kan ses, hvordan sandsynlighedsfordelingerne i cellerne følger, hvor stor en del af cellen, der er dækket af hver litologi.



Figur 8-2. Eksempel på oversættelsen af en boring. Fra venstre mod højre ses a) den klassificerede boring, b) borings-informationen diskretiseret til 5 meter grid celler, c) sandsynlighedsfordeling efter tilføjet usikkerhed baseret på boreringskvalitet (boringen tilhører boreringsrating klasse 5), d) sandsynlighedsfordeling, hvor også filtre er inkluderet som information.

De litologiske beskrivelser i borerne tildeles også en "kvalitetskategori" med udgangspunkt i Miljøstyrelsens boringsrating (Tabel 7). Her bruges 8 kategorier fra 0 - 7, hvor 7 er det bedste. Boringerne er vægtet, så de bedste borer bliver tildelt mest vægt. Vægtningen er implementeret som den maksimale sandsynlighed for en litologi. Det skal forstås ved, at når der kun er én litologi-klasse i en celle, vil dennes sandsynlighed blive begrænset til den maksimale sandsynlighedsværdi. Tilsvarende normalisering sker for alle sandsynlighedsfordelinger.

Tabel 7. Beskrivelse af Miljøstyrelsens boringsrating efter Damsgaard & Makwarth (2020) og de tilskrevne sandsynligheder for kategorierne.

Kvalitetskategori	Beskrivelse	Maksimal sandsynlighed
0	Lito-beskrivelse er null eller indeholder kun brønd eller ukendt	ses bort fra
1	- Ingen brugbar lito-beskrivelse - Der findes borerapport eller jordprøv. Rapport	ses bort fra
2	- DAPCO boring - Der er en litologisk beskrivelse	0,55
3	- Der er en litologisk beskrivelse - Ikke DAPCO	0,65
4	2 karakterer i beskrivelse - Ikke DAPCO	0,7
5	- Drilldepth beskrives (antaget bundpejl) 2 karakterer i beskrivelse - Ikke DAPCO	0,75
6	- Prøve per 2m 2 karakterer i beskrivelse - Ikke DAPCO	0,9
7	- Boremetode er sneglebor - Prøve per 2m 2 karakterer i beskrivelse - Ikke DAPCO	0,95

Effekten af at inddrage boringskvaliteten ses i ændringen fra Figur 8-2 B til Figur 8-2 C, hvor dette skridt udføres. Boringen i eksemplet tilhører kategori 5, hvorfor celler med en sandsynlighed på 1 falder til den vægtede sandsynlighed på 0,75.

8.2.2 Hydrologisk information fra borer

I Ribe-området stødte vi på den udfordring, at der stedvis er fejlbeskrevne litologier i nogle borer, hvor der er filtersætning og endda i nogle tilfælde bliver hentet vand. Vi besluttede derfor at inkludere information om, hvorvidt borerne er filtersatte – samt om de giver/har givet vand – og i disse tilfælde lade informationen øge sandsynligheden for at intervallet tilhører sandklassen. Filter informationerne modificerer sandsynlighederne fra litologi-informationerne og indgår ikke som en individuel datakilde. Informationen om filtre er

implementeret på to forskellige måder baseret på, om filtret bliver kategoriseret som indikativ eller kategoriseres som sikker.

Tabel 8. Tabel, der beskriver kategoriseringen af formål og anvendelse af filtre.

kategori	Symbol og beskrivelse
Vandboring	'V' – Vandforsyningsboring/nødvandsforsyningsboring/sænkning 'VA' – Afværgeboring 'VD' - Dambrug 'VH' - Havevanding 'VM' - Markvanding/gartneri 'VI' - Industri/procesvand/kølevand/skylning/grusvaskning 'VP' - Privat husholdning/drikkevand udenfor vandværk 'VR' - Reserve/Nødvands boring 'VS' - Permanent grundvandssænkning 'VV' - Vandværksboring 'RE' - Vandindvindingsboring, reserve
Mulig vandrelateret boring	'M' -Moniteringsboring/overvågning/kontrol/GRUMO 'I' -Vandinjektion/nedpumpningsboring 'P' - Pejleboring 'U' - Undersøgelsesboring/videnskabelig boring/prøveboring 'S' - Sløjfet/opgivet/opfyldt boring 'C' - Brønd 'PA' - Passiv - taget ud af drift midlertidigt
Ikke vandboring	'A' - Andet 'B' - Brunkulsboring 'F' - Frederikshavn gasboring 'D' - Dydbeboring/dybhulsproduktion 'G' -Geoteknisk boring/midlertidig grundvandssænkning 'J' - Jordvarme op/ned 'K' - Ikke oplyst 'KO' - Kompensationsboring 'L' -Forureningsbor./miljøundersøg./lossepl./affaldsdep./lov 214 'LO' - Oprensning 'LS' - Sparging/termisk oprensning (ilttingsbor.) 'MG' - Marin geoteknisk 'N' - Ingen anvendelse 'O' -Overboret/uddybnet og derfor erstattet af nyt DGU nr. 'R' -Råstofboring f.eks. efter ler/sand/bentonit 'H' - Shot hole/Dapco ' ' – Tomt felt

Filtrenes betydning og kvalitet bliver vurderet i 11 kategorier baseret på kriterier om borehullets anvendelse, relation til et vandindvindingsanlæg og tilgængelige pumpetest (Tabel 9). Disse kategorier bestemmer både hvorvidt filter information beskrives som sikker eller indikativ, og hvilken sandsynlighed de tilskrives. Først vurderes hvorvidt en borings anvendelse eller formål er relateret til vandindvinding. Jupiter har 34 mulige anvendelser eller formål for en boring, samt den mulighed, at feltet er tomt. Formålene er blevet opdelt i 3 generelle kategorier, nemlig om en boring er en *vandproduktionsboring*, *mulig vandrelateret* eller *ikke en vandboring*. Fordelingen af Jupiter beskrivelser i de tre kategorier kan ses i Tabel 8.

Det næste mål for, om et filter indikerer sandklassen er, hvorvidt filtret er registreret til et vandindvindingsanlæg. Vores antagelse er, at en boring brugt til vandindvinding med ret stor sandsynlighed er filtersat i en enhed med høj hydraulisk ledningsevne, og dermed i den sandede litologiklasse.

Sidste stykke information er pumpetest, der kan give en direkte indikation på den hydrauliske ledningsevne. I filtre hvor pumpetest er registreret i Jupiter, udregnes en hydrauliske ledningsevne efter formelen:

$$K = (Q/S)/d$$

Hvor K er den hydrauliske ledningsevne, Q er oppumpningsraten, S er sænkningen og d er længden på filteret. Hvis den estimerede hydrauliske ledningsevne er over 10^{-5} m/s , ses dette som en stærk indikator for at filteret er sat i sandklassen. I det tilfælde, hvor der er udført flere pumpetests på forskellige tidspunkter, tages et gennemsnit af de estimerede hydrauliske ledningsevner. Denne information er til forskel fra de andre filterinformationer kvantitativ. Derfor vælger vi, at alle pumpetests, der indikerer sand, ses som stærk information.

Al information samles i 11 kategorier, der tilskrives en sandsynlighedsfordeling for sand- og lerklasserne og dermed definerer implementeringsmetoden. Kategorierne, hvordan de er bestemt og deres implementering i modelleringen ses i Tabel 9.

For filtre, der kategoriseres som indikativ, baseres udregningen af sandsynlighed i en celle på et vægtet gennemsnit af litologiinformation og filterinformation. I tilfælde, hvor litologi sandsynligheden for sandklassen er mindre end den tildelte sandsynlighed for filteret, tager filter sandsynligheden "pladsen" i filter intervallet. Sandsynligheden regnes som

$$P_{ny} = (d_{filter} * P_{filter} + (dz - d_{filter}) * P_{lith})/dz$$

Hvor P_{ny} er den nye sandsynlighed for en klasse i cellen, d_{filter} er højden af filtret i cellen, dz er højden af cellen, og P_{lith} sandsynligheden for klassen baseret på litologien. Det betyder, at den tilskrevne sandsynlighedsfordeling for filtret bliver sandsynlighedsfordelingen i cellen, hvis filtret dækker hele cellen.

Tabel 9. Beskrivelse af de 11 filterkategorier, den vægtede sandsynlighed tildelt hver filter kategori og typen af implementering.

Kvalitetskategorien (sandsynlighed sand kategori)	Beskrivelse	Implementering Kommentar
0	"Ikke vand" borehul - Ingen vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Ses bort fra
1 (0.6)	"Mulig vand relateret" borehul - Ingen vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Indikativ
2 (0.65)	"ikke vand" borehul - vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Indikativ Typisk manglende information om formål og anvendelse
3 (0.75)	" Mulig vand relateret" borehul - Vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Indikativ Ofte relateret til sløjfede borehuller.
4 (0.8)	"Vand" borehul - Ingen vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Indikativ
5 (0.8)	"Vand" borehul - vandindvinding registeret - Ingen pumpe information	Sikkert filter – overtager celler
6	"Ikke vand" eller "vand relateret" borehul - Ingen vandindvinding registeret $K < 10^{-5}$	Ses bort fra
7 (0.5)	"Ikke vand" eller " Mulig vand relateret" borehul - vandindvinding registeret $K < 10^{-5}$	Indikativ Implementeret med en sandsynlighed på 0.5, dvs. at den kun påvirker usikkerheden, og kan ikke ændre mode modellen
8 (0.5)	"Vand" borehul - Ingen vandindvinding registeret $K < 10^{-5}$	Indikativ Implementeret med en sandsynlighed på 0.5, dvs. at den kun påvirker usikkerheden, og kan ikke ændre mode modellen
9 (0.75)	"Vand" borehul - vandindvinding registeret $K < 10^{-5}$	Indikativ
10 (0.95)	$K > 10^{-5}$	Sikkert filter – overtager celler

'Sikre filtre' er implementeret, så de kan overtage en celle de kun delvist dækker. I celler hvor et 'sikkert filter' dækker mindre end 20 % af cellens højde, inkluderes informationerne som for et indikativt filter.

I eksemplet fra borehullet i Figur 8-2 ses effekten af to sikre filtre. Boringen er filtersat fra 26-41 m dybde. Boringen har en prøvepumpning, der giver en estimeret hydraulisk ledningsevne på $2,20 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ og dermed ender filtret i kategori 10. Det kan ses i Figur 8-2 D, hvordan de celler, der er dækket af filteret, viser større sandsynligheder for sand, når filterinformationen bliver tilføjet (forskellen fra Figur 8-2 C til Figur 8-2 D).

8.2.3 Udbredelse af information i rummet

8.2.3.1 Flere boringer i én celle

Med en cellestørrelse på 100 X 100 X 5 meter, ses det flere steder, at der ligger flere boringer indenfor samme celle. Individuelle boringer betragtes som uafhængige data, og derfor beregnes en fælles sandsynlighedsfordeling (ligning 7.1) i hver celle baseret på alle tilgængelige boringer, efter at de er blevet oversat til sandsynligheder, som beskrevet ovenfor.

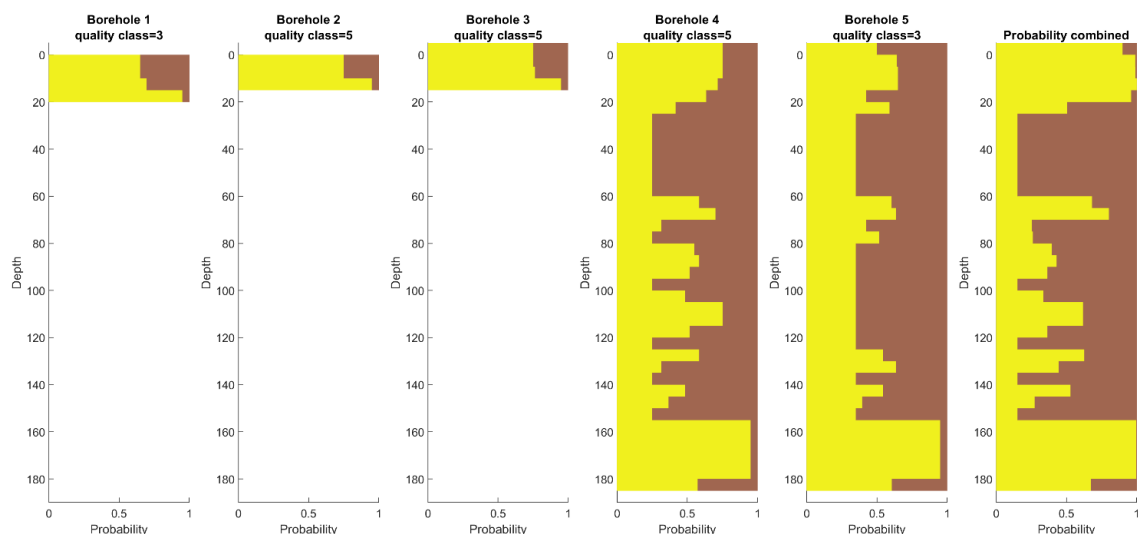
Figur 8-3 viser et eksempel, hvor 5 boringer ligger i samme søjle af celler, dvs. samme x,y koordinat. Boringerne har meget varierende dybde og kvalitet, hvilket f.eks. kan ses ved at sammenligne boringerne 1, 2 og 3, der alle kun har beskrevet den sandede klasse. Forskellene i sandsynlighedsfordelingerne skyldes kvalitetsvurderingerne, som er angivet over hver boring i figuren. Man kan også sammenligne boringerne 4 og 5 og observere de samme strukturer i litologien, men med meget mindre variationer i sandsynlighed, da kvaliteten af boringerne er meget forskellige. Når de fælles sandsynligheder beregnes, ses hvordan usikkerheden bliver meget mindre, når de 5 borehuller er konsistente. De første 15 meter hvor alle boringer beskriver den sandede kategori som den mest sandsynlige, bliver dette interval med stor sikkerhed beskrevet som sand.

Ved at beskrive boringer på denne måde, bliver alle boringer taget i betragtning, i de relevante dybder og med den relevante kvalitetsvurdering. I eksemplet i Figur 8-3 ses det, hvorledes de bedst vurderede boringer præger sandsynlighederne mest, og hvordan usikkerheden falder, når data er konsistente.

8.2.3.2 Udbredelse af boringsinformation

Efter informationerne indenfor en søjle af celler (en stak af celler med samme x,y koordinat) er kombineret, bredes denne information ud i rummet. Her anvender vi først de rumlige afgrænsninger af området, dvs. top og bund af Saale enheden. Data klippes, så kun data i Saale enheden anvendes, hvilket i praksis gøres ved, at celler der ligger udenfor det relevante interval får tildelt uniforme sandsynlighedsfordelinger. Herefter benyttes en udbredningsmatrice til hver celle med boringsinformation (omtalt som datacelle). Denne 3D matrice beskriver området i rummet som en given datacelle påvirker, og med hvilken vægt den påvirker en celle i rummet. I et lokalt grid omkring boringen regnes nu vægtede gennemsnit af

sandsynlighederne for litologi-klasserne, hvor vægten er givet af udbredelsesmatricen. Til de vægtede gennemsnit tilskrives herefter en stigende usikkerhed med afstanden til den nærmeste datacelle. Denne tottrinsløsning er valgt, da løsningen giver en kontinuert aftagende sandsynlighed væk fra data, uden artefakter skabt af overlappende udbredelsesmatricer.



Figur 8-3. Eksempel på 5 borer der ligger indenfor celler med samme x,y koordinater. Boringerne har meget forskellige dybder og kvalitet. Den kombinerede sandsynlighedsfordeling ses til højre i figuren. Her ses det, at borningsinformationen bliver meget sikker, når data er konsistente.

Denne procedure udføres for hver søjle af celler med borningsinformation. Boringerne ses som uafhængige og det fulde borningsgrid beregnes ved at gange de udbredte informationer for alle de lokale borningsgrids sammen efter ligning 8.1. I bilag 1 beskrives de valgte udbredelsesmatricer og rumlige afhængigheder.

8.3 SkyTEM information

Information fra den tilgængelige TEM data bliver behandlet lidt anderledes end borningsinformationerne. TEM informationen består af resistivetsmodeller, der skal oversættes til sandsynlighedsfordelinger for litologiklasserne. Litologi og resistivitet har en sammenhæng, men koblingen afhænger af flere parametre (f.eks. porevandets salinitet, temperatur, mineralogi, m.m.), og kan ikke laves som en simpel, unik oversættelse. Med viden om resistiviteten af forskellige litologier i det relevante område (afsnit 8.3.1) konstruerer vi en sandsynlighedsbaseret sammenhæng. Herefter kan resistivetsmodellerne oversættes til sandsynlighedsfordelinger og informationerne kan udbredes i rummet efter et koncept, der minder om borerne.

Resistivetsmodellen er opnået med en Spatially Constrained Inversion (SCI), der betyder, at individuelle 1D resistivetsmodeller ikke kan ses som uafhængige data. Denne viden ændrer på, hvordan vi behandler data, samt at vi inddrager viden om sensitivetsfunktioner og usikkerheder for TEM data.

8.3.1 Resistivitet-litologi forhold for Saale aflejringerne

Ud fra geofysiske borehulsresistivitetslogs er der sammenstillet resistivitet-litologi-forhold for grupper af sammenlignelige aflejringer fra områder med bakkeøer. Resistivitetslogs er udtrukket fra GERDA databasen, mens litologi stammer fra Jupiters jordprøvebeskrivelser. Boringer, hvor der både er optaget en resistivitetslog og foretaget prøvebeskrivelse af en geolog, indgår i analysen. Resistivitetsmålinger tæt ved laggrænser sorteres fra for dels at undgå "overgangsresistiviteter" og usikkerheder i bestemmelsen af dybden, så der kan opnås den mest korrekte bestemmelse af formationsmodstanden. Data brugt i analysen er kompileret i foråret 2021.

Indenfor Ribe-modelområdet findes ca. 10 boringer med resistivitetslogs. Da det for de fleste af litologi-grupperne vil føre til for få målinger, opdeles resistivitet-litologi-analysen i to dele, så der laves resistivitetsfordelinger lokalt i Ribe-model området og regionalt, hvor resistivitetslog er medtaget fra tilstødende områder med sammenlignelige geologiske aflejringsforhold og porevandets elektriske modstande. Sammenlignelige geologiske aflejringsforhold er udpeget ved brug af det geomorfologiske kort, således at der overvejende medtages resistivitetslogs beliggende på ældre moræneflader (bakkeøer), se Figur 8-4. Områder med sammenlignelig porevandsmodstand er udpeget på et kort baseret på målinger af porevandets elektriske modstand fra vandprøver indrapporteret til Jupiter (Figur 8-5). Alle porevandsmodstandsmålinger frem til 2015 indgår i fremstilling af kortet. Når de tilstødende sammenlignelige områder medtages, vil der indgå resistivitet-litologi-data fra 51 boringer, hvoraf flertallet er målt med normallog. Siden datasættet er kompileret i 2021, er der rapporteret 11 resistivitetslogs til GERDA, men indtil videre er der kun jordprøvebeskrivelser fra én af disse boringer, så de nye data er ikke medtaget i analysen.

Ud fra tidligere gruppering af litologi er grupperne listet i Tabel 10 brugt til kompilering af resistivitetsfordelinger i Figur 8-6.

Tabel 10. Grupperinger af litologi, som anvendes til resistivitetsfordelinger

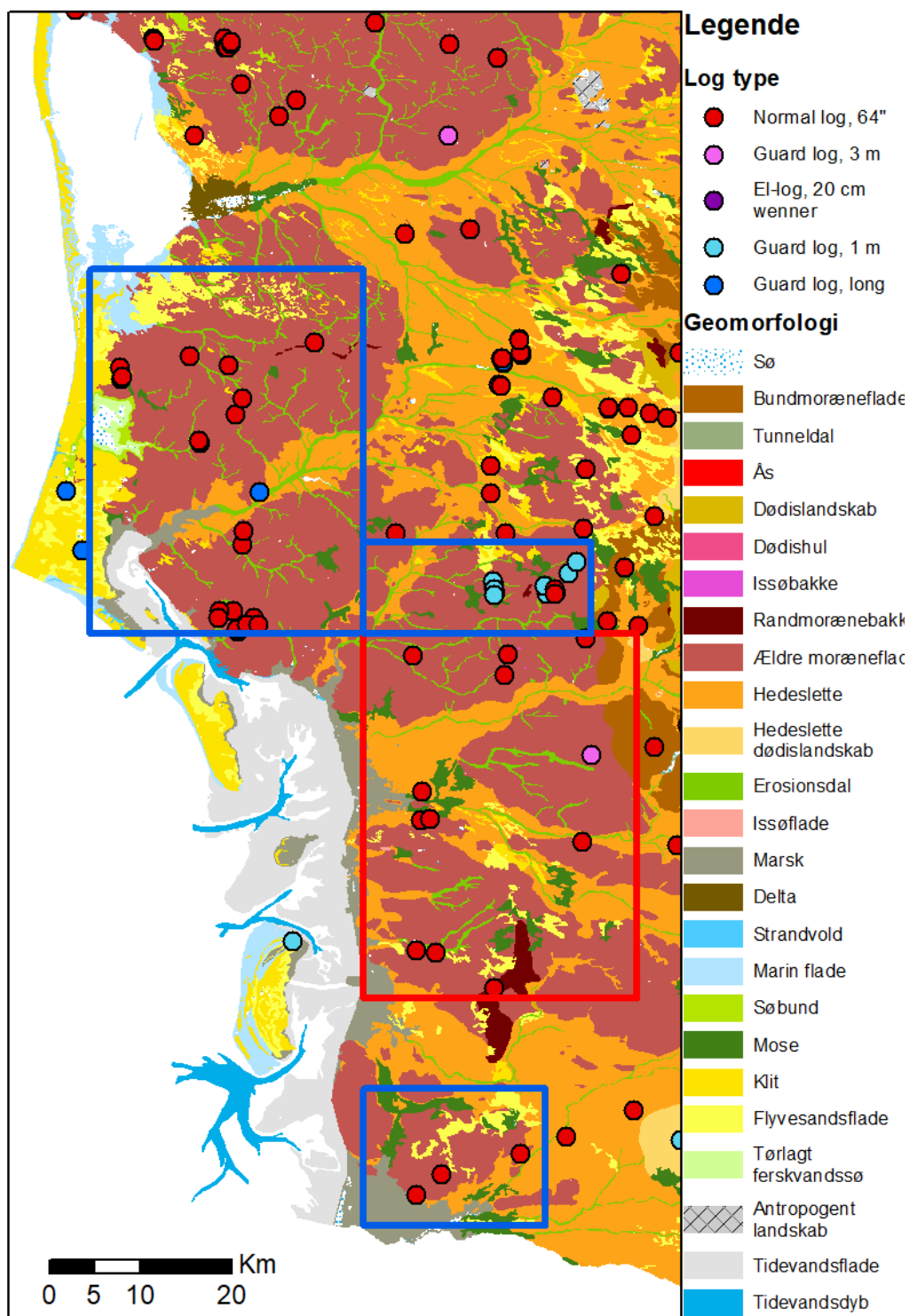
Navn på gruppe	Litologier listet ud fra DGU symbol
Kvartære grovklastiske aflejringer (ferskvands og marin sand og grus fra post-, sen-, og interglacial og glacialt smeltevandssand, -grus og -sten)	FG, FS, ES, HG, HS, TG, TS, YG, YS, DZ, DG, DS, IG, IS, QG, QS
Smeltevandssand, -grus og sten	DS, DG, DZ
Kvartære finklastiske og till-aflejringer (ferskvands og marin silt og ler fra post-, sen-, og interglacial og glacial moræne- og smeltevandssilt, og -ler)	FL, HL, TL, TI, YL, YI, DL, DI, DV, IL, II, IV, QL, QI, QV, ML, MI
Smeltevandsler	DL
Smeltevandssilt	DI
Kvartære glaciale moræneaflejringer	ML, MI, MS, MG, MZ
Finkornede moræneaflejringer	ML, MI
Grovkornede moræneaflejringer	MS, MG, MZ
Kvartære organiske aflejringer	

I Figur 8-6 er der for hver litologigruppe vist to resistivitetsfordelinger, en lokal for Ribe-modelområdet (øverst) og en regional (nederst). Der er beregnet 0.05, 0.25, 0.5 (median), 0.75

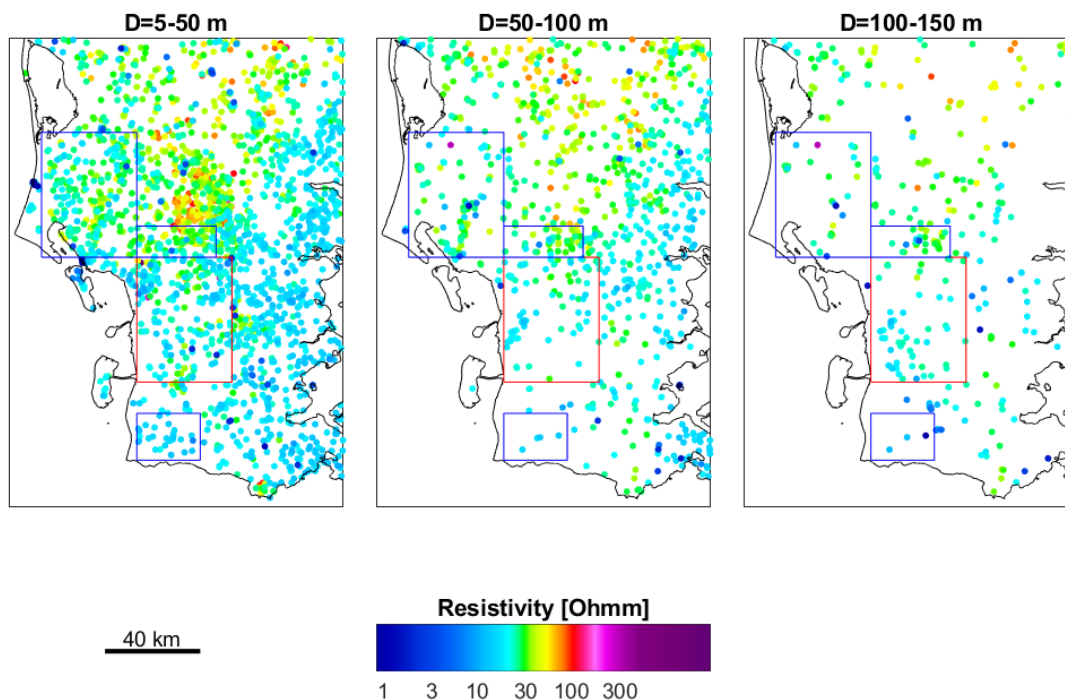
og 0.95 percentiler, som en del af beskrivelsen af de enkelte fordelinger. De følgende afsnit relaterer sig til Figur 8-6.

Gruppen af kvartære organiske aflejringer fremgår ikke i Figur 8-6, da der ikke er findes data for denne gruppe indenfor området.

De kvartære, grovklastiske aflejringer i gruppe 1 består overvejende af smeltevandsaflejringer (gruppe 2), som i Ribe-modelområdet ud fra antallet af samples (N) udgør ca. 80 % og i det regionale område udgør 97,5 %. Forskellene mellem hhv. de lokale og regionale fordelinger i de to grupper er meget små. For de to grupper er der målinger fra ni borer (B) i Ribeområdet, så det giver en rimelig sikker statistisk beskrivelse og repræsentation af resistiviteten for smeltevandssand, -grus og -sten inden for Ribeområdet. Sammenlignet med det regionale område, så indeholder det regionale område flere høje resistiviteter, konkret udtrykt ved at der er ca. 20% flere over 170 ohmm, mens fordelingen af lavere resistivitet indenfor gruppe 2 er meget lig hinanden lokalt og regionalt. Forskellen i fordelingerne relateret til de højeste resistiviteter kan evt. forklares ved at 1) porevandsmodstanden i dele af det regionale områder er lidt højere end i Ribe-modelområdet og medfører højere formationsresistiviteter og 2) hvis andelen af umættede aflejringer er større i de regionale områder end i Ribe-modelområdet.



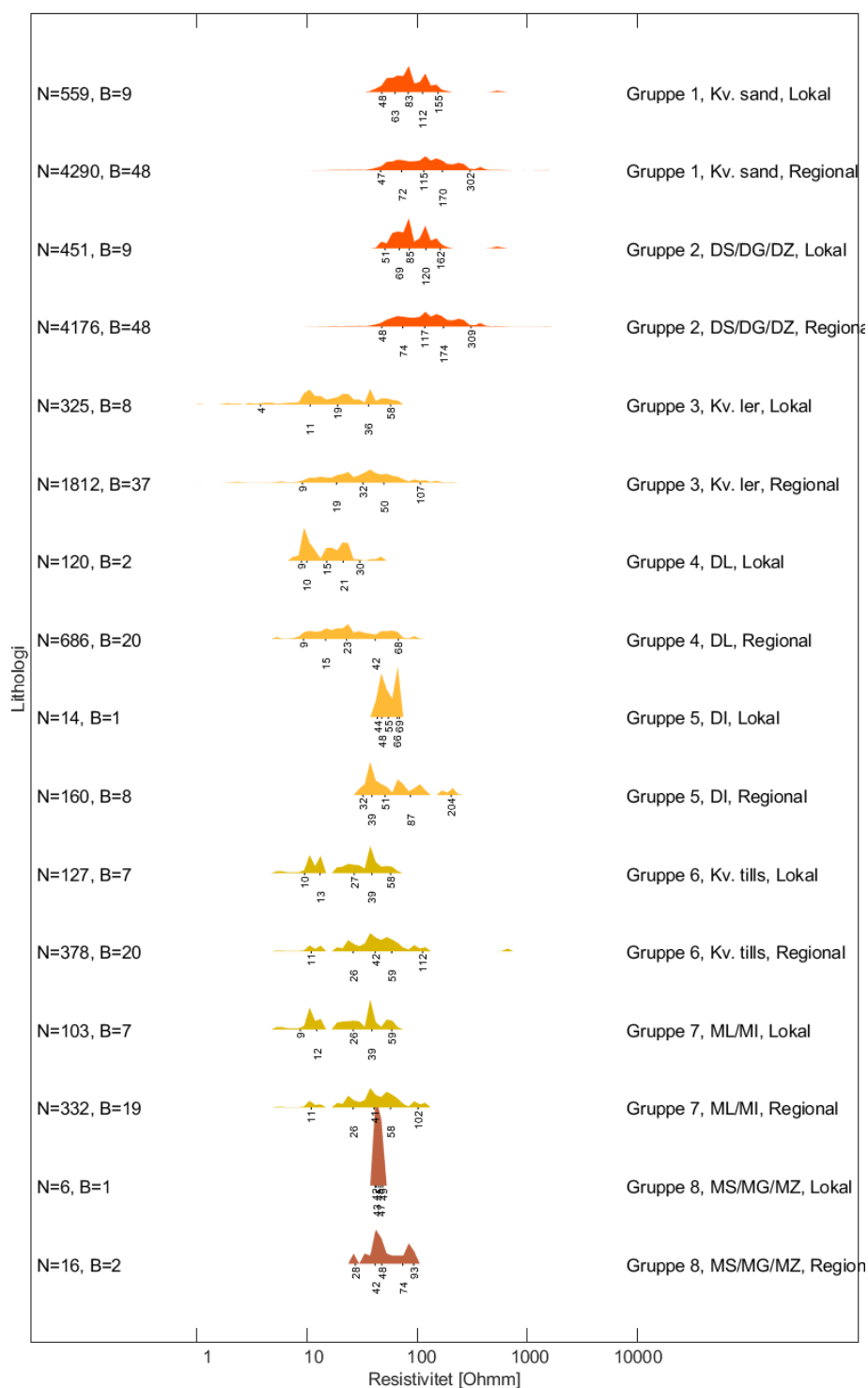
Figur 8-4. Placering af resistivitetslog i og omkring modelområdet. Ribe-modelområdet er markeret med rød boks. Tilstødende områder med sammenlignelige aflejningsforhold er markeret med blå bokse.



Figur 8-5. Porevandsresistivitet fra vandprøver med filterinterval i hhv. 5-50 m, 50-100 m og 100-150 m dybde. Filtrets midtpunkt er brugt som dybderefERENCE. Hvis der er udtaget mere end én prøve i filteret, er median anvendt. Dataudtræk fra Jupiter 2. juni 2024.

De lerede, kvartære aflejringer i gruppe 3 består i Ribe-området primært af moræneler (gruppe 7), når man ser på antallet af borer, mens der er en mere ligelig fordeling af smeltevandssler (gruppe 4) og moræneler (gruppe 7) regionalt. Målinger beskrevet som smeltevandssilt (gruppe 5) viser en tendens til at være højere end smeltevandssler og moræneler, hvilket kan være med til at forklare 'halen' af høje resistiviteter i gruppe 3 for de regionale områder. Da der kun er en boring med målinger beskrevet som silt og to borer med smeltevandssler i Ribeområdet, er de regionale fordelinger sikkert mere repræsentative. Da der er meget få målinger af morænesand/grus/sten og da de ligger med overlap med moræneler, er disse aflejringer også medtaget, så det er den samlede gruppe af moræne, som indgår i gruppe 3. I dette område er det ikke muligt ud fra de prøver/målinger, som indgår i analysen, resistivitetsmæssigt at adskille morænesand, grus- og sten fra moræneler og –silt

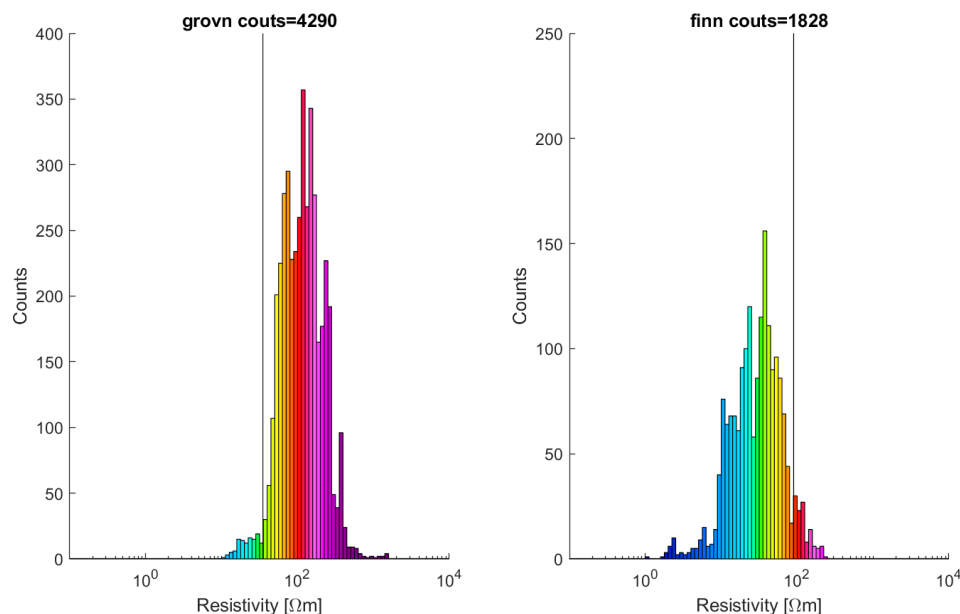
Vi anvender disse observationer til at konstruere fordelinger for de to relevante litologi-klasser ('sand' og 'ler'). For den sandende klasse vælges "gruppe 1 Kv. Sand, regional", der repræsenterer de regionale grovklastiske, kvartære aflejringer. Til den lerede enhed kombineres observationerne fra "gruppe 3, Kv. Ler, regional" med få observationer for 'grov moræne' litologien i "gruppe 8, MS/MG/MZ, regional". Herefter får vi en tilsvarende fin litologi-klasse og en grov litologi-klasse på samme måde, som for borerne. Histogrammer og antal observationer for disse to klasser ses i Figur 8-7.



Figur 8-6. Resistivitetsfordelinger for litologigrupper listet i Tabel 10. For hver gruppe er der en lokal og en regional resistivitetsfordeling. N angiver antallet af prøver/målinger som ligger til grund for fordelingerne og B angiver hvor mange borer disse er fordelt på. De små tal under fordelingerne angiver fra venstre: 0.05, 0.25, 0.5 (median), 0.75 og 0.95 percentiler.

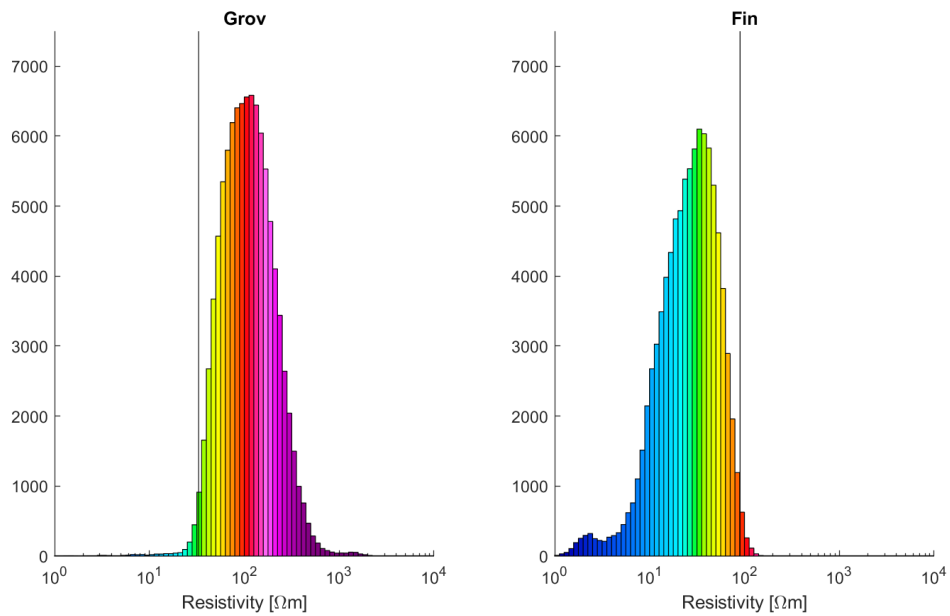
De to fordelinger er processeret ved at indføre en minimumsresistivitet for den grove litologiklasse og en maksimumsresistivitet for den fine litologiklasse. Værdierne herover og under vurderes urealistiske for de relevante enheder, og observationerne ses som upålidelige.

Minimumsværdien for de grove sedimenter er sat til 35 ohmm og max-værdien for de fine sedimenter er sat til 90 ohmmeter. Værdierne er vist i Figur 8-7 som lodrette streger.

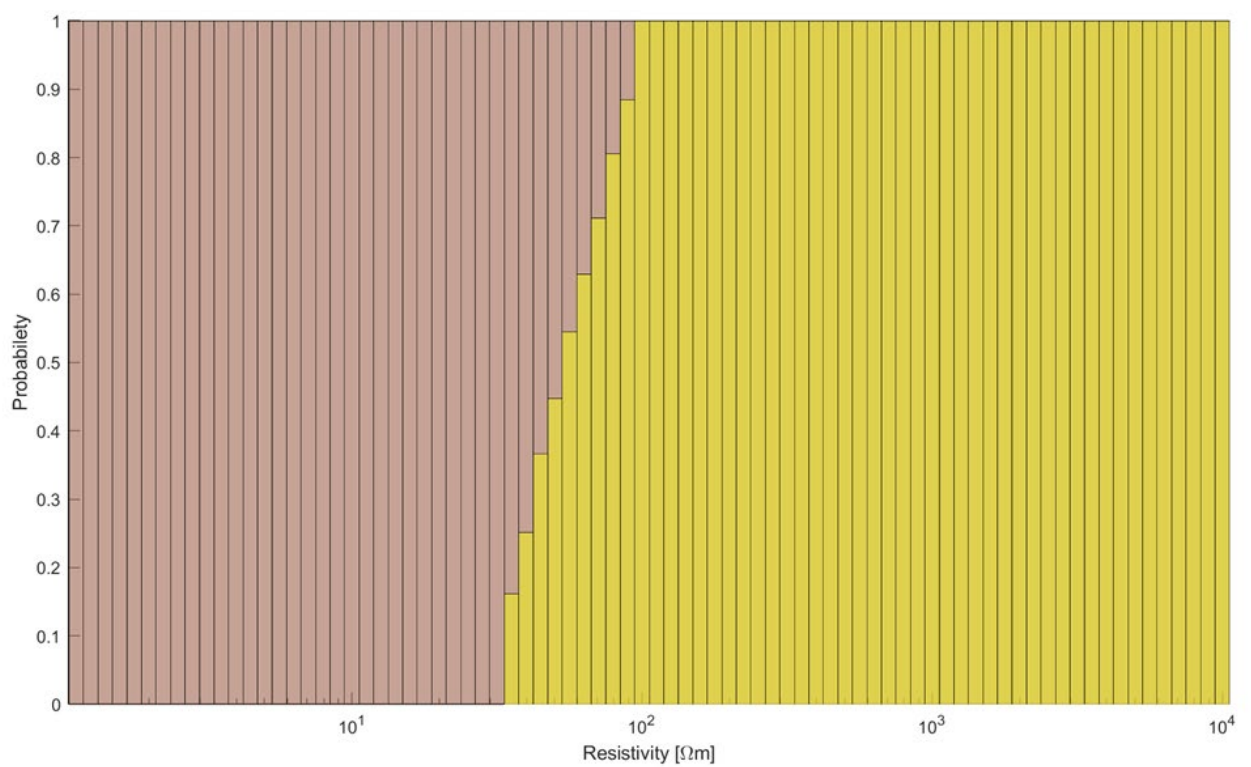


Figur 8-7. Histogrammer over resistivitets målinger for de to grupper for den fine og grove litologi klasse i voxel modelleringen.

For ikke at indføre en bias pga. antallet af observationer i resistivitetsfordelingerne, resamples fordelingerne til begge at have 100.000 punkter samt gattes under antagelse af, at fordelingerne er normalfordelte. Dette giver pæne fordelinger med lige mange counts i hver, som er vist i Figur 8-8. De fastsatte maksimums- og minimumsværdier fastholdes, hvorefter fordelingerne kan normaliseres indenfor hver bin i histogrammet, og opnår de ønskede fordelinger til oversættelse af resistivitet. De anvendte fordelinger af resistivitet for litologi-klasserne er vist sammen i Figur 8-9. En observeret resistivitet i TEM data kan nu oversættes til sandsynlighed ved at tilskrive cellen sandsynlighedsfordelingen fra den bin, som resistivitetsmålingen falder indenfor.



Figur 8-8. De producerede fordelinger af resistivitet i de to litologiklasser



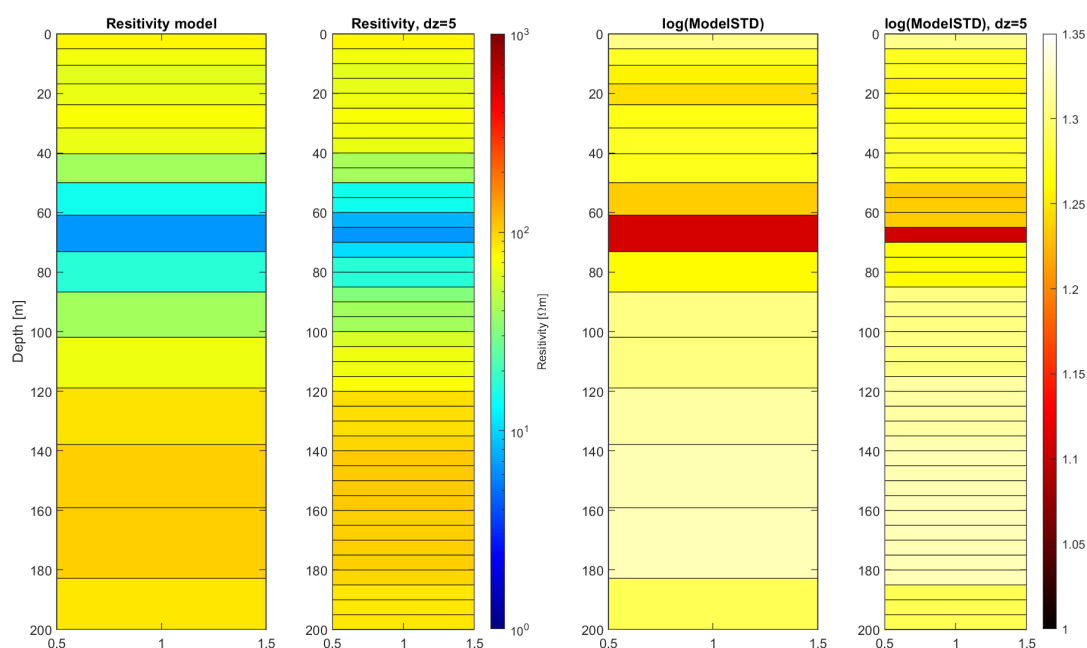
Figur 8-9. Endelig fordeling anvendt til oversættelse fra resistivitet til litologi. Resistiviteten oversættes ved at tilskrive en celle sandsynlighedsfordelingen fra den bin, som resistiviteten falder i.

8.3.2 Voxel-modellering baseret på TEM resistivitetsmodeller.

I voxel-modelleringen beskæftiger vi os med individuelle 1D-resistivitetsmodeller, hvor hver sondering betragtes som datakilde. For hver TEM sondering er der således inverteret en resistivitsmodel med et tilhørende usikkerhedsestimat. I inversionen anvendes også bånd mellem de enkelte resistivitsmodeller, hvilket betyder, at variationerne mellem nærtliggende modeller begrænses. Dermed kan modellerne per definition ikke betragtes som uafhængige data, hvorfor det blev besluttet udelukkende at bruge den resistivitsmodel, der er beliggende nærmest centrum af cellen.

Ligesom for borerne skal resistivitsmodellen og dens usikkerhed også diskretiseres til gridstørrelsen af modellen. Resistivitsmodellen har lag med logaritmisk fordelte tykkelser. Resistivitsmodellen omsættes til 5-meter celler ved vægtede gennemsnit. Usikkerheden tilskrives ved altid at vælge den største usikkerhed beregnet for et lag, der påvirker cellen. Dette valg bygger på et forsigtighedsprincip, hvor vi hellere vil give høj kvalitetsdata en lidt for lav vægt frem for at give usikker information en for høj vægt.

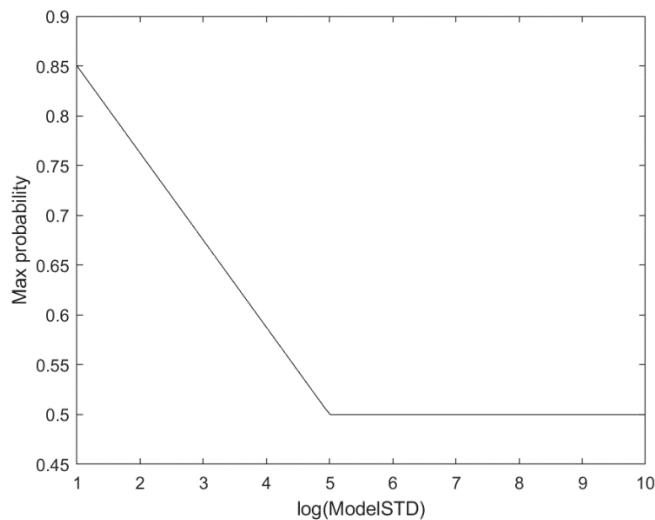
Figur 8-10 viser diskretiseringen af en 1D resistivitsmodel med usikkerheder fra en inversion af TEM dataene. Længst til venstre vises resistivitsmodellen med lagene fra inversionen, herefter den diskretiserede resistivitsmodel. Tredje søjle viser modelusikkerheden udtrykt som $\log(\text{modelSTD})$. Fjerde kolonne viser modelusikkerhederne, når de er diskretiseret til 5 m tykke lag. Her tilskrives cellen den største værdi for usikkerheden vurderet på de to celler, der bliver skåret i diskretiseringen.



Figur 8-10. Figuren viser diskretisering af resistivitsmodellen og modelusikkerheden. Fra højre ses a) resistivitsmodellen fra inversionen, b) resistivitsmodellen diskretiseret til cellestørrelsen på 5 meter, c) resistivitsmodelusikkerheden udtrykt som $\log(\text{modelSTD})$ og d) resistivitsmodelusikkerheden diskretiseret til cellestørrelsen.

Herefter kan resistiviteterne i hver celle oversættes til en sandsynlighedsfordeling baseret på resistivitsfordelingerne i Figur 8-6. Usikkerhed i hver celle implementeres med en simpel funktion, der oversætter $\log(\text{modelSTD})$ til en maksimal sandsynlighed. Den maksimale

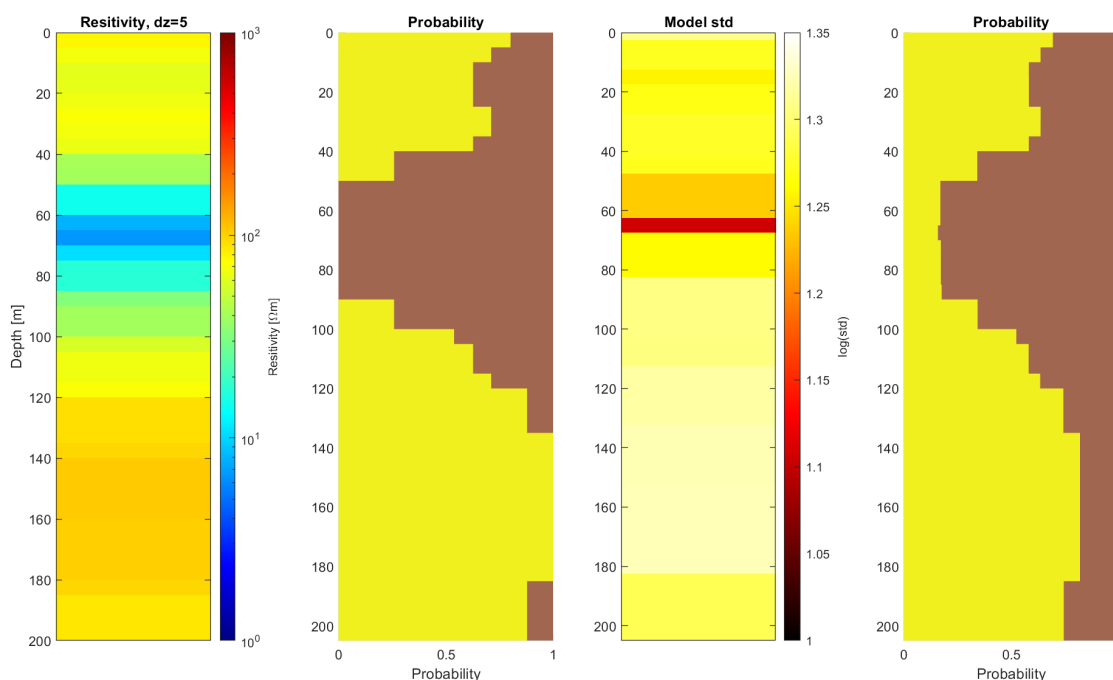
sandsynlighed skal forstås tilsvarende boringskvaliteten. Funktionen, der beskriver maks. sandsynligheden som funktion af $\log(\text{modelSTD})$, kan ses i Figur 8-11



Figur 8-11. Funktionen der oversætter modelusikkerhed ($\log(\text{ModelSTD})$) til den implementerede probabilistiske usikkerhed (max sandsynlighed).

Figur 8-12 viser oversættelsen af en 1D-resistivitetsmodel til sandsynlighedsfordelinger, samt effekten af usikkerhederne på resistivitetsmodellen på sandsynlighedsfordelingerne. Figur 8-12b viser den rå oversættelse af resistiviteten, hvorefter effekten af den tilhørende usikkerhed (Figur 8-12c) kan ses ved at sammenligne med Figur 8-12d. Da variationerne i resistivitetsmodelusikkerheden ikke viser den store variation, spiller dette en mindre rolle, men det, at den maksimale sandsynlighed ikke overstiger 0.85 tilføjer en væsentlig og realistisk usikkerhed på TEM informationerne.

Herefter kan alle datacellerne tilskrives en sandsynlighedsfordeling baseret på resistiviteten og på den tilhørende usikkerhed. Inden informationen spredes ud i rummet, udvælges alle dataceller i Saale-intervallet, da kun disse skal have betydning i modelleringen. Dette gøres i praksis ved at sætte alle dataceller udenfor Saale-intervallet til en uniform sandsynlighedsfordeling (ligesom for boringerne).



Figur 8-12. Figuren viser oversættelsen af en resistivitetsmodel til sandsynligheder og effekten af at indføre usikkerheder på resistivitetsmodellen. Fra højre ses a) resistivitetsmodellen, b) resistiviteten direkte oversat til sandsynligheder, c) resistivitetsmodelusikkerheder d) den endelige sandsynlighedsfordeling fra TEM informationerne med anvendelse af resistivitetsmodelusikkerheden.

8.3.2.1 Udbredelse af TEM information i rummet

TEM-informationerne udbredes efter et tilsvarende koncept som udbredelsen for borerne (se Bilag 1), dog med variationer tilpasset TEM-metoden. De tilgængelige TEM-data kan først splittes op i 5 forskellige surveys. Dette gøres eftersom data fra de forskellige surveys kan betragtes som uafhængige, da de er numerisk behandlet og inverteret uafhængigt af hinanden

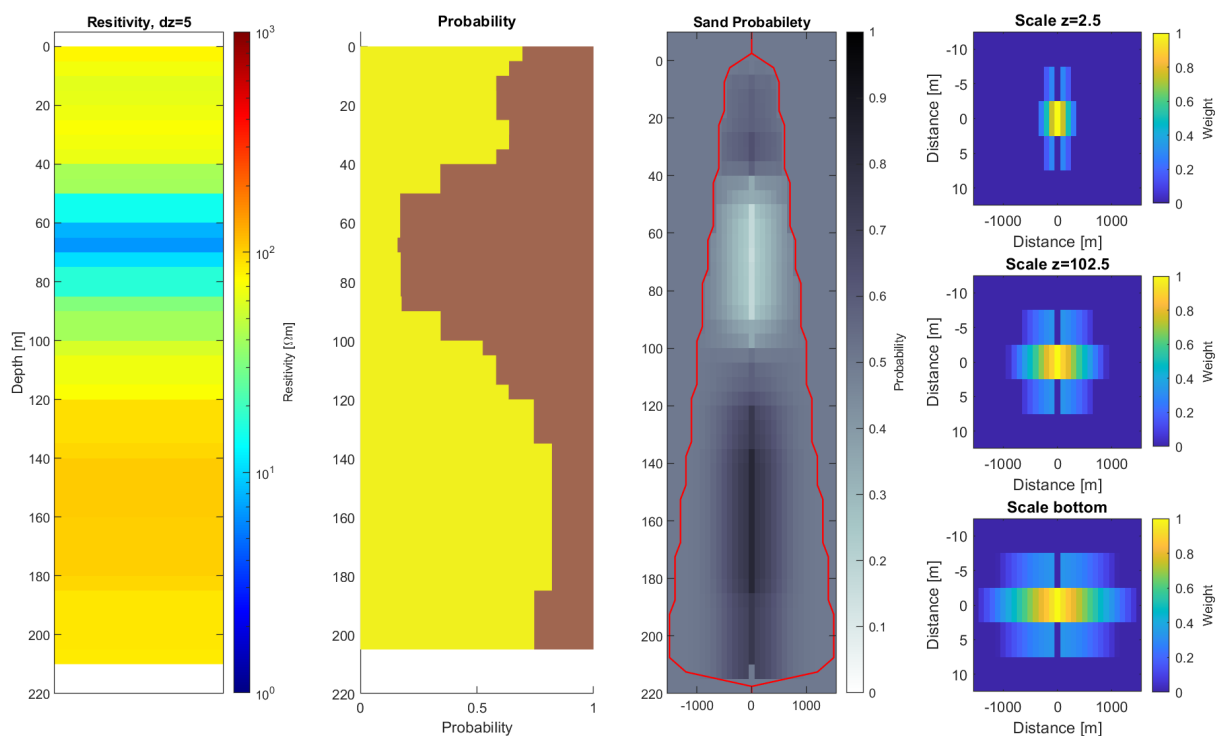
Herefter defineres der nu for hver datacelle for et helt survey en udbredelsesmatrix, der definerer den vægt, som datacellen påvirker de omgivende celler med. Der beregnes vægtede gennemsnit af alle celler med påvirkninger, og der defineres en aftagende sandsynlighed med afstand fra den nærmeste TEM sondering, som igen beregnes på survey-niveau. Herefter kan grid for de 5 surveys kombineres ved at beregne en fælles sandsynlighedsfordeling i hver celle i modelområdet. De valgte parametre bliver defineret i de følgende afsnit.

Udbredelsesmatrixerne for TEM-informationer baserer vi ikke på den samme geologiske information som borerne, men i højere grad på viden om TEM-metodens sensitivitetsfunktion. Vi ved, at TEM-data bliver påvirket af et større og større område med dybden. Derfor indfører vi en tilsvarende form på udbredelsen af resistivitetsinformationen. Dette gøres ved at have en $\max_{dist}$, der varierer lineært 400 – 1500 meter med dybden. Eksempler på udbredelsesmatrixerne kan ses i Figur 8-13d. Tilsvarende borerne sættes også en konstant $d_{vertikal} = 7,5$. Herefter kan alle skaleringsmatrixer for data udregnes for alle celler i et survey og vægtede gennemsnit beregnes.

Grundet TEM-metodens sensitivitet, begrænses betydningen af sandsynlighedsfordelingen i de øverste celler i skaleringsmatricerne. TEM-metoden har et trade-off mellem opløsningen i overfladen og "depth of investigation" (DOI) der fortæller, hvor dyb information, der kan opløses. I Ribe-området er der fløjet med et relativt stort SkyTEM-system, der ikke har hovedfokus på opløsning af den mest overfladenære del af lagserien. Derfor implementeres det i udbredelsen af TEM-informationerne, at udbredelsesmatricerne for dataceller i det første lag (0-5 meter) sættes til 0 og for dataceller i andet lag (5-10) halveres impactet.

Herefter beregnes der på samme måde som for borerne en faldende sandsynlighed med afstand væk fra datacellerne. Dette gøres nu for hele surveyet, og det bliver derfor gjort på skala af hele modelgriddet og ikke et lokalt grid omkring data. Eftersom en TEM-sondering har data i hele dybden af voxelmodellen, kan vi i dette tilfælde nøjes med at beregne afstand i x,y planet til nærmeste TEM-sondering. Skaleringsværdierne, og de endelige sandsynligheder beregnes som for borehullerne, hvor $decay_{dist} = 400$ og en nugget på 0,8.

For Figur 8-13c er dette den aftagende sandsynlighed med afstand beregnet for én 1D resistivitetsmodel, så effekten på et sandsynlighedsgrid af én resistivitetsmodel kan ses på samme måde som for borerne. Den længere udbredelse med dybden kan ses, og betydningen af at begrænse impactet af de øverste to dataceller kan ses.



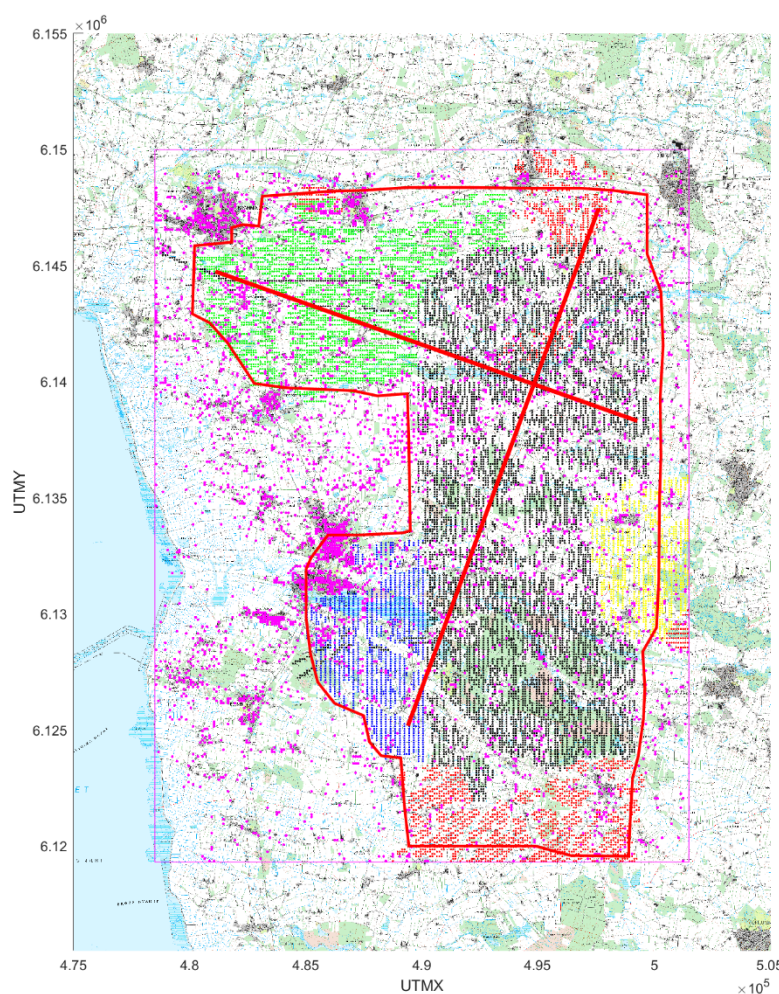
Figur 8-13. Figuren viser udbredelsen af TEM informationer i rummet. Fra højre ses a) resistivitetsmodellen b) sandsynlighedsfordelingen baseret på resistivitetsmodellen, c) snit gennem udbredelse af information af en TEM sondering, d) eksempler på udbredelsesmatricen for TEM data, hvor det ses, at udbredelsen stiger med dybden.

Efter at dette er gjort for alle 5 surveys, beregnes den fælles sandsynlighed af disse 5 surveys, og en model baseret udelukkende på TEM-data kan opnås.

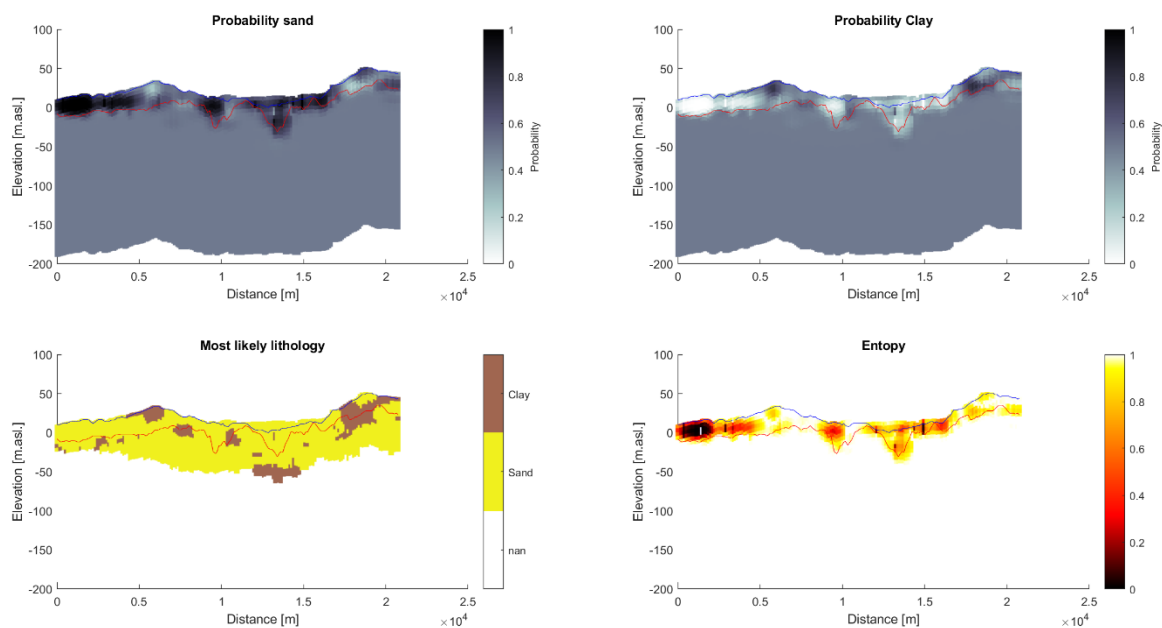
8.4 Resultat af voxelmodelleringen

Efter at både boringsgriddet og TEM-griddet er beregnet, kombineres informationen til et fælles sandsynlighedsgrid. Dette er et resultat af modelleringen, hvorefter information kan trækkes ud af disse sandsynlighedsfordelinger. Den mest sandsynlige model (MODE-modellen) beregnes sammen med en tilhørende entropi, som er et simpelt mål for usikkerheden.

Eksempler på modellen kan ses på to tværsnit gennem modelområdet på Figur 8-15 og Figur 8-16. Placering af tværsnittene kan ses i Figur 8-14. Begge tværsnit viser de to sandsynlighedsgrids, MODE-modellen og entropien, ligesom top og bund af Saale-enheden også er markeret. Det ses i begge tværsnit, at modellen også har sandsynligheder og MODE-model for celler over og under Saale-enheden. I den endelige model er der kun anvendt data indenfor Saale-intervallet.

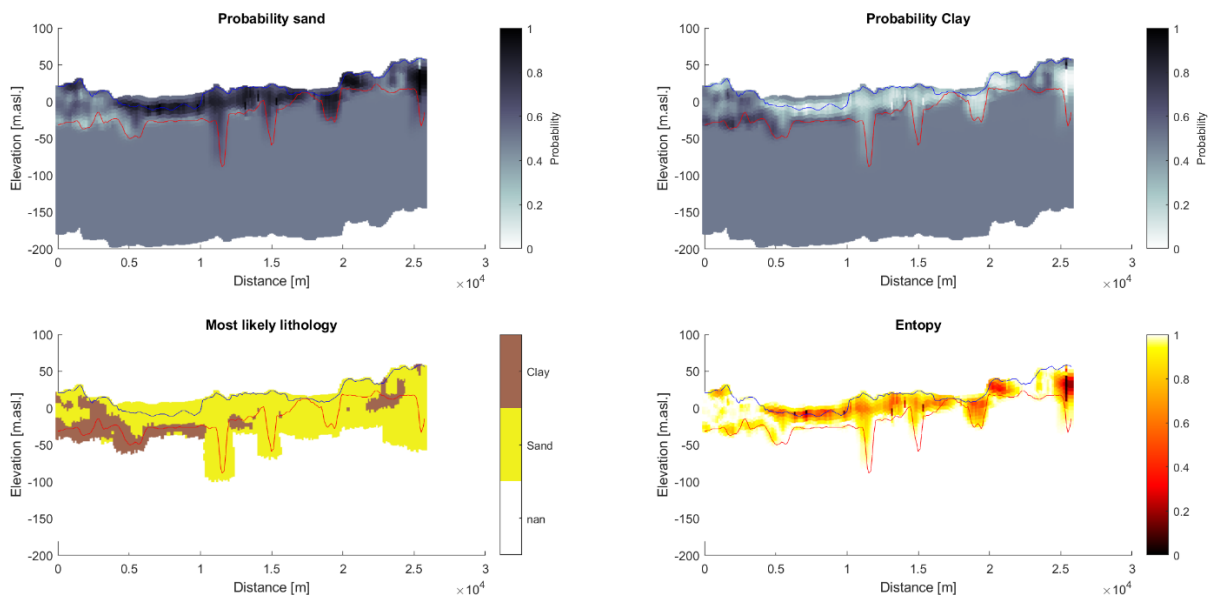


Figur 8-14. Placeringen af tværsnit gennem modelområdet. Tværsnit 1 ligger i den nordlige del af modelområdet fra nordvest mod sydøst (se Figur 8-15). Tværsnit 2 ligger fra sydvest mod nordøst (se Figur 8-16).



Figur 8-15. Resultatet af voxelmodelleringen for tværsnit 1, hvor der vises to sandsynlighedsgrids, der indeholder sandsynligheden for hhv. sand- eller ler-kategorien. Derudover vises den mest sandsynlige litologi og usikkerheden i form af entropien. Top og bund af Saale-enheden er også markeret.

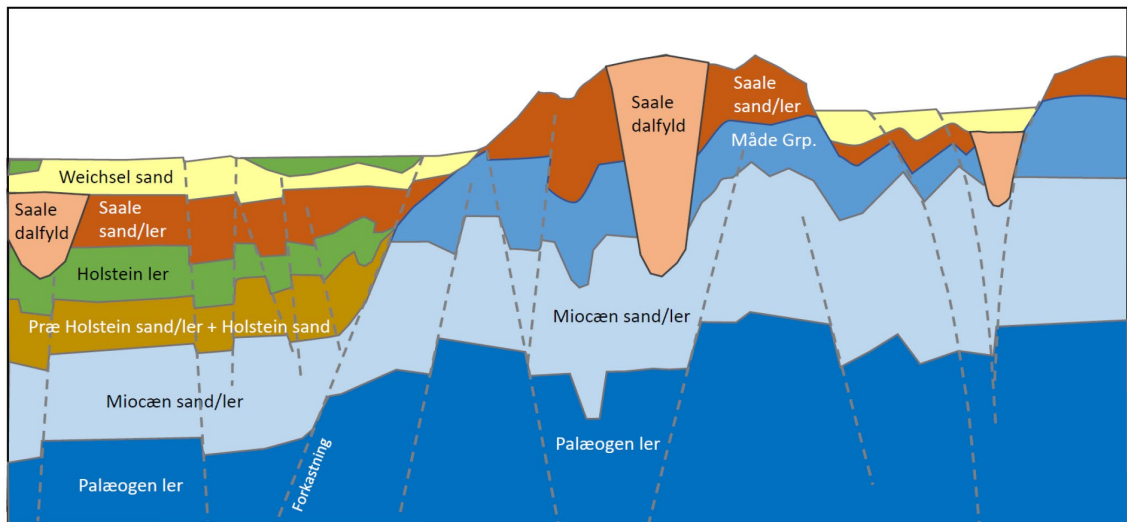
MODE-modellen, der viser den mest sandsynlige litologi, er eksporteret og lagt ind i Geoscene3D projektet og beskåret, så kun voxler indenfor Saale top og bund er brugt. I voxel-modellen i Geoscene er der brugt en anden farveskala for ler- og sand-kategorierne, så sand er vist med rødt og ler med brunt. Voxelmodellen er efterfølgende udfyldt med litologi for de omkringliggende lag, så der opnås en 3D voxelmodel for kote 80 til -200 m (se afsnit 9.4).



Figur 8-16. Resultatet af voxelmodelleringen for tværsnit 2, hvor der vises de to sandsynlighedsgrids, der indeholder sandsynligheden for hhv. sand- eller ler-kategorien. Derudover vises den mest sandsynlige litologi og usikkerheden i form af entropien. Top og bund af Saale-enheden er også markeret.

9. Supplerende information til den hydrologiske model

9.1 Opdateret konceptuel geologisk model



Figur 9-1. Opdateret konceptuel geologisk model.

På baggrund af arbejdet med den geologiske modellering er den indledende konceptuelle geologiske model (Figur 5-2) blevet opdateret – se Figur 9-1. De største ændringer er, at højre side af det konceptuelle profil er udvidet med en hedeslette – svarende til den nordlige slette mellem Holsted og Rødding bakkeøer - og de underliggende kvartære og prækvartære lag. Herudover er der indtegnet langt flere forkastninger end den første version.

9.2 Inddeling af Ribe-modelområdet i 'tektoniske zoner'

Ved det geologiske modelarbejde beskrevet i det foregående, er der fundet talrige tegn på, at områdets lagserie har været udsat for tektonisk deformation i form af folder og forkastninger. Tilsyneladende er den prækvartære del af lagserien og den ældste del af kvartæret ('præ-Holstein sand/ler') kraftigst deformeret, og deformationerne har overvejende karakter af forkastninger. Graden af deformationer i modelområdet fordrer en vurdering af konsekvenserne for grundvandets strømning, da forkastningerne stedvist kan skabe barrierer for grundvandsstrømningen og andre steder kunne øge den.

På baggrund af isopachkort, middelmotstandskort, forløb af tidligere kortlagte forkastninger, topografi og tolkninger langs 2D-profiler, er modelområdet derfor inddelt i 10 tektoniske zoner (TZ 1-10), hvor graden af deformation og deformationernes orientering varierer (Figur 9-2). Graden af deformation er skønnet og zonerne er inddelt i tre klasser. For hver zone er der med orange pile vist den formodede dominerende orientering af de iagttagne forkastninger.

De udpegede tektoniske zoner, som beskrives i det følgende, danner således input til den hydrologiske model.

Klasse 1: Kraftig deformation

TZ 1: Hedesletten mellem Holsted og Rødding Bakkeøer.

Forkastninger afgrænser hedesletten og bakkeøerne, og der ses her forsætninger på i størrelsesordenen 20 m. Lagserien er kraftigt deformeret til og med Mådegruppen, og forsætninger af denne når i nogle profilsnit tilsyneladende over 50 m. Hedeslettens topografi viser også tegn på deformation, men i mindre grad. Der ses varierende hældninger samt knæk i topografien på op til i størrelsesordenen 5 m.

TZ 3: Hedesletten mellem Gram og Toftlund bakkeøer

Deformationerne afgrænses mod syd af kanten af Toftlund Bakkeø og mod nord ved den nordlige side af Gram Bakkeø. Mod nordvest grænser zonen op til TZ 10 og dækkes af Holsteinaflejringer. Ved den VSV-ØNØ orienterede grænse ser det ud til, at der findes en forkastning. Det forventes, at zonen fortsætter mod VNV ud under Holsteinleret, men det kan ikke afgøres med sikkerhed ud fra data. Lagserien i zonen er gennemsat af talrige forkastninger med VNV-ØSØ orienteringer. Deformationerne i lagserien ses tydeligst i Mådegruppen. Flere af forkastningerne går helt til terræn, da hedeslettens topografi tydeligt viser lange, parallelle lineamenter og springende koter, som er meget usædvanlige for en hedeslette.

TZ 7: Holsted Bakkeø's sydvestlige del

Området er kraftigt deformeret til og med de kvartære præ-Holstein sedimenter. Deformationerne har primært karakter af forkastninger, og det tolkes, at to større forkastninger danner den vestlige og østlige afgrænsning. Lagserien i zonen er gennemsat af talrige forkastninger med forventet NNV-SSØ orientering. De kvartære aflejringer fra Holstein og opefter er deformeret i mindre grad, og deformationerne har karakter af blide folder.

Klasse 2: Moderat deformation

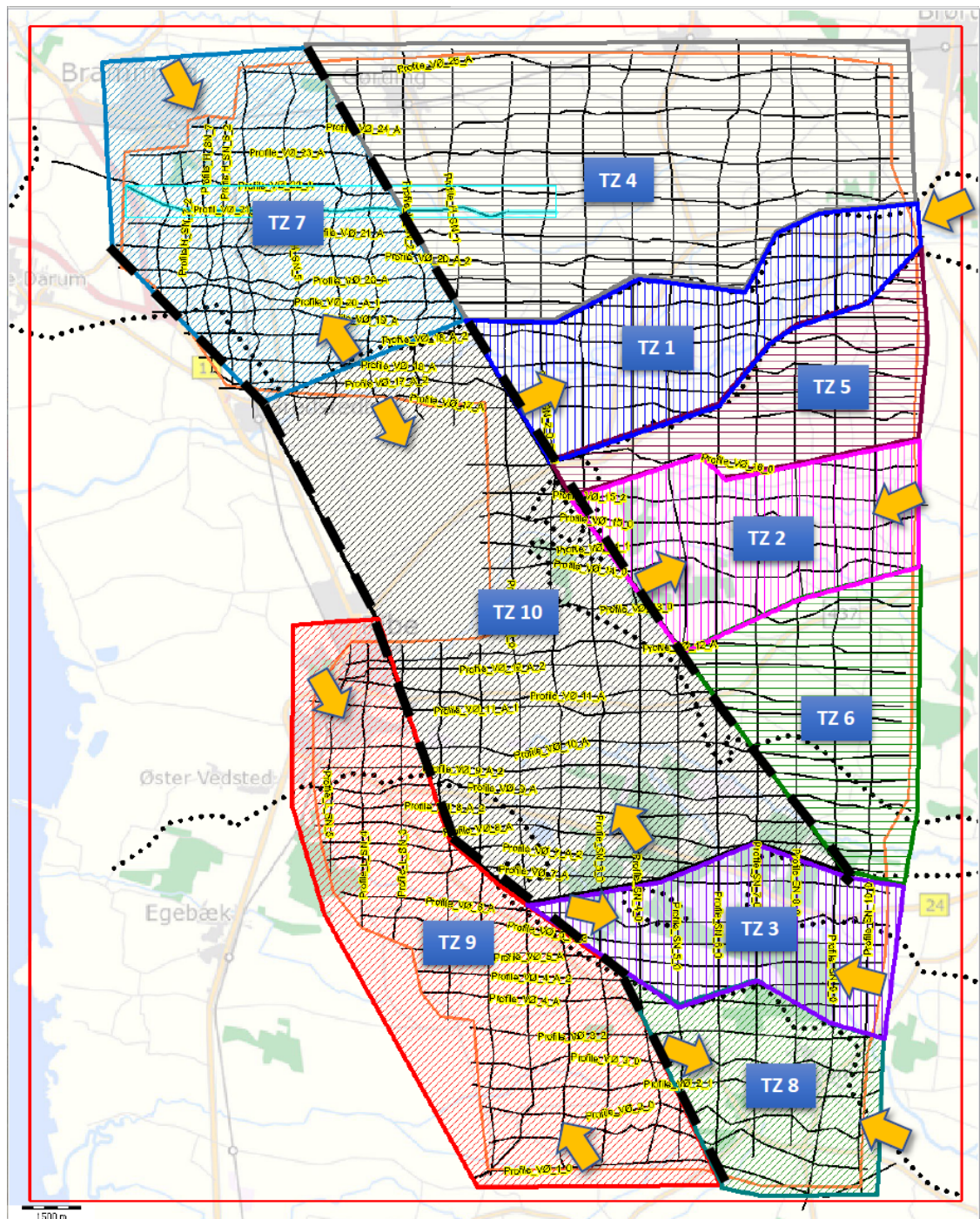
TZ 2: Vestlig del af Rødding Bakkeø

Områdets deformationer ses som spring i top- og bundkote for Mådegruppen. Det forventes, at forkastningernes dominerende orienteringer ligger omkring VSV-ØNØ. Området er gennemsat af markante begravede dale, som fortrinsvist har denne orientering, men som mod vest drejer til VNV-ØSØ.

TZ 10: Hedesletten nordøst-øst for Ribe

Mellem Ribe og Gredstedbro er der ikke kortlagt med SkyTEM, men den øvrige del peger på en vis grad af tektonisk deformation. Den vestlige og østlige grænse tolkes at udgøres af markante forkastninger ligesom TZ 7, og betragtes derfor som en forlængelse mod syd, men på grund af stedvist begrænset datadækning er der nogen usikkerhed ved denne tolkning. Mådegruppen findes ikke indenfor området, og derfor er det vanskeligt at vurdere graden af deformation. Dog er der i topografien tegn på, at området er gennemsat af forkastninger, da hedesletten flere steder viser markante kotevariationer. Mod nord i zonen domineres topografien af orienteringer omkring NNV-SSØ og orienteringer vinkelret her på. Mod syd ses en

begravet dal og trends i topografien at dreje mere mod VNV-ØSØ, hvilket kunne tyde på en vis indflydelse fra forkastningszonen TZ 3, hvor denne orientering dominerer.



Figur 9-2. Tektoniske zoner, TZ 1 til TZ 10. Orange pile angiver tolket foretrukken orientering af forkastninger inden for hver zone. Sorte stiplede linjer angiver tolkninger af større forkastninger. Se tekst for yderligere forklaring.

Klasse 3: Begrænset deformation

TZ 4: Holsted Bakkeø's sydlige del

Denne zone er kun begrænset deformeret. Mådegruppen er udbredt og kun stedvist ses pludselige kotevariationer, som kunne tyde på forkastninger. En orientering af

forkastningerne er ikke tydelig i data, men det forventes, at forkastningernes dominerende orienteringer svarer til TZ 1.

TZ 5: Nordvestlig del af Rødding Bakkeø

Zonens nordlige afgrænsning udgøres af en forkastning, hvilket også synes at være tilfældet for den sydlige afgrænsning. Mådegruppen er sammenhængende i området. Der er ingen indikationer på forkastninger i zonen.

TZ 6: Sydvestlig del af Rødding Bakkeø

I denne zone er Mådegruppen sammenhængende og kun begrænset deformeret. Stedvist ses knæk i bund og top af laget, hvilket kunne pege på forkastninger. Dette ses specielt mod syd, hvor zonens sydlige del rækker ud over hedesletten syd for Holsted Bakkeø. Her ses tydelige forkastninger i SkyTEM-data. Lange, retlinede spring i topografien med VNV-ØSØ-orienteringer på hedesletten svarer til TZ 3 mod syd. I den resterende del af TZ 6 ses ingen tydelig orientering af hverken topografi eller forkastninger.

TZ 8: Nordlig del af Toftlund Bakkeø

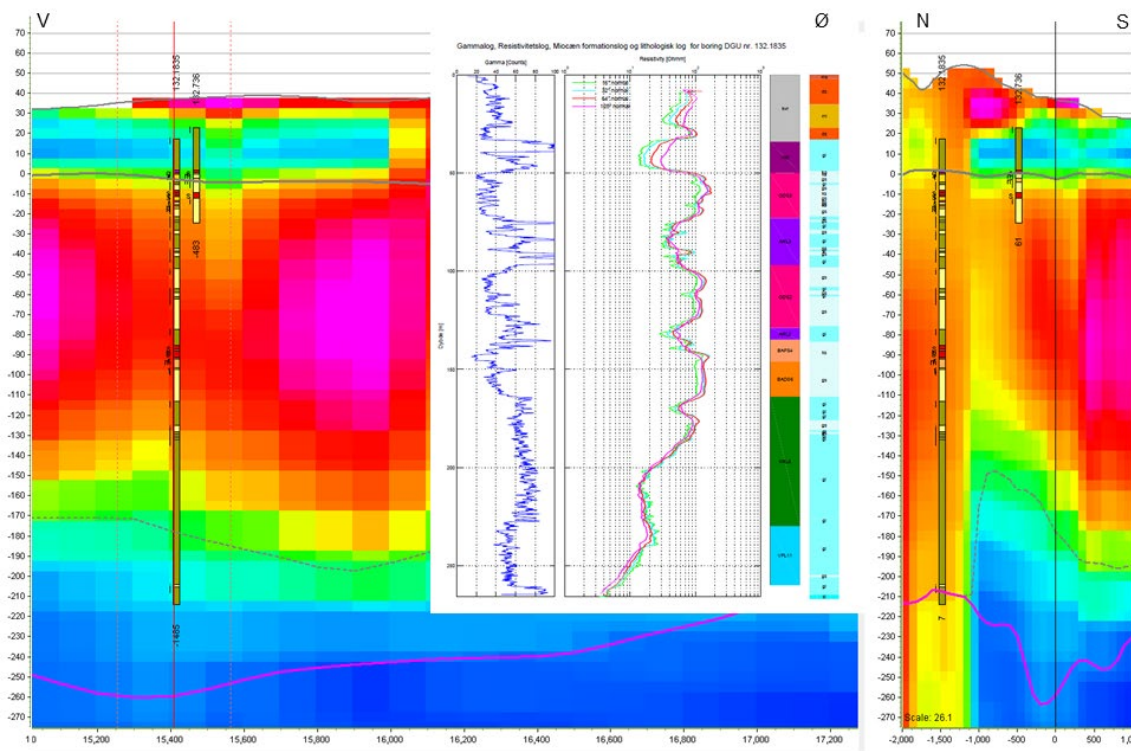
Mådegruppen varierer stedvist i kote, men der ses ingen tydelige forkastninger. En markant begravet dal i området har en VNV-ØSØ orientering, hvilket peger på erosion langs en orientering, som svarer til forkastningszonen nord for.

TZ 9: Ribe og Toftlund Bakkeø

Zonen tolkes mod øst at være afgrænset af en større NNV-SSØ orienteret forkastning. Deformationer af lagserien kan ikke bestemmes ud fra data, bortset fra placeringen af den gode leder og deformationerne af Holsteinaflejringerne. Deformationerne af Holsteinlagene forventes at skyldes glacialtektonik, og foldernes bløde udtryk peger ikke på hverken forkastninger eller overskydninger i større stil. Graden af deformation i zonen forventes at være begrænset, men den der måtte være, forventes at have en orientering omtrent parallelt med den afgrænsende forkastning mod øst.

9.3 Vurdering af anisotropi for hydraulisk ledningsevne i miocænet under Måde gruppen

Det miocæne lag afgrænset opadtil af bunden af Mådegruppen (flade '5100_Mådegruppen') og nedadtil af top Palæogen (flade '6900_Vejle_Fjord_VFL6') består af vekslende lag af lerede og sandede aflejringer (se afsnit 5.3.1-2), hvilket vil give anledning til en anisotropi for hydraulisk ledningsevne. Det har ikke været muligt at modellere disse lag enkeltvis i modellen, da de ikke kan opløses i SkyTEM resistivitetsmodellerne, selvom der er en resistivitetskontrast mellem lagene målt med resistivitetslogs (Figur 9-3). I det meste af modelområdet viser SkyTEM 3D resistivitetsgriddet, at resistiviteten falder med dybden fra 50–100 ohmm i de øvre dele af laget og ned til 10 ohmm ved bunden af laget (Figur 9-3). De 10 ohmm er brugt som afgrænsning af top Palæogen (flade '6900_Vejle_Fjord_VFL6'). For at de primært lerede dybere dele af det miocæne lag facies tilhørende Klintinghoved og Vejle Fjord formationerne ikke skal komme til at dominere beregningerne af anisotropi for hydraulisk ledningsevne, konstrueres en ekstra flade ud fra resistivitetsgriddet givet ved den dybde, hvor resistiviteten falder til 30 ohmm (Figur 9-3).



Figur 9-3: Profilsnit i to retninger ved boring med DGU nr. 132.1835, hvor borerne tolket med teksturklasser vises på profilsnit sammen med SkyTEM 3D resistivetsgrid som baggrund. Det er kun den miocæne del af lagserien der vises i borerne. Bund af Mådegruppen er markeret med grå linje, 30 ohmm fladen med stiplede linje og top Palæogen med magenta linje. Overhøjning på de to profilsnit er forskellig, så overhøjning i V-S profilsnit er 5,5 og N-S profilsnit er 26. Resistivetsfarveskala ses i Figur 3-4 og legende for teksturklasser ses i Figur 9-6. Placering af profilet er markeret på Figur 9-4. Indsat figur med gamma- og resistivetslog samt boreprofiler med tolkning af formationer fra Miocæn og litologi er fra Kristensen et al. (2015).

Vurderingen af anisotropi for hydraulisk ledningsevne laves ud fra borerne, hvor der er foretaget en beskrivelse af tekstur i forbindelse med en geologisk prøvebeskrivelse. Hver teksturklasse er tilskrevet en hydraulisk ledningsevne. Derefter beregnes vertikal og horisontal hydraulisk ledningsevne samt anisotropi i relation til den vertikale og horisontale komponent for den del af borerens lag, som ligger i det miocæne lag afgrænset af bunden af Mådegruppen opadtil og nedadtil ved den konstruerede flade, hvor resistiviteten i 3D griddet falder under 30 ohmm.

For et lagdelt system med en samlet tykkelse, t , bestående af homogene og isotrope lag med hydraulisk ledningsevne K_i , og tykkelsen t_i , kan den vertikale hydrauliske ledningsevne, K_z , estimeres som

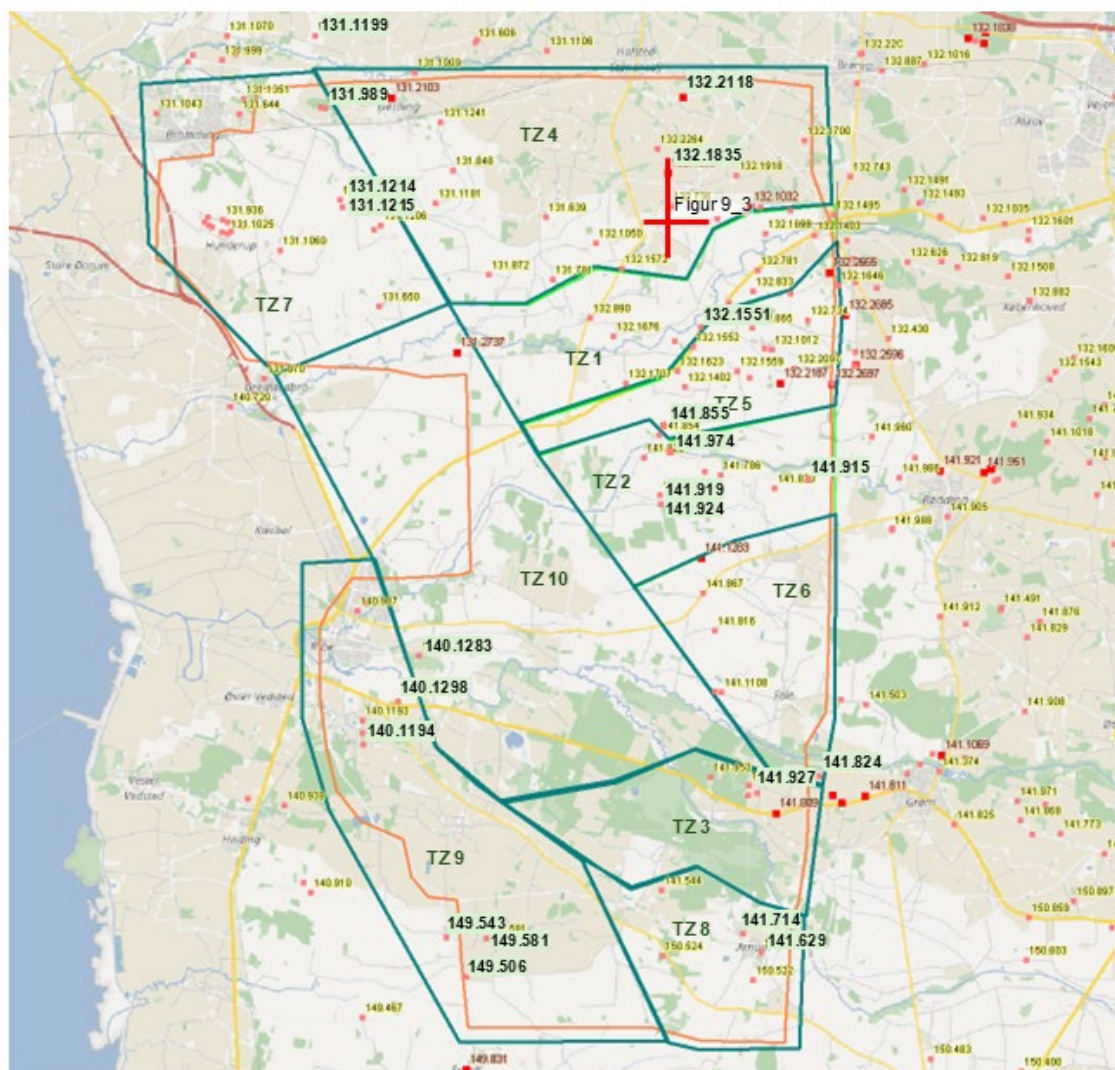
$$K_z = \frac{t}{\sum_{i=1}^n t_i / K_i}$$

og horisontale hydrauliske ledningsevne, K_x , estimeres som

$$K_x = \sum_{i=1}^n \frac{K_i t_i}{t}$$

og den horisontale til vertikale anisotropi er K_x/K_z (Freeze & Cherry 1979).

I vurderingen medtages kun borer, som strækker sig mere end halvvejs ned gennem det miocæne lag over 30 ohmm fladen. Til en vurdering af de anvendte borerers repræsentativitet for de enkelte tektoniske zoner er såkaldte nøgleboringer fra 3D miocæn projektet (Kristensen et al. 2015) taget i betragtning sammen med resistivitetsvariationer set i SkyTEM resistivitetsgriddet. Ud fra beskrivelsen i kapitel 9.2 af deformationsgraden i de 10 tektoniske zoner noteres omfanget af anisotropi mellem de to horisontale komponenter. Orienteringen af de to horisontale komponenter fremgår af Figur 9-2 og placeringen af borerne fremgår af Figur 9-4.



Figur 9-4: Oversigtskort med tektoniske zoner (grøn streg), og borer med teksturklasser (orange eller rød firkant), hvor borer vist i Figur 9-5 til Figur 9-8 har fremhævet boringsnavn, placeret skråt opad til højre for boreren med grøn markering. Placering af profilsnit vist i Figur 9-3 er markeret med røde streger.

9.3.1 Vurdering af hydraulisk ledningsevne for facies

Ud fra teksturbeskrivelse fra jordprøvebeskrivelser rapporteret til Jupiter er der oprettet 11 teksturklasser, som hver tilskrives en hydraulisk ledningsevne. Ud fra teksturbeskrivelse fra

jordprøvebeskrivelser rapporteret til Jupiter er der oprettet 11 teksturklasser, som hver tilskrives en hydraulisk ledningsevne. Værdier for den hydrauliske ledningsevne for hver af teksturklasserne er vurderet ud fra litteraturstudier, hvor hydraulisk ledningsevne er estimeret for forskellige formationer i den miocæne lagserie. Der er anvendt studier fra Sønderjylland (Meyer et al., 2018), Skjern Å oplandet (Sonnenborg et al. 2016) og ved Grindsted (Maurya et al. 2018, Fiandaca et al. 2018 og Balbarini et al. 2020). Desuden er der anvendt data (estimeret hydraulisk ledningsevne fra kornstørrelsesanalyser) fra en boring på Grindsted losseplads fra GEOCON projektet, hvorfra de tre sidstnævnte artikler også stammer. Hydraulisk ledningsevne for de 11 teksturklasser er:

1. $K_{kul} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
2. $K_{ler-silt} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
3. $K_{fin\ sand} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
4. $K_{fin-mellem\ sand} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
5. $K_{mellem\ sand} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
6. $K_{fin-grov\ sand} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
7. $K_{mellem-grov\ sand} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
8. $K_{grov\ sand} = 10^{-3} \text{ m/s}$
9. $K_{usortet\ sand} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
10. $K_{grus-sten} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
11. $K_{sand-ukendt\ tekstur} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

9.3.2 Anisotropi for hydraulisk ledningsevne i tektoniske zoner

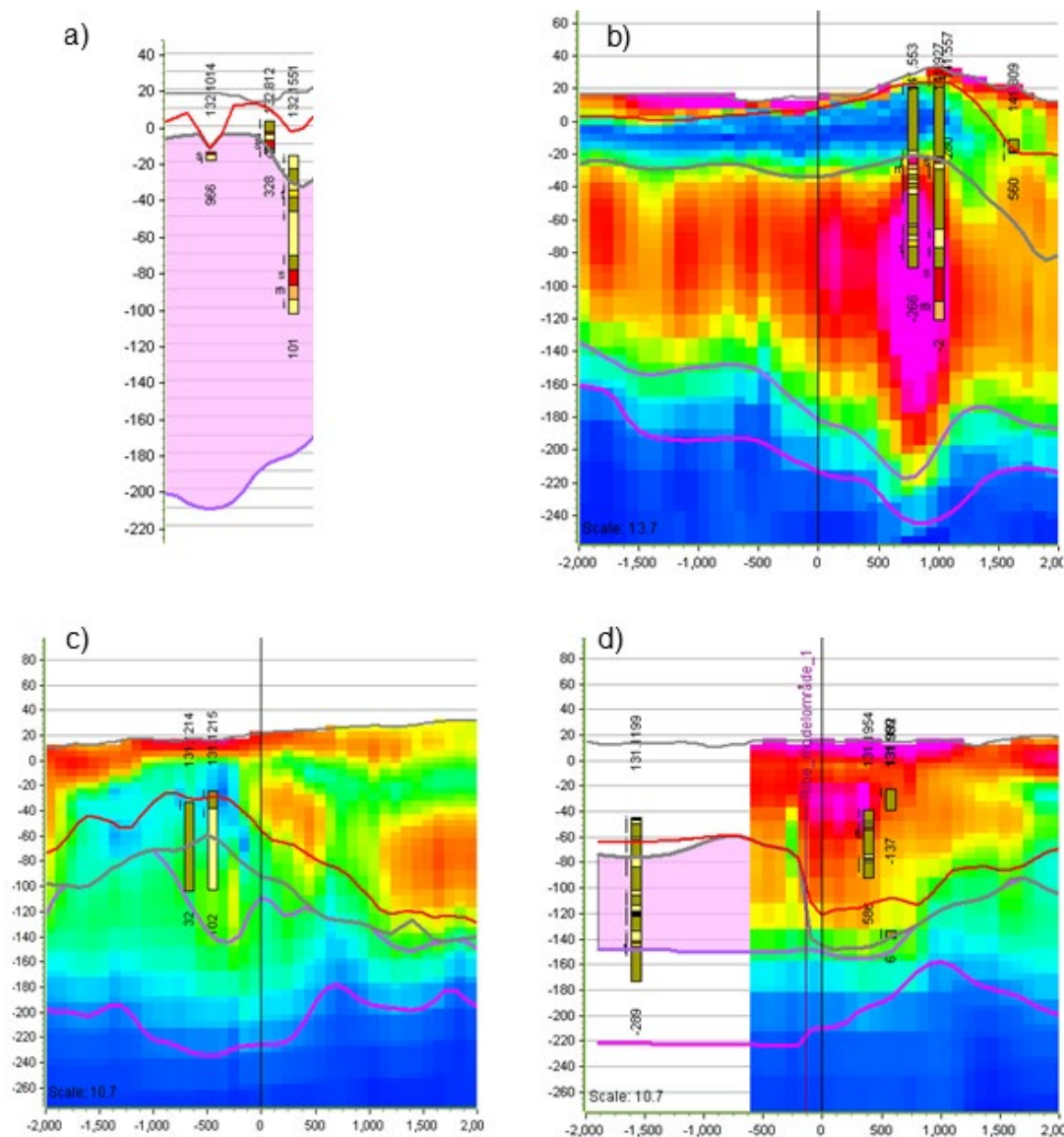
I dette afsnit gennemgås hvilke borer, som ligger til grund for beregninger af horisontal til vertikal anisotropi. Profilsnit med borerers teksturklasser vises i Figur 9-5 til Figur 9-8.

Klasse 1: Kraftig deformation

TZ 1: Horisontal til vertikal anisotropi for hedeslette-området mellem Holsted og Rødding Bakkeøer.

For denne zone findes ikke nogen borer, som opfylder kriteriet om at strække sig mere end halvvejs gennem laget. Boringen med DGU nr. 132.1551 strækker sig 46 % ned i laget. Boringen når ikke ned i de mere lerede facies, som forventes til være til stede i de dybere dele af det miocæne lag (Figur 9-5a). I TZ 4 beliggende nord for denne zone findes en boring (DGU nr. 132.1835, Figur 9-3, Figur 9-7b), som strækker sig hele vejen gennem det miocæne lag, som forventes at kunne repræsentere zone TZ 1, da de miocæne lag i miocæne nøgleboringer beliggende syd og nord for TZ 1 har sammenlignelige lagserier (Kristensen et al. 2015).

Da borer i TZ1 viser, at den øverste del af lagserien består af grovere facies end i boringen med DGU nr. 132.1835 i TZ 4, vælges det at anvende et aritmetisk gennemsnit mellem de to borer til vurdering af den horisontale til vertikale anisotropi. Det giver en anisotropi på 40.



Figur 9-5: Teksturklasser for (a) boring med DGU nr. 132.1551 i TZ 1, (b) boring med DGU nr. 141.927 i TZ 3, (c) boringer med DGU nr. 131.1214 og DGU nr. 131.1215 i TZ 7 og (d) boringer med DGU nr. 131.989 og DGU nr. 131.1199 nord for TZ 7. Det er kun den miocæne del af lagserien, der vises i boringerne. Fed grå streg markerer toppen af det miocæne lag og lilla fed streg markerer bunden af det miocæne lag og selve laget er vist med lyserød udfyldning, hvor der ikke er kortlagt med SkyTEM og 3D resistivitetsgriddet vises. Resistivitetsfarveskala ses i Figur 3-4, legende for teksturklasser ses i Figur 9-6 og boringernes placering vises på Figur 9-4.

TZ 3: Horisontal til vertikal anisotropi for hedesletten mellem Gram og Toftlund bakkøer

Der er en boring (DGU nr. 141.927, Figur 9-5b) i TZ-zonen, som rækker dybere end halvvejs ned i det miocæne lag, nemlig 60 %. Boringen ligger i den nordøstlige del af området, som ud fra SkyTEM ser ud til at bestå af flere sandede facies end i resten af området. Anisotropifaktoren for den horisontale til vertikale komponent er estimeret til 77, hvilket er i den høje ende af, hvad der samlet er set i Ribe modelområdet. I TZ-zonerne 6 og 8, som ligger hhv nord og syd for TZ 3, er der to boringer i hver. Hvis man tager et aritmetisk gennemsnit af

disse boringer, sammen med boringen i TZ 3 får man en anisotropi på 66. Da der ikke er den store forskel på den estimerede anisotropi fra boringen i TZ 3 og gennemsnittet med boringerne i nabozonerne, foreslås det at anvende den estimerede anisotropi på 77 fra boringen i TZ 3.

TZ 7: Horisontal til vertikal anisotropi for Holsted Bakkeø's sydvestlige del

I TZ 7 findes det miocæne lag kun i mindre områder af varierende tykkelse, da den miocæne lagserie i den nordvestlige del af Ribe modelområdet overvejende består af finkornede facies. Boringerne med DGU nr. 131.1214 og 131.989 (Figur 9-5c og d) består kun i det miocæne lag af lerede facies. De trænger hhv. 53 % og 57 % ned i laget. Boring med DGU nr. 131.1215, som ligger tæt på boring 131.1214, trænger knap 50 % ned i laget og består inden for laget udelukkende af finkornet sand. Da disse boringer kun består af samme teksturklasse inden for det miocæne lag, giver det ud fra disse boringer ikke anledning til nogen anisotropi. Nord for den østlige rand af TZ 7 findes boring med DGU nr. 131.1199 (Figur 9-5d), som har vekslende lerede og finkornede sand facies. For denne boring er den horisontale til vertikale anisotropi estimeret til at være 23. Dette anses for at være mere repræsentativt for TZ 7.

Samlet for Klasse 1

Da der findes en kraftig deformation i denne zone, må det antages, at der er en væsentlig anisotropi i det horisontale plan (x-y). Det må formodes, at vandet vil strømme bedre langs den foretrukne orientering af forkastningerne og at det er for denne retning, at den estimerede horisontale til vertikale anisotropi gælder. Hvad størrelsesorden af anisotropi mellem to komponenter i det horisontale plan er, må vurderes ud fra modelleringsscenerier.

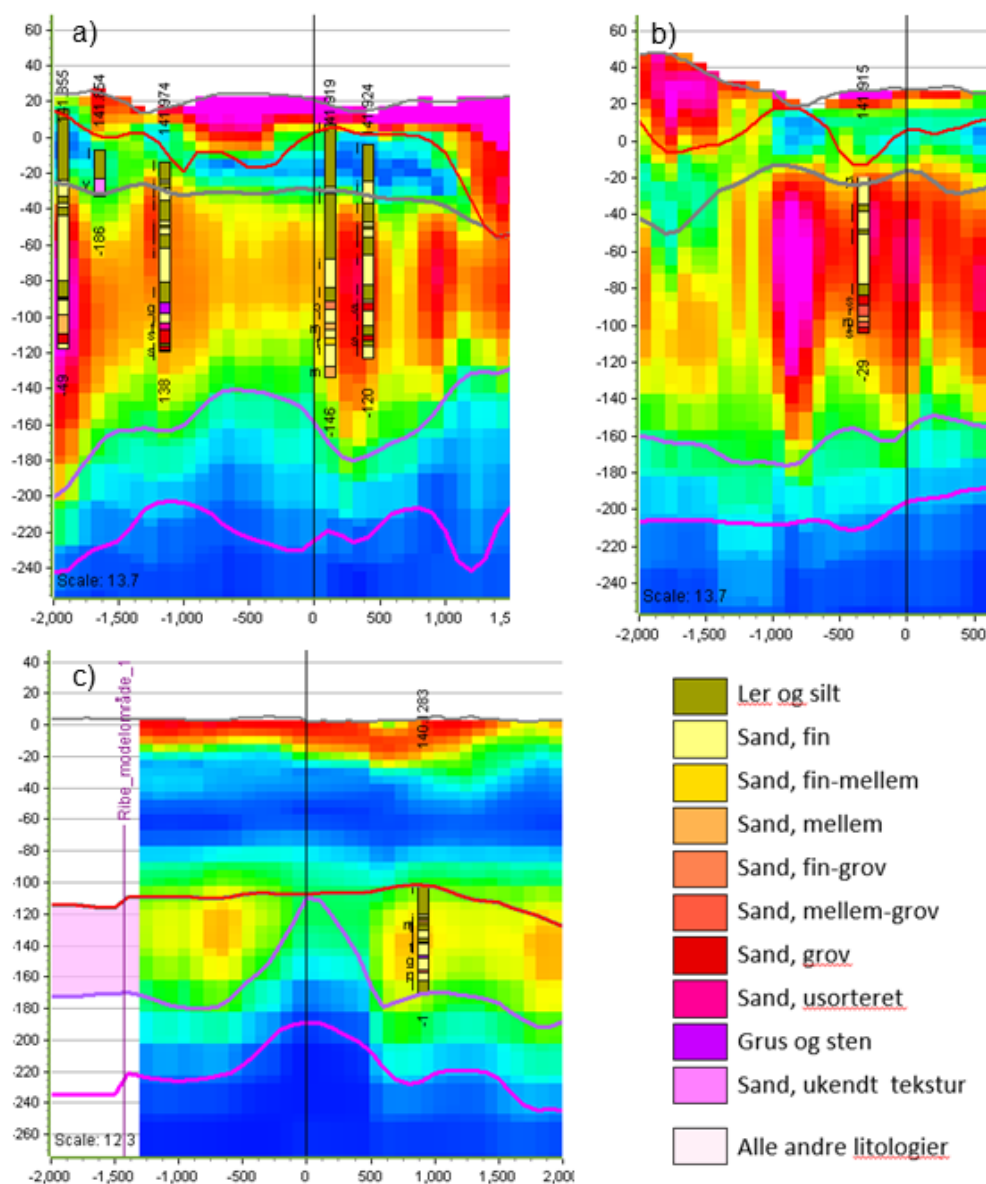
Klasse 2: Moderat deformation

TZ 2: Horisontal til vertikal anisotropi i den vestlige del af Rødding Bakkeø

I TZ 2 findes fire boringer (DGU nr. 141.974, 141.919, 141.924 og 141.915), som strækker sig fra 58 % til 76 % ned i det miocæne lag (Figur 9-6a, b). De formodes til sammen at repræsentere lagserien i det meste af det miocæne lag. Dog vil de mere lerede facies, som formodes at være til stede i de dybere dele, ikke være inkluderet i de estimerede anisotropifaktorer. Et aritmetisk gennemsnit på 44 for anisotropien for den horisontale til vertikale komponent anvendes for hele denne TZ-zone.

TZ 10: Hedesletten nordøst-øst for Ribe

I TZ 10 er der en boring (DGU nr. 140.1283, Figur 9-6c), som ligger i den vestlige del af området og når 74 % ned i det miocæne lag. Boringen anses for at være repræsentativ for zonen. Anisotropifaktoren for den horisontale til vertikale komponent er estimeret til 36.



Figur 9-6: Teksturklasser for (a) boringer med DGU nr. 141.974, 141.919, 141.924 i TZ 2, (b) boring med DGU nr. 141.915 i TZ 2 og (c) boring med DGU nr. 140.1283 i TZ 10. Det er kun den miocæne del af lagserien der vises i boringerne. Baggrund er SkyTEM 3D resistivitsgriddet. Fed grå streg markerer toppen af det miocæne lag og lilla fed streg markerer bunden af det miocæne lag. Resistivitsfarveskala ses i Figur 3-4 og boringernes placering vises på Figur 9-4.

Samlet for Klasse 2

Deformationsgraden er moderat i denne zone, så det må formodes, at der kan forekomme en anisotropi mellem de to komponenter af hydrauliske ledningsevne i det horisontale plan. Denne anisotropi må antages at være mindre end en sådan i zonerne med kraftig deformation.

Klasse 3: Begrænset deformation

TZ 4: Horisontal til vertikal anisotropi i Holsted Bakkeøys sydlige del

I TZ 4 er der to boringer (Figur 9-7a og b), som rækker mere end halvvejs gennem det miocæne lag. Boring med DGU nr. 132.2118, når 51 % ned i laget, mens boring med DGU

nr. 132.1835 når hele vejen gennem laget. Derfor vælges det at lade boring med DGU nr. 132.1835 repræsentere TZ 4. Anisotropi for denne boring er 44 og den ligger også centralt i zonen.

TZ 5: Horisontal til vertikal anisotropi i nordvestlig del af Rødding Bakkeø

I TZ 5 er der en boring (DGU nr. 141.855, Figur 9-7c), som ligger i den sydlige del af området og den når 51 % ned i det miocæne lag. Der er fortsat relativt høje resistiviteter i resten af laget, så det kan antages, at boringen kan repræsentere hele laget. Anisotropi for denne boring er 28.

TZ 6: Horisontal til vertikal anisotropi i sydvestlig del af Rødding Bakkeø

I TZ 6 er der en boring (DGU nr. 141.824, Figur 9-7d), som ligger i den sydlige del af området og den når 65 % ned i det miocæne lag. Boringen ligger i den sydligste spids af området. Boringen når ikke ned i de dybeste dele af laget, som må forventes at være mere lerede. Områdets facies bliver mere lerede i den vestlige del, mens den østlige del måske har lag af Bastrup flodslettesand, som det ses i Gram boringen (DGU nr. 141.852) øst for området og i Rødding Præsteskovens boringen (DGU nr. 141.1141) nordøst for området (Kristensen et al, 2015).

Anisotropifaktoren for den horisontale til vertikale komponent er estimeret til 46 i boringen (DGU nr. 141.824) i TZ 6, mens anisotropifaktoren er estimeret til 47 i Gram boringen (DGU nr. 141.852). Da anisotropifaktoren fra disse to borer stort set er ens, antages det at boringen i TZ 6 er repræsentativ for hele zonen.

TZ 8: Horisontal til vertikal anisotropi i nordlig del af Toftlund Bakkeø

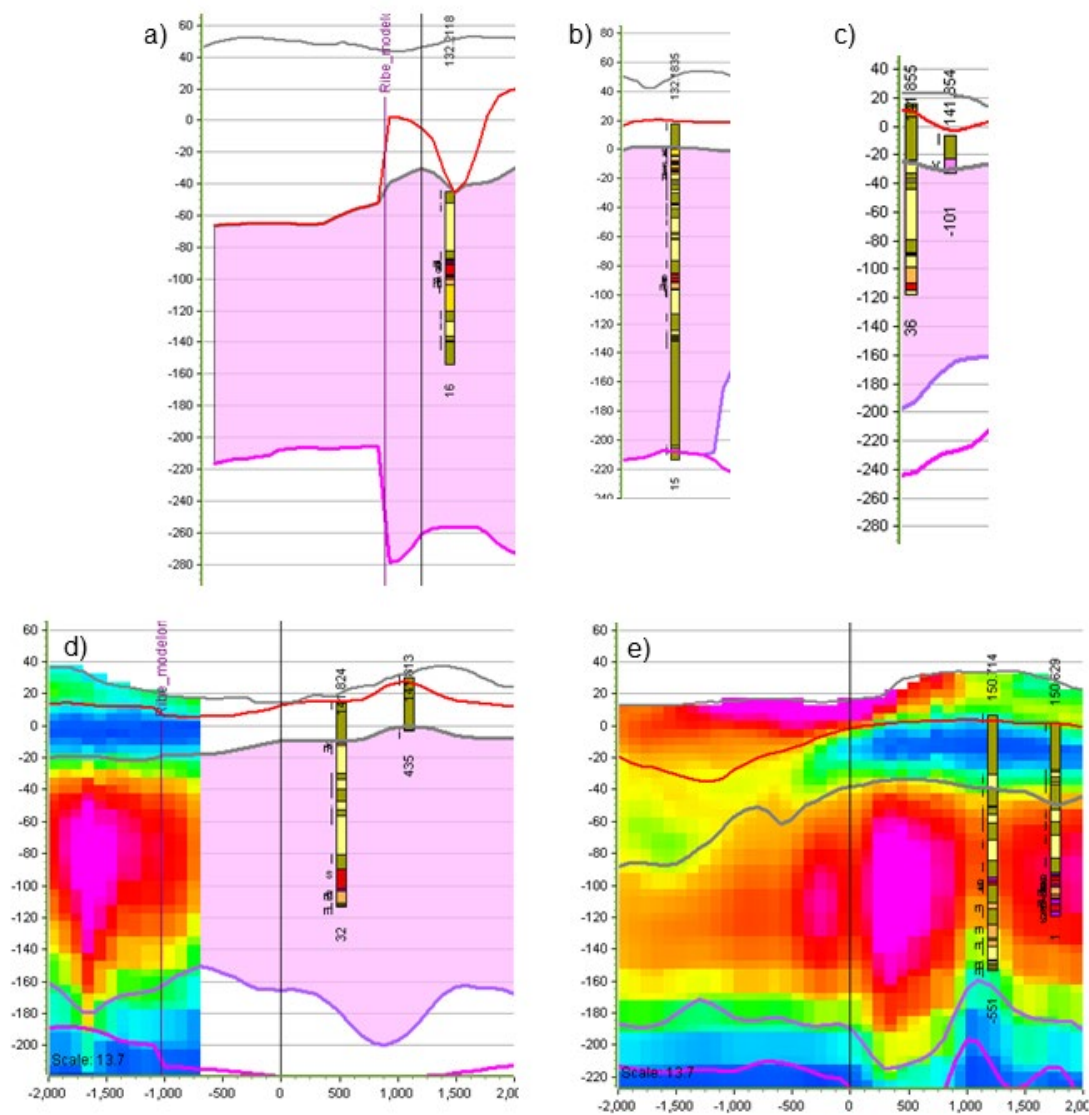
I TZ 8 er der to borer (Figur 9-7e), som rækker dybere end halvvejs gennem det miocæne lag. Boring med DGU nr. 150.629, når 52 % ned i laget, mens boring med DGU nr. 150.714 når 77 % ned i laget. Det må antages, at begge borer er repræsentative for TZ 8. Den horisontale til vertikale komponent af anisotropien er hhv. på 101 og 56, hvilket giver et aritmetisk gennemsnit på 79, som anvendes.

TZ 9: Horisontal til vertikal anisotropi i Ribe og Toftlund Bakkeø

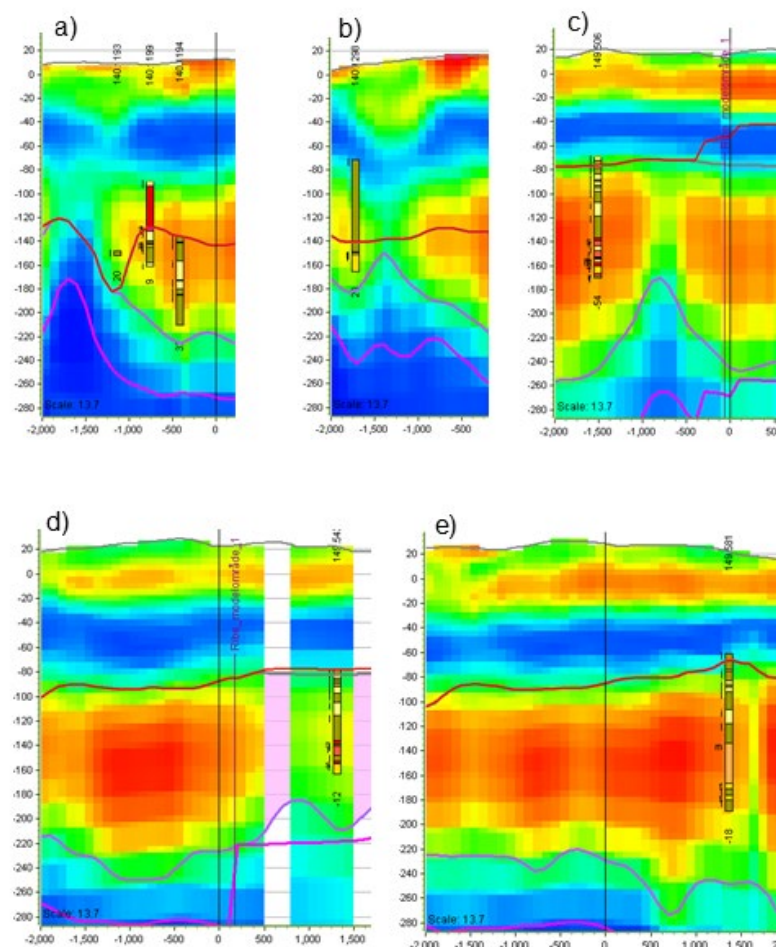
I TZ 9 er der fem borer (DGU nr. 140.1194, 140.1298, 149.506, 149.543 og 149.581, Figur 9-8) som når mere end halvvejs ned i det miocæne lag - hhv. 86 %, 61 %, 55 %, 60 % og 62 %. De vurderes alle at være repræsentative for TZ 9. Den horisontale/vertikale komponent af anisotropien ligger mellem 23 og 54, hvilket giver et aritmetisk gennemsnit på 79.

Samlet for klasse 3

Deformationsgraden er begrænset i denne zone, så det må formodes, at en anisotropi mellem de to komponenter af hydrauliske ledningsevne i det horisontale plan er uden betydning eller lille.



Figur 9-7: Teksturklasser for (a) boring med DGU nr. 132.2118 (b) DGU nr. 132.1835 i TZ 4, (c) for boring med DGU nr. 141.855 i TZ 5, (d) for boring med DGU nr. 141.824 i TZ 6, og (e) borer med DGU nr. 141.714 og 150.629 i TZ 8. Det er kun den miocæne del af lagserien, der vises i borerne. Baggrund er SkyTEM 3D resistivitetsgriddet eller laget vist med lyserød udfyldning. Fed grå streg markerer toppen af det miocæne lag og lilla fed streg markerer bunden af det miocæne lag. Resistivitetsfarveskala ses i Figur 3-4, legende for teksturklasser ses i Figur 9-6 og borerne placering vises på Figur 9-4.

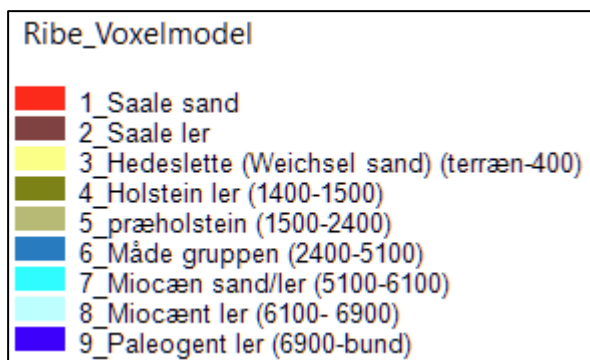


Figur 9-8: Teksturklasser for (a) borer med DGU nr. 140.1194, (b) DGU nr. 140.1298, (c) DGU nr. 149.506, (d) DGU nr. 149.543 og (e) DGU nr. 149.581, alle i TZ 9. Det er kun den miocæne del af lagserien der vises i borerne. Baggrund er SkyTEM 3D resistivetsgriddet. Fed grå streg markerer toppen af det miocæne lag og lilla fed streg markerer bunden af det miocæne lag. Resistivitetsfarveskala ses i Figur 3-4, legende for teksturklasser ses i Figur 9-6 og boringernes placering vises på Figur 9-4.

9.4 Voxelman til brug for hydrologisk modellering

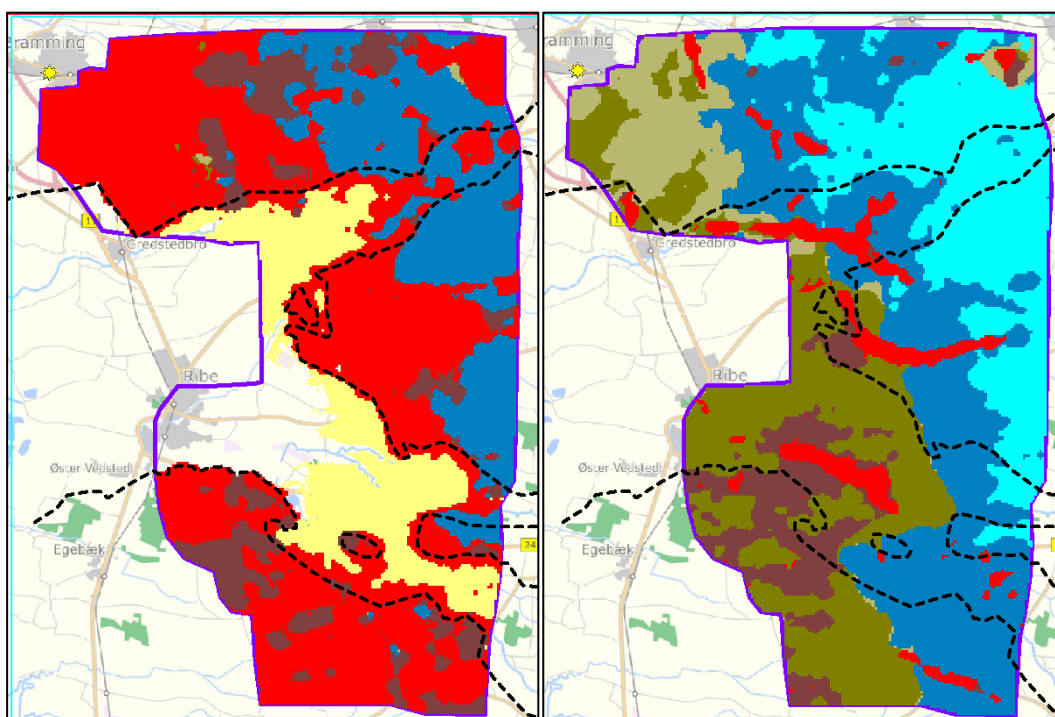
Det viste sig vanskeligt i den hydrologiske modellering at operere med kun én enhed (Saale enheden), der er defineret som voxler, mens resten af modellen er defineret i lag. Den geologiske model er derfor konverteret til en voxelmodel i et rektangulært grid fra kote 80 til -200 m. Dette er gjort ved at udfylde modellen med voxler mellem de modellerede laggrænser. Voxelmodellen er diskretiseret ligesom Saale-griddet, dvs. med 100*100*5m. Voxelmodellen er navngivet 'Ribe voxelmodel' i Geoscene projektet og refererer til filen 27092024_Ribe_Voxelmodel.grd3.

Farveskalaen for voxelgriddet ses på Figur 9-9, ligesom forkortelserne for de enkelte betegnelser angiver, hvilke flader, der er benyttet ved voxel-udfyldningen. Voxel-udfyldningen er foretaget i samme intervaller, som er benyttet ved opstillingen af lagene til visning i Geoscene3D.



Figur 9-9. Farveskala for voxelgriddet

Voxelmodellen ligger også i Geoscene-projektet, hvor horisontale snit igennem modellen kan bidrage til et rumligt overblik over modellen (Figur 9-10).



Figur 9-10. To horisontale snit gennem voxelmodellen. Tv: Horisontalt snit gennem voxelmodellen i kote 7,5 m, Th: Horisontalt snit gennem voxelmodellen i kote -27,5 m. For legende se Figur 9-9.

10. Referencer

- Aber, J.S. & Ber, A., 2007. Glaciotectonism. *Developments in Quaternary science* / 6, 246 pp. Elsevier, Amsterdam. ISBN: 9780444529435.
- Andersen, L. T., 2004. The Fanø Bugt Glaciotectonic Thrust Fault Complex Southeastern Danish North Sea. A study of large-scale glaciotectonics using high resolution seismic data and numerical modelling. Ph. D. thesis 2004, GEUS rapport 2004/30.
- Balbarini, N., Frederiksen, M., Rønde, V., Møller, I., Sonne, A. T., McKnight, U. S., Pedersen, J. K., Binning, P. J. & Bjerg, P. L. (2020). Assessing the Transport of Pharmaceutical Compounds in a Layered Aquifer Discharging to a Stream. *Groundwater*, 58(2), 208–223. <https://doi.org/10.1111/gwat.12904>.
- Binzer, K. & Stockmarr, J., 1994. Prækvarteroverfladens højdeforhold. *Danm. Geol. Unders. Kortserie Nr. 44*.
- Britze, P. & Japsen, P., 1991. Geological map of Denmark 1: 400,000. The Danish Basin. "Top Zechstein" and the Triassic (two-way travelttime and depth, thickness and interval velocity). Geological Survey of Denmark Map Series 31. 4 maps and 4 pp.
- Bruun-Petersen, J., 1990. Det brune grundvand i Ribe amt. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1987-89*, side 103-107, København 15. januar 1990.
- Clausen, O.R., Nielsen, S.B., Egholm, D.L. & Gołędowski, B. (2012). Cenozoic structures in the eastern North Sea Basin — A case for salt tectonics. *Tectonophysics* 514–517 (2012) 156–167.
- COWI, 2007. Seismisk kortlægning mellem Holsted og Vejen. Rapport. Udført for Ribe Amt.
- COWI, 2008. Refleksionsseismisk undersøgelse mellem Skærbæk og Vamdrup. Rapport, November 2008. Udarbejdet for Miljøcenter Ribe.
- Damsgaard, A. & Makwarth, S., 2020. Borehole quality assessment of boreholes in the Jupiter Database. Udarbejdet af Miljøstyrelsen (https://gitlab.com/mst-gko/borehole_quality).
- EUGENO S Working Group 1988. Crustal structure and tectonic evolution of the transition between the Baltic Shield and the North German Caledonides (the EUGENO-S Project). In: R. Freeman, A. Berthelsen and St. Mueller (Editors), *The European Geotraverse, Part 4. Tectonophysics*, 150: 253-348.
- Fiandaca, G., Maurya, P.K., Balbarini, N., Hördt, A., Christiansen, A.V., Foged, N., Bjerg, P. L., & Auken, E., 2018. Permeability Estimation Directly From Logging-While-Drilling Induced Polarization Data. *Water Resources Research*, 54(4), 2851–2870. <https://doi.org/10.1002/2017WR022411>.

Freeze, A.R & Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA, 604 pp.

Friborg, R. & Thomsen, S., 1999. Kortlægning af Ribe Formationen. Et fællesjysk grundvandssamarbejde. Teknisk rapport, 76 s. Tønder 1999. ISBN 87-7486-359-2.

Friborg, R., Kirsch, R., Scheer, W., Stoepker, K. & Thomsen, S. 2002. Grundvand til Sønderjylland og Schleswig - Grundwasser für Sønderjylland und Schleswig (In Danish and German). Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein & Sønderjyllands Amt, Teknisk Forvaltning. Maj 2002, Tønder. ISBN: 3-923339-76-3.

Gravesen, P., Jakobsen, P.R., Binderup, M. & Rasmussen, E.S., 2004. Geologisk set – Det sydlige Jylland. Miljøministeriet – Skov- og Naturstyrelsen. Geografforlaget, 188 p.

Hansen, M., & Pjetursson, B. (2011). Free, online Danish shallow geological data. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 23, 53-56. <https://doi.org/10.34194/geusb.v23.4842>.

Houmark-Nielsen, M., Knudsen, K.L. og Noe-Nygaard, N., 2006. Istider og mellemistider. In Naturen i Danmark – Geologien, Jensen KS (ed). Gyldendal: Danmark; 255–301.

Houmark-Nielsen, M., 2007. Extent and age of Middle and Late Pleistocene glaciations and periglacial episodes in southern Jutland, Denmark. Bull. Geol. Soc. Denm., Vol. 55, pp. 9-35.

Houmark-Nielsen, M. 2010. Extent, age and dynamics of Marine Isotope Stage 3 glaciations in the southwestern Baltic Basin. Boreas, Vol. 39, pp. 343–359. 10.1111/j.1502-3885.2009.00136.x. ISSN 0300-9483.

Houmark-Nielsen, M., 2011. Pleistocene Glaciations in Denmark: A Closer Look at Chronology, Ice Dynamics and Landforms. Developments in Quaternary Science. Vol. 15, doi: 10.1016/B978-0-444-53447-7.00005-2 ISSN: 1571-0866, # 2011 Elsevier.

Huang, L., & Liu, C.-y. (2017). Three types of flower structures in a divergent-wrench fault zone. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 10,478–10,497. <https://doi.org/10.1002/2017JB014675>.

Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Piotrowski, J. A., & Jakobsen, P. R. (2013). Deeply rooted glaciotectonism in western Denmark: geological composition, structural characteristics and the origin of Varde hill-island. Journal of Quaternary Science, 28(7), 683-696. <https://doi.org/10.1002/jqs.2667>.

Japsen, P. & Langtofte, C., 1991a. Geologisk kort over Danmark. Det danske Bassin. "Basis Kalk" og Kalk Gruppen. Danmarks Geologiske Undersøgelse Kortserie nr. 29.

Japsen, P. & Langtofte, C., 1991b. Geologisk kort over Danmark, 1:400.000. Det danske Bassin. "Top Trias" og Jura-Nedre Kridt. Danmarks Geologiske Undersøgelse Kortserie nr. 30.

Jørgensen, F., Scheer, W., Thomsen, S., Sonnenborg, T. O., Hinsby, K., Wiederhold, H., Schamper, C., Burschil, T., Roth, B., Kirsch, R. & Auken, E. 2012. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 2629–2674, 2012.

Jørgensen, F., Sandersen, P., Høyer, A.-S., Møller, R. R., Pallesen, T. M., He, X., Kristensen, M., Sonnenborg, T. & von Platen-Hallermund, F., Oct 2014, København: GEUS. 182 p. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport No. 39/2014.

Knudsen, K.L., 1994. The marine Quaternary in Denmark: a review of new evidence from glacial – interglacial studies. *Bull. Geol. Soc. Denm.* 41, 203–218.

Knudsen, K.L., 1987. Foraminifera in the Late Elsterian – Holsteinian sequence at Tornskov in south Jutland, Denmark. *DGU Serie B* 10, 7–31.

Konradi, P.B., 2001. "Vejenbælt" et ældgammelt sund tværs over Jylland. *Geologi/Nyt fra GEUS*, 3/01, p. 6-7.

Konradi, P.B., Larsen, B. & Sørensen, Aa.B., 2005. Marine Eemian in the Danish eastern North Sea. *Quaternary International* 133–134 (2005) 21–31.

Kristensen, M., Vangkilde-Pedersen, T., Rasmussen, E.S., Dybkjær, K., Møller, I., & Andersen, L.T., 2015. *Miocæn 3D, opdateret 2015. Den rumlige geologiske model*. GEUS Rapport 2015/90, 320 s.

Lyngsø, S. 2007. Continental sutures and their influence on rifting in the North Sea. Thesis submitted to the Faculty of Sciences, University of Copenhagen for the Ph.D.-degree. January 2007. Geophysical Laboratory, Geological Institute, University of Denmark. 69 p.

Maurya, P. K., Balbarini, N., Møller, I., Rønde, V., Christiansen, A.V., Bjerg, P.L., Auken, E., & Fiandaca, G., 2018. Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization. *Geophysical Journal International*, 213(2), 770–785. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy018>

Mertz, E.L., 1977. Ribe og omegns jordbundsforhold. En ingeniør-geologisk beskrivelse. *Danm. Geol. Unders. Rapport* 11, 52 pp.

Meyer, R., Engesgaard, P., Høyer, A.S., Jørgensen, F., Vignoli, G., & Sonnenborg, T.O., 2018. Regional flow in a complex coastal aquifer system: Combining voxel geological modelling with regularized calibration. *Journal of Hydrology*, 562 (May), 544–563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.020>.

Penney, D.N., 1990. Microfossils (Foraminifera, Ostracoda) from an Eemian (Last Interglacial) tidal flat sequence in south-west Denmark. *Quaternary International*, 3/4 (1989), pp. 85-91.

Rambøll, 2013. SkyTEM – Holsted St. og Tobøl Vandværk. Processering, tolkning og afrapportering. Rambøll A/S. Udarbejdet for Naturstyrelsen Ribe, Rapport ID 95421.

Rasmussen, L.B., 1966. Biostratigraphical studies on the younger Miocene of Denmark. *Geol. Surv. Denm*, II 88, 358.

Rasmussen, E. S., Dybkjær, K., and Piasecki, S., 2010. Lithostratigraphy of the upper Oligocene – Miocene section in Denmark: Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, v. 22, p. 93.

Rasmussen, E. S., & Dybkjær, K., 2020. The lower Miocene flint conglomerate, Jylland, Denmark: a result of the Savian tectonic phase. *GEUS Bulletin*, 44. <https://doi.org/10.34194/geusb.v44.4618>.

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*, Vol. 53, no. 4, pp. 229-249.

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*, Vol. 44, pp. 413–431. 10.1111/bor.12103. ISSN 0300-9483.

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*, Volume 293, 2022, 107681, ISSN 0277-3791, doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107681.

Sandersen, P.B.E., Gregersen, S. & Voss, P., 2021. Late- and Postglacial Faulting in Denmark. In: "Glacially-Triggered Faulting", eds.: Holger Steffen, Odleiv Olesen and Raimo Sutinen, Chapter 6.1, Cambridge University Press.

Sandersen, P.B.E., Jørgensen, F., Kallesøe, A.J., Møller, I., 2018. Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. GEO-VEJLEDNING 2018/1. GEUS Særudgivelse. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. www.geovejledning.dk.

Sjørring S, Frederiksen J. 1980. Glacialstratigrafiske observationer i de vestjyske bakkeøer. *Dansk Geologisk Forening* 1979: 63–77.

Smed, P., 1982. Landskabskort over Danmark, blad. 3, Sønderjylland og Fyn, Geografforlaget.

Sonnenborg, T.O., Scharling, P.B., Hinsby, K., Rasmussen, E.S., & Engesgaard, P. (2016). Aquifer Vulnerability Assessment Based on Sequence Stratigraphic and (39) Ar Transport Modeling. *Ground Water*, 54(2), 214–230. <https://doi.org/10.1111/gwat.12345>.
Sorgenfrei, T., & Buch, A. (1964). Deep Tests in Denmark 1935-1959. Danmarks Geologiske Undersøgelse III. Række, 36, 1–146. <https://doi.org/10.34194/raekke3.v36.6941>.

Steffen, H., Olesen, O., Sutinen, R., 2021. Glacially triggered faulting: a historical overview and recent developments. In: Steffen, H., Olesen, O., Sutinen, R. (Eds.), *Glacially-Triggered Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-19. <https://doi.org/10.1017/9781108779906.003>.

Stewart, I.S., Sauber, J., Rose, J., 2000. Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity. *Quat. Sci. Rev.* 19, 1367-1389.

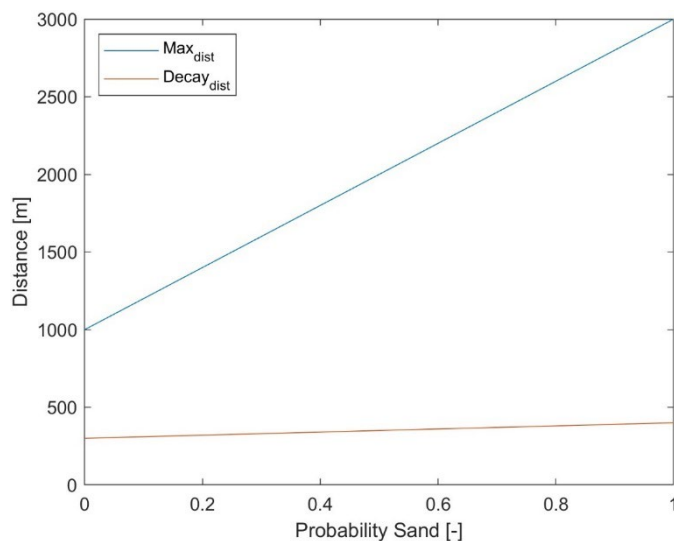
Ter-Borch, N., 1991. Kalkoverfladens struktur. DGU Kortserie nr. 7.

Vejbæk, O. V. og Britze, P., 1994. Top pre-Zechstein, geological map of. Denmark 1:750.000, DGU Kortserie, 45, 9 pp.

Bilag 1: Udbredelsesmatricer for boringsinformationen i voxel-modelleringen

Udbredelsesmatricerne definerer det område og den vægt, som en celle med information påvirker de omgivende celler med. Potentielt kan udbredelsesmatricerne have enhver tænkelig form, hvis informationer er tilgængelige til at lave sådanne generelle slutninger om strukturer. I geologi forventer vi oftest mere lateral udbredelse end vertikal, dvs. vi forventer lag frem for søjler. Dette integreres i modellen gennem udbredelsesmatricen, der i dette tilfælde er symmetrisk i x,y planen, defineret ved en *maksimal udbredelsesafstand* ($\max_{dist}$), hvor udbredelseslængden i vertikal (z) retningen defineres ud fra et *horisontalt til vertikale forhold* (HV).

Saale-enheden omkring Ribe er en generelt sandet enhed med mindre indslag af ler. De lerede enheder forventes derfor at have en mindre lateral udbredelse end den sandede klasse. Dette indbygges ved at $\max_{dist}$ varierer med sandsynlighedsfordelingerne i datacellerne. I Figur 1, herunder, viser den blå linje den maksimale udbredelsesafstand som funktion af sandsynligheden for sand (P_{sand}), hvilket svarer til $1 - P_{ler}$, da vi kun arbejder med to klasser. Det kan ses, at den maksimale udbredelse af en celle med $P_{ler} = 1$ vil være 1000 meter, hvorimod en celle, hvor $P_{sand} = 1$, er 3000 meter. I modellen vil sandsynlighedsfordelingen i en datacelle altid være et sted imellem, og her findes de maksimale udbredelsesværdier efter en lineær funktion mellem disse to yderpunkter.



Figur 1. Variationer i udbredelses parameter med sandsynligheden af sand.

Den vertikale udbredelse er holdt konstant ved at udregne et 'horisontalt til vertikalt forhold' og definere en konstant vertikal udbredelse:

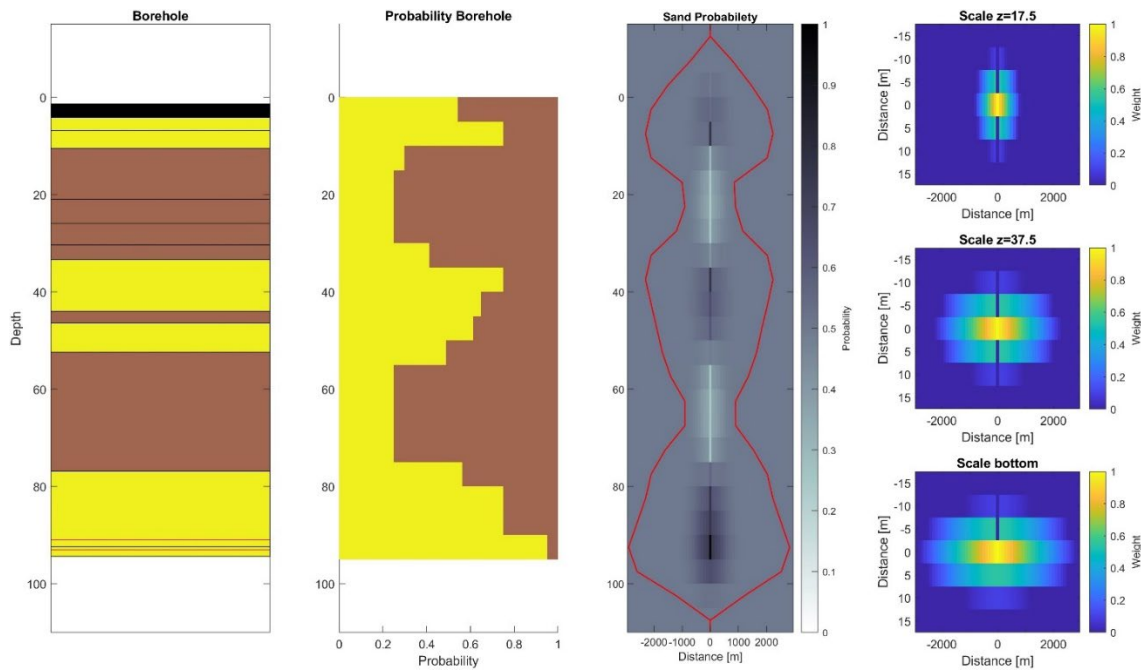
$$HV = \max_{dist} / d_{vertikal}$$

Hvor $d_{vertikal}$ er den vertikale udbredelses distance og i modelleringen er $d_{vertikal} = 11$.

Med HV_{ratio} og max_{dist} defineres en udbredelses matrix baseret på afstanden mellem cellerne, hvor Z komponenten vægtes med HV . Værdien i en celle udregnes som:

$$impact(x, y, z) = \frac{max_{dist} - \sqrt{(x - x_{data})^2 + (y - y_{data})^2 + (z - z_{data})^2} * HV^2}{max_{dist}}$$

Hvor impact er vægten i en celle i udbredelsesmatricen, max_{dist} er den maksimale udbredelsesafstand, x, y, z er x, y og z koordinaterne for en celle (centrum af cellen), $x_{data}, y_{data}, z_{data}$ er koordinaterne for cellen med data og HV er ratioen mellem den horisontale og den vertikale udbredelse. I tilfælde hvor impact er negativ, vil cellen med koordinaterne x, y, z ligge længere væk end max_{dist} , og dermed sættes impact = 0. Da vi arbejder vertikalt langs en boring og ikke ønsker, at cellerne påvirker de andre data celler i boringen, sætter vi også impact = 0 for celler lige under eller lige over data cellen (dvs. $x = x_{data}$ & $y = y_{data}$) undtagen for den dybest liggende datacelle i boringen, der også får et impact på cellerne under. Figur 2d, viser eksempler på snit gennem de tredimensionale udbredelsesmatricer fra tre dataceller i boringen. Det kan ses, hvordan disse varierer med forskellige litologier, og hvordan udbredelsesmatricen for den nederste datacelle også giver en udbredelse nedefter.



Figur 2: Udbredelsen af sandsynligheder i rummet. Fra venstre mod højre vises søjlerne a) litologi fra borehullet, b) sandsynlighedsfordelingen baseret på boringsinformationen. d) et snit gennem datacellerne gennem det lokale sandsynlighedsgrid for boringen, der viser, hvordan informationen fra en boring er bredt ud i rummet. Den røde linje viser det område, som boringsinformationen indvirker på, d) snit gennem 3 udbredelses matricer fra 3 forskellige dataceller ved forskellige dybder. Det ses, hvordan kun den nederste har udbredelse ned ad langs boringen.

Med vægten fra udbredelsesmatricen udbredes nu sandsynlighedsfordelingerne i hver celle i det lokale boringsgrid. Dette udregnes som et vægtet gennemsnit.

$$P_{avg_i} = \frac{\sum_{d=1}^n P_{id} * W_{id}}{\sum_{d=1}^n w_d}$$

Hvor $P_{avg_{ij}}$ er den nye sandsynlighed i en celle for den i 'te litologiklasse, P_{id} er sandsynligheden for den i 'te lithologi klasse i den d 'th datacelle, der påvirker cellen, og w_d er vægten fra udbredelsesmatricen, der hører til den d 'th datacelle. Kun at regne sandsynlighederne i det lokale grid som et vægtet gennemsnit ville betyde, at celler der kun bliver påvirket af én litologi får uhensigtsmæssigt høje sandsynligheder for denne kategori. Vi tilføjer derfor en aftagende sandsynlighed med distance væk fra boringen.

Den aftagende sandsynlighed med afstand fra datapunkter defineres ud fra en skaleringsfaktor (dec), der varierer fra 0-1, hvor 0 betyder at sandsynlighedsfordelingerne bliver uniform og 1 betyder, at det vægtede gennemsnit ikke påvirkes. Formen på den aftagende sandsynlighed med afstanden er defineret på baggrund af et gausisk variogram med en nugget. Dog anvendes nugget ikke i datacellen og denne påvirkes derfor ikke. Dette skal ikke ses som et variogram i kriging-forstand, men at denne form er anvendt til skaleringsfunktionen. En nugget giver en skarp forskel i sandsynlighederne i dataceller sammenlignet med de interpolerede celler, da vi grundlæggende er meget mere usikre i celler uden data end i celler med.

Skaleringsfaktoren defineres ud fra afstanden til den nærmeste datacelle. I hver dybde der indeholder en datacelle, vil den nærmeste datacelle være den i samme dybde. Derfor regnes der for hver dybde skaleringsværdier som funktion af afstande i x,y planet. Denne er defineret ved en nugget og en gauss-funktion defineret ved en mean og standardafvigelse kaldet $decay_{dist}$. Mean er altid sat til 0, $decay_{dist}$ varierer tilsvarende max_{dist} med sandsynligheden for litologiklasserne i datacellen i denne dybde. Nugget-værdien er sat konstant til 0.6 i alle dataceller. Variationen $decay_{dist}$ kan ses i Figur 3. Den gaussiske form på skaleringsfaktoren kan beregnes som:

$$dec_{shape}(dist) = \frac{1}{decay_{dist} * \sqrt{2\pi} * \exp\left(-\frac{1}{n_{lith}}\right) * \left(\frac{dist}{decay_{dist}}\right)^2}$$

Hvor $dec_{shape}(dist)$ er den gaussiske form som funktion af distancen af afstanden i x,y planet, $decay_{dist}$ er en standardafvigelse, der definerer bredden på den gaussiske form, n_{lith} er antallet af litologiklasser, og $dist$ er afstanden i x,y planet.

Da dataudbredelsesmatricen også påvirker celler over og under datacellerne vil der forekomme lag i det lokale boringsgrid uden dataceller (forekommer kun over og under søjlen af dataceller fra en boring), hvilket der skal tages højde for. Dette gøres ved at variere nugget med Z afstanden væk fra nærmeste datacelle, mens $decay_{dist}$ holdes konstant med samme værdi som den nærmeste datacelle i dybden (Z afstanden). Dermed anvendes også den samme dec_{shape} som for nærmeste lag. Variationerne i nugget beregnes som:

$$nug_{no\ data}(z_{dist}) = \frac{nug_z * Z_{dist}}{d_{vertikal}} + (1 - nug_z)$$

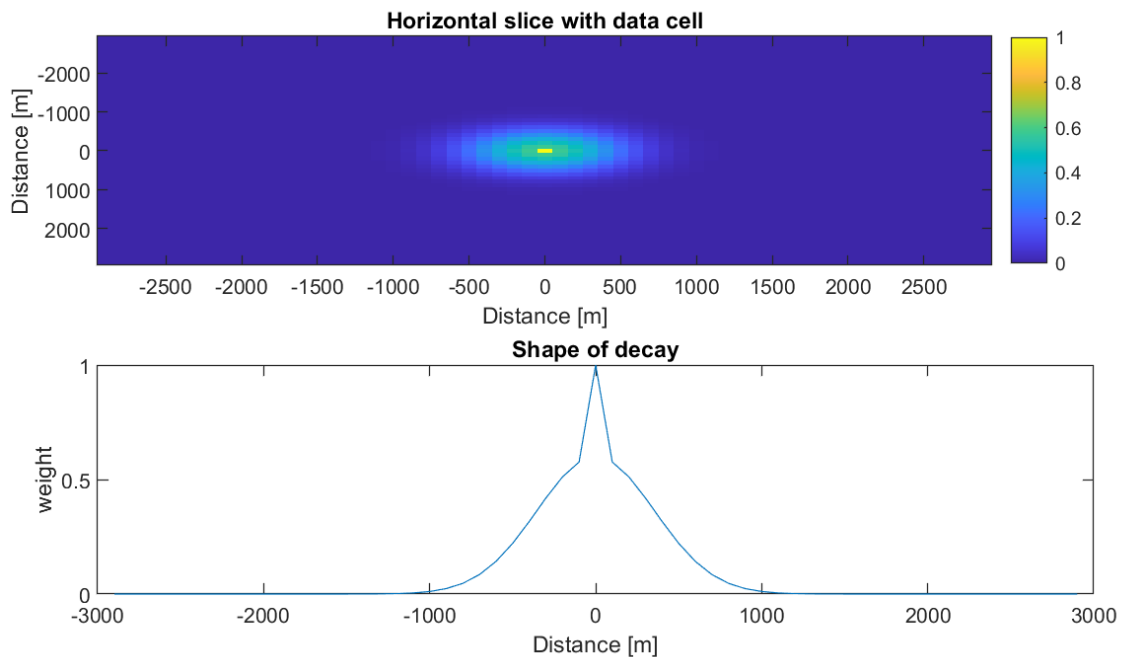
Hvor $nug_{no\ data}$ er den nye nugget i en dybde uden datacelle, nug_z er nuggetværdien i den nærmeste datacelle i dybderetningen, Z_{dist} er afstanden i dybden til nærmeste datacelle og $d_{vertikal}$ er udbredelsesafstanden i dybderetningen. I tilfælde af at $nug_{no\ data}$ bliver negativ

sættes den til 0, da dette betyder, at laget ligger længere væk end den valgte vertikale udbredelse, og derfor forekommer der ikke celler med påvirkning af udbredelsesmatricen

Skaleringsværdierne beregnes så ved at normalisere dec_{shape} til at variere mellem 0-1 med den valgte nugget. Hvilket beregnes som

$$dec(dist) = nug - \left(\frac{nug * (dec_{shape} - \max(dec_{shape})) + nug}{\max(dec_{shape}) + \min(dec_{shape})} \right)$$

I modelleringen af Saale aflejringerne er der valgt en nugget på 0,6 for alle datapunkter, der resulterer i en form, som kan ses i Figur 3. Her ses det, at datacellen ikke påvirkes, og at første celle væk fra datacellen får en dec-værdi på nuggetværdien 0,6.



Figur 3. Skaleringsværdier for den aftagende sandsynlighed med afstand. Øverst vises skaleringsværdierne i et lag i det lokale boringsgrid. Nederst vises formen af et snit gennem data cellen. Det ses, hvordan der ikke ændres på sandsynlighedsfordelingen i datacellen, men at skalerings værdien aftager skarpt til nabo cellerne, hvorefter den følger den gaussiske form.

Herefter er den faldende sandsynlighed med afstand fuldt defineret, og det endelige lokale sandsynlighedsgrid omkring en boring kan beregnes i hver celle som:

$$P_i = Pavg_i + \left(\frac{1}{n_{lith}} - Pavg_i * dec \right)$$

Hvor P_i er sandsynligheden for den i'te litologiklasse i en celle, $Pavg_i$ er sandsynligheden baseret på vægtet gennemsnit, n_{lith} er antallet af litologi klasser og dec er skaleringsfaktoren. Efter denne beregning omkring en boring har man et lokalt sandsynlighedsgrid. Et eksempel på et snit gennem et lokalt sandsynlighedsgrid for sandklassen omkring en boring kan ses i Figur 2C. For at fremhæve, hvor langt informationen fra boringen er udbredt, er der tilføjet en rød linje ved den afstand, som boringen påvirker. Det ses her tydeligt, hvordan

sandede dataceller påvirker celler meget længere ud, men også at deres påvirkning på lang afstand er meget lille.

De lokale grids kombineres i det fulde grid, hvor de behandles om uafhængige datakilder. Derfor beregnes der fælles sandsynligheder på alle overlappende celler mellem lokale grids. Resten af modellen fyldes ud med uniforme sandsynlighedsfordelinger, da vi i disse celler ingen information har. Dette danner en model baseret kun på baggrund af boringer.