

3D geologisk model ved Tønder

Flemming Jørgensen, Peter Sandersen, Anne-Sophie Høyer, Rasmus Rønde Møller,
Tom Martlev Pallesen, Xiulan He, Margrethe Kristensen, Torben Sonnenborg &
Frants von Platen-Hallermund

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



3D geologisk model ved Tønder

Flemming Jørgensen, Peter Sandersen, Anne-Sophie Høyer, Rasmus Rønde Møller,
Tom Martlev Pallesen, Xiulan He, Margrethe Kristensen, Torben Sonnenborg &
Frants von Platen-Hallermund

Indholdsfortegnelse

1.	Baggrund	9
2.	Modelområde	11
3.	Eksisterende geologisk viden	13
3.1	Trin 1-kortlægning	13
3.2	Geologiske hovedtræk	14
3.3	Overordnet landskabs- og lineamentanalyse	14
3.4	Kalk og Palæogen.....	16
3.5	Miocænet	17
3.5.1	Ribe-Gruppen.....	17
3.5.2	Måde-Gruppen	18
3.6	Begravede dale.....	19
3.7	Den kvartære lagserie.....	22
4.	Oversigt over datagrundlag	25
4.1	Boringer	25
4.1.1	Datakvalitet	26
4.1.2	Boringsdybde	27
4.1.3	Supplerende information i Jupiter-databasen:.....	27
4.1.4	Nye undersøgelsesboringer	28
4.2	Geofysiske data	29
4.2.1	SkyTEM.....	29
4.2.2	Seismik.....	30
4.3	Øvrige geofysiske data og andre data	31
4.3.1	MEP	31
4.3.2	PACES.....	31
4.3.3	Tyngdedata	31
4.3.4	Topografiske data	31
5.	Modelkoncept	33
5.1	Overordnet beskrivelse af modelkoncept.....	33
5.2	Angivelse af tolkningsusikkerhed	34
5.3	Sammenligning med retningslinjer i vejledning	36
6.	Databehandling og fremgangsmåde for tolkning	39
6.1	Boredata	39
6.1.1	Jupiterdata	39
6.1.2	Nye undersøgelsesboringer inkl. logging	40
6.1.3	Rating af boringer til SSV og SGeMS	40
6.2	SkyTEM	42
6.2.1	Anvendelse i modellen	42
6.2.2	Konstruktion af 3D resistivitetsgrids	43
6.2.3	Farveskala.....	43

6.2.4	Forsøg med a priori.....	44
6.2.5	Eksempler på tolkning af SkyTEM-data	44
6.3	Seismik.....	47
6.3.1	Import og dataforberedelse.....	47
6.3.2	Miocæn stratigrafi	47
6.3.3	Andre eksempler på tolkning af seismik.....	49
6.4	Multielektrode profilering (MEP)	50
6.5	Hydrologiske data.....	50
7.	Procedurer for udarbejdelse af geologisk model	51
7.1	Lagmodel.....	51
7.1.1	Modellering af lagflader.....	51
7.1.2	Delvist automatisk genererede lagflader.....	53
7.1.3	Justering af flader	53
7.1.4	Resampling af flader	53
7.1.5	Beskæring af flader.....	55
7.1.6	Kombination af flader.....	55
7.2	Voxelmodel.....	57
7.3	SSV	59
7.3.1	Oversigt over SSV-konceptet.....	59
7.3.2	Videreudvikling af SSV konceptet.....	60
7.3.3	SSV-kørsler	60
7.3.4	Konvertering af SSV griddet til et lithologisk grid	61
7.3.5	SSV-resultater	62
7.3.6	Manuel tilretning af SSV	64
7.4	Stokastisk modellering - SGeMS	69
7.4.1	Oversigt over SGeMS-metoden.....	70
7.4.2	Benyttet fremgangsmåde.....	71
7.4.3	SGeMS-resultater	75
7.5	Terrænanalyse	78
8.	Digital modelstruktur	79
9.	Beskrivelse af den geologiske model	83
9.1	Tektoniske rammer og den ældre lagserie	83
9.2	Terrænanalyse	86
9.3	3D model-indhold	91
9.3.1	Kridt	91
9.3.2	Palæogen	91
9.3.3	Bastrup Deltasand (BADS 9)	92
9.3.4	Klintinghoved Ler 9 og 10 (KRL9 og KRL10)	93
9.3.5	MRS Bastrup	94
9.3.6	Arnum Ler 2 og 3 (ARL 2 og 3)	95
9.3.7	Odderup Sand 2 og 3 (Ods 2 og 3).....	96
9.3.8	MRS Odderup	97
9.3.9	Måde Gruppen.....	97
9.3.10	Måde Gruppen, deformert.....	99

9.3.11	Basal decollement-flade	99
9.3.12	Prækvartær overfladen.....	100
9.3.13	Kvartæret	100
9.3.14	Begravede dale	100
9.3.15	Andre kvartære enheder i modellen	108
9.3.16	Kraftigt forstyrret lagserie (FLJ)	109
9.3.17	Hedeslette	110
9.3.18	Postglacial.....	110
9.3.19	Andre modellerede enheder.....	111
9.3.20	Kortfattet beskrivelse af voxelmodellen.....	111
10.	Fra geologisk model til grundvandsmodel	113
11.	Resume	115
12.	Diskussion	117
13.	Referencer	121

Liste over bilag

Bilag 1.	Symboliste, voxelmodel
Bilag 2.	Stratigrafisk skema
Bilag 3.	Lagflader, kort.....
1.	Top Kridt
2.	Top Palæogen
3.	Top Klintinghoved 9.....
4.	Top Bastrup Sand.....
5.	Top Klintinghoved 10.....
6.	MRS Bastrup
7.	Top Arnum Ler 2.....
8.	Top Odderup Sand 2
9.	Top Arnum Ler 3.....
10.	Top Odderup Sand 3
11.	MRS Odderup.....
12.	Basal decollementflade
13.	Top Måde.....
14.	Top Måde deformert.....
15.	Prækvarteroverfladen.....
16.	Bund hedeslette.....
17.	Bund Postglacial.....
18.	Bund Møgeltønder-dal.....
19.	Bund Løgumkloster 3-dal
20.	Bund Abild-dal
21.	Bund Højer-dal.....
22.	Bund Lydersholm-dal.....
23.	Bund Løgumkloster 2-dal
24.	Bund Tønder-Jejsing-dal
25.	Bund Løgumkloster 1-dal
26.	Saltvandsgrænse.....
Bilag 4.	Lagtykkelser, kort
1.	Palæogen ler
2.	Klintinghoved 9
3.	Bastrup Sand
4.	Klintinghoved 10
5.	Arnum Ler 2
6.	Odderup Sand 2
7.	Arnum Ler 3
8.	Odderup Sand 3
9.	Måde Gruppe
10.	Måde Gruppe deformert del
11.	Glacialtektonisk deformert enhed
12.	Hedeslette
13.	Postglacial
Bilag 5.	Profiler, begravede dale
1.	Abild og Højer-dale
2.	Møgeltønder og Løgumkloster 3-dale
3.	Lydersholm og Løgumkloster 2-dale

4.	Tønder-Jejsing og Løgumkloster 1-dale
Bilag 6.	Profilsnit gennem voxelmodel
1.	Profilsnit NS.....
2.	Profilsnit ØV
Bilag 7.	Horisontale snit gennem voxelmodel
1.	Horisontale snit, dybe.....
2.	Horisontale snit, øvre
Bilag 8.	Hydrauliske ledningsevner
Bilag 9.	Rutine til automatisering af fladetolkning

1. Baggrund

Denne rapport beskriver et udviklingsprojekt gennemført i et samarbejde mellem Naturstyrelsen og GEUS. Udviklingsprojektet omhandler opstilling af en 3D geologisk model, en hydrogeokemisk model og en grundvandsmodel. Denne afrapportering vedrører alene opstillingen af den geologiske 3D model.

Målet med projektet har været at udvikle og implementere nye metoder, der konkret adresserer en række særlige geologiske forhold og deraf følgende udfordringer.

Disse særlige udfordringer kan karakteriseres ved følgende:

- Området gennemskæres af en række forkastninger, hvoraf nogle gennemskærer lagserien helt til terræn.
- I store dele af området er lagserien i stor skala glacialtektonisk deformeret.
- Flere begravede dale af forskellige generationer gennemskærer lagserien til meget stor dybde.
- Lagserien i marsken og dermed i dele af modelområdet er overvejende saltvandsmættet og dermed svær at kortlægge med fladedækkende metoder.
- Den miocæne lagserie er forholdsvis kompleks med deltaudbygninger og kystnære facies.

Et andet delformål med projektet har været, at opstille en 3D geologisk model, der dels kan benyttes som en grundlæggende, opdateret model over områdets geologiske forhold baseret på grundvandskortlægningens nyindsamlede data, men som også samtidigt kan benyttes som input til en grundvandsmodel.

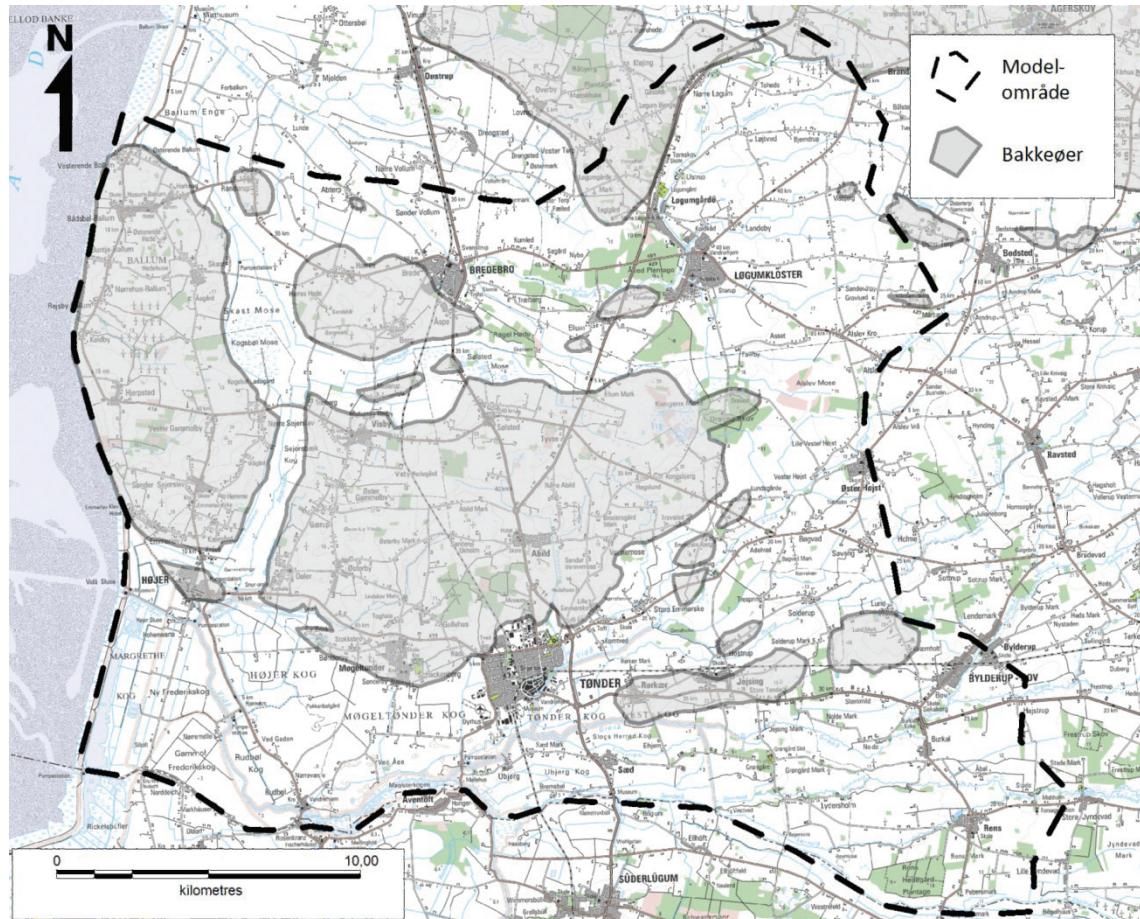
Naturstyrelsen ønsker i samarbejde med GEUS at få opstillet en geologisk model af høj kvalitet opstillet på trods af ovennævnte udfordringer. GEUS er i regi af andre projekter i gang med at udvikle metodikker til håndtering af samme eller relaterede problemstillinger, og har på denne baggrund ønsket at indgå dette samarbejdsprojekt med Naturstyrelsen.

Rapporten omfatter dels resultaterne af den konkrete geologiske model for Tønderområdet, og dels beskrivelse af den udvikling projektet har afstedkommet. Der er lagt vægt på både at vise og beskrive de udviklede modelkoncepter og tolkningsteknikker og på at beskrive den resulterende geologiske model for området.

Projektet er gennemført af Flemming Jørgensen, Peter Sandersen, Anne-Sophie Høyer, Rasmus Rønde Møller, Margrethe Kristensen, Torben Sonnenborg, Frants Von Platen-Hallermund, alle GEUS, samt Tom Martlev Pallesen, I-GIS, og Xiulan He, Københavns Universitet. Desuden har en række personer bidraget på forskellige områder og i forskellige faser af projektet.

2. Modelområde

Modelområdet er beliggende i den sydvestligste del af Jylland, afgrænset mod vest af Vadehavet og mod syd af den dansk-tyske grænse. Mod nord forløber grænsen fra Ballum Enge i vest og nord om Nørre Løgum, mens østgrænsen forløber ved Øster Højst og Bylderup Bov. Området er på ca. 625 km².



Figur 1: Tønder modelområde

Afgrænsningen af området er sket ud fra betragtninger omkring placeringen af OSD-områder samt at grundvandsmodellen skal kunne beregne en velafstemt vandbalance.

Områdets topografi er domineret af to terrænelementer: bakkeøer og de omkringliggende smeltevandssletter. Bakkeøerne, som har ligget eksponeret siden den forrige istid (Saale), (Figur 1), udgør områdets højeste områder. Bakkeøerne har et uregelmæssigt terræn, som står i kontrast til de omkringliggende, flade smeltevandsletter. Smeltevandssletterne udgør et samlet hele, som forløber fra den gamle Weichsel isrand øst for modelområdet og vestover til Vesterhavet. Overordnet set har sletten et fald på omkring 1,2 o/oo.

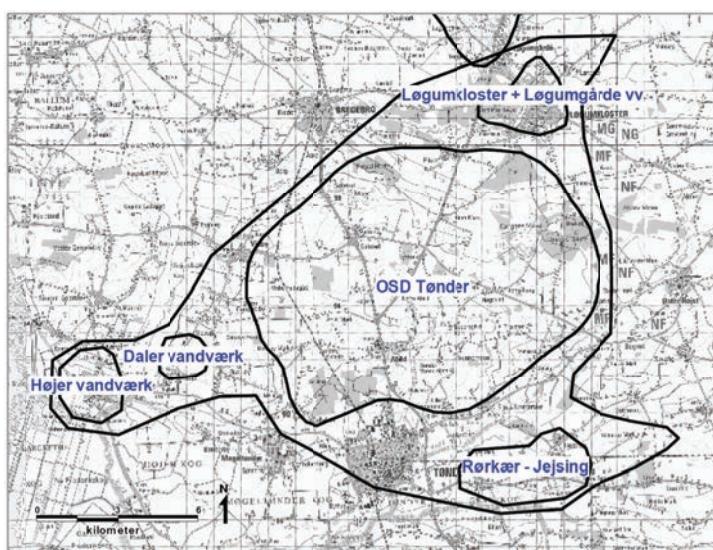
Smeltevandssletten afvandes fra øst mod vest af et større system af vandløb.

3. Eksisterende geologisk viden

3.1 Trin 1-kortlægning

I forbindelse med Naturstyrelsens nationale grundvandskortlægningsopgave med at kortlægge potentielle grundvandsmagasiner og den naturlige beskyttelse af disse, er der for OSD Tønder og områder ved omkringliggende vandværker udført en Trin 1-kortlægning. Kortlægningsområdet, som kan ses på Figur 2, udgør den centrale del af modelområdet for Tønder. Trin 1-kortlægningen er udført af Grontmij A/S i 2010 og afferapporteret i Grontmij (2010).

I forbindelse med Trin 1-kortlægningen er der på baggrund af eksisterende materiale foretaget en vurdering af de geologiske, hydrogeologiske og grundvandskemiske forhold. Formålet med dette har været at lave en indledende opsamling af eksisterende viden for området omhandlende en redegørelse for de planmæssige forhold, udført geofysik, et rids af områdets vandforsyning, grundvandskemi, hydrologi, hydrogeologi samt en geologisk forståelsesmodel.



Figur 2: Trin 1-kortlægningsområdet

Trin 1-kortlægningen udgør et udmærket udgangspunkt for modelleringen i Tønderområdet, da det udgør de centrale dele af modelområdet. En række vurderinger og konklusioner fra Trin 1-rapporten relateret til geologien i området kan derfor anvendes som fundament for modelleringen, og disse vil i det følgende kortfattet blive ridset op.

Den geologiske forståelsesmodel fra Trin 1-kortlægningen indeholder en overordnet landskabsanalyse, en gennemgang af eksisterende geologiske tolknninger fra rapporter og udvalgt litteratur, en geologisk vurdering af de geofysiske kortlægninger, samt overordnede vurderinger af boredata. Forståelsesmodellen følger Geo-Vejledning 3 (Jørgensen et al. 2008) og er baseret på eksisterende tolknninger.

3.2 Geologiske hovedtræk

Den gennemgåede litteratur i Trin 1-kortlægningen beskriver et område, hvis geologiske udvikling er præget af bevægelser i undergrunden. Området er beliggende på sydflanken af Ringkøbing-Fyn højderyggen og de tektoniske bevægelser i og omkring Tønder Graven har sat sit præg på lagserien. De seismiske undersøgelser i forbindelse med olieefterforskning har haft fokus på de dybe dele af undergrunden, men alligevel er der tegn på, at bevægelserne har forplantet sig til de helt overfladenære dele af lagserien. Der er bl.a. konstateret nedforkastede, tertiære grundvandsmagasiner i Tønder Graven.

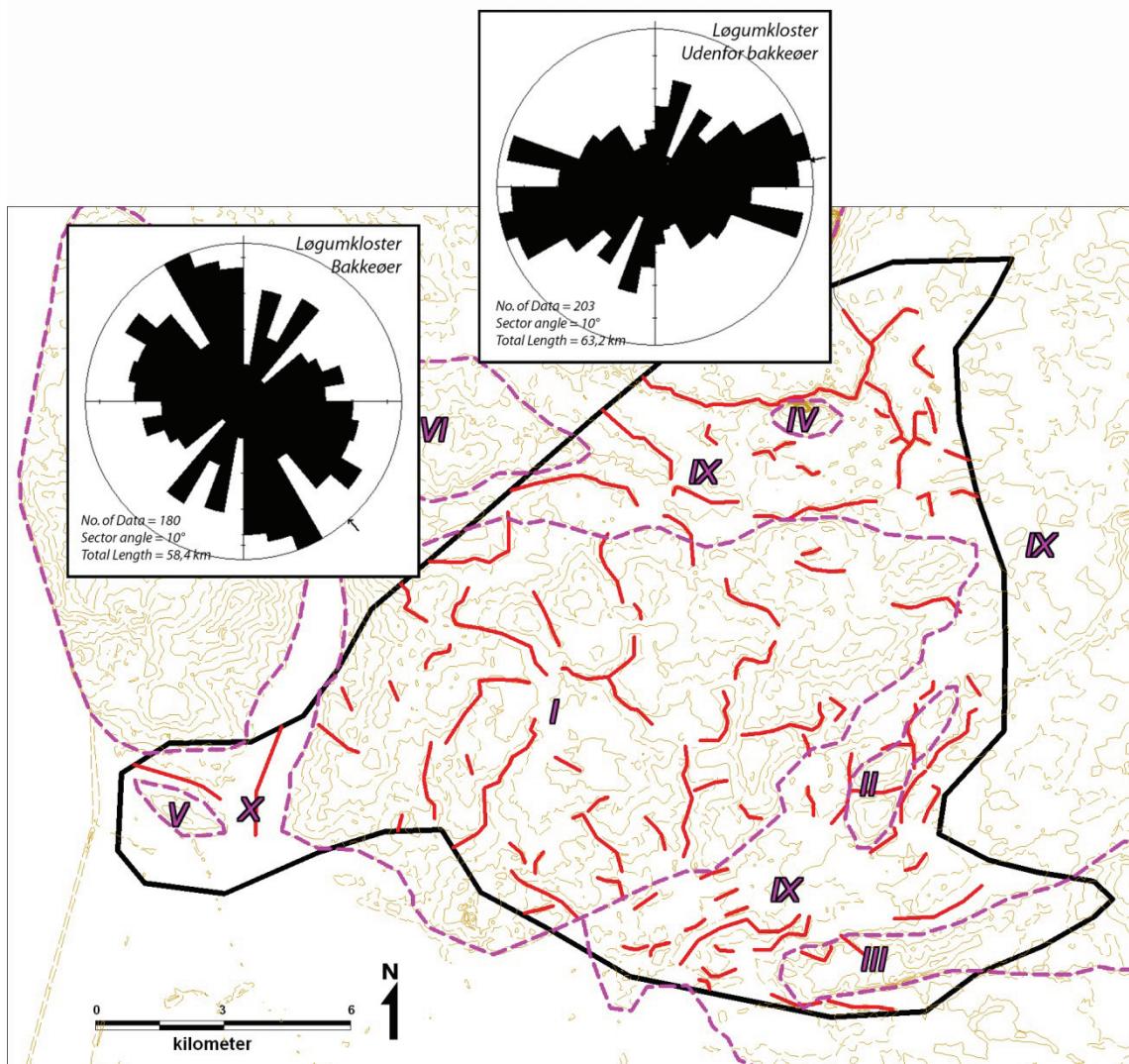
I litteraturen er der enighed om de overordnede tektoniske rammer, men de mere specifikke forløb af forkastningerne og detaljer i den tektoniske udvikling er stadig til diskussion. De tertiære formationer er detaljeret undersøgt i Jylland og formationsnavne, alde og udbredelser er løbende revideret. I den kvartære lagserie er der tegn på storskala deformationer, som forventes at have forstyrret lagserien så dybt som Arnum Formationen. Deformationerne menes at være sket sidst i Saale istiden og det landskab, som isen efterlod, var storbakket med mellemliggende lave områder, hvor der efterfølgende dannedes smeltevands-sletter. Den marine Eem-transgression trængte efterfølgende ind mellem bakkerne. I Weichsel, hvor isen kun nåede Hovedopholdslinien, dækkedes de lave områder med smeltevandsaflejringer, mens Saale-bakkeørerne stadig lå hævet over det omkringliggende landskab. En stor del af den kvartære lagserie i bakkeørerne er således glacialt deformeret, hvilket vil have betydning for korrelationer mellem borer. Generelt viser det gennemgåede materiale i Trin 1-kortlægningen, at de seismiske undersøgelser kombineret med gravimetri har bidraget væsentligt til beskrivelsen af den strukturelle opbygning af området, mens TEM/SkyTEM og borer har bidraget væsentligt til udredningen af den kvartære del af lagserien. Samlet set ridses det i Trin 1-rapporten op, at der er tale om et område, hvor dybgrundstektonikken ser ud til at have haft indflydelse på såvel den prækvartære som den kvartære lagserie, og hvor de kvartære deformationer har haft indvirkning på ikke alene den kvartære lagserie, men også på den tertiære.

3.3 Overordnet landskabs- og lineamentanalyse

Ud fra en erkendelse af, at en landskabsanalyse kan give vigtige informationer om de geologiske forhold, da terrænets udformning til en vis grad vil afspejle lagserien nedenunder, er der i Trin 1-kortlægningen gennemført en overordnet landskabsanalyse. Ved landskabs-analysen er området inddelt i delområder med forskelligt kurvebillede. Inddelingen er overordnet og er udført så objektivt som muligt, dvs. uden at tage hensyn til andre analyser af landskabsformerne og tolkninger af deres dannelses. Landskabsanalysen er foretaget på kurvebilledet fra Top10-DK.

Området er overordnet inddelt i bakkeører (delområderne I-V) og i fladerne udenom (delområderne IX og X) (se Figur 3). Bakkeørernes kurvebilleder ligner generelt hinanden. Abild Bakkeø's (I) uregelmæssige og jævne kurvebilleder, hvor der ikke umiddelbart ses foretrukne orienteringer, peger på et gammelt landskab, som har været utsat for erosion gennem en længere periode. Jejsing Bakkeøs (III) kurvebilleder afviger dog fra de øvrige bakkeører indenfor aktivitetsområdet ved at fremstå med stejle sider, hvilket vurderes at skyldes, at

Jejsing Bakkeø har været utsat for intens erosion langs specielt sydsiden. Smeltevands-sletterne (IX og X) viser et uregelmæssigt kurvebillede, men med et svagt hældende forløb mod vest.



Figur 3: Topografiske delområder og lineamentanalyse. De stippled linjer angiver afgrænsninger mellem topografiske delområder. Lineamenter er indtegnet som røde vektorer i bunden af erosionsdale. Fra Grontmij (2010).

Som supplement til den topografiske analyse er der udført en simpel lineamentanalyse indenfor Trin 1-området, med det formål at opnå et analytisk billede af de foretrukne orienteringer i det nuværende terræn. Lineamentanalysen er udført på dal-erosioner indenfor undersøgelsesområdet på baggrund af kurveplanen med ækvidistance på 2,5 m. Der er indtegnet vektorer i bunden af erosionsdale i kurvebilledet (mere end ca. 200 m). Vektorerne er vist i Figur 3, og på figuren er ligeledes vist to rosetter, hvor den samlede længde af dalene er vist for 10 graders intervaller. Rosetterne dækker hhv. bakkeøområderne og smeltevandssletterne/marskarealerne udenom.

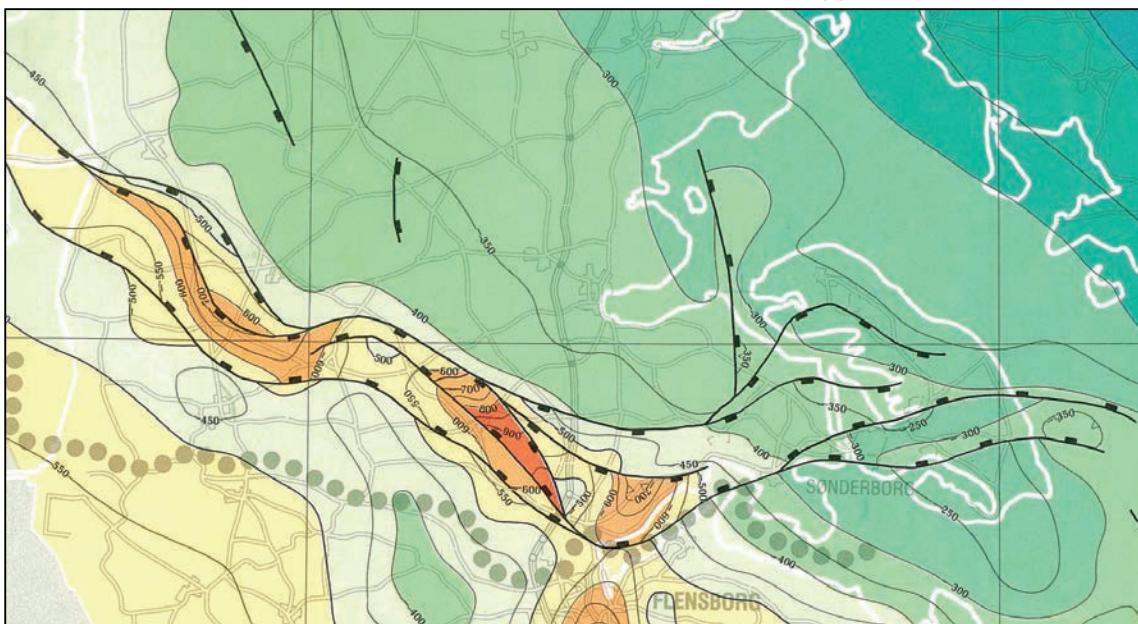
Lineamentanalysen viser, at der på bakkeøerne er foretrukne orienteringer mellem NV-SØ og NNV-SSØ, og en mindre hyppig orientering med en skæv vinkel herpå. For arealerne

udenfor bakkeøerne ses derimod en meget tydelig orientering omkring VSV-ØNØ. Det er ikke overraskende, at erosionen i bakkerne er forskellig fra erosionen på fladerne, men lineamentanalysen fremhæver forskellene.

For bakkeøernes vedkommende kan de foretrukne orienteringer muligvis sættes i forbindelse med geologiske hændelser i den sidste del af Saale. Rosetten for bakkeøerne viser et billede, som kunne afspejle en lagserie, der er deformert fra NØ. Dette understøttes af undersøgelser ved Tønder, hvor der er fundet en kompliceret geologisk opbygning, som tolkes at skyldes stor-skala glaciale deformationer i Saale. De foretrukne orienteringer for bakkeøerne svarer ligeledes omtrent til orienteringen af Rømø Forkastningen og Tønder Gravens orientering. Der er således også mulighed for, at de foretrukne orienteringer i terrænet afspejler deformationer med rødder dybere i lagserien. For smeltevandssletternes vedkommende er der en markant foretrukken orientering VSV-ØNØ. Umiddelbart vurderes denne orientering at afspejle smeltevandsslettens generelle hældning.

3.4 Kalk og Palæogen

Den dybeste del af lagserien, som har interesse i sammenhæng med modellering af grundvandsressourcerne udgøres af Skrivekridt fra Øvre Kridt og Danienkalk fra den ældste del af tertæret. Den samlede tykkelse af kridt- og kalklagene i Sønderjylland er omkring 500 m, hvoraf Danienkalken kun er 10-20 m tyk (Thomsen, 1995). Overfladen af kalken er gengivet i Figur 4, som viser, at der i Sønderjylland er store variationer i koten. Dette skyldes primært tilstedeværelsen af Tønder Graven, hvor kalkoverfladen ligger dybest.



Figur 4: Kalkoverfladens struktur (Udsnit), Ter-Borch (1997)

Over kalken følger overvejende fede leraflejringer fra Palæogen, hvor den samlede tykkelse ligger på omtrent 150-250 m – i Tønder Graven noget mere.

3.5 Miocænet

De følgende beskrivelser af miocænet er primært fra Rasmussen et al. (2010), se Figur 5. 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 bærer vidnesbyrd om hyppige variationer i aflejningsmiljøet.

3.5.1 Ribe-Gruppen

Ribe-gruppen består af Vejle Fjord, Billund, Klintinghoved, Bastrup, Arnum og Odderup Formationerne fra Nedre Miocæn. Gruppen består af tre cykler med skiftende ler- og sanddominerede enheder, hvor der i den øverste cyklus (Odderup Fm) er forekomst af kullag. Ribe Gruppen blev aflejret af deltasystemer, som bredte sig fra nord mod syd og sydvest. Den nedre grænse til de underliggende oligocæne aflejring er skarp og der ses et skift fra velkonsoliderede aflejring til mindre konsoliderede aflejring. Ved grænsen kan der forekomme et grus/sandlag. Ribe Gruppen har en tykkelse på 200 m eller mere; i boring DGU nr. 168.1378 ved Tinglev blev 200 meter gennemboret uden at bunden af gruppen blev nået.

Vejle Fjord Formationen

Vejle Fjord Formationen (VFF) består hovedsagelig af mørk brun, leret silt, og er stedvist domineret af lamineret, grøngrå sand og mørkbrun leret silt med indlejring af tynde sandlag. Sedimenterne i VFF blev aflejret i brak til fuldt marint miljø. Den øvre grænse er typisk defineret hvor lerede og organisk rige sedimenter afløses af sanddominerede aflejring enten i form af Billund Formationen eller den mere lokale Kolding Fjord Member. I Sønderjylland, hvor Billund Formationen er fraværende, overlejres VFF af den lerholdige Klintinghoved Formation. VFF er omkring 20 m tyk i Sønderjylland, mens den kan nå tykkelser på omkring 100 m i Vestjylland.

Klintinghoved Formationen

Klintinghoved Formationen (KF) består af mørk brun, siltet ler med indlejrede lag af sand med skarpe afgrænsninger. Sandet er homogen eller fint lamineret – ofte med dobbelte lerlag (tidevandspræg). KF blev aflejret i et marint miljø – enten i shelf, delta eller i den neder del af strandplanet ved vanddybder på mellem 15 og 60 m. Aflejningsmiljøet var kraftigt influeret af tidevandsprocesser og storme. I Sønderjylland, hvor KF overlejer VFF, ses der ikke markant skift i lithologi, men et skift til lidt mindre konsoliderede sedimenter. KF's øvre grænse kan være både skarp og gradvis. KF er ofte mellem 10 og 50 m tyk, men kan mod vest og sydvest i Jylland nå tykkelser på over 125 m.

Bastrup Formationen

Bastrup Formationen (BF) består overvejende af gråt, mellem- til grovkornet sand med indlejrede gruslag (maks. kornstørrelse 2 cm). Sandet er domineret af kvarts med et vist indhold af glimmermineraler. Der ses både opad finende og opad grovende sekvenser. Aflejningsmiljøet har været deltaisk og fluvial med veludviklede point bars og fluviale kana-

ler. Indlejret ler repræsenterer flodsletteaflejringer. Den nedre grænse kan være både skarp og gradvis, mens den øvre grænse til Arnum Formationens mere finkornede sedimenter. BF er typisk mellem 25 og 50 m tyk.

Arnum Formationen

Arnum Formationen (AF) består af mørkebrun siltet ler med stedvise skal-lag. Tynde, lamineret og finkornede sandlag er almindeligt forekommende. De tynde sand- og siltlag kan have et højt indhold af tungmineraler og glaukonit. AF er aflejret i fuldt marint shelf-miljø med en havdybde, der ikke var større end at sedimenterne kunne påvirkes af strøm- og bølgeaktivitet. AF er afgrænset af sandede formationer i både bund og top (Bastrup, Odderup Formationerne). AF er mellem 130 og 150 m tyk i Sønderjylland.

Odderup Formationen

Odderup Formationen (OF) består af fin- til grovkornet sand med indlejring af tynde lerlag og brunkulslag. Formationen er kvartsrig med et vist glimmerindhold og med stedvist højt indhold af tungmineraler. OF blev aflejret i nedre til øvre strandplan i et prograderende kystmiljø, men hvor kullagene og de tilhørende klastiske sedimenter blev aflejret i ferskvandssøer og laguner. Den øvre grænse til Hodde Formationen er markant og ofte udformet som et gruslag. Tykkelsen af OF ligger normalt på over 40 m, men i Tinglevboringen (DGU nr. 168.1378) er tykkelsen omkring 150 m.

3.5.2 Måde-Gruppen

Måde Gruppen består af Hodde, Ørnøj og Gram Formationerne. Måde Gruppen er domineret af mørk brunt og organisk rigt ler aflejret i et marint shelf-miljø med en vanddybde på op til omkring 100 m. Den samlede tykkelse af Måde Gruppen ligger i Vestjylland på omkring 25 m, men i Sønderjylland er tykkelsen væsentlig større; eksempelvis i Tinglevboringen (DGU nr. 168.1378), hvor tykkelsen er på 150 m.

Hodde Formationen

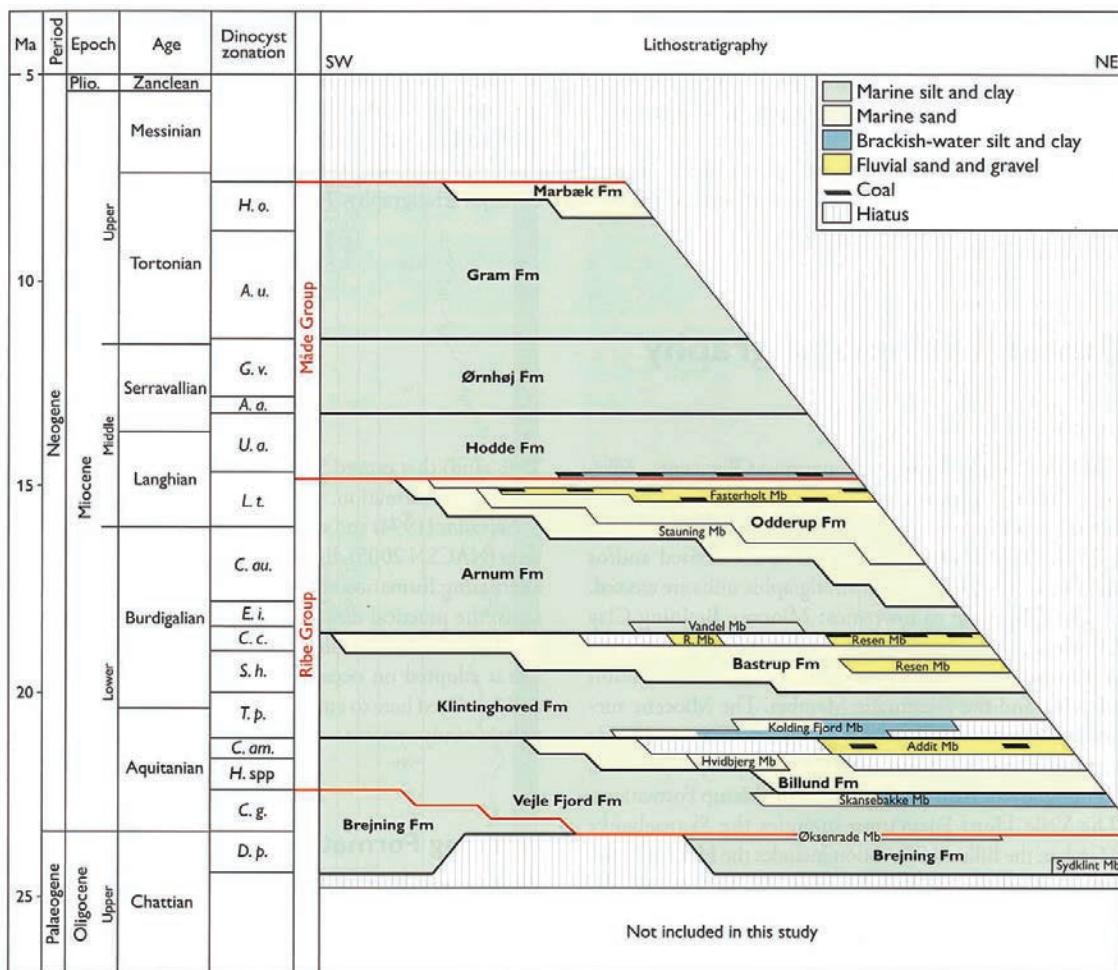
Hodde Formationen (HF) består af mørk brun organisk rig siltet ler med tynde sandlinser. Den basale del af formationen består af et gruslag. I den i den øvre del forekommer laminet, siltet ler med glaukonit. HF er aflejret i et fuldt marint miljø, og det basale gruslag repræsenterer den indledende transgression. Den øvre grænse er defineret af et skrapt skift til Ørnøj Formationens grønbrune ler. Tykkelsen af HF ligger på mellem 5 og 40 m.

Ørnøj Formationen

Ørnøj Formationen (ØF) består af grønt og brunt ler, hvor høje koncentrationer af glaukonit hyppigt forekommer. ØF blev aflejret i fuldt marint miljø, hvor sedimenttilførslen var begrænset. Havdybden var sandsynligvis mere end 100 m og ØF repræsenterer den mest udbredte transgression i Miocæn. Den øvre grænse til Gram Formationen er defineret ved farveskiftet fra grønlige til mørkebrune nuancer i de lerede sedimenter. Tykkelsen af ØF ligger på mellem 2 og 5 m.

Gram Formationen:

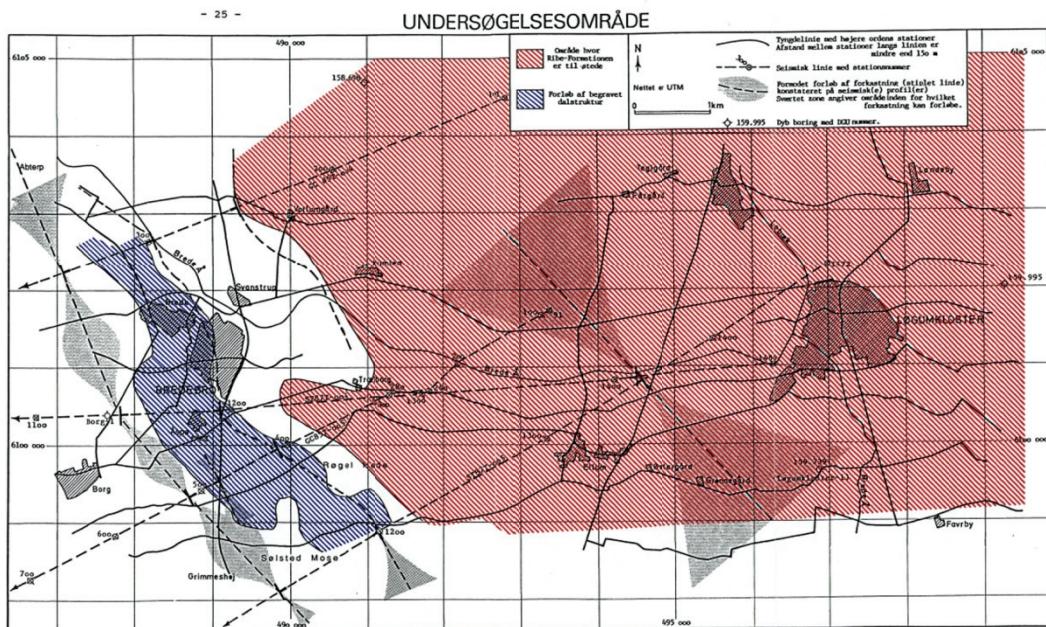
Gram Formationen (GF) består hovedsageligt af mørk brun ler, som gradvist bliver mere siltet opefter. I den øvre del ses tynde sandlag indlejret. Siderit konkretioner er hyppige i formationens nedre del, og generelt er pyritindholdet højt. I den øverste del af GF ses indslag af stormlag, som peger på progradation af kystlinjen. GF er ligesom den resterende Måde Gruppe aflejret i fuldt marint miljø med vanddybder op til omkring 100 m. Mod nord er GF kun omkring 15 m tyk, mens den bliver tykkere mod syd. I Tinglevboringen (DGU nr. 168.1378) er tykkelsen er på 105 m.



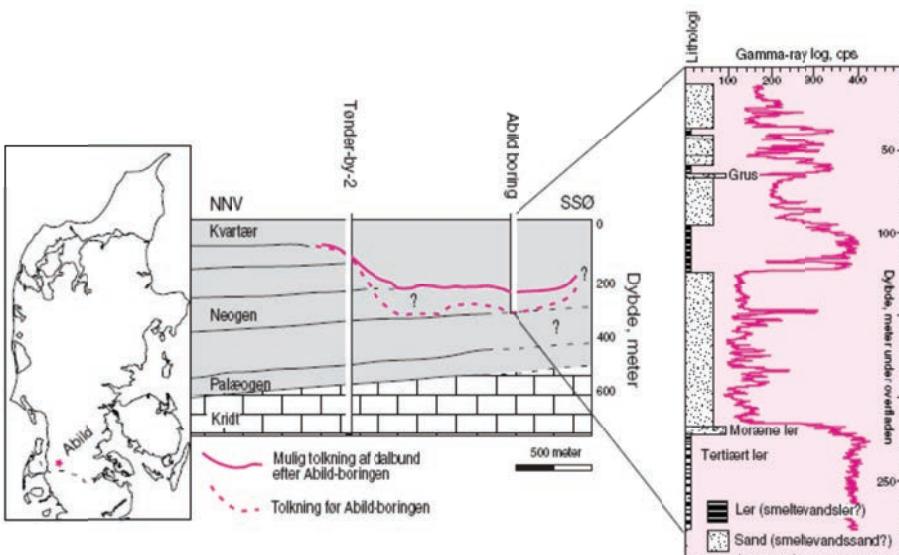
Figur 5: Revideret lithostratigrafi for miocænet. Aldrene på udviklingen ses til venstre og tilhørende sekvensstratigrafi ses til højre. Figurer viser en generel stratigrafi fra NØ til SV i det danske område (Rasmussen et al. 2010).

3.6 Begravede dale

I forbindelse med kortlægningen af de dybe grundvandsmagasiner i Sønderjylland (Thomsen 1991, 1992, Friborg & Thomsen 1999) er der blandt andet foretaget kortlægning af begravede dale. En SØ-NV forløbende begravet dal ved Bredebro (se Figur 6) blev kortlagt på baggrund af gravimetri og seismik, og en dyb, begravet dal ved Abild (se f.eks Huuse, Lykke-Andersen & Thomsen 2000) blev kortlagt fra gravimetri, seismik og en dyb boring (Figur 7).



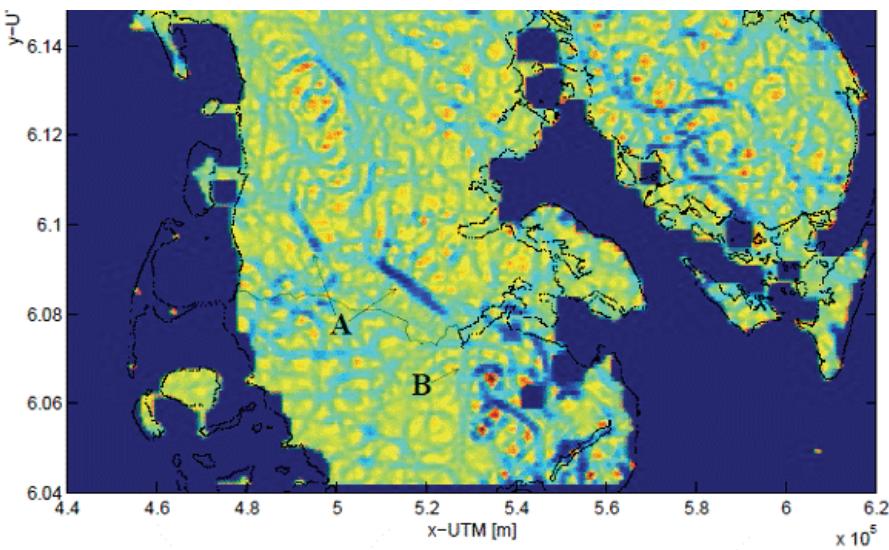
Figur 6: Udbredelse af "Ribe Formationen" og den begravede dal ved Bredebro (Thomsen, 1992).



Figur 7 Tøversnit af begravet dal ved Abild (Huuse, Lykke-Andersen & Thomsen 2000).

I 1998 blev der sat fokus på dalen ved Bredebro og Ribe Formationen med baggrund i analyser af de gravimetriske data (Bahlo, 1998). I 2001 blev de gravimetriske data igen analyseret, men denne gang i et langt større område (se Figur 8). Ved at beregne maximum curvature af tyngdefeltet fremkom en række smalle, aflange strukturer, der tolkedes som begravede dale og forkastninger. Der kunne konstateres et godt sammenfald med eksisterende strukturer, f.eks. Tønder Graven. Undersøgelserne viste, at bearbejdningerne

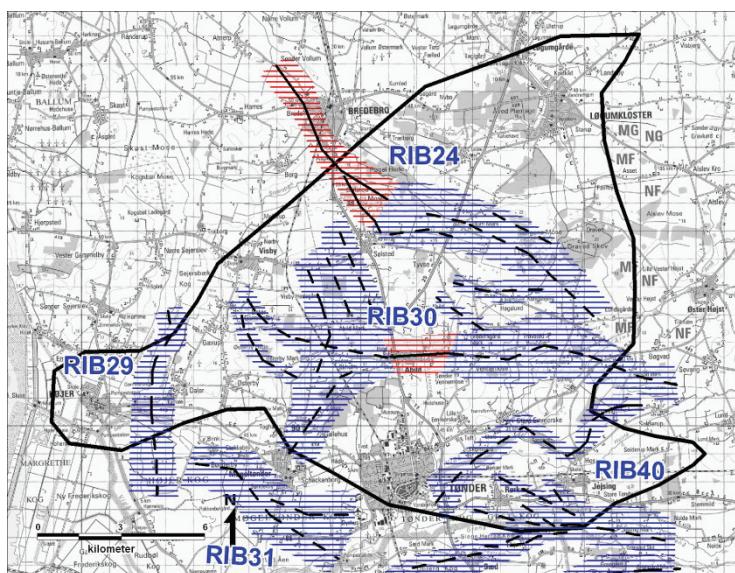
af tyngdedata kan yde et vigtigt bidrag til kendskabet til de strukturelle forhold i Sønderjylland.



Figur 8: Maximum curvature plot af det regionale Bouguer tyngdefelt (fra Stadtler 2001).

På baggrund af ældre TEM-data, nye SkyTEM-data, seismik, gravimetri og borer blev der kortlagt en række begravede dale i Løgumkloster-Tønder området i forbindelse med den nationale kortlægning af begravede dale (Jørgensen & Sandersen 2009), Figur 9. På tidspunktet for rapportens udarbejdelse forelå de nye SkyTEM-data kun i en meget indledende tolkning af foreløbige, uprocesserede data. Tolkningen, som den ses på Figur 9 var derfor foreløbig og skulle ses med et vist forbehold. Det stod dog allerede på det tids punkt klart, at med de nye SkyTEM-data viste mange dale i området – kendte såvel som nye, hidtil ukendte dale.

På Figur 9 ses de 5 lokaliteter, hvor der var kortlagt dale i 2009; RIB 24 Bredebro, RIB29 Højer, RIB30 Abild, RIB31 Møgeltønder og RIB 40 Tønder-Jejsing.

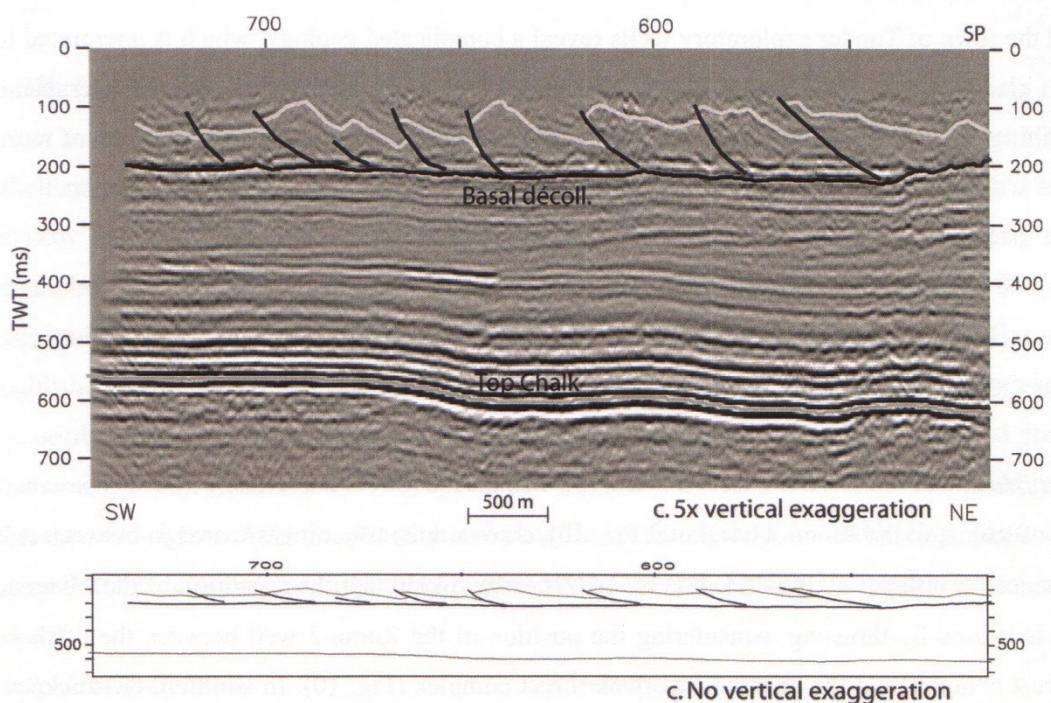


Figur 9: Kortlagte begravede dale i 2009. Blå dale er svagt dokumenterede og røde dale er veldokumenterede (Jørgensen & Sandersen 2009).

3.7 Den kvartære lagserie

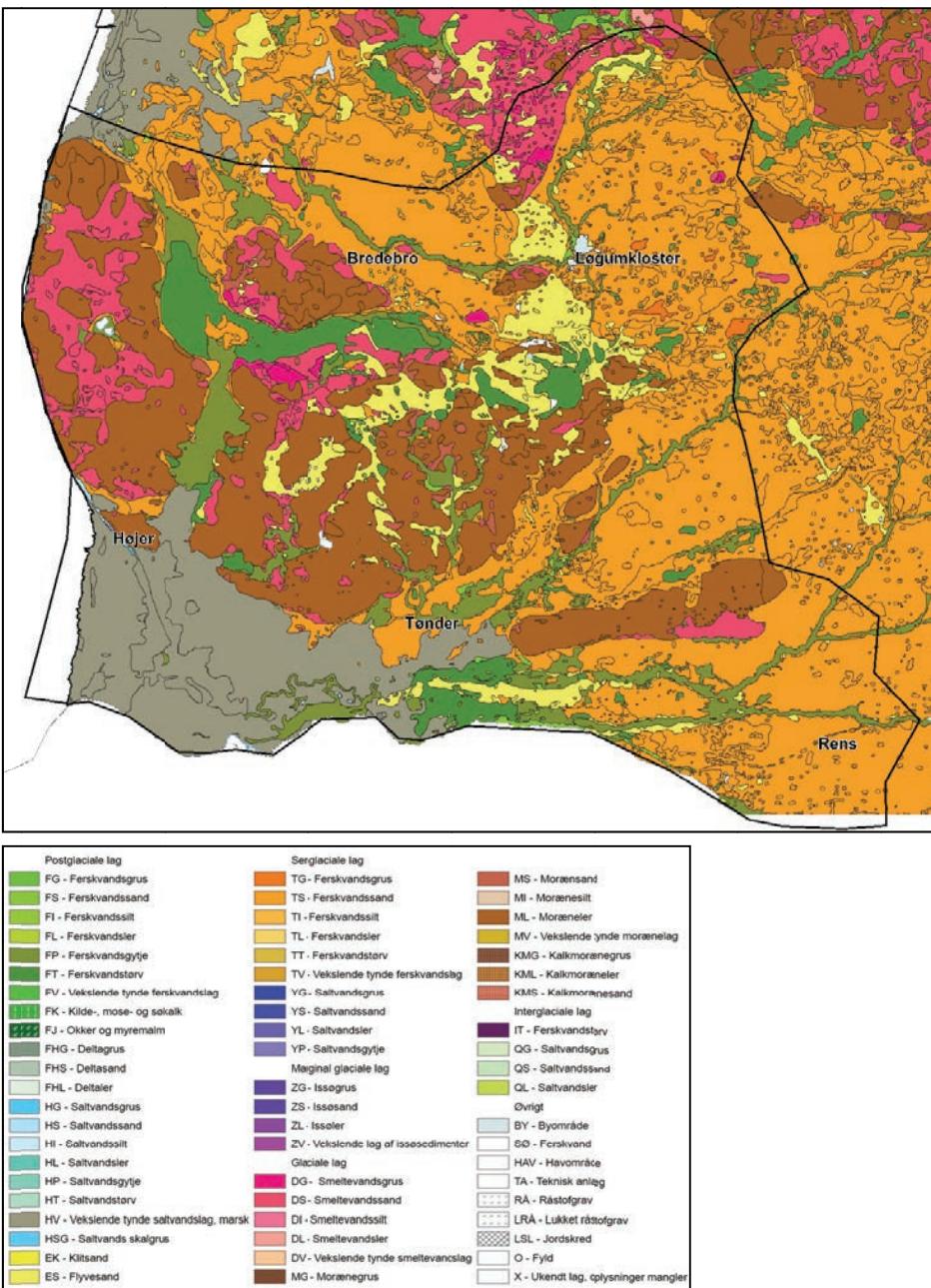
Den kvartære lagserie i kortlægningsområdet udgøres overordnet af glaciale aflejringer relateret til isen og smeltevandet samt marine og ferskvandsaflejringer fra mellemistiderne og Postglaciale tiden. I Elster istiden og muligvis ved tidlige nedisninger blev der dannet dybt nederoderede dale i området. Dalene blev dannet som tunneldale ved smeltevands-erosion under en eller flere iskapper (Jørgensen & Sandersen 2006). Dalene blev eroderet dybt ned i såvel de tertære som de kvartære aflejringer. Senere isfremstød dannede flere tunneldale med andre orienteringer i området, og herved opstod de begravede dalsystemer. Efter bortsmelting af isen i Elster blev de dannede dale og andre lavliggende områder oversvømmet af Sen-Elster- og Holstein-havet og blev gradvist udfyldt med smeltevandsaflejringer og interglaciale aflejringer.

I kvartæret er der tegn på storskala-deformationer (Figur 10), som i store områder forventes at have forstyrret lagserien fra måske så dybt som Arnum Formationen (Andersen, 2004). Disse deformationer menes at være sket sidst i Saale istiden og det landskab, som isen efterlod, var storbakket og med mellemliggende lavliggende områder, hvori der efterfølgende dannedes en Saale hedeslette.



**Figur 10: Glacialtektoniske overskydninger i Skærbæk-Tornskov-området. Seismisk sek-
tion CG85T-003 (SV-NØ, fra Andersen, 2004)**

Den marine transgression i Eem trængte efterfølgende ind mellem bakkerne. I Weichsel, mens isen stod ved Hovedopholdslinien, dækkedes de lave områder foran med smeltevandsaflejringer, mens Saale bakkerne stadig lå hævet over det omkringliggende. Dette billede afspejles i GEUS' jordartskort, som ses i Figur 11.



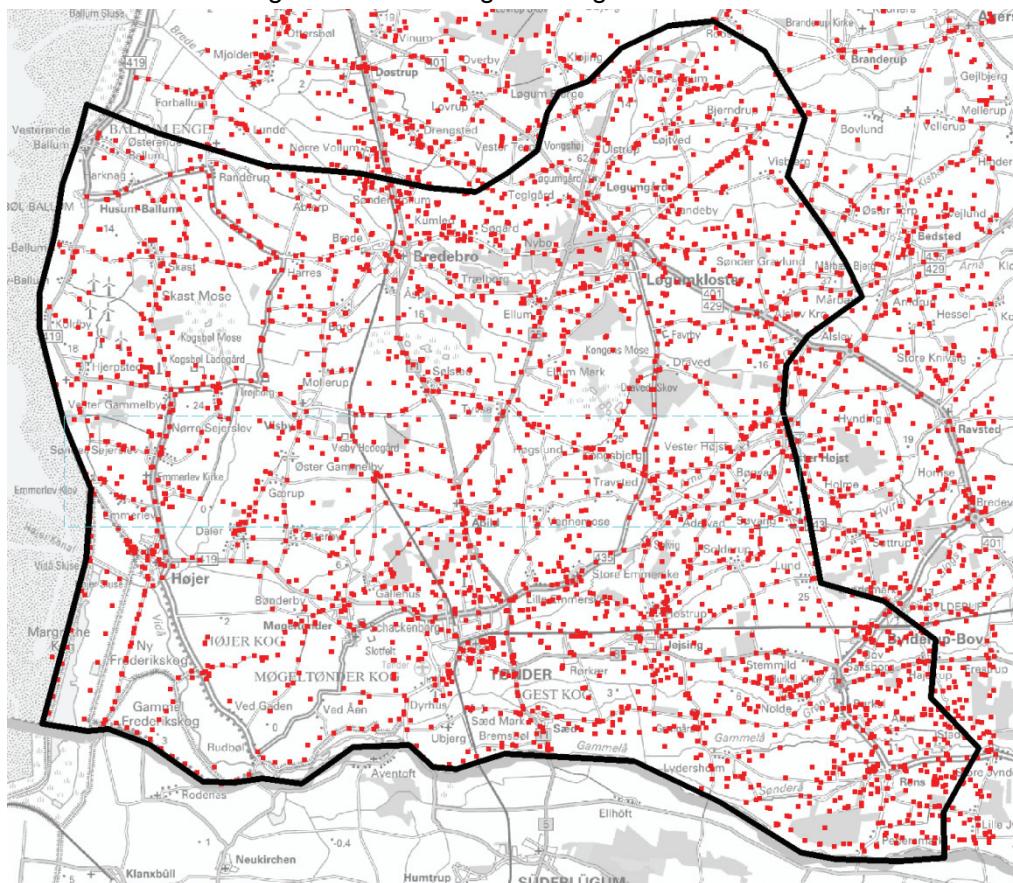
Figur 11: GEUS' jordartskort for modelområdet med tilhørende symbolliste. Udsnittet er 35 km horisontalt og 30 km vertikalt.

En stor del af den kvartære lagserie ældre end Eem er således med stor sandsynlighed glaciale deformeret og meget komplekst opbygget. Dette vil have betydning for tolkningerne indenfor den kvartære del af lagserien og vil begrænse mulighederne for modellering af gennemgående lagflader i kvartæret.

4. Oversigt over datagrundlag

4.1 Boringer

Boringer er udtrukket fra Jupiter boringsdatabasen til en lokal Access PCJupiter-database den 4. juni 2012. Databasen er navngivet rrm_geus_dk_523399840_pcjupiter.mdb, og boringernes placering er vist på Figur 12. Langt de fleste boringer er ikke særligt dybe og mange er af en dårlig kvalitet. En stor del af dem er shotholes udført i forbindelse med olie-seismiske undersøgelser. Der er endvidere flere meget dybe boringer udført i forbindelse med olieefterforskning. De fleste boringer er dog udført i forbindelse med vandforsyning.

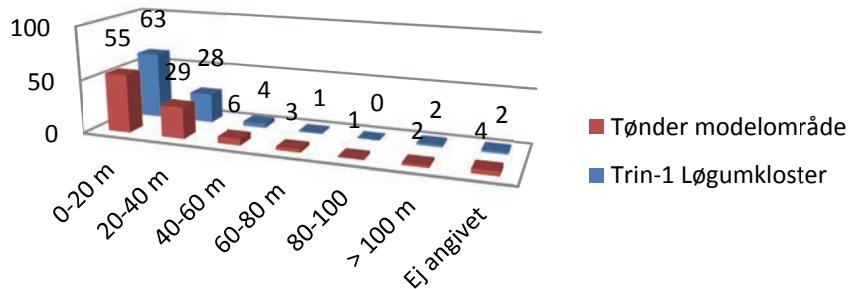


Figur 12: Kort over boringer i modelområdet. Udsnittet er 35 km horisontalt og 30 km vertikalt.

I forbindelse med Trin-1 kortlægningen for OSD-områderne omkring Tønder og Løgumkloster (Grontmij 2010) er der foretaget en boringsanalyse af et område svarende til ca. 1/3 af det samlede modelområde for Tønder.

Analysen er foretaget på et udtræk fra Jupiter-databasen i september 2009 på i alt 1089 boringer. Trin-1 området er en delmængde af Tønder modelområdet, hvor der i et udtræk fra d. 11. april 2012 er fundet i alt 3675 boringer. Ses der på en procentvis fordeling af boringssdybderne for henholdsvis Trin-1 og Tønder-området, ses det, at denne er stort set den samme for de to områder (Figur 13).

Procentvis fordeling af boringsdybder



Figur 13: Procentvis fordeling i boringsdybder for Tønder modelområdet og Trin-1 kortlægningsområdet.

Boredata udgør det primære datasæt for de geologiske vurderinger og tolkninger, og derfor er det vigtigt, at der indledningsvist opnås et overblik over datasættets kvalitet. Boremetoderne, formålet med borerne og alderen af borerne vil variere, og derfor vil usikkerheden og graden af information fra boredata tilsvarende variere. Da den procentvise fordeling af boringsdybderne for de to områder er sammenlignelige, er det valgt at lade analysen fra Trin-1 rapporten karakterisere datasættet fra hele Tønder modelområdet. De følgende konklusioner vil derfor primært være baseret på Trin-1 rapporten:

4.1.1 Datakvalitet

Af det samlede datasæt må det forventes, at ca.:

- 0,5 % har fejl ved topkote/terrænkote
- 2 % har mindre fejl i koten for top/bund af filtre eller ingen angivelse af kote for filter
- 4 % mangler oplysninger om boredybde
- 4 % har ingen oplysninger om de gennemborede lag

I Trin-1 kortlægningen er der foretaget en inddeling af borerne i følgende kategorier:

- **Kategori 1: God kvalitet.** Boringen er beskrevet af GEUS, rådgiver (geolog) og/eller SESAM.
- **Kategori 2: Middelkvalitet.** Boringen er udførligt beskrevet af brøndbore
- **Kategori 3: Dårlig kvalitet.** Boringen har ingen andre oplysninger end hovedlithologien
- **Kategori 4: Meget dårlig kvalitet.** Boringen har ingen (brugbare) oplysninger om de gennemborede lag

For detaljer omkring hvordan inddelingen konkret er udført, henvises til Trin-1 rapporten. Resultatet af evalueringen i Trin-1 kortlægningen betyder, at følgende kvalitet kan forventes af de i alt 3675 borer i Tønder modelområdet:

Kategori	Kvalitet	Procent
1	God	13
2	Middel	9
3	Dårlig	67
4	Meget dårlig	11
SUM		100

Tabel 1: Evaluering af borer

Af Tabel 1 fremgår det, at kun 22 % af borerne kan forventes at være af "god kvalitet" og "middel kvalitet", mens 78 % af borerne er kategoriseret som "dårlig kvalitet" eller "meget dårlig kvalitet". Det betyder, at mere end $\frac{3}{4}$ af alle borer i området ikke kan forventes at have flere oplysninger end hovedlithologien i den digitale Jupiter database, og heraf er 11 % uden pålidelige oplysninger om de gennemborede lag.

Ifølge Jupiter-databasen er formålet med borerne fordelt på:

- 23 % vandforsynings- og vandværksboringer
- 39 % DAPCO-shotholes
- 19 % Diverse formål
- 19 % Ikke oplyst

4.1.2 Boringsdybde

I Figur 14 er områdets borer tematiseret i forhold til boringsdybde. På figuren kan ses et større antal borer, der ligger langs mere eller mindre rette linjer. Disse borer har dybder i kategorierne 0-20 m og 20-40 m, og repræsenterer primært DAPCO-borer (shotholes). DAPCO-shotholes er borehuller udført i forbindelse med olieeftersøkningseismik, og disse borer er typisk dårligt beskrevne, da lagserien reelt ikke havde betydning i forbindelse med udførelsen/anvendelsen af borerne. Prøvernes og borejournalernes kvalitet er således generelt dårlig og i værste fald misvisende. Som det ses ovenfor, udgør disse borer næsten 40 % af det samlede antal borer i området.

4.1.3 Supplerende information i Jupiter-databasen:

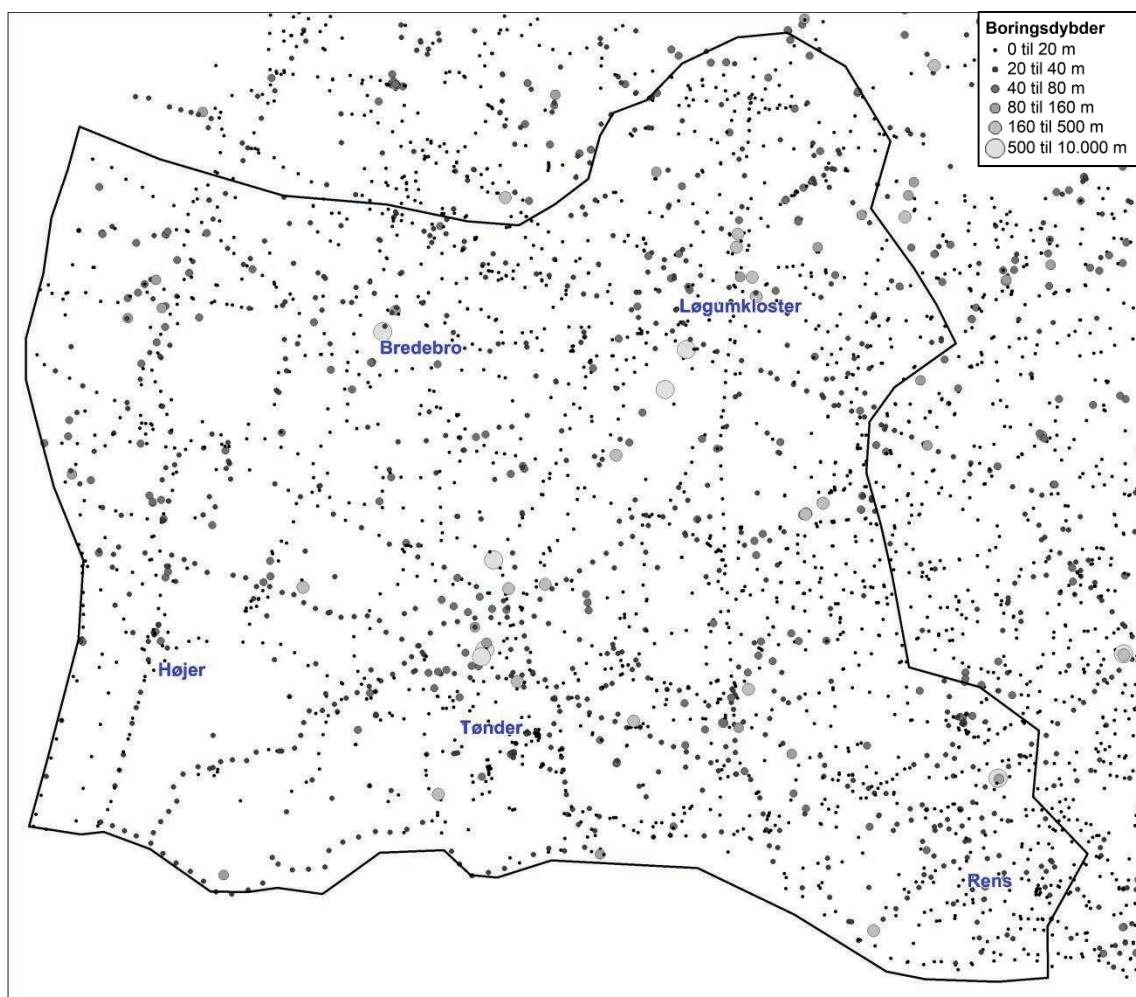
Jupiter-databasen indeholder scannede versioner af brøndborerjournaler og/eller DGU's gamle prøvebeskrivelser, og sammenstillinger af den digitale version med brøndborerens originale journaler som regel meget værdifuld, da der kan fremkomme informationer, som ikke er med i den digitale version.

I Trin-1 kortlægningen er der set nærmere på de indscannede borejournaler for borer dybere end 30 meter indenfor kvalitetskategorierne 3 og 4 (ca. 8 % af borerne), dvs. borer, hvor der ikke er oplysninger ud over hovedkomponenten eller ingen oplysninger om lagserien overhovedet.

Af disse 8 % er der efter gennemgangen fundet:

- Supplerende oplysninger i brøndborerjournal for 75 % af borerne – hvoraf der i lidt under halvdelen også foreligger en detaljeret DGU/GEUS prøvebeskrivelse i scannet version
- 6 % borer, som ikke har en brøndborerjournal
- 23 % borer, hvor der ikke er fundet supplerende oplysninger

Det blev konkluderet i Grontmij (2010), at der i $\frac{3}{4}$ af de gennemsete borer kunne findes værdifulde supplerende oplysninger om lagserien, og at der i næsten halvdelen af disse kunne findes endog meget detaljerede oplysninger. Hvor der fandtes DGU/GEUS beskrivelse, ville disse borer kunne flyttes fra kategori 3 til kategori 1, såfremt oplysningerne blev lagt over i Jupiterdatabasens digitale data. Kun i $\frac{1}{4}$ af de gennemsete borer kunne der ikke hentes supplerende oplysninger.



Figur 14: Kort over boringsdybder i Tønder modelområdet. De nye undersøgelsesboringer er ikke medtaget. Udsnittet er 35 km horisontalt og 30 km vertikalt.

4.1.4 Nye undersøgelsesboringer

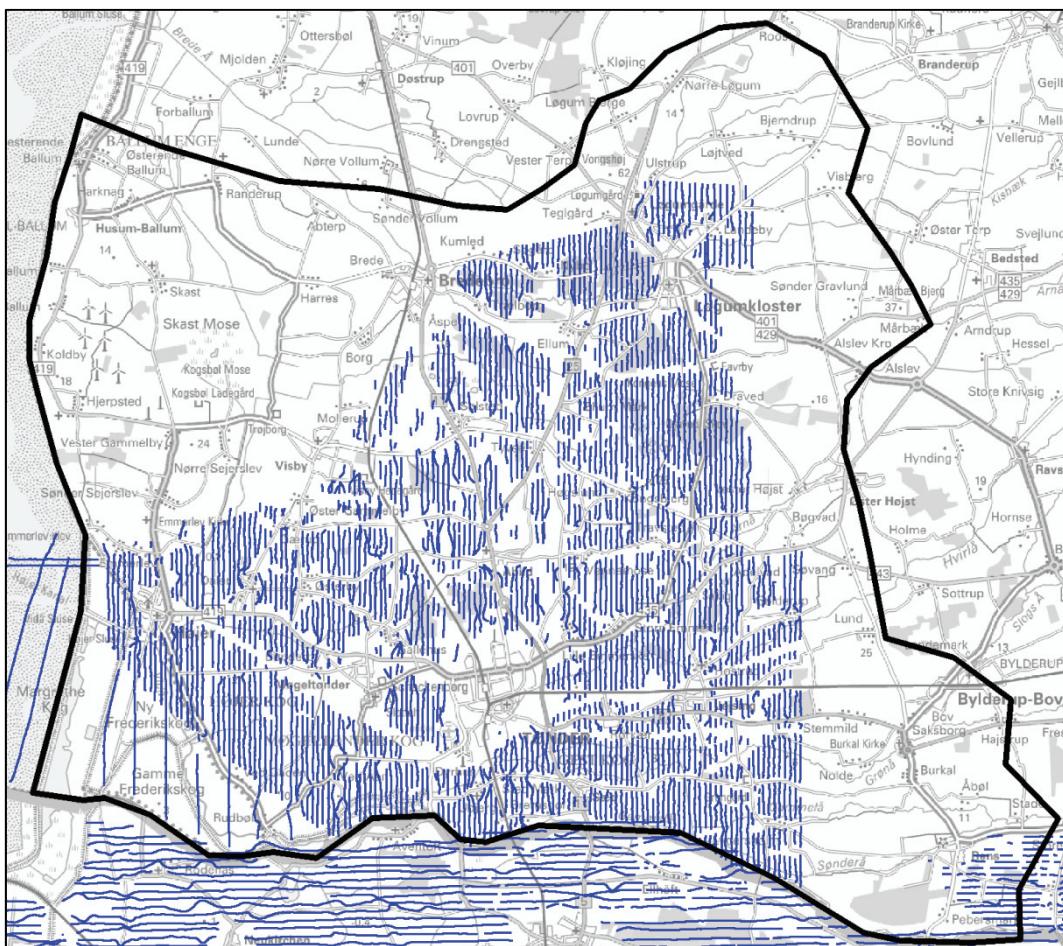
Der er i forbindelse med grundvandskortlægningen udført dybe undersøgelsesboringer ved Bønderby (DGU nr. 166.761) og Travsted (DGU nr. 167.1538 og 167.1545). Disse er grun-

digt geologisk beskrevet og tolket, og der er udført geofysisk borehulslogging (Orbicon 2010, Orbicon 2011, Orbicon 2012).

4.2 Geofysiske data

4.2.1 SkyTEM

Der er udført en SkyTEM kortlægning i lidt over halvdelen af området (Aarhus University, 2012). Ved denne kortlægning er der fløjet 1750 km med en gennemsnitlig linjeafstand på 167 m (Figur 15). Der ses generelt en god dækning, bortset fra ved de større byer og over marsken.



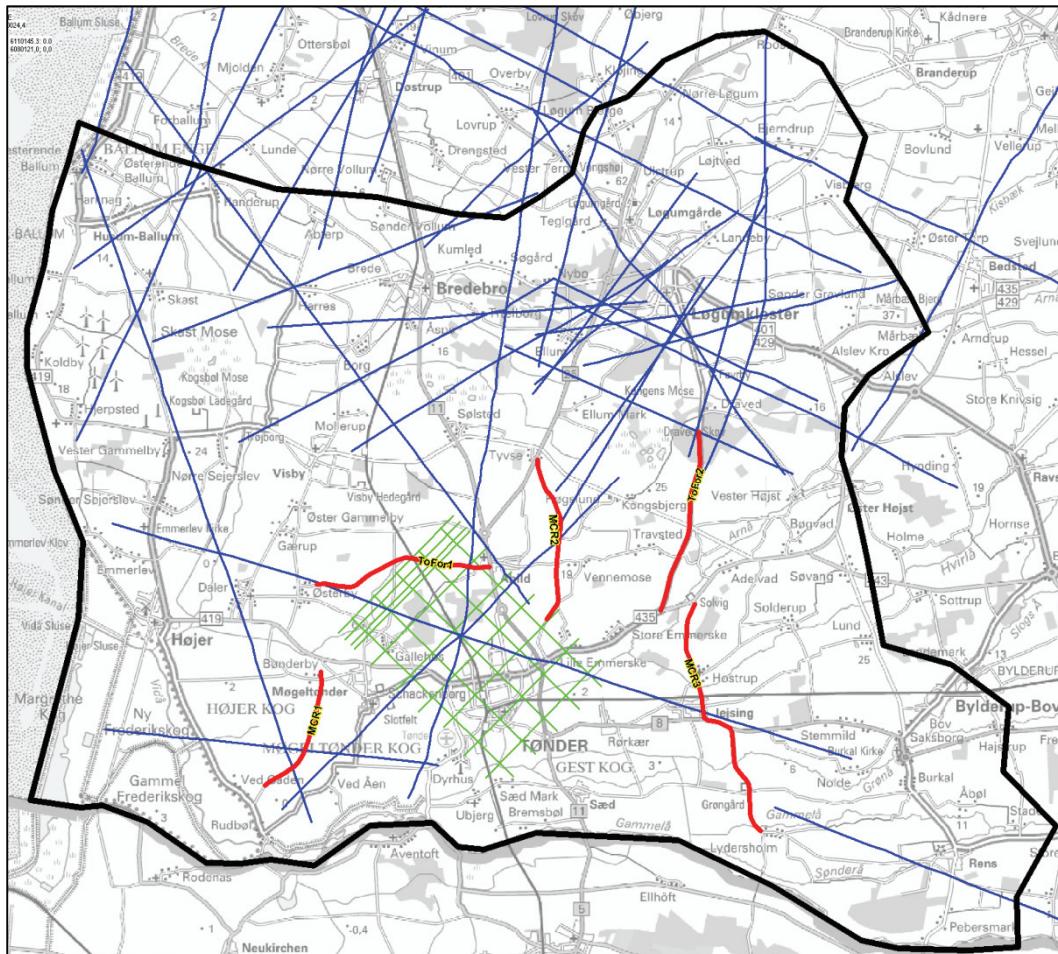
Figur 15: Kort over SkyTEM-data i modelområdet. Udsnittet er 35 km horisontalt og 30 km vertikalt.

De indsamlede data er grundlæggende tolket som 6-lags modeller (Toender_L5_1a.gdb) og som 29-lagsmodeller (Toender_S29_3a.gdb). Der har efterfølgende været foretaget forsøg med implementering af geologisk apriori-viden fra seismik og borer. Dette gælder for både 6-lagsversionen (Toender_L6_12a.zip) og 29-lagsversionen (Toender_S29_5d.zip).

4.2.2 Seismik

Der er anvendt tre forskellige typer af seismiske data i modellen (se Figur 16):

- Shallow-seismik indsamlet i forbindelse med grundvandskortlægningen. I alt er der indsamlet 29,5 km fordelt på 5 linjer (Rambøll, 2010). Billedfiler af de seismiske linjer er importeret i GeoScene 3D.
- Al tilgængelig olieseismik er udtrukket i Landmark fra GEUS' arkiver. Billedfiler heraf er blevet justeret og importeret i GeoScene 3D. I alt er 31 linjer importeret.
- I området omkring Tønder er der fra GEUS' arkiver udtrukket 15 2D sektioner fra en 3D seismisk undersøgelse.



Figur 16: Seismiske data anvendt i modearbejdet. Røde linjer viser grundvandsseismiske data, blå linjer viser olieseismiske data og grønne linjer viser seismiske linjer stammende fra en 3D seismisk undersøgelse. Det seismiske profil vist i Figur 26 er det nordøstligste (ToFor2).

4.3 Øvrige geofysiske data og andre data

4.3.1 MEP

Ved Bredebro er der i 2002 udført 15,3 km MEP fordelt på 16 tætliggende linjer (NIRAS 2002). Disse data er medtaget som en del af tolkningsgrundlaget. Data forefindes i GERDA-databasen.

4.3.2 PACES

Ved Visby er der udført en mindre PACES kortlægning for vejdirektoratet i 2003. Data forefindes i GERDA-databasen, men der er ingen rapporter tilgængelige. Data er medtaget i modellen.

4.3.3 Tyngdedata

Grids med tyngdedata (se Kap 3.6 for referencer) er udleveret af Naturstyrelsen og importeret i GeoScene3D.

4.3.4 Topografiske data

Ved brug af LiDAR (Light Detection And Range) metoden indsamlles højopløselige højdemodeldata til brug for analyser af terrænmorfologi. LiDAR er en laserscanning-metode, hvor der udsendes et elektromagnetisk signal, som reflekteres fra terrænoverfladen eller objekter på denne. Efter at måledata er indsamlet foretages en bearbejdning af data, hvor blandt andet refleksioner fra træer og bygninger frasorteres (Wind 2008) For Danmarks vedkommende er der af COWI frem til 2009 indsamlet et landsdækkende LiDAR-datasæt opmålt fra et fly i ca. 1 kilometers højde. Dette datasæt har en med en detaljeringsgrad på ca. 1½ m horisontalt og 0,1 til 0,2 m vertikalt, hvilket betyder, at selv meget små variationer i topografin kan udskilles.

LiDAR-højdedata fra Tønderområdet er bearbejdet i ArcMap 10 og er anvendt uden yderligere filtrering. Der er udarbejdet to typer kort: 1) terrænkort med anvendelse af en kontinuerlig farveskala fra blå (lav topografi) til brun (høj topografi) (Figur 53 og Figur 57) og 2) terrænkort med farvede, faste koteintervaller på 1 m med mellemliggende, hvide 1 meters intervaller (Figur 54). Førstnævnte kort er anvendt til generelle oversigtskort for topografinen i området, mens sidstnævnte er anvendt ved detailstudier af topografiske variationer.

5. Modelkoncept

5.1 Overordnet beskrivelse af modelkoncept

Modelområdet er ifølge de eksisterende borer, råstofgrave og indsamlede data stedvist heterogent og komplekst opbygget. Således viser borerne, at dele af området er glacialtektonisk forstyrret, idet ældre lag er skubbet op over yngre lag. Glacialtektoniske strukturer kan også ses i SkyTEM- data og i de seismiske data. Strukturernes størrelse er på grænsen af, hvad SkyTEM metoden kan opnå. De seismiske linjer har ikke samme tæthed som SkyTEM-linjerne, og derfor kan geologien heller ikke opnås rumligt heri (imellem linjerne). De heterogene forhold optræder fortrinsvist i den øvre del af lagserien (0 til ca. 140 meters dybde), mens den dybereliggende, tertære del er mere homogent opbygget med udbredte lagfølger.

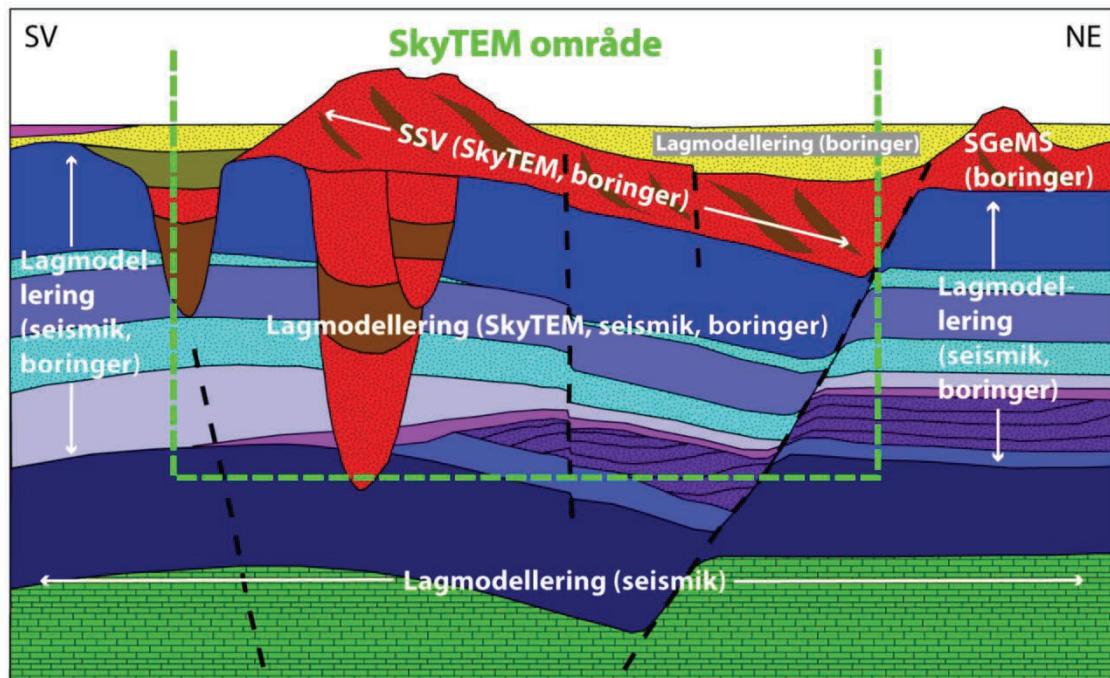
Den heterogene øvre del kan ikke beskrives i en traditionel lagmodel, og det er derfor valgt delvist, at opstille hele modellen som en voxelmodel. Foruden lagflader består modellen således af et voxelgrid, der beskriver den rumlige fordeling af lithologien med diskretiseringen $100 \times 100 \times 5$ m.

I den del af modelrummet der er præget af glacialtektonik, og hvor der findes SkyTEM-data, er SSV-konceptet (geoStatistical estimation of Structural Vulnerability) anvendt (Foged 2013), se Figur 17. Dette koncept blev også anvendt ved Ølgod for et lignende geologisk miljø (Jørgensen et al. 2012a), men siden er konceptet blevet videreudviklet og optimeret til 3D modellering, se Kap. 7.3.2. Ved SSV bliver de enkelte voxler tildelt et sand-ler forhold. Efterfølgende er resultatet af SSV-inversionen blevet underkastet en manuel gennemgang, hvorved tilretning er foretaget i områder, hvor baggrundsviden fra bl.a. boredata og andre kilder inddrages.

I den del af modelområdet, der er glacialtektonisk deformert, men hvor der ingen SkyTEM-data findes, er der ligeledes ingen mulighed for at konstruere en manuelt tolket geologisk model. Her er det desuden heller ikke muligt at anvende SSV-modellering, da der ikke findes SkyTEM. Det blev derfor besluttet at modellere denne del af modelområdet ved hjælp af multiple point geostatistik (Strebelle, 2002, se Kap 7.4) og anvende SkyTEM data som training image (He et al. 2013). Dette kan gøres fordi de geologiske forhold og den strukturelle opbygning ifølge de seismiske data antages at have en statistisk set ensartet rumlig fordeling i hele det deformerede område, både indenfor og udenfor det SkyTEM-kortlagte område. Den stokastiske modellering (multiple point) er blevet udført ved hjælp af SGeMS (Remy et al. 2009), og har resulteret i et binært ler-sand voxelgrid med en diskretisering svarende til den øvrige geologiske model.

I resten af modelrummet, dvs. under og over de deformerede lag er almindelig kognitiv, manuel geologisk modellering anvendt (Figur 17). Heri er de geologiske forhold blevet modelleret med rumlige flader. Disse flader repræsenterer sedimentære laggrænser, lithologiske grænser og erosive flader. I miocænet forekommer alle tre typer af flader. Begravede dale er modelleret som erosive flader samt i nogle tilfælde med lithologiske grænser i

dalfyldet. Saale og Weichsel smeltevandssand og postglaciale aflejringer er også modelleret manuelt med flader.



Figur 17: Rumlig fordeling af de tre modeltyper, SSV, SGeMS og manuel, kognitiv modellering og hvilke data modelleringsmetoderne baserer sig på (i parentes). Grøn skraveret streg viser det områder, hvor indenfor der er udført SkyTEM-kortlægning. Skitse for konceptuel geologisk (Figur 50) er vist som baggrund.

Modellen er udarbejdet i følgende steps:

1. *Klargøring af data og import til visualisering i GeoScene3D samt produktion af resistivitetsgrids.*
2. *Integreret geologisk tolkning af alle geofysiske og geologiske data i Aarhus Workbench og GeoScene 3D.*
3. *Manuel, kognitiv modellering af rumlige geologiske flader*
4. *Boringsevaluering til anvendelse i SSV og SGeMS.*
5. *SSV-modellering*
6. *Manuel gennemgang og tilretning af SSV-resultatet i GeoScene 3D.*
7. *SGeMS-modellering.*
8. *Udfyldning med lithologi i voxler mellem de manuelt modellerede rumlige flader.*
9. *Sammensmelting af de tre voxelmodeltyper (SSV, SGeMS og manual, kognitiv).*

5.2 Angivelse af tolkningsusikkerhed

Der er som udgangspunkt tilskrevet usikkerhedsværdier for tolkningen i alle lagfladernes tolkningspunkter. Her opereres der altid med 4 usikkerhedskategorier: lille usikkerhed, moderat usikkerhed, stor usikkerhed og bedste gæt, se i Tabel 2.

Usikkerhedskategori	Farvekode	Benævnelse
1	Grøn	Lille usikkerhed
2	Gul	Moderat usikkerhed
3	Rød	Stor usikkerhed
4	Grå	Bedste gæt

Tabel 2: Symboelliste for tolkningsusikkerhed

I Tabel 3 vises de kriterier, der ligger til grund for usikkerhedsvurderingerne. De 3 kategorier for usikkerhed afspejler modellørens vurdering af den samlede usikkerhed på et tolkningspunkt. Der er ikke skelnet mellem forskellige typer af usikkerhed, f.eks. usikkerhed på kote/koordinat, datausikkerhed, usikkerhed på elementets eksistens, eller f.eks. på om elementets oprindelse er korrekt angivet.

	Tolkningsgrundlag
1: Lille usikkerhed	Gode data med tilfredsstillende datatæthed i forhold til den geologiske variabilitet og/eller meget robust geologisk forståelse
2: Moderat usikkerhed	En eller flere typer data af varierende kvalitet og med mindre tilfredsstillende datatæthed i forhold til den geologiske variabilitet og/eller robust geologisk forståelse
3: Stor usikkerhed	Dårlig datakvalitet med utilfredsstillende datatæthed i forhold til den geologiske variabilitet og/eller lille geologisk forståelse
4: Bedste gæt	Ingen information i data og/eller ingen geologisk forståelse

Tabel 3: Kriterier for usikkerhedsvurdering. Der arbejdes med 3 usikkerhedskategorier sikker, middelsikker og usikker

Uddybning af usikkerhedskategorierne:

1) Lille usikkerhed

I kategorien "Lille usikkerhed" har man belæg for sin tolkning i gode data, der samtidig har en tilfredsstillende datatæthed. Et området meget heterogen kræves stor datatæthed og hvis der findes en homogen geologi kan væsentlig færre data give det samme resultat. Gode data kan være velbeskrevne borer, som er understøttet af geofysiske data af høj kvalitet. Peger data tolkningsmæssigt i samme retning, og er der mulighed for sammen-tolkning af disse til en robust geologisk tolkning, har man en tolkning med en lille usikkerhed. Tolkningen er ikke afhængig af viden fra nærtliggende områder. Er der ingen eller få data kræves en meget robust forståelse af dannelseshistorien og de geologiske processer der har skabt områdets geologi før tolkningerne kan placeres i denne usikkerhedskategori.

2) Moderat usikkerhed

I kategorien "Moderat usikkerhed" har man ofte belæg for sin tolkning i flere typer data af varierende kvalitet og/eller med en mindre god datatæthed end i den foregående kategori. Det kan også være, at man har godt belæg i den geologiske forståelse, samtidig med at den geologiske variabilitet er lav.

3) Stor usikkerhed

I kategorien "Stor usikkerhed" har man kun i mindre grad belæg for sin tolkning grundet mindre gode til dårlige data, som samtidig har en utilfredsstillende tæthed i området. Samtidig er den geologiske forståelse typisk ringe og den geologiske variabilitet stor. Et eksempel kan være et område med meget få, dårligt beskrevne borer, evt. ældre seismik eller TEM/SkyTEM af mindre god kvalitet, som med lidt god vilje gør det muligt at modellere laggrænser eller dele af geologiske strukturer, men hvor den geologiske forståelse er ringe.

4) Bedste gæt

I kategorien "Bedste gæt" har man intet belæg for sin geologiske tolkning og modellering. Hverken når det gælder datagrundlag eller geologisk viden og forståelse. Den geologiske tolkning bliver derfor i principippet det bedste gæt.

Kategori 4 (ukendt) falder udenfor kriterierne for det, der normalt anbefales modelleret i en rumlig geologisk model (Jørgensen et al. 2008). Idet lagfladerne i Tønder-modellen anvendes til at tilskrive lithologi til voxler i hele modelrummet har det været nødvendigt at anvende kategori 4. Dette er sket i områder hvor geologien er ukendt, og hvor der derfor kun kan angives "bedste gæt" (se afsnit 5.3).

Usikkerhed på SSV

For den del af modellen, der er baseret på SSV-modellering er der sammen med estimaten af lerindhold beregnet en usikkerhed på inversionen. I forbindelse med anvendelsen af SSV er der dog flere usikkerhedsfaktorer, der spiller en rolle for oversættelsen fra elektriske modstande til lithologi: Silt, salt porevand og heterogenitet. Silt kan have høje modstande og vil kunne fremstå som sand i modellen. Fint silt, særligt i form af glimmersilt, kan imidlertid have hydrauliske egenskaber, der er mere sammenligneligt med ler end med sand, hvilket potentielt give problemer ved grundvandsmodelleringen. Salt porevand kan resultere i ikke-eksisterende "lerforekomster" i modellen. Endelig kan heterogeniteten i områder være for høj i forhold til afstanden og korrelationen mellem TEM-data og boredata. Ovennævnte usikkerhedsforhold vil uundgåeligt influere på resultatet af denne model.

5.3 Sammenligning med retningslinjer i vejledning

Modellen er ikke opstillet i henhold til de retningslinjer vedr. underopdeling af modeltyper, der er angivet i GeoVejledning 3 (Jørgensen et al. 2008). I vejledningen opereres med 3 grundlæggende modeltyper: den geologiske forståelsesmodel, den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Foruden den geologiske forståelsesmodel består Tønder-modellen i praksis af en kombination af den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Lagfladerne i modellen udgør den rumlige geologiske model, dog også udbygget i de ukendte dele af modelrummet med "bedste gæt". Sorteres disse tolk-

ningspunkter fra (på baggrund af tilskrevet usikkerhedskategori (4) i punktet) vil modellen i praksis udgøre den rumlige geologiske model som beskrevet i modelvejledningen.

Voxelmodellen kan sammenlignes med den hydrostratigrafiske model, idet den beskriver den rumlige fordeling af lithologien og dermed også til dels sedimenternes hydrauliske egenskaber. Som beskrevet i modelvejledningen dækker voxelmodellen hele modelrummet.

6. Databehandling og fremgangsmåde for tolkning

6.1 Boredata

6.1.1 Jupiterdata

Boredata er anvendt ved SSV og SGeMS-modelleringen samt ved den manuelle tolkning og modellering. Alle boredata er i modelarbejdet anvendt og visualiseret på profilsnit med en maksimal bufferafstand på 100 m. Ved tolkningen er der løbende suppleret med digitale, indscannede borejournaler. Der er taget højde for at omkring ¾ af borerne i området har en ”dårlig eller meget dårlig kvalitet” (se Kap 4.1.1), hvilket giver begrænsninger i detaljegraden af de geologiske tolkninger.

Den anvendte farvekode for lithologi er vist i Figur 18.



Figur 18: Anvendt farvekode for lithologi i boredata.

6.1.2 Nye undersøgelsesboringer inkl. logging

Der er i forbindelse med grundvandskortlægningen udført nye dybe undersøgelsesboringer to steder i modelområdet. Det ene sted er ved Travsted nordøst for Tønder, og det andet sted er ved Bønderby tæt ved Møgeltønder. Begge borer er udført i begravede dale. Ved Travsted blev der først udført en boring til 358 meters dybde (DGU nr. 167.1538), men denne styrtede sammen under filtersætningen. Som erstatning blev en ny boring udført til 325 meters dybde (DGU nr. 167.1545). Begge borer er logget med geofysiske tools (Orbicon 2010; Orbicon 2011). Boringen ved Bønderby (DGU nr. 166.761) er udført til en dybde af 262 meter og er ligeledes blevet geofysisk logget (Orbicon 2012). Borerne med tilhørende prøvebeskrivelser findes i Jupiter-databasen.

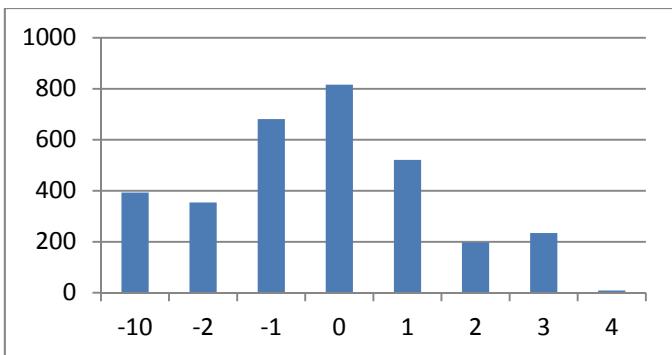
Borerne giver væsentlige oplysninger omkring de geologiske forhold, og disse oplysninger er særligt blevet anvendt som et grundlag for den dannelsesmæssige forståelse af området, men informationerne fra de store dybder har også været væsentlige for den mere konkrete opstilling af modellen i de gennemborede begravede dale. Borerne bordata er importeret fra Jupiter til GeoScene 3D.

6.1.3 Rating af borer til SSV og SGeMS

Til brug i den geostatistiske modellering er der udført en rating af alle borerens pålidelighed. Til forskel for den manuelle evaluering i Trin 1 (Kap. 4.1.1) er denne rating udført automatisk og for samtlige borer i området. Denne boringsrating er således udført som en automatisk proces, der omfatter alle borer indenfor Tønder-modelområdet. Den automatiske rating blev udført ved hjælp af følgende steps:

- Borer, hvor koten er målt med differentiel GPS eller lignende metoder har fået tildelt 1 point
- Borer, hvor koten er målt med differentiel GPS eller lignende metoder har fået tildelt 1 point.
- Borer, hvor x og y koordinater er målt med GPS har fået tildelt 1 point
- Borer udført ved hjælp af boringsmetoder, der giver troværdige prøver og laggrænser (Tørboring/slagboring, lufthæve, snegleboring, hulsnegleboring og el-log boring) har fået tildelt 1 point
- Borer udført som seismiske shot-holes har fået fratrukket 1 point, da de normalt er kendetegnet ved få prøver af dårlig kvalitet og mangelfuld beskrivelse.
- Borer udført af pålidelige boremestre har fået tildelt 1 point
- Borer, der har mere end 4 prøver pr. 10 m har fået tildelt 1 point
- Borer med mindre end 1 prøve pr. 10 m har fået fratrukket 1 point
- Borer uden beskrivelser har fået fratrukket 10 point

Processen resulterede i, at borerne med relevant information fik automatiske point mellem 4 og – 2, mens borerne uden information fik – 10 point (Figur 19).



Figur 19: Antal boringer med de forskellige antal points efter den automatiserede rating-proces. Boringer med -10 point indeholder ingen relevant information. De bedste boringer har 4 point, mens de dårligste (med relevant information) har -2 points.

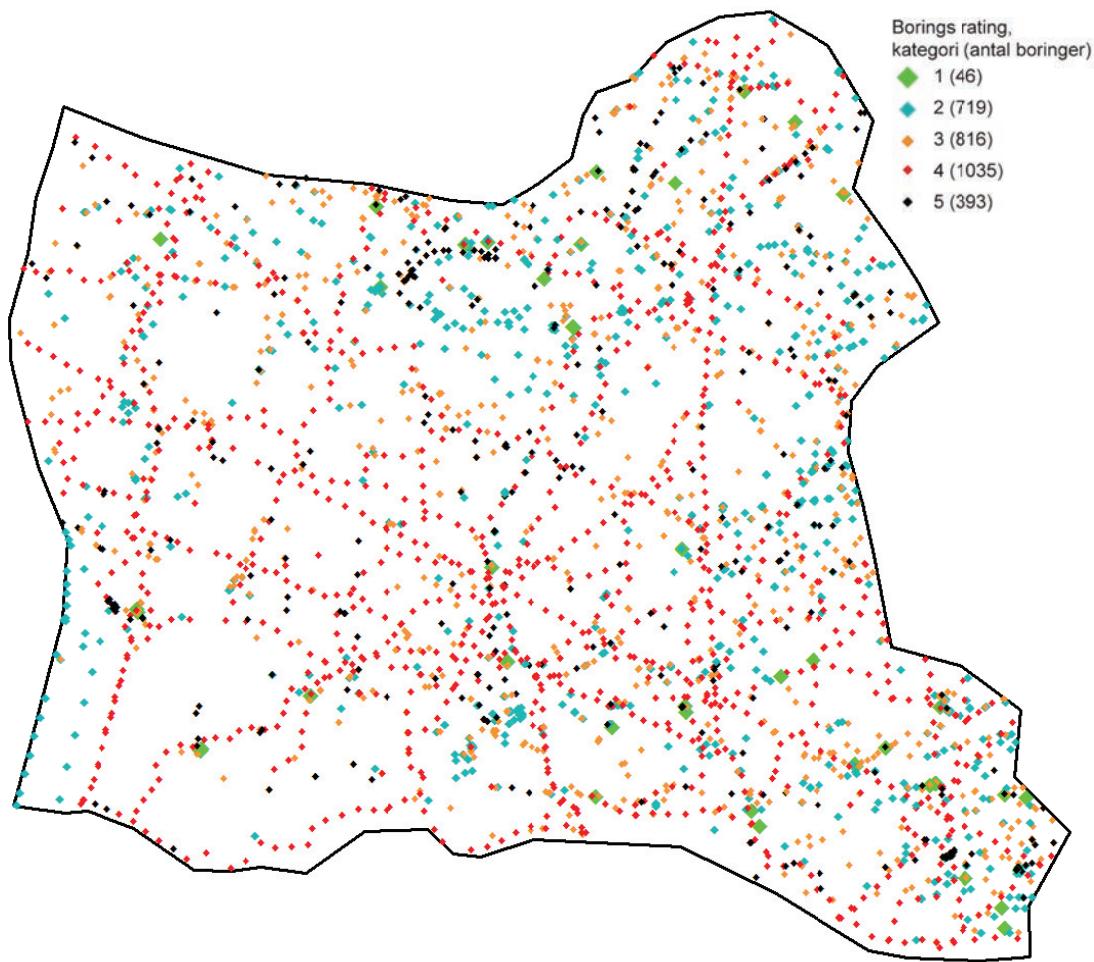
På baggrund af en undersøgelse af udvalgte boringer i de forskellige grupper med automatiske point, blev boringerne inddelt i 5 kvalitetskategorier (Tabel 4).

Boringsrating kategori	Boringskvalitet	Automatiske point	Antal boringer
1	God	≥ 3	243
2	Over middel	1 og 2	719
3	Under middel	0	816
4	Dårlig	-1 og -2	1035
5	Ubrugelig	-10	393

Tabel 4: Boringsrating baseret på automatisk tildelte point

Udover denne gennemgang blev de dybe DAPCO boringer gennemgået manuelt med henblik på at undersøge, hvorvidt disse boringer var pålidelige. De fleste af boringerne er dybe undersøgelsesboringer, der er detaljeret beskrevet af pålidelige kilder som f.eks. Theodor Sorgenfrei. Det er derfor vurderet, at disse boringer er af god kvalitet trods den ældre dato. Til gengæld er der andre af de dybe boringer, hvor der slet ikke er fokuseret på den kvartære lagserie, og hvor informationen derfor ikke er inddraget i de geostatistiske beregninger.

Fordelingen af boringerne i de forskellige kategorier kan ses i Figur 20. Som det fremgår af denne figur er der et netværk af boringer i kategori 4 (røde markeringer). Mange af disse er seismiske shot-holes, der er foretaget langs lige linjer.



Figur 20: Rating af borerne i undersøgelsesområdet.

6.2 SkyTEM

6.2.1 Anvendelse i modellen

SkyTEM data udgør en væsentlig del af datagrundlaget. Data vises både som enkeltmodeller (stave) på profilsnit og ved hjælp af interpolerede 3D-resistivitetsgrids. Både 5-lagstolkningerne og mangelagstolkningerne er løbende blevet anvendt. 5-lagstolkningerne er anvendt i tilfælde hvor eksakte laggrænser med modstandskontrast har skullet tolkes, eller hvor et estimat af en modstandsværdi har skullet vurderes. Mangelagsmodellerne er anvendt til at få overblik over geologiske strukturer og deres variationer. Typisk er de to modeltyper anvendt i kombination. Depth of investigation (DOI) er anvendt i tilfælde, hvor det har været vigtigt at kende den minimale indtrængningsdybde.

SkyTEM data er endvidere anvendt ved den geostatistiske modellering, både ved SSV og SGeMS-modelleringen (se Kap. 7.3 og 7.4).

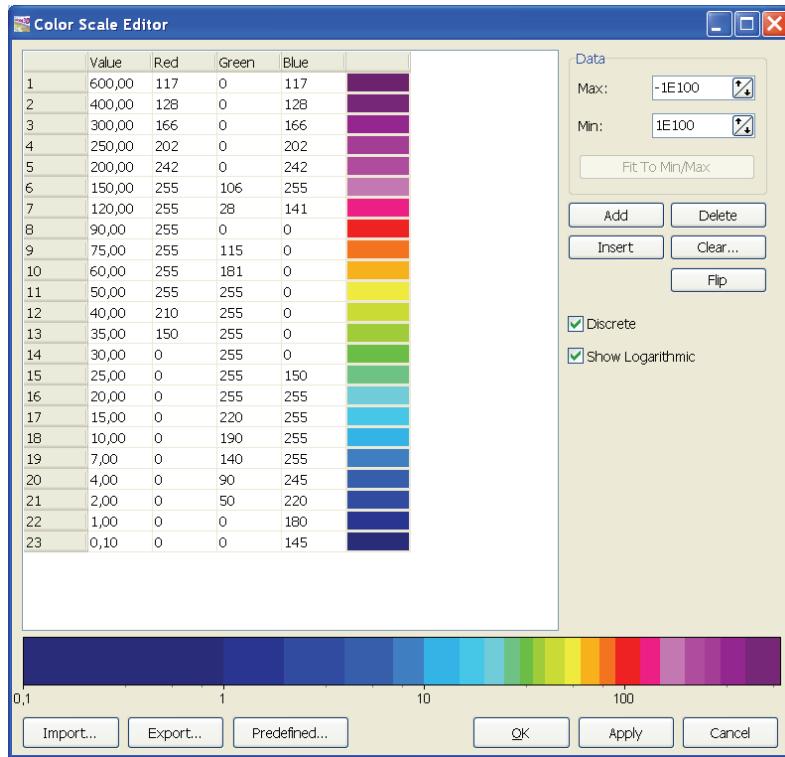
6.2.2 Konstruktion af 3D resistivitetsgrids

Der er udarbejdet 3D-modstandsgrids for både mangelagsversionen og fålagsversionen. Dette arbejde er gjort i Aarhus Workbench og i GS3D. I Workbench er der først lavet et databaseudtræk, hvorefter der er beregnet middelmodstande fra kote -270 m til terræn med en vertikal diskretisering på 5 m. Der er anvendt vertikale modstande og middelmodstandende er interpoleret ved brug af kriging med cellestørrelsen 100 m og søgeradius 500 m. Der er ikke anvendt 'logaritmic data transform'. Proceduren gav en serie på i alt 60 grids, som blev stakket til et 3D-grid i GS3D Toolbox.

De udarbejdede modstandsgrids visualiseres på profiler og fladekort ved hjælp af en farveskala, som beskrives nedenfor. Da grids, sammenlignet med enkeltonderingerne, beskriver den interpolerede modstand (inklusive modelrummet mellem sondringerne), vil de fremstå som en kontinuert repræsentation af data. De interpolerede grids kan således let visualiseres rumligt i både horizontale snit og i vertikale snit. De horizontale snit svarer til middelmodstandskort, mens gridcellerne i de vertikale snit (profiler) svarer til snit gennem hele stakken af middelmodstandskort. Oven på de kontinuert visualiserede modstandsgrids kan andre data, f.eks. boredata let visualiseres. Der er dog også behov for løbende at få vist enkeltonderingerne ved at vælge disse til og fra. Dette gøres typisk for at kontrollere detaljer i data, og for at tage højde for interpolationsafstanden til profilsnittet er det også vigtigt hele tiden at holde kontrol med afstanden til sonderingspunkterne (kan gøres i kortvinduet).

6.2.3 Farveskala

Farveskalaen, der er benyttet ved visualisering af TEM data i dette projekt, er vist i Figur 21. Farveskalaen er særligt detaljeret ved de lave modstande. De blå farvenuancer repræsenterer især lerlag af tertiær oprindelse, men også smeltevandsler, interglacialt ler og saltvand. Grønne og gule farver svarer især til moræneler og blandede lag af ler og sand. Rødlige farver angiver sandede lag. Value angiver modstand i ohmm.



Figur 21: Farveskala benyttet ved visualisering af TEM-data, hvor "value" angiver modstand i ohmm.

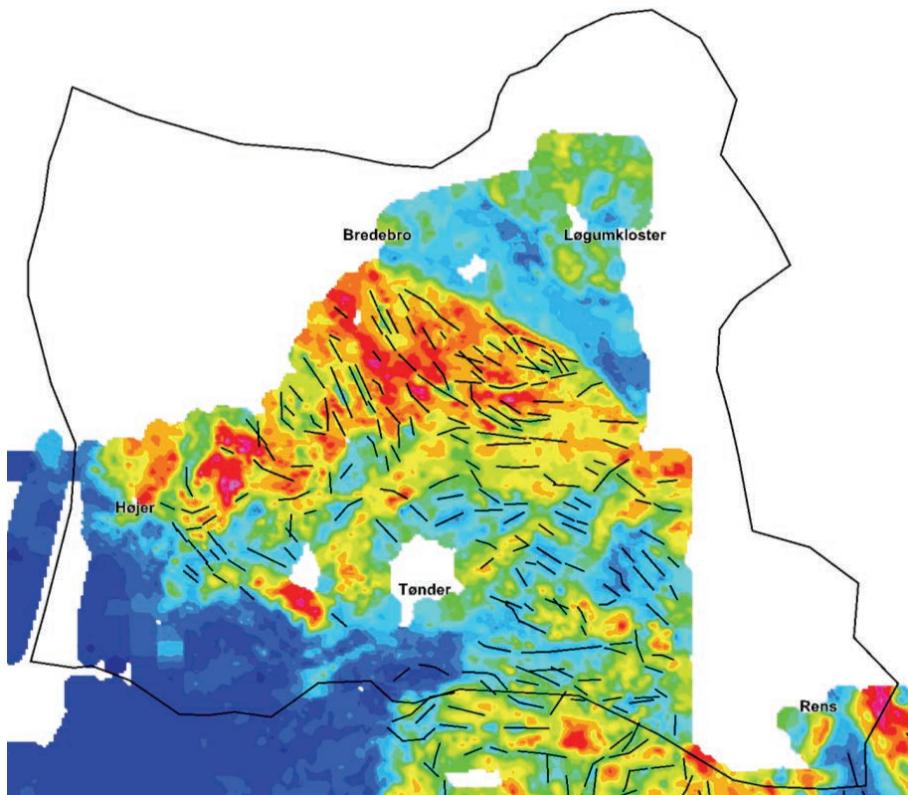
6.2.4 Forsøg med a priori

Undervejs i modelleringsprojektet er den modellerede overflade af Palæogenet blevet anvendt som a priori i den geofysiske inversion (Aarhus University 2012). Top Palæogen blev modelleret primært på baggrund af de seismiske data og enkelte dybe boringer. Efter en sammenligning af resultatet med de oprindelige versioner, blev det besluttet ikke at benytte a priori versionerne som det primære datagrundlag for modelleringen. De er dog lejlighedsvis inddraget som en del af tolkningsgrundlaget i områder med særlige problemstillinger.

6.2.5 Eksempler på tolkning af SkyTEM-data

6.2.5.1 Glacialtektonik

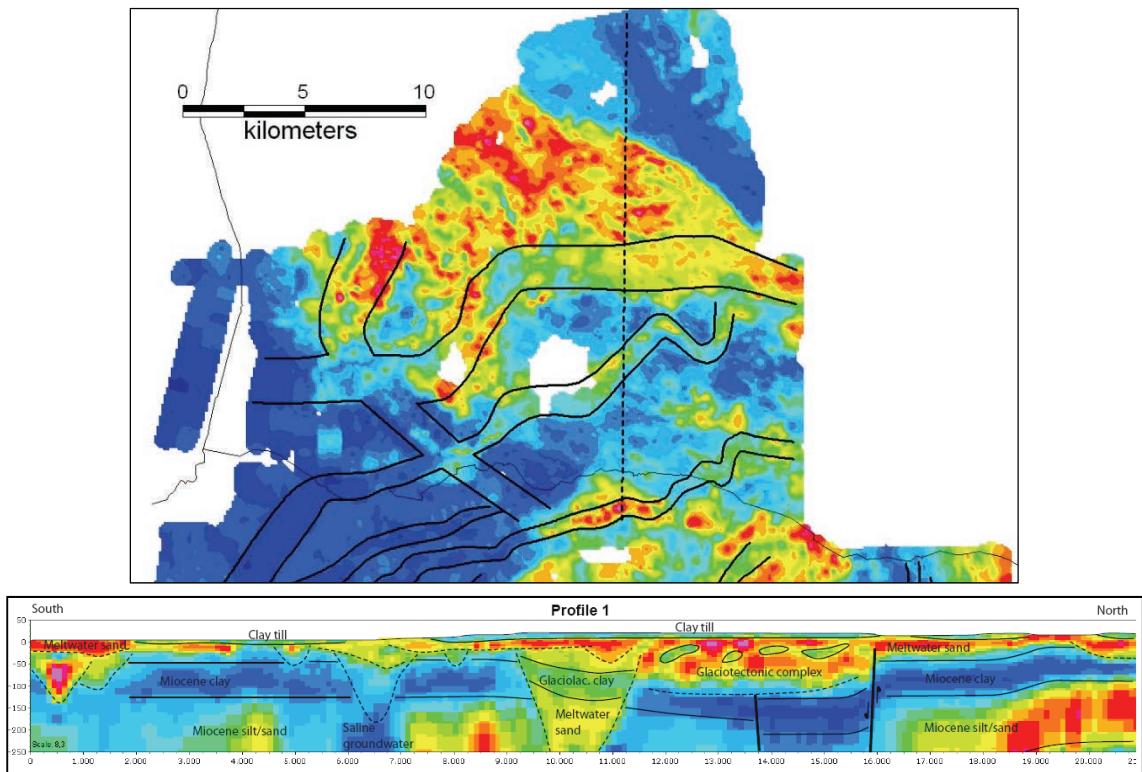
Store dele af modelområdet er kraftigt præget af glacialtektoniske forstyrrelser. I SkyTEM data ses dette som komplekse mønstre i resistivitetsbilledet på middelmodstandskort (Figur 22). I mønstrene kan erkendes aflange strukturer, der indikerer skråstillede lag som en følge af den glacialtektoniske deformation. De aflange strukturer er ofte svagt buede og tyder på et istryk fra nordøstlige retninger. Det glacialtektoniske præg kan følges ned til dybder på 150-200 m og findes i størstedelen af området.



Figur 22: Aflange strukturer i SkyTEM data der kan tolkes som skråstillede lag som en følge af glacialtektonisk deformation. De aflange strukturer er ofte svagt buede og tyder på et istoryk fra nordøstlige retninger. Nogle af de aflange strukturer ses i viste middelmodstandskort 30-35 meter under terræn. Andre ses i andre niveauer. Se Figur 21 for farveskala.

6.2.5.2 Begravede dale

SkyTEM data afslører også mange begravede dale. Disse ses som aflange anomalier i modstandsbilledet og erkendes særligt ved at sammenholde middelmodstandskort fra forskellige dybder (Figur 23). Nogle gange og over nogle strækninger ses de som positive anomalier og på andre strækninger ses de som negative anomalier i modstandsbilledet. De kan bevæge sig op og ned i niveau, således at de kan være svære at følge på horizontale middelmodstandskort over længere strækninger. Nogle af de ældre dale er blevet overpræget af glacialtektonisk aktivitet, hvilket yderligere slører dem i SkyTEM-data. Der ses lag med lave modstande i nogle af dalene, ifølge borer svarende til ler af forskellig type.



Figur 23: Øverst ses et middelmodstandskort fra 50-55 m under terræn. Tidligere tolkede begravede dale er markeret med sorte streger og kan delvist følges som aflange høj- og lavmodstands anomalier i dette niveau. Nederst er vist et tværsnit gennem 3D resistivitetsgriddet med geologiske tolkninger – se lokalisering på kortet øverst. Se Figur 21 for farveskala. Modificeret fra Jørgensen et al. (2012).

6.2.5.3 Miocæn

Den øverste del af miocænet består af Gram og Hodde ler (Måde Gruppen), hvilket har en god elektrisk ledningsevne. Dette er derfor let genkendeligt i SkyTEM-data. Det ses som et ca. 50 m tykt lavmodstandslag (Figur 23) over det meste af mrådet, bortset fra hvor det er gennemskåret af begravede dale. Nedenunder dette lag ses højere modstande af sandede og siltede lag.

6.2.5.4 Forkastninger

Nogle af Tønder Gravens forkastninger og fleksurer ses tydeligt i SkyTEM data som mere eller mindre rette linjer gennem modstandsbilledet. Særligt hvor der sker en nedforkastning af leret i Måde Gruppen (se nordlige del af kortet i Figur 23).

6.2.5.5 Saltvand

Det saline grundvand under Tøndermarsken er tydeligt markeret i SkyTEM data som lave modstande. Det kan dog stadig lade sig gøre at hente informationer om geologiske forhold ud af data i dette område. Dalen optræder nogle steder som aflange anomalier på trods af de lave modstande og det samme gør Måde Gruppen. De nævnte forhold ses dog særligt i den tyske del af kortlægningen (Figur 23).

6.3 Seismik

6.3.1 Import og dataforberedelse

Tolkningen af de seismiske data er udført på en seismisk tolkningsstation i Landmarks SeisWorks2D. Der er tolket på data fra grundvandskortlægningen og på de konventionelle olieseismiske data. Nogle linjer har været tolket i forbindelse med Ribe Formationsprojektet (Friborg & Thomsen 1999) og findes kun i papirudgave. Disse er scannet og importeret direkte til GeoScene3D.

Til indlægning af seismiske data i GeoScene3D er der blevet videreudviklet en metodik først etableret i forbindelse med Miocæn3D-projektet. De seismiske data er blevet plottet fra den seismiske tolkningsstation til såkaldte cgm-filer, som efterfølgende er blevet konverteret til jpg-filer. Alle linjer er plottet med stigende CDP-numre fra venstre mod højre uanset linjens retning. Positionsdata er blevet eksporteret til ascii-filer fra den seismiske tolkningsstation. Ved hjælp af ArcMap tools er der lavet en udlugning af datapunkter i positionsfilerne, før de er hentet ind i GeoScene3D. Endelig er jpg-filerne lagt ind i GeoScene3D langs de reviderede positionsfiler.

Med udgangspunkt i jpg-filerne er der blevet beregnet en top- og bundkote for hver enkelt seismisk profil. Top- og bundkoterne er beregnet og angivet for top og bund af selve billedfilen og ikke for top og bund af de seismiske data, hvilket hænger sammen med den måde hvorpå billedfiler indlæses og georefereres i GeoScene3D. Der er anvendt en fast gennemsnitshastighed på 1800 m/s for alle seismiske profiler ved beregningen af top og bundkoter (Kristensen et al., 2010).

6.3.2 Miocæn stratigrafi

De seismiske data er blevet stratigrafisk tolket indenfor rammerne af Miocæn 3D-projektet (Kristensen et al. 2010). I Miocæn 3D-projektet samtolkes stratigrafiske borer og højoplöselige seismiske data i henhold til den nyeste miocæne lithostratigrafi (Rasmussen et al., 2010).

Fra de stratigrafiske borer og fra modelleringen af miocænet i Miocæn 3D i områderne nord for Tønder-modelområdet, er der arbejdet videre med modelleringen ud fra en paleogeografisk og sekvensstratigrafisk indfaldsvinkel. Der er fokuseret på at adskille lagserien i limniske, kystnære og kystfjerne aflejringsmiljøer.

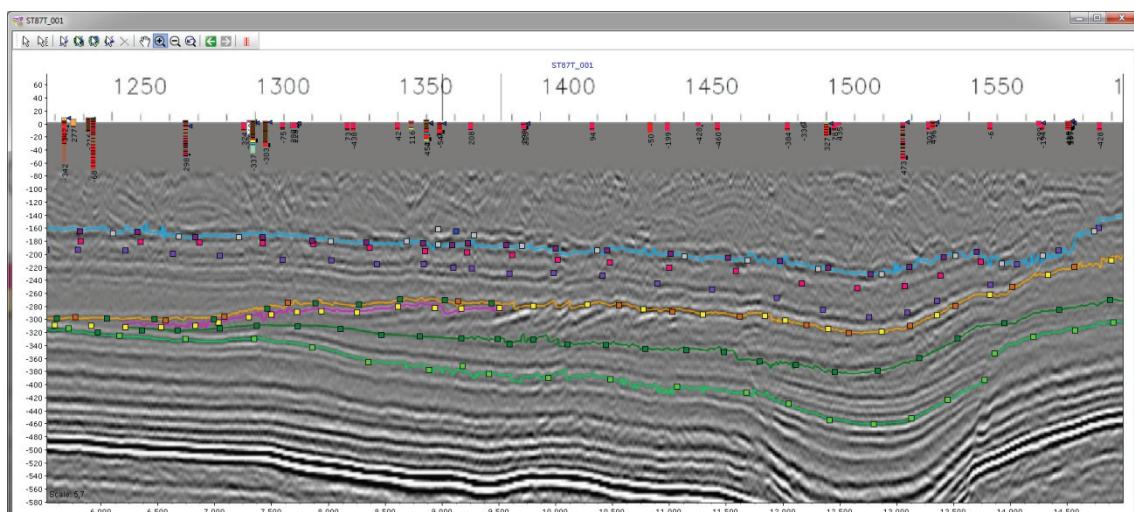
Punkttolkning i regi af Miocæn 3D-projektet er først og fremmest foretaget i stratigrafiske borer og langs reflektorer på de seismiske billedfiler i GeoScene3D. Tolkningen af laggrænser i de stratigrafiske borer kan adskille sig fra laggrænser i Jupiterdatabasen. Det-

te skyldes, at ændringer i gammaloggen og biostratigrafiske zoner vægtes højere end ændringer i kornstørrelsen af sedimentet ved tolkningen af de stratigrafiske borer.

De stratigrafiske borer er udvalgt som dybe borer i miocænet, som ofte indeholder alle eller flere af følgende kriterier: Gode sedimentbeskrivelser, gammalog og biostratigrafisk analyse. Desuden indgår de ofte i et eller flere korrelationspaneler til beskrivelse af den miocæne lagserie i tidligere publikationer.

I modelområdet findes 4 borer, der kan karakteriseres som miocæne stratigrafiske borer. Det er Borg-1 (DGU nr. 158.760), Løgumkloster (DGU nr. 159.739), Travsted (DGU nr. 167.1538) og Øster Højst (DGU nr. 159.1335). Der findes biostratigrafiske analyser for Borg-1, Travsted og Øster Højst, og der findes gammalog for alle borerne. Gammalog-mønsteret fortæller om, hvor der er sandede eller lerede indslag i borerne og er derfor et rigtigt godt supplement til sedimentbeskrivelserne. Ud over gammalog fra Jupiter-databasen er der indhentet gammalogs fra SAMBA databasen (GEUS' seismikdatabase) på Tønder-1 (DGU nr. 166.230), Tønder-2 (DGU nr. 166.232) og Tønder-3 (DGU nr. 166.602) for at få informationer om miocænet i den sydlige del af modelområdet, hvor der ikke er særlig mange dybe borer eller seismik.

I forbindelse med tolkningen af de seismiske linjer er der udført kvalitetssikring og færdiggørelse af tolkningen af overordnede lagflader (Top Miocæn, Bund Miocæn og MRS Bastrup), hvis de erkendes på seismikken. Der er ikke fundet aflejringer fra Billund Formationen i modelområdet. Som støtte til punkttolkningen i GeoScene3D, er der udført detailtolkning af de underordnede lag (Klintinghoved, Bastrup, Arnum og Odderup). Detailtolkningen er et forsøg på at afgrænse udstrækningen af sandede enheder på de seismiske profiler. I nogle tilfælde er der tolket sandede enheder alene ud fra refleksionsmønsteret på profilerne.



Figur 24: Eksempel på seismisk profil med tolkninger fra Landmark (farvede streger) og tolkningspunkter i GeoScene3D (farvede prikker). Ofte findes der ingen borer til at understøtte tolkningerne. Her ses tydeligt en deltaudbygning på seismikken med skråstillede reflektorer mellem de gule og mørkegrønne tolkningspunkter centralt i profilet.

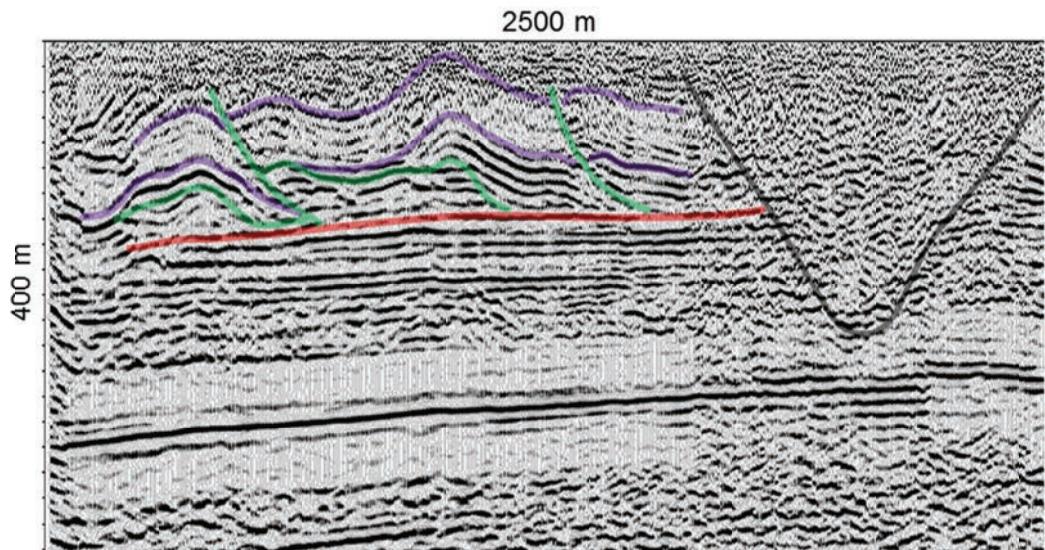
Efter eksport fra Landmark af billedfiler med seismiske tolkninger og import til GeoScene3D er de udvalgte flader således blevet modelleret med tolkningspunkter langs linjerne og i

boringer med stratigrafiske oplysninger (Figur 24). Herefter er fladerne med støtte fra bl.a. SkyTEM, øvrige boringer og generel geologisk forståelse af aflejringsmiljø m.m. blevet udbygget til egentlige rumlige enheder med frie fladetolkningspunkter imellem de seismiske linjer.

6.3.3 Andre eksempler på tolkning af seismik

6.3.3.1 Glacialtektonik

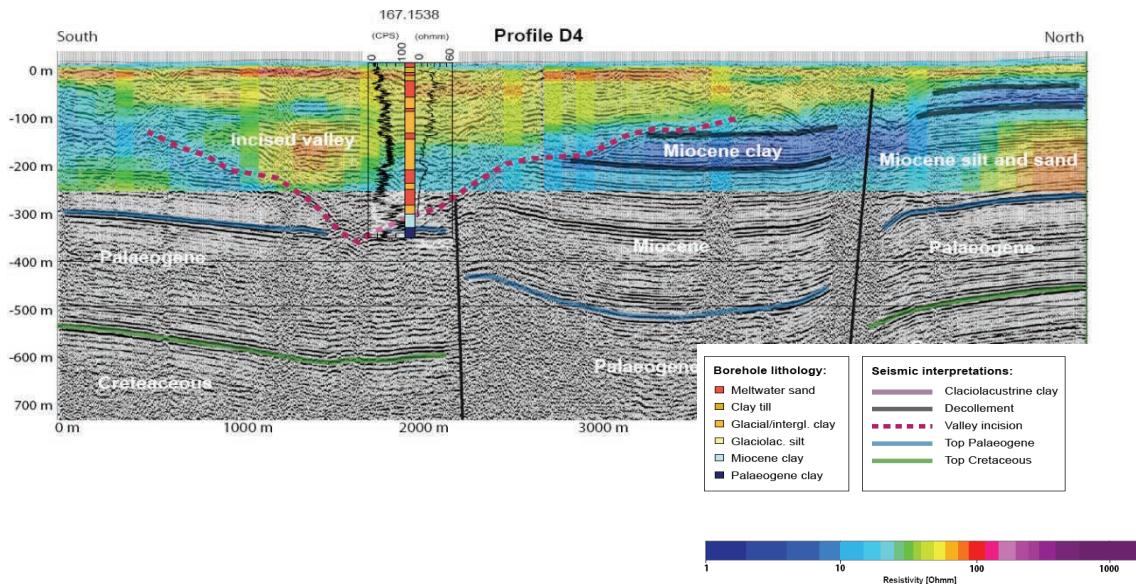
Glacialtektonikken ses tydeligt i mange seismiske sektioner. Et eksempel fra en shallow-seismisk linje er vist i Figur 25. Glacialtektonikken kan også ses tydeligt i flere olieseismiske linjer (Andersen 2004). Det basale decollement er modelleret rumligt på baggrund af de seismiske linjer i det meste af området. Decollementfladen ses oftest i den nedre del af Måde Gruppen men skærer også gennem flere af de ældre begravede dale.



Figur 25: Eksempel på glacialtektonik på en grundvandsseismisk linje. Rød streg repræsenterer tolkning af basal decollementflade, grønne streger er overskydninger. Lilla angiver foldet og forkastet lerlag i toppen af Måde Gruppen. Det tektoniske kompleks gennemskæres af en begravet dal (til højre).

6.3.3.2 Dale

De begravede dale ses ofte meget tydeligt på de seismiske profiler. Her ses de ofte erodert ned i den miocæne lagserie, der typisk ses som horisontale refleksioner (Figur 26). Det er ofte vanskeligt at se selve erosionsfladen ved bunden af dalen. Dalenes fyld består af kvartært materiale og er generelt mere varieret end miocænet, og undertiden kan dalene kun erkendes på forskelle i refleksionsmønstre.



Figur 26: Seismisk profil med en dyb begravet dal (se Figur 16 for beliggenhed - "ToFor-To"). SkyTEM-grid og boretdata fra en dyb undersøgelsesboring er vist oven på seismikken. Fra Jørgensen et al. (2012).

6.3.3.3 Forkastninger

Tønder Gravens forkastninger og flexurer ses tydeligt i seismikken, hvor de forsætter eller på anden måde deformerer den præ-kvartære lagdeling (Figur 26).

6.4 Multielektrode profilering (MEP)

Da MEP-data befinner sig indenfor den del af modellen, der er blevet modelleret ved hjælp af SSV og SGeMS, er MEP-data blevet anvendt som datagrundlag ved den manuelle gennemgang.

6.5 Hydrologiske data

Hydrologiske data fra Jupiter er anvendt ved modelleringen. Vandspejl og filterplacering er visualiseret på borerne. Vandspejlsniveauer i forskellige borer kan f.eks. give information om manglende sammenhænge mellem magasiner. Desuden er der skelet til ydelsen i form af oppumpning og sænkninger; værdier som i kombination kan give information om magasiners størrelse og lithologi.

I den manuelle gennemgang af modellen er det i muligt omfang vurderet, om der er tydelige spring i trykniveauer og måske derfor manglende hydrauliske sammenhænge indenfor sand- og gruslag. Lagene kan uhensigtsmæssigt være koblet sammen i SSV-beregningen og derved viderefivet til det lithologiske grid.

7. Procedurer for udarbejdelse af geologisk model

I dette kapitel beskriver vi ikke resultaterne, men kun de anvendte metoder og procedurer

7.1 Lagmodel

7.1.1 Modellering af lagflader

Overordnet er modelleringen af lagflader udført i henhold til GeoVejledning 3 (Jørgensen et al. 2008). De i denne model anvendte typer af tolkningspunkter er:

- *Snappede fladetolkningspunkter*: Definerer en tolket position af en flade i rummet. Et snappet fladetolkningspunkt er tilknyttet et datapunkt eller dataprofil i modelrummet. Dette er typisk en laggrænse i en boring, i en geofysisk sondering eller på et seismisk profil.
- *Frie fladetolkningspunkter*: Definerer en tolket position af en flade eller et lag i rummet. Et frit fladetolkningspunkt har i modsætning til det snappede fladetolkningspunkt ingen præcis tilknytning til data, men afsættes typisk på et vertikalt profilsnit eller et horisontalt kortsnit.
- *Støttende fladetolkningspunkter*: Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet. Et støttende fladetolkningspunkt er et frit fladetolkningspunkt, der alene benyttes, hvis man i en senere fase ved interpolation ønsker at omdanne sin punktsværm til grids. Støttende fladetolkningspunkter anbringes på steder, hvor man ønsker at styre sit grid på en forudbestemt måde. Sådanne punkter er kun benyttet i begrænset omfang i modellen.

Fladetolkningspunkterne er udført på dynamiske/flytbare profiler og horisontale snit og punkterne er derfor ikke knyttet til faste vertikale profilsnit eller horisontale kortsnit.

Selve sværmen af fladetolkningspunkter for en flade definerer dennes tolkede udbredelse og tolkningens sikkerhed/usikkerhed i kraft af den tilhørende usikkerhedsangivelse. Interpolation af fladen udføres med henblik på visualisering og formidling af fladens udbredelse i rummet.

Alle tolkningspunkter er håndteret i en Access database, hvor punktsværmen for hver flade har sin egen tabel. Der skrives direkte til tabellen under tolkning i GeoScene3D. Databasen, der indeholder tolkningspunkterne i Tønder-modellen, er navngivet ToenderXYZ.mdb og i databasen indgår der følgende tabeller (og dermed lagflader i den geologiske model):

Flade	Tabelnavn i ToenderXYZ.mdb
Saltvandsafgrænsning	Salt1
Bund af Postglacial	Postglacial_bottom
Bund af Hedeslette	Sandur_bottom
Top af moræneler ved Bylderup-Bov	Q_Clay_Top
Bund af moræneler ved Bylderup-Bov	Q_Clay_Bottom
Top af lerlag i Møgeltønder-dalen	Møgel_clay_top
Bund af lerlag i Møgeltønder-dalen	Møgel_clay_bottom
Top af sand i Løgumkloster-dalen	Løgumkloster1_Top
Top af lerlag i Højer-dalen	Højer_clay_top
Bund af lerlag i Højer-dalen	Højer_clay_bottom
Top af Eem i Tønder-Jejsing-dalen	Eemian_bottom
Bund af Eem i Tønder-Jejsing-dalen	Tønder_Jejs_Eem_top
Top af sand i Tønder-Jejsing-dalen	Sandur_Bottom
Top af ler i Tønder-Jejsing-dalen	Tønder_Jejs_clay_top
Top af lerlag i Abild-dalen	Abild_clay01_top
Bund af lerlag i Abild-dalen	Abild_clay01_bottom
Bund af Højer-dalen	RIB29_Hoejer_dalbund
Bund af Abild-dalen	RIB30_Abild_dalbund
Bund af Tønder-Jejsing-dalen	RIB40_Toender_Jejs_dalbund
Bund af Løgumkloster 1-dalen	RIB41_Loegumkl_1_dalbund
Bund af Løgumkloster 2-dalen	RIB41_Loegumkl_2_dalbund
Bund af Løgumkloster 3-dalen	RIB41_Loegumkl_3_dalbund
Bund af Lydersholm-dalen	RIB42_Lydersholm_dalbund
Bund af Møgeltønder-dalen	RIB43_Moegeltoender_dalbund
Basal decollement-flade	GlacTek_seismikprofiler
Top af Måde Gruppen deformert	TopMaadeGroup_ink_deforme_ovre_lag
Top af Måde Gruppen	TopMaadeGroup
MRS Odderup	MRS_Odderup
Top af Odderup Sand 3	ODS3
Top af Arnum Ler 3	ARL3
Top af Odderup Sand 2	ODS2
Top af Arnum Ler 2	ARL2
MRS Bastrup	MRS_Bastrup
Top af Klintinghoved 10	KRL10
Top af Bastrup Sand	BADS9
Top af Klintinghoved 9	KRL9
Top af Palæogen	TopPal
Top af Kridt	TopChalk

Tabel 5: Flader i den geologiske model med tabelnavn i databasen fladetolkningspunkter.

Fladetolkningspunkterne er - i de områder den pågældende flade eksisterer – forsøgt afsat med en ensartet, indbyrdes afstand uanset graden af usikkerhed. Der er på de fleste flader som udgangspunkt anvendt en indbyrdes afstand på 500 m. Dog er der for bundfladerne af

de begravede dale som udgangspunkt anvendt en gennemsnitlig afstand på 250 m. For Top Kalk er der anvendt en afstand på 1000 m.

Den efterfølgende interpolation til flader er udført i GeoScene3D med Kriging. Der er anvendt:

- Cellestørrelse på 200 m og søgeradius på 1000 m for flader med indbyrdes punktafstand på 500 m
- Cellestørrelse på 100 m og søgeradius på 500 m for flader med indbyrdes punktafstand på 250 m
- cellestørrelse på 400 m og søgeradius på 2000 m for flader med indbyrdes punktafstand på 1000 m. Ved efterfølgende bearbejdning af fladerne er cellestørrelserne blevet forfinet ved resampling (se Kap. 7.1.4).

7.1.2 Delvist automatisk genererede lagflader

For enkelte lagflader er der benyttet en delvist automatiseret procedure for generering af lagflader mellem to eksisterende referenceflader – ”gulv” og ”loft”. Formålet er at skabe en flade, der honorerer allerede afsatte fladetolkningspunkter på seismiske profiler og i enkelte borer, men hvor der, for at skabe en rumlig flade, ikke er afsat punkter imellem disse. Den skabte flade skal således honorede de allerede afsatte, men spredt beliggende, sikre eller relativt sikre tolkningspunkter i rummet mellem de to referenceflader og samtidig følge de samme overordnede rumlige variationer som referencefladerne følger. Sidstnævnte som en følge af, at lagfladen, der skal skabes er en del af en samlet lagserie (inklusive loft- og gulv-fladerne) med samme overordnede rumlige variationer. Proceduren er udviklet og anvendes for at undgå at digitalisering af usikre tolkningspunkter i rummet, hvilket er tidskrævende, og så længe tolkningen bag punkterne er usikker betyder automatiseringen kun minimalt for den endelige model. Proceduren er udviklet af Frants von Platen-Hallermund, GEUS og gennemføres i ArcGIS. Proceduren beskrives nærmere i Bilag 9.

7.1.3 Justering af flader

Samtlige lagflader, undtaget dalbundsfladerne og dalenes interne flader, er justeret i forhold til krydsende lagflader. Justeringen er foretaget ved anvendelse af GeoScene3D's ”Grid Adjustment and Evaluation”-tool, og der er justeret oppe fra og ned og efterfølgende nedefra og op med terræn som topflade og kalk som bundflade. Terrænoverfladen har været låst for justering.

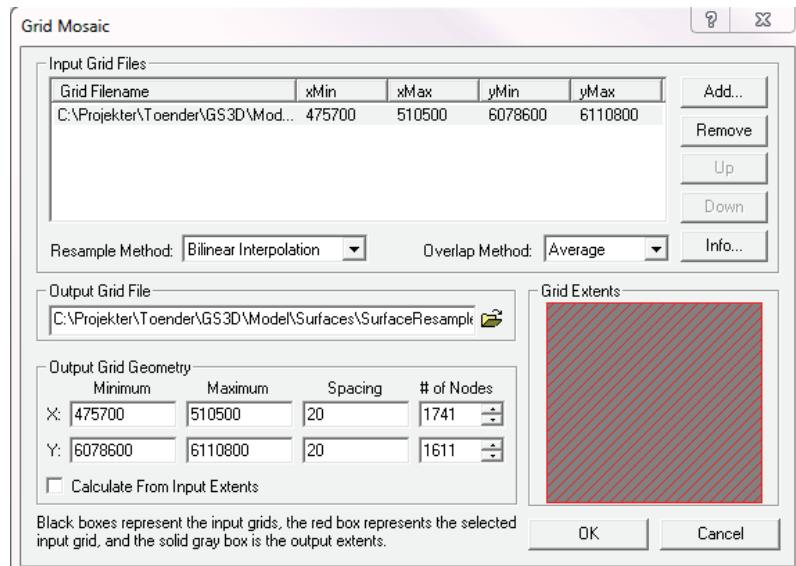
De anvendte settings er gemt i filen ”*AdjustAll_terrain_to_Chalk.xml*”.

7.1.4 Resampling af flader

Efter justering af lagfladerne (Kap. 7.1.3), er der foretaget en resampling af fladerne. Resamplingen er foretaget med følgende formål:

- Fladebearbejdning: For at kunne bearbejde, herunder beskære, kombinere og udarbejde eksempelvis tykkelseskort for de enkelte enheder i modellen skal det sikres, at alle gridflader er defineret inden for samme udbredelsesområde (extent) og har samme gridgeometri. Dette sker ved resampling, hvor der foruden ensretning af extent også sikres sammenfald af gridnoder i de enkelte grids. Ved flader der som udgangspunkt ikke dækker hele modelområdet, eksempelvis begravede dale, er denne resampling også nødvendig i forhold til senere anvendelse af fladerne i modellen.
- Solid Layers: Med henblik på i profilsnit i GeoScene3D at anvende solidlayers (udfyldning med farve mellem de enkelte lagflader) skal det sikres at fladerne har samme gridstørrelse og at gridnoderne er sammenfaldende. Alternativt opstår blanke partier i solidlayers.
- Voxellering af lagmodel: Med henblik på at anvende lagmodellen som grundskelet i voxelmodellen skal det sikres, at der er sammenfald mellem gridnoder og cellestørrelser i de grid der anvendes i voxelmodellen. Jo større cellestørrelser i de griddede lagflader, desto grovere – mere klodset – bliver voxelmodellen at se på. Det vil være særligt tydeligt ved kraftigt hældende flader, eksempelvis ved begravede dale eller forkastninger.

Indledningsvist er der gjort forskellige forsøg med resampling af lagflader i såvel GeoScene3D som Surfer. Det viste sig, at den visuelt nærmeste resampling, som stadig var så tro mod data som muligt, opnåedes i Surfer. Der er anvendt "Bilinear Interpolation" som resamplingmetode og "Average" som "Overlap Method", samt en gridcellestørrelse på 20 meter, se Figur 27.



Figur 27: Metode og anvendte settings i forbindelse med resampling af lagflader i Surfer.

Alle flader i Tabel 5 er blevet resampled i Surfer efter ovenstående settings, og efterfølgende genindlæst i GeoScene3D.

Det er væsentligt at bemærke, at resampling af de oprindelige flader, interpoleret med eksempelvis 200 m gridceller, ikke påvirker den oprindelige interpolation, men i principippet blot deler de enkelte gridceller i mindre blokke.

7.1.5 Beskæring af flader.

Alle flader er beskåret i GeoScene3D's Toolbox. Der er foretaget beskæring i forhold til afgrænsningspolygonet "Region_Modelomr", hvorved alle dele af de respektive flader udenfor kortlægningsområdets grænse er fjernet.

For flader med afgrænset lateral udbredelse er der udarbejdet afgrænsnings-regioner, der definerer det interpolerede grids udbredelse (Tabel 6). Disse regioner er blevet benyttet ved beskæringen.

Flade	Tilhørende afgrænsningsregion
Alle	RegionModelomr
Bund af Hedeslette (fladen er blanket inden for de angivne regioner)	Toftlund01 Jejsing Hjersted01 Hjersted02 Hjersted03 Abild01 Abild02 Abild03 Abild04 Abild05 Abild06 Abild07
Bund af Postglacial	Region_Postglaciale_aflejringer
Bund af Højer-dalen	Hoejer
Bund af Abild-dalen	Abild
Bund af Tønder-Jejsing-dalen	Toender_Jejs
Bund af Løgumkloster 1-dalen	LoegumKloster_1
Bund af Løgumkloster 2-dalen	LoegumKloster_2
Bund af Løgumkloster 3-dalen	LoegumKloster_3
Bund af Lydersholm-dalen	Lydersholm
Bund af Møgeltønder-dalen	MoegeToender
Top af Klintinghoved 9	Region_KRL9
Top af Klintinghoved 10	Region_KRL10
Bastrup Sand	RegionBaDS9
Top af Odderup Sand 3	Region_ODS3

Tabel 6: Oversigt over udarbejdede og benyttede afgrænsningsregioner. Med mindre andet er nævnt, er der blanket uden for regionerne.

7.1.6 Kombination af flader.

Alt arbejde i forbindelse med fladekombination af lagflader er foretaget i GeoScene3D's Toolbox, ved anvendelse af funktion "Mosaic". Som beskrevet i det forrige, udføres kombinationen med henblik på at skabe lagflader der er defineret i hele modelområdet.

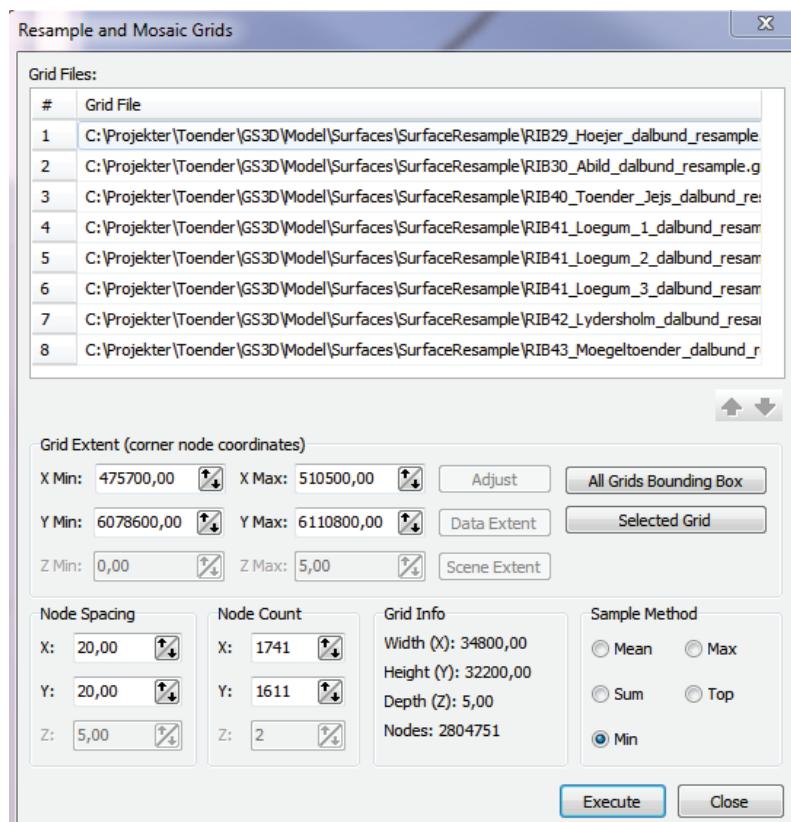
I det nedenstående er proceduren for flade kombination beskrevet for hhv. dalbundsfladerne og for andre lagflader.

Dalbundsflader

Flertallet af de begravede dale udgør markante strukturer, som skærer sig dybt ned i de dybere aflejringer under dalene. Visse dale skærer sig desuden ned i hinanden – se detaljer i Kap. 9.3.14.

Arbejdsgangen har været følgende for dalbundsfladerne:

1. Samtlige dalbunde er efter resampling (Kap. 7.1.3), kombineret til ét samlet grid.
2. De regionale modelflader (Grid1) er efterfølgende kombineret med det samlede dalbundsgrid (Grid2) ved at replacere de dele af de respektive grids, hvor der findes dalbund under griddet, dvs. hvor Grid2 < Grid1. Således indsættes bunden af de begravede dale i de øvrige flader, der hvor dalene skærer sig ned i fladerne. Settings er vist i Figur 28.



Figur 28: Kombination af gridflader i GeoScene3D. Bemærk: Der er kun foretaget kombination ("mosaic") og ikke resampling i denne proces.

Andre flader

For andre flader har arbejdsgangen har været følgende:

1. De aktuelle lagflader er resampled i Surfer (Kap. 7.1.3).
2. Lagfladerne er indlæst i GeoScene3D's toolbox. Her er de først beskåret i forhold til afgrænsningsregioner (Tabel 6). I Toolbox'en er der anvendt funktionen "Resample and Mosaic Grids". De indlæste lagflader er kombineret til ét samlet grid. Der er ikke foreta-

- get resampling i GeoScene3D. Der er anvendt "Max" under Sample Method i GeoScene3D.
3. Fladerne er kombineret med den samlede flade for de begravede dale, jfr. ovenstående.

7.2 Voxelmodel

Ved opstilling af voxelmodellen er der anvendt tre forskellige metodikker:

1. Geostatistisk tildeling af lithologi til voxler (SSV og SGeMS). Disse procedurer er nøje beskrevet i Kap. 7.3 og Kap. 7.4.
2. Tildeling af lithologi med lagflader og regioner som afgrænsning. Ved denne metode vælges to lagflader som hhv. øvre og nedre afgrænsning for de modelrum en given lithologi ønskes tildelt. Til lateral afgrænsning kan evt. benyttes regioner der beskriver den lithologiske enheds udbredelse.
3. Manuel tildeling af lithologi med specialudviklede værktøjer i GeoScene3D. Herved kan specifikke voxelgrupper udvælges på baggrund af f.eks. resistivitetsværdier, boredata og meget andet. Sådanne manuelle voxeltilkningsprocedurer er grundigt beskrevet i Møller og Jørgensen (2010). I Tønder-modellen er denne fremgangsmåde primært blevet benyttet i forbindelse med den manuelle gennemgang af SSV-resultaterne (se Kap. 7.3.6).

Proceduren for opbygningen af voxelmodellen er beskrevet i det følgende (fladenavne referer til Tabel 5):

- a) Der er oprettet et tomt voxelgrid med følgende dimensioner og egenskaber (Tabel 7):

Voxelgrid	Enhed (m)	
Cellestørrelse	100 (x) * 100 (y) * 5 (z)	
Antal lag	168	
MinX-MaxX	476.200	509.600
MinY-MaxY	607.9700.0	6.109.800
MinZ-MaxZ	-772,5	62,5

Tabel 7: Dimensioner af voxelgrid

- b) Det tomme voxelgrid er udfyldt med voxler fra eksisterende voxelgrids i følgende rækkefølge:
 - 1) SGeMS (filnavn "*nosoftReal84.grd3*")
 - 2) SSV (filnavn "*SSV_run16G_connect_10.grd3*")
 - 3) Lithologi2 (filnavn "*Lithologi2.grd3*")
 - 4) Lithologi1 op til "*Top af Måde Gruppen deformere*" (filnavn "*Lithology.grd3*")

De enkelte grids har samme dimension som angivet i Tabel 7. Udarbejdelsen af SSV, SGEMS og Lithologi1-griddene er beskrevet i Kap. 7.3 og 7.4. Udarbejdelsen af Lithologi2 er beskrevet sidst i dette afsnit.

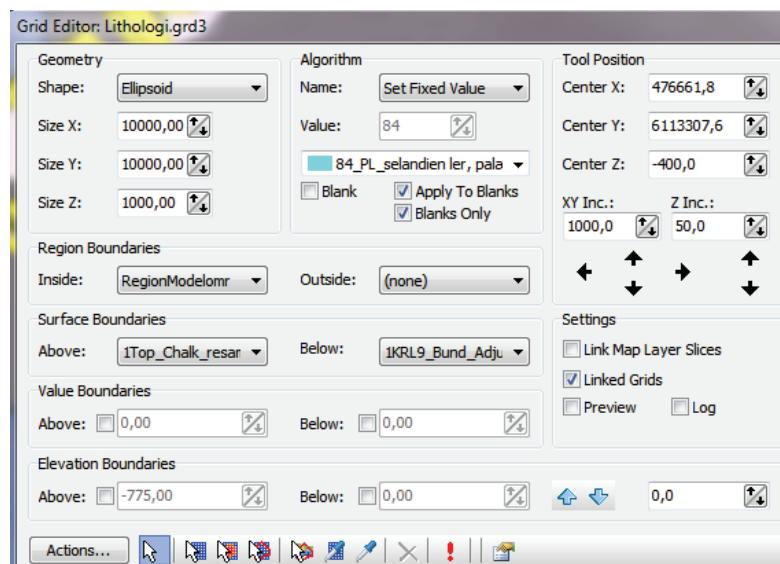
Ved samlingen er der i områder hvor to grids overlapper anvendt følgende rangorden:

- SSV overskriver SGEMS
 - Lithologi1 overskriver SSV og SGEMS
 - Lithologi2 overskriver SSV, SGEMS og Lithologi1
- c) Dette foreløbige voxelgrid blankes efterfølgende med fladen "Bund af hedeslette" og udfyldt med voxler svarende til hedeslette.
 - d) Gridded blankes nu med fladen "Bund af Postglacial" og udfyldes med tilsvarende voxler.
 - e) Gridded blankes med fladen "Saltvandsgrænse" (se Kap. 9.3.19) og udfyldes med tilsvarende voxler.

Det resulterende voxelgrid er således opbygget ved en stepvis kombination og beskæring på baggrund af eksisterende voxelgrids og lagflader.

Lithologi2-griddet som indgår i ovenfor beskrevne procedure er opbygget på baggrund af de tolkede lagflader fra og med "Top af Kridt" til og med "Top af Måde Gruppen deformert". Arbejdsgangen for etableringen af dette grid har været følgende:

- a) I GeoScene3D's Grid Editor er der i et tomt voxelgrid (se omtale ovenfor) foretaget voxellering på baggrund af eksisterende flader fra lagmodellen. Til udfyldelse af voxler i ét lag, er der anvendt 2 lagflader; en top og en bund. Som regionsafgrænsning for regionale lagflader er anvendt den overordnede områdeforgrænsning (Tabel 6). For ikke-regionale lagflader er anvendt tilhørende udbredelsesregioner (Tabel 6).
- b) Efter at top, bund, regionsafgrænsning og voxelsymbol er valgt, udfyldes voxelgriddet for den pågældende enhed. Et eksempel på settings for udfyldelse af voxellaget Palæogent ler er vist i figur Figur 29.



Figur 29: Voxelmodel-udfyldning af Lithologi2-grid (eksempel). (Bemerk; den i figuren viste lithologi "84_PL_selandien ler" er ikke den anvendte værdi). Der er anvendt en specielt udarbejde symboliste til nærværende voxelmodel (se evt. Bilag 1)

Der er anvendt en specielt udarbejde symboliste til voxelmodellen (se 0).

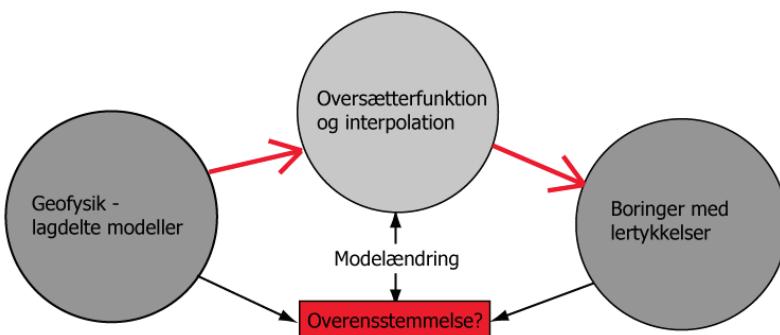
7.3 SSV

Helt grundlæggende beskriver SSV-konceptet en måde, hvorpå man kan optimere sam tolkningen af geofysiske og geologiske data i forbindelse med beregning af den akkumulerede tykkelse af lerlag inden for et valgt beregningsinterval. SSV-modulet udregner en funktion, der er i stand til at oversætte de geofysiske målinger til lerlagstykkeler på en måde, så der opnås bedst mulig overensstemmelse mellem den SSV-beregnehede lertykkelse og de lerlagstykkeler, der helt konkret er beskrevet i borerne.

Resultatet af SSV-beregningerne er således afhængigt af både tæthed og kvalitet af et områdes borer såvel som af tæthed, type og kvalitet af de geofysiske målinger. I principippet er der to yderpunkter, når man diskuterer datagrundlag og lertykkelsesberegninger: 1) Næsten ingen geofysiske data i et område: SSV-resultatet vil være tæt på, hvad man ville opnå udelukkende ved gridning af lerindhold fra de eksisterende borer. Man ender altså stort set med en boringsbaseret beregning. 2) Tæt geofysik datadækning og næsten ingen borer. Her vil resultatet nærme sig dét, man ville få ved benyttelse af en simpel omregning fra elektrisk modstand til ler eller ikke-ler (eksempel: ved modstande under 50 Ωm omregnes lag til ler og ved modstande over 70 Ωm omregnes lag til ikke-ler, medens lag med mellemliggende modstande omregnes med et gradvist aftagende bidrag til den samlede lertykkelse). I denne situation ender man således med en beregning, der næsten udelukkende er baseret på geofysik. Eftersom hovedparten af borerne i undersøgelsesområdet er relativt korte, er SSV beregningerne mest præget af boringsresultaterne i overfladen, mens de er domineret af geofysikresultaterne i dybden.

7.3.1 Oversigt over SSV-konceptet

Overordnet kan man inddale SSV konceptet i tre dele, der er internt forbundne som vist i Figur 30. På den ene side er der de geofysiske lagdelte modeller og på den anden side boringsinformationen med beskrevne lertykkeler. Hvis man tænker på SSV-modulet ud fra en inversionsmæssig tankegang, er de beskrevne lertykkeler i borerne *data*, og funktionen, der oversætter geofysikken til lertykkeler, er *modellen*. Der *inverteres* for den optimale model ved at bruge de geofysiske modeller i *forwardberegningen*. Grundideen er således, at man ud fra en given oversætterfunktion kan lave den geofysiske lagmodel om til en lertykkelse. Ved at interpolere den fundne lertykkelse fra geofysik-punkterne til boringspunkterne opnås et mål for den *geofysiske* lertykkelse i boringspunkterne. I boringspunkterne sammenlignes den forudsagte lertykkelse fra geofysikken med den beskrevne lertykkelse i borerne. Boringernes lertykkelse bliver associeret med en usikkerhed, der afhænger af den enkelte boringsrating kategori (se Kap. 0). Ud fra graden af overensstemmelse opdateres oversætterfunktionen ("Modelændring") i et iterativt forløb, således at der for hver iteration fås en forbedret overensstemmelse mellem lertykkelsen fra geofysikken og lertykkelsen beskrevet i borerne. For uddybende forklaring af nogle af begreberne, se Jørgensen et al., 2012 og Foged og Christiansen, 2013.



Figur 30: Grafisk fremstilling af SSV-konceptet

7.3.2 Videreudvikling af SSV konceptet

SSV-konceptets oprindelige implementering var tænkt som et værktøj til kortlægning af den samlede lerdækklagstykkelse. SSV konceptet er siden blev videreudviklet, således at det er muligt at estimere ler-andelen i et givent volumen og dermed producere et 3D grid, der viser lerandele i de enkelte voxler. Denne anvendelse er blandt andet brugt i forbindelse med opstillingen af en geologisk model ved Ølgod (Jørgensen et al. 2012a).

I nærværende projekt ved Tønder er der benyttet en yderligere videreudvikling af SSV metoden, som ikke var implementeret, da modellen i Ølgod-projektet blev gennemført. Således er der i Tønder-modellen benyttet en version, hvor der uddover laterale bånd også anvendes vertikale bånd til at begrænse den vertikale variation i oversætterfunktionen (Foged and Christiansen, 2013).

7.3.3 SSV-kørsler

Som grundlag for SSV kørslen blev alle boringsinformationer i området inddelt i to kategorier: "ler" og "ikke-ler". SSV-metoden måler i praksis på lerindholdet og ikke direkte på sandindholdet. Gruppen af sedimenter, der tilhører kategorien 'ikke-ler' bliver dog i praksis kaldet sand, da langt hovedparten af de ikke-lerede sedimenter er sand i det konkrete område. I den sandede kategori indgår dog også stenede, grusede og siltede sedimenter. For at opnå bedst repræsentation af den heterogene geologi er SSV kørslen blev lavet på basis af SkyTEM mangelagsinversionen.

I Tønder-modellen blev en række indstillinger af SSV kørslerne afprøvet med henblik på at opnå den mest hensigtsmæssige repræsentation af geologien. Der blev således lavet en række midlertidige vurderinger af resultaterne, hvilket blev efterfulgt af nye kørsler. Evalueringen af SSV resultaterne inkluderede blandt andet følgende:

- Med henblik på at vurdere fornuftige værdier på de laterale og vertikale bånd i SSV kørslen blev variationen i SSV-resultatet samt oversætterfunktionen vurderet i forhold til den forventede geologiske variation.
- Sand/ler forholdet i SSV-resultatet blev vurderet med henblik på at vælge fornuftige startværdier for oversætterfunktionen. På basis af den første SSV-kørsel blev der lavet en beregning af misfit mellem boringer og SSV resultatet. Boringer, der havde et højt

misfit (> 2) og samtidigt gennemborede mange SSV-beregningsslag (> 5) blev gen- nemgået manuelt. I denne forbindelse blev det vurderet, hvorvidt der var en rimelig forklaring på afvigelsen mellem SSV-resultatet og boringen (f.eks. lokal heterogenitet). I enkelte tilfælde blev det vurderet, at boringen oprindeligt havde været vurderet med for høj rating. Disse borer blev nedjusteret i rating-kategori, hvilket i praksis tillader større afvigelse mellem SSV-resultatet og boringen i de efterfølgende kørsler.

Parametrene for SSV-kørslen, der blev udvalgt som basis for den endelige model er vist i Tabel 8. Det ses, at modellen havde et totalt misfit på 0,97, og da dette tal er mindre end 1, svarer det til, at modellen fitter data indenfor datausikkerheden. Det skal dog i denne sammenhæng nævnes, at usikkerhederne på borerne er valgt som arbitrale værdier, da de ikke kan estimeres absolut. De horizontale bånd betyder, at værdien af oversætterfunktionen må variere med en faktor 2 mellem griddets nodepunkter, mens de vertikale bånd angiver, at oversætterfunktionen må variere med en faktor 3 mellem de vertikale beregningsceller. De vertikale beregningsceller er 5 m tykke i overfladen og stiger til 10 og 20 m i dybden for at modsvare den stigende tykkelse af lagene i SkyTEM-mangelagsmodellen.

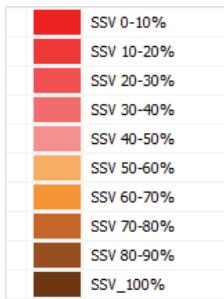
Total misfit	Startværdi (Nedre cut-off)	Startværdi (Øvre cut-off)	Horizontale band	Vertikale band	Griddets nodeafstand	STD borer (kategori 1-4)
0,97	45 Ω m	65 Ω m	1	2	750 m	0,1; 0,2; 0,3; 0,5

Tabel 8: Indstillinger for den endelige SSV-kørsel implementeret i Tønder-modellen. STD på borerne angiver den faktor, der er benyttet til at vægte usikkerheden på borerne ift. de fire bорingsrating-kategorier, de er inddelt i.

7.3.4 Konvertering af SSV griddet til et lithologisk grid

Den beregnede lerfordeling fra SSV'en udmøntes i 32 2D-grids, der hver især dækker et interval svarende til en voxeltykkelse på 5 meter. Voxlerne er 100 x 100 meter i X- og Y-retningen og dækker intervallet fra kote - 140 m til 20 m over havniveau. Grids'ene blev stakket til et 3D-grid i GeoScene3D Toolbox og efterfølgende indlæst til GeoScene 3D.

SSV-griddet indeholder den eksakt beregnede lerandel (målt som relativ lerlykkelse) i hver voxel, angivet i decimaltal fra 0,00 til 1,00. For at gøre det muligt at arbejde med lithologiske betegnelser og beskrivelser i symbolisten blev SSV-griddet konverteret til et diskret grid. Dette blev gjort ved at inddælle griddet i 10 % intervaller. Farverne i symbolisten (Figur 31) er valgt ud fra den indgangsvinkel, at farven for en høj lerandel skal modsvare lerede sedimenter, mens den for en lav lerandel skal indikere grovkornede sedimenter – der i undersøgelsesområdet typisk består af sand. Voxler, der indeholder mellem 0 og 50 % ler er derfor angivet i symbolisten med røde nuancer, mens voxler med 50 til 100 % ler er vist med brune nuancer. Farveintensiteten stiger med stigende andel af sedimenttypen.



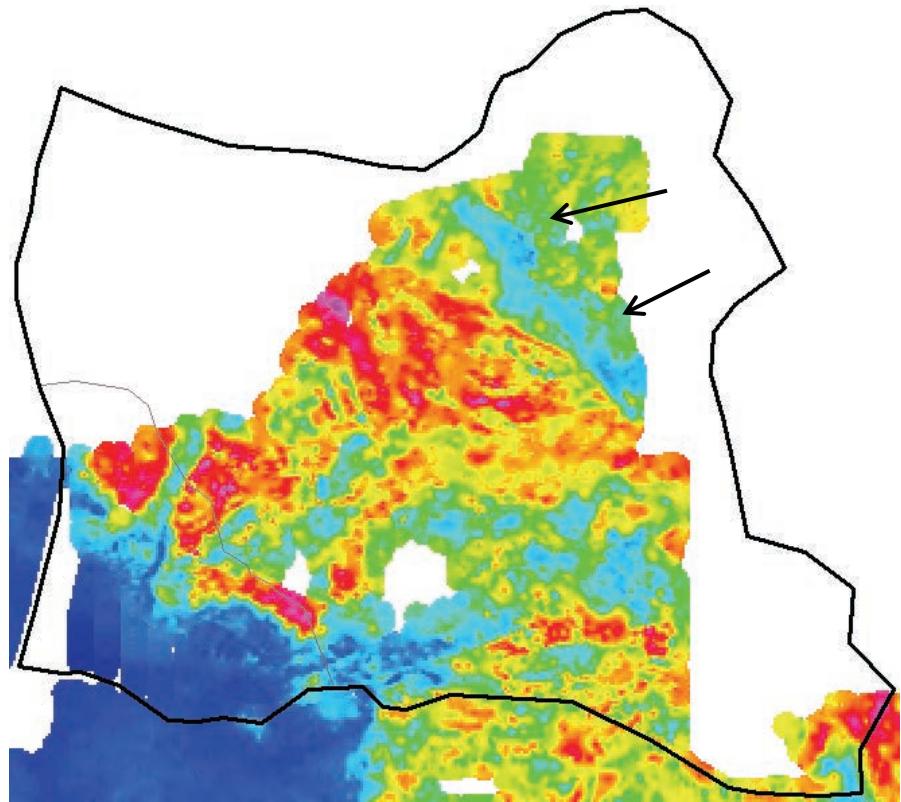
Figur 31: Symboliste for de 10 kategorier, der indgår i SSV-griddet. Procentsatserne angiver lerandelen.

7.3.5 SSV-resultater

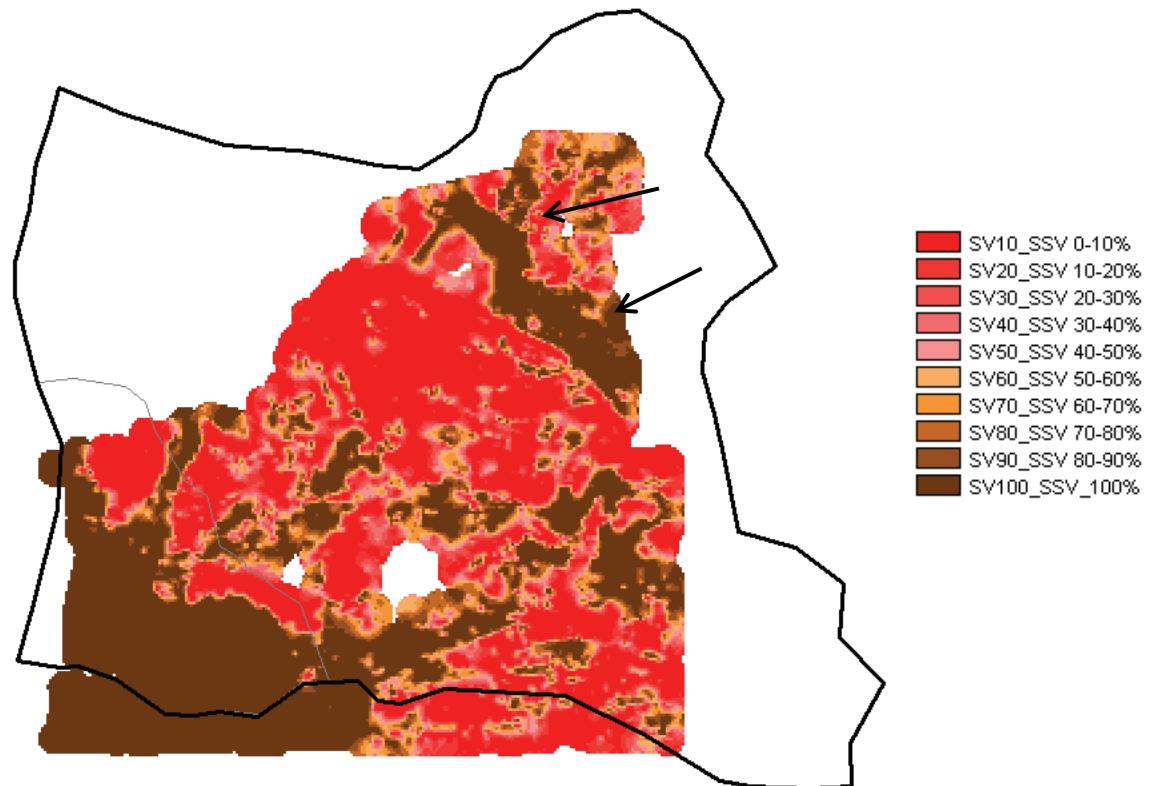
SSV-kørslen er udført for intervallet mellem terrænoverfladen og kote -140 m. Et eksempel på et horizontalt snit gennem SSV-resultatet er vist i Figur 32.

Det ses, at der i SkyTEM-sektionerne er områder, der viser markante høje og lave modstande, karakteristiske for henholdsvis sand og ler. I en del tilfælde er det dog mere vanskeligt at placere grænserne mellem de lerede og ikke-lerede sedimenter, idet resistiviteterne her ligger i spektret 40 til 60 Ωm (grønne og gule farver). Det er i disse områder, at SSV-metoden er særligt brugbar, fordi den inddrager boringsinformationen til at foretage afgrænsningen mellem sand og ler. For at illustrere dette, er der i Figur 32 markeret to områder, der viser resistiviteter i samme størrelsesordnér, men som ifølge SSV-outputtet har meget forskellige lerindhold.

A:



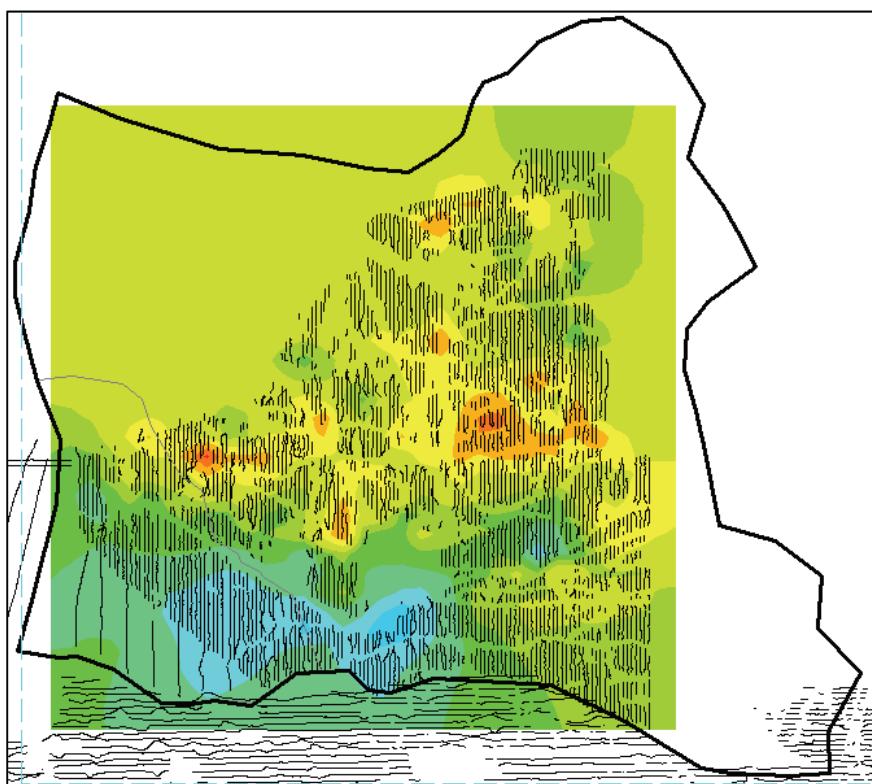
B:



Figur 32: Snit gennem SkyTEM og SSV-grids vist for kote – 22,5m. A: SkyTEM B: SSV-resultatet. De 10 kategorier vist i % ler er vist til højre. Den maksimale udstrækning af griddet, der afgrænser saltvandsområdet (i sydvest) er vist med en grå linje. Pilene mar-

kerer to områder, der viser resistiviteter i samme størrelsesorden, men som resulterer i helt forskellige lithologier.

Variationen i afskæringsværdierne for SSV'en er illustreret i Figur 33, der viser middelværdierne for oversætterfunktionen i kote -2,5m. Eftersom det er middelværdier, kan værdier over og under også blive oversat til henholdsvis sand og ler. I kraft af inversionens natur, varierer værdierne mest i overfladen, hvor der er flest borer, mens funktionen kun varierer langsomt i dybden, hvor der er meget få boringsdata. I dybder uden boringsdata ændres oversætterfunktionen således ikke fra den definerede startmodel. Figur 33 viser bl.a., hvordan middelværdierne i oversætterfunktionen er meget lave i den sydvestligste del af området, der er påvirket af saltvandsindtrængning. Dette stemmer overens med forventningen, da sandede lag i saltvandspåvirkede borer viser meget lave resistiviteter, hvilket vil presse oversætterfunktionen i SSV ned mod meget lave afskæringsværdier.



Figur 33: Øvre og nedre afskæringsværdier indenfor SSV-beregningensgriddet. Farveskalaen er den samme som SkyTEM dataene bliver vist med (dvs. gul svarer til ca. 50 Ω m), se Figur 21.

7.3.6 Manuel tilretning af SSV

SSV-resultatet er blevet manuelt gennemgået i hele området. Her er det med udgangspunkt i de tilgængelige data (SkyTEM, borer, MEP) blevet vurderet, hvorvidt det i tilstrækkelig grad modsvarer den forventede geologi. Efter en indledende gennemgang af SSV-resultatet fremgik det, at der var fire områdetyper, der krævede en særlig indsats for at opnå tilfredsstillende resultater:

1. De begravede dale, hvor det blev besluttet at udføre manuelle tolknninger af dalfyldet (Kap 9.3.14).
2. Under byer, hvor der grundet stor afstand til SkyTEM-sonderinger ikke fandtes SSV-resultater.
3. Det saltvandspåvirkede område mod sydvest, hvor de meget lave resistiviteter forårsaget af saltvandsindtrængningen gjorde det umuligt for SSV'en at adskille ler fra 'ikke-ler'.
4. I umiddelbar nærhed af højkvalitets-boredata, hvor SSV resultatet ikke stemmer overens med data. F.eks. i forbindelse med boringer, der fremstår til at være filtersatte i lerede sedimenter.

I de tilfælde, hvor SSV-resultatet ikke tilfredsstillede opløste geologien, blev der udført manuelle tolknninger og modellering. Eftersom det ikke er muligt manuelt at tolke i lerandele, blev tolkningerne opdelt i tre kategorier bestående af henholdsvis 'Kvantært Sand', 'Kvantært ler' og 'Saltvandsprægede kvartære sedimenter'. For at forsimple processen blev de manuelle tolknninger foretaget på baggrund af et SSV-grid, der kun viser tre intervaller for lerandelen (Figur 34).



Figur 34: Til venstre: Symboliste for de 3 SSV-intervaller, der blev benyttet ved med den manuelle evaluering af SSV-griddet. Til højre: Symboler for de manuelle tilretninger.

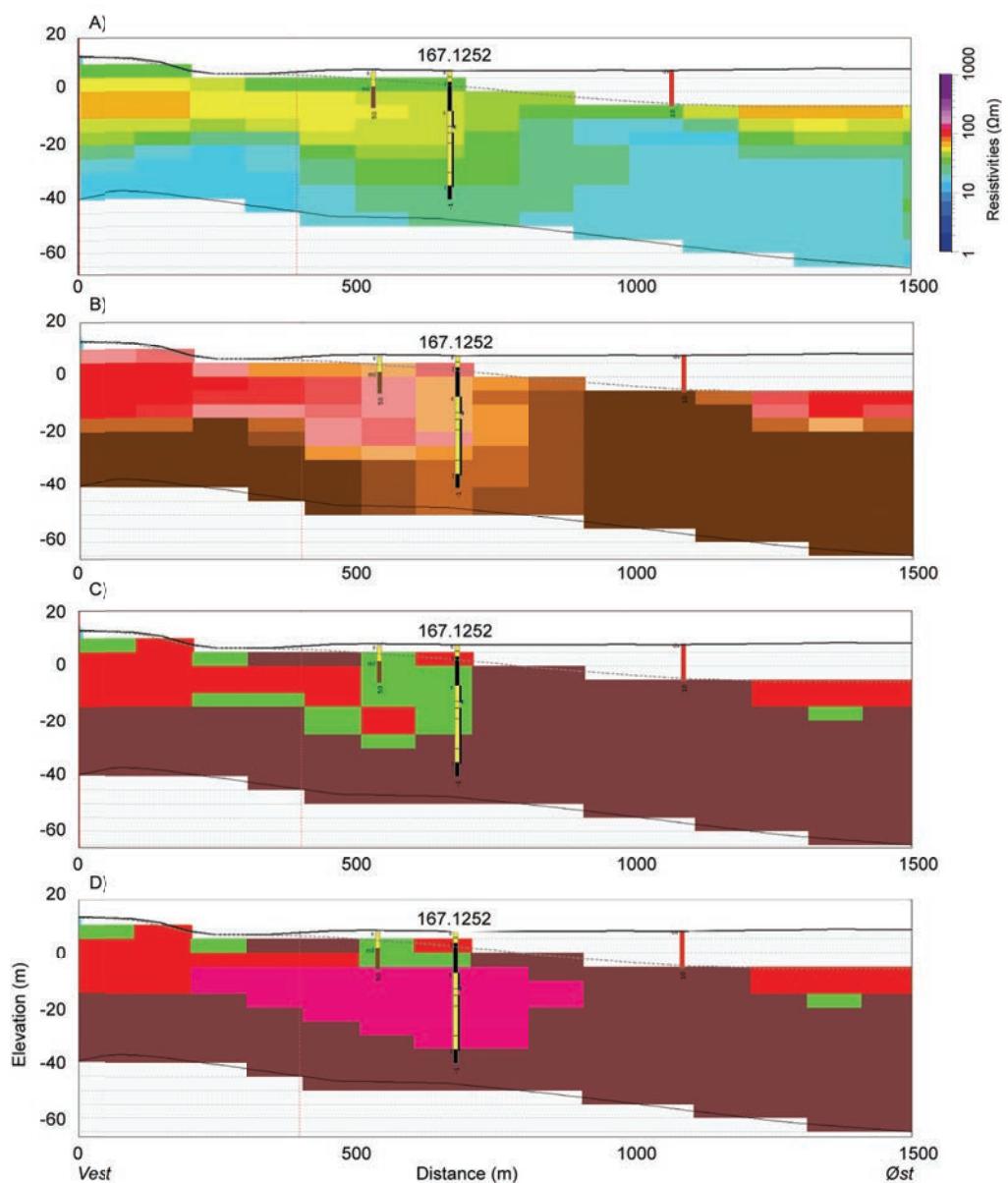
De udførte tolknninger blev tildelt en usikkerhedskategori. I praksis er de manuelle tolknninger i det SkyTEM-kortlagte område indenfor kategorierne "sikker til usikker" - da det ikke gav mening at lave ændringer af SSV modellen, hvis de manuelle tolknninger var baseret på "bedste gæt". I tilfælde, hvor der er lavet tilretninger lige omkring boringsinformation af god kvalitet, er usikkerheden typisk vurderet til at være lille. Modsvarende er tolkninger baseret udelukkende på SkyTEM eller på boringer af lav kvalitet, vurderet til at være tilknyttet stor usikkerhed. Tolkninger udført udenfor det SkyTEM- og SSV-dækkede område er bedømt til at være usikre eller baseret på bedste gæt.

7.3.6.1 Eksempler på tilretninger af SSV-griddet

I det følgende vises eksempler fra vurderingen af SSV resultaterne. SSV-resultatet er hovedsageligt evalueret på basis af resistivetsgrids fra mangelagtstolkningen, men i nogle tilfælde er enkeltonderinger og/eller fålagsmodellen inddraget i tolkningen. I to af eksemplerne blev det valgt at lave tilretning af SSV griddet, mens det blev vurderet, at der ikke skulle foretages ændringer i et tredje eksempel. Ved de 3 første eksempler er data vist mellem de to grid-flader 'Bund af hedeslette' og 'Top Maade deformert', da det er i det pågældende interval (bortset fra manuelt modelleret dalfyld), SSV-griddet benyttes i den endelige model. I de tre eksempler er boringerne som udgangspunkt vist med standard Jupiter-symboler. Dog er enkeltsymbolerne for sand og ler vist med henholdsvis gul farve for "sand" og sort farve for "ler".

Eksempel 1:

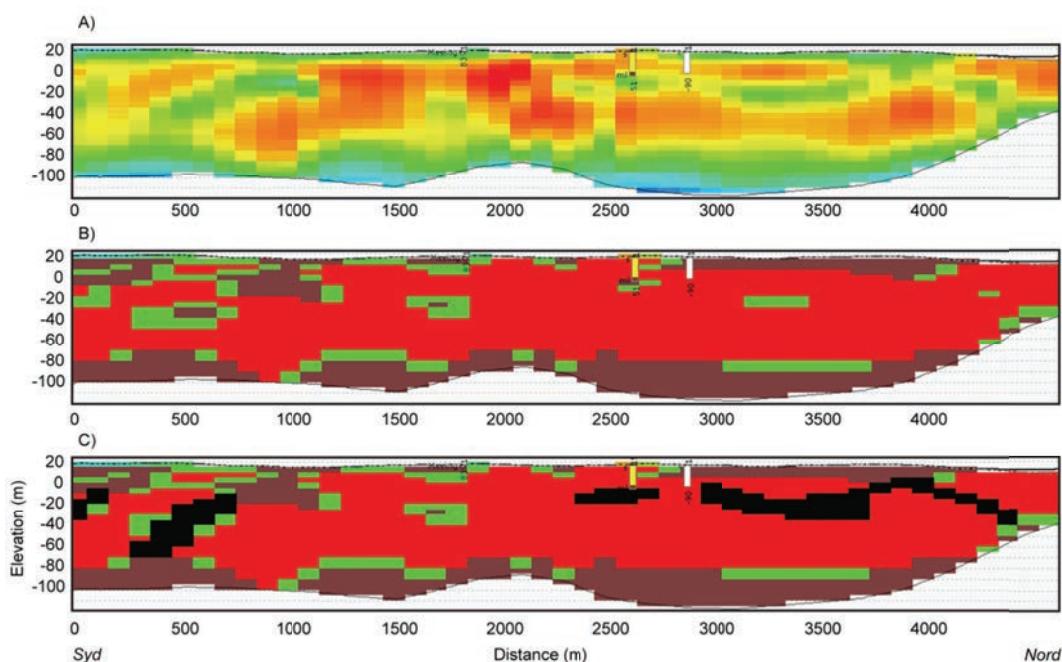
Det første eksempel viser et vest-øst vendt profil (Figur 35 A-D), hvor en boring midt på profilet (DGU nr. 167.1252) viser et tykt filtersat sandlag. Ifølge SkyTEM resistivitetsgriddet (A) befinner boringen sig i overgangszonen mellem høje og lave resistiviteter. Boringen er ikke detaljeret beskrevet, og er derfor ikke en 'højkvalitsboring', men filtersætningen er en troværdig indikator på at sandlegemet er eksisterende. SSV-resultatet (B og C) viser en middel lerandel i det pågældende dybdeinterval ved boringen. I eksemplet blev det besluttet at tolke sand (pink i D) på baggrund af boringsinformationen, da de relativt lave resistiviteter for sandlaget kan forklares ved, at boringen befinner sig i et område, hvor SkyTEM sonderingerne ændrer sig hurtigt over korte afstande.



Figur 35: Samme profil vist med A) SkyTEM-resistivitetsgrid, B) SSV-grid inddelt i 10 kategorier, C) SSV-grid inddelt i 3 kategorier, D) Manuel tolkning ovenpå det SSV-grid, der er inddelt i 3 kategorier. Boringer indenfor en buffer på 100m er vist på profilet. Uover Jupiter symbollisten er sand med enkeltsymbol vist med gul farve og ler med enkeltsymbol vist med sort farve. 5 gange overhøjning.

Eksempel 2:

Eksempel 2 (Figur 36 A-C) viser et 4,5 km syd-nord gående profil, som går gennem et meget heterogent område. SkyTEM-resistivitetsgriddet (A) viser mange detaljer i form af vekslen mellem en højresistiv lagpakke og en række relativt tynde lavresistive lag, der ofte fremstår hældende. På SkyTEM-profilet viser de lavresistive lag tydelige kontraster til de omkringliggende sedimentter (30-40 Ω m ift. 50-60 Ω m i det omkringliggende). Det ses, at SSV resultatet overordnet modsvarer SkyTEM-resistivitetsgriddet som forventet, men dog er der mange tilfælde, hvor de tynde lavresistive enheder ikke kan genkendes som lerlag i SSV resultatet (f.eks. 3000-3500m i B). De lavresistive enheder, der er overbevisende indikatorer for lerlag, er derfor tolket som ler i (C). Der er således i nogle tilfælde udført manuelle tilretninger af SSV-griddet, der udelukkende er baseret på SkyTEM informationen.

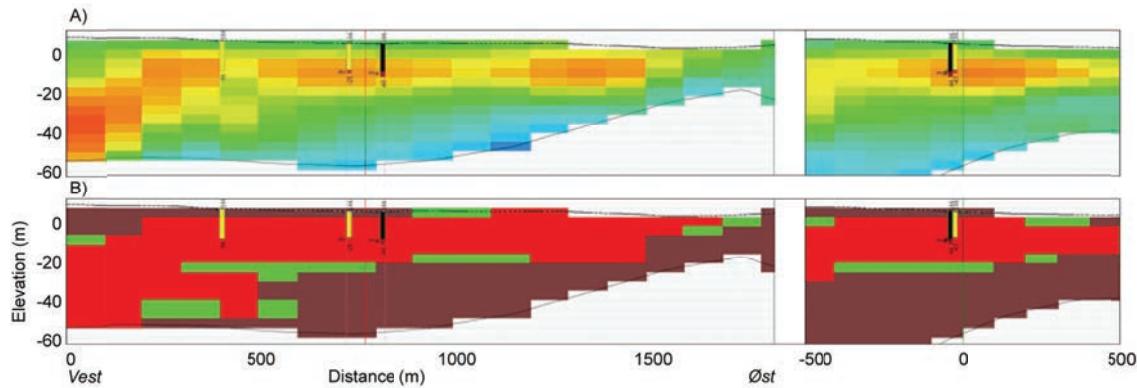


Figur 36: Samme profil vist med A) SkyTEM-resistivitetsgrid, B) SSV-grid inddelt i 3 kategorier, C) Manuel tolkning ovenpå SSV-griddet. Boringer indenfor en buffer på 100m er vist på profilet. Udeover Jupiter symbollisten er sand med enkeltsymbol vist med gul farve og ler med enkeltsymbol vist med sort farve. 5 gange overhøjning.

Eksempel 3:

Det tredje eksempel (Figur 37 A-B) viser et vest-øst profil, hvor to tætliggende borer viser meget forskelligartede lithologier. De to borer har en indbyrdes afstand på kun 50 m, men viser henholdsvis sand og ler i samme dybdeinterval. Ingen af borerne er beskrevet detaljeret, og de er begge vurderet til at være i boringsratingskategori 4. SkyTEM profilet viser lave resistiviteter lige i overfladen, men ellers relativt høje (50-70 Ω m) i dybden. Der ses ingen gradient i resistivitetsniveauet omkring borerne, der kan forklare forskellen, og heller på ikke snittet vinkelret på profilet (Figur 37, til højre) vidner om heterogenitet, der kan forklare forskellen mellem de to borer. På baggrund af SkyTEM profilet er det oplagt at tolke sand i den enhed, der viser resistiviteter over 50 Ω m. Dette stemmer også overens med SSV resultatet (B). SSV-kørslen kan ikke imødese begge borer, da

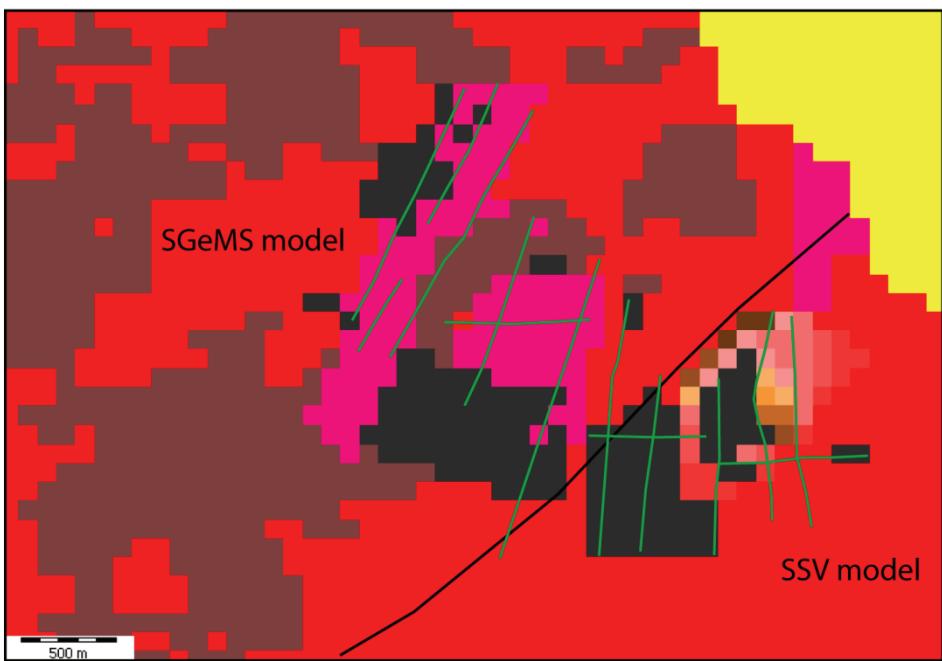
de giver modstridende informationer. Boringen, der viser ler, er derfor et eksempel på en boring, der er misfittet i SSV-resultatet, men som ikke har ført til nogen manuelle ændringer. Det er vurderet, at boringen sandsynligvis er fejlbehæftet.



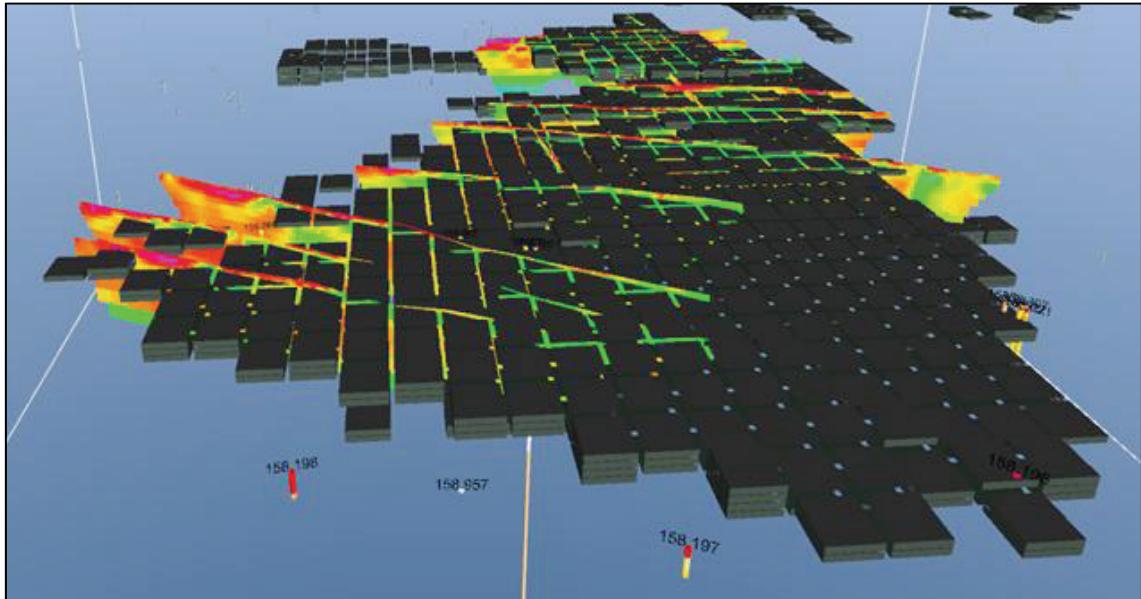
Figur 37: Samme profil vist med A) SkyTEM resistivitetsgrid, B) SSV grid inddelt i 3 kategorier. Tv.: vest-øst profilet, th.: data vinkelret på profilet, 500 m på hver side af den røde markør (ved afstanden 750m). Boringer indenfor en buffer på 100m er vist på profilet. Udo over Jupiter symbollisten er sand med enkeltsymbol vist med gul farve og ler med enkeltsymbol vist med sort farve. 5 gange overhøjning.

Eksempel på tilretning af SSV og SGeMS grid på baggrund af MEP-data ved Bredebro

MEP-profilerne ved Bredebro ligger i et område, hvor der kun delvist forefindes SkyTEM-data. Således er de østligste af linjerne beliggende i et område, hvor voxelmodellen er baseret på SSV-resultatet, mens de vestligste af linjerne ligger i et område, der er beskrevet ved SGeMS modellen (Figur 38). I området med SSV-resultater blev MEP-dataene kun brugt i den øverste del af lagserien, hvor de har størst følsomhed. I området med SGeMS-modellen blev MEP-dataene til gengæld benyttet mere aggressivt, eftersom SGeMS-modellen er meget usikker i områder, hvor der ikke er hårde data i form af borer. I denne del af området blev MEP-information derfor også benyttet ved stor dybde, ligesom tolkniningerne også blev ekstrapoleret en anelse ud fra profilerne. Generelt viste MEP-profilerne et lerlag tæt ved terræn (Figur 39), der i dele af området går i dagen, mens det i andre områder findes under et meget tyndt sandlag.



Figur 38: Voxelmodellen i området omkring MEP-profilerne (vist med grøn). Modellen er vist for kote - 2,5 m. De sorte voxler er manuelt tolket ler, mens de pinkfarvede voxler er det manuelt tolkede sand. SkyTEM-data findes i området sydøst for den sorte linje, hvor modellen som udgangspunkt er baseret på SSV modellen. Nordvest for linjen er der ingen SkyTEM data, og her er voxelmodellen som udgangspunkt baseret på SGeMS-modellen.



Figur 39: Manuelt tolkede ler-voxler i området med MEP profiler - set fra vest.

7.4 Stokastisk modellering - SGeMS

Mens det øvrige modelarbejde er baseret på at estimere den mest realistiske geologiske model, bidrager den stokastiske metode med en række simuleringer, der hver for sig må

betrages som værende lige sandsynlige. Simuleringerne stemmer altid overens med boringsværdierne lige præcis i de celler, der er i kontakt med boringen. Alle andre steder forudsiger metoden en 'tilfældig' værdi valgt ud fra en sandsynlighedsfordeling. Når man bevæger sig væk fra borerne, er værdierne i de enkelte celler i de forskellige simuleringer derfor meget forskellige. Den stokastiske del af den geologiske model skal derfor betragtes som dét den er: En simulering af geologien, der afspejler de forventede former af de geologiske strukturer og et realistisk sand/ler forhold.

7.4.1 Oversigt over SGeMS-metoden

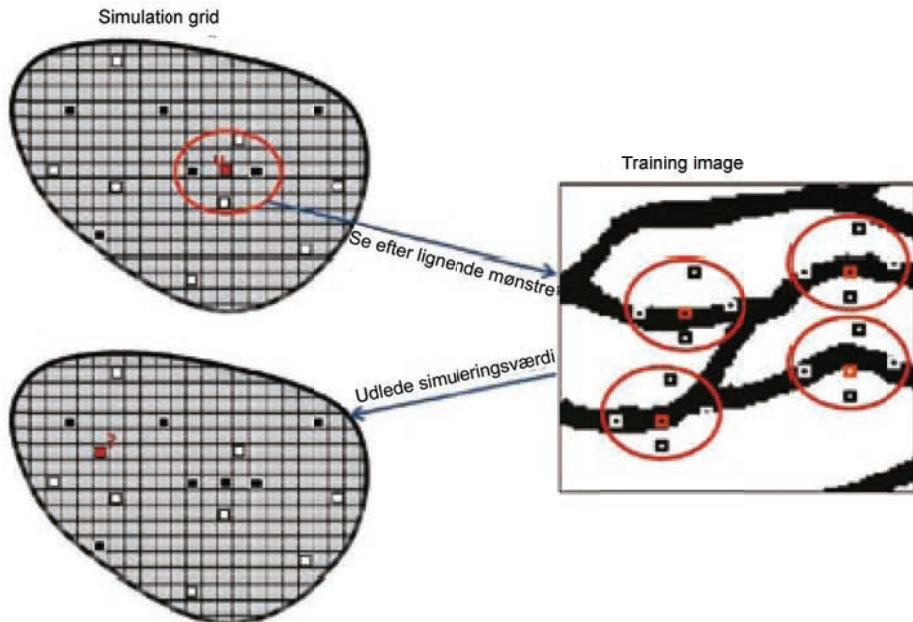
Den stokastiske modellering er foretaget med det såkaldte SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software: Remy et al. (2009), der er et statistisk software, som er baseret på multipoint geostatistik (MPS) (Strebelle 2002). Ved udførelsen af SGeMS simuleringerne er der benyttet en algoritme kaldet "SNESIM" (Single Normal Equation SIMulation), der kombinerer styrkerne ved de to traditionelle fremgangsmåder; de objektbaserede, samt de pixelbaserede geostatistiske simulatingsalgoritmer. Objektbaseret geostatistik er fordelagtig til at gengive storskala-tendenser i data (som geologiske storskala strukturer), men har typisk problemer ved konditionering til store mængder lokale data (f.eks. tætte boringsdata). I modsætning hertil er de traditionelle pixelbaserede metoder (f.eks. T-PROGS) gode til at imødekomme lokale data via variogram- eller kovariansanalyser, men mindre gode til at beskrive de overordnede strukturelle variationer. SNESIM er en avanceret pixelbaseret fremgangsmåde, hvor storskala-variationen minder mere om det, der kan opnås ved objekt-baseret modellering, fordi metoden bruger multivariate fordelinger i modsætning til bivariate i traditionel pixelbaseret modellering. Den multipoint-betingede sandsynlighedsfordelingsfunktion udledes direkte fra et såkaldt training image (TI).

En afgørende forudsætning for overhovedet at benytte SNESIM er således at producere et training image (TI). TI'et skal være nogenlunde stationært og afspejle former og fordelinger af de geologiske strukturer i undersøgelsesområdet. Grundlæggende er tanken, at TI'et bidrager med sandsynlighedsfordelingen og beskriver sammenhængen mellem ét punkt og andre punkter i rummet.

Arbejdsgangen i multipoint-statistisk analyse for modellering med hårde data (f.eks. borer) og et TI er overordnet beskrevet i Daly and Caers (2010) og er skitseret i Figur 40, samt opsummeret herunder:

- Som udgangspunkt haves et tomt grid med celler, der skal fyldes med faciesværdier (f.eks. sand=1 og ler=2)
- Faciesværdier udledt fra boringsinformationen tildeles cellerne, hvor borerne er placeret.
- Algoritmen fortsætter ved at vælge en tilfældig sti gennem alle de ikke udfyldte celler og besøge dem skiftevis. For hver af disse celler (X), udsøges boringsdata og tidligere simulerede værdier rundt om cellen indenfor en prædefineret template af celler. Konfigurationen af data indenfor denne template i forhold til cellen X benævnes data-hændelsen for X.
- Data-hændelsen for X benyttes til at udlede den betingede sandsynlighed for at finde et bestemt facies i cellen X.

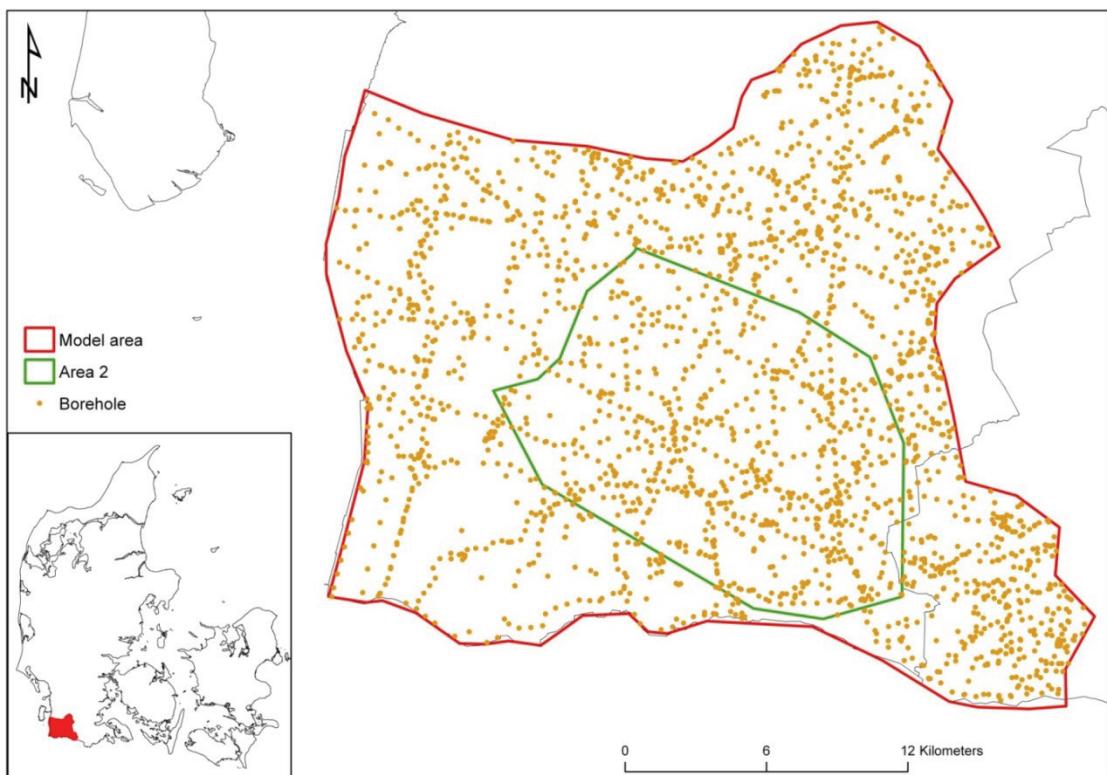
- De betingede sandsynligheder findes for hver facies og fører til den betingede sandsynlighedsfordeling.
- Simuleringen af den enkelte celle dannes ved at udtrække en tilfældig faciesværdi fra fordelingsfunktionen.
- Processen fortsætter, indtil alle celler er besøgt én, og kun én gang i en tilfældig rækkefølge.



Figur 40 Skitse, der illustrerer, hvordan SNESIM-algoritmen simulerer en celle. Skitsen er modificeret fra Daly and Caers (2010) og i dette tilfælde opereres med to faciestyper: Kanalaflejringer (sort) og shale (hvid). Algoritmen søger efter identiske data events indenfor en prædefineret template af celler (indenfor de røde cirkler). På baggrund af dette returneres den betingede sandsynlighed. I figuren returneres fire matches og sandsynligheden for kanal-aflejringer er 0,75, mens sandsynligheden for shale er 0,25.

7.4.2 Benyttet fremgangsmåde

SGeMS simuleringerne blev udført i hele modelområdet (Figur 41), selvom det i den endelige model kun er brugt i den del af området, hvor der ikke er manuel eller SSV-modellering. Simuleringerne er udført i dybdeintervallet mellem *Bund af hedeslette* og *Top Maade* deformert. SkyTEM data fra en del af området (Area 2 på Figur 41) blev benyttet til at danne et TI. Denne del af området blev udvalgt, idet geologien blev tolket til også at være karakteristisk for geologien i det ikke-SkyTEM kortlagte område mod nordvest, da begge områder er tolket til at være præget af glacialtektoniske processer ifølge olieseismiske data.



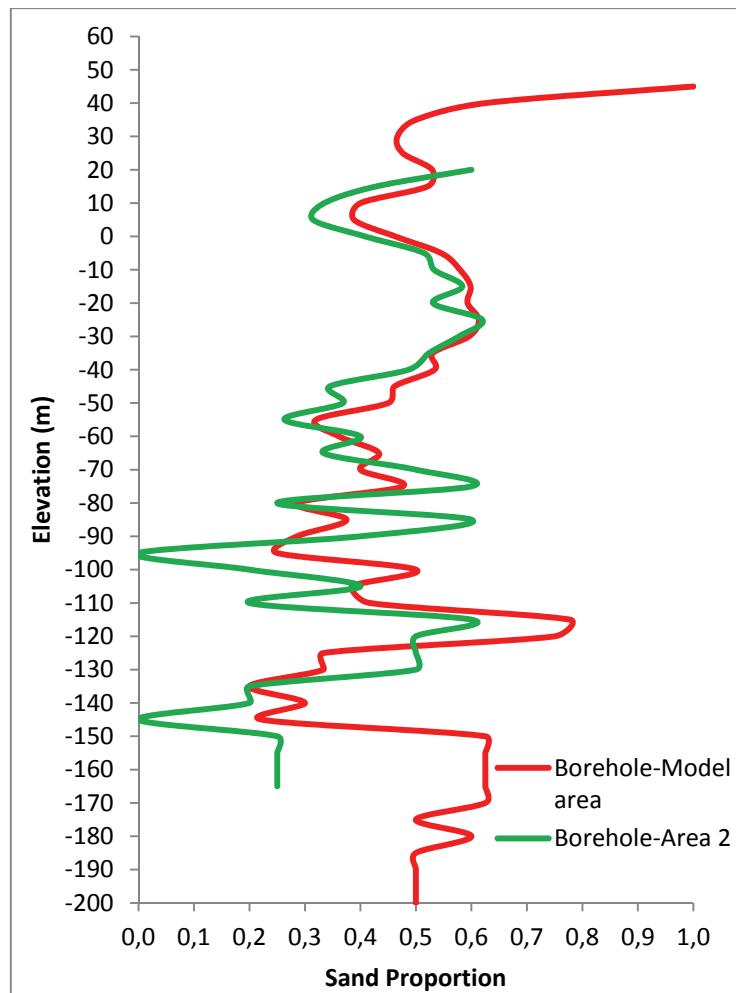
Figur 41 Modelområdet er vist med rødt. Det SkyTEM dækkede område, der er benyttet til at danne TI er vist med grønt (Area 2).

7.4.2.1 Sand-/lerandel i borerne

På baggrund af boringsbeskrivelserne blev de enkelte boringsinformationer inddelt i kategorierne sand eller ler. Sandandelen beregnet på alle borer i hele modelområdet svarede til 0,52, mens den svarede til 0,46 beregnet på borer indenfor område 2.

Sandandelen blev også plottet som funktion af dybden på baggrund af 5 m tykke beregningslag (Figur 42). Som det fremgår af Figur 42 er der stor overensstemmelse mellem sandandelen i de to områder ned til kote ca. -150 m. Herunder er der kun meget få boringsinformationer, og fra kote - 170 m er der ingen borer i område 2.

Ved kørslen af simuleringerne angives en sandandel, og det blev i den forbindelse besluttet at lade sandandelen være en funktion af dybden. Simuleringerne tilstræber derfor at opnå en sandandel svarende til den røde kurve i Figur 42, samtidig med at strukturformerne angivet af TI tilnærmes.

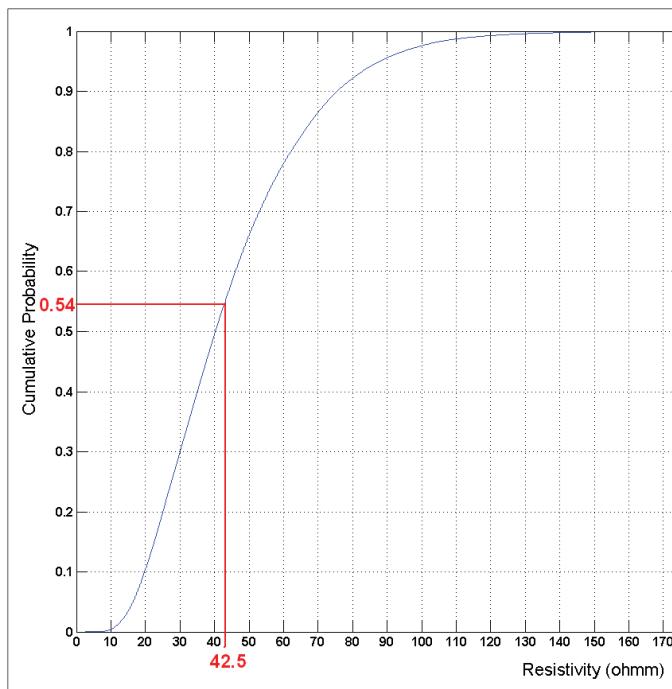


Figur 42 Sandandelen plottet som funktion af koten. Den grønne kurve viser sandandelen i borer indenfor område 2, mens den røde kurve viser sandandelen i alle borer i området.

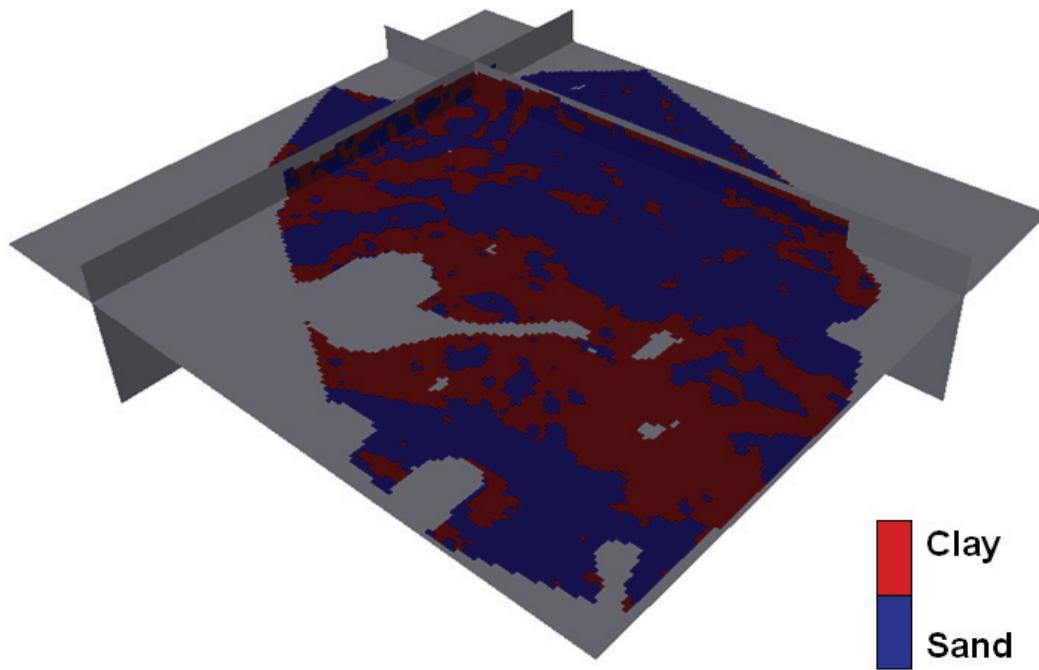
7.4.2.2 Konvertering af SkyTEM grid til training image (TI)

Et TI blev konstrueret på basis af SkyTEM-griddet ved at opdele griddet i to kategorier: Sand og ler. Dette TI er baseret på SkyTEM-dataene indenfor Område 2, hvor lerandelen ifølge borerne svarer til 54 %.

Den kumulerede sandsynlighedsfunktion for SkyTEM-dataene (Figur 43) blev benyttet til at finde afskæringsværdien til at opdele SkyTEM-griddet i sand og ler: Afskæringsværdien aflæses således som den værdi, der modsvarer lerandelen på 54 %, hvilket giver en afskæringsværdi på $42,5 \Omega\text{m}$ (Figur 43). Det tredimensionelle training image (Figur 44) blev således dannet ved at definere alle områder af SkyTEM-griddet med resistiviteter under afskæringsværdien som ler og alle områder med højere værdier som sand.



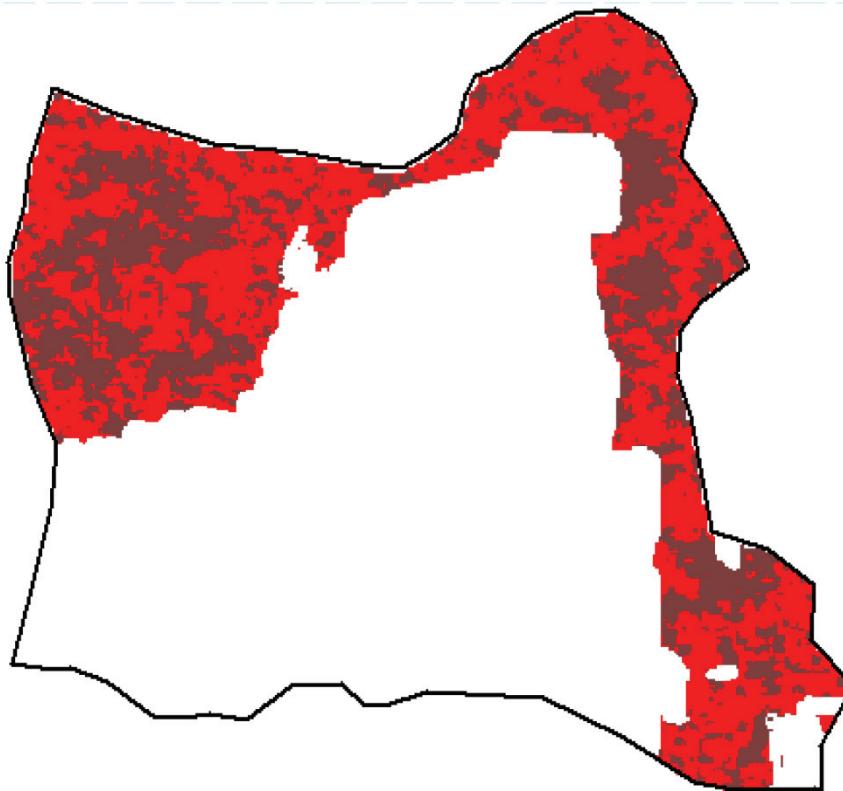
Figur 43 Den kumulerede sandsynlighedsfunktion (CDF), der viser sammenhængen mellem lithologier observeret i boringer og resistiviteter observeret på SkyTEM data. Data i Område 2 viser en lerandel på 0,54, hvilket svarer til, at resistiviteter under 42,5 Ωm repræsenterer lerede sedimenter, mens resistiviteter over 42,5 Ωm repræsenterer sand.



Figur 44 Snit gennem det anvendte training image.

7.4.3 SGeMS-resultater

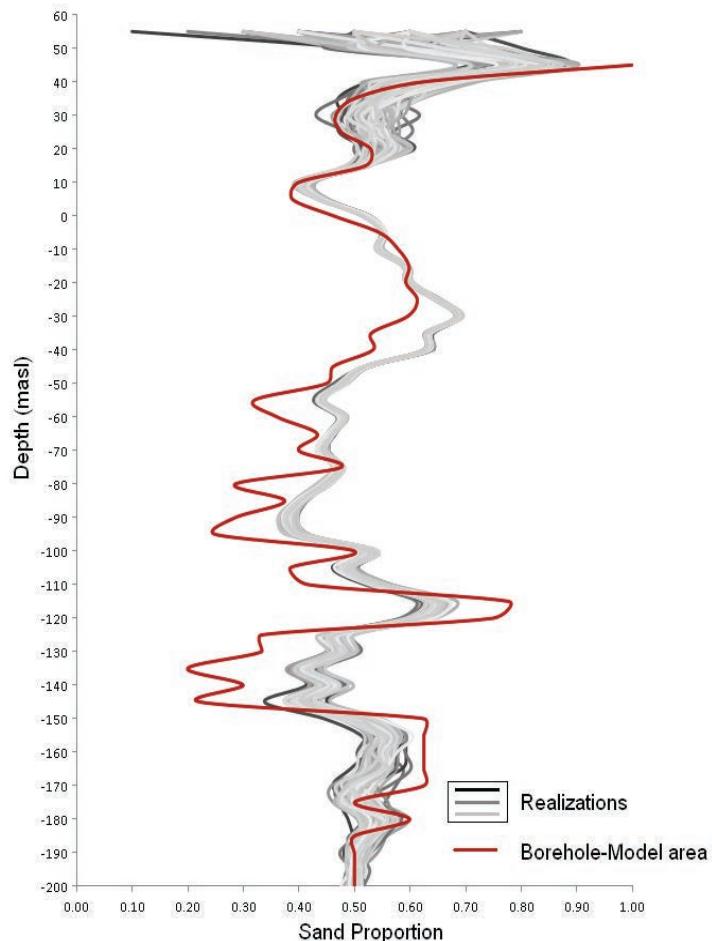
Der blev udført 100 simuleringer med borer som hårde data og et TI baseret på SkyTEM data (Figur 41). Simuleringerne er udført for dybdeintervallet mellem lagfladerne *Bund af hedeslette* og *TopMaade deformert*, hvor bunden af dalene er implementeret. Hovedparten af området, hvor der er benyttet en SGeMS simulering, ligger derfor mellem kote ca. 0 til -120 m. Figur 45 viser SGeMS delen af modellen for kote -17,5 m.



Figur 45 Én af SGeMS simuleringerne vist for kote - 17,5 m. Rød angiver sand, mens brun angiver ler.

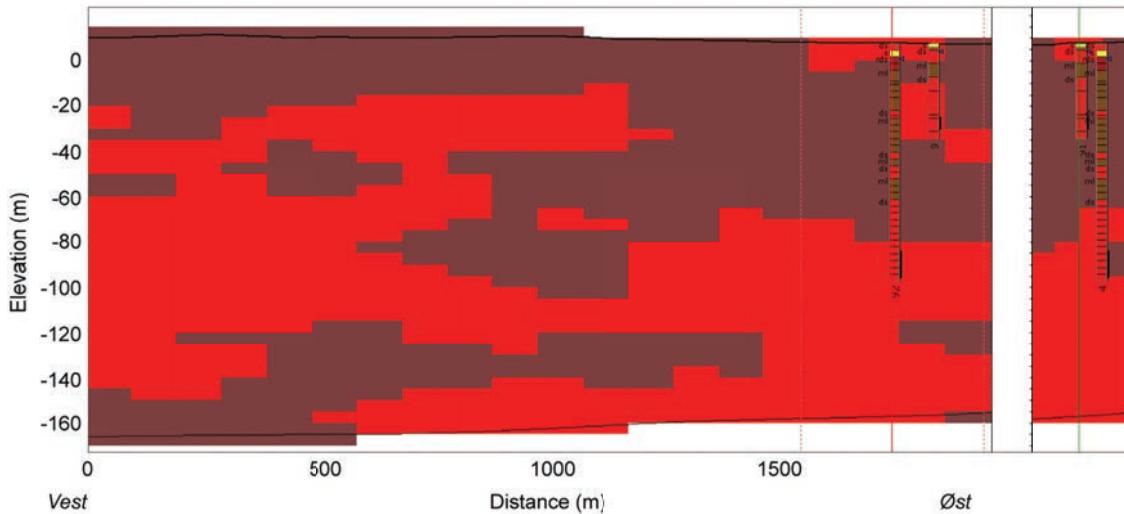
Sandandelen i de 100 simuleringer er plottet med dybden og holdt op imod boringsresultatet (se Figur 46). Det ses, at simuleringerne er meget ens fra omkring kote 15 m til -120 m, hvor kurverne er baseret på relativt store datamængder. Over og under dette interval er der større forskel på de enkelte simuleringer, hvilket skyldes de små arealer, som simuleringerne dækker ved disse koter. Generelt følges kurverne for simuleringerne og borerne pænt ad, og tendenserne genkendes tydeligt.

Et plot af afvigelsen (RMSE) mellem de enkelte simuleringers og boringsdatas sandandele i de givne intervaller viste således også værdier der lå mellem 0,0876 i den simulering, der viste mindst afvigelse til 0,1029 i den simulering, der havde den største afvigelse. Samlet set viser de 100 realisationer en middelværdi for sandandelen på 0,53, hvilket er tæt på middelværdien for borerne sandandel på 0,52 (Kap. 7.4).



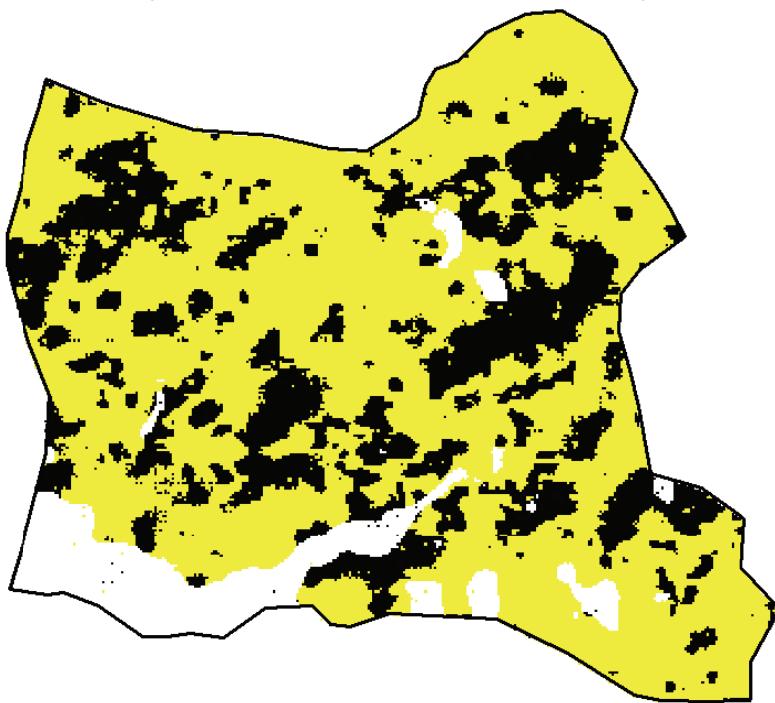
Figur 46 Sandandelen som funktion af dybden. Den røde kurve angiver sandandelen, der er registreret i boringerne (Figur 42), mens de grå kurver viser resultaterne af de forskellige simuleringer.

De 100 simuleringer kan alle betragtes som værende lige gode, og det er derfor problematisk at vælge en enkelt simulering frem for de andre. Som udvælgelsesparameter blev det dog besluttet at vælge den simulering, der viste den mindste afvigelse (RMSE) mellem simuleringens sandandel og boringsdataenes sandandel i de givne intervaller. Den valgte simulering er vist på et profil i Figur 47. Simuleringen fremstår meget heterogen og viser spottede strukturer, der minder om formerne, der kan ses i SkyTEM resultaterne. Det ses, hvordan simuleringen viser den rigtige type sediment præcist ved boringsplaceringen, men ofte er sedimentforekomsten meget lokalt afgrænset. For eksempel ses det på hovedprofilen (Figur 47), hvordan simuleringen ikke viser sand i hele det sandede interval af den dybe boring, der er placeret 92 m fra profilet. Til gengæld afslører tværprofilen, at simuleringen viser sand i det pågældende interval, når afstanden til boringen bliver tilstrækkelig lille.



Figur 47 V-Ø profil fra den nordvestlige del af området, der viser den valgte SGeMS simulering sammen med borer indenfor 100 m afstand af profilet (den dybe boring ligger 92 m fra profilet og den korte 9 m fra profilet). Den røde markør ved den dybe boring indikerer placeringen for tværprofielen, som er vist til højre.

Det skal nævnes, at også middelværdierne af simuleringerne er plottet og visualiseret i Geoscene3D (Figur 48). Det giver dog ikke mening at benytte middelværdierne som model, da man herved ville udviske de strukturer, der fremelskes ved at benytte TI i simuleringerne. I realiteten afspejler middelværdierne således sandsynlighedsfordelingerne i de enkelte voxler – i Figur 48 blot skarpt opdelt mellem sand og ler.



Figur 48 Middelværdier for de 100 simuleringer visualiseret for kote -17,5 m. (Værdierne er vist med en binær skala, hvor sandsynligheden for sand > 50 % er vist med gul farve, og < 50 % er sort). I Figur 45 er en af de 100 simuleringer vist i samme interval – dog kun for den del af området, hvor SGeMS benyttes i voxelmodellen.

7.5 Terrænanalyse

I forbindelse med den geologiske modellering er der foretaget detailundersøgelser af Li-DAR datasættet med det formål at uddrage mere detaljeret geologisk information fra topografien end terrænanalysen i Trin 1-kortlægningen bidrog med.

Som beskrevet i Sandersen & Jørgensen (accepted) er der i store dele af Sønderjylland tegn på, at tektoniske bevægelser i Tønder Graven i løbet af kvartæret har været landskabsdannende og dermed har haft stor indflydelse på den geologiske opbygning af lagseriens øvre dele. Forståelsen af den tektoniske påvirkning af det nuværende landskab giver dermed også en forståelse af den generelle geologiske opbygning af såvel den øvre som den nedre del af lagserien. Terrænmodelanalysen har derfor fokuseret på at udpege steder, hvor tektoniske hændelser kan tænkes at have påvirket landskabet, og her har fokus været på Tinglev hedeslette, da dannelsen af denne er sket som noget af det sidste inden isen i Sen Weichsel smeltede bort fra Hovedopholdslinjen øst for området. Hedesletten er således ung og dens overflade, som i uforstyrret form vil være jævnt hældende fra øst mod vest, udgør et ideelt sted at identificere eventuelle senglaciale eller postglaciale tektoniske episoder. Vore iagttagelser er derfor ikke afgrænsset til selve Tønder modelområdet, men er fokuseret på de områder ovenover Tønder Graven, hvor de største topografiske uregelmæssigheder er iagttaget.

Væsentlige dele af den topografiske analyse er forskningspræget og ligger udover, hvad der normalt udføres i forbindelse med en geologisk modellering. Resultaterne af arbejdet er fremlagt i en videnskabelig artikel, som forventes publiceret (Sandersen & Jørgensen, accepted.), og det vil være hovedtræk her fra, som gengives i nærværende rapport (Kap.9.2).

8. Digital modelstruktur

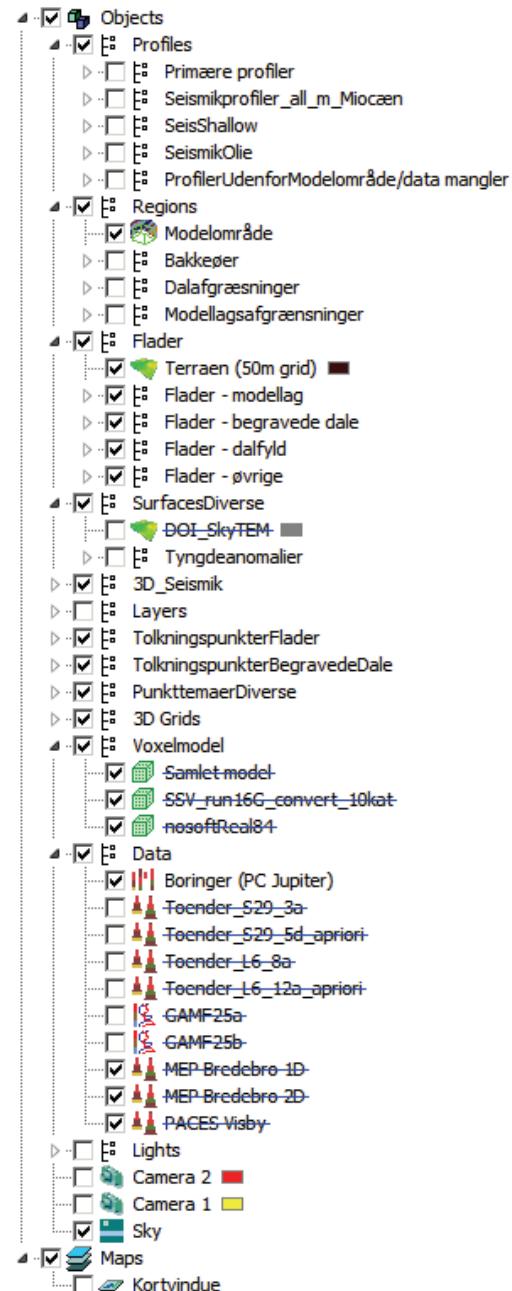
Den digitale geologiske model består af et GeoScene3D-projekt med tilhørende data. Modellen er opstillet i GeoScene3D og afleveret i betaversion 6.0.0.392, men kan læses i alle programversioner fra 372 og frem. GeoScene3D projektet rummer såvel lagmodellen som voxelmodellen.

GeoScene3D-projektet indeholder alle de primære data, der er anvendt i forbindelse med tolkningsarbejdet. Data og profiler som kun er anvendt sekundært undervejs er ikke medtaget i den endelige projekt.

I projektet er der mange, store og tunge datasæt. Derfor er mange data deaktiveret ("disabled"), men indgår stadig i projektet, idet de blot kan genaktivieres ("enables"). Ved anvendelse af et fuldt scene extent, bør kun vises modellens lagflader eller voxelag, ligesom det ikke kan forventes at alle geofysiske data samt boringer kan vises samtidigt. Deaktiverede data vises med en streg igennem.

Alle data, der indgår i GeoScene3D projektet, fremgår af hhv. GeoScene3D's source manager og dataset manager. Af disse fremgår også stireferencer til de enkelte data.

I Figur 49 er vist hovedgrupperne i GeoScene3D's object manager. Data er struktureret således, at profiler ligger i en hovedgruppe kaldet "Profiles", lagflader i en gruppe kaldet "Flader", boredata og geofysiske data i en "Data"-gruppe o.s.v. Nogle hovedgrupper indeholder flere undergrupper, eksempelvis gruppen "Flader", der indeholder undergrupperne "Flader – modellag", "Flader – begravede dale", "Flader – dalfyld" og "Flader – øvrige".



Figur 49: Hovedgrupperne i GeoScene3D-modellens object manager

I Tabel 9 er vist en oversigt over de vigtigste objekttyper og datasæt i GeoScene3D-projektet.

Objekttype/ datasæt	Objektnavn	Datasource	Beskrivelse
Profiler	"Primære profiler"		Primære tolkningsprofiler
Profiler	"Seismikprofiler_a_ll_m_Miocæn", "SeisShallow" og "SeismikOlie".	*.jpg-filer. Fremgår af dataset manager.	Indeholder forskellige grupper af seismiske profiler. De seismiske profiler er oprettet som konventionelle profiler, hvor top og bund er tilpasset, og hvor der er tilknyttet en jpg-fil til de enkelte seismiske profiler.
Regioner	Regions ("Modelområde", "Bakkeør", "Dalaafgrænsninger", "Modellagsafgræsninger")	*.csv-filer	Underinddelt i flere grupper. Regionerne markerer afgrænsningen af bakkeør, begravede dale samt ikke-gennemgående lag. Regionerne er bl.a. anvendt til beskæring af lagflader, og i forbindelse med udfyldning af voxler i voxelmodellen. Modelområdets afgrænsning ligger også i denne gruppe.
Fladetemaer	Flader ("Terraen", "Flader-modellag", "Flader-begravede dale", "Flader-dalfyld", "Flader-øvrige")	*.grd-filer. Fremgår af dataset manager og object manager	Fladerne er indlæst eller genereret ved interpolation i GeoScene3D som grd-filer. De er underinddelt i grupper med flader af regional karakter (modellag), flader af lokal karakter (begravede dale og dalfyld) og øvrige flader (f.eks. saltvandsgrænsen, geofysisk DOI m.fl). Desuden findes der en terrænoverflade i 50m grid.
Punkttemaer (*.xyz, *.csv, Access)	"Tolkningspunkter-Flader"	Access-database (ToenderXYZ.mdb)	Tolkningspunkterne ligger i samme Access database.
	"Tolkningspunkter-Begravede dale"	Access-database (ToenderXYZ.mdb)	Tolkningspunkterne ligger i samme Access database.
	"Punkttemaer-Diverse"	csv-filer samt udtræk fra Jupiter	
3D grids (*.grd3)	"3D Grids"	*.grd3-filer dannet ved 3D interpolation eller stacking i GeoScene3D	Udarbejdet for SkyTEM 6- og 29 lags tolkninger med og uden apriori.

..fortsat	Voxelmodel	Voxelmodel.grd3	Det samlede voxelgrid for modellen. Baseret på voxeludfyldning mellem lagflader, voxeltolkning langs profiler, SSV-grid og SGEMS-grid.
	SSV	SSV_run16G_convert_10kat.grd3	SSV-grid. Indbygget i det samlede voxelgrid.
	SGEMS	nosoftReal84.grd3	Grid baseret på SGEMS-beregninger. Indbygget i det samlede voxelgrid.
Data	"Boringer (PC Jupiter)"	PCJupiter_24102013.mdb	Udtræk fra PC Jupiterdatabesen. Opdateret 24-10-2013.
	Øvrige (geofysik)	*.gdb og *.mdb formater	Data findes i Gerda-databaseformat. SkyTEM data ligger som *.gdb-filer mens øvrige data ligger som *.mdb filer.

Tabel 9: Centrale objekttyper og datasæt i GeoScene3D projektet for Tønder.

Boringsdatabasen er senest opdateret den 24. oktober 2013.

9. Beskrivelse af den geologiske model

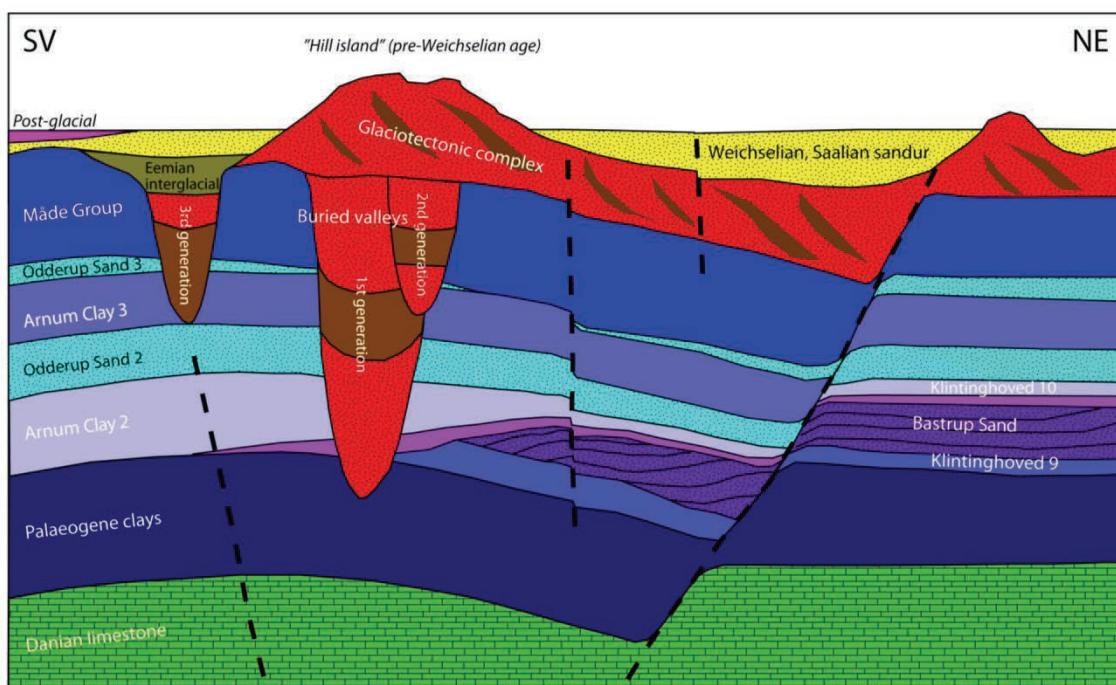
Områdets lagserie er overordnet opdelt i en prækvartær og en kvartær lagserie, hvor der i modelleringen er fokuseret på lagserien fra toppen af den palæogene lagserie og til terræn. Det er denne del af lagserien, som har primær interesse i grundvandssammenhæng.

I det følgende beskrives de enkelte geologiske elementer i den geologiske model. Der fokuseres på:

- De tektoniske rammer
- Terrænforholdene
- Den prækvartære lagserie
- Den kvartære lagserie

Afsnittene omhandlende de tektoniske rammer og terrænforhold er en forkortet og bearbejdet udgave af tekst og figurer fra Sandersen & Jørgensen (accepted). I disse afsnit anvendes betegnelserne "hedeslette", "smeltevandsslette" og "sandur" synonymt.

De modellerede lag og lagflader ses i en konceptuel geologisk skitse gennem området i Figur 50. En oversigt over modellens stratigrafi og enheder er vist i Bilag 2.



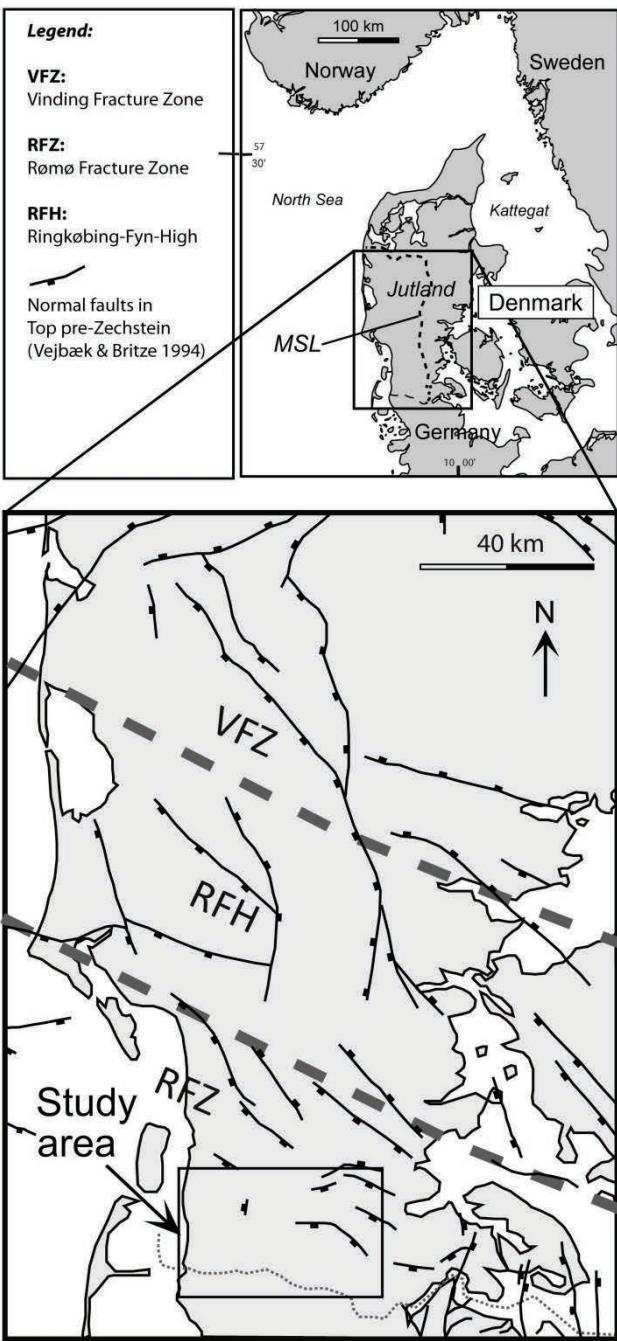
Figur 50: Konceptuel geologisk skitse med modellerede lag og lagflader.

9.1 Tektoniske rammer og den ældre lagserie

Modelområdet er beliggende på sydflanken af den VNV-ØSØ orienterede Ringkøbing-Fyn-Højdyrg (RFH) i den nordlige del af det Nordtyske Bassin (Figur 51). RFH blev dannet i slutningen af Karbon perioden og starten af Perm perioden (Vejbæk 1997, Clausen et al.

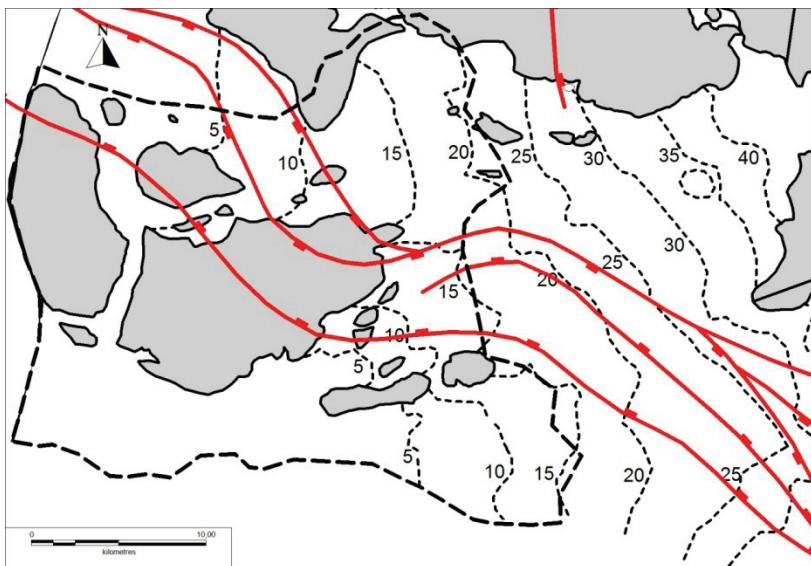
2012). De krystalline bjergarter under bassinet og RFH er prækambriske og overlejres af palæozoiske sedimenter (Lyngsie 2007). Med en orientering omtrent平行t med RFH haves Rømø Forkastningszonen (RFZ), som udgør en overgangszone mellem det Nordtyske Bassin og Ringkøbing-Fyn-højderiggen på samme måde som Vinding Forkastningszonen (VFZ) gør det nord for højderiggen (Figur 51). Forkastningerne på Figur 51 forsætter toppen af præ-Zechstein bjergarterne. I Sen Karbon til tidlig Perm skete der sideværts bevægelser i højderiggen, hvilket medførte at de individuelle blokke roteredes i forhold til hinanden (EUGENO Working Group 1988).

I sen Perm (Zechstein) blev der af lejret tykke lag af saltflejringer i aflejningsbassinet både syd og nord for RFH, og senere bevægelser i saltet på grund af densitetsforskelle skabte deformationer af såvel salt som aflejringerne ovenover. Saltbevægelserne har været medvirkende til, at lagserien nord for Tønder gradvist er indsunket, hvilket har været medvirkende til dannelsen af Tønder Graven. De fleste forkastninger i sedimentpakken ovenover har ikke kontakt til forkastninger i basement på grund af det mellemliggende salt (Clausen & Huuse 1999, Clausen et al. 2012).



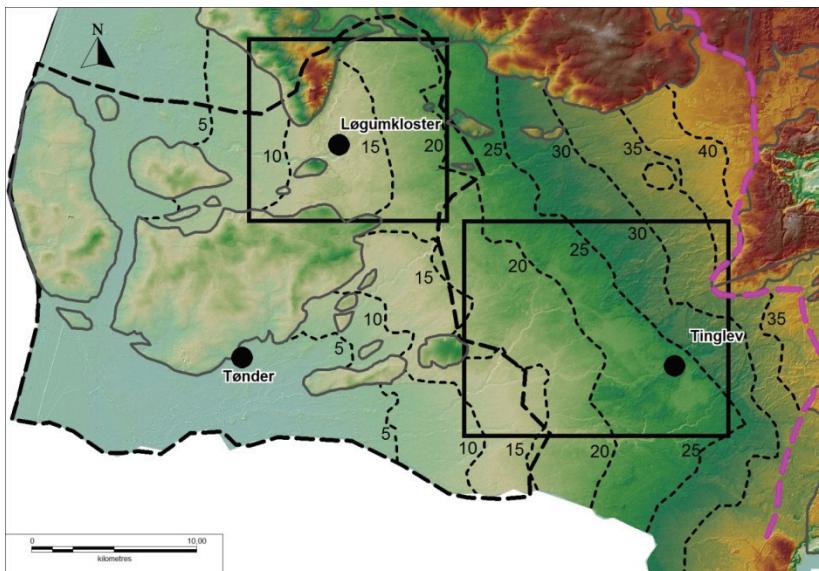
Figur 51 Modelområdets placering i forhold til de tektoniske rammer. Fra Sandersen & Jørgensen (accepted).

Tønder Gravens omrids ses tydeligt i forkastningerne i toppen af Kalkoverfladen i området (Figur 52), hvor der ses offset på flere hundrede meter. Forkastningerne har været aktive i neogenet både syd og nord for RFH (Clausen et al. 2012), hvilket f.eks. afspejles i tykkelsen af de ovenover liggende miocæne Hodde og Gram Formationer (Friborg et al. 2002, Jørgensen et al. 2012b). Nogle af forkastningerne i Tønder Graven har således forsøgt lagserien helt til mindst toppen af Miocæn (Friborg et al. 2002, Jørgensen et al. 2012b).



Figur 52: Tønder Gravens omrids udtrykt ved forkastninger i toppen af Kalk Gruppen (røde streger) (Ter-Borch 1991). Modelområdet er angivet med fed stiplet linje. Saale bækkeøer er vist med grå raste og 5-meter højdekurver er påført den omkringliggende Tinglev hedeslette. Efter Sandersen & Jørgensen (accepted)

9.2 Terrænanalyse



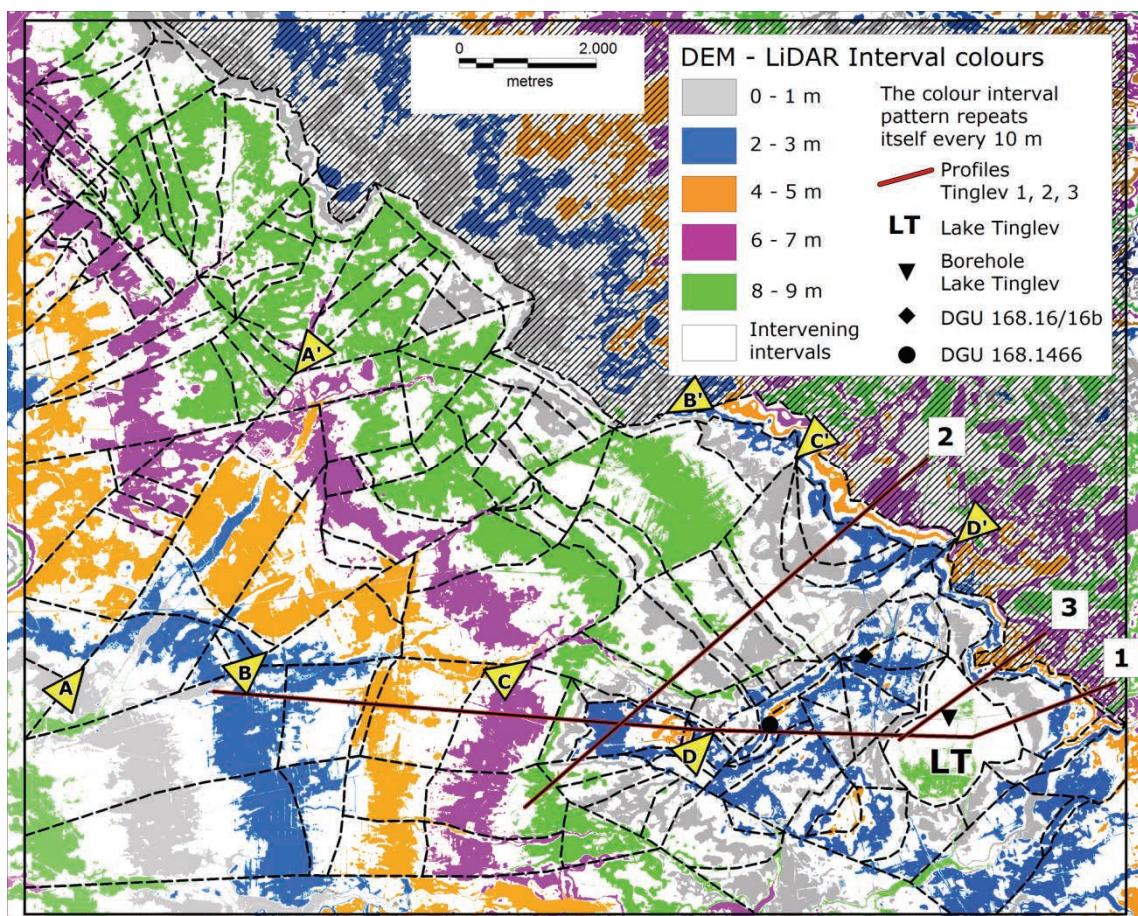
Figur 53 Modelområdets overordnede topografi. Modelområdets afgrænsning er markeret med fed stiplet linje. Kontinuert farveskala (blågrøn: laveste koter, brun: højeste koter). På Tinglev hedeslette er indtegnet 5-meter højdekurver. Hovedopholdslinjen er vist med lilla stiplet linje. De to rektangler ved Tinglev (Delområde A) og Løgumkloster (Delområde B) angiver områder, som beskrives nærmere i det følgende (fra Sandersen & Jørgensen, accepted).

Hedeslettens overordnede topografi ses tydeligt på Figur 52 og Figur 53. Terrænet hælder svagt mod vest og sydvest fra Hovedopholdslinjen helt mod øst, hvilket de stiplede linjer på figuren viser. Hvis der ses nærmere på de detaljerede LiDAR-data viser det sig dog, at der

stedvist er tale om lokale deformationer af hedeslettens topografi, som kan relateres til reaktiveringer af forkastningerne i Tønder Graven (Sandersen & Jørgensen, accepted). Tydeligst er disse deformationer omkring Tinglev øst for modelområdet og ved Løgumkloster i modelområdets nordlige del. Disse to områder benævnes i det følgende henholdsvis delområde A og delområde B.

I delområde A er der foretaget detailstudier af LiDAR-data (Figur 54) og fundet store afvielser fra en forventet jævnt hældende og rimeligt ensartet smeltevandsslettetopografi. Topografien på Figur 54 er simplificeret på Figur 55, og her ses det, at smeltevandssletten har en meget uregelmæssig overflade. Der er bl.a. iagttaget:

- Store ændringer i smeltevandsslettens hældning (stedvist mere end 10 gange den forventede hældning)
- Betydelige variationer i hældningsretningen (op til 180°)
- Betydelige niveauændringer på tværs af kilometer lange lineamenter (op til 2 m)
- Forekomst af områder, der ligger lavere end forventet (op til 8-16 m)
- Forekomst af områder, der ligger højere end forventet (op til mindst 2 m)
- Forekomst af smalle, lineære rygge på op til 2 meters højde
- Et postglaciale dræneringsmønster, der afviger fra det forventede.

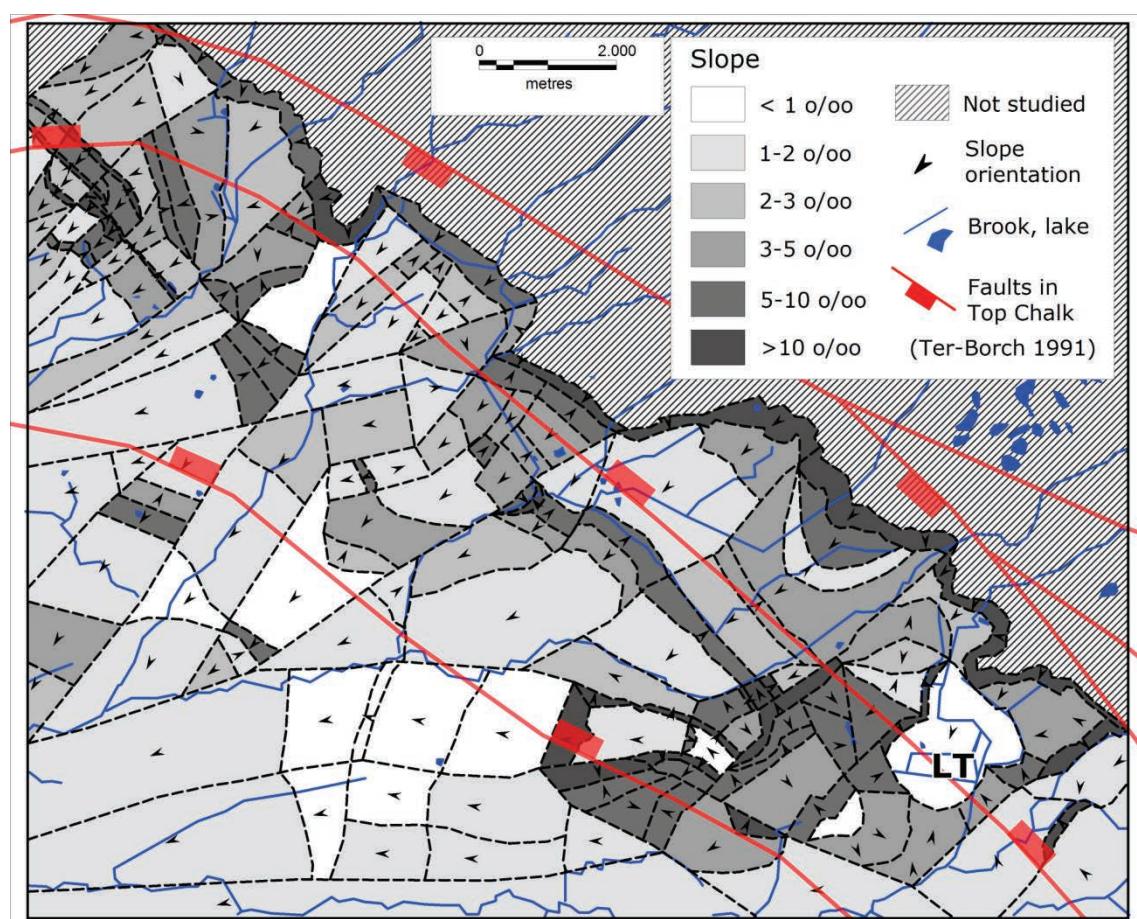


Figur 54 Tinglev-området (delområde A). De enkelte intervaller udgør 1 meters højdeforskell. De stiplede linjer adskiller områder med forskellig hældning af smeltevandssletten og gule pilehoveder angiver lineamenter, langs hvilke der ses markante kotespring. (Fra Sandersen & Jørgensen, accepted)

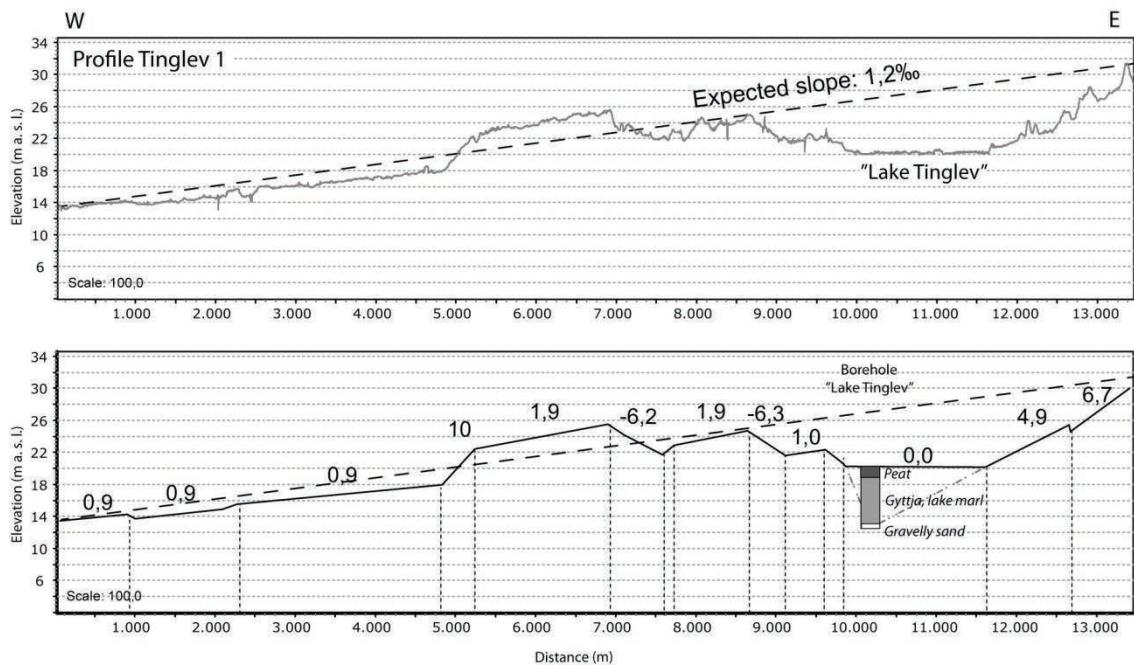
På profilet Figur 56, ses et topografisk tværssnit af hedesletten lige syd for Tinglev (Figur 54), hvor også en boring i Tinglev sø er indtegnet. Søens sedimenter er postglaciale og ligger ovenpå smeltevandsslettens aflejringer.

Som det ses af Figur 55, er deformationerne i delområde A størst lige ovenover Tønder Graven, hvis afgrænsning er indtegnet med røde forkastninger.

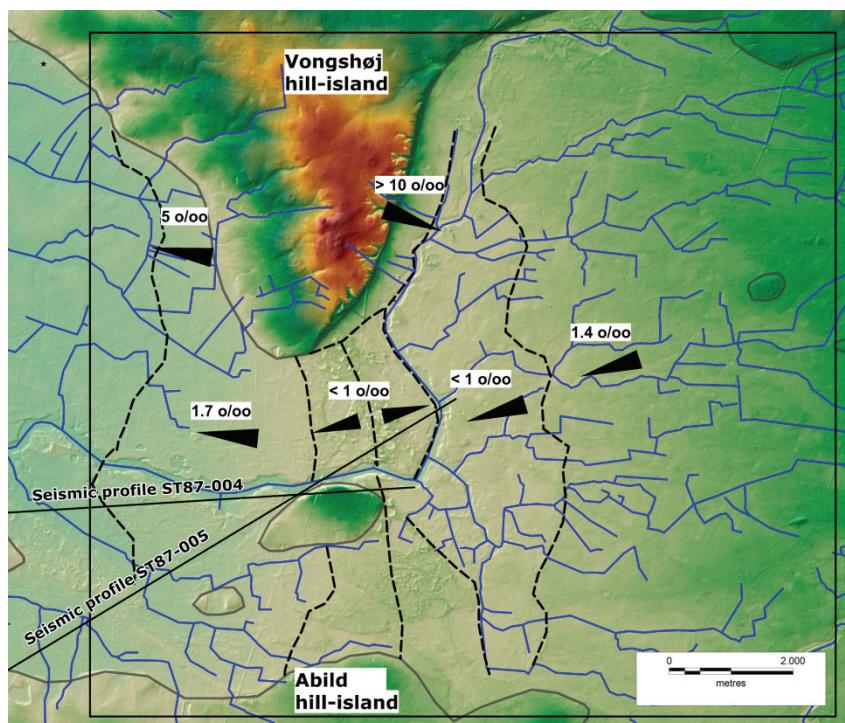
I delområde B ved Løgumkloster er der iagttaget en N-S tærskel i hedesletten lige vest for Løgumkloster (Figur 57). Tærskelen viser sig ved, at slettens hældning varierer fra øst mod vest og lige mellem bakkeøerne mod nord og mod syd, haves en tærskel på omkring 2 m, som tvinger vandløbene mod øst til at løbe sammen til ét vandløb, som først derefter er i stand til at forcere tærskelen (ca. midt på figuren). Den østligste del af det seismiske profil ST87-004 (Figur 58), viser, at der netop under tærskelen findes en antiklinal, som har rødder dybt i lagserien.



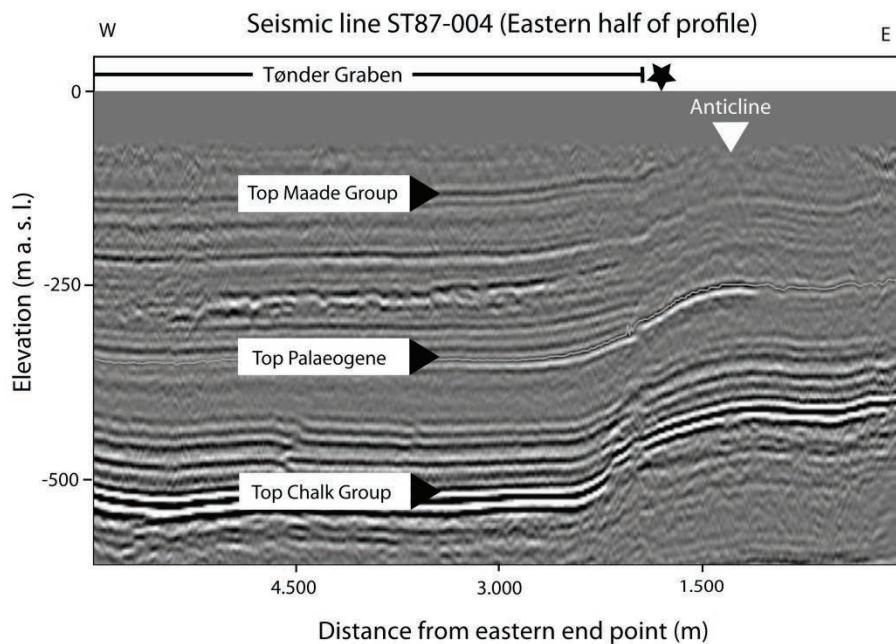
Figur 55 Smeltevandsslettens hældning i Tinglev-området. (Fra Sandersen & Jørgensen, accepted)



Figur 56 Topografisk profilsnit Tinglev 1 (for lokalisering, se Figur 54) Bemærk, at overhøjningen er 100 gange. På det øverste snit ses LiDAR-data og indtegning af den forventede hældning af smeltevandssletten. På det nederste snit ses en simplificering af topografin og anførsel af gennemsnitlige hældninger af terrænoverfladen. (Fra Sandersen & Jørgensen, accepted)



Figur 57 Delområde ved Løgumkloster (delområde B). Pilene angiver smeltevandsslettenes hældning. Bække er vist med blå streger. (Fra Sandersen & Jørgensen, accepted)



Figur 58 Østligste halvdel af det seismiske profil ST87-004 (se Figur 57 for lokalisering).
(Fra Sandersen & Jørgensen, accepted)

Uregelmæssighederne på hedesletten omkring Tinglev er tidligere forklaret ved afsmelting af dødis ladt tilbage efter et mindre fremstød vest for Hovedopholdslinjen lige inden den endelige bortsmelting skete (Hansen 1978). Men denne forklaring kan ifølge Sandersen & Jørgensen (accepted) ikke opretholdes på grund af, at dødisen i givet fald skulle være i kilometer-størrelsesorden brede/lange og kun få meter tykke. Ydermere skulle disse dødisflager være blevet dækket af så meget sediment efterfølgende, at isen først smelte bort efter mere end 9.000 år – på det tidspunkt, hvor sø-sedimentationen i Tinglev sø startede (Hansen 1978, Andersen 1954). Det vil også betyde, at de arealmæssigt meget store isflager skulle afsmelte så ensartet, at der opnåedes en opdeling i de individuelle flader med varierende hældninger, som ses i dag.

Områderne med såvel hævninger som sænkninger i begge delområder, og placeringen lige ovenover eller lige ved kanten af Tønder Graven viser en tydelig sammenhæng med tektoniske bevægelser (Sandersen & Jørgensen, accepted.). Tidspunktet for bevægelserne kan på baggrund af dateringen af sedimenterne i Tinglev sø fastsættes til 9.000 år før nu, og det tolkes, at de tektoniske bevægelser skyldes aflastningen fra ismasserne i forbindelse med deglaciationen. Dette er i tråd med iagttagelser af postglacial tektonik i den nordlige del af Skandinavien (f.eks. Dehls et al. 2000). At der skulle være tale om relation til deglaciation tydeliggøres af, at der i boringer ved Tinglev by er fundet 5 m marint og limnisk Eem (DGU nr. 168.16b) samt 12 m antageligt marint Holstein (DGU nr. 168.1466). Konklusionen må derfor være, at reaktiveringer af Tønder Gravens forkastninger sandsynligvis har været forekommende i forbindelse med deglaciationerne, således at dybe (op til 16 m) indsunkninger har kunnet dannes og fyldes op i den efterfølgende postglaciale tid med marine og limniske aflejringer. Tønder Graven er således fortsat med at være aktiv op gennem kvartæret, om end årsagerne til bevægelserne har været en noget anden sammenlignet med prækvartæret.

De topografiske iagttagelser har vist, at Tønder Graven har været aktiv i postglacial tid og at den geologiske opbygning af området er meget snævert relateret til den strukturelle opbygning af undergrunden. I sårbarhedssammenhæng bør dette tages i betragtning, da vi nu ved, at mange forkastninger i området rækker helt til terræn og dermed gennemskærer store dele af lagserien.

9.3 3D model-indhold

I dette kapitel beskrives indholdet af den opstillede digitale geologiske 3D model.

9.3.1 Kridt

Identifikation i data

Dybden til kalkoverfladen kan ses i de få dybe olieefteforskningsboringer i området. Herfra kan kalkoverfladen, der fremstår som en tydelig reflektor i både olieseismik og grundvandsseismik, følges ud i området.

Modelleringsteknik

Kalkoverfladen er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter (Bilag 3.1). Tolkningspunkterne er placeret på de seismiske linjer og frit imellem disse. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

I Tønder Graven når kalkoverfladen ned under kote -700 m, mens den i den nordøstlige del når højder på omkring kote -400 m. I den sydvestlige halvdel befinner den sig omkring kote -500 m, bortset fra et område ved Tønder, hvor Tønder saltpuden tydeligt ses.

Usikkerheder

Modelleringen af kalkoverfladen langs med de seismiske linjer er de fleste steder forholdsvis sikker. Imellem linjerne er der bortset fra enkelte boringer ingen data til at støtte tolknningen og her bliver modellen mindre sikker, specielt ved Tønder Graven, hvor den topografiske variation i fladen er stor (Bilag 3.1).

9.3.2 Palæogen

Identifikation i data

Overfladen af palæogenet erkendes tydeligt i de dybere boringer i området og kan også tydeligt ses i de grundvandsseismiske linjer som en markant, gennemgående reflektor. Den ses også forholdsvis tydeligt i en del af de olieseismiske data. Endvidere kan den i de områder, hvor den når højest, og hvor der er foretaget SkyTEM kortlægning, ses som en god leder i SkyTEM-data.

Modelleringsteknik

Overfladen af palæogenet er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af flatetolkningspunkter (Bilag 3.2). Tolkningspunkterne er placeret på de seismiske linjer og frit imellem disse. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1.

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

I Tønder Graven når overfladen af palæogenet ned under kote -550 m, mens den i den sydøstlige del når højder på omkring kote -180 m. Niveauet er generelt hældende mod vest kun afbrudt af Tønder Gravens fordybning. Der ses et fald på omkring 150 meter i vestlig retning gennem området. Der ses en daleerosion i fladen ved Møgeltønder (Møgeltønder-dalen). Palæogenets tykkelse er generelt mellem 170 og 250 m med størst tykkelse over Tønder Graven (Bilag 4.1).

Lithologi

Palæogenets overflade består af fed ler, primært Søvind Mergel dækket af Brejning Ler.

Usikkerheder

Modelleringen af overfladen langs med de seismiske linjer er de fleste steder forholdsvis sikker (typisk moderat til lille usikkerhed). Imellem linjerne er modellen usikker. Hvor tolkningen støttes af TEM-data er modellen moderat sikker (umiddelbart nord for Tønder Graven, Bilag 3.2).

9.3.3 Bastrup Deltasand (BADS 9)

Baggrund og identifikation i data

Ifølge Rasmussen et al. (2010) er Bastrup Formationen afsat under aflejring af et prograderende deltakompleks med høj sedimenttilførsel med sydvestlig udbygningsretning. De sandede sedimenter er aflejret som deltalober, der er adskilt af lerede indslag, som følge af variationer i havniveau. Den gradvise kystudbygning fra nordøst mod sydvest har bevirket, at de sandede enheder kan underinddeles i adskilte generationer af deltalober. Deltaudbygningerne genkendes ofte på de seismiske profiler som tilstedeværelsen af skråstillede reflektorer internt i en enhed.

De sandede deltalober og de mellemliggende lerede indslag nummereres stigende mod sydvest. I modelområdet er der kun fundet en enkelt delta-enhed fra Bastrup Formationen (BADS9). Deltaloben kan genfindes i et bredt bånd langs en paleogeografisk kystzone (slope-område) fra Husum-Ballum i den nordvestlige del og ned mod Øster Højst i den østlige del af området. Lige nord for området ligger fronterne for deltaloberne BADS8 (ved Skærbæk) og BADS7 (ved Gånsager). Disse deltalober vil højest sandsynligt strække sig ind i den nordøstlige del af området, men da der ikke er højopløselig seismisk eller stratigrafiske borer her, er de ikke registreret.

I forhold til tolkningerne foretaget i forbindelse med Ribe Formationsprojektet (Friborg & Thomsen, 1999) er der sket nogle ændringer. Generelt tilhører det der før blev kaldt Ribe Formationen nu Bastrup Formationen. Nogle steder passer den tidligere tolkning af Top af Ribe Formationen med deltaloben BADS9.

Som beskrevet identificeres og tolkes Bastrup Deltasand (BADS 9) ud fra seismikken og de stratigrafiske boringer. Bortset fra indikationer i øvrige boringer kan enheden ikke ses i andre data.

Modelleringssteknik

Bastrup Deltasand (BADS 9) er modelleret med to flader, der er konstrueret som grids på basis af fladetolkningspunkter. Bunden defineres som Top af Klintinghoved 9 (Bilag 3.3) mens toppen defineres som Top af Bastrup Sand (Bilag 3.4). Ved modelleringen er der taget udgangspunkt i tolkningspunkterne afsat på seismikken og i boringerne, og der er herudfra blevet afsat fladetolkningspunkter i rummet. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er anvendt udbredelsesregion til at beskære den griddede flade med (se Kap 7.1)

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Bastrup Deltasandet er modelleret i den nordlige og nordøstlige del af området (Bilag 3.4 og Bilag 4.3). Sandet findes ned til mere end kote -470 m i Tønder Graven til omkring kote -120 m i den nordøstlige del. Tykkelsen af sandet varierer fra 0 til 70 meter; tykkest umiddelbart nord for Tønder Graven. Det kiler ud henover Tønder Graven (Bilag 4.3).

Lithologi

Kun få oplysninger fra boredata i området. Hovedsageligt mellem- til grovkornet sand med indslag af gruslag. Se Kap. 3.5.1 for generel beskrivelse af Bastrup Sand.

Usikkerheder

Bastrup Deltasand er typisk tolket på seismiske linjer af god kvalitet og her er usikkerheden moderat til stor. Imellem disse linjer og i resten af udbredelsesområdet er enheden tolket med stor usikkerhed eller med "bedste gæt".

9.3.4 Klintinghoved Ler 9 og 10 (KRL9 og KRL10)

Baggrund og identifikation i data

Ifølge Rasmussen et al. (2010) gav en forbedring af klimaet anledning til stigende vandstand. Klintinghoved Formationen blev afsat mens vanddybden var omkring 16 til 60 meter dybt og aflejringsmiljøet var præget af storm- og tidevandsprocesser. Klintinghoved Formationen består af mørkebrun siltet ler med indslag af sand. Gammalog-mønstret er savtakket med mellem til højt niveau, der falder svagt opad.

I Tønder området er der fundet 2 enheder af regressivt ler fra Klintinghoved Formationen (KRL9 og KRL10). Enhederne er identificeret og tolket på baggrund af de seismiske data og de stratigrafiske boringer. Bortset fra indikationer i øvrige boringer kan enheden ikke ses i andre data.

Modelleringssteknik

Begge enheder er modelleret med to flader konstrueret som grids på basis af fladetolkningspunkter. Bunden af KRL9 defineres som Top af Palæogen (Bilag 3.2) mens toppen defineres som Top af Klintinghoved 9 (Bilag 3.3). Bunden af KRL10 defineres som en kom-

bination af Top af Bastrup (Bilag 3.4) Top Klintinghoved 9 (Bilag 3.3) og Top Palæogen (Bilag 3.2) mens toppen defineres som Top af Klintinghoved 10 (Bilag 3.5). Ved modelleingen er der taget udgangspunkt i tolkningspunkterne afsat på seismikken og i borerne, og der er herudfra blevet afsat fladetolkningspunkter i rummet. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er anvendt udbredelsesregion til at beskære den griddede flade med (se Kap 7.1)

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

KRL9 er modelleret i den nordlige og nordøstlige del af området (Bilag 3.3). Overfladen af enheden findes fra mere end kote -470 m i Tønder Graven til omkring kote -140 m i den nordøstlige del. Tykkelsen af KRL9 varierer fra 0 til 120 meter; tykkest i den nordøstlige del af modelområdet (Bilag 4.2). KRL10 er ligeledes modelleret i den nordøstlige del af området, men når dog længere mod sydvest end BADS9 og KRL9. Overfladen af KRL10 er også præget af Tønder Graven og varierer fra mellem kote -440 m og kote -110 m (Bilag 3.5). Tykkelsen af KRL10 varierer fra 0 m til omkring 80 meter; tykkest i den centrale del af modelområdet (Bilag 4.4).

Lithologi

Kun få oplysninger fra boredata i området. Siltet ler med indslag af homogene eller fint laminerede sandlag. Se Kap. 3.5.1 for generel lithologisk beskrivelse af enhederne. Palynologiske analyser har vist at prøver fra 342–343 m u. t. og i 323–324 m u.t. tolkes til at henholdsvis at repræsentere hhv. Brejning Formationen og sandsynligvis Klintinghoved Formationen (Dybkjær 2011). Niveauet for Brejning Formationen stemmer overordnet set godt overens med modellen der viser at palæogenet på stedet findes omkring 350–360 m.u.t. Boringen er placeret tæt ved Tønder Gravens forkastningszone og en præcis modeldybde er således vanskelig at opnå på steder, bl.a. på grund af interpolation. Den øverste prøve er ifølge modellen taget i niveau med Arnum Ler 2.

Usikkerheder

KRL9 og KRL10 er typisk tolket på seismiske linjer af god kvalitet, og her er usikkerheden typisk moderat til stor. Imellem linjerne og i resten af udbredelsesområdet er enhederne tolket med stor usikkerhed eller med "bedste gæt".

9.3.5 MRS Bastrup

Den sekvensstratigrafisk definerede maksimale regressive flade MRS Bastrup genkendes ofte på seismikken som en af de markante reflektorer. Den erkendes som en markant landerosionsflade, som kan genfindes på seismikken i et område, der har sin nordlige afgrænsning i en linje fra Harboør i Nordvest til Ikast i Midtjylland, og den sydlige afgrænsning går fra Aabenraa og vestpå tværs gennem kortlægningsområdet. MRS Bastrup er vigtig at kortlægge i forbindelse med grundvandskortlægning, da de mest grovkornede sedimenter fra enten fluviale aflejringer eller deltaober (der er afsat nær ved den daværende kystlinie) ofte findes lige derunder.

Modelleringsteknik

MRS Bastrup er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er placeret på de seismiske linjer og frit imellem disse. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1.

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Overfladen er vist i Bilag 3.6. Den er stærkt påvirket af Tønder Graven og har de dybeste niveauer ned til kote -440 m heri. Mod nordøst ses den op til omkring kote -120 m, mens den i den vestlige del befinder sig omkring kote -300 m.

Usikkerheder

Langs med de seismiske linjer, er usikkerheden moderat til stor, mens tolkningen og modelleringen af fladen i mellem linjerne er præget af "bedste gæt".

9.3.6 Arnum Ler 2 og 3 (ARL 2 og 3)

Baggrund og identifikation i data

Arnum Formationen er ifølge Rasmussen et al. (2010) aflejret under en markant global opvarmning med stigende havniveau og tilhørende transgression til følge. Ved maksimal transgression befandt kystlinjen sig fra Nordvestjylland til det centrale Jylland. Arnum Formationen består af mørkebrun siltet ler med indslag af skaller. Gammalog-mønstret viser højt niveau, savtakket med stigende trend opad.

I modellen for Tønder området er Arnum Formationen inddelt i ARL2 og ARL3 aflejret under regressive forhold. Disse er adskilt af Odderup Sand 2.

Modelleringsteknik

Begge enheder er modelleret med to flader konstrueret som grids på basis af fladetolkningspunkter. Bunden af Arnum Ler 2 defineres som en kombination af Top Klintinghoved 9 (Bilag 3.3) og Top Palæogen (Bilag 3.2), mens toppen defineres som Top af Arnum Ler 2 (Bilag 3.7). Bunden af Arnum Ler 3 defineres som Top af Odderup Sand 2 (Bilag 3.8), mens toppen defineres som Top af Arnum Ler 3 (Bilag 3.9). Ved modelleringen er der taget udgangspunkt i tolkningspunkterne afsat på seismikken. Fladerne mellem Top af Odderup 3 og toppen af Arnum Ler 3 (dvs. Top af Arnum Ler 2, Top af Odderup Sand 2 og Top af Arnum Ler 3) er genereret ved hjælp af den delvist automatiserede rutine for flademodelleling (se Kap.7.1.2.).

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Arnum Ler 2 overlejrer palæogenet i den sydlige halvdel og Bastrup sandet i den nordlige halvdel. Toppen af leret findes i dybder på omkring kote -340 m i Tønder Graven mens den i den nordøstlige del findes op til omkring kote -100 m (Bilag 3.7). Tykkelsen er meget lille i den nordøstlige del (0-30 m), mens den i resten af området typisk er mellem 80 og 100 m (Bilag 4.5). Toppen af Arnum Ler 3 findes i dybder på ned til kote -320 m i Tønder Graven mens den i den nordøstlige del findes op til omkring kote -80 m (Bilag 3.9). Tykkelsen varierer meget gennem området fra 0 og 55 m (Bilag 4.7). Overfladerne vist i bilagene er en kombination af nedskæringer af begravede dale og overfladen selve enheden.

Lithologi

Der er kun få oplysninger fra boredata i området. Lithologien af Arnum Leret er generelt siltet med indslag af skaller. DGU nr. 159.1335: 4 prøver i Arnum formationen viser fed ler til siltet ler. Generelt glimmerholdigt. Se Kap. 3.5.1 for en mere generel lithologisk beskrivelse af enhederne.

Usikkerheder

Usikkerheden på begge enheder er stor i hele området (Bilag 3.7, Bilag 3.9)

9.3.7 Odderup Sand 2 og 3 (Ods 2 og 3)

Baggrund og identifikation i data

Ifølge Rasmussen et al. (2010) er Odderup Formationen afsat under subtropisk klima hvor kystlinjen på grund af tektonisk opløft af baglandet påbegynder fremrykning med deraf følgende stigende sedimenttilførsel til Nordsøbassinet. Odderup Formationen består af fin- til grovkornet sand med indslag af ler og brunkul. Finkornede storm-sandslag aflejret foran kystlinjen udgør Stauning Member. Gammalog-mønstret viser lavt til mellemhøjt niveau med opad stigende tendens, hvilket tolkes som kystnær aflejring.

Under aflejring af Odderup Formationen var kystudbygningen ikke så markant som under aflejring af Bastrup Formationen. Dette bevirker, at Odderup sandet ikke genkendes på de seismiske profiler i samme grad som Bastrup sandet. Kystlinjen bevægede sig frem og tilbage på det samme sted over en længere periode, og nogle steder blev der oparbejdet store koncentrationer af tungmineraler i storm-sandlagene. Dette kan genkendes som ekstremt høje udsving på gammaloggen. Når de sandede enheder fra Odderup Formationen ikke er så dybtliggende, erkendes aflejrigerne i borer og diffust i SkyTEM-data. SkyTEM kan ikke adskille de enkelte lag i Odderup og Arnum, men blot give overordnet information om resistivitetsniveauet, som typisk er relativt højt, sammenlignet med den dækende Måde Gruppe.

I modellen er Odderup Formationen inddelt i 2 sandede enheder Odderup Sand 2 (ODS2) og Odderup Sand 3 (ODS3) adskilt af Arnum Ler 3 (ARL3). Stauning Member er ikke skilt ud fra Odderup-enhederne.

Modelleringsteknik

Begge enheder er modelleret med to flader konstrueret som grids på basis af fladetolkningspunkter. Bunden af Odderup Sand 2 defineres som Top af Arnum Ler 2 (Bilag 3.7) mens toppen defineres som Top af Odderup Sand 2 (Bilag 3.8). Bunden af Odderup Sand 3 defineres som Top af Arnum Ler 3 (Bilag 3.9), mens toppen defineres som Top af Odderup Sand 3/MRS Odderup (Bilag 3.11). Ved modelleringen er der taget udgangspunkt i tolkningspunkterne afsat på seismikken. Fladerne mellem Top af Odderup 3 og toppen af Arnum Ler 3 (dvs. Top af Arnum Ler 2, Top af Odderup Sand 2 og Top af Arnum Ler 3) er genereret ved hjælp af den delvist automatiserede rutine for flademodellering (se Kap.7.1.2.).

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Overfladen af Odderup Sand 2 findes på dybder på mellem kote -340 m og -80 m; dybest i Tønder Graven og højest i den nordøstlige del (Bilag 3.8). Tykkelsen af Odderup Sand 2 varierer fra 0 m i den sydøstlige del til 60 m i den centrale nordlige del. Toppen af Odderup Sand 3 (Bilag 3.10, samme som MRS Odderup, Bilag 3.11) er næsten identisk med Top af Arnum 3 idet Odderup Sand 3 kun er meget tynd over det meste af området (Bilag 4.8). I de aller østlige dele ses Odderup Sand 3 at tiltage i tykkelse. Overfladerne vist i bilagene er en kombination af nedskæringer af begravede dale og overfladen selve enheden.

Lithologi

Der er kun få oplysninger fra boredata i området. Lithologien af Odderup Sand-enhederne er generelt fint- til grovkornet med indslag af ler og brunkul. Se Kap. 3.5.1 for en mere generel lithologisk beskrivelse af enhederne.

Usikkerheder

Usikkerheden på begge enheder er stor i hele området (Bilag 3.8, Bilag 3.10)

9.3.8 MRS Odderup

MRS Odderup er ikke så markant på seismikken, som MRS Bastrup, så ofte vil overgangen fra Odderup Formationen til Måde gruppen ikke ses som en markant reflektor. Ofte vil tolkningen af toppen af Odderup baseres på, at seismikken ændrer udseende til et reflektionsmønster, der kan relateres til Måde Gruppens lerede sedimenter. MRS Odderup falder dog sammen med undersiden af Måde Gruppen, som er let genkendelig i SkyTEM-data. Tolkningen og modelleringen af MRS Odderup er derfor støttet af SkyTEM-data i de dele af området hvor disse eksisterer.

Modelleringsteknik

MRS Odderup er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er placeret på de seismiske linjer og frit imellem disse. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1.

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Overfladen er vist i Bilag 3.11. Den er stærkt påvirket af Tønder Graven og har de dybeste niveauer ned til kote -280 m heri. Mod nordøst og sydøst ses den op til omkring kote -50 m, mens den i den sydvestlige del befinder sig omkring kote -150 m.

Usikkerheder

I de områder der er dækket af både SkyTEM og seismik, er usikkerheden moderat til stor, mens tolkningen og modelleringen af fladen i den øvrige del af området er præget af "bedste gæt".

9.3.9 Måde Gruppen

Baggrund og identifikation i data

Ifølge Rasmussen et al. (2010) aflejredes Måde gruppen som følge af endnu en varmeperiode og forøget indsynkning af Nordsøbassinet. Hodde Formationen dannes under stigende vandstand. Ved maksimal transgression aflejres Ørnøj Formationen, der med dens glauconitindhold tolkes at være aflejret langt fra kysten. På trods af klimaforværring, betyder den øgede indsynkning af området, at det fortsat er oversvømmet, men samtidig opløft af det norske område medfører øget sedimenttilførsel og kysten begynder at rykke frem. Gram Formationen aflejres, stadig i et åbent marint miljø, men tynde storm-sandslag øverst i formationen indikerer, at kystlinjen nærmer sig. Tæt på slutningen af perioden aflejres Marbæk Formationen som strandplanssedimenter, og kystlinjen fortsætter sin fremrykning mod vest og sydvest ud i Nordsøbassinet.

I modellen er Måde gruppen samlet som én enhed (herunder Marbæk sand, Gram ler, Ørnøj ler og Hodde ler). Der er fundet Marbæk sand i Borg-1 boringen, men i tolkningen er den ikke skilt ud fra Mådegruppen. Andelen af Marbæk Sand i enheden vurderes at være meget begrænset.

På baggrund af stratigrafiske boringer er Måde Gruppen tolket på en del af de seismiske linjer. Måde Gruppens lerede lithologi gør den let at identificere i SkyTEM-data. Lerlaget ses meget tydeligt som et lavmodstandsdrag, og dette danner grundlag for modelleringen imellem de seismiske linjer.

Modelleringsteknik

Toppen af Måde Gruppen er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af flatetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er placeret på de seismiske linjer og frit imellem disse. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Overfladen vist i Bilag 3.13 er en kombination af nedskæringer af begravede dale og overfladen af Måde Gruppen. Undersiden af Måde Gruppen er defineret ved MRS Odderup (Bilag 3.11).

Forekomst, udbredelse og afgrænsning

Toppen af Måde Gruppen ses typisk mellem kote -25 m og -150 m (Bilag 3.13). Der ses et generelt fald i vestlig retning. Tykkelsen varierer fra 0 m til mere end 200 m (Bilag 4.9). I den nordvestlige, nordøstlige og sydøstlige del er den stedvist meget tynd eller mangler helt. Måde Gruppen er tykkest over Tønder Graven.

Lithologi

Måde Gruppen er domineret af organisk-holdigt ler. Der findes kun få sandede indslag. I boringer bliver Måde Gruppen ofte beskrevet som "fed ler". Se Kap. 3.5.2 for generel beskrivelse af Måde Gruppen.

Usikkerheder

I de områder der er dækket af både SkyTEM og seismik, er enheden relativt velbestemt med en tolkningsusikkerhed på moderat til stor (Bilag 3.13). I den øvrige del af området er tolkningen præget af "bedste gæt".

9.3.10 Måde Gruppen, deformert

Identifikation i data

Mådegruppen er glacialtektonisk deformert i varierende grad. I SkyTEM-data ses laget stedvist at være tykkere med en øvre del, der er ujævn og har en lidt højere modstand. Sammenholdt med seismiske data antages dette at skyldes, at denne øvre del er glacialtektonisk deformert. Overfladen af dette deformerede Måde Gruppe-lag er blevet modelleret.

Modelleringsteknik

Toppen af Måde Gruppen deformert er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter (Bilag 3.14). Tolkningspunkterne er primært tildelt på baggrund af SkyTEM-data, men også på nogle seismiske linjer. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Overfladen vist i Bilag 3.14 er en kombination af nedskæringer af begravede dale og overfladen af Måde Gruppen deformert. Undersiden af Måde Gruppen deformert er defineret Top af Måde Gruppe (Bilag 3.13).

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Den deformerede del af Mådegruppen er kun modelleret i den centrale del af modelområdet, hvor der findes SkyTEM. Tykkelsen varierer fra få meter til omkring 60 m (Bilag 4.10). Overfladen af enheden når højeste koter nord og syd for Tønder Graven (ca. kote 0 m) (Bilag 3.14).

Usikkerheder

Enheden er relativt velbestemt med en tolkningsusikkerhed typisk på moderat.

9.3.11 Basal decollement-flade

Identifikation i data

Den basale decollementflade er tydelig i store dele af de seismiske data (se Figur 25). Den kan dog kun ses heri og ikke i andre data.

Modelleringsteknik

Overfladen er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er kun placeret på de seismiske linjer. Der er interpoleret ved hjælp af Kriging med 2000 m søgeradius og en cellestørrelse på 400 m. Der er ikke udarbejdet afgrænsningspolygon, idet udbredelsen ikke kendes præcist.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Decollement-fladen findes generelt omkring kote -150 m (Bilag 3.12). I Abild-dalen ses det dog dybere (ned til omkring kote -200 til -250 m). Mod nordøst ses der antydning af, at fladen stiger til noget højere koter. Udbredelsen er ikke kortlagt, men der ses indikationer på glacialtektonik i boredata fra stort set hele området, så udbredelsen forventes at være noget større end modelleret.

Usikkerheder

Usikkerheden på tolkningen af decollement-fladen varierer fra lille til stor (Bilag 3.12).

9.3.12 Prækvartæreroverfladen

Definition

Prækvartæreroverfladen kan defineres på forskellige måder. Der kan være fokus på lithologi eller oprindelse. I tilfældet her ved Tønder kan det vælges at definere Prækvartæreroverfladen ved decollementfladen, hvor der har været dynamisk aktivitet i Kvartæret. Store dele af den deformerede zone er imidlertid kun lettere deformered og ikke opblændet med kvartære sedimenter og hvis definitionen baseres på lithologi vil overfladen ligge over disse sedimenter. Idet leret fra Måde Gruppen er let at kortlægge med SkyTEM er det blevet besluttet at definere Prækvartæreroverfladen ud fra en lithologisk synsvinkel og derved ved toppen af den deformerede del af Måde gruppen.

Modelleringsteknik

Prækvartæreroverfladen er en kombination af Top Måde deformered og Top Måde samt bunden af de dale, der skærer sig ned gennem disse to flader (Bilag 3.15).

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Overfladen varierer fra omkring kote -450 m til omkring kote 0 m. Den ligger dybest i Møgeltønder-dalen og højest lige nordvest for Tønder Graven. Generelt befinner den sig dog omkring i koteintervallet -150 m til 0 m. Tøndergraves ses svagt afspejlet i fladen.

Usikkerheder

I de områder der er dækket af både SkyTEM og seismik er enheden relativt velbestemt med en tolkningsusikkerhed typisk på moderat. I den øvrige del af området er tolkningen præget af "bedste gæt".

9.3.13 Kvartæret

Gennemgangen af de indsamlede data sammenholdt med boredata har vist, at kvartæret over hele modelområdet er meget påvirket af glacial deformation. Der er ikke korrelation mellem boredata, og generelt ses et meget rodet og komplekst resistivitetsbillede i SkyTEM data. Seismikken viser ligeledes en kaotisk opbygning. De komplekse forhold skyldes den glacialtektoniske aktivitet i området. Forholdene kan ikke beskrives rumligt og dermed ej heller modelleres. Der er dog undtagelser, hvor dele af den kvartære lagpakke er sammenhængende rumligt. Dette gælder først og fremmest fyldet i de begravede dale. Enten fordi fyldet befinner sig dybt og under niveau af den forstyrrede del af lagserien, eller fordi dalen og dalfyldet er yngre end deformationerne (og dermed udeformeret). Desuden er den unge lagpakke af post-Saale sedimenter uden for dalene heller ikke er blevet glacialt deformeret. Alle disse elementer er modelleret som selvstændige enheder i modellen og beskrives i det følgende.

9.3.14 Begravede dale

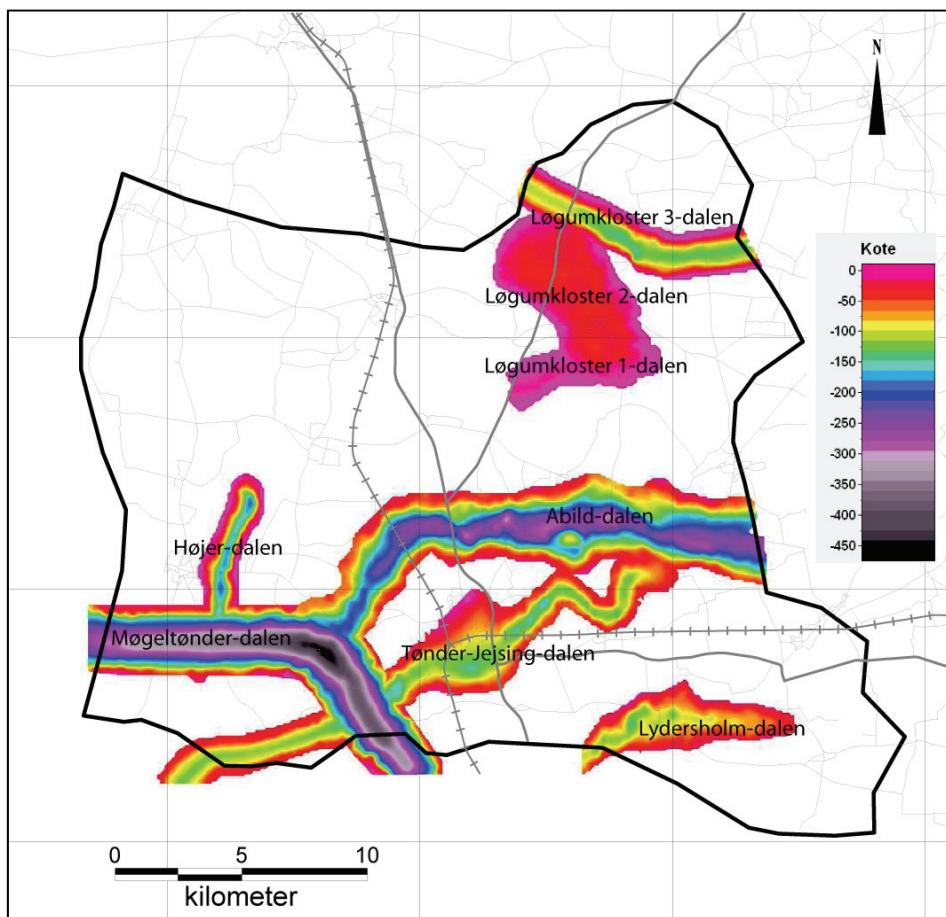
Der er i alt modelleret 8 begravede dale i modelområdet. Dalene skærer ned i ældre aflejninger og skærer også hinanden indbyrdes i nogle områder. På denne baggrund er det muligt at skønne de relative aldre af dalene og dalene er opdelt og grupperet i 3 generatio-

ner. Alderen af tredje generation er sandsynligvis Saale, mens anden og første generation vurderes at være af Elster alder eller ældre.

1. generation	2. generation	3. generation
Møgeltønder-dalen	Abild-dalen	Tønder-Jejsing
Løgumkloster 3-dalen	Højer-dalen	Løgumkloster 1-dalen
	Lydersholm-dalen	
	Løgumkloster 2-dalen	

Tabel 10 Gruppering af dale i aldersgenerationer

Dalene er vist i Figur 59.



Figur 59 Alle modellerede begravede dale i modelområdet.

9.3.14.1 Møgeltønder-dalen

Identifikation i data

Møgeltønder-dalen kan ses i SkyTEM-data og de seismiske data. Dalen er SØ-NV-gående og helt begravet. Den ses som en fordybning i den gode leder, men dalens sydlige flanke sløres af saltvandsforekomster i dalfyldet. På to næsten parallelle, olieseismiske linjer (WGC 7801 og D 8117) kan dalen ligeledes spores, ligesom den svagt kan ses i både WGC 8008 og 8009. Dalen kan følges over en afstand på 15 km. Mod syd fortsætter den

på den anden side af den dansk-tyske grænse og mod vest ud i Vadehavet. Dalen fremstår diffust i TEM på grund af saltvandsforekomsterne, og i den vestlige del, hvor der kun er spredtliggende SkyTEM-linjer, ses den kun svagt som en aflang anomali med lavere modstande end omgivelserne. I det seismiske profil MCR1 ses dalen også tydeligt og i dette profil når dalen en maksimal dybde på 470 m (ca. kote -470 m). Dalens bredde er omrent 2 km.

Foruden en enkelt olieefteforskningsboring af lav kvalitet (DGU nr. 166.226), findes der kun en enkelt dyb boring i dalen. Denne boring er en ny undersøgelsesboring udført af Naturstyrelsen (DGU nr. 166.761). Boringen viser en lagserie med smeltevandssand iblandet moræneler ned til omkring kote -15 m, herefter smeltevandssand til kote -40 m efterfulgt af et tykt lag af smeltevandsler til omkring kote -75 m. Dette efterfølges af en tyk serie af primært smeltevandssand ned til omkring kote -195 m. Nederst i boringen er der ifølge prøvebeskrivelserne fundet interglaciale marint sand og dalbunden anbores i kote -259 m.

Smeltevandsleret mellem kote -40 m og -75 m i boring DGU nr. 166.226 ses tydeligt i SkyTEM data som et udbredt lavmodstandslag i hele dalens forløb. Den tykke serie af sand nedenunder dette ses som moderat til høje modstande i den centrale del af dalen, hvor saltvandspåvirkningen ikke er så kraftig. Ligeledes ses serien af sand og moræneler ovenover smeltevandsleret som høje modstande i TEM-data.

Dalen skæres af både Højer-dalen og af Abild-dalen og dalen er således ældst af disse.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.18. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Lerlaget i dalen (Møgeltønder Ler) er modelleret ved hjælp af to lagflader, en top og en bund. Sandet ovenover (Møgeltønder Øvre Sand) er opefter afgrænset af bunden af hedesletten (Bilag 3.16). Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.2.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Den nedre sandede enhed (Møgeltønder Nedre Sand) i dalen er mere end 300 m tyk. Overfladen af det dækkende Møgeltønder Ler dykker mod øst og syd fra omkring kote -30 m til omkring -80 m. Tykkelsen af leret er nogenlunde konstant omkring 40 m. Den dykende overflade af leret giver plads til Møgeltønder Øvre Sand, som er op til omkring 60 m tykt.

Usikkerheder

Dalen fremstår utydeligt i data, og der er kun få dybe borer. Dalforløbet i den vestligste del og i den sydligste del er mest usikkert.

9.3.14.2 Løgumkloster 3-dalen

Identifikation i data

Løgumkloster 3-dalen ses kun i boredata. DGU nr. 159.243 (Tornskov boringen) viser Holstein interglacial helt ned til kote -76 m og glaciale aflejringer ned til kote -85 m, hvor tertiæ-

ret anbores. Denne boring står sandsynligvis i dalen, som er vanskelig at kortlægge idet, der her ikke findes geofysiske data. En mulig udbredelse af dalen er, at den forløber i SØ-NV retning nordøst om Løgumkloster idet der også ses dybtliggende kvartære aflejringer i bl.a. DGU nr. 159.1170 ved Landeby, 159.615 mellem Landeby og Visbjerg samt i DGU nr. 159.1209 ved Østerby Mark. DGU nr. 169.1167 viser kvartære sedimentter, men denne vurderes at stå udenfor dalførsløbet. Der er muligvis tale om en fejltolkning af boreprøverne i denne boring, således at disse måske er af tertiær oprindelse.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.19. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er ikke modelleret lagflader i dalfyldet. Dalfyldet er modelleret som en del af SSV og SGeMS modelleringen. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.2.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Dalen er op til 140 m dyb og omkring 2 km bred. Dalen fortsætter ud af modelområdet både i nordvest og nordøst.

Usikkerheder

Dalens eksistens og forløb er meget usikker, særligt den nordvestlige og østlige del.

9.3.14.3 Abild-dalen

Identifikation i data

Abild-dalen ses SkyTEM-data, seismiske data og i borer. Dalen er en bred og dyb, helt begravet dal. Dalen består af et østligt segment med en Ø-V orientering samt et vestligt stykke, som er omtrent NØ-SV orienteret. Dalen er generelt bred – mellem 1,75 og 3½ km - og er kortlagt over en afstand på 20 km. Dalen fremstår tydeligt i data, men den øvre del af dalfyldet fremstår forstyrret, hvilket giver en vis usikkerhed på dalbredden. Dalen er ikke afgrænset mod øst, hvor den løber ud af modelområdet. Mod vest løber den sammen med den ældre Møgeltønder-dal, hvorefter den er svær at følge pga. saltvandsforekomster og tynd datadækning. Stigende indhold af salt porevand i lagserien gør at de elektriske modstande fremstår lavere end normalt i SkyTEM-data. Dalens dybde er generelt stor; ved Abild anborer boring DGU. nr. 166.228 dalbunden i form af tertiært ler i kote -258 m, mens boring DGU nr. 166.711 anborer tertiært ler i kote -208 m. Ved Travsted anbores dalbunden i kote -316 m (DGU nr. 167.1538). Disse daldybder er i god overensstemmelse med seismikken, hvor den på profil ToFor1 når ned i kote -280 m, på profil MCR 2 kote -325 m og på profil ToFor 2 kote -320 m. Dalens afgrænsning opadtil kan være vanskelig at stedfæste, da det ser ud til, at de øvre dele af lagserien, ned til mellem kote -50 og -120 m, er deformert. Dalens flanker kan følges op til mellem kote -50 og -10 m.

Den deformerede lagserie ovenover dalen består af vekslende lerede og sandede lag. Dalfyldet under den deformerede lagserie består øverst af et lavmodstandslag, som generelt stiger i kote fra øst mod vest jf. SkyTEM-data. I øst befinner overfladen af dette lag sig omkring kote -120 m, mens det i vest befinner sig omkring kote -10 m. Det er sandsynligt,

at glacialtektoniske deformationer har deformeret dette lag. Laget består ifølge DGU nr. 166.711 af kalkholdig, fed smeltevandsler og smeltevandssilt. Boring DGU nr. 167.1538 viser ligeledes, at lavmodstandslaget udgøres af smeltevandsler og -silt, og her med en samlet tykkelse på mere end 100 m. Lagserien herunder er primært sandet med indslag af smeltevandsler og -silt, men en mod bunden faldende modstand i induktionsloggen peger på et stigende indhold af salt porevand mod dybden. Ifølge boring DGU nr. 166.711 ved Abild består det nederste af dalfyldet primært af kvartært smeltevandssand med tyndere indslag af smeltevandsler og -silt.

Dalen er øverst eroderet ned i Måde Gruppen og herunder ned i Odderup, Arnum og Klin-tinthoved Formationerne.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.20. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Lerlaget i dalen (Abild Ler) er modelleret ved hjælp af to lagflader, en top og en bund. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.1.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Den nedre sandede enhed (Abild Sand) i dalen er i den vestlige del omkring 175 m tyk (se Bilag 5.1). Sandet dykker mod øst og har i den østlige del kun en tykkelse på omkring 60 m. Overfladen af det dækkende Abild Ler dykker ligeledes mod øst fra omkring kote -15 m til omkring -120 m. Tykkelsen af leret stiger fra omkring 25 m i vest til ca. 70 m i øst. De deformerede lag ovenover leret er primært modelleret ved hjælp af SSV.

Usikkerheder

Dalens bund og fyld er forholdsvis velbestemt og er primært tolket med moderat usikkerhed. I den østlige del, hvor der ikke findes mange geofysiske data, er tolkningen præget af "bedste gæt".

9.3.14.4 Højer-dalen

Identifikation i data

Højer-dalen ses i SkyTEM-data i området øst for Højer. Dalen er N-S-orienteret og både helt og delvist begravet. Dalens udbredelse i det horisontale plan er tydeligst i dalens øvre dele. Dalen kan følges op til kote 0 til +5 m, men afgrænsningen er her u tydelig i SkyTEM-data. Dalens nordlige del er beliggende mellem Hjerpsted bakkeø og Abild bakkeø og dal-forløbet svarer til den topografiske lavning mellem bakkeørne. Dalen er V-formet og mellem 0,8 km og 1,3 km bred. Dalen kan følges over en afstand på godt 8 km og ses i SkyTEM-data ned til omkring kote -170 m. Dalen ser ud til at blive mindre dyb mod syd, hvor dalen gradvist bliver sværere at erkende. Den krydser her Møgeltønder-dalen (RIB31) og bliver meget sløret på grund af saltvandsforekomster i Tøndermarsken. Mod nord fortsætter dalen muligvis udenfor det SkyTEM-kortlagte område videre ud i modelområdet, men er ikke inddarbejdet i modellen her. Dalen kan ikke erkendes i de to olieseismiske profiler, som krydser dalen.

Dalen er allerøverst dækket af et tyndt lag (5-10 m) med lave modstande. Dette forventes at modsvare postglaciale marine aflejringer. Herunder haves lag med lidt højere modstande og nedunder, ned til omkring 50 meter, findes igen lave modstande. Der findes ingen boringsoplysninger med høj kvalitet, så en tolkning af disse lag er vanskelig. Laget med de lidt højere modstande tolkes dog at være smeltevandssand af Saale eller Weichsel alder (hedeslette-sand), mens lavmodstandslaget nedenunder kan være marint Eem, glacial ler og/eller salt porevand. I modellen er det inddarbejdet som glacialt ler (Højer Ler). I modstandsmodellet ser det ud til, at de laveste modstande her slynger sig i et strøg langs med dalen. Nedenunder lavmodstandslagene, dybere end kote -40 til -50 m ses igen høje modstande. Det er meget sandsynligt at dette modsvarer smeltevandssand (Højer Sand) i den nedre del af dalen (Thomsen 2013).

Den dybe del af lagserien udenfor dalen er saltvandspåvirket, hvilket ses ved et generelt lavt modstandsniveau. Modstanden af fyldet i de dybe dele af dalen er dog, som ovenfor nævnt, ikke overpræget af salt porevand. Lagserien udenfor dalen er kvartær i de øvre dele ned til omkring kote -70 m og består ifølge borerne af moræneler og generelt kalkfri smeltevandssand. Karakteren af den dybe lagserie udenfor dalen er usikker, da boredata er sparsomme, og da SkyTEM-data generelt forstyrres af det salte porevand.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.21. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Lerlaget i dalen (Højer Ler) er modelleret ved hjælp af to lagflader, en top og en bund. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.1.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Den nedre sandede enhed (Højer Sand) i dalen er omkring 150 m tyk (Bilag 5.1). Overfladen af det dækkende Højer Ler findes mellem kote 0 m (terræn) og kote -20 m. Dette er op til 25 m tykt, og i de midterste dele af dalen dækkes dette af smeltevandssand og postglaciale sedimenter.

Usikkerheder

Dalens eksistens og forløb i de nordlige dele forholdsvis sikker (moderat usikkerhed), mens usikkerheden mod syd er stor.

9.3.14.5 Lydersholm-dalen

Identifikation i data

Lydersholm-dalen ses i SkyTEM-data, men er dog ikke særlig tydelig, og der findes ikke andre data til at verificere den. Heller ikke boredata. Denne dal kan spores over en afstand på omkring 5 km og er omkring 1,5 km bred. Den ses som en diffus modstands anomalii mellem kote -50 m og -120 m. Modstandene i dalen er ikke høje, men alligevel højere end omgivelserne, som præges af modstande på under 15-20 ohmm.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.22. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er ikke modelleret lagflader i dalfyldet. Dalfyldet er modelleret som en del af SSV og SGeMS modelleringen. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.3.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Dalen er op til 140 m dyb og omkring 1 og 2 km bred. Dalen fortsætter ud af modelområdet mod syd.

Usikkerheder

Dalens eksistens og forløb er meget usikker, særligt den nordvestlige og østlige del.

9.3.14.6 Løgumkloster 2-dalen

Identifikation i data

Løgumkloster 2-dalen kan kortlægges ved at kombinere SkyTEM-data med boredata. Boring DGU nr. 159.739 (Løgumkloster 1) viser, at der fra kote 0 og ned til kote -40 m er "postglaciale saltvandssand" og herunder 15 meter kvartært sand, ler og grus, ned til kote -55 m. Saltvandssandet er nok næppe postglaciale, men snarere interglaciale; enten fra Eem eller Holstein. Disse aflejringer fremstår med lave modstande i SkyTEM-data. Lave modstande kan følges i et bredt strøg mod NNV gennem Løgumkloster i niveauer under Løgumkloster 1-dalen. Boringerne DGU nr. 159.1103, 159.1254 og 159.368 indenfor strøget med de lave modstande viser marine aflejringer. Dette strøg med lave modstande tolkes som en NNV-SSØ orienteret helt begravet dal, som kan ses under kote 0 m, og som er udfyldt med overvejende lavmodstandsdrag af marin oprindelse. Boring DGU nr. 159.1103 viser dog også, at der under de marine aflejringer findes glaciale aflejringer inden der anbores tertiære aflejringer. Der er stor variation i boringsbeskrivelserne i dalen, selvom de står tæt, og det vurderes derfor, at lagserien er deformert.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.23. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er ikke modelleret lagflader i dalfyldet. Dalfyldet er modelleret som en del af SSV og SGeMS modelleringen. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.3.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Dalen er mellem 2,2 og 3,8 km bred og dalbunden ser generelt ud til at ligge omkring kote -30 til -50 m. Dalen er i modellen lettere nederoderet i Måde Gruppen. Dalen fortsætter sandsynligvis både i nordvestlig og sydøstlig retning, men dette har kunnet modelleres på grund af manglende geofysiske data.

Usikkerheder

Dalens udbredelse og form er usikkert bestemt, og dalens fortsættelse i begge retninger er ukendt.

9.3.14.7 Tønder-Jejsing-dalen

Identifikation i data

Tønder-Jejsing-dalen ses i SkyTEM-data, seismiske data og boringer fra nord om Jejsing, over Tønder by og Rudbøl. Dalen ses i SkyTEM data som en aflang anomali af henholdsvis højere (nordøstlige del) og lavere modstande (sydvestlige del) end omgivelserne. I den sydvestlige del ses den i seismiske data (MCR3) som et kaotisk refleksionsmønster, der afbryder mere regelmæssige miocæne reflektorer.

Fyldet i dalen består overvejende af lag med moderate til lave modstande. Flere boringer i dalen viser, at der øverst i dalen findes interglaciale aflejringer. Eksempelvis ses der i boring DGU nr. 166.223A interglacial saltvandsler fra ca. kote -14 til kote -25 m. Leret er i boringer aldersbestemt til Eem. Dette koteinterval korrelerer med et lag øverst i dalen med lave modstande i SkyTEM data. De marine Eem-aflejringer er afgrænset til dalen, hvilket betyder, at dalen har udgjort en fjord i Eem (Jørgensen et al. 2012b). Specielt mod vest er karakteren af dalfyldet vanskelig at bestemme, da der ikke haves dybe boringer, og da der her er salt porevand i lagserien generelt (i Tøndermarsken). Bedømt ud fra SkyTEM-data ser det ud til, at lagserien i dalen generelt har lave modstande i toppen, svarende til det marine Eem, mens der nedenunder dette lag ses en stigende modstand, sandsynligvis svarende til en sandet lagserie af Saale alder. Vurderet ud fra lave modstande i den dybste del af dalens østlige del, ser der ud til at dalen her domineres af ler.

Da dalen i toppen er udfyldt med marint Eem må dalens alder være Saale eller ældre.

Dalen er øverst eroderet ned i det miocæne Gram og Hodde ler og herunder de miocæne Arnum og Odderup Formationer.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.24. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Lerlaget i dalen (Tønder-Jejsing Ler) er modelleret ved hjælp af to lagflader, en top og en bund. Sandlaget ovenover (Tønder-Jejsing Sand) er indarbejdet med en selvstændig flade for bunden og med bunden af hedeslettet som top. Øverst er Eem-laget lagt ind i modellen med 2 selvstændige lagflader. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.4.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Dalen har et bugtet forløb, som består af dalsegmenter med typisk NØ-SV og SØ-NV orienteringer. Dalen har en samlet længde på 22 km (i Danmark – fortsætter i Tyskland) og en bredde på mellem ca. 1,2 og 3 km med den bredeste del ved Tønder by. Dalbundens kote varierer mellem ca. -110 m og -170 m. Mod vest skærer dalen Møgeltønder-dalen, som dermed er ældre. Leret dybt i dalen (Tønder-Jejsing Ler) har ifølge modellen sin største mægtighed mod nordøst. Her når det op til omkring kote -40 m. Tønder-Jejsing Sandet ovenover har modsat sin største mægtighed i den sydvestlige del med tykkeler på 60-70 m. Hedeslettesandet når ned til omkring kote -40 m; dybest mod sydvest. Eem-laget er indlejret i hedeslette-enheden som et 5-10 m tykt lag.

Usikkerheder

Dalen fremstår forholdsvis tydeligt i de geofysiske data og boredata bekræfter de øvre dele af dalfyldet inkl. de marine Eem-aflejninger. Der er dog ikke dybe borer til at bekræfte dalen i den sydvestlige del. Hertil kommer, at salt porevand vanskeliggør afgrænsningen af dalsiderne og bestemmelsen af dalfyldets karakter. Dalens form og udbredelse er dermed relativt godt bestemt i de nordøstlige dele (moderat usikkerhed), mens forløb og form er dårligt bestemt i den sydvestlige del (stor usikkerhed). Også i og omkring Tønder by er der stor usikkerhed idet der her ikke findes SkyTEM-data. Dalfyldets rumlige fordeling og lithologi under hedeslettesandet er tolket med stor usikkerhed.

9.3.14.8 Løgumkloster 1-dalen

Identifikation i data

Syd om Løgumkloster er der modelleret en 5 km lang, Ø-V forløbende dal med en bredde på 1-1,5 km. Dalen går helt til terræn og bunden ligger typisk omkring kote -15 m. Dalens dybde er derfor maksimalt omkring 30 m. Dalen kan erkendes som en aflang struktur med høje modstande i SkyTEM-data. Borer i dalen; f.eks. DGU nr. 159.1237 syd for Ellum, bekræfter de høje modstande, da der er gennemboret en lagserie overvejende bestående af smeltevandssand, med et par indslag af moræneler. Dalen er helt begravet og kan ikke erkendes i det nuværende terræn, men i den vestlige del afgrænses den mod syd af bakkeøen.

Modelleringsteknik

Dalbunden er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter, der er interpoleret til et grid, se Bilag 3.25. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1. Der er ikke modelleret lagflader i dalfyldet. Dalfyldet er modelleret som en del af SSV. Dalens fyld er illustreret på et længdeprofil midt i dalen i hele dennes udstrækning på Bilag 5.4.

Usikkerheder

Dalen står tydeligt i SkyTEM-data som en højmodstandsstruktur, og borer bekræfter billedet. Dalen er derfor relativt velbestemt og modelleret med moderat usikkerhed. Dalens fortsættelse mod vest er ukendt og ikke modelleret.

9.3.15 Andre kvartære enheder i modellen

9.3.15.1 Moræneler ved Bylderup-Bov

Efter en grundig gennemgang af boredata i den kvartære del af modellen udenfor dalene og under Post Saale enhederne er det kun et enkelt sted vurderet muligt at tolke sammenhængende lag. Dette drejer sig om et mindre område ved Bylderup-Bov, hvor et morænelerslag kan identificeres i relativt tætliggende borer. Dette lag kan følges i et område på 6 km² og er ca. 20 m tykt. Det befinner sig på en dybde af 5-10 m.u.t. Der er konstrueret lagflader for top og bund af dette lag ved hjælp af fladetolkningspunkter. Laget er efterfølgende indarbejdet i voxelmodellen.

9.3.16 Kraftigt forstyrret lagserie

Området, der er præget af kraftig glacialtektonik, svarer til det område, der ligger mellem bunden af hedesletten (Bilag 3.16) og Top Måde deformeret inkl. begravede dale (Bilag 3.14). Dog er der mellem disse to flader undtagelser hvor lagserien kun er lettere forstyrret, f.eks. dele af dalfyldet i flere af dalene, samt den ovenfor beskrevne enhed ved Bylderup-Bov (Kap. 9.3.15.1). Enheden beskrevet her i dette kapitel er ikke præcist den del af lagserien, der er glacial deformeret, idet enheden "Måde Gruppen deformeret" (Kap. 9.3.10) befinder sig under dette niveau. Det basale decollement-plan ses endvidere endnu dybere – nede i noget af dalfyldet i nogle af dalene og i selve Måde Gruppen (Kap. 9.3.9), hvilket betyder af disse enheder også er præget af glacialtektonik. Disse deformationer er dog begrænsede, og det har derfor været muligt at inddrage enhederne i den manuelle modellering. Det er således kun de kraftigt deformerede områder, der ikke kan modelleres manuelt, der er modelleret ved hjælp af SSV (Kap. 7.3) eller SGeMS (Kap. 7.4).

Tykkelsen af den "kraftigt deformerede lagserie" ses i (Bilag 4.11). Tykkelsen er størst i den nordvestlige del (op til 180 m), mens den er noget tyndere i de sydlige dele og i den nordøstlige del (10-50 m). Over Tønder Graven er tykkelsen i omegnen af 100 m.

9.3.16.1 SSV-resultater

Det SSV-modellerede område dækker både et område i den centrale del, men også dele af området ved Løgumkloster og Rørkær-Jejsing. SSV-resultaterne viser 10 "lithologi"-kategorier – fra kategorien med mindst ler (0-10%) til kategorien med mest ler (90-100%). Generelt forekommer overgangene mellem ler og 'ikke-ler' gradvist som følge af, at SSV kørslen er foretaget på baggrund af mangelagtstolkningen. SSV resultatet fremstår typisk mere homogent end SkyTEM resultatet, ligesom hældende strukturer har en tendens til at blive overset. Ud fra et tolkningsmæssigt synspunkt er det derfor lettere at genkende de glacialtektoniske strukturer direkte i SkyTEM dataene end i SSV resultatet.

I den centrale del af det SSV-modellerede område ses det, at de dybeste dele af det benyttede SSV-resultat (< kote -75 m) hovedsageligt viser lerede sedimenter, mens griddet fremstår mere sandet opefter, se Bilag 6. Specielt intervallet mellem kote -40 m og -10 m viser en tyk sandet enhed (Bilag 7.2, kote -37,5). Herover (kote -10 til 0 m) fremstår SSV-griddet mere heterogent med mange små afgrænsede lerenheder i en overordnet sandet matrix (Bilag 7.2, kote -2,5m). Øverst (kote 0 til 15 m) viser SSV-modellen flere steder igen højere lerindhold, samt mange områder, der falder i middelkategorien mellem ler og sand.

I områderne ved Løgumkloster (Bilag 7.2, A3) og Rørkær-Jejsing (Bilag 7.2, C3) fremstår SSV-resultaterne generelt mere heterogene end i resten af området. Således viser begge områder typisk højere ler-indhold end den centrale del af området.

9.3.16.2 SGeMS resultater

SGeMS-realisationen er som beskrevet benyttet for området udenfor det SkyTEM-dækkede område. Sand-andelen er nøje bestemt ud fra boringerne, og det ses derfor, at den er størst i overfladen, mens den ligger nogenlunde jævnt (omkring 50-60 %) herunder.

SGeMS realisationen er opdelt binært mellem ler og sand, og resultatet fremstår derfor skarpere end SSV-resultatet. Mens den nederste del i SSV-resultatet hovedsageligt er leret, fremstår SGeMS-resultatet temmelig sandet i det dybeste niveau (Bilag 7). Både vertikalt (Bilag 6) og horisontalt (Bilag 7.2) fremstår SGeMS-resultaterne meget heterogene – og strukturerne ser meget 'spottede' ud. SGeMS-resultatet ser således meget mere heterogen ud end SSV resultatet – men også mere 'spottet' end det umiddelbare indtryk, SkyTEM-resultaterne giver.

9.3.17 Hedeslette

Identifikation i data

Enheden "Hedeslette" består af de to hedesletter aflejret under henholdsvis Saale og Weichsel. Hedesletterne overlejrer hinanden og ses delvist at udfylde Tønder-Jejsing-dalen (Kap. 9.3.14.7). I netop denne dal er de to hedesletter dog adskilt af et tyndt lag fra den mellemliggende interglaciale periode Eem. Bortset fra indikationer fra relativt få borer, hvor der ses indslag af Eem lag, kan det ikke lade sig gøre at adskille de to hedesletter fra hinanden. Hedeslettesandet ses i boredata og kan også ses som et tyndt højmodstandslag i den del af modelområdet der er dækket af SkyTEM-data. Det overlejrer typisk mere blandede lithologier fra den glacialtektonisk forstyrrede enhed. Toppen af laget udgøres af terrænoverfladen i de områder hvor det findes. Dog er det dækket af et tyndt lag af postglaciale lag i marskområdet (se Kap 9.3.18)

Modelleringsteknik

Toppen af Hedesletten udgøres af terrænoverfladen og af bunden af den postglaciale enhed (Bilag 3.17). Bundens udgøres af "Bund Hedeslette" (se Bilag 3.16) og er modelleret som en gennemgående lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er primært tildelt på baggrund af boredata, SkyTEM-data, samt i overfladen langs bakkeørerne jordartskort og LiDAR-data. Vedr. punktafstand og interpolation, se Kap. 7.1.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Hedesletten findes i de områder hvor bakkeørne ikke ses. Den når dybest i Tønder-Jejsing-dalen (til omkring kote -40 m) og ligger generelt forholdsvis dybt i den sydlige del (Bilag 3.16). Mod nordvest når den dybder på mellem kote -10 m og +20 m omkring. Tykkelsen varierer fra 20 til 40 m i den sydlige del (dybest i Tønder-Jejsing-dalen) og 0-20 m i den nordlige del.

Usikkerheder

Enheden er generelt ikke særlig godt bestemt idet kontrasten til det underliggende (både lithologisk og modstandsmaessigt) er svag. Særligt i den sydvestlige del, under marsken, og i den sydøstlige del er tolkningen og modelleringen præget af "bedste gæt".

9.3.18 Postglacial

Identifikation i data

Enheden ses i marsken og i andre lavliggende områder. Enheden er kun modelleret i marsken, da den her opnår en betydelig tykkelse. I marsken består den primært af marint sand, gytje og tørv. Enheden ses i terræn på jordartskortet og i boredata. Den overlejrer hedesletten (Kap. 9.3.17). Toppen af laget udgøres af terrænoverfladen.

Modelleringssteknik

Bunden af den postglaciale er modelleret som en lagflade ved hjælp af fladetolkningspunkter. Tolkningspunkterne er tildelt på baggrund af boredata. Punktafstanden er 500 til 1000 m.

Forekomst og udbredelse og afgrænsning

Den postglaciale enhed når dybest i den sydvestlige del af marsken (til omkring kote -10 m), men den når også relativt dybt omkring Tønder (Bilag 3.17). Tykkelsen tilsvarer dybden, idet overfladen findes nær kote 0 m (Bilag 4.13).

Usikkerheder

Der er ikke foretaget usikkerhedsvurdering på denne lagflade.

9.3.19 Andre modellerede enheder

Saltvandsgrænse

Grænsen til det salte grundvand under marsken er modelleret på baggrund af SkyTEM-data. Ved lave modstande (lavere end 20-30 ohmm) i områder, hvor der ifølge boredata og geologisk tolkning findes sandlag, er miljøet tolket som salint. Dette har resulteret i en lagflade der adskiller det salte grundvand mod sydvest fra det ferske grundvand.

Fladen er modelleret ved hjælp af fladetolkningspunkter digitaliseret med jævn afstand (Bilag 3.26). Fladen er fulgt til den krydser terræn opadtil og Top Palæogen nedadtil. Der er kun få km mellem de øverste og nederste niveau, hvilket viser en meget stejlt hældende grænse.

9.3.20 Kortfattet beskrivelse af voxelmodellen

I det følgende gives en kortfattet beskrivelse af voxelmodellen (se især Bilag 6 og Bilag 7).

Nederst i modellen, på dybder mellem 400 og 700 m, findes toppen af kalkoverfladen. Heri ses Tønder Graven tydeligt. Kalken er overalt dækket af et 170-250 m tykt lag af palæoge- ne sedimenter hovedsageligt bestående af fed ler. Herefter følger en serie af Klintinghoved og Bastrup Sand – udbygget fra nordøstlige retninger og dækker kun de nordlige og nord-østlige dele af modelområdet. Bastrup Sand alene er op til 70 m tykt. Tønder Graven er stadig meget markant i dette niveau. Ovenover Klintinghoved og Bastrup følger Arnum og Odderup Formationerne, som forekommer nogenlunde jævnt fordelt over hele området. Denne serie er typisk mellem 100 og 200 m tyk. Mådegruppen overlejrer Odderup og Arnum Formationerne, og varierer i tykkelse fra 0 til 200 m. Gruppen er tykkest i Tønder Gra- ven, og Tønder Graven bliver derfor herefter mindre markant i lagserien. Overfladen af

Måde Gruppen ligger relativt højt i lagserien i den østlige dele, hvorefter den falder nogenlunde jævnt mod vest.

Måde Gruppen er glacialtektonisk deformeret helt ned i de nedre dele. Intensiteten af forstyrrelserne er dog begrænsede på store dybder og træder først for alvor i karakter ovenover Måde Gruppen, men den øverste del af gruppen er alligevel skilt ud i en særlig enhed kaldet "Måde Gruppen deformeret". Denne enhed ses primært i de centrale dele og er op til ca. 50 m tyk. Ovenfor Måde Gruppen er lagserien kraftigt forstyrret, hvorfor den er modelleret ved hjælp af geostatistik. Denne kraftigt deformede enhed er mellem 10 og 100 m tyk; tykkest i den nordvestlige del. Der ses et meget heterogent mønster af sand- og lerstrukturer internt i enheden.

En lang række begravede dale eroderer sig ned i underlaget – en enkelt så dybt som til palæogenet, mens flertallet blot når et stykke ned i de miocæne lag. Dalene skærer også i nogle tilfælde ned i hinanden. De er primært udfyldt med lerede og sandede kvartære smeltevandsaflejringer, typisk meget tykke lagpakker. Nogle af dalenes fyld indgår dog i den kraftigt forstyrrede enhed.

I de områder hvor bakkeørerne ikke findes, dækkes området af glaciale, interglaciale og postglaciale lag fra sen Saale, Eem, Weichsel og Postglacial. Disse lag domineres af et 0-40 meter tykt lag af hedeslette-sand. Indlejret i dette sand findes de interglaciale Eem-lag i den begravede dal ved Tønder (Tønder-Jejsing-dalen). Marsken dækkes af et tyndt lag af postglaciale sedimenter.

10. Fra geologisk model til grundvandsmodel

I forbindelse med at den geologiske model skal anvendes i en grundvandsmodel, er det nødvendigt at estimere hydrauliske ledningsevner for de forskellige lithologiske enheder. Estimeringen er foretaget ved at gennemgå en tre-trinsmetode:

1. Opdeling i hhv. kvartære (Q) og prækvartære (P) enheder. (Pga. store forskelle i aflejningsmiljøerne er det forventeligt, at en prækvartær sand-enhed vil have en anden hydraulisk ledningsevne end en kværtær sand-enhed.)
2. Opdeling i hhv. sand (S) og ler (C): De geologiske enheder fra hhv. kvartær og prækvartær opdeles i sand og ler.
3. Høj- (H) og lav-permeable (L) enheder (K-enheder): Der foretages en vurdering af, om de definerede sand- og ler-enheder har en relativ høj eller en relativt lav hydraulisk ledningsevne. Den hydrauliske ledningsevne afhænger af kornstørrelse og af sorteringsgraden. Mht. sorteringsgraden (og på lidt større skala, homogeniteten) er det forventeligt, at en homogen sand-enhed vil have en relativt høj K-værdi, mens en homogen ler-enhed vil have en relativt lav K-værdi. Dvs. hvis der er tale om en heterogen sandlithologi, er det forventeligt, at den hydrauliske ledningsevne er relativt lav (sammenlignet med homogen sand). Omvendt, hvis der er tale om en "rodet" ler-lithologi, er det forventeligt, at den hydrauliske ledningsevne er relativt høj (sammenlignet med homogen ler).

Metoden blev benyttet systematisk for alle lithologiske enheder i modellen, hvilket resulterede i en fordeling som vist i Tabel 11. Den estimerede hydrauliske ledningsevne og begrundelserne kan ses på Bilag 8.

	Kvantært ler		Prækvantært ler		Kvantært sand		Prækvantært sand	
K-enhed	QCH	QCL	PCH	PCL	QSH	QSL	PSH	PSL
Antal voxler	293.573	184.773	1.476.399	652.820	407.059	365.011	116.329	478.043

Tabel 11 Tabellen angiver antallet af voxler for de overordnede K-enheder, der er brugt i grundvandsmodellen. Q står for kvartære sedimenter, P for prækvartære sedimenter. C står for ler, S for sand. H står for høj hydraulisk ledningsevne, og L står for lav hydraulisk ledningsevne. Således står f.eks. "QCH" for kvartært ler med høj hydraulisk ledningsevne.

De kvartære enheder omfatter både de manuelt tolkede enheder i form af dalfyld, moræneaflejringer samt postglaciale aflejringer, men også de voxler, der er modelleret med SGeMS og SSV. De manuelt tolkede enheder blev vurderet hovedsageligt på baggrund af boringsresultaterne. I denne forbindelse blev de velbeskrevne borer benyttet til at give information om parametre som f.eks. sorteringsgrader, mens variationen mellem borerne blev benyttet til at vurdere ensartetheden af formationerne. En enkelt enhed er dog vurderet ud fra et praktisk hensyn. Således er de saltvandsprægede kvartære sedimenter beskrevet som "kvartært ler med lav hydraulisk ledningsevne". Denne enhed består af en blanding af sand- og lerlag, men klassificeringen blev foretaget ud fra ønsket om, at der i grundvandsmodellen ikke må strømme grundvand fra det ferskvandsmættede område ud i det saltvandsmættede området.

Ved klassificeringen af SGeMS voxlerne blev det vurderet, at leret skulle have en forholdsvis høj ledningsevne, mens sandet skulle have en relativt lav ledningsevne. SSV-voxlerne blev opdelt i henholdsvis sand (< 50 % ler) og ler (> 50 % ler), mens lerandelen blev benyttet til at inddæle griddet yderligere i høje og lave hydrauliske ledningsevner. Således er SSV-voxlerne med 0-20 % ler f.eks. beskrevet som sand med høj hydraulisk ledningsevne, mens voxlerne med 20-50 % ler er beskrevet som sand med lav hydraulisk ledningsevne (se Bilag 8).

De to kategorier for manuelt tolkede enheder "kvartært sand" og "kvartært ler" (se Figur 34), benævnt "Quaternary_Sand" og "Quaternary_Clay" i Bilag 8, er typisk anvendt i forbindelse med tilretninger af SSV-griddet. Det "kvartære sand" er oftest tolket ved filtersatte borer, hvor SSV-griddet har angivet ler. Disse områder er derfor vurderet til at have en høj hydraulisk ledningsevne. Mht. det 'kvartære ler' er dette tolket i områder, hvor SSV'en som udgangspunkt har angivet sand. Dette tyder på, at leret har en relativt lav resistivitet, hvorfor der er tolket en høj ledningsevne.

De prækvartære enheder i grundvandsmodellen omfatter de Miocæne aflejringer. Ved klassificeringen af disse K-enheder er der foruden de dybe detaljerede borer skelet kraftigt til den generelle beskrivelse af de forskellige Miocæne lithologier af Rasmussen et al. (2010). I mange tilfælde omfatter formationerne flere forskellige enheder – som strækker sig fra sandede til lerede sedimenter (f.eks. Måde gruppen). I disse tilfælde er lithologien blevet afgjort af hovedenheden, mens de sekundære enheders tilstedeværelse afspejles i den relative hydrauliske ledningsevne.

11. Resume

Alle data blev indledningsvist gennemgået og indlagt i GeoScene3D. Her blev de sammen og hver for sig underlagt en grundig geologisk tolkning inden digitaliseringen af 3D modelnen blev påbegyndt.

Arbejdet med at importere de seismiske data til GeoScene3D var meget omfattende pga. af forskellige problemstillinger mht. koordinater, seismiske hastigheder, filstørrelse og -type m.m. Modellen indeholder alle tilgængelige seismiske data i området, inklusive uddrag af et 3D seismisk datasæt ved Tønder. Med baggrund i tolkninger udført i regi af Miocæn 3D projektet er en række enheder defineret i den nyeste miocæne stratigrafi indbygget i modellen. Dette er sket ved hjælp af fladmodellering mellem de seismiske linjer og stratigrafiske borer. På denne baggrund er der skabt en 3D model over miocænet indeholdende enheder fra Klintinghoved, Bastrup, Arnum og Odderup formationerne samt en enhed for Måde Gruppen. Også overfladen af kalken og palæogenet er hovedsageligt modelleret på baggrund af de seismiske data.

Ovenfor de miocæne lag ses de glacialtektonisk forstyrrede enheder tydeligt i SkyTEM-data, i de seismiske data og i boredata. Intensiteten og udbredelsen af forstyrrelserne er blevet undersøgt og kortlagt. Det har ikke været muligt, at modellere de glacialtektoniske strukturer i detalje, idet størrelsen af hver enkelt struktur er for lille i forhold til datatæthed og dataopløsning. Glacialtektonikken forekommer i hele modelområdet men ikke i samme dybdeinterval overalt. Toppen og bunden af de mest forstyrrede områder er blevet kortlagt, og for intervallet herimellem blev det besluttet at opstille modellen ved hjælp af geostatistiske metoder. I områder med SkyTEM-data blev SSV-metoden anvendt. Dette er sket i samarbejde med Århus Universitet og er baseret på en videreudvikling, som kan håndtere 3D modellering. I området hvor der ingen SkyTEM-data findes, er den stokastiske metode SGeMS anvendt. Disse metoder fordrer voxelmodellering, da deres resultater bliver distribueret ud i et rumligt voxelgrid. Metoderne resulterer i en sand-ler lithologi og munder således ikke ud i en "rigtig" geologisk model.

De begravede dale er blevet kortlagt ud fra en kombination af SkyTEM-data, seismiske data og boredata og er indlagt i modellen som lagflader. Der er meget dybde dale (mere end 400 m) og meget overfladenære dale, og der er således stor forskel på disse. Nogle er meget gamle og kan henføres til tidlige glaciationer, og nogle er relativt unge (måske Saale). Hver dal har sin egen bundflade i modellen, og flertallet af dalene har endvidere fået modelleret interne lagflader (hvis lagserien ikke har været meget forstyrret).

De yngste sedimenter i området, dvs. sen Saale, Eem, Weichsel og postglacial er uforstyrrede, og for disse enheder er der igen udført lagfladmodellering. Områdets bakkeører ses som forstyrrede, glacialtektonisk prægede levn fra Saale og præ-Saale. De yngste sedimenter er aflejret rundt om bakkeørerne og danner hedesletterne og marsken. Eem-lagene forekommer i en ung baggravet dal, der når fra marsken, forbi Tønder og langt ind i landet.

Der er foretaget en grundig geomorfologisk analyse baseret på LiDAR-data. Denne analyse viser, at Tønder Gravens forkastningsstrukturer er blevet reaktivert af istidens iskapper,

og at forkastningerne på hedesletten har været aktive helt op i Postglacial tid. Mange af forkastningerne når derfor helt til terræn.

Lagfladerne har været genstand for en hel del manuelle operationer efter digitalisering, bl.a. resampling, beskæring og kombination. De færdige lagflader med tilhørende afgrænsningsregioner har fungeret som limits ved opbygningen af voxelmodellen. Den endelige voxelmodel er en kombination af denne voxellering og de geostatistisk genererede voxelmodeller, SSV og SGeMS.

Voxelmodellen dækker hele modelområdet og benyttes bl.a. som hydrostratigrafisk model. Der er vurderet hydraulisk ledningsevne for alle lithologier i voxelmodellen til brug ved den efterfølgende grundvandsmodellering.

12. Diskussion

Målet med projektet var at udvikle og implementere nye metoder, der konkret adresserer de særlige, lokale geologiske forhold og deraf følgende udfordringer i området. Desuden var målet at opstille en 3D geologisk model, der bl.a. kunne benyttes som input til en grundvandsmodel.

De særlige udfordringer er karakteriseret ved følgende:

- Området gennemskæres af en række forkastninger, hvoraf nogle gennemskærer lagserien helt til terræn.
- I store dele af området er lagserien i stor skala glacialtektonisk deformert.
- Flere begravede dale af forskellige generationer gennemskærer lagserien til meget stor dybde.
- Lagserien i marsken og dermed i dele af modelområdet er overvejende saltvandsmættet og dermed svært at kortlægge med fladedækkende metoder.
- Den miocæne lagserie er forholdsvis kompleks med deltaudbygninger og kystnære facies.

Dette projekt er et udviklingsprojekt, hvor nye fremgangsmåder til at tackle ovennævnte problemstillinger er blevet testet af. Nogle er faldet positivt ud mens andre af forskellige årsager har vist sig at være "blindgyder". Idet et delmål i projektet har været at udarbejde en model til videre anvendelse i forbindelse med bl.a. grundvandsmodellering, har det været af afgørende betydning, at der **samtidig** med det udviklingsorienterede arbejde kunne fremstilles en 3D geologisk model af høj kvalitet, der som **minimum** lever op til normal standard for geologiske modeller. Det vil sige, at når en testet metode viste sig at være en "blindgyde", skulle der efterfølgende enten findes andre metoder eller anvendes en kendt standardløsning. Et sådant projekt er derfor svært at dimensionere og har først og fremmest krævet mere tid end normalt og mere fleksibilitet i planlægningen.

En stor del af de testede fremgangsmåder har vist sig fordelagtige og anvendelige, men nogle har som nævnt også haft karakter af "blindgyder", især på grund af diverse begrænsninger, der har vist sig uoverstigelige på nuværende tidspunkt. En kortfattet beskrivelse af nogle af de indhentede erfaringer følger:

Det var bl.a. målet, at få indarbejdet forkastningerne omkring Tønder Graven i 3D modelnen. Det har på nuværende tidspunkt ikke været muligt, at få udviklet et modul i GeoScene3D til håndtering af dette, og forkastningerne blev derfor forsøgt indlagt som almindelige lagplaner. Dette viste sig dog ikke som en farbar vej, da den praktiske håndtering i forhold til afskæring og relation til andre flader ikke var optimal. Desuden kan der ikke interpoleres med forkastninger i programmet. Resultatet har været, at forkastningerne er blevet indlagt som stærkt hældende partier i eksisterende lagflader – en løsning der ikke viser selve forkastningsplanet, og ej ikke viser detaljer omkring forkastningszonerne.

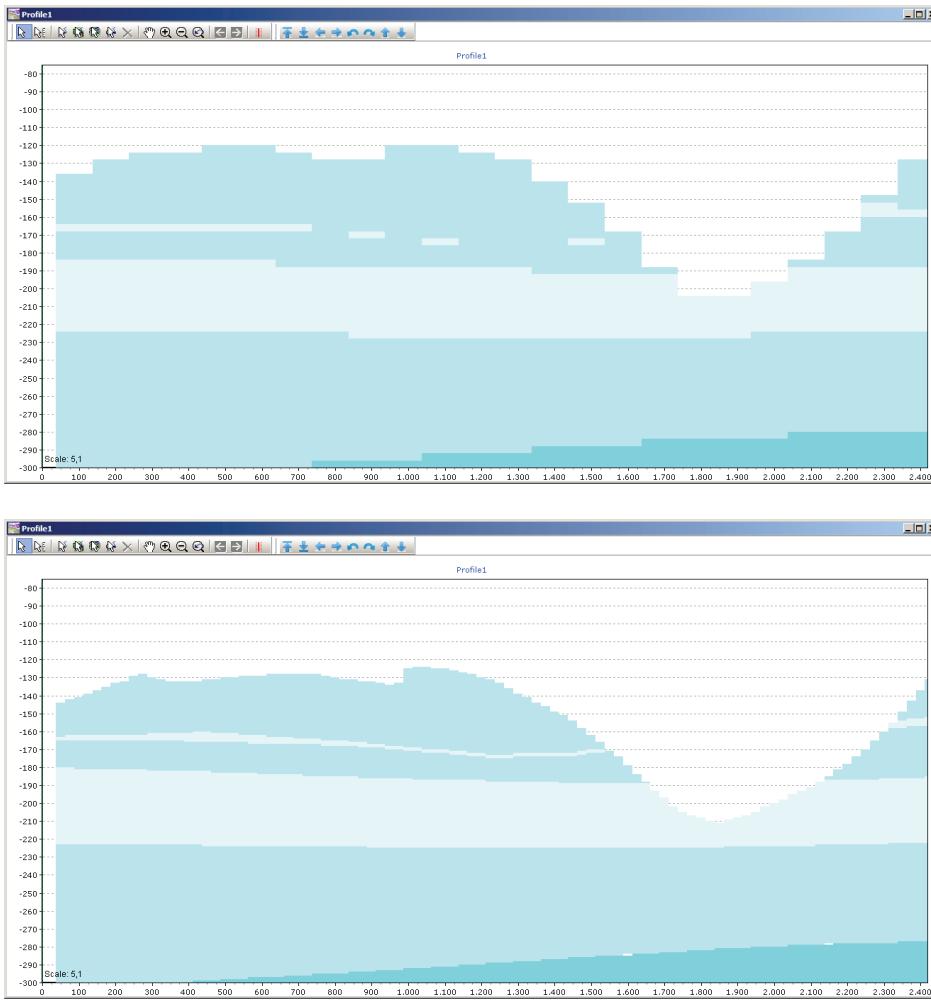
Den måske største udfordring i området har været, at modellere den kraftigt glacialtektonisk deformerede lagserie. På baggrund af erfaringer fra Ølgod-området (Jørgensen et al. 2012a), hvor manuel tolkning viste sig uoverkommelig, blev det besluttet, at der skulle an-

vendes en geostatistisk tilgang. Den til projektet videreudviklede SSV-metodik har vist sig let anvendelig, og tilgodeser både boredata og SkyTEM-data. Men det er vanskeligt, at give en reelt vurdering af resultaterne heraf, idet de ikke umiddelbart kan verificeres kvantitativt. Ud fra en subjektiv vurdering kan det dog siges, at typiske glacialtektoniske strukturer ikke i særligt stort omfang kan erkendes i den resulterende voxelmodel. Omvendt må det siges, at det pt. er svært at finde en anden farbar vej til opstilling af en 3D model, hvor alle data implementeres tilstrækkeligt og tilfredsstillende i modeltolkningen.

For den del af modelområdet, der ikke er dækket af SkyTEM-data men er kraftigt deformert, kan der ikke opstilles en realistisk geologisk model. Det er vurderet helt umuligt, at udarbejde en meningsfuld manuel, subjektivt tolket geologisk model for denne del af lagserien i dette område. Derfor blev løsningen med at anvende stokastisk modellering med SkyTEM-resistivitetsgriddet som training image valgt. Resultatet repræsenterer i det mindste den statistisk rumlige fordeling af sedimenterne i området (i hvert fald med udgangspunkt i SkyTEM-data). Anvendeligheden af resultatet kan diskuteres, idet der til modellen blot er udvalgt en enkelt realisation blandt mange meget forskellige realisationer.

Selvom den geologiske model i sidste ende bl.a. består af en voxelmodel, er den kun i meget lille omfang opstillet ved hjælp af manuel voxelmodellering. Kun ved den manuelle gennemgang af SSV-outputtet er der sket direkte manuel editering af voxelgriddet. Dog kan det siges, at nogle af lagfladerne (bl.a. de interne dalflader) er udarbejdet som et redskab til at få udfyldt voxler. Denne metodik har været forholdsvis effektiv. Manuel voxelmodellering er stadig under udvikling, og der mangler effektive værktøjer til dette. Potentialet vurderes dog at være stort i de tilfælde, hvor der er SkyTEM-data tilstede, og hvor geologien er heterogen.

Der har været begrænsede, men dog succesfulde forsøg med octree voxelmodellering. En lille del af modellen er blevet konverteret til en octree-model med en meget stor besparelse i antallet af voxler eller alternativt en stor forøgelse i dætaljeringsgraden langs laggrænser (se Figur 60). Der er ikke arbejdet videre med metodikken idet octree-modulet ikke er færdigudviklet.



Figur 60: Øverst ses en almindelig voxelmodel med normalt regulært grid (100 m x 100 m x 4 m), nederst en octree-model med voxler af variabel størrelse (25 m x 25 m x 1 m). Bemærk den bedre oplosning af det tynde lag. Eksempel fra Tønder-modellen.

Der blev udført forsøg med anvendelse af a priori information ved den geofysiske tolkning af SkyTEM-data. A priori informationen var baseret på seismiske data og enkelte dybe borer. Vurderet ud fra forventet geologi og sammenholdt med andre data var resultaterne af dette ikke overbevisende bedre end resultaterne fra standardinversionerne. Disse blev derfor ikke anvendt videre i modelarbejdet.

Der er i modellen opstillet et koncept for usikkerhedsvurdering af de afsatte tolkningspunkter. Konceptet har fungeret godt i det omfang, det er blevet ført ud i livet. Der er tale om subjektive vurderinger af usikkerheden på fladetolkningsniveau, men det har alligevel vist sig muligt, at følge disse med rimelig konsistens også på tværs af modellører. Usikkerhedsvurderingerne er dog ikke blevet gennemført i fuldstændigt omfang i dette udviklingsprojekt og alle fladetolkningspunkter i modellen har derfor ikke fået tildelt en usikkerhed.

De begravede dale er modelleret med individuelle bundflader og flader der beskriver fyldet. Der er blevet testet forskellige metoder til digitalisering af punkter i rummet, til interpolation og til afskæring af flader. Dalene er fremkommet ved digitalisering af punkter både på horizontale snit af resistivitetsdata og borer, på flytbare profiler med samme data og på for-

skellige kombinationer heraf. En endelig velegnet fremgangsmåde for modellering af dale er dog ikke blevet defineret i dette projekt.

I projektet er der også blevet udarbejdet modelflader i den saltvandsmættede del af lagserien under marsken. Her har det vist sig at SkyTEM-data har kunnet udnyttes, hvis den lave del af resistivitetsskalaen fremhæves ved en trimning af den tilhørende farveskala. Der opereres således med andre resistivitetsintervaller end normalt for de forskellige typer af lithologier.

Denne geologiske model er anderledes i forhold til andre geologiske modeller udført herhjemme, idet den i højere grad fokuserer på geologien og de geologiske forhold. Dette medfører, at modellen indeholder mange geologiske enheder med rigtig mange forskelligartede lagflader og strukturer. Det har været en stor udfordring, at holde styr på de interne relationer mellem disse; f.eks. hvilke flader skærer hvilke, deres indbyrdes aldersrelationer, hvilke flader er erosionsbetingende og hvilke er sedimentationsflader, hvad gøres ved forkastninger, osv. De dybe dale, forkastninger og deltaudbygningerne i miocænet gør systemet kompliceret, ligesom det glacialtektoniske kompleks midt i lagserien spiller sin helt egen rolle. Der er ikke udarbejdet nogen dedikeret metodik til at styre disse forhold i projektet, men det anbefales, at hvis intentionen er at opstille komplicerede rumlige geologiske modeller fremover, skal der udvikles avancerede koncepter og digitale værktøjer til dette.

13. Referencer

- Andersen, A. 1954: Two Standard pollen diagrams from South Jutland. Geological Survey of Denmark, II. Series, No. 80, pp. 188-209. Copenhagen 1954.
- Andersen, L.T. 2004: The Fanø Bugt Glaciotectonic thrust fault comolex, Southeastern Danish North Sea. DGU Rapport 2004/30.
- Bahlo, M 1998: Mikrogravimetrische Untersuchungen der Ribeformation. Upubliceret speciale-opgave. Ruhr-Universität BochumClausen, O. R. & Huuse, M. 1999: Topography of the Top Chalk surface on- and offshore Denmark. Marine and Petroleum Geology 16 (1999) 677-691.
- Clausen, O.R., Nielsen, S.B., Egholm, D.L. & Gołębowski, B. (2012). Cenozoic structures in the eastern North Sea Basin — A case for salt tectonics. Tectonophysics 514–517 (2012) 156–167.
- Daly, C., and Caers, J., 2010, Multi-point geostatistics - an introductory overview: First Break, v. 28, p. 39-47.
- Dehls, J. F., Olesen, O., Olsen, L. & Blikra, L. H. 2000: Neotectonic faulting in northern Norway; the Stuoragurra and Nordmannvikdalen postglacial faults. Quaternary Science Reviews 19 (2000) 1447-1460.
- Dybkjær, K. 2011: Palynologisk undersøgelse af 2 prøver fra boringen DGU nr. 167.1538 Travsted. GEUS notat til Naturstyrelsen Ribe. Dateret 11/11-2011.
- 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.
- Foged, N., and Christiansen, A. V. 2013: Large-scale automatic generation of lithological models from resistivities using borehole information in an inversion approach, SAGEEP: Denver, Colorado.
- Friborg, R. 1996. The landscape below the Tinglev outwash plain: a reconstruction. Bull. Geol. Soc. Denm., Vol. 43, pp. 34-40. Copenhagen.
- Friborg, R. & Thomsen, S. 1999: Kortlægning af Ribe Formationen, Et fællesjysk grundvandssamarbejde, Teknisk Rapport, Ribe Amt, Ringkøbing Amt, Viborg Amt, Århus Amt, Sønderjyllands Amt.
- 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.
- Grontmij a/s 2010. Trin 1-kortlægning af Tønder, Løgumkloster og Løgumgårde, Højer og Daler samt Rørkær-Jejsing kortlægningsområder. Udført for Naturstyrelsen, april 2010.
- Hansen, S. 1978. Sidste istids maksimums-udbredelse i Syd- og Midtjylland. Danm. Geol. Unders., Årbog 1976, pp. 139-152. København, 1. marts 1978.
- He, X., Sonnenborg, T.O., Jørgensen, F., Hoyer, A.S., Moeller, R.R and Jensen, K.H. 2013: Analyzing the effects of geological and parameter uncertainty on prediction of groundwater

head and travel time. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 17, 3245-3260, doi:10.5194/hess-17-3245-2013

Huisse, M., Lykke-Andersen, H. & Thomsen, S. 2000. Begravede dale i Nordsøen - og i Sønderjylland. *GeologiskNyt* 05/2000.

Jørgensen, F. & Sandersen, P.B.E. 2006: Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 25, 11-12, pp. 1339-1363.

Jørgensen, F. et al. 2008. Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. *Geo-Vejledning* 3, GEUS. Juli 2008.

Jørgensen, F. & Sandersen, P. (2009)/ Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2006-2009. Udført for de statslige miljøcentre. ISBN 978-87-7871-259-2.

Jørgensen, F., Møller, R. R., Høyer, A.-S., and Christiansen, A. V., 2012a, Geologisk model ved Ølgod og Skovlund - eksempel på effektiviseret modellering i et heterogent geologisk miljø GEUS

Jørgensen, F., Scheer, W., Thomsen, S., Sonnenborg, T. O., Hinsby, K., Wiederhold, H., Schamper, C., Burschil, T., Roth, B., Kirsch, R. & Auken, E. 2012b. 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.

Kristensen, M., Vangkilde-Pedersen, T., and Skovbjerg, R. E., 2010, Miocæn 3D, Den rumlige geologiske model: Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Lyngsie, 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.

Møller, R.R. & Jørgensen, F. 2011: Geologisk model ved Egebjerg. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/37. 95 pp.

NIRAS 2002: MEP kortlægning ved Bredebro. Sønderjyllands Amt.

Orbicon 2010: Miljøcenter Ribe, Boringsundersøgelse DGU Nr. 167.1538.

Orbicon 2011: Naturstyrelsen Ribe, Boringsundersøgelse DGU Nr. 167.1545.

Orbicon 2012: Naturstyrelsen Ribe, Boringsundersøgelse DGU Nr. 166.761.

Rambøll 2010. Seismisk kortlægning ved Tønder. Upubliceret rapport. Miljøcenter Ribe.

Remy, N., Boucher, A., and Wu, J., 2009, Applied Geostatistics with SGeMS, Cambridge, UK.

Rasmussen, E. S. 2004: Stratigraphy and depositional evolution of the uppermost Oligocene-Miocene succession in Western Denmark. *Bull. Geol. Soc. Denm.* Vol. 51, pp. 89-109.

Rasmussen, E. S. , Dybkjær, K., Piasecki, S. & Riisager, P. 2009: Højopløselig stratigrafi af den miocæne lagserie i Jylland, Danmark. GEUS rapport 2009/29.

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

Sanderson, P. B. E. & Jørgensen, F. (accepted). Neotectonic deformation of a Late Weichselian outwash plain by deglaciation-induced fault reactivation of a deep-seated graben structure. Accepted for publication in *Boreas*.

- Strebelle, S. B. 2002: Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics: Mathematical Geology v. 34, no. 1, p. 1-21.
- Ter-Borch, N. 1991: Kalkoverladens struktur. Kort i 1:500.000, DONG, Skov- og Naturstyrelsen.
- Thomsen, E. 1995: Kalk og kridt i den danske undergrund. In: O.B. Nielsen (ed.): Danmarks geologi fra Kridt til i dag. 32?7. Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Thomsen, S. 1991: Kortlægning af dybe grundvandsmagasiner. 1. statusrapport, Kort- og Matrikelstyrelsen, Geodætisk-Seismisk afdeling samt Sønderjyllands Amt, Miljø- og Vandløbsvæsenet, 1991.
- Thomsen, S. 1992: Kortlægning af dybe grundvandsmagasiner. 2. statusrapport, Kort- og Matrikelstyrelsen, Geodætisk-Seismisk afdeling samt Sønderjyllands Amt, Miljø- og Vandløbsvæsenet, 1992.
- Thomsen, S. 2013: Tønder Forsyning. Status, konklusioner og videre forløb for arbejdet med boringer og indvinding ved Højer Vandværk. Thomsen, S. (2013): Tønder Forsyning. Status, konklusioner og videre forløb for arbejdet med boringer og indvinding ved Højer Vandværk.
- Vejbæk, O.V. 1997: Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. Geologisk Tidsskrift 4, 1–31.
- Wind, M. 2008: Automatic generation of elevation data over Danish landscape. PhD-afhandling, Ålborg Universitet 2008.
- Aarhus University 2012: SkyTEM Survey Tønder 2009, Leck 2008, Rens/Løgumgårde 2011. Hydrogeophysics Group, Report number 2012-09-01.

Bilag 1. Symbolliste, voxelmodel

Bilag 2. Stratigrafisk skema

Bilag 3. Lagflader, kort

1. Top Kridt
2. Top Palæogen
3. Top Klintinghoved 9
4. Top Bastrup Sand
5. Top Klintinghoved 10
6. MRS Bastrup
7. Top Arnum Ler 2
8. Top Odderup Sand 2
9. Top Arnum Ler 3
10. Top Odderup Sand 3
11. MRS Odderup
12. Basal decollementflade
13. Top Måde
14. Top Måde deformert
15. Prækvarteroverfladen
16. Bund hedeslette
17. Bund Postglacial
18. Bund Møgeltønder-dal
19. Bund Løgumkloster 3-dal
20. Bund Abild-dal
21. Bund Højer-dal
22. Bund Lydersholm-dal
23. Bund Løgumkloster 2-dal
24. Bund Tønder-Jejsing-dal
25. Bund Løgumkloster 1-dal
26. Saltvandsgrænse

Bilag 4. Lagtykkeler, kort

1. Palæogen ler
2. Klintinghoved 9
3. Bastrup Sand
4. Klintinghoved 10
5. Arnum Ler 2
6. Odderup Sand 2
7. Arnum Ler 3
8. Odderup Sand 3
9. Måde Gruppe
10. Måde Gruppe deformert del
11. Glacialtektonisk deformert enhed
12. Hedeslette
13. Postglacial

Bilag 5. Profiler, begravede dale

1. Abild og Højer-dale
2. Møgeltønder og Løgumkloster 3-dale
3. Lydersholm og Løgumkloster 2-dale
4. Tønder-Jejsing og Løgumkloster 1-dale

Bilag 6. Profilsnit gennem voxelmodel

1. Profilsnit NS

2. Profilsnit ØV

Bilag 7. Horisontale snit gennem voxelmodel

1. Horisontale snit, dybe

2. Horisontale snit, øvre

Bilag 8. Hydrauliske ledningsevner

Bilag 9. Rutine til automatisering af fladetolkning

Color	Text
Red	Quaternary_Sand_fill
SSV 0-10%	
SSV 10-20%	
SSV 20-30%	
SSV 30-40%	
SSV 40-50%	
SSV 50-60%	
SSV 60-70%	
SSV 70-80%	
SSV 80-90%	
SSV_100%	
SSV sand (0-40% clay)	
SSV sand og ler (40-60% clay)	
SSV ler (60-100% clay)	
SGEMS sand	
SGEMS clay	
Post_glacial	
Sandur	
Late_glacial	
Eem	
Saale	
MaadeGroup_deforme	
MaadeGroup	
Odderup_S3	
Arnum_L3	
Odderup_S2	
Arnum_L2	
Klintinghoved_Clay_Upper_10	

Color	Text
Purple	Klintinghoved_Clay_Upper_10
Bastrup_Sand	
Klintinghoved_Clay_Lower_9	
Paleogene_Clay	
Danian_Limestone	
Quaternary_Sand	
Quaternary_Clay	
Uncertainty_little	
Uncertainty_medium	
Uncertainty_high	
Uncertainty_indefinite	
Abild_Valley_Sand	
Abild_Valley_Clay	
Hoejer_Valley_Sand	
Hoejer_Valley_Clay	
Toender_Jejs_Valley_Sand	
Toender_Jejs_Valley_Clay	
MoegelToender_Valley_Sand	
MoegelToender_Valley_Clay	
LoegumKloster1_Valley_Sand	
Toender_Jejs_Valley_Sand_Upper	
Eem_deposits	
QuaternarySediments_Saltwater	
Q_MC	
Sand and clay (Empty voxel fill)	
Moegeltoender_Valley_Upper_Sand	

Bilag 1: Symbolliste, voxelmodel

Enhed	Lag - navn	Value	Farvekode	Flade	Tabelnavn i ToenderXYZ.mdb
Post Saale	Postglacial	571	pink	Terræn	Terræn*
	Sandur	572	yellow	Bund af Postglacial	Postglacial_bottom
Moræneler	Bylderup_Bov ML	622	dark brown	Top af moræneler ved Bylderup-Bov	Q_Clay_Top
				Bund af moræneler ved Bylderup-Bov	Q_Clay_Bottom
Glacialektonisk kompleks	SSV, SGeMS			Bund af Sandur** eller terræn	
				Top af Måde Gruppen inkl. øvre def.***	TopMaadeGroup_ink_deforme_ovre_lag
Prækvarter	Måde Gruppen, øv. def.	586	blue	Top af Måde Gruppen inkl. øvre def.	TopMaadeGroup_ink_deforme_ovre_lag
	Måde Gruppen	576	blue	Top af Måde Gruppen	TopMaadeGroup
				Basal decollement-flade	GlacTek_seismikprofiler
				MRS Odderup	MRS_Odderup
	Odderup Sand 3	577	cyan	Top af Odderup Sand 3	ODS3
	Arnum Ler 3	578	purple	Top af Arnum Ler 3	ARL3
	Odderup Sand 2	579	light blue	Top af Odderup Sand 2	ODS2
	Arnum Ler 2	580	purple	Top af Arnum Ler 2	ARL2
	Klintinghoved 10	585	light purple	Top af Klintinghoved 10	KRL10
	Bastrup Sand	581	light purple	Top af Bastrup Sand	BADS9
	Klintinghoved 9	582	light purple	Top af Klintinghoved 9	KRL9
	Palæogen	583	blue	Top af Palæogen	TopPal
	Kridt	584	green	Top af Kridt	TopChalk
	Saltvandsgrænsning				
				Salt1	

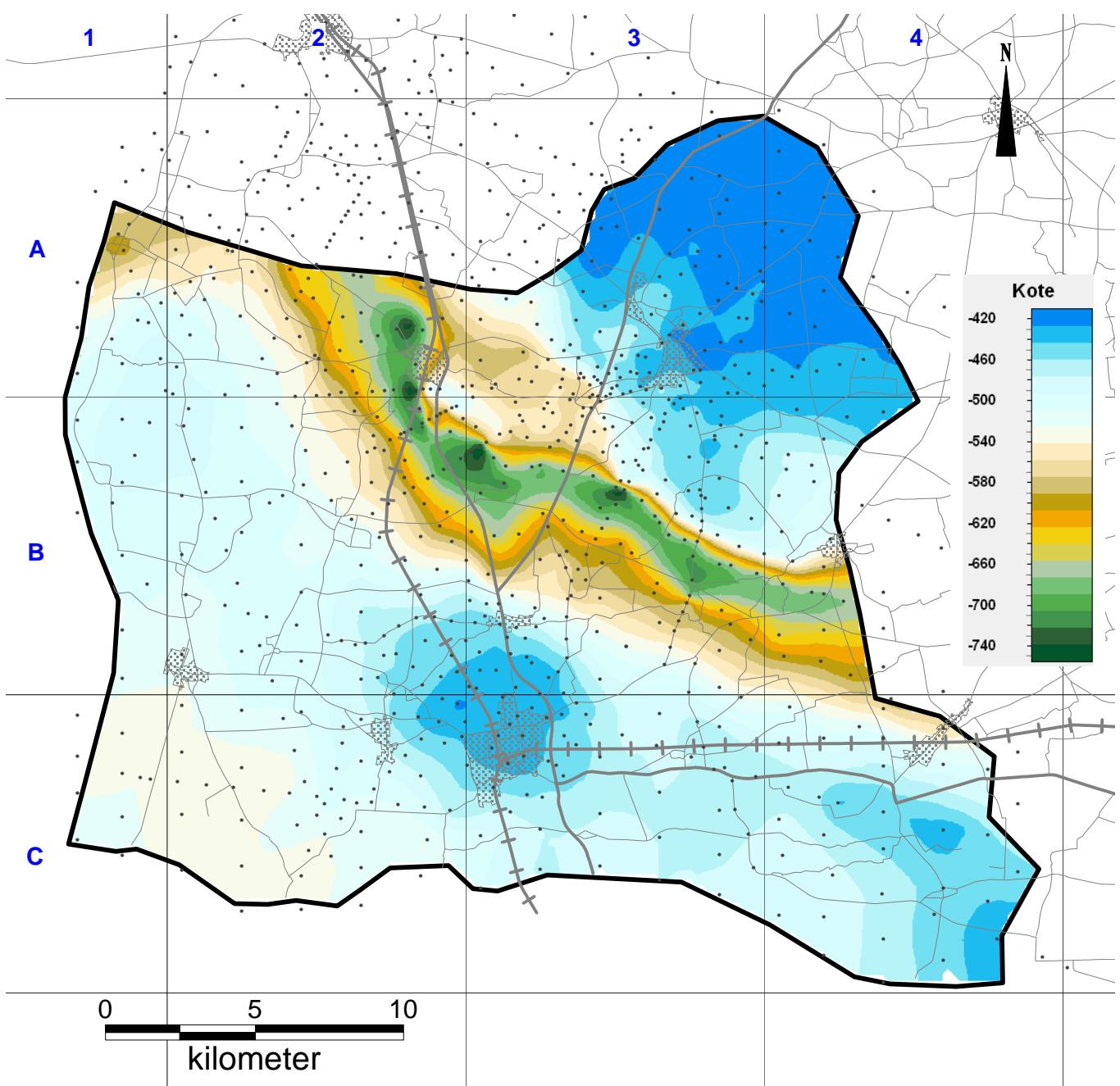
* Terræn findes ikke i ToenderXYZ.mdb

** Også bund af dale hvor dannelsen fyld er overskrevet

*** Også top af dalfyld hvor dette er overskrevet

Enhed	Lag - navn	Value	Farvekode	Flade	Tabelnavn i ToenderXYZ.mdb	Generation
Tønder-Jejsing-dalen	Tønder-Jejsing Eem	574	olive green	Top af Eem i Tønder-Jejsing-dalen	Tønder_Jejs_Eem_top	
	Sandur	572	yellow	Bund af Eem i Tønder-Jejsing-dalen	Eemian_bottom	
	Tønder-Jejsing Sand	599	orange	Bund af Sandur	Sandur_Bottom	3
	Tønder-Jejsing Ler	595	brown	Top af lerlag i Tønder-Jejsing-dalen	Tønder_Jejs_clay_top	
				Bund af Tønder-Jejsing-dalen	RIB40_Toender_Jejs_dalbund	
Løgumkloster 1-dalen	Løgumkloster 1 sand	598	red	Top af sand i Løgumkloster 1-dalen	Løgumkloster1_Top	3
				Bund af Løgumkloster 1-dalen	RIB41_Loegumkl_1_dalbund	
Lydersholm-dalen	SSV	flere	red	Terræn	Terræn*	2
				Bund af Lydersholm-dalen	RIB42_Lydersholm_dalbund	
Højer-dalen	Højer Ler	592	brown	Top af ler i Højer-dalen	Højer_clay_top	
	Højer Sand	593	red	Bund af ler i Højer-dalen	Højer_clay_bottom	2
				Bund af Højer-dalen	RIB29_Hoejer_dalbund	
Abild-dalen	Abild Ler	591	brown	Top af ler i Abild-dalen	Abild_clay01_top	
	Abild Sand	590	red	Bund af ler i Abild-dalen	Abild_clay01_bottom	2
				Bund af Abild-dalen	RIB30_Abild_dalbund	
Løgumkloster 2-dalen	SSV	flere	red	Terræn	Terræn*	2
				Bund af Løgumkloster 2-dalen	RIB41_Loegumkl_2_dalbund	
Løgumkloster 3-dalen	SSV, SGeMS	flere	red	Terræn	Terræn*	1
				Bund af Løgumkloster 3-dalen	RIB41_Loegumkl_3_dalbund	
Møgeltønder-dalen	Møgeltønder øvre sand	625	pink	Bund af Sandur	Sandur_bottom	
	Møgeltønder ler	597	brown	Top af lerlag i Møgeltønder-dalen	Møgel_clay_top	1
	Møgeltønder nedre sand	596	red	Bund af lerlag i Møgeltønder-dalen	Møgel_clay_bottom	
				Bund af Møgeltønder-dalen	RIB43_Moegeltender_dalbund	

Bilag 2: Stratigrafisk skema

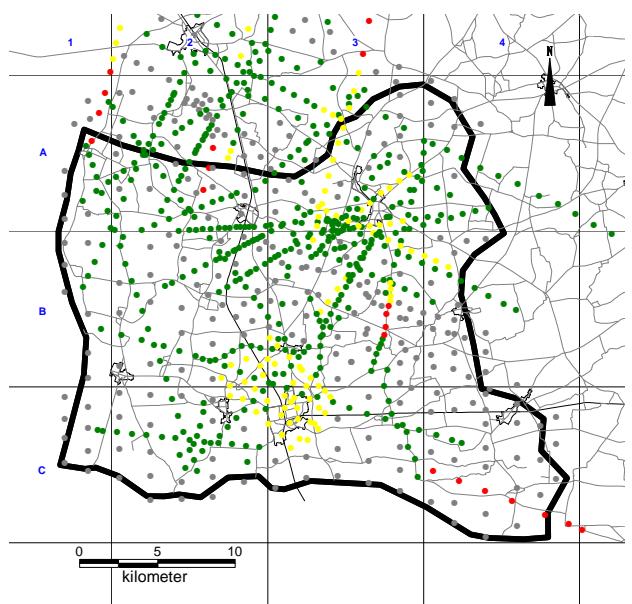


Tolkninger

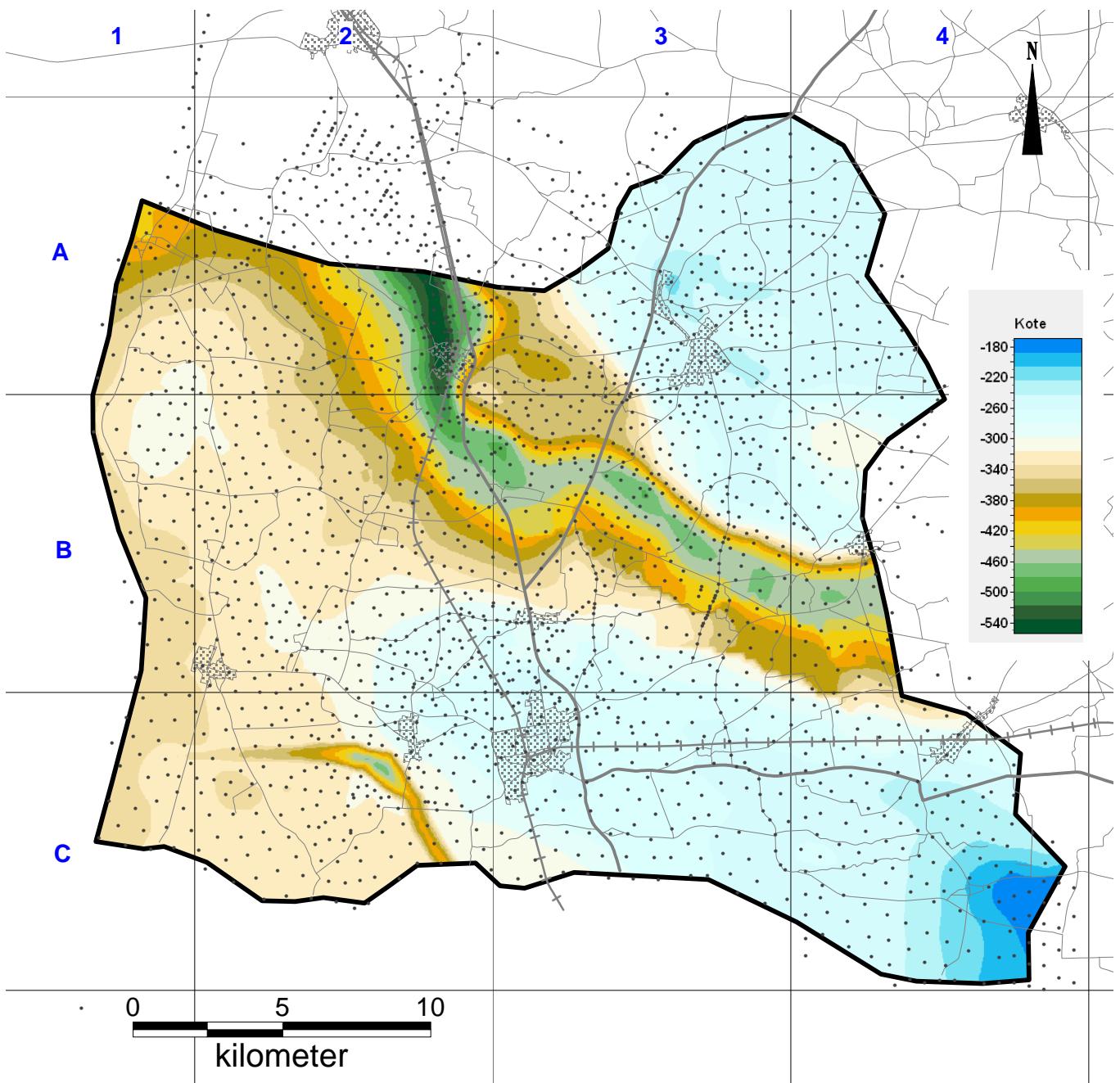
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- | | |
|------------------|-------|
| • 1 - Lille | (493) |
| • 2 - Moderat | (100) |
| • 3 - Stor | (22) |
| • 4 - Bedste gæt | (261) |



Bilag 3.1: Top Kalk

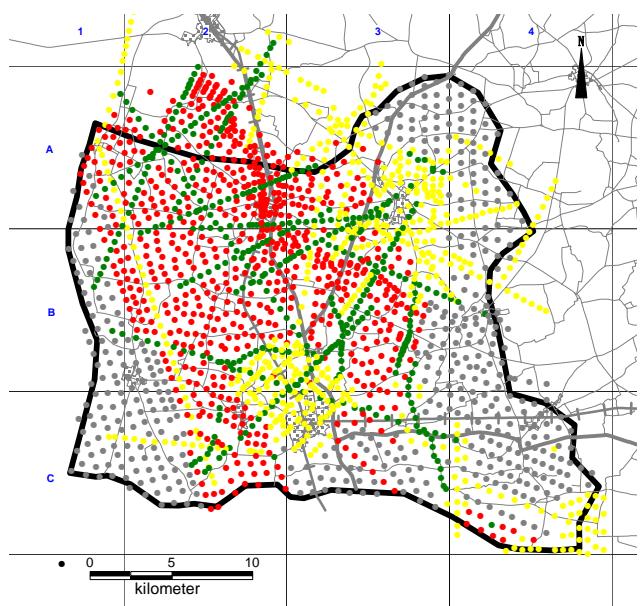


Tolkninger

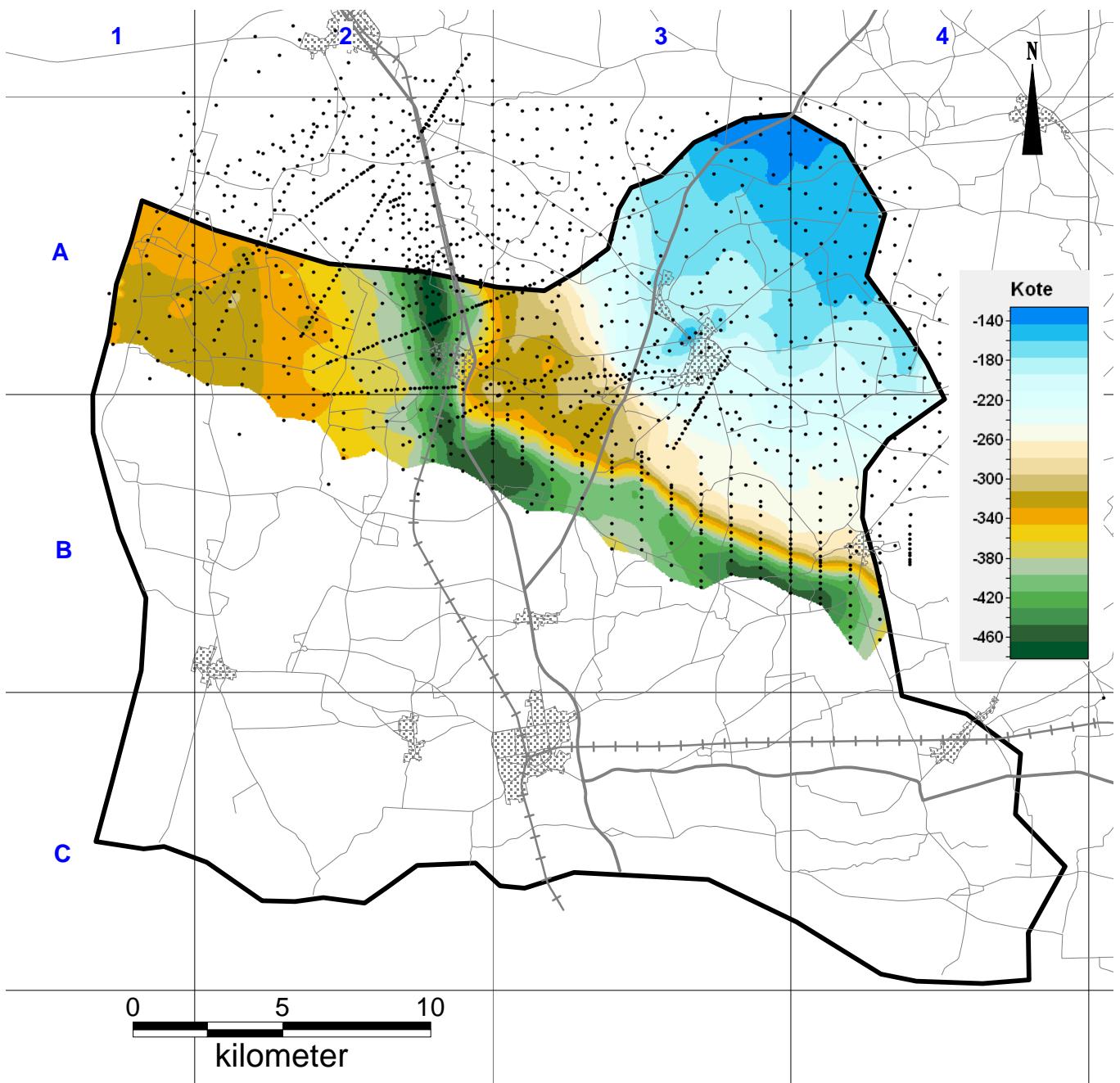
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret (1)
- 1 - Lille (428)
- 2 - Moderat (550)
- 3 - Stor (678)
- 4 - Bedste gæt (453)



Bilag 3.2 Top Paleogen

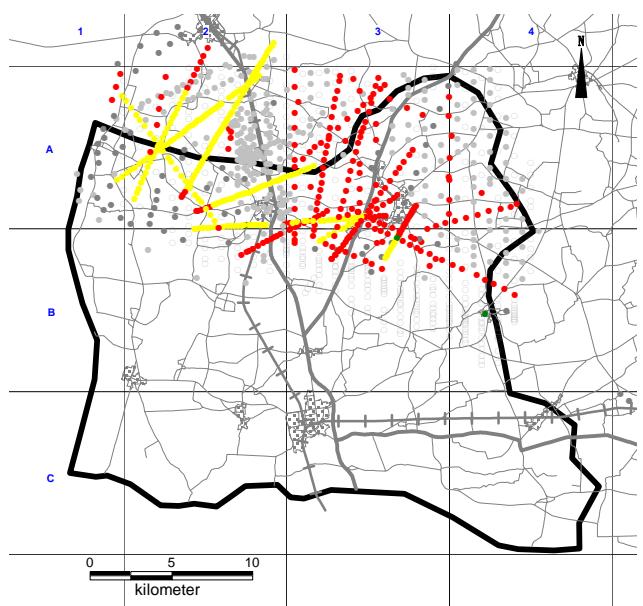


Tolkningspunkt

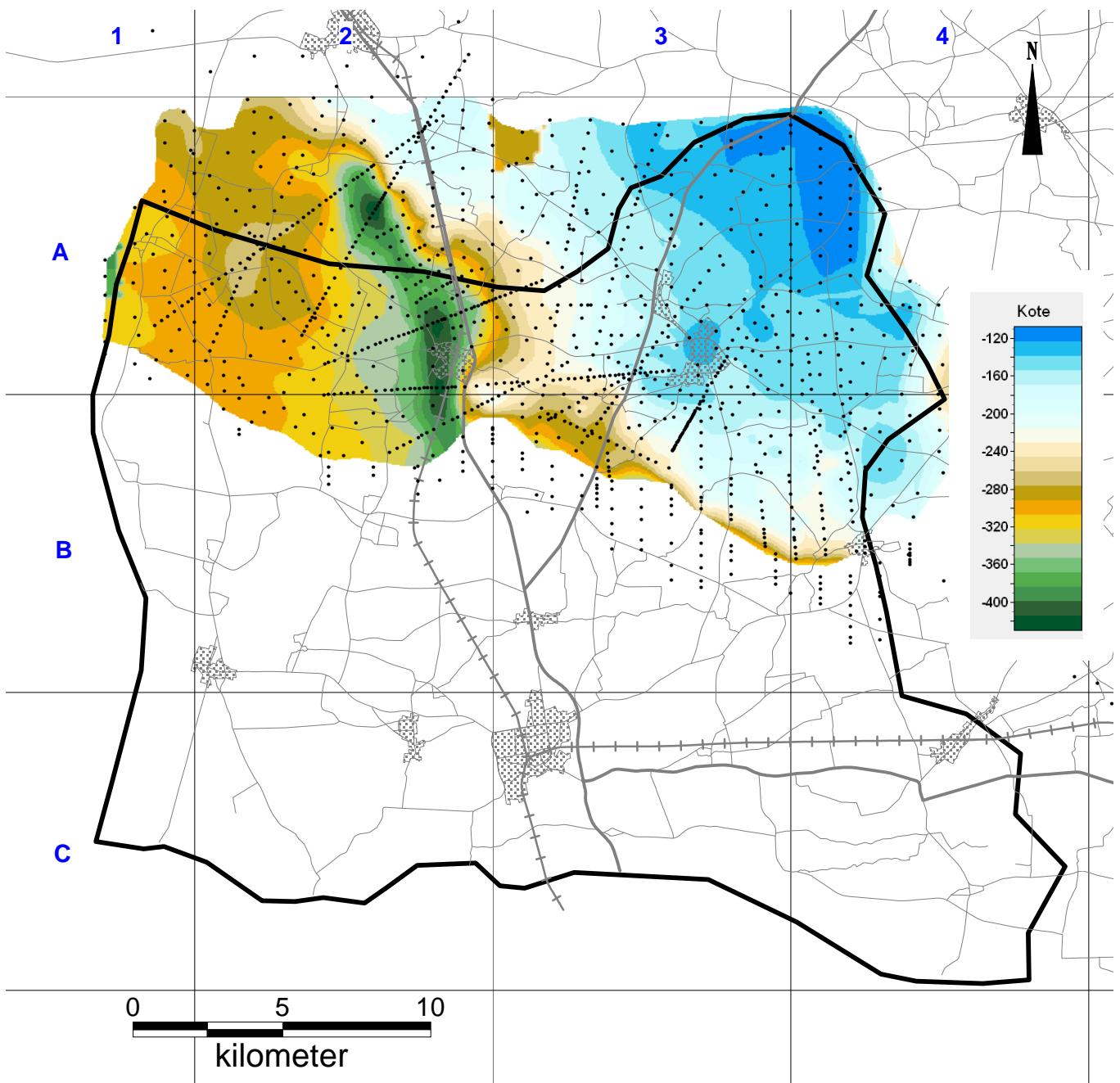
- Punkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.3: Top af Klintinghoved 9

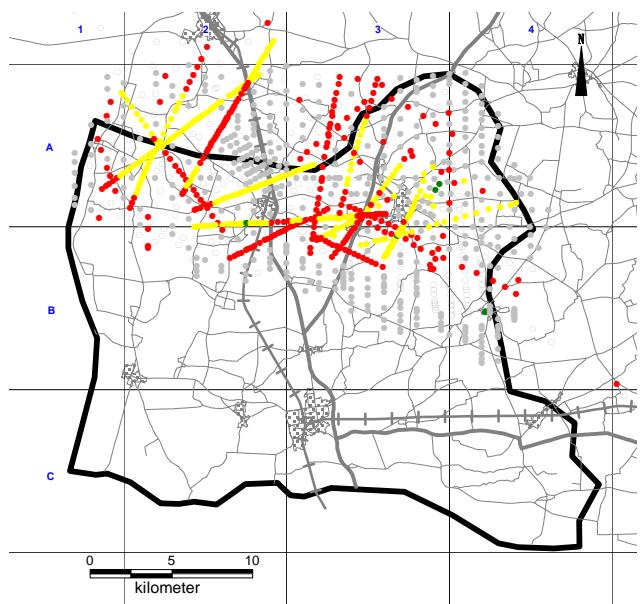


Tolkninger

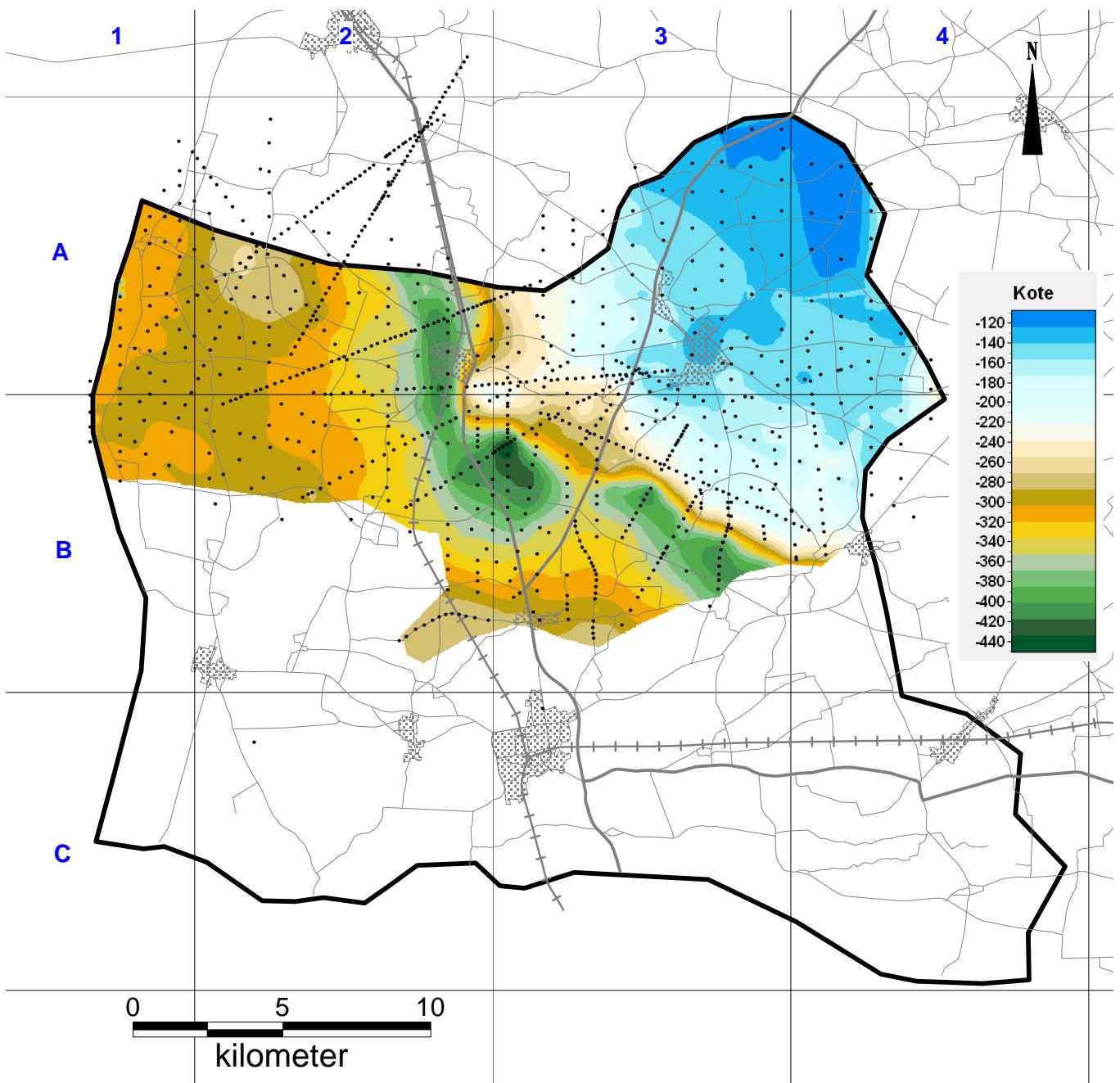
- Tolkningspunkter

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.4: Top af Bastrup Sand

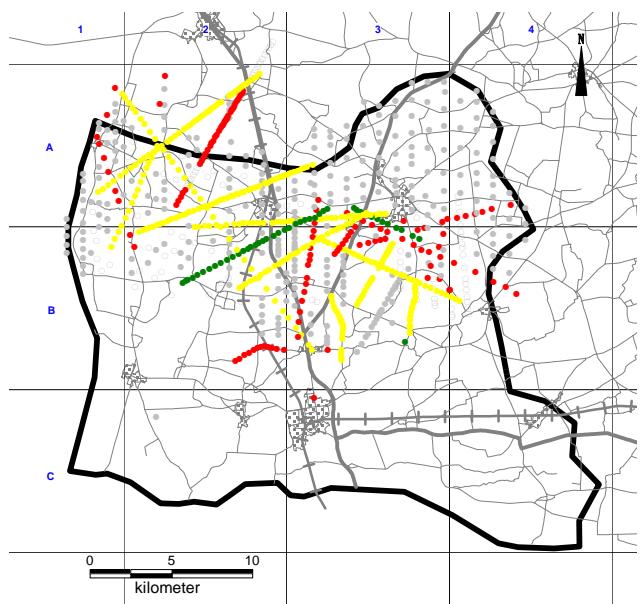


Tolknninger

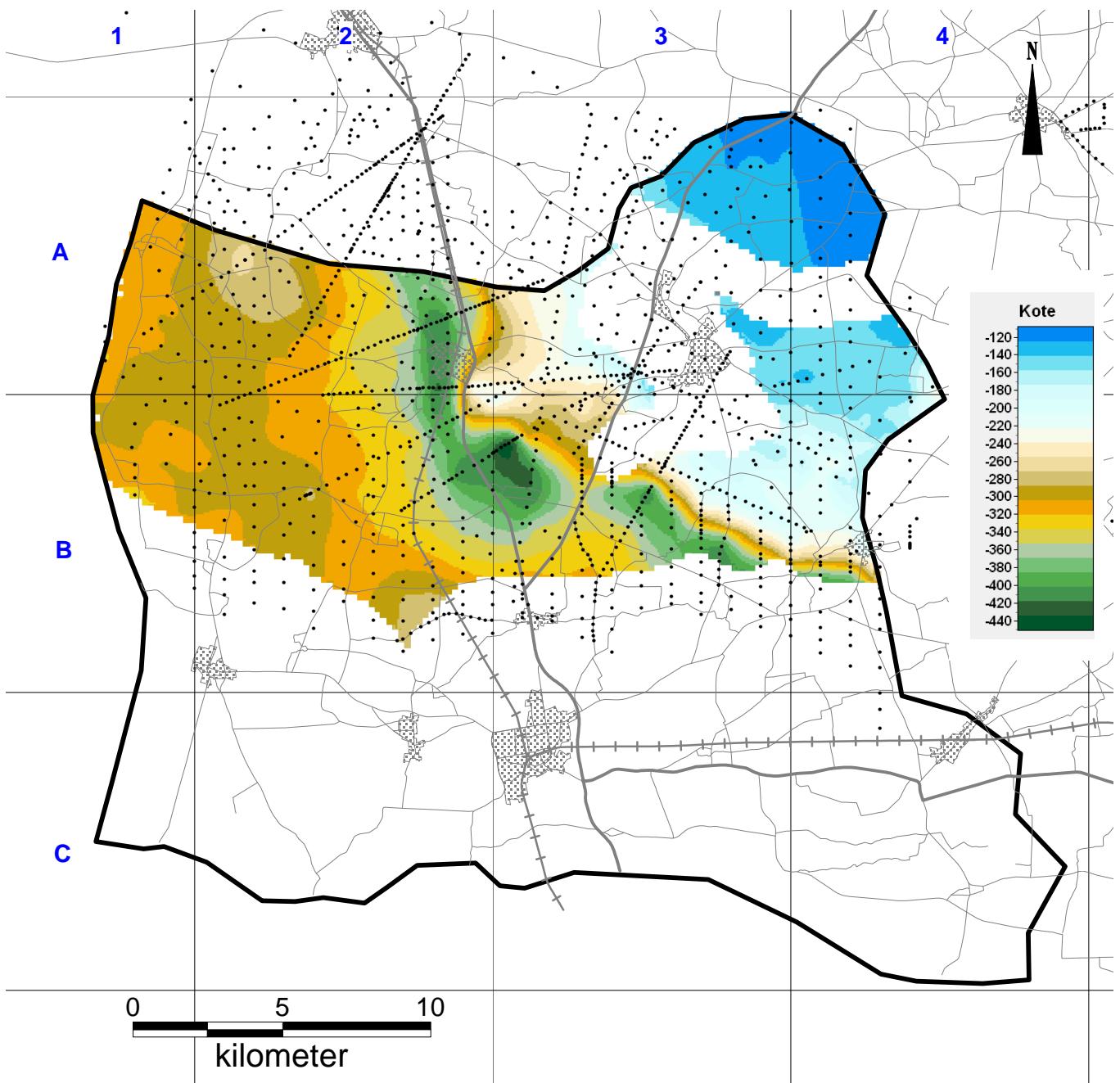
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.5: Top Klinting Hoved 10

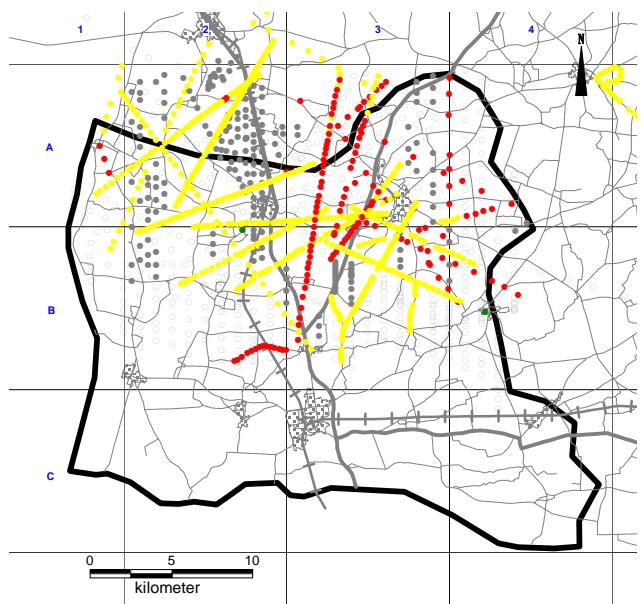


Tolkningsusikkerhed

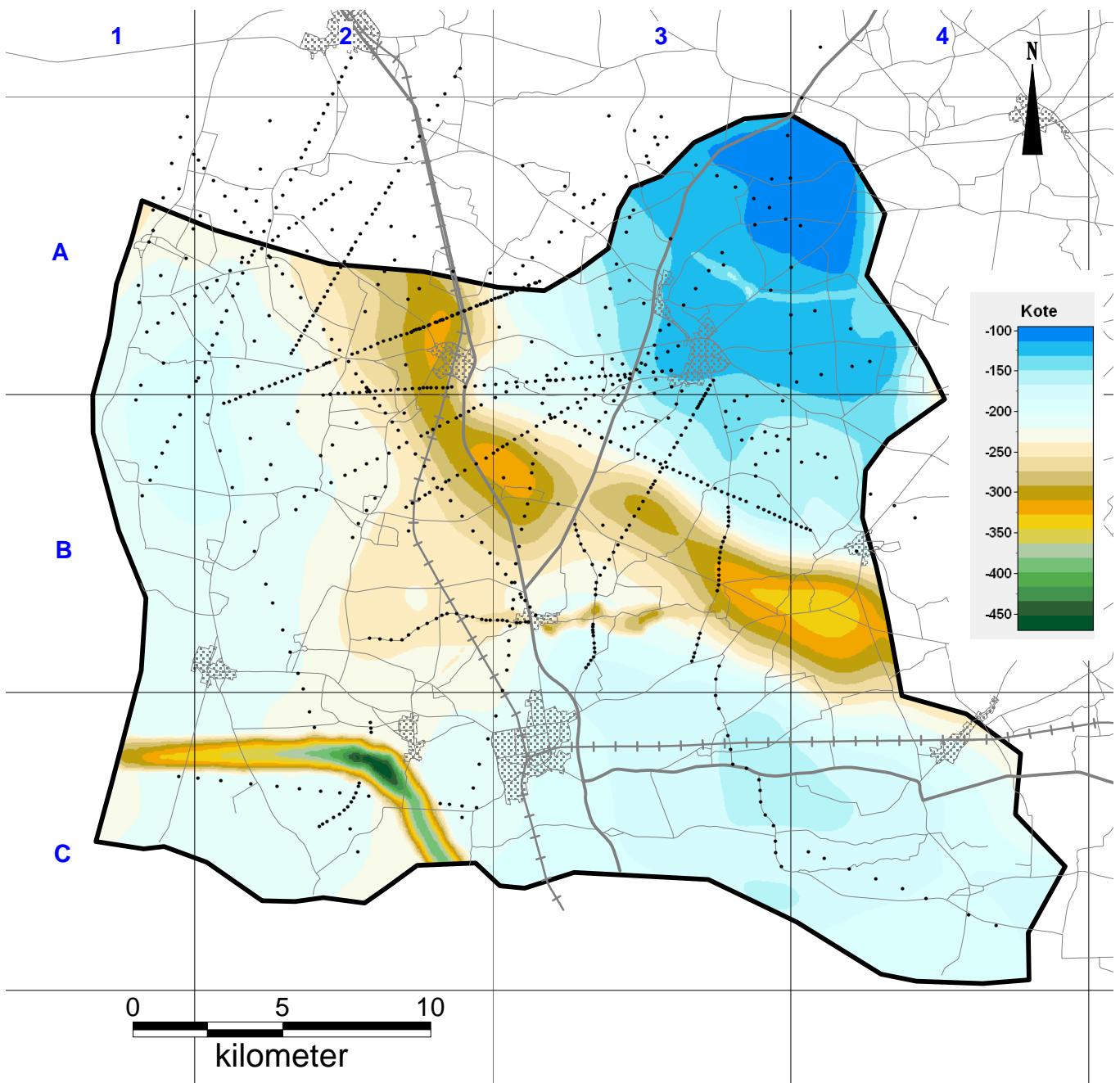
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.6: MRS Bastrup

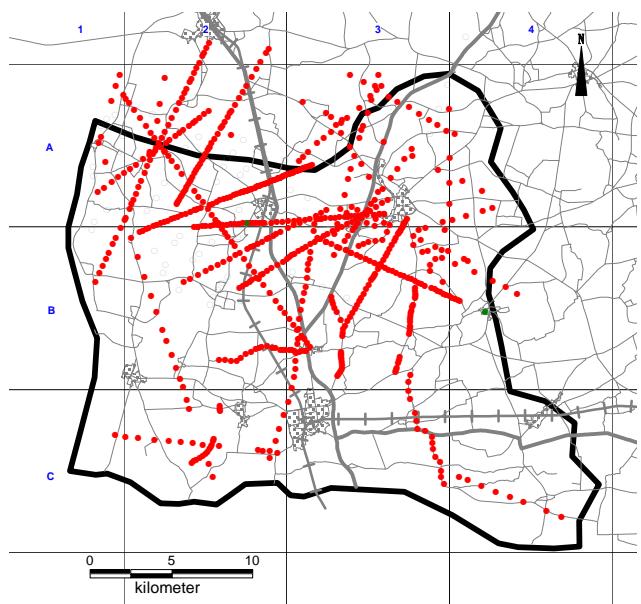


Tolkninger

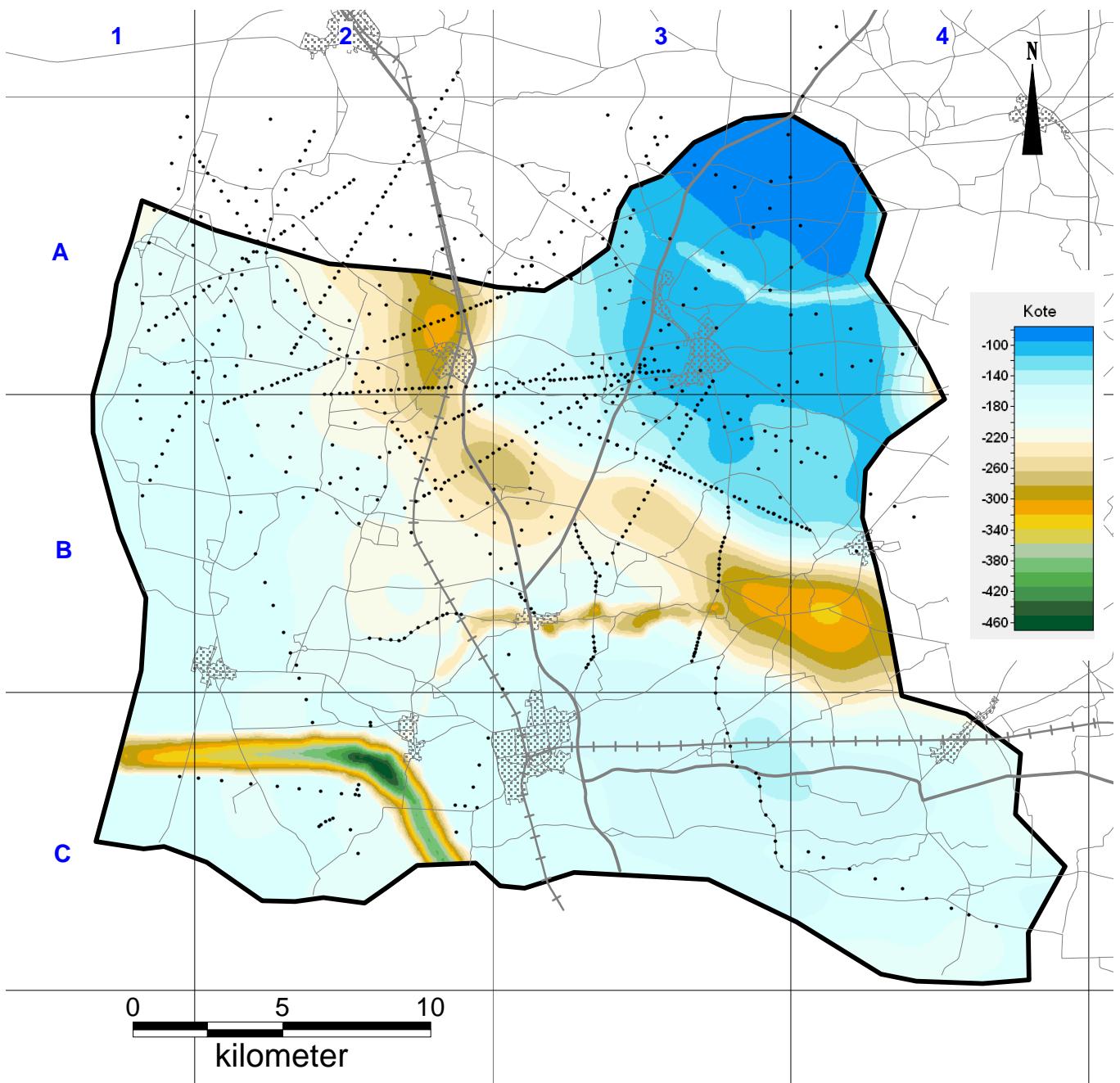
- Tolkningspunkter

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor



Bilag 3.7: Top af Arnum Ler 2

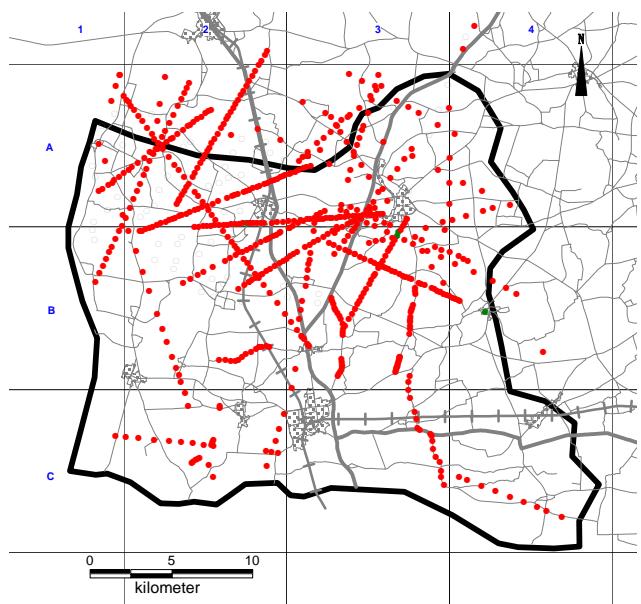


Tolkninger

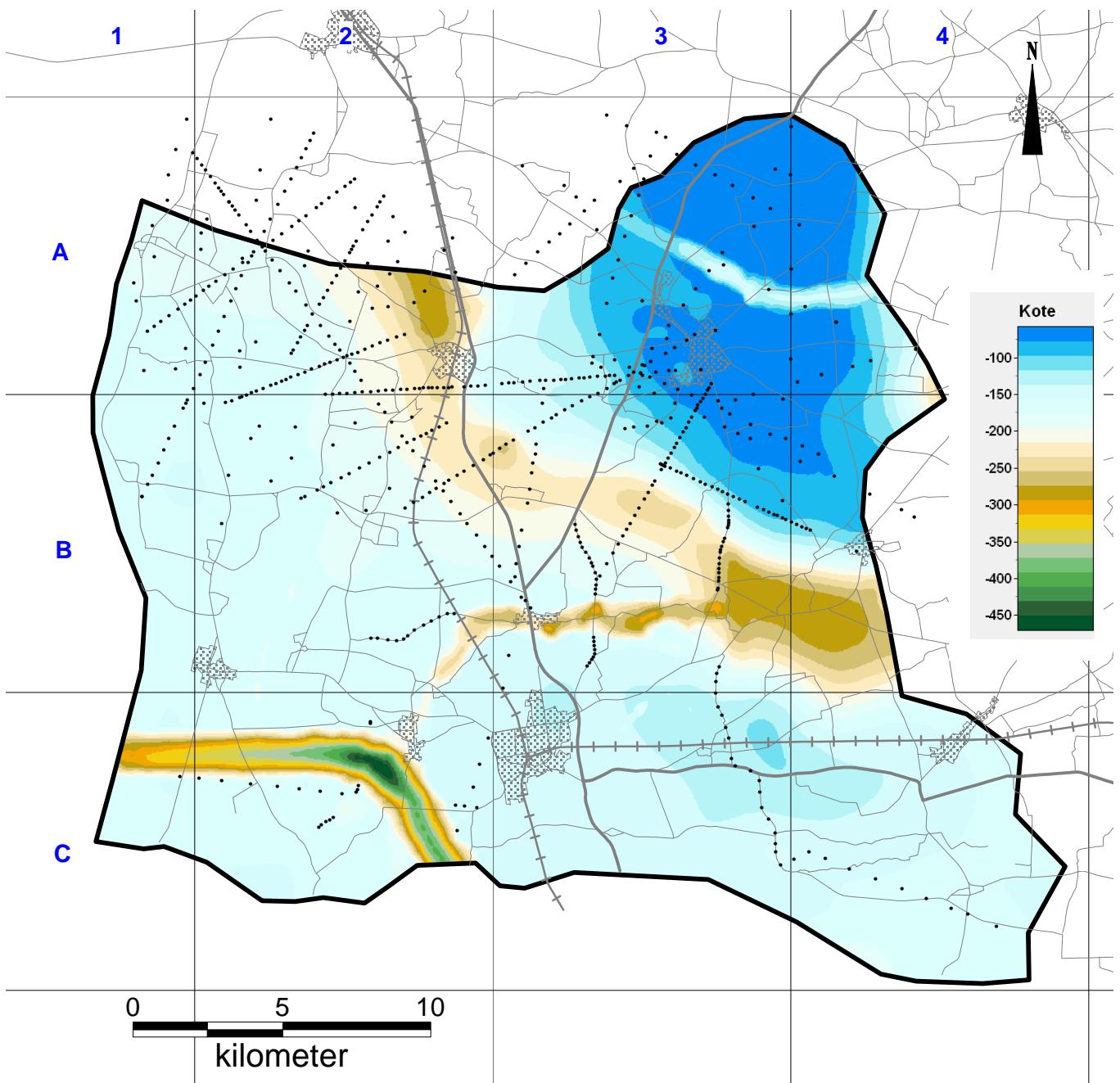
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor



Bilag 3.8: Top af Odderup Sand 2

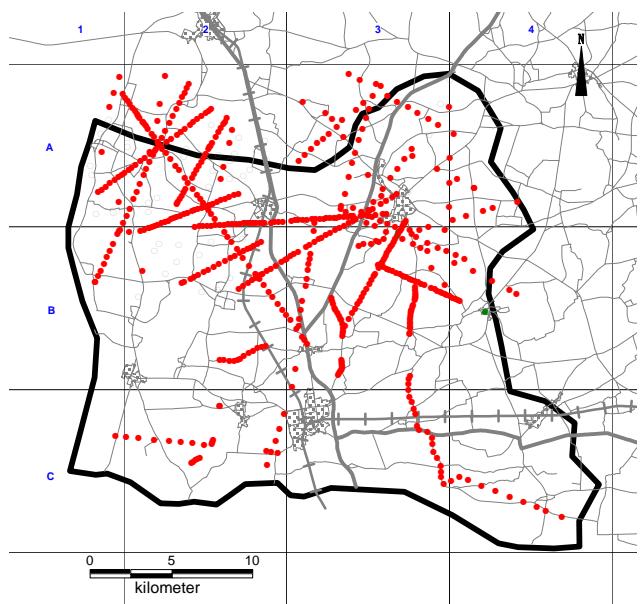


Tolkninger

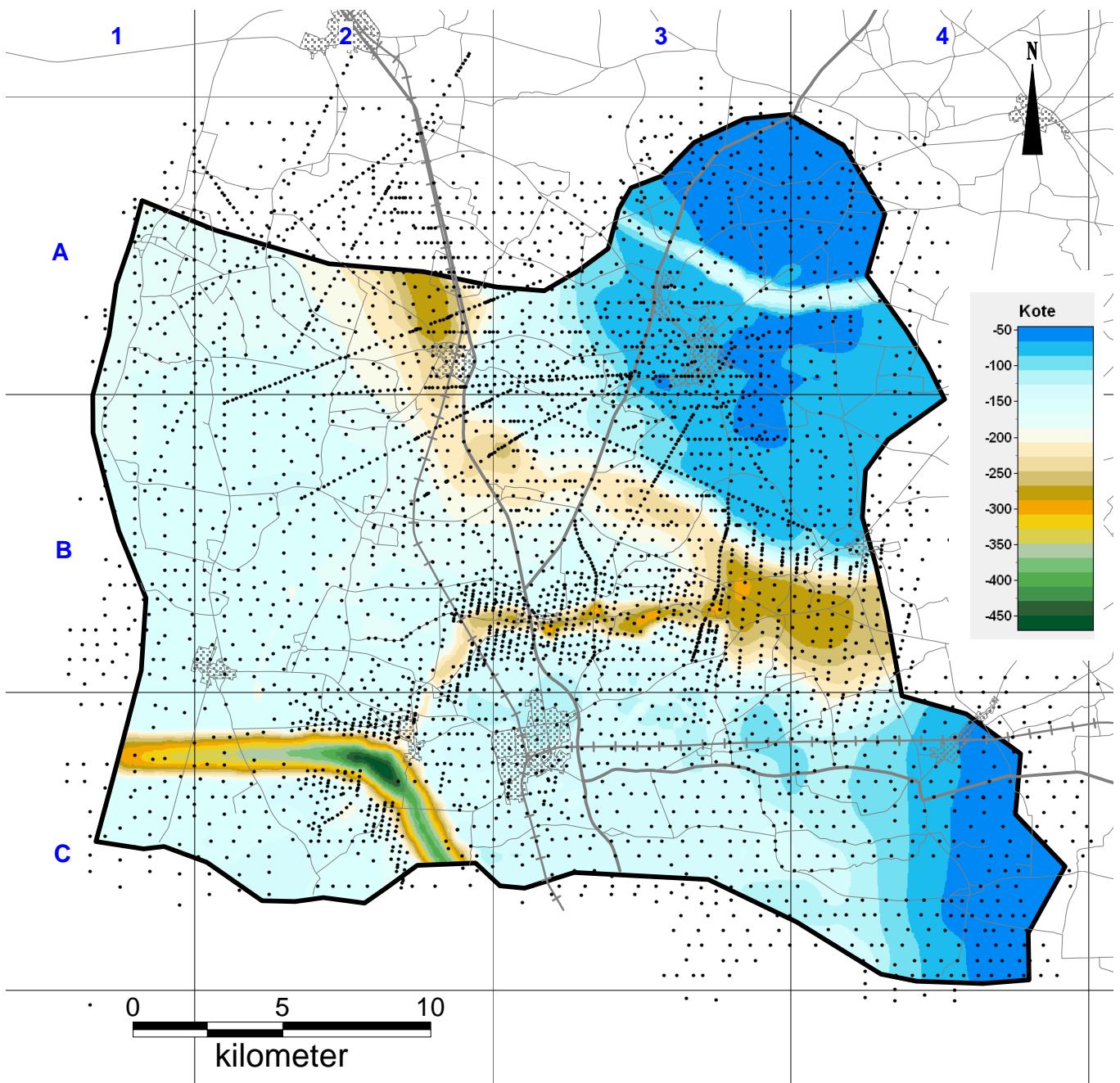
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor



Bilag 3.9: Top af Arnum Ler 3

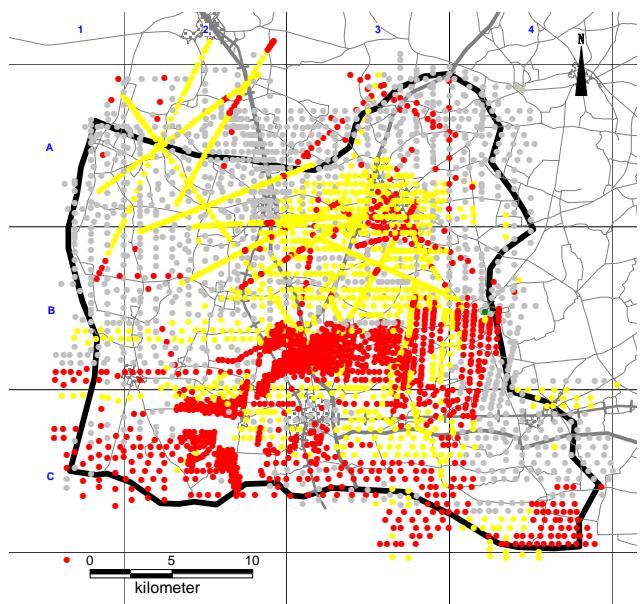


Tolkninger

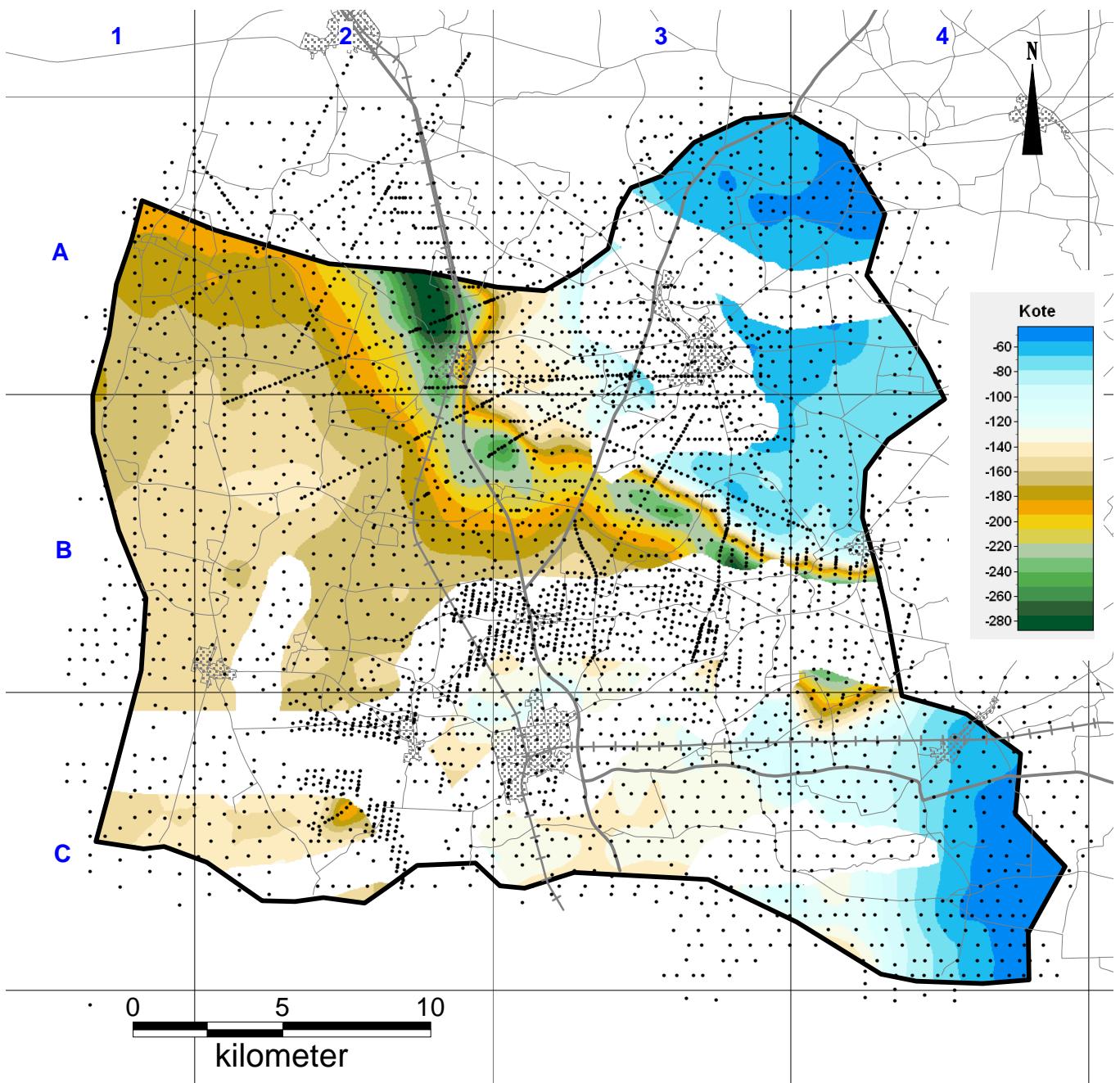
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.10: Top af Odderup Sand 3

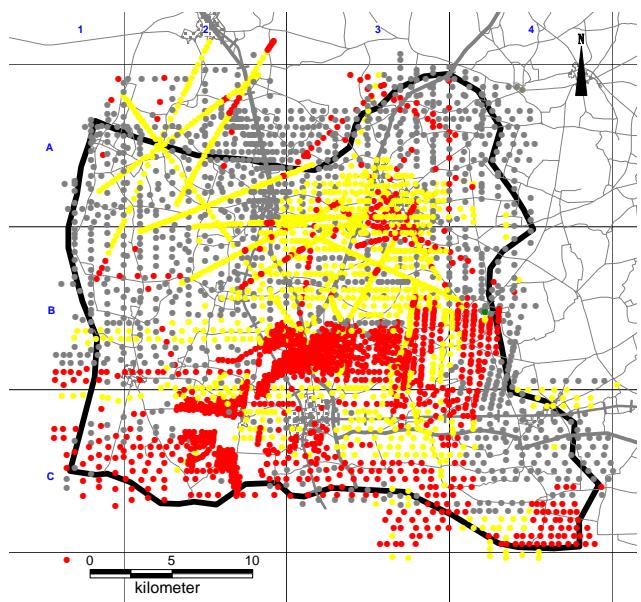


Tolkningsusikkerhed

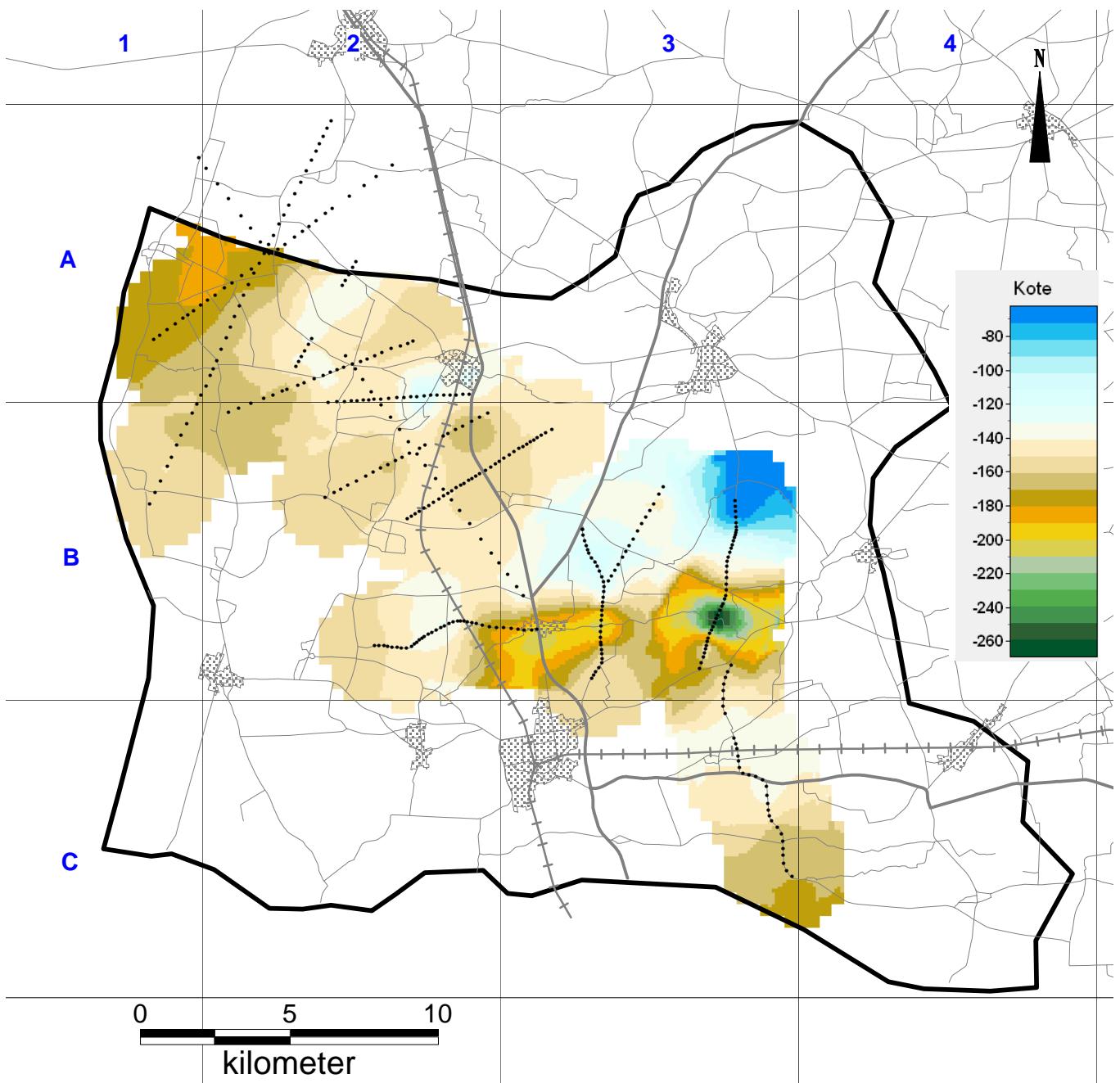
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.11: MRS Odderup

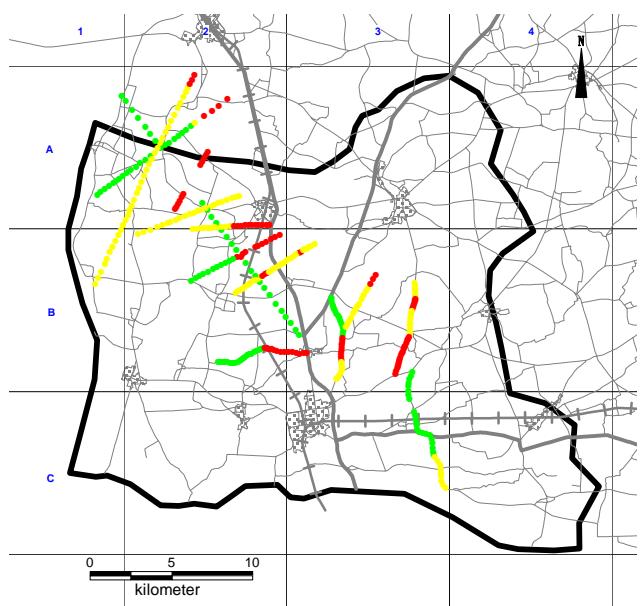


Tolkninger

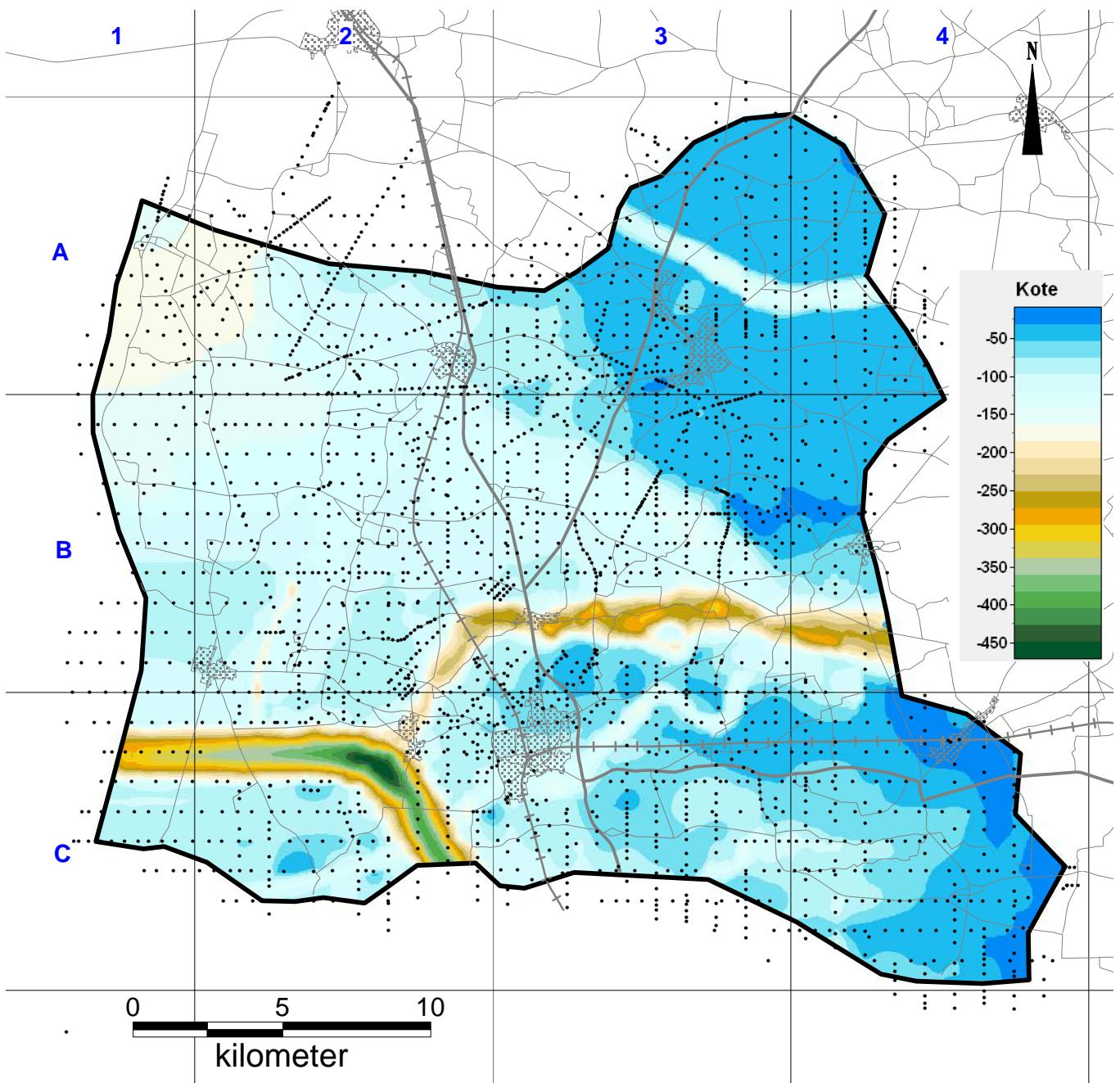
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor



Bilag 3.12: Basal decollementflade

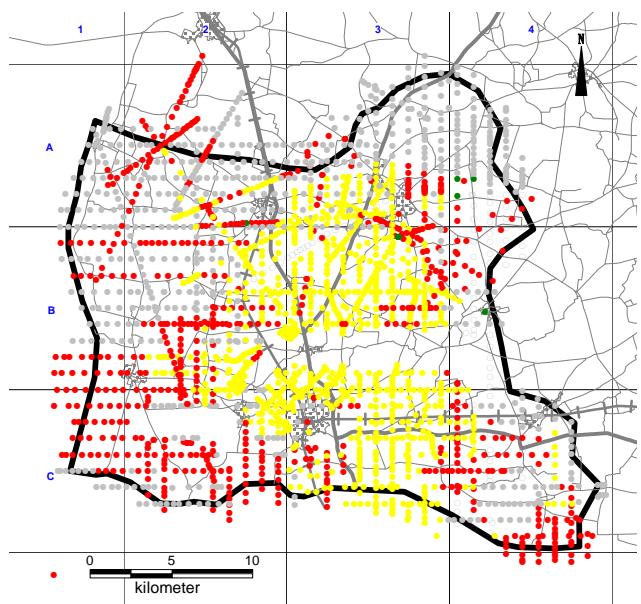


Tolkninger

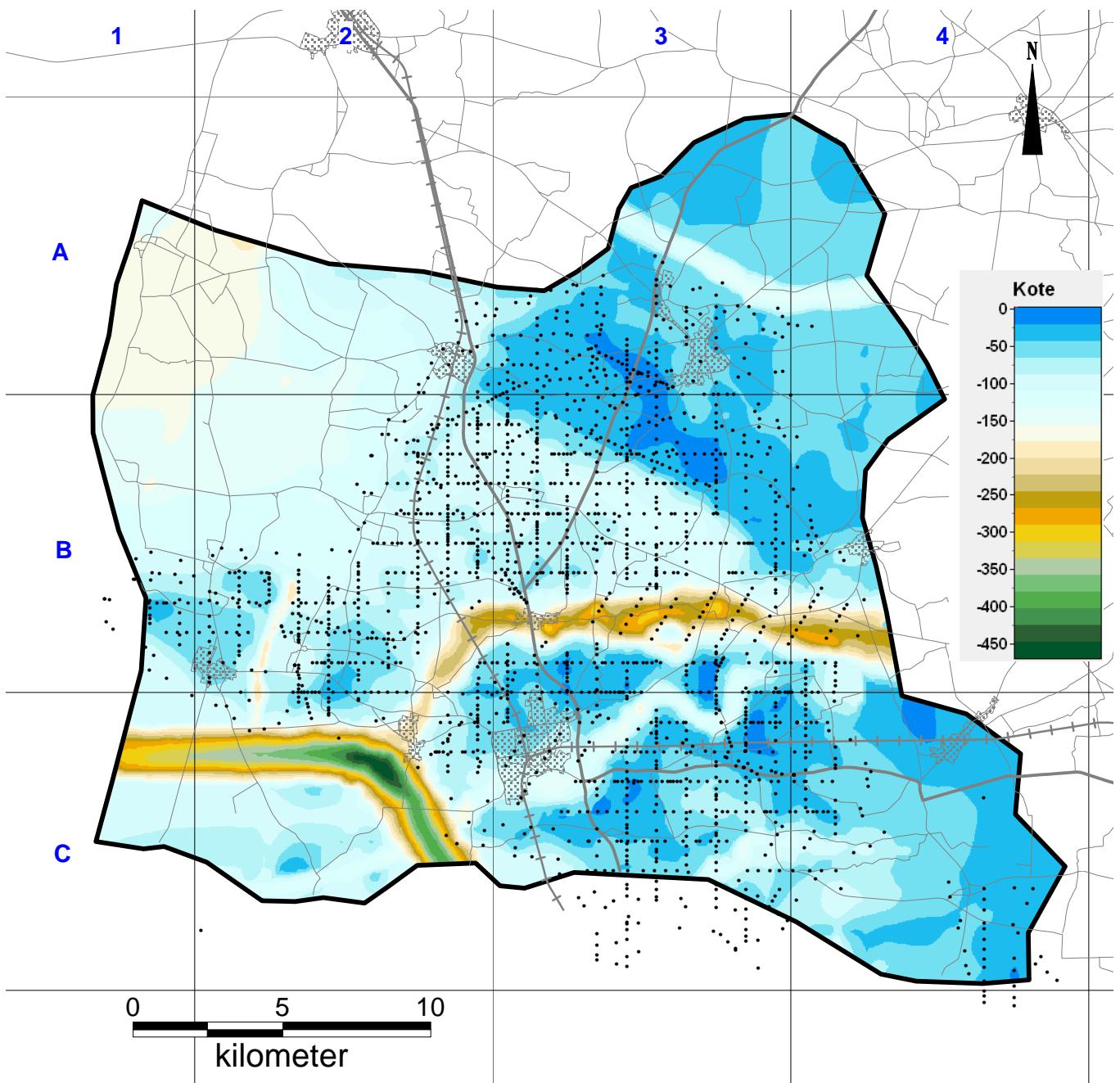
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



Bilag 3.13: Top af Måde Gruppe

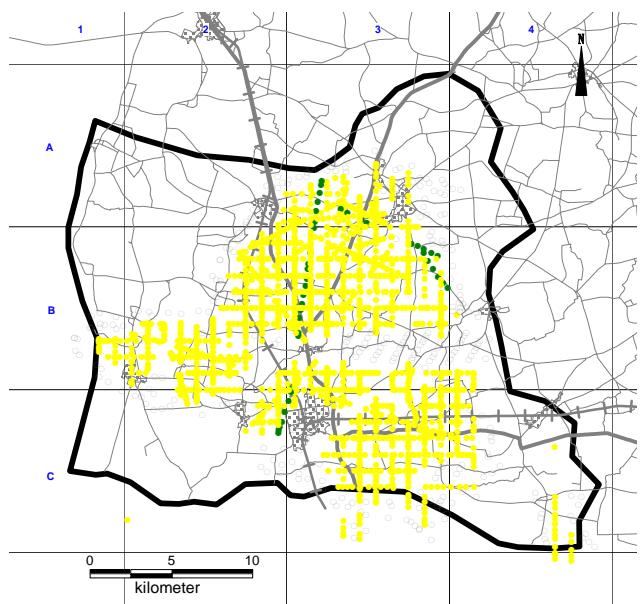


Tolkninger

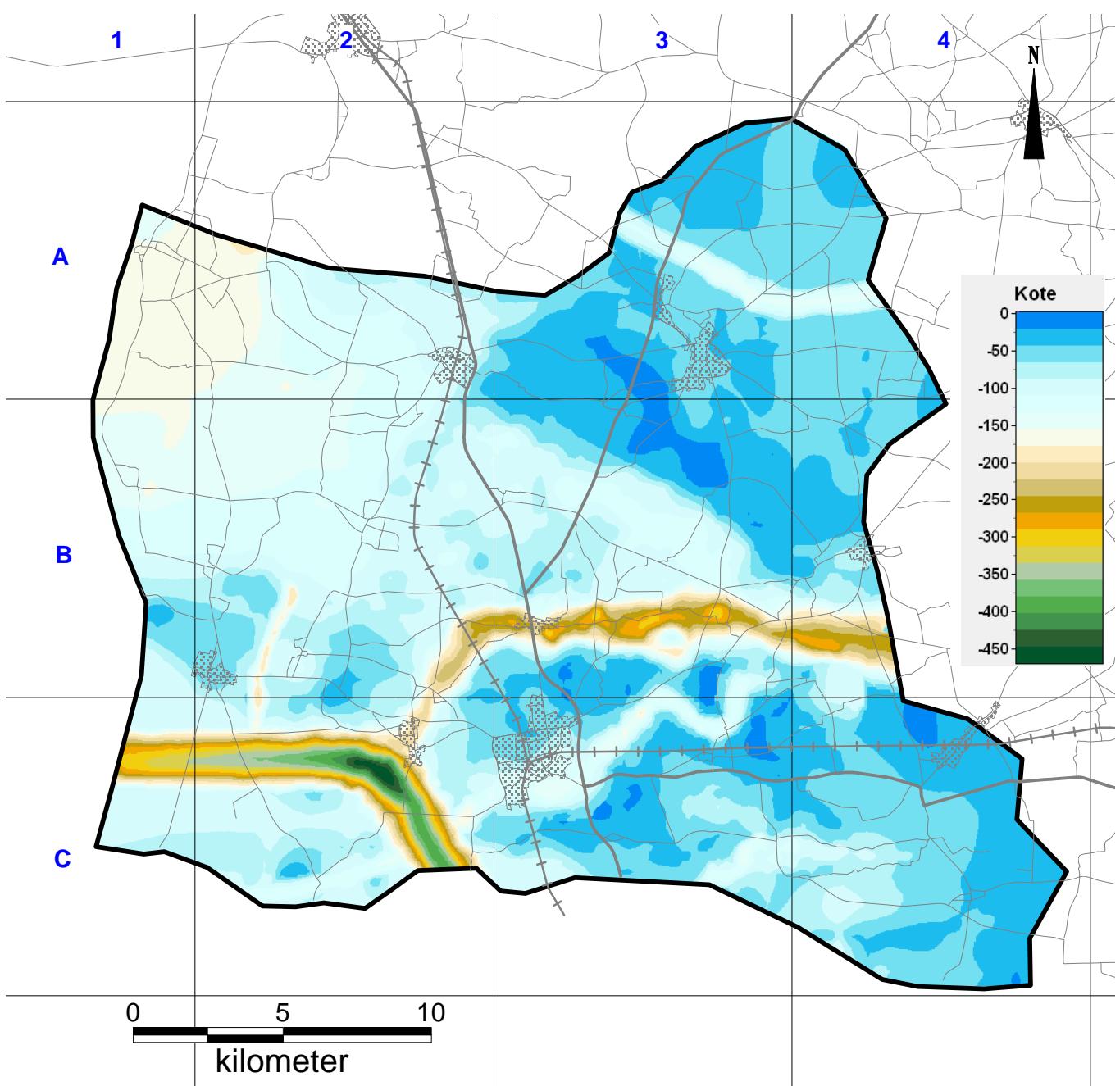
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

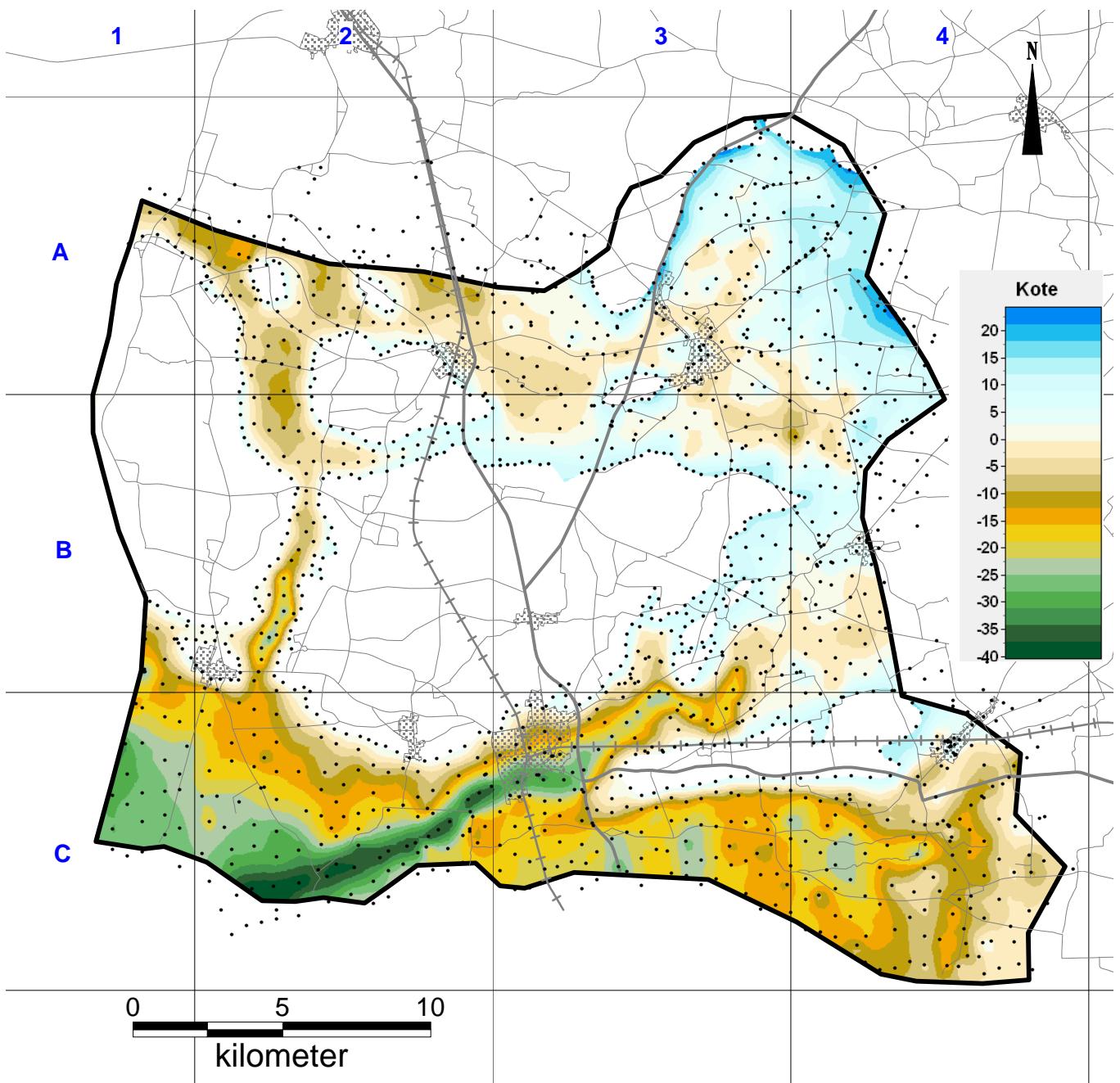
- 0 - Ikke kategoriseret
- 1 - Lille
- 2 - Moderat



Bilag 3.14: Top af Måde Gruppe deformert



Bilag 3.15: Prækvartæreoverfladen

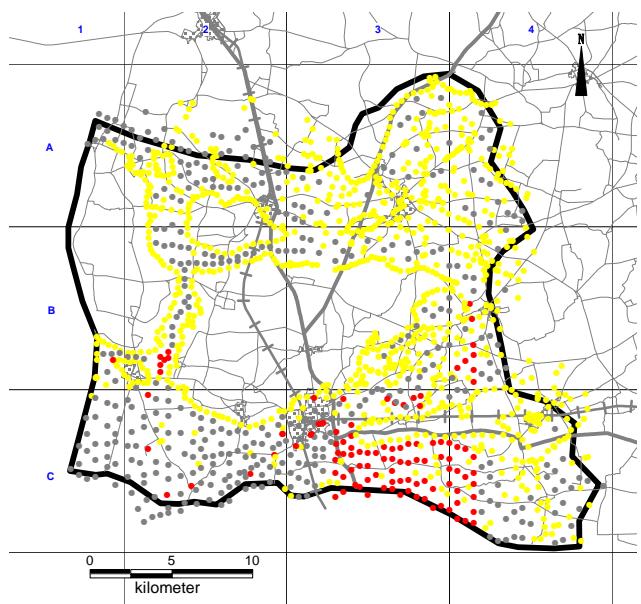


Tolkninger

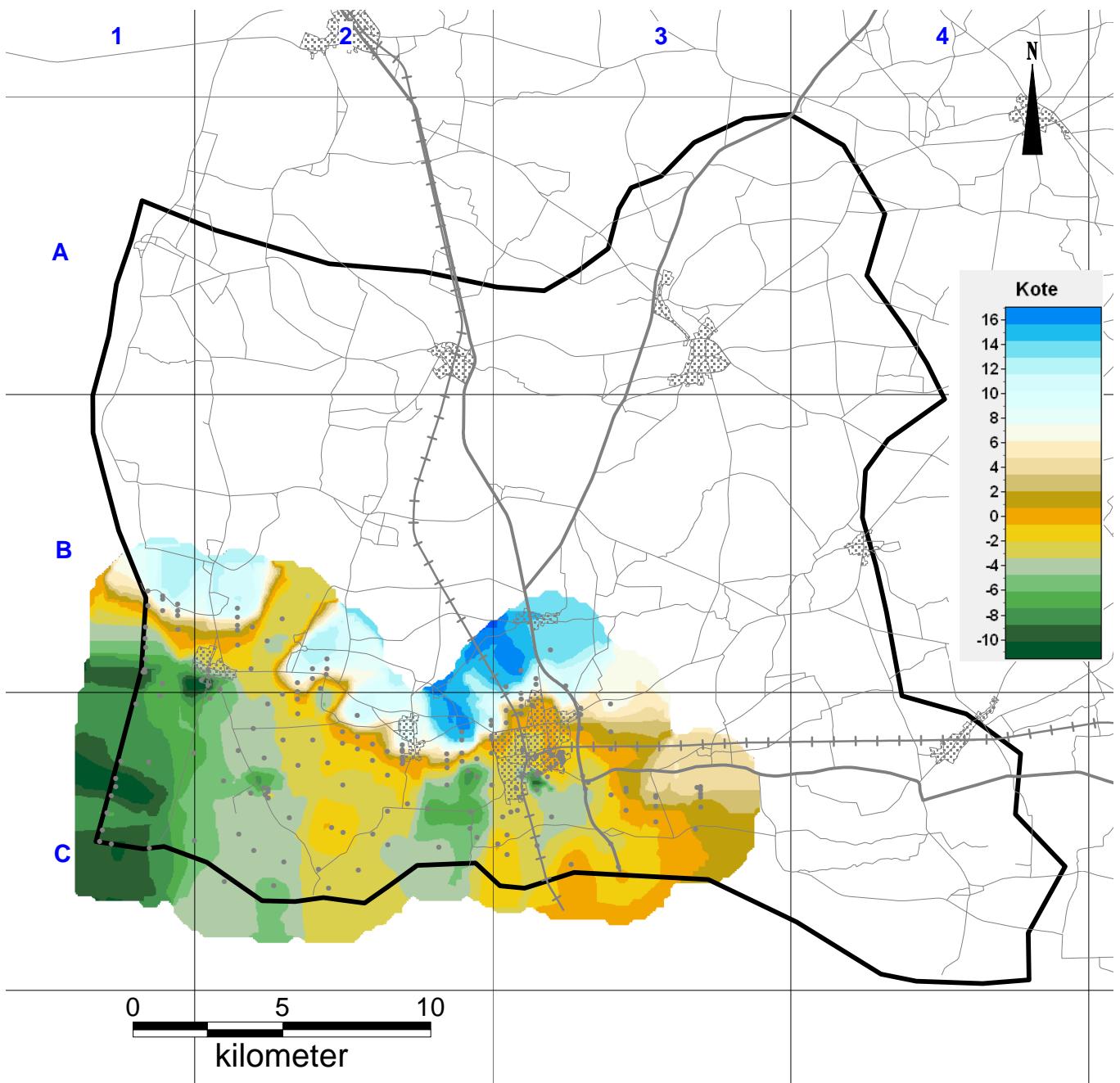
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 2 - Moderat
- 3 - Stor
- 4 - Bedste gæt



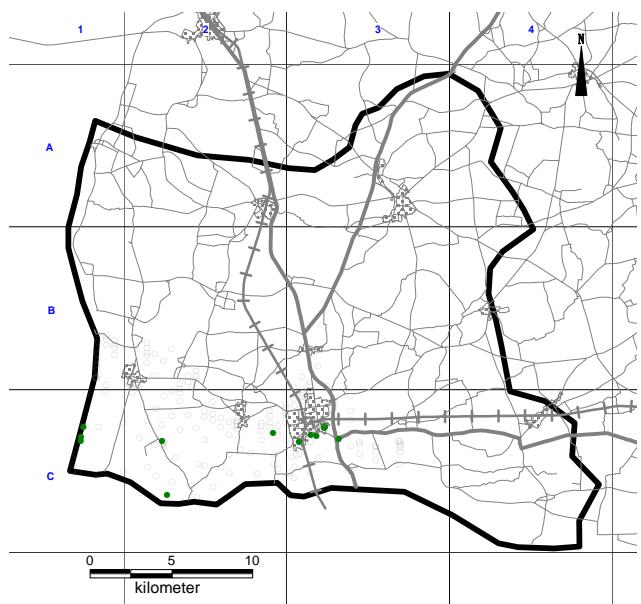
Bilag 3.16: Bund af hedeslette



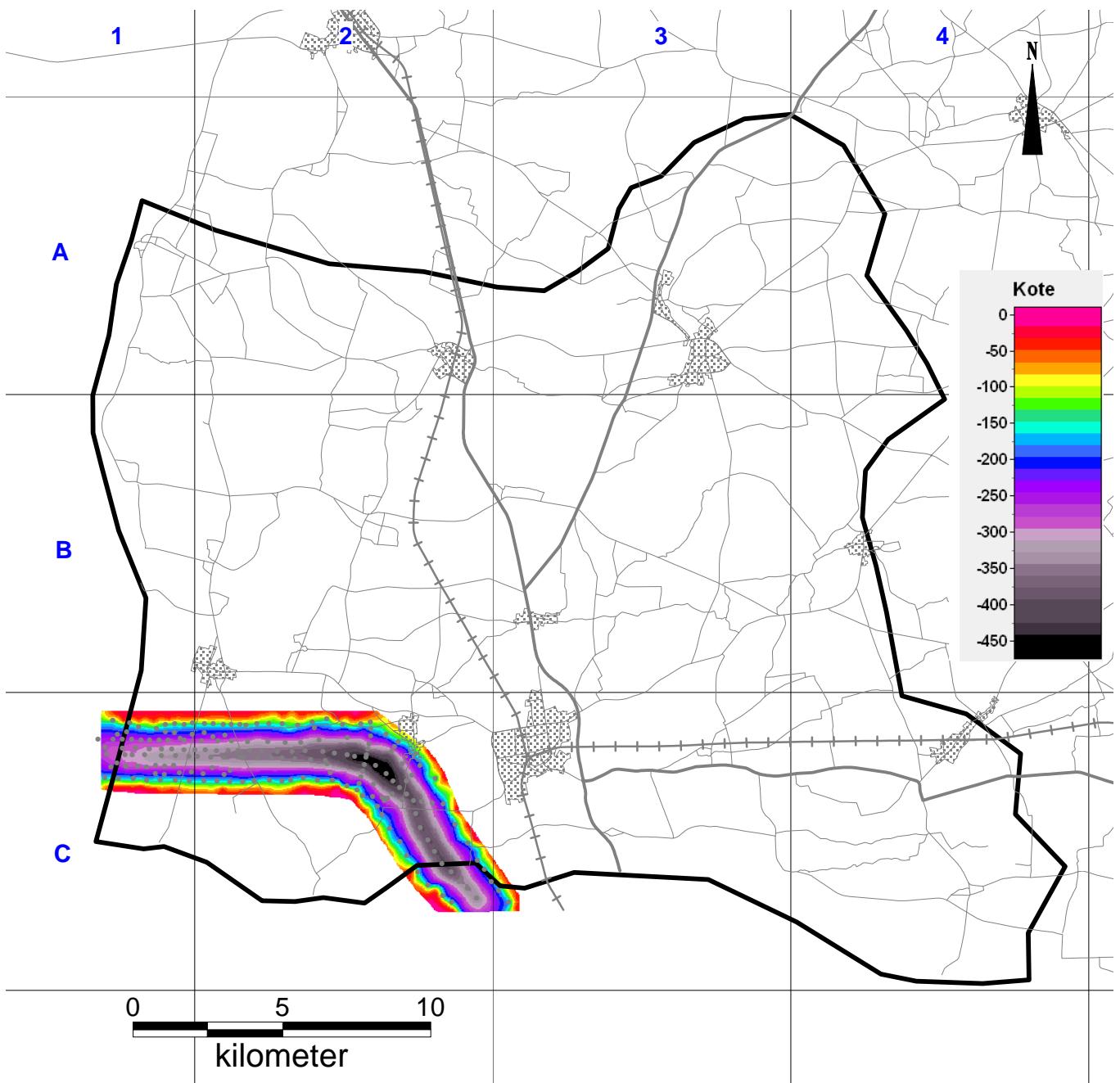
Tolknninger
• Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 0 - Ikke kategoriseret (186)
- 1 - Lille (14)



Bilag 3.17: Postglacial Bund

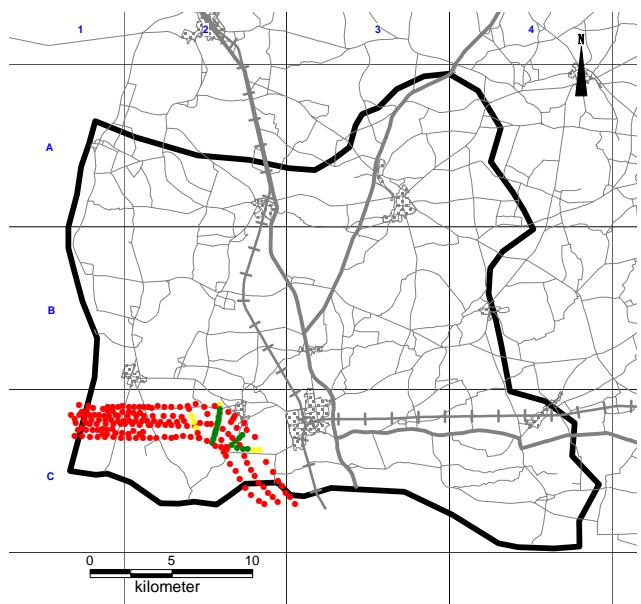


Tolkninger

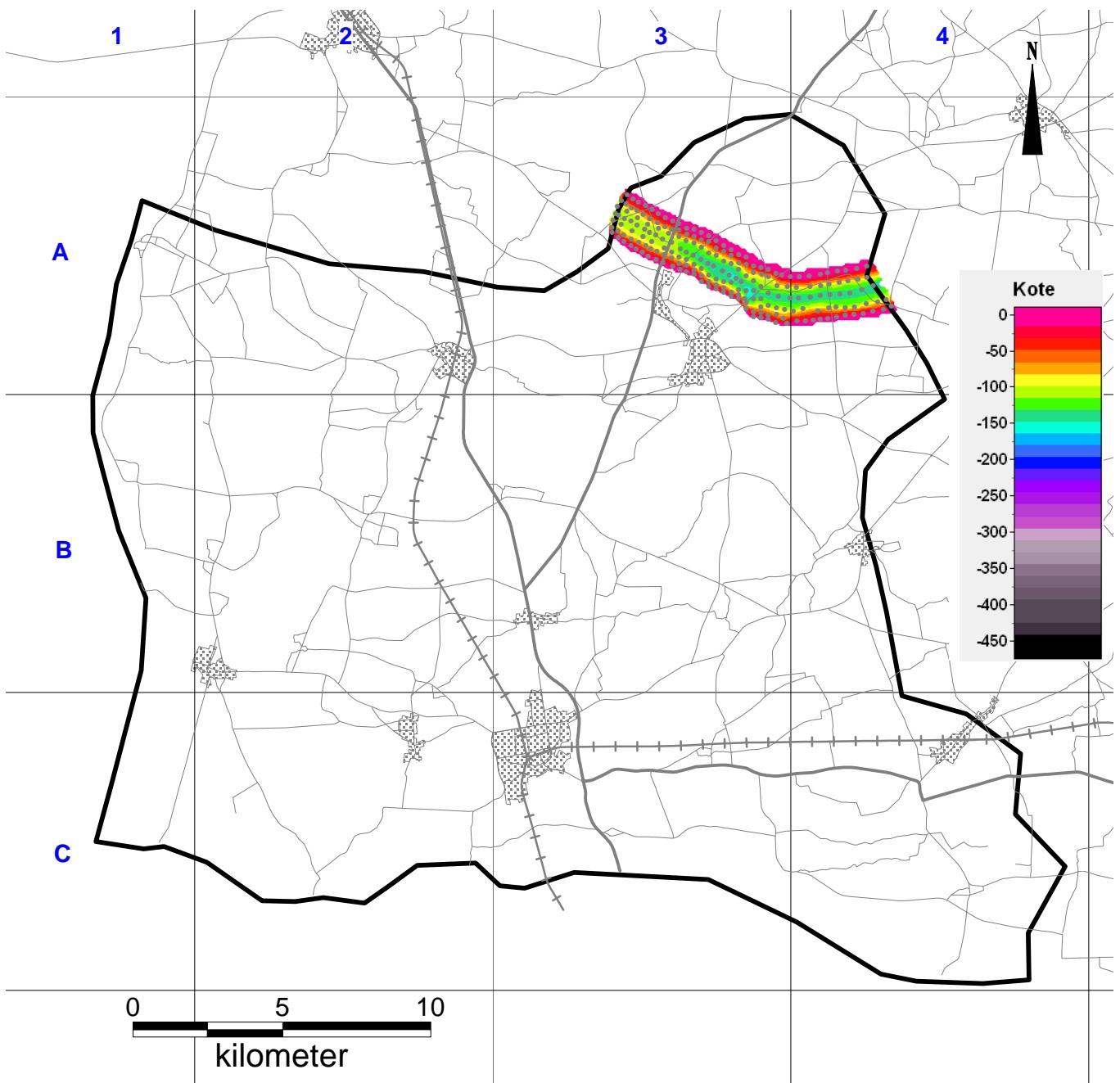
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 1 - Lille (18)
- 2 - Moderat (7)
- 3 - Stor (166)



Bilag 3.18: Møgeltønder Dalbund

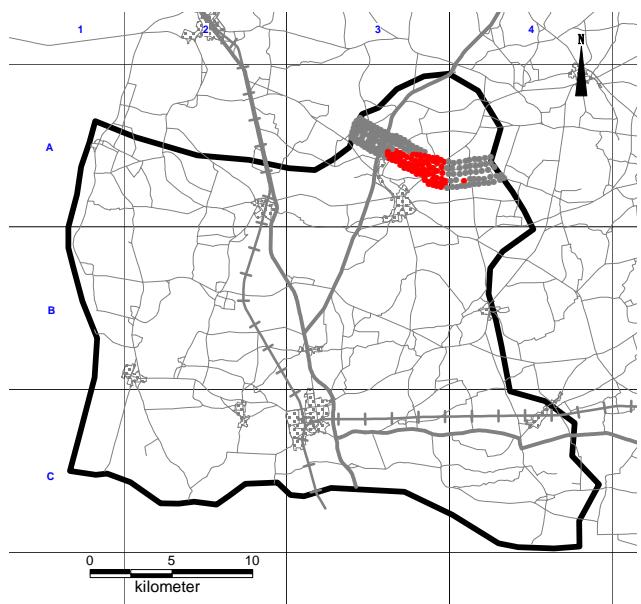


Tolkninger

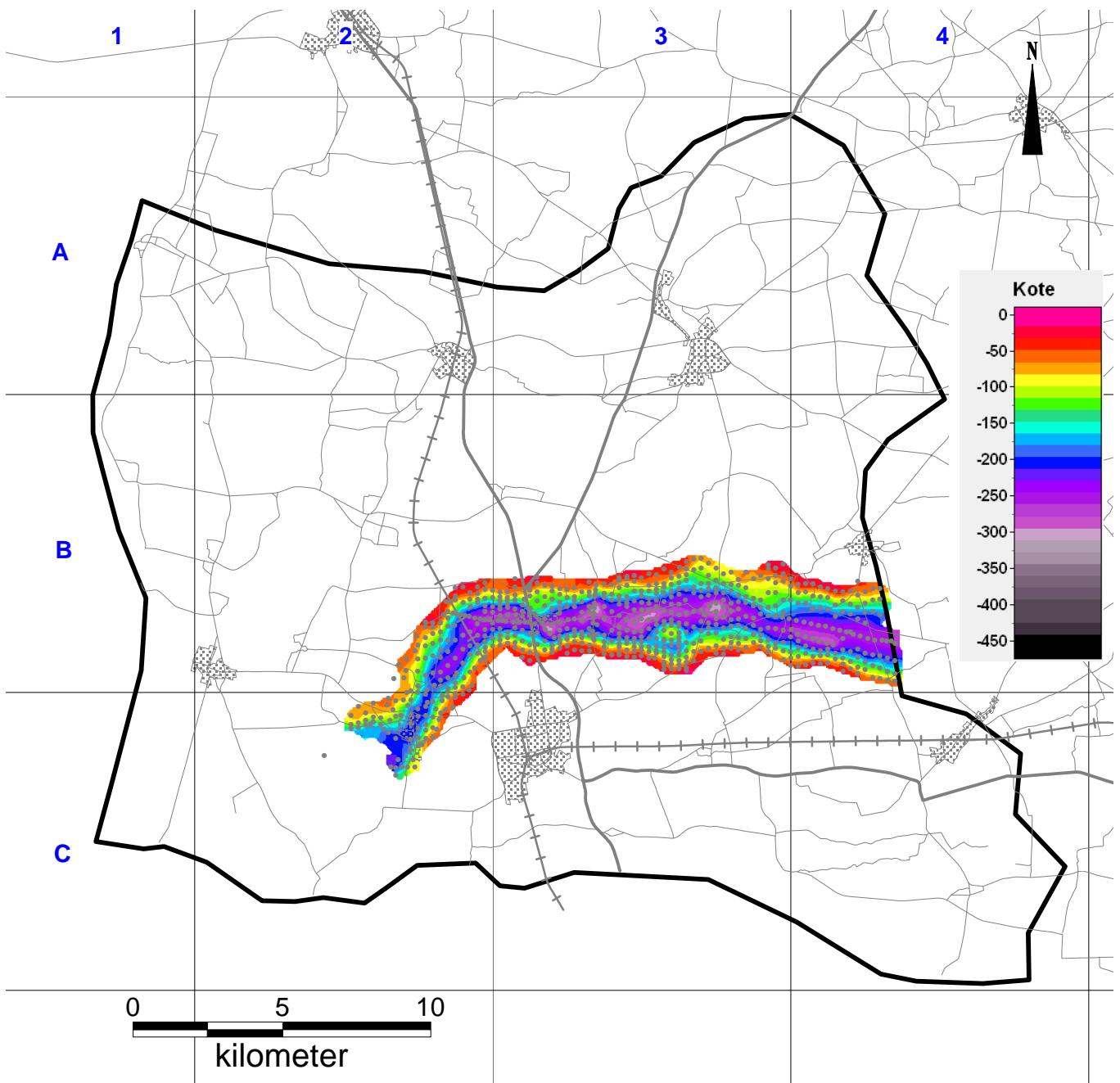
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 3 -Stor (75)
- 4 - Bedste gæt (135)



Bilag 3.19: Løgum3 Dalbund

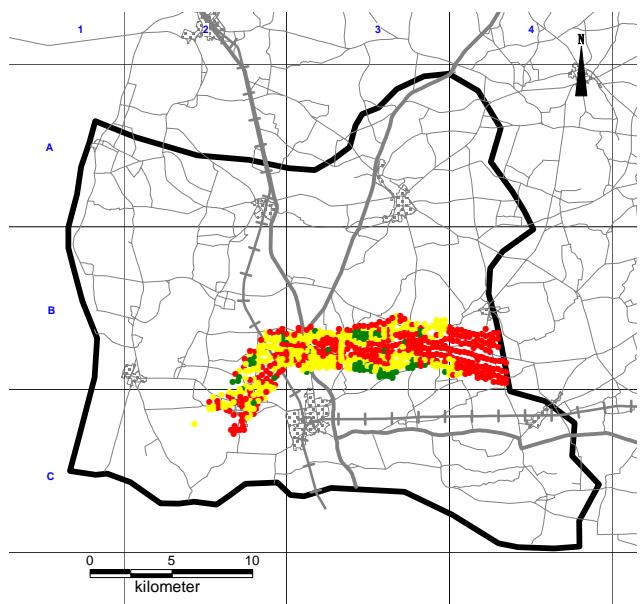


Tolknninger

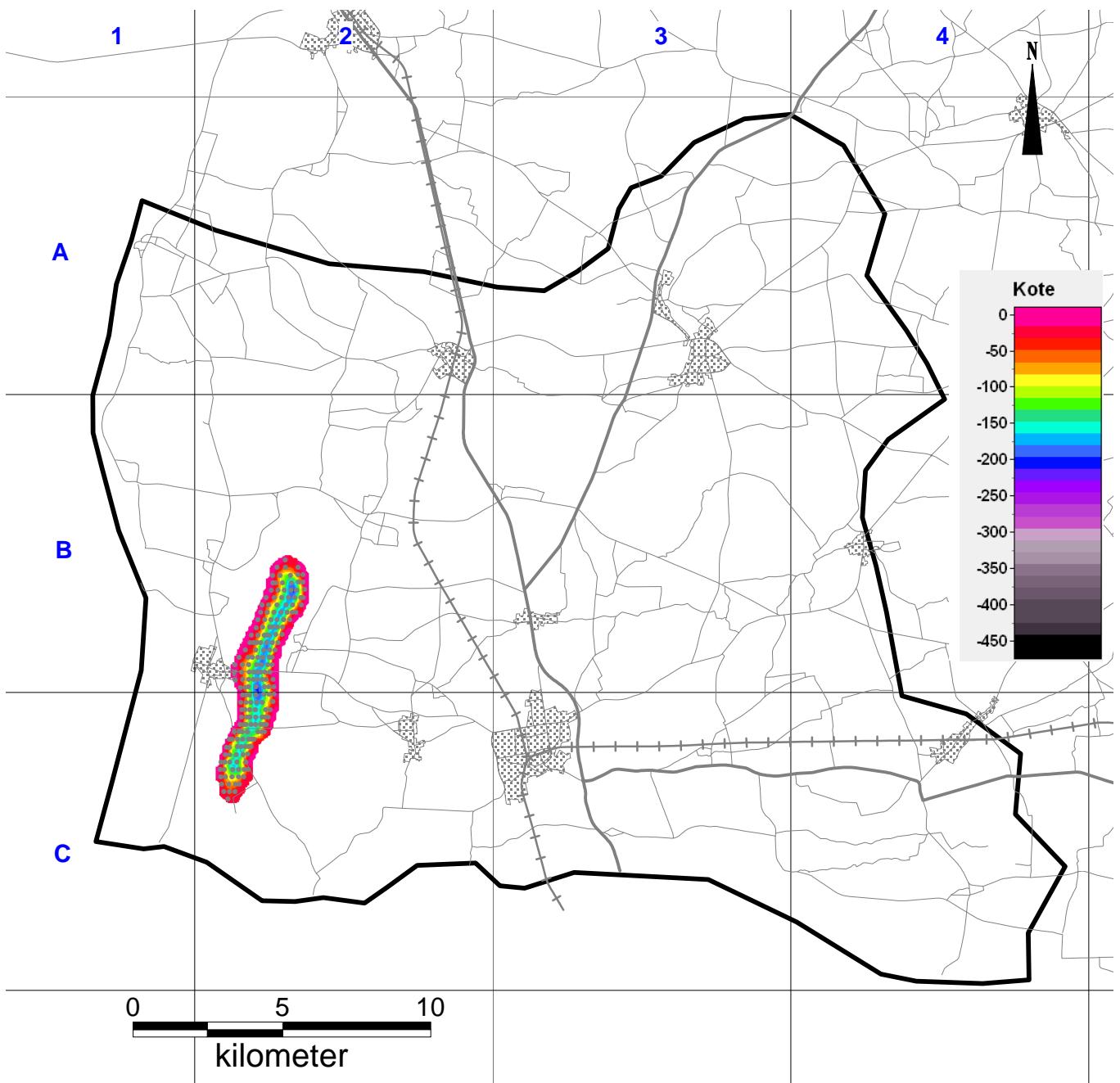
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 1 - Lille (70)
- 2 - Moderat (310)
- 3 - Stor (346)



Bilag 3.20: Abild Dalbund

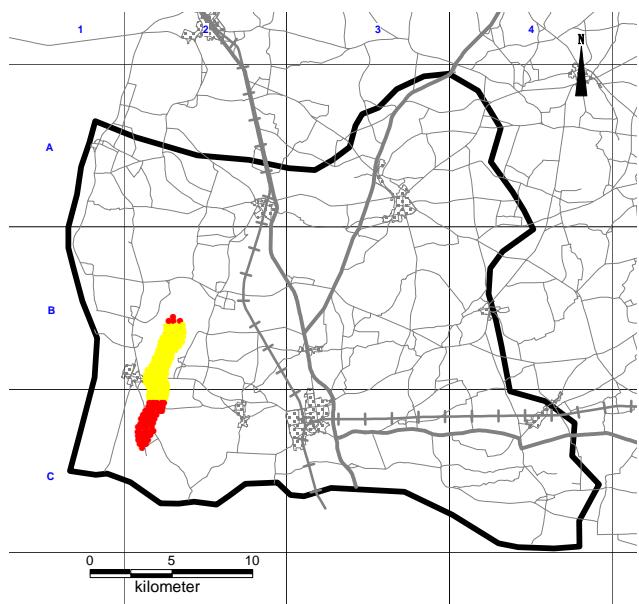


Tolkninger

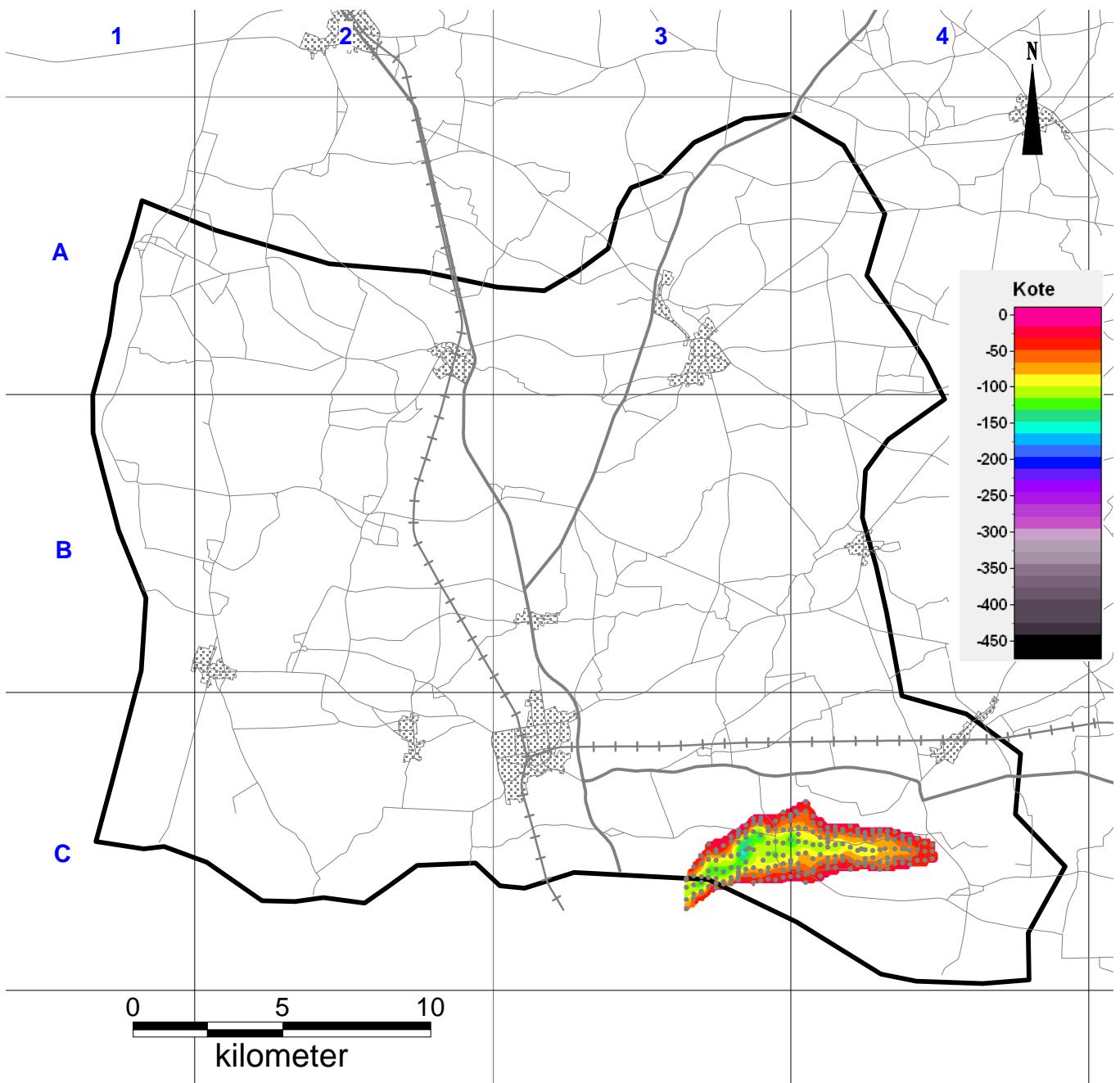
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 2 - Moderat (124)
- 3 - Stor (69)



Bilag 3.21: Højer Dalbund

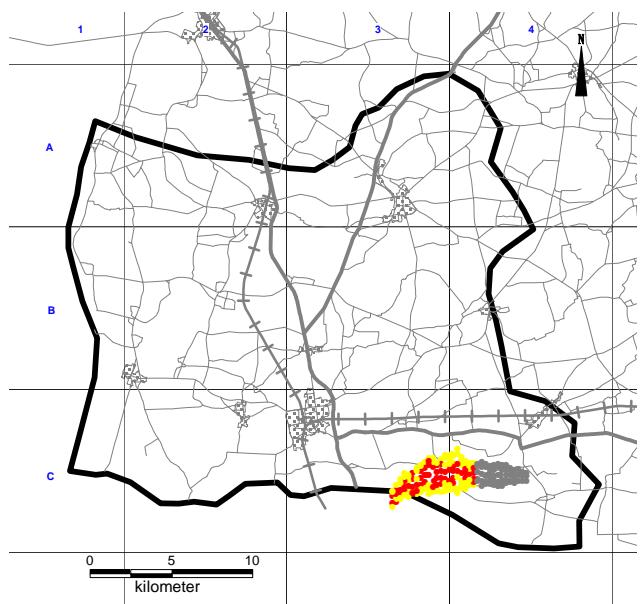


Tolknninger

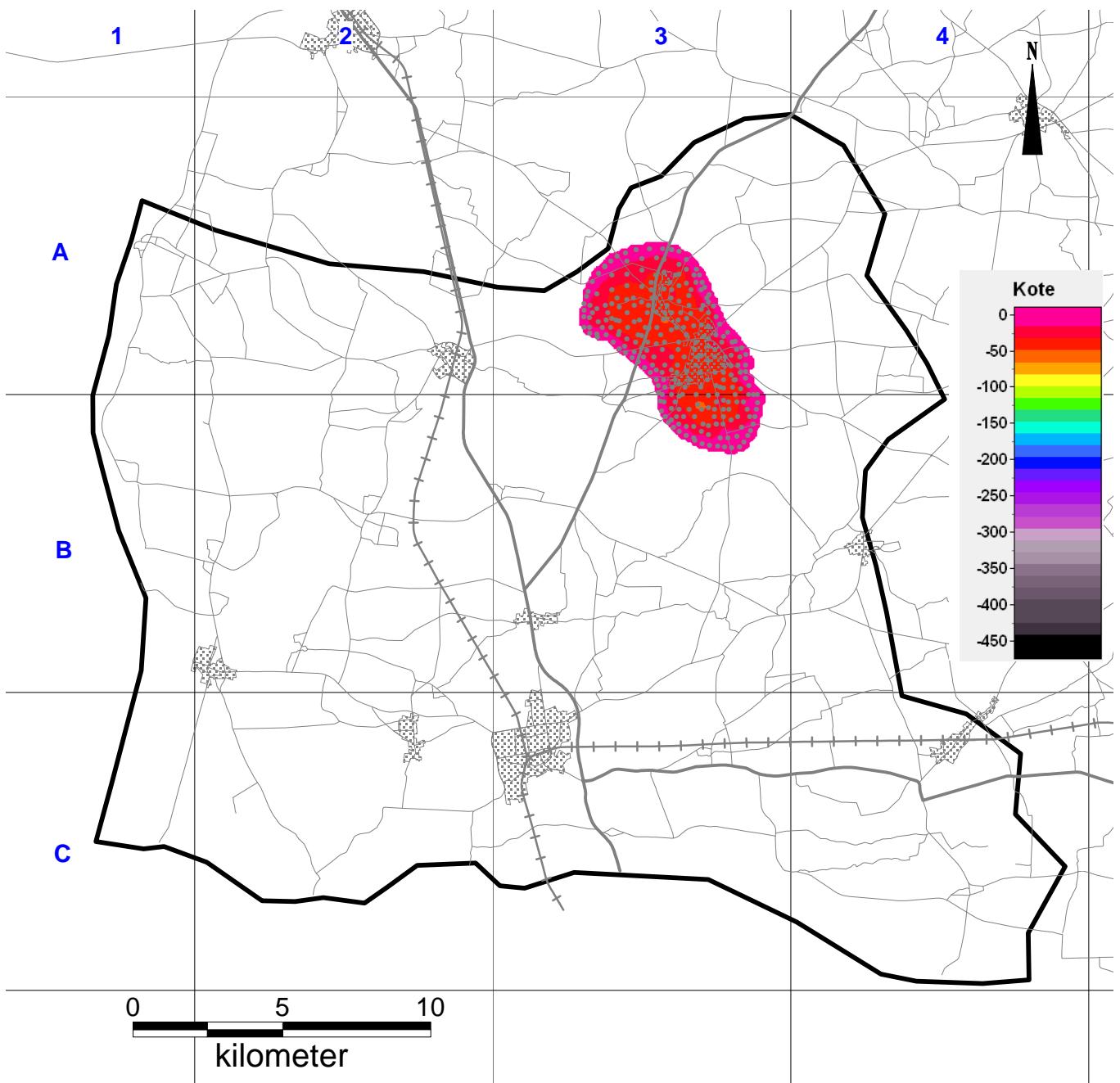
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 2 - Moderat (92)
- 3 - Stor (60)
- 4 - Bedste gæt (71)



Bilag 3.22: Lydersholm Dalbund

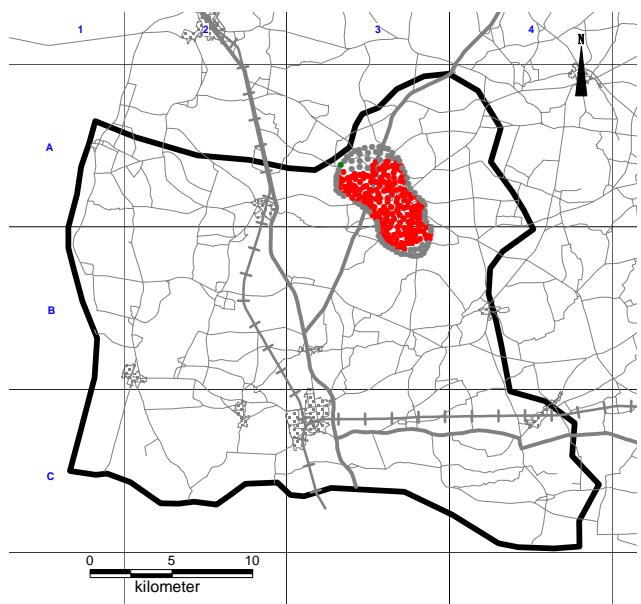


Tolkninger

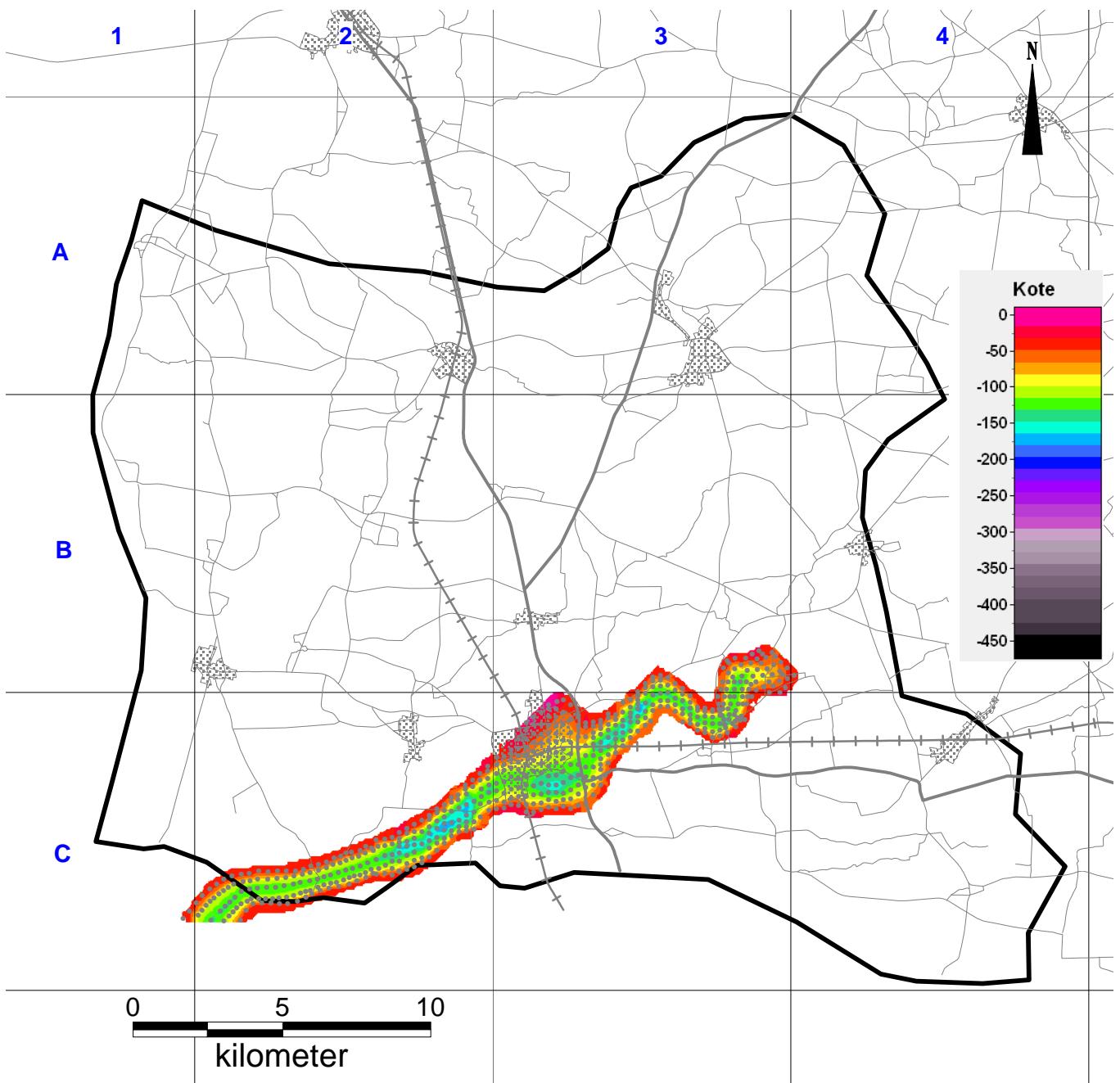
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 1 - Lille (1)
- 3 - Stor (200)
- 4 - Bedste gæt (80)



Bilag 3.23: Løgum2 Dalbund

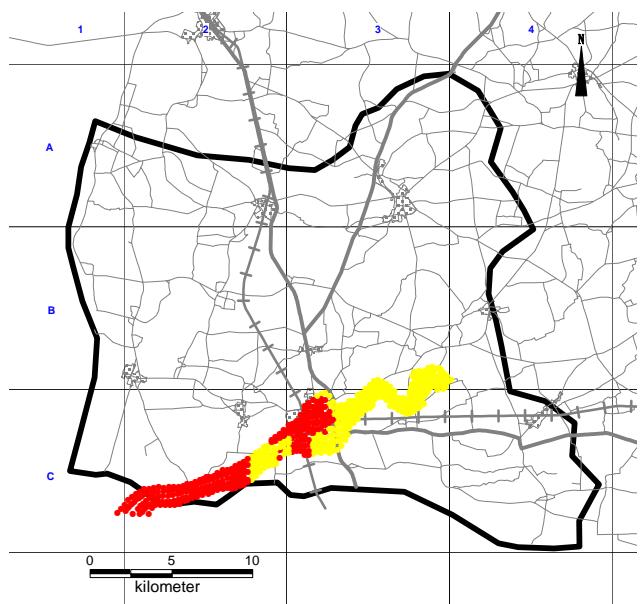


Tolknninger

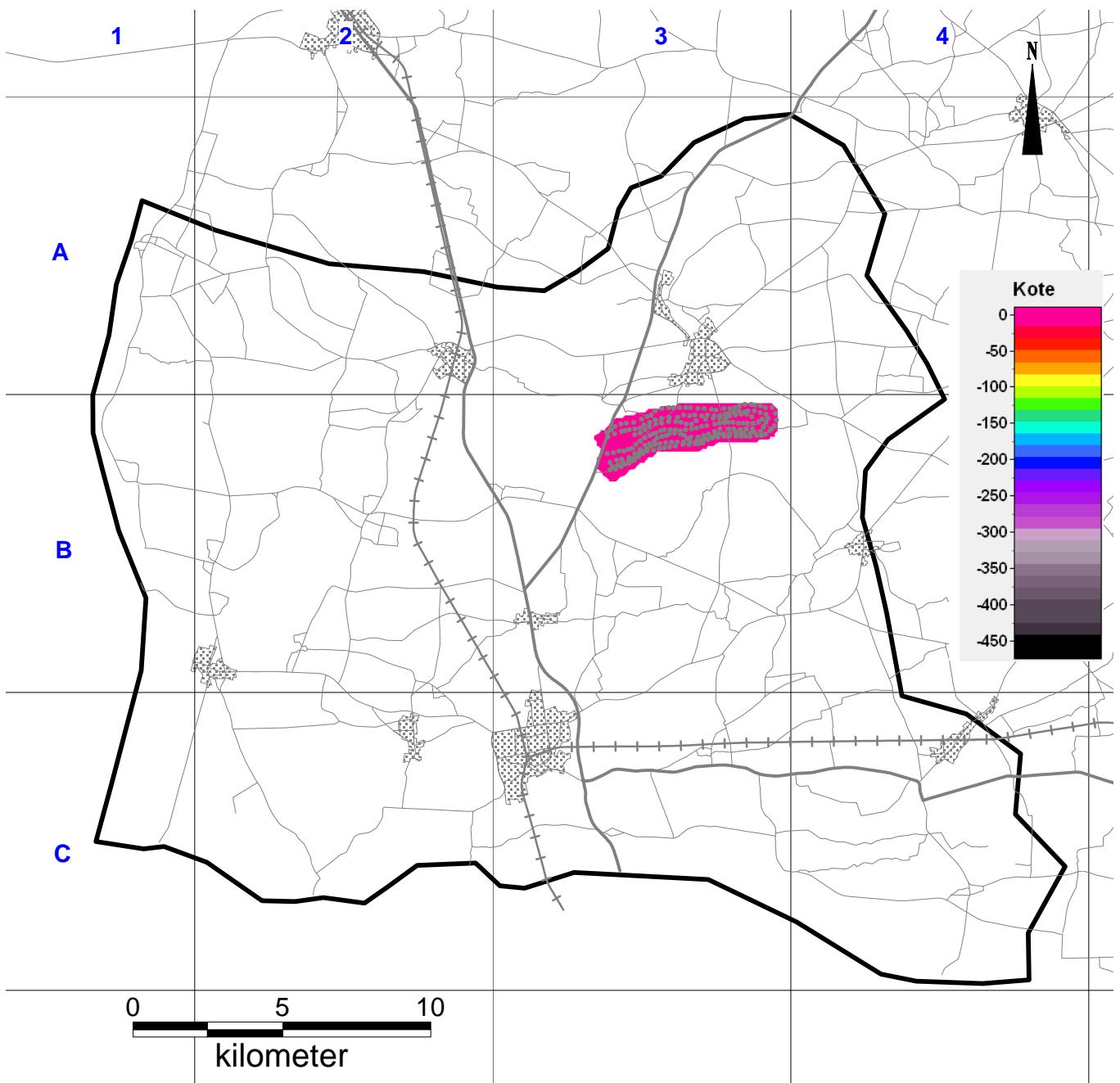
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 2 - Moderat (305)
- 3 - Stor (253)



Bilag 3.24: Tønder-Jejs Dalbund

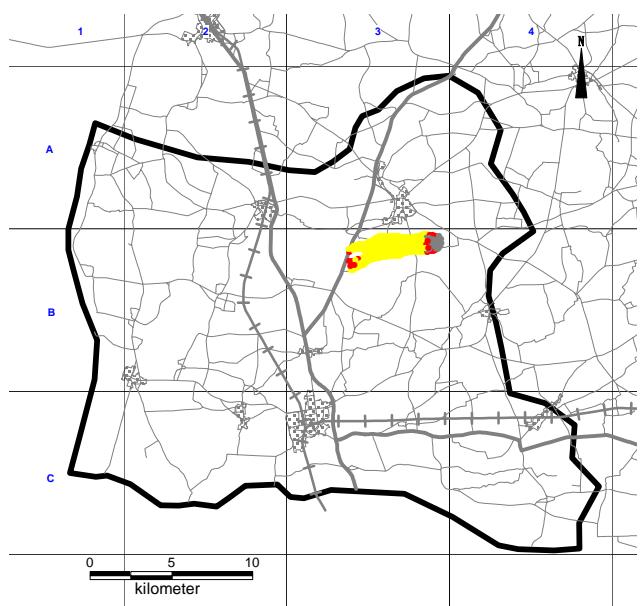


Tolkninger

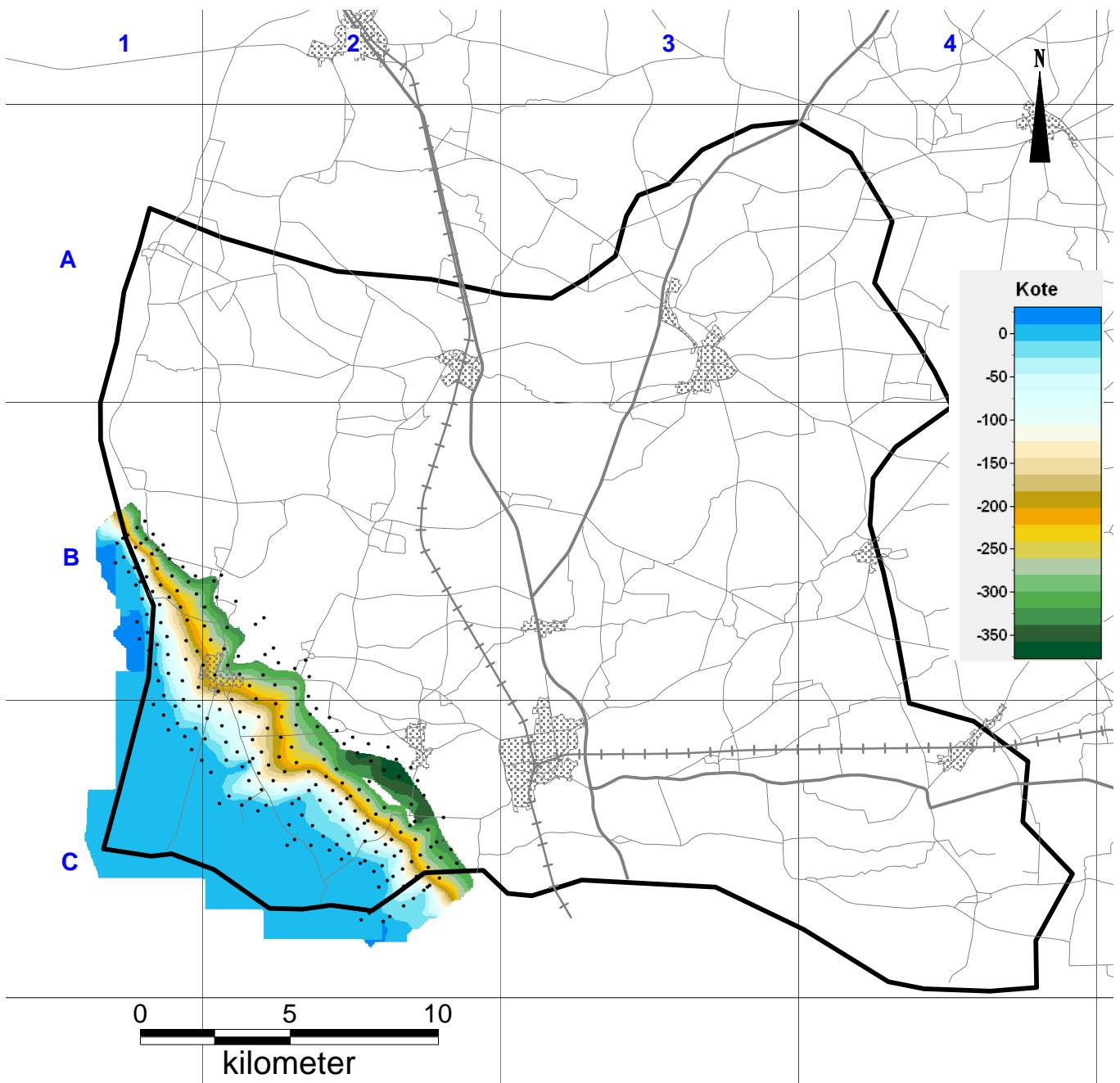
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

- 2 - Moderat (176)
- 3 - Stor (18)
- 4 - Bedste gæt (18)



Bilag 3.25: Løgum1 Dalbund

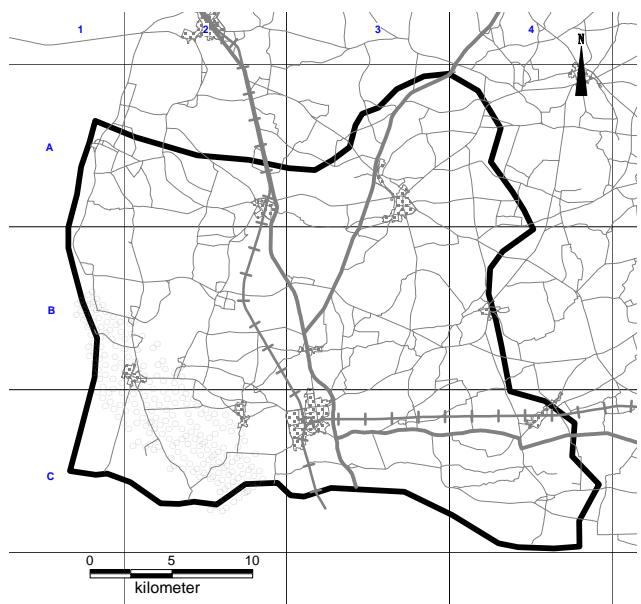


Tolkninger

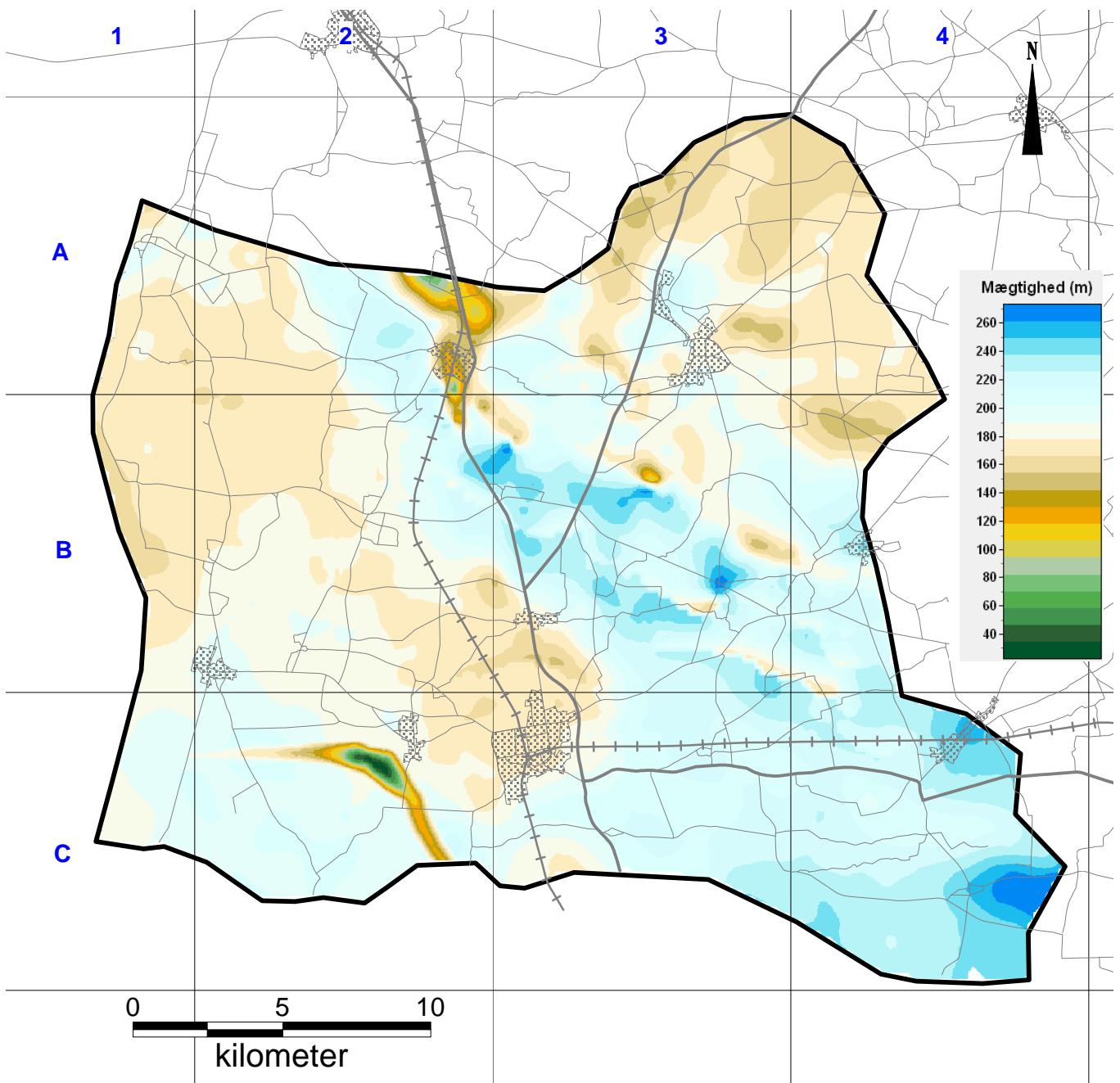
- Tolkningspunkt

Tolkningsusikkerhed

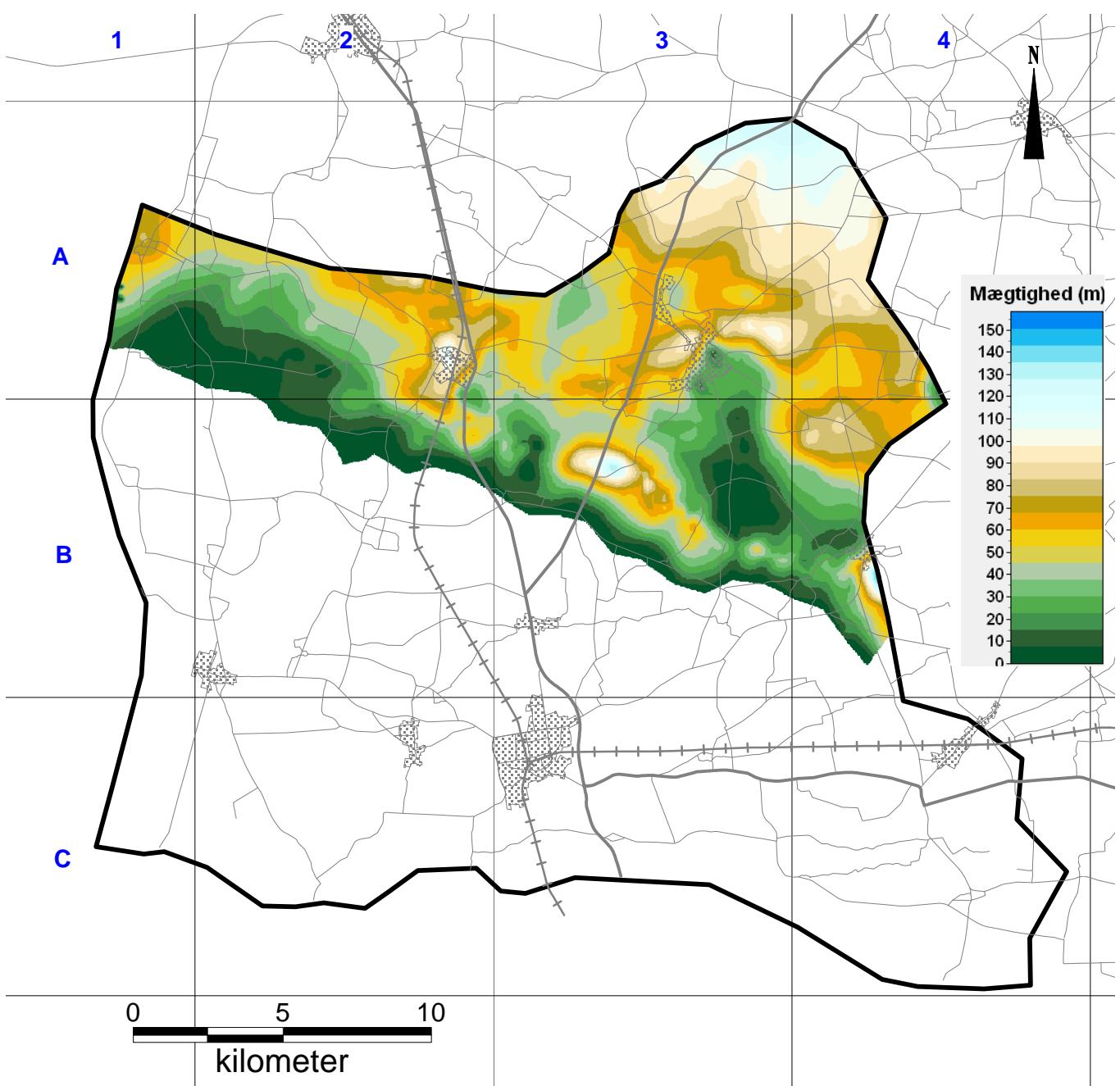
- 0 - Ikke kategoriseret



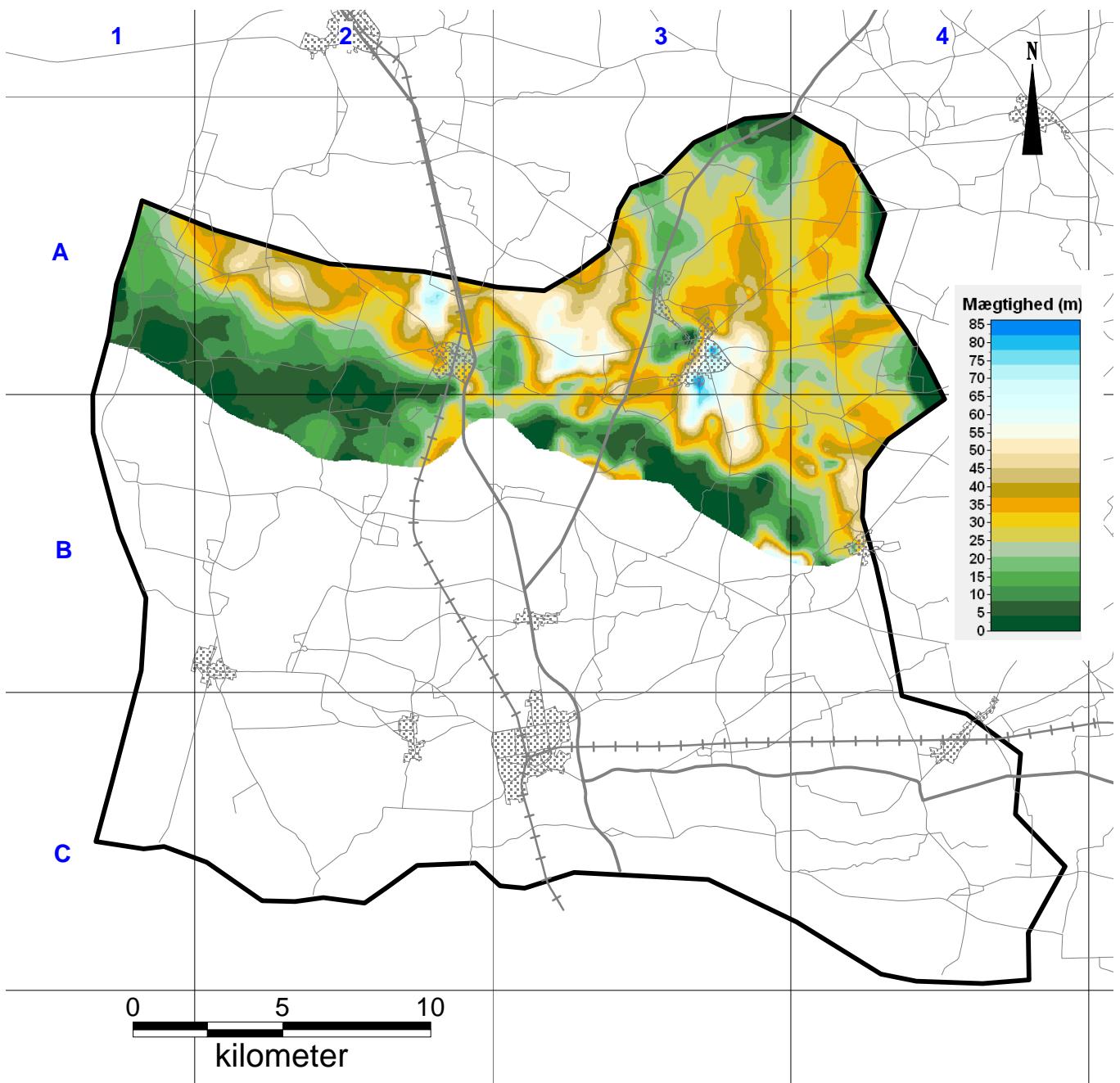
Bilag 3.26: Saltvandsgrænse



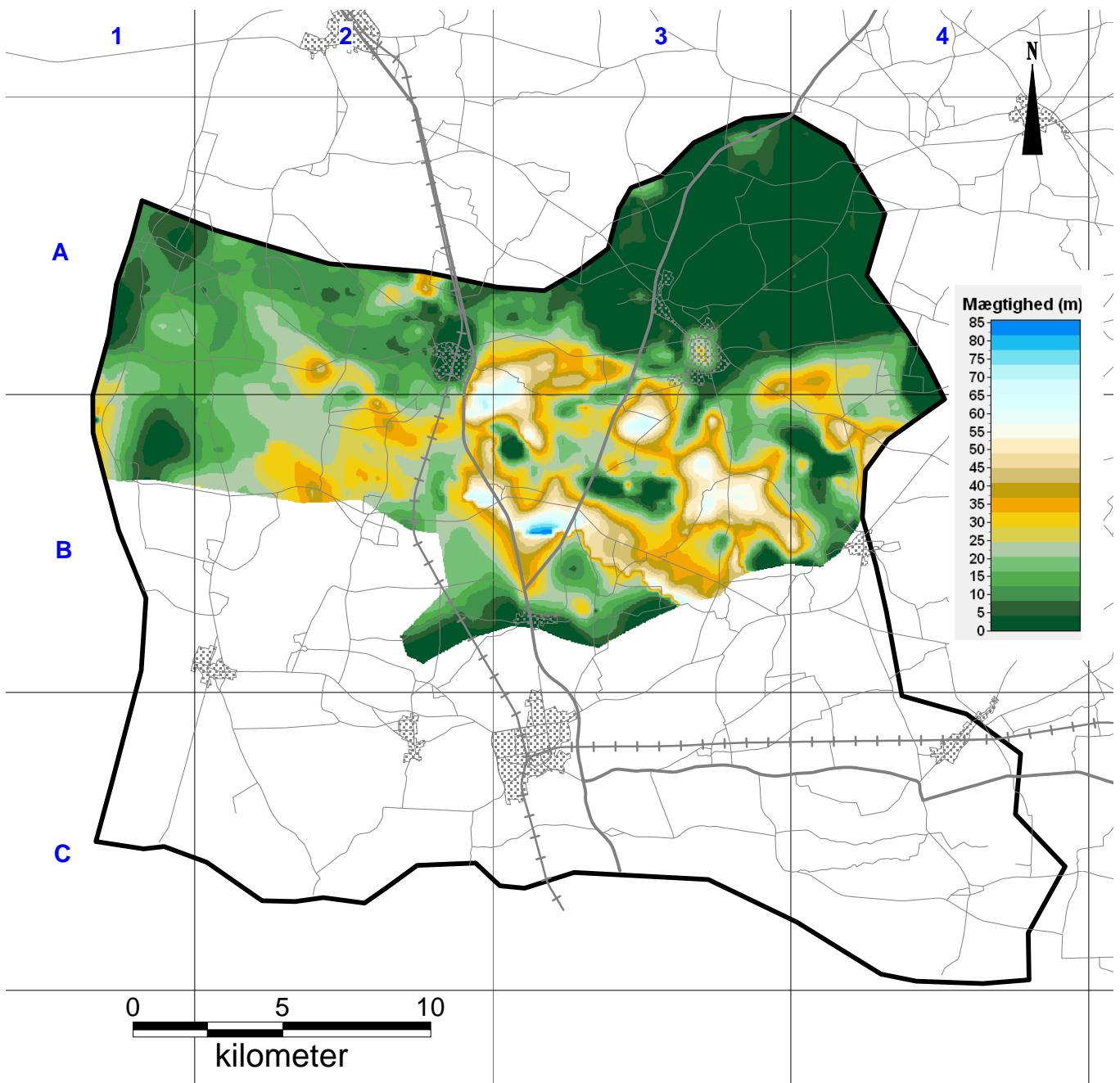
Bilag 4.1: Tykkelse Palæogen



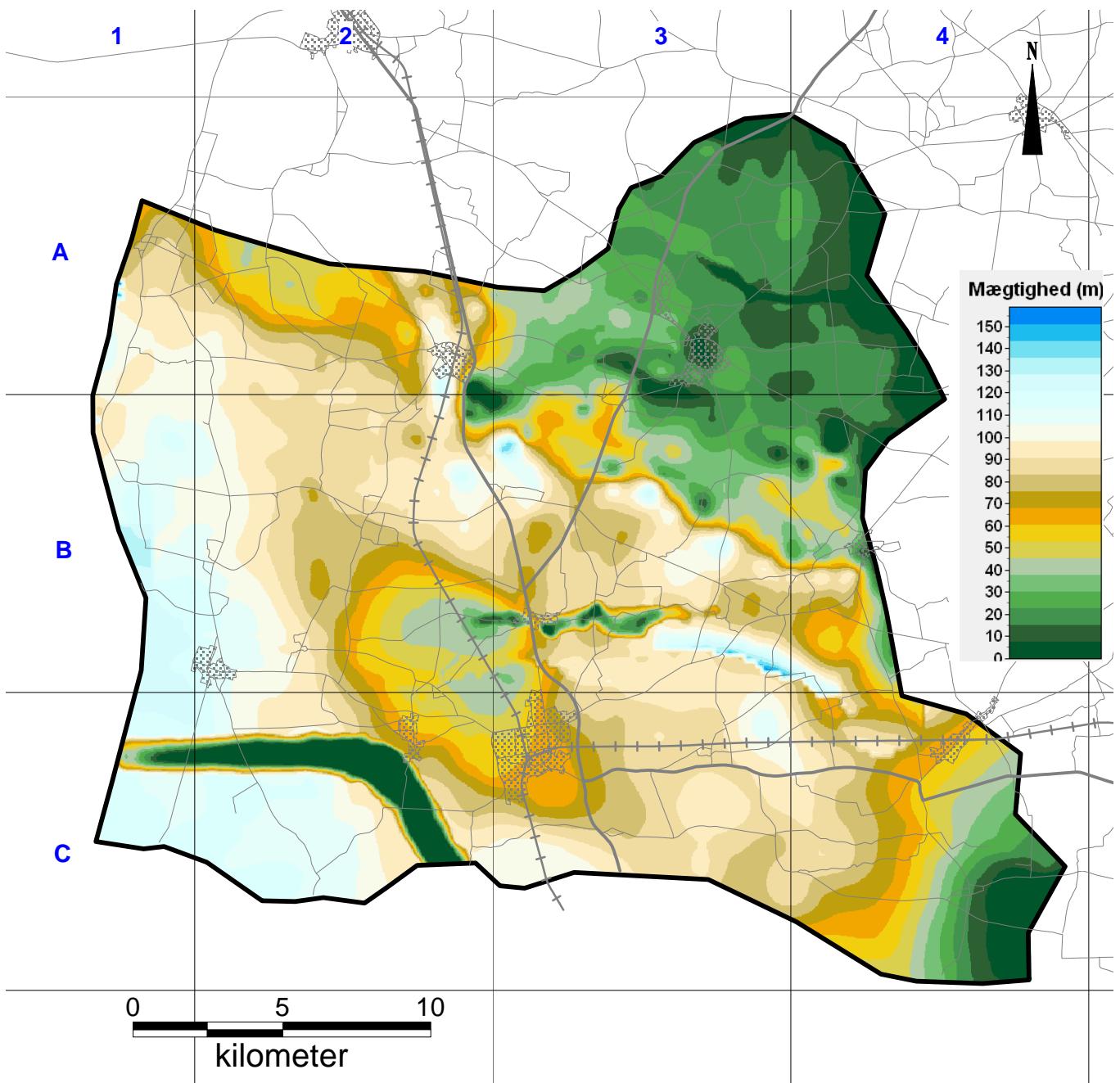
Bilag 4.2: Tykkelse af Klintinghoved 9



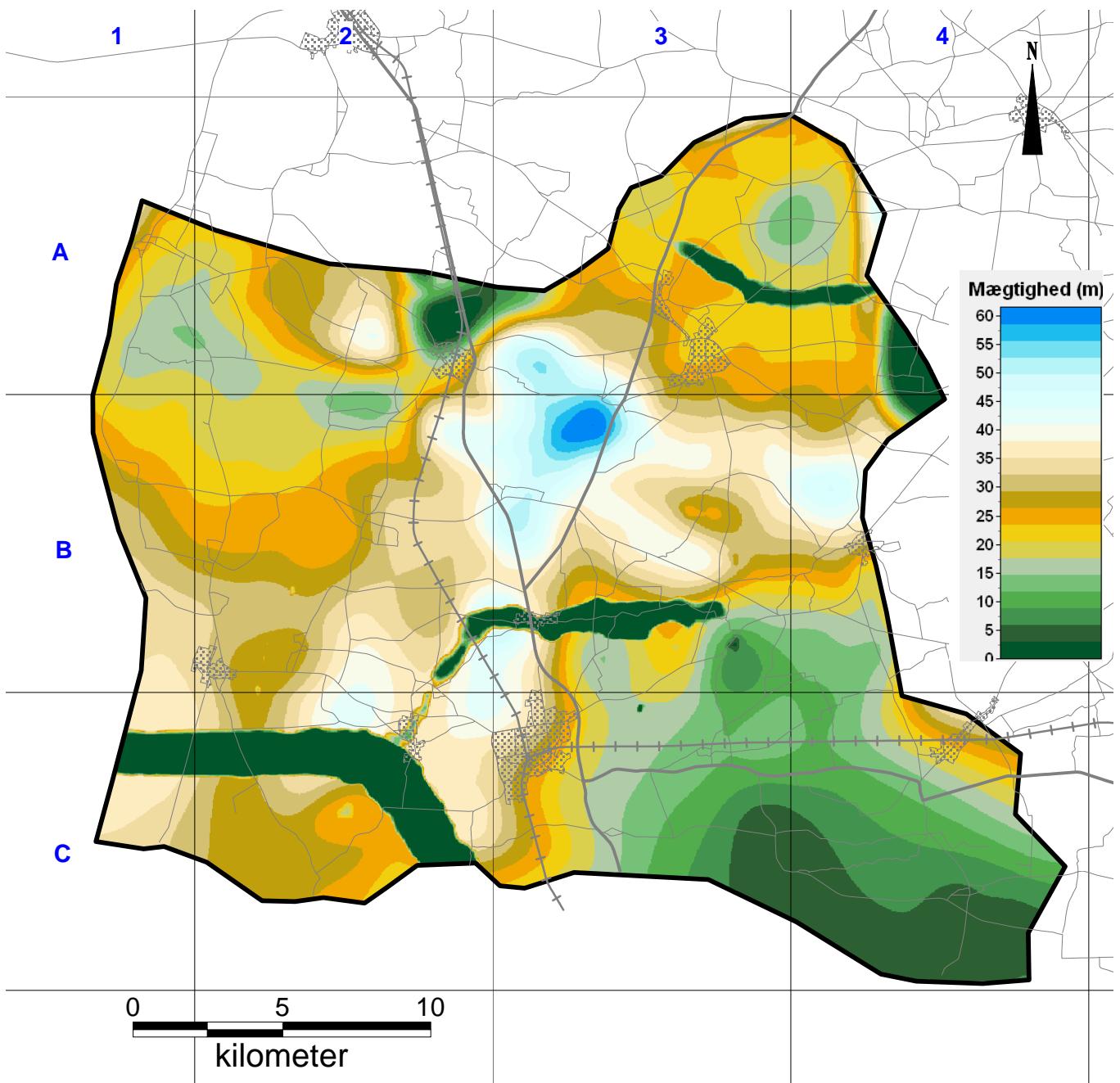
Bilag 4.3: Tykkelse af Bastrup Sand



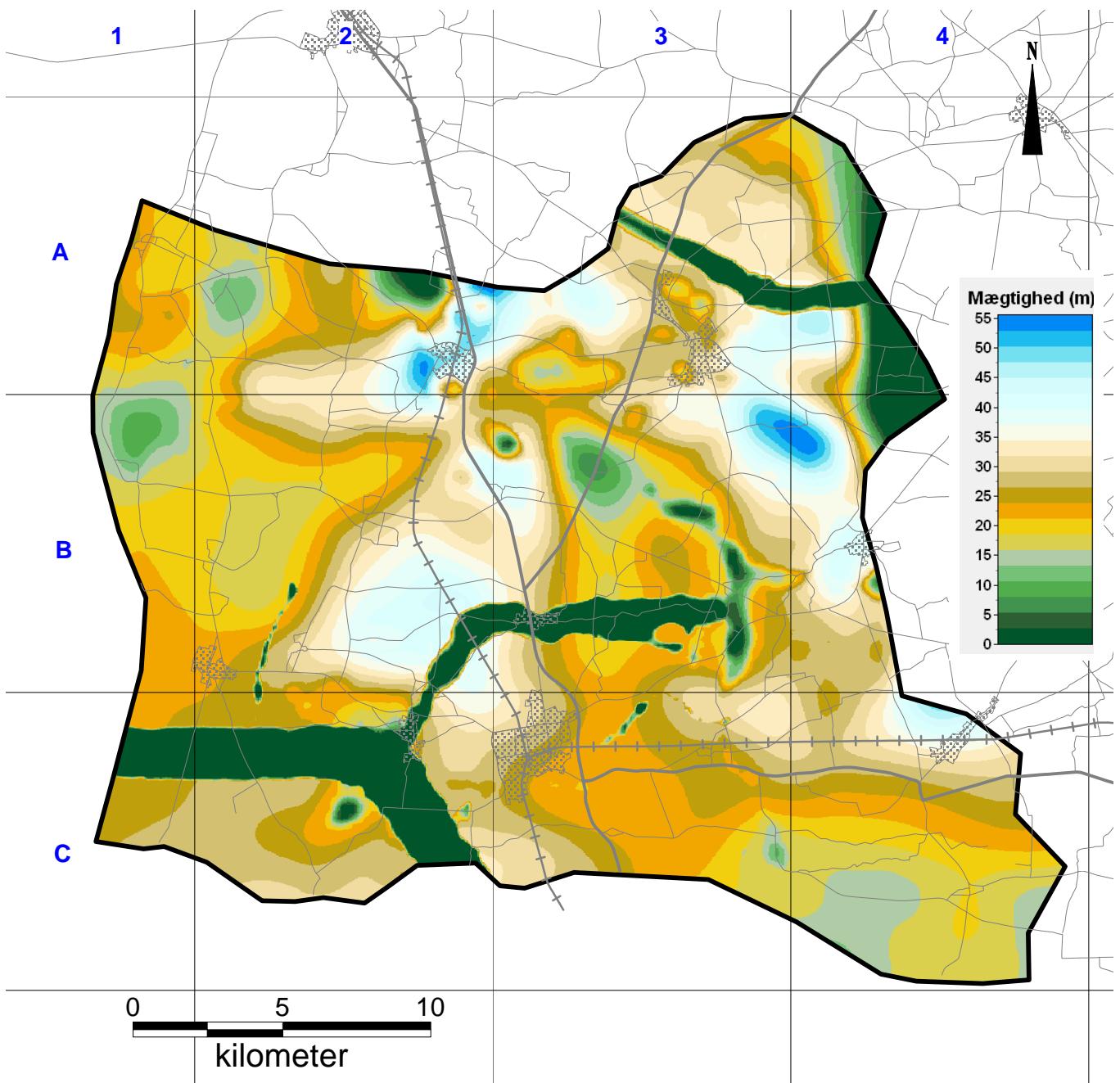
Bilag 4.4: Tykkelse af Klintinghoved 10



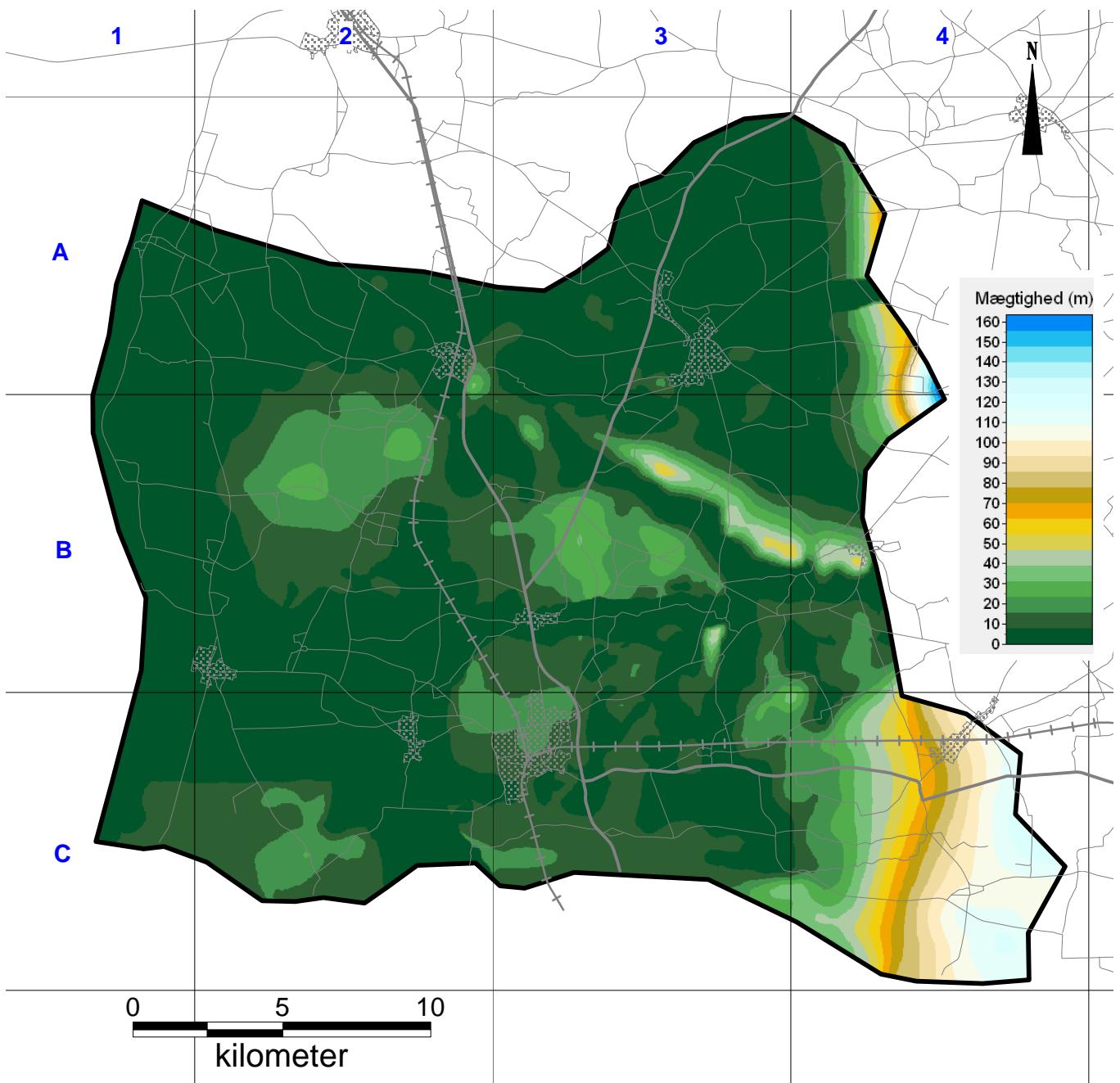
Bilag 4.5: Tykkelse af Arnum Ler 2



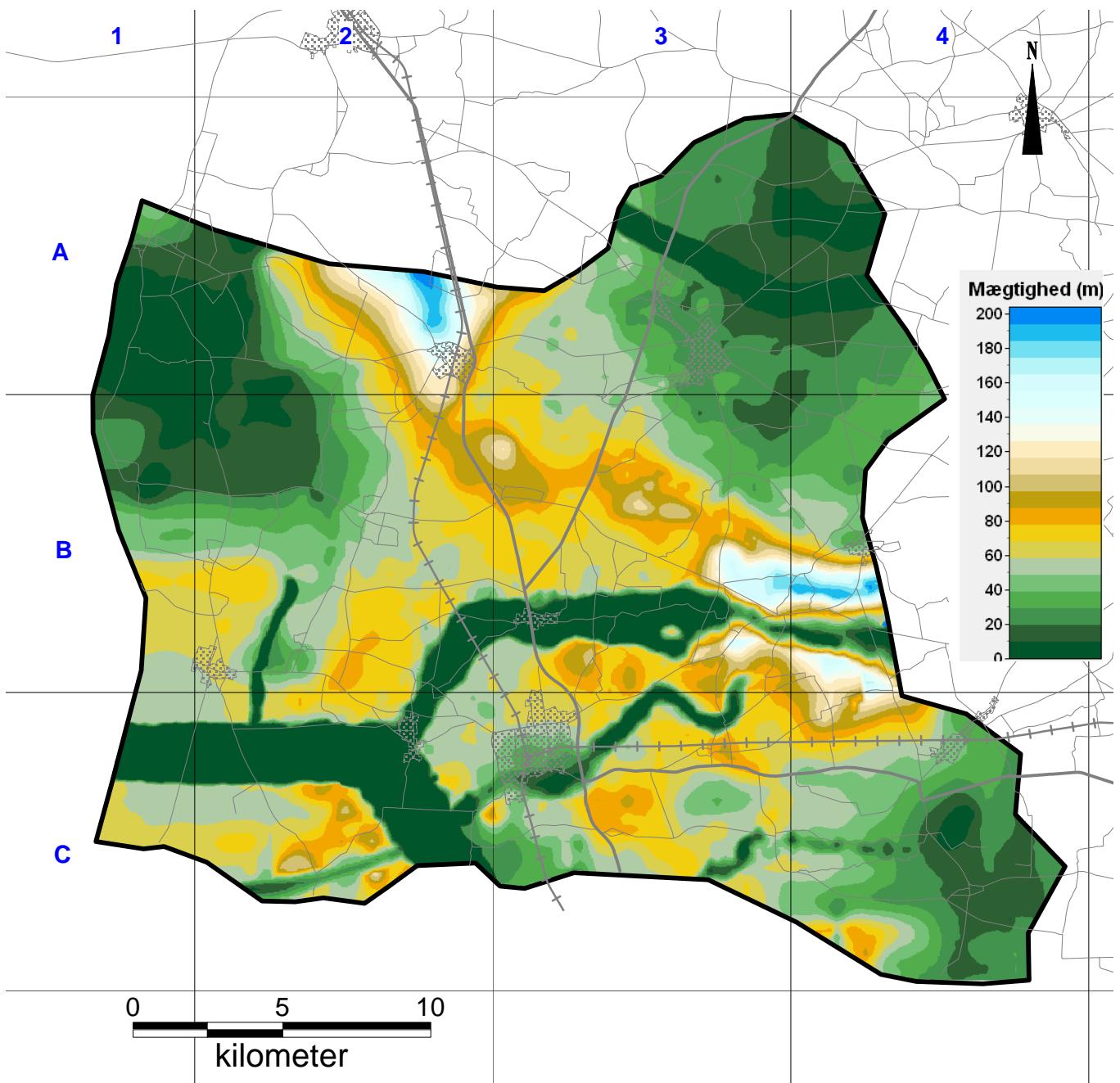
Bilag 4.6: Tykkelse af Odderup Sand 2



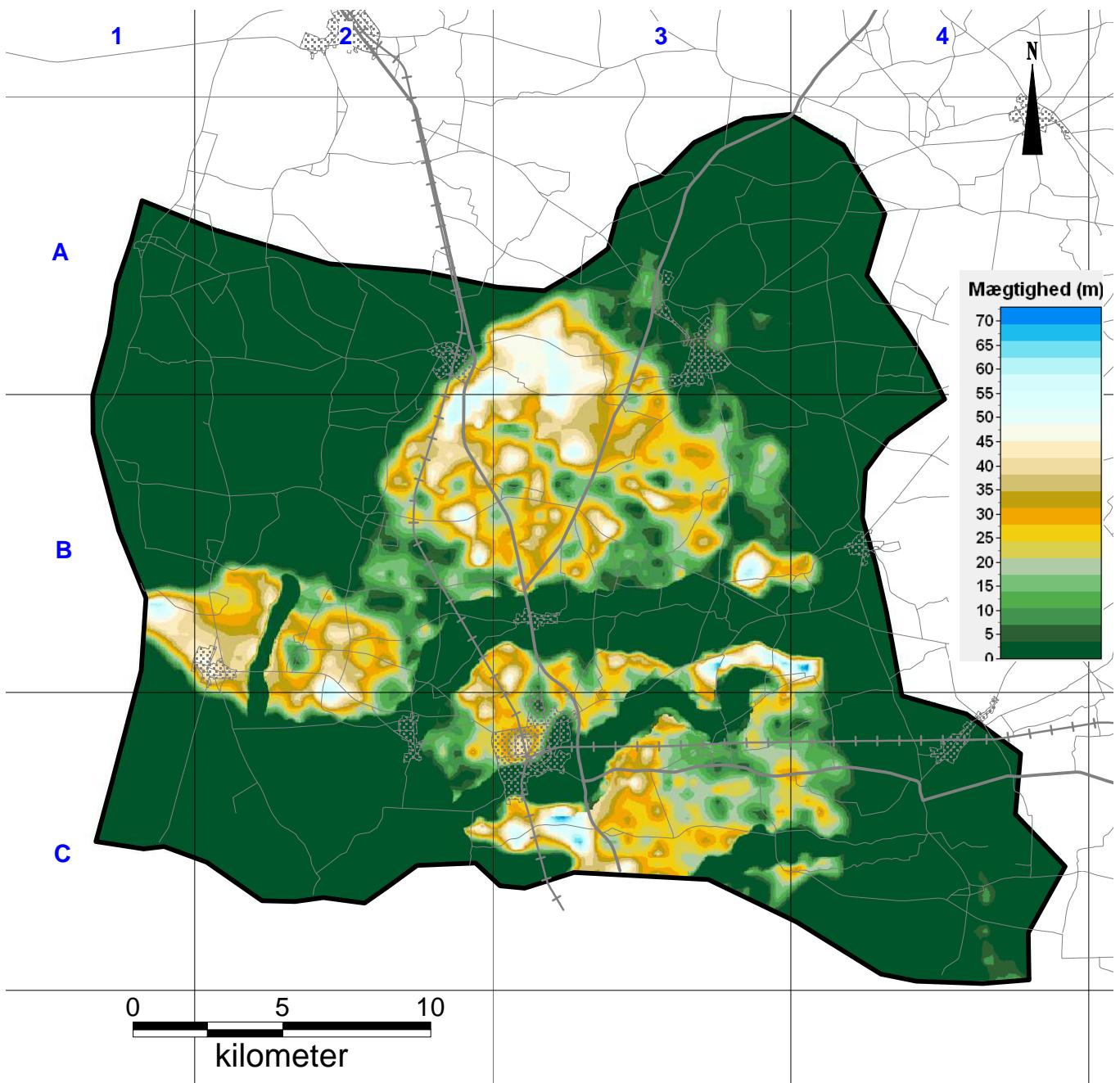
Bilag 4.7: Tykkelse af Arnum Ler 3



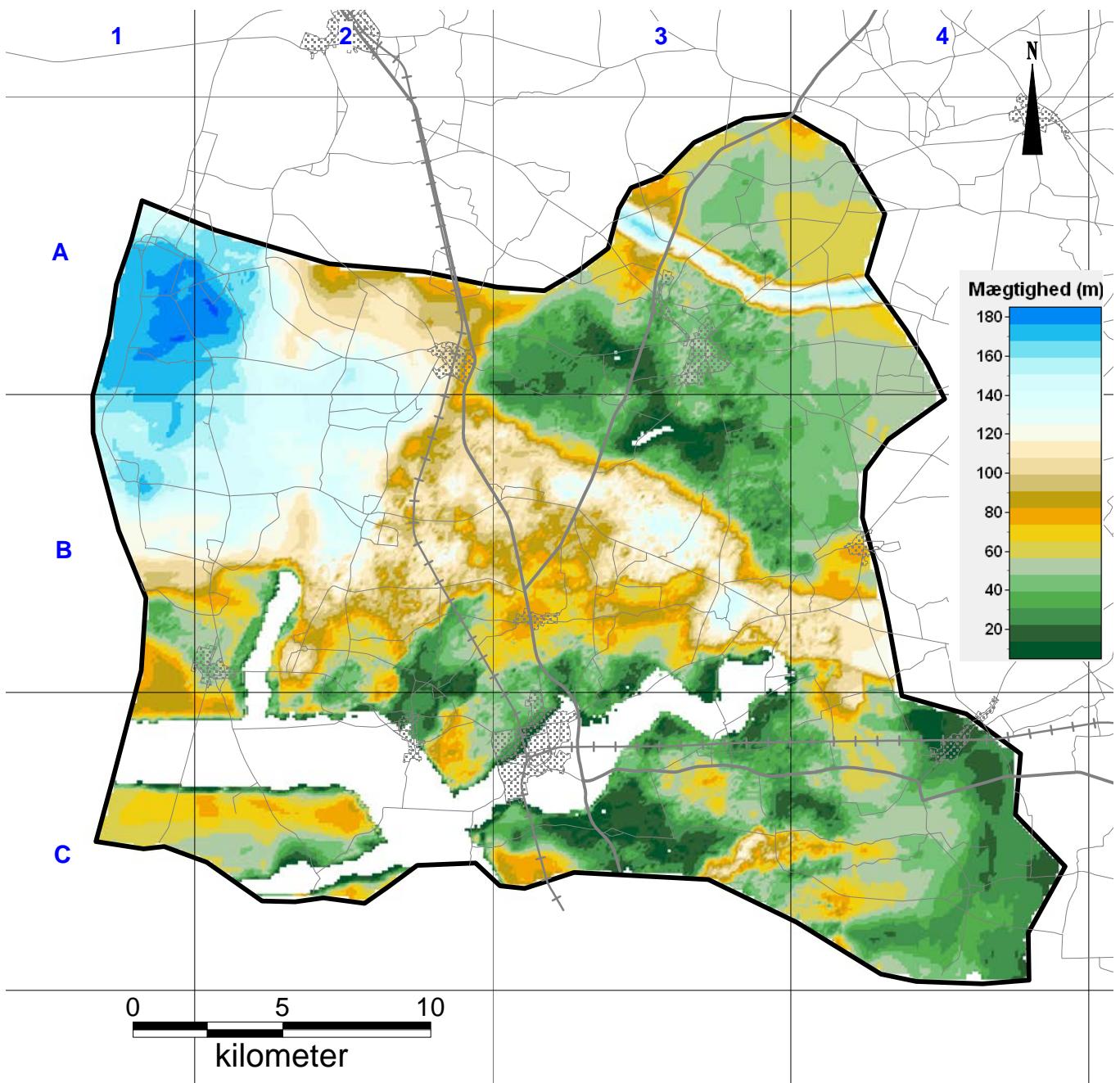
Bilag 4.8: Tykkelse af Odderup Sand 3



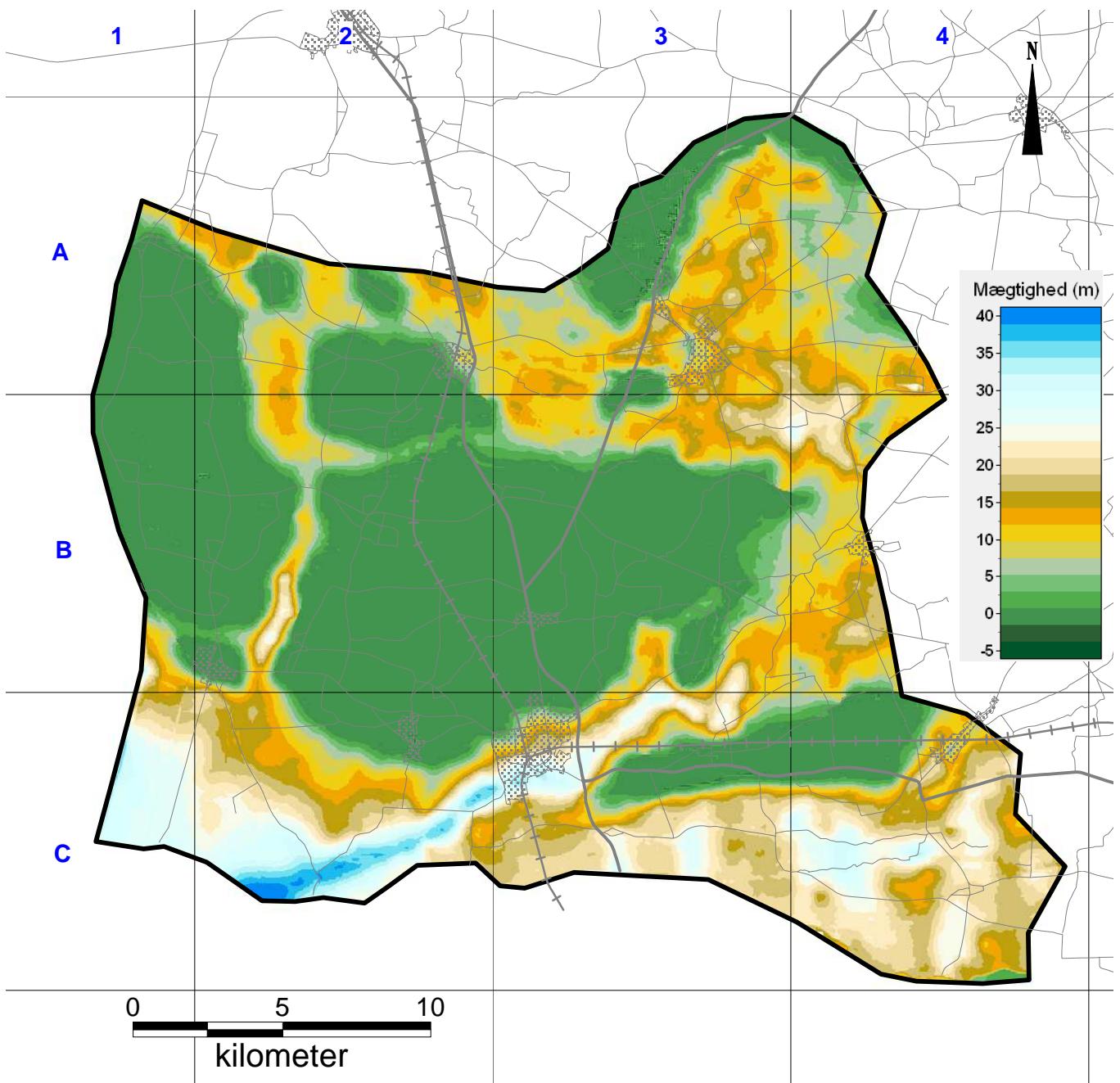
Bilag 4.9: Tykkelse af Måde Gruppen



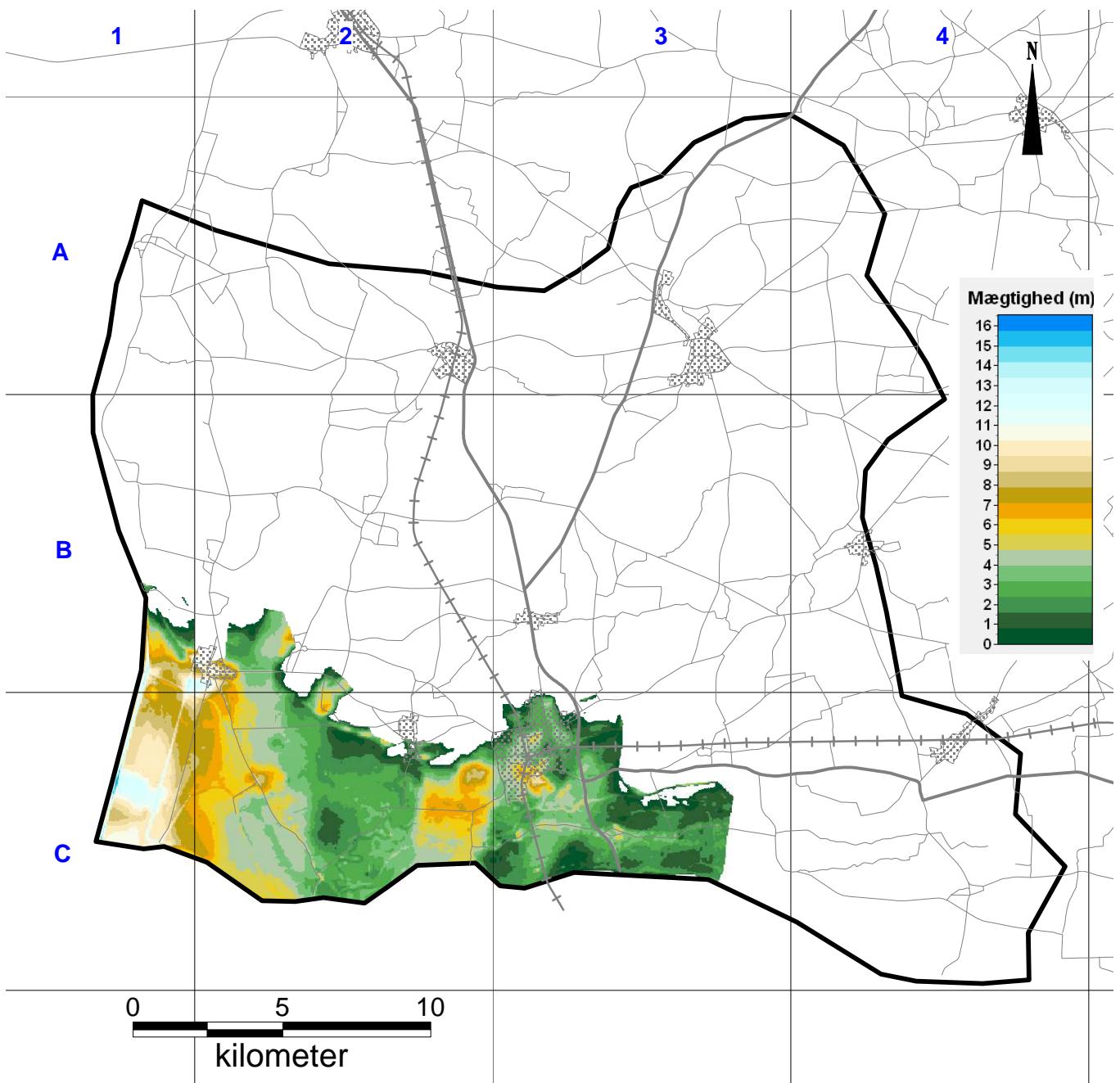
Bilag 4.10: Tykkelse af Måde Gruppe deformert



Bilag 4.11: Kraftigt forstyrret lagserie

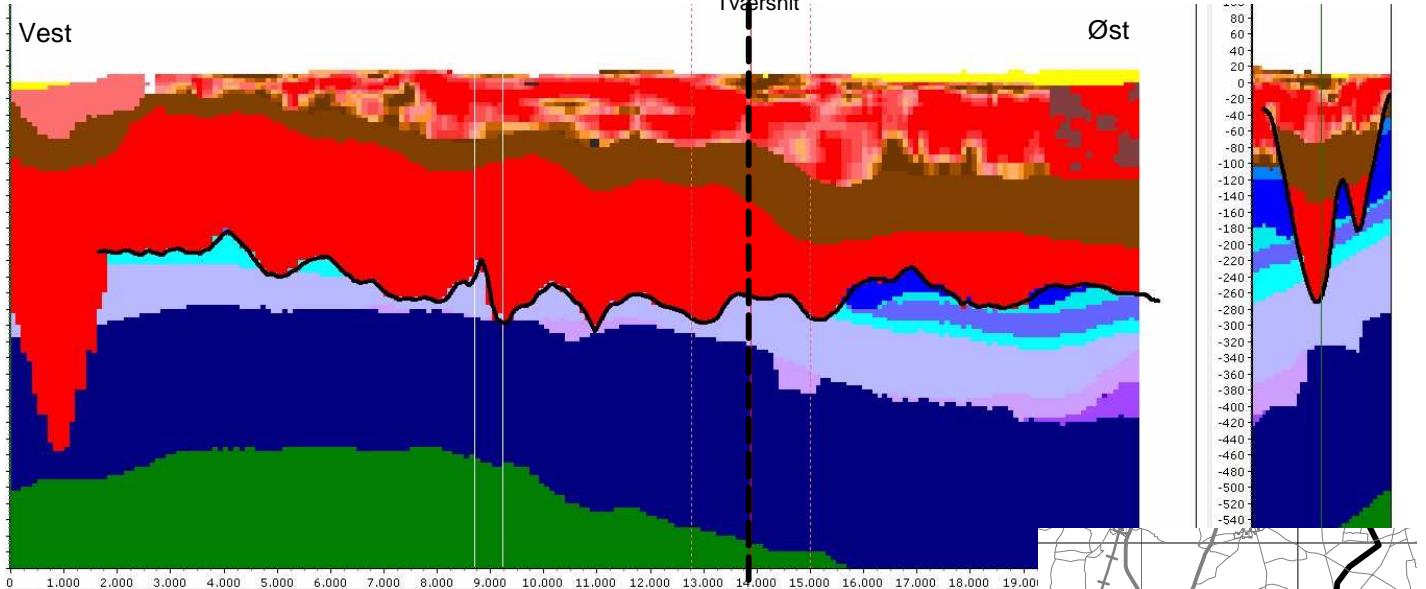


Bilag 4.12: Tykkelse af hedeslette



Bilag 4.13: Tykkelse af Postglacial

Abild-dalen

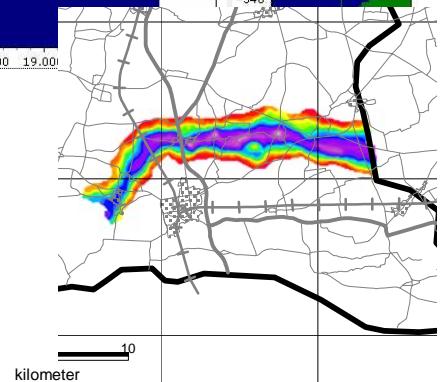


Profilsnit gennem Abild-dalen (dalbund = sort linje).

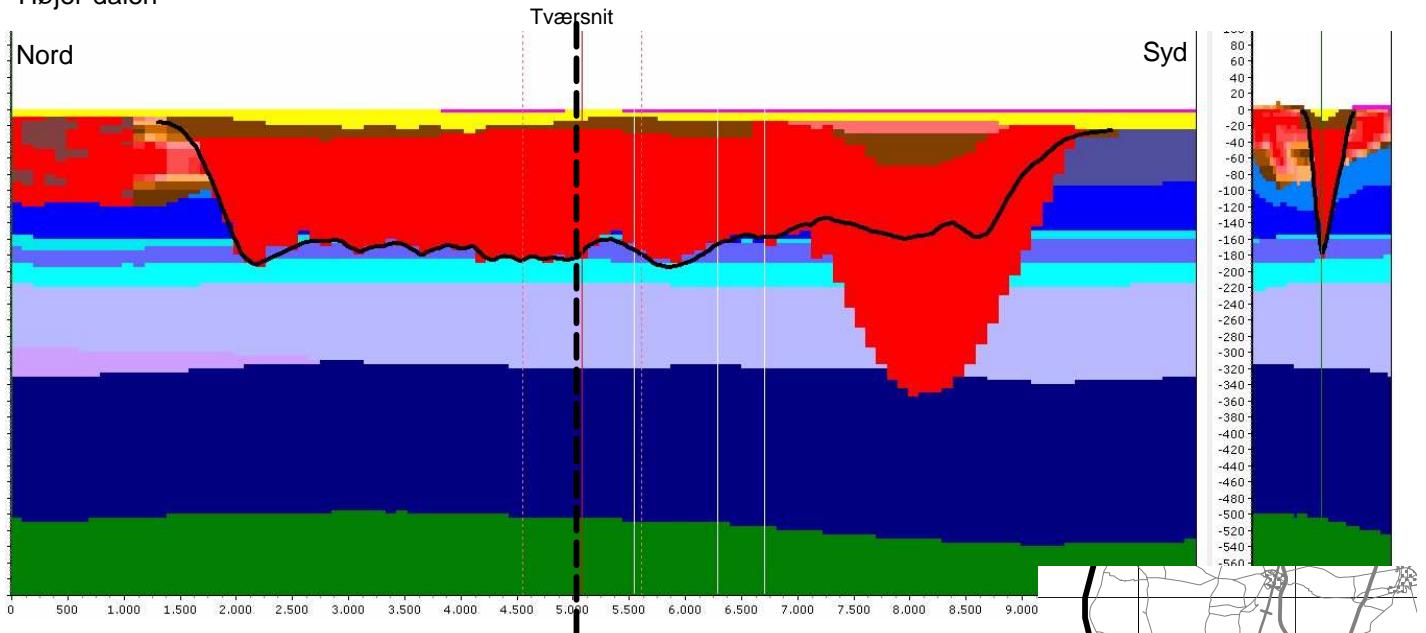
Profilet slutter i øst ved kortlægningsområdets grænse.

Profillængde = 21.000 m. Tværsnitsbredde = 4000 m. Højde = 700 m.

Legende: Se bilag 1



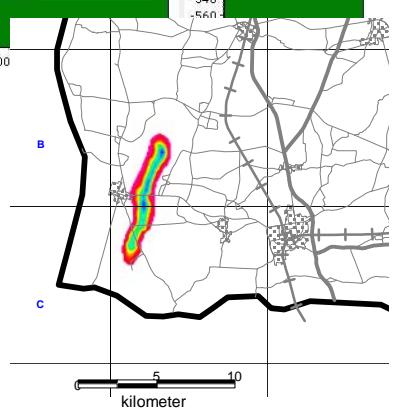
Højer-dalen



Profilsnit gennem Højer-dalen (dalbund = sort linje).

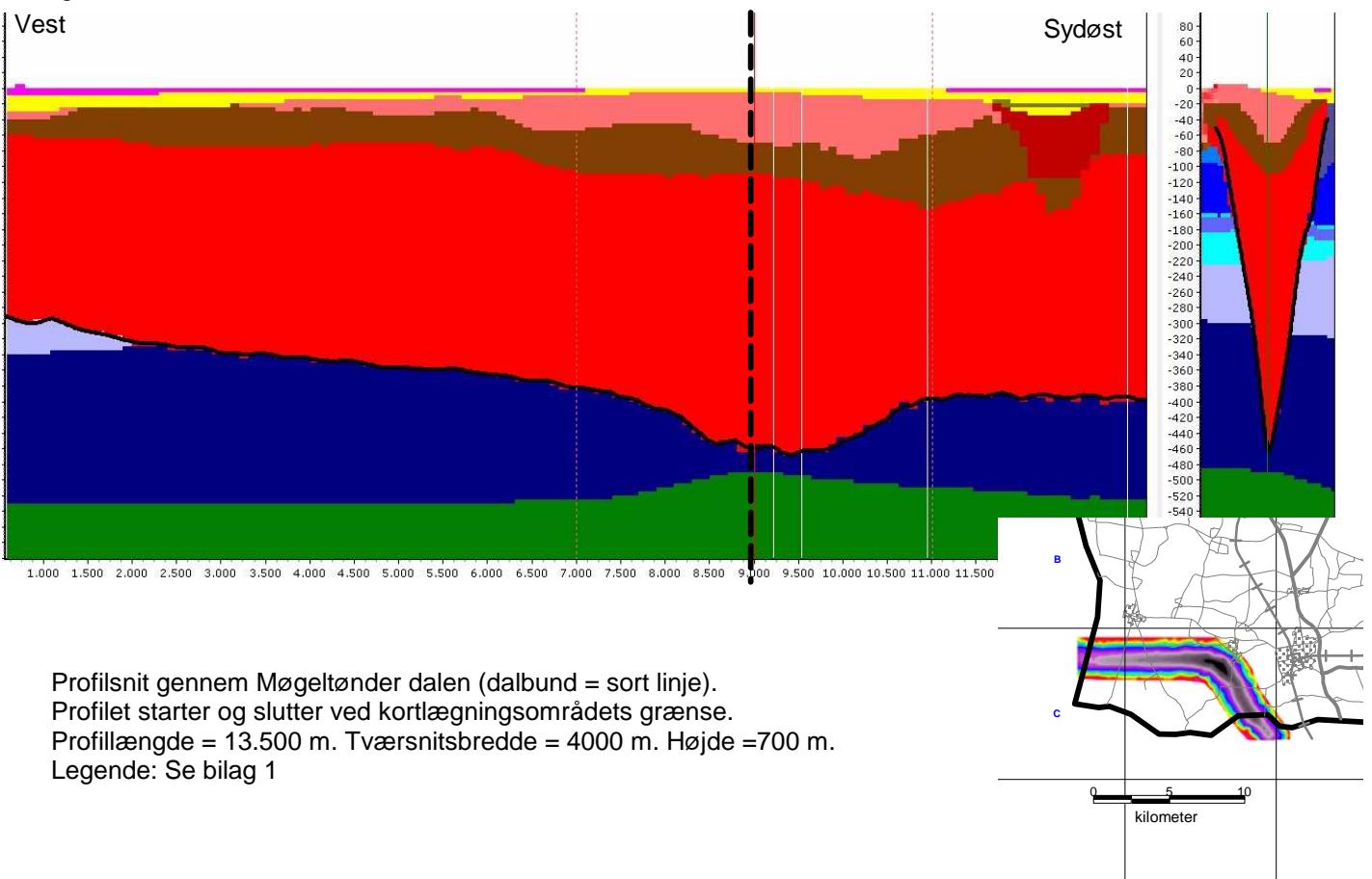
Profillængde = 10.500 m. Tværsnitsbredde = 4000 m. Højde = 700 m.

Legende: Se bilag 1

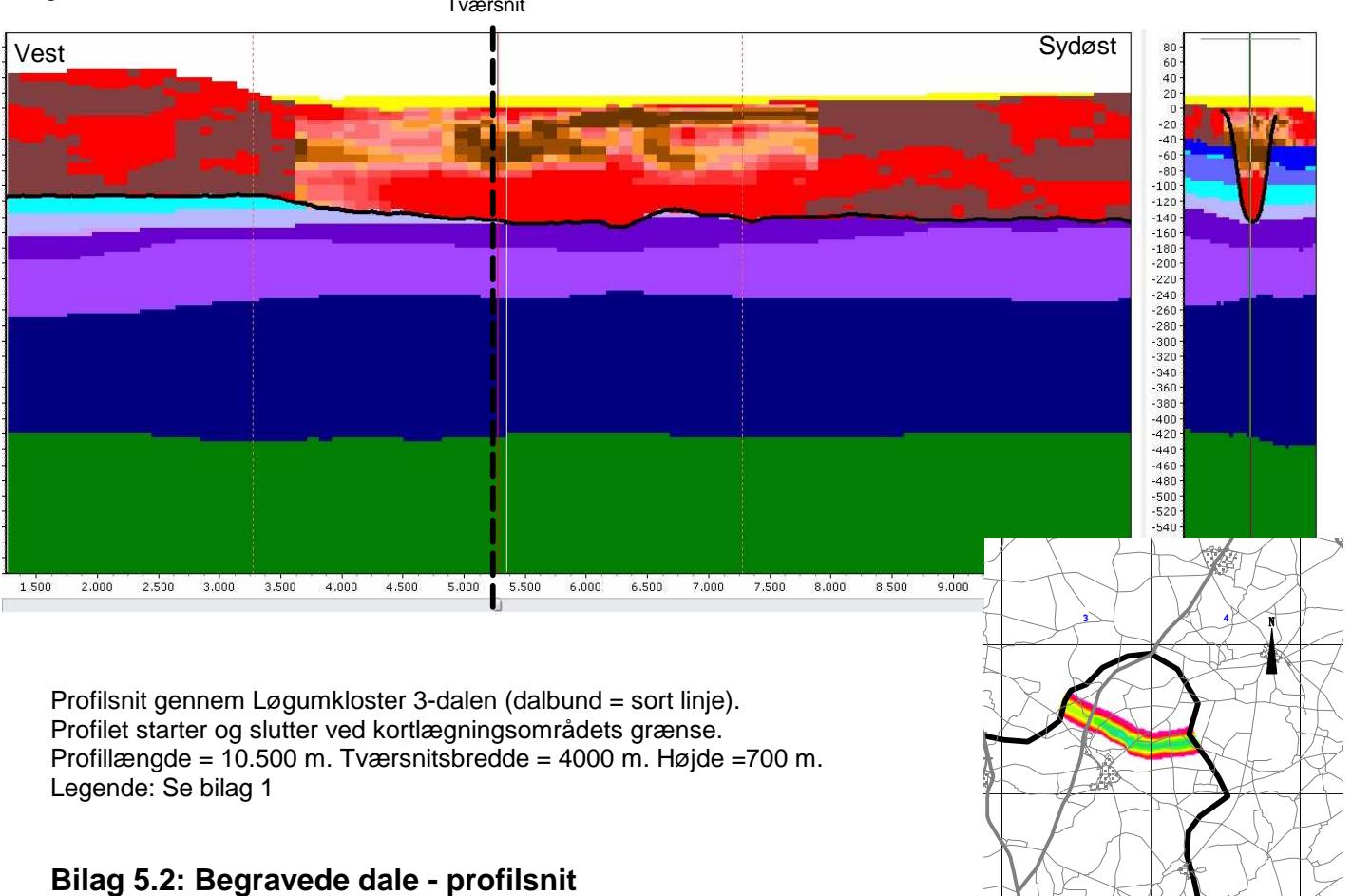


Bilag 5.1: Begravede dale - profilsnit

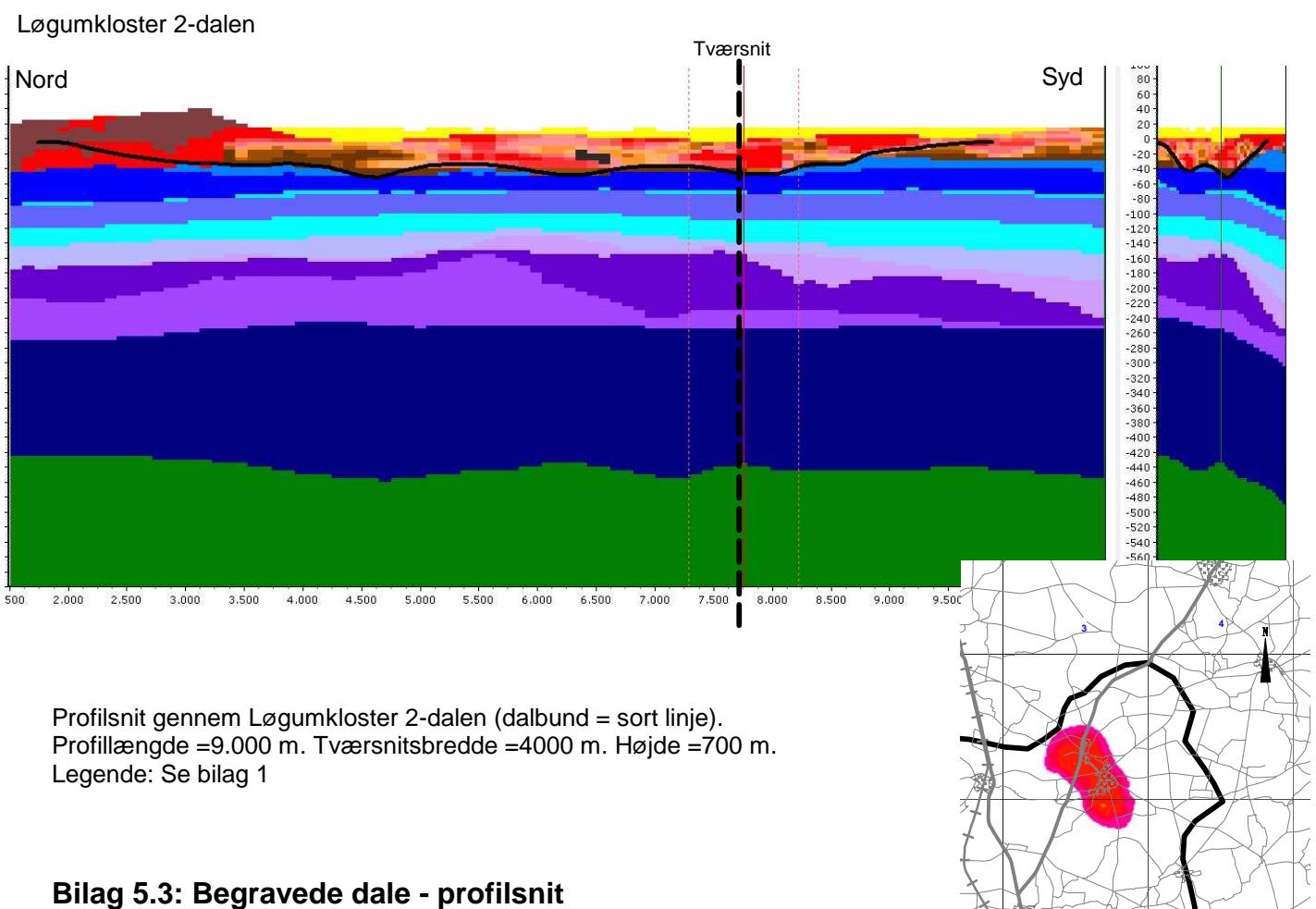
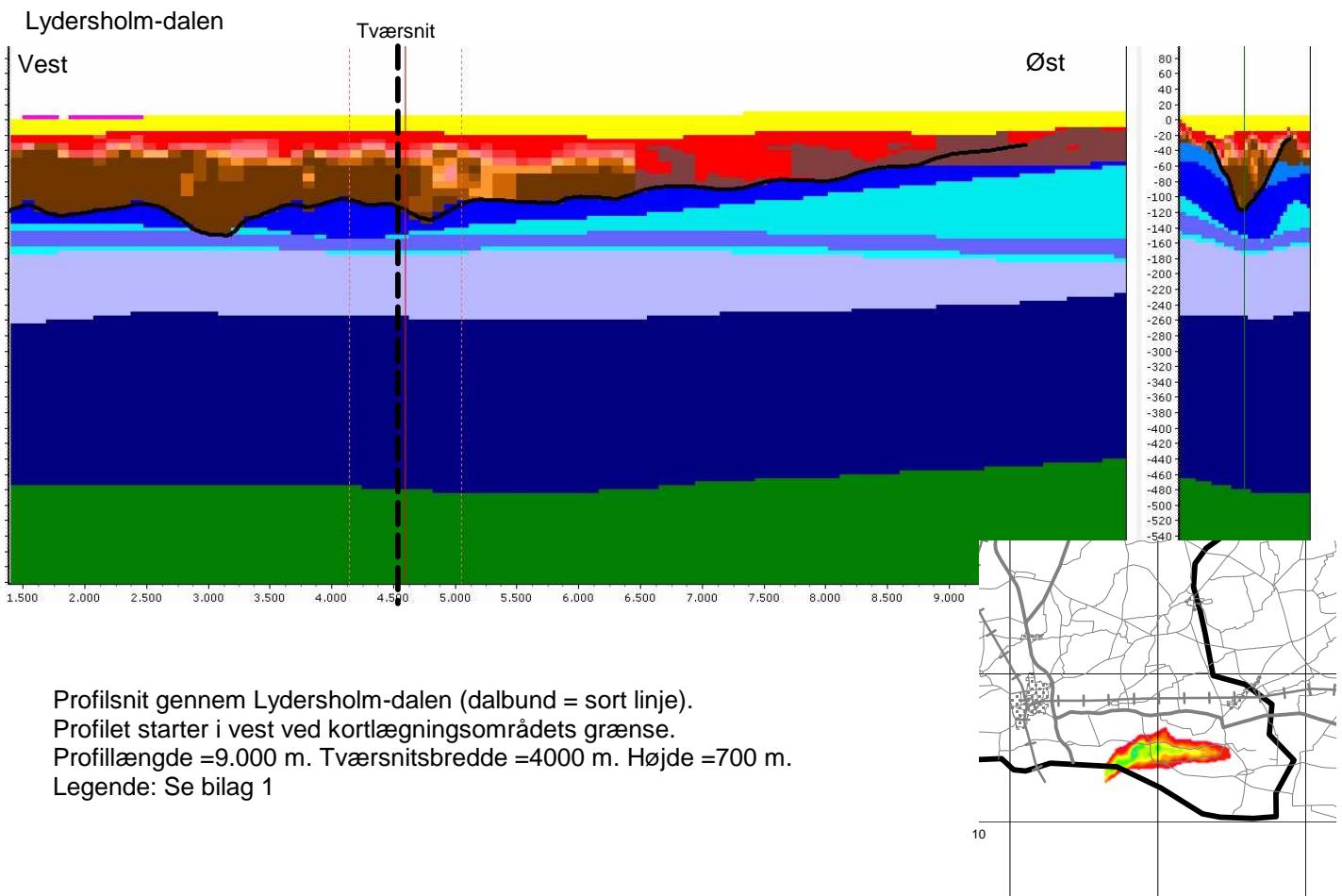
Møgeltønder-dalen



Løgumkloster 3-dalen

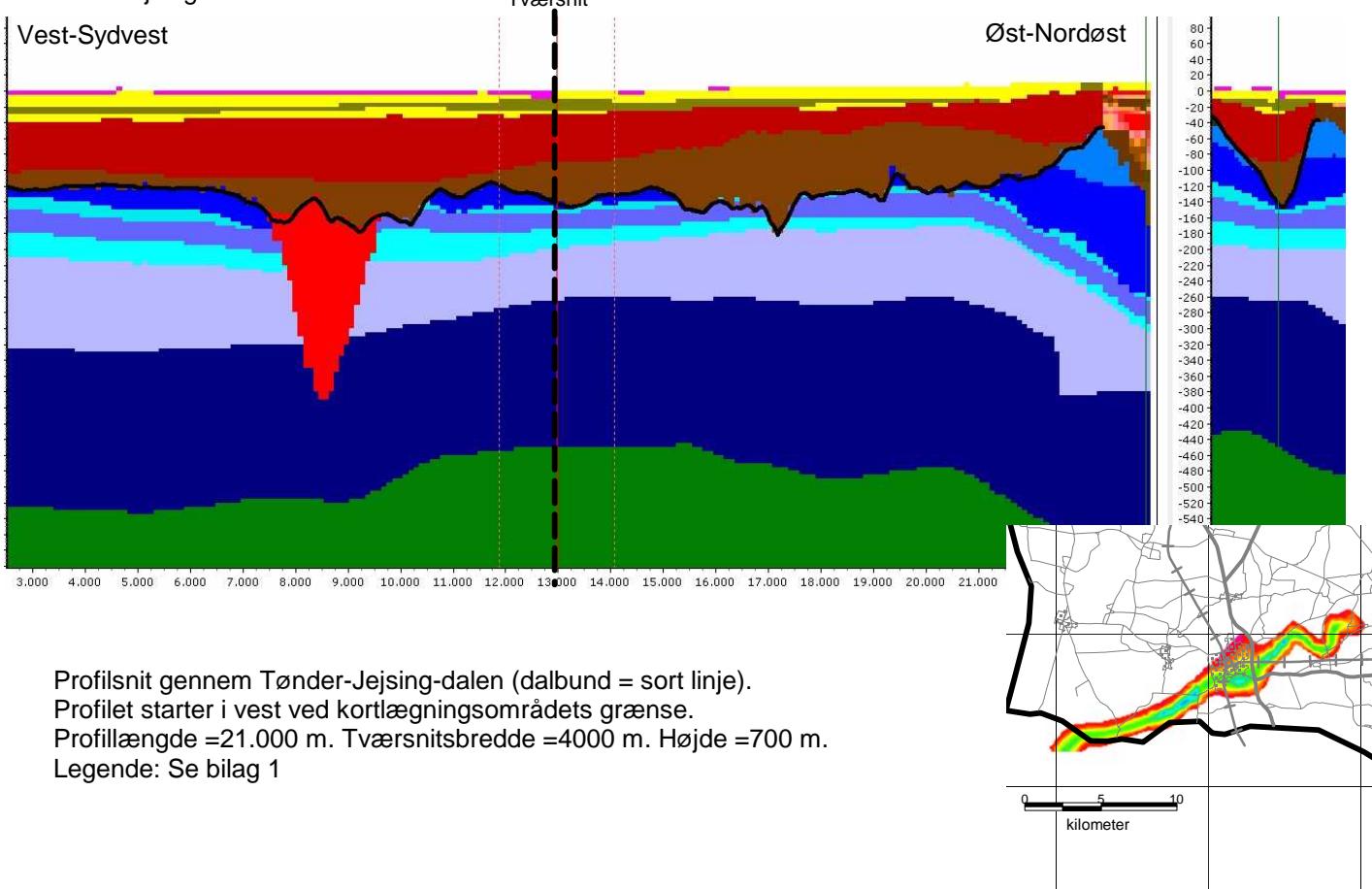


Bilag 5.2: Begravede dale - profilsnit

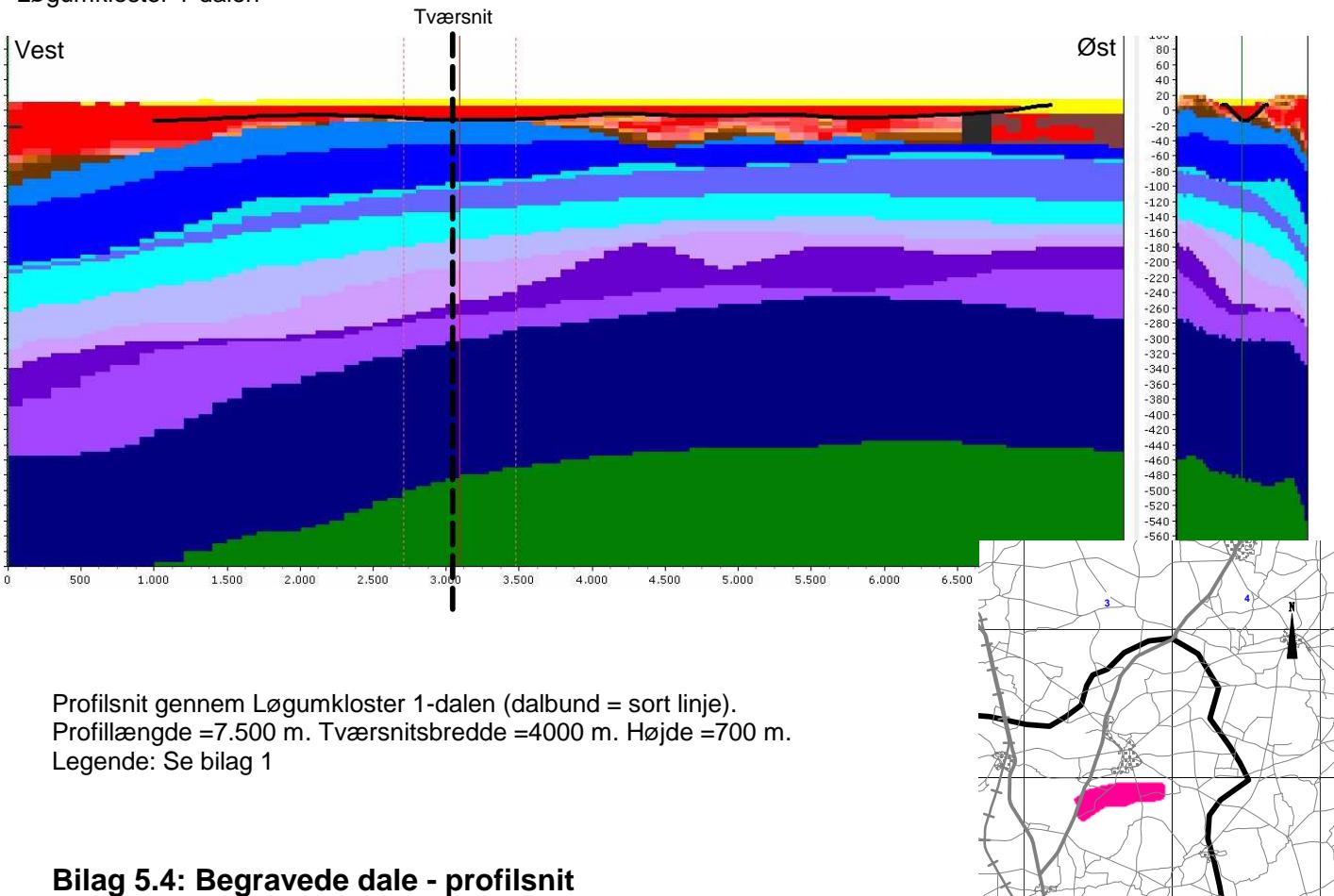


Bilag 5.3: Begravede dale - profilsnit

Tønder-Jejsing-dalen



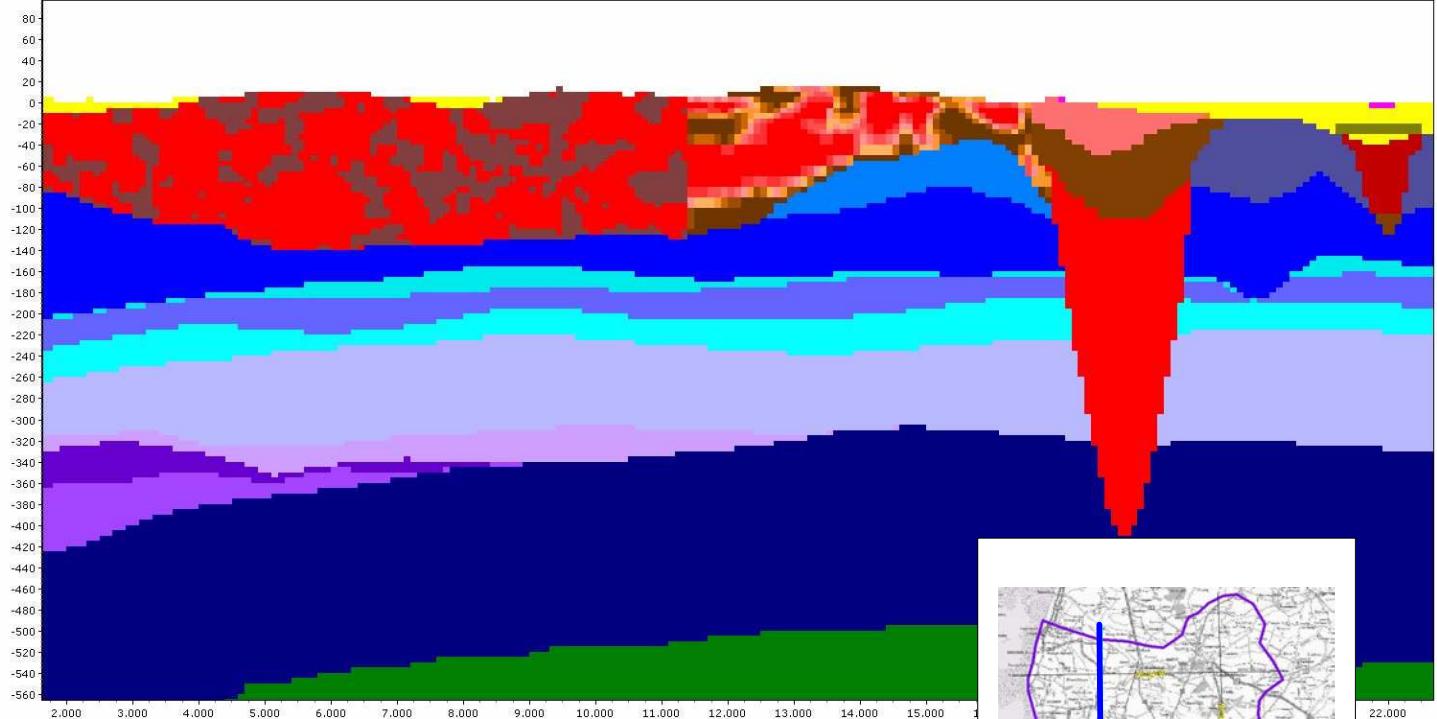
Løgumkloster 1-dalen



Bilag 5.4: Begravede dale - profilsnit

Nord

Syd



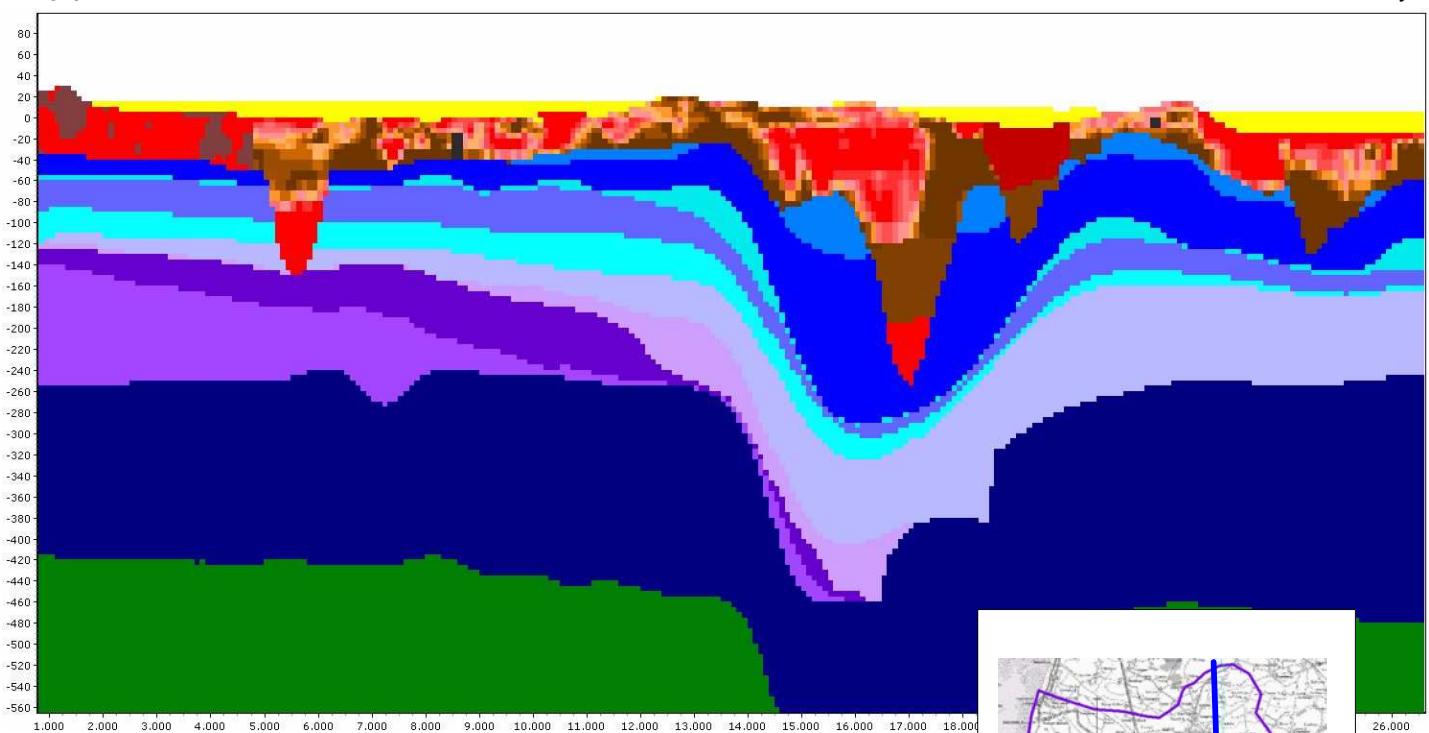
Nord-sydligt profilsnit gennem voxelmodellen i
kortlægningsområdets vestlige del.

Profillængde= 21.000 m. Højde= 700m.

Legende: Se bilag 1

Nord

Syd



Nord-sydligt profilsnit gennem voxelmodellen i
kortlægningsområdets østlige del.

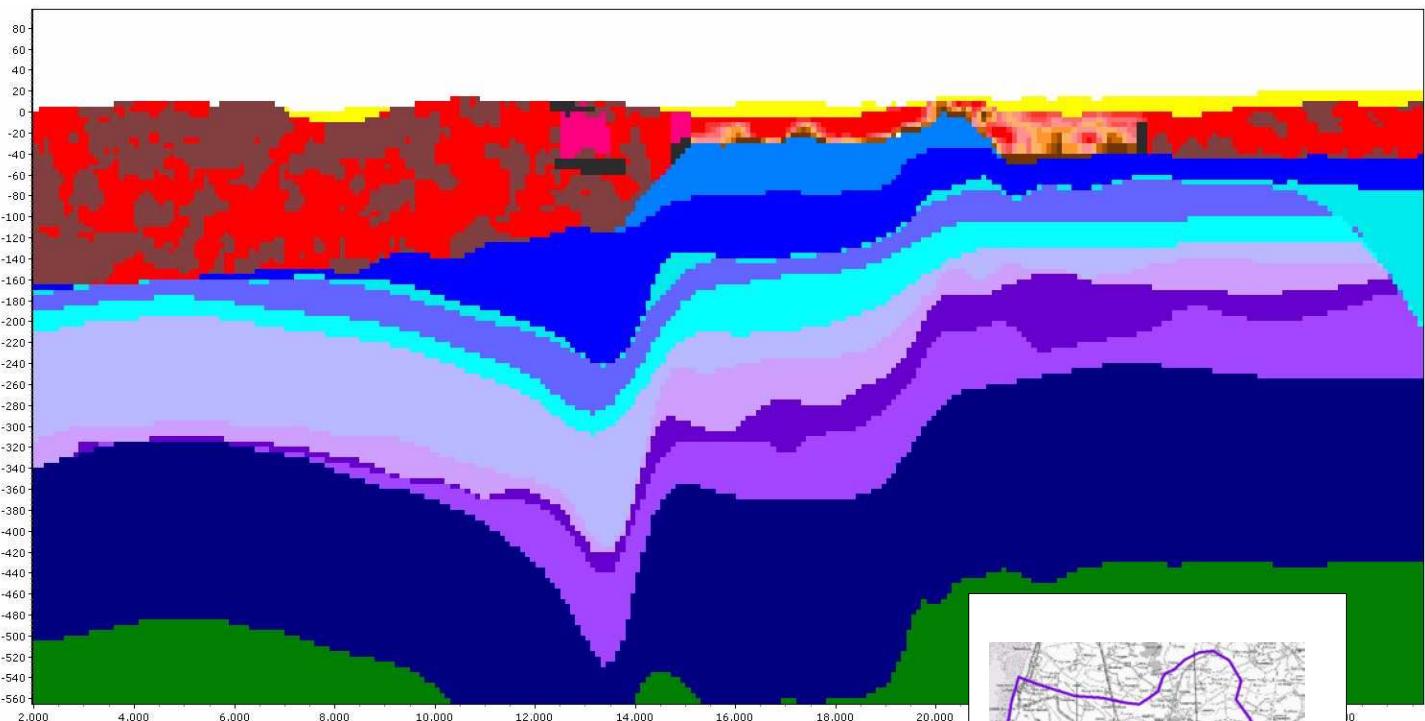
Profillængde= 26.400 m. Højde= 700m.

Legende: Se bilag 1

Bilag 6.1: Profilsnit igennem voxelmodellen, NS

Vest

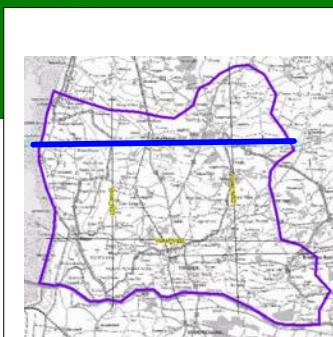
Øst



Vest-østligt profilsnit gennem voxelmodellen i
kortlægningsområdets nordlige del.

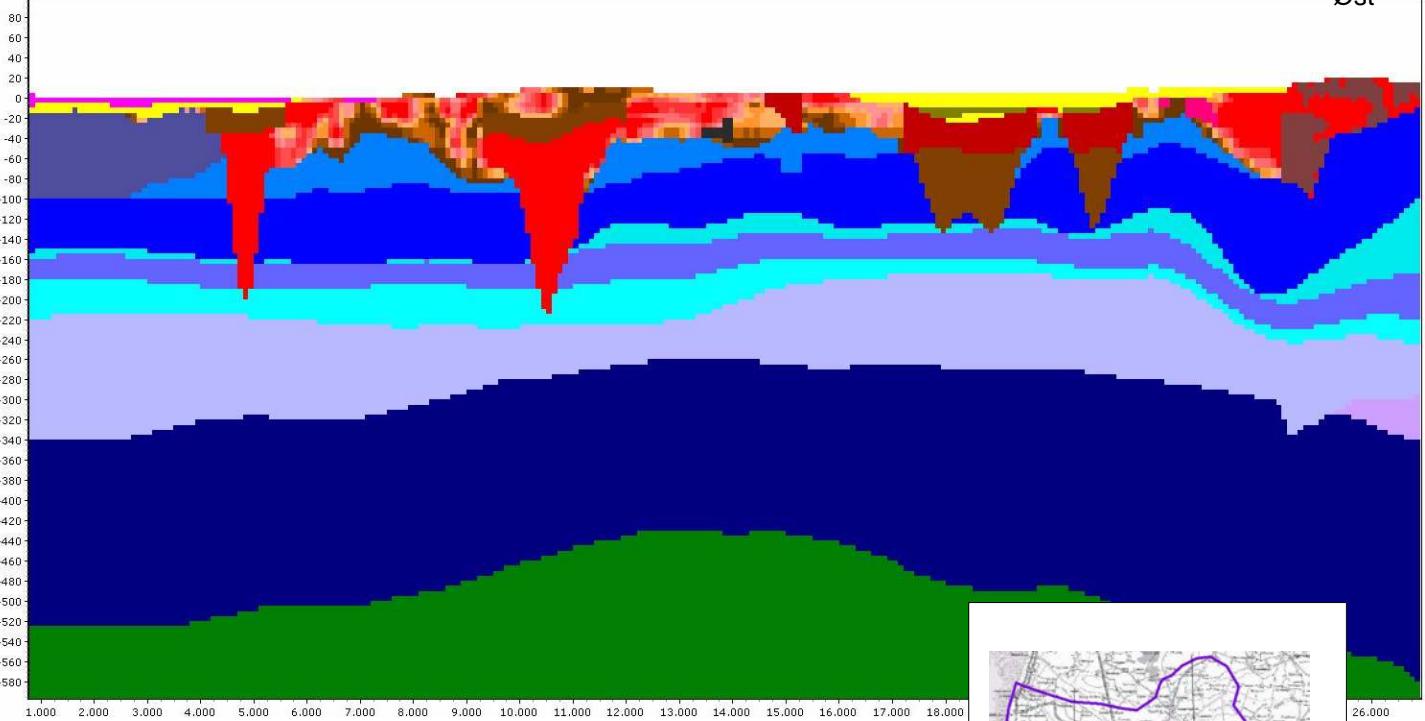
Profillængde= 29.500 m. Højde= 700m.

Legende: Se bilag 1



Vest

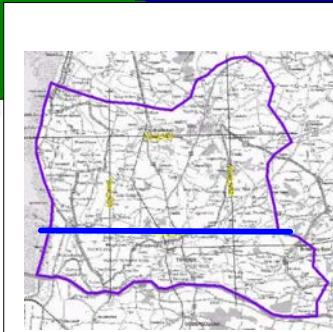
Øst



Vest-østligt profilsnit gennem voxelmodellen i
kortlægningsområdets sydlige del.

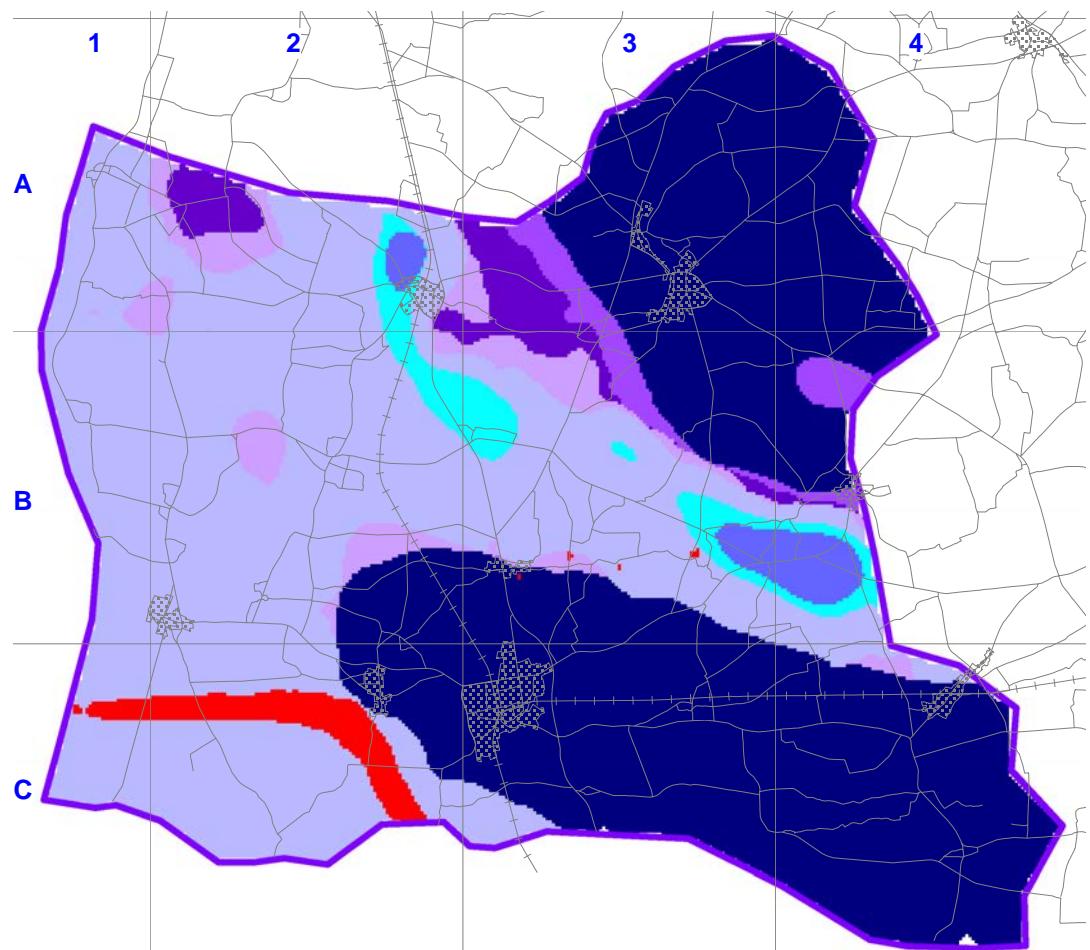
Profillængde= 27.000 m. Højde= 700m.

Legende: Se bilag 1

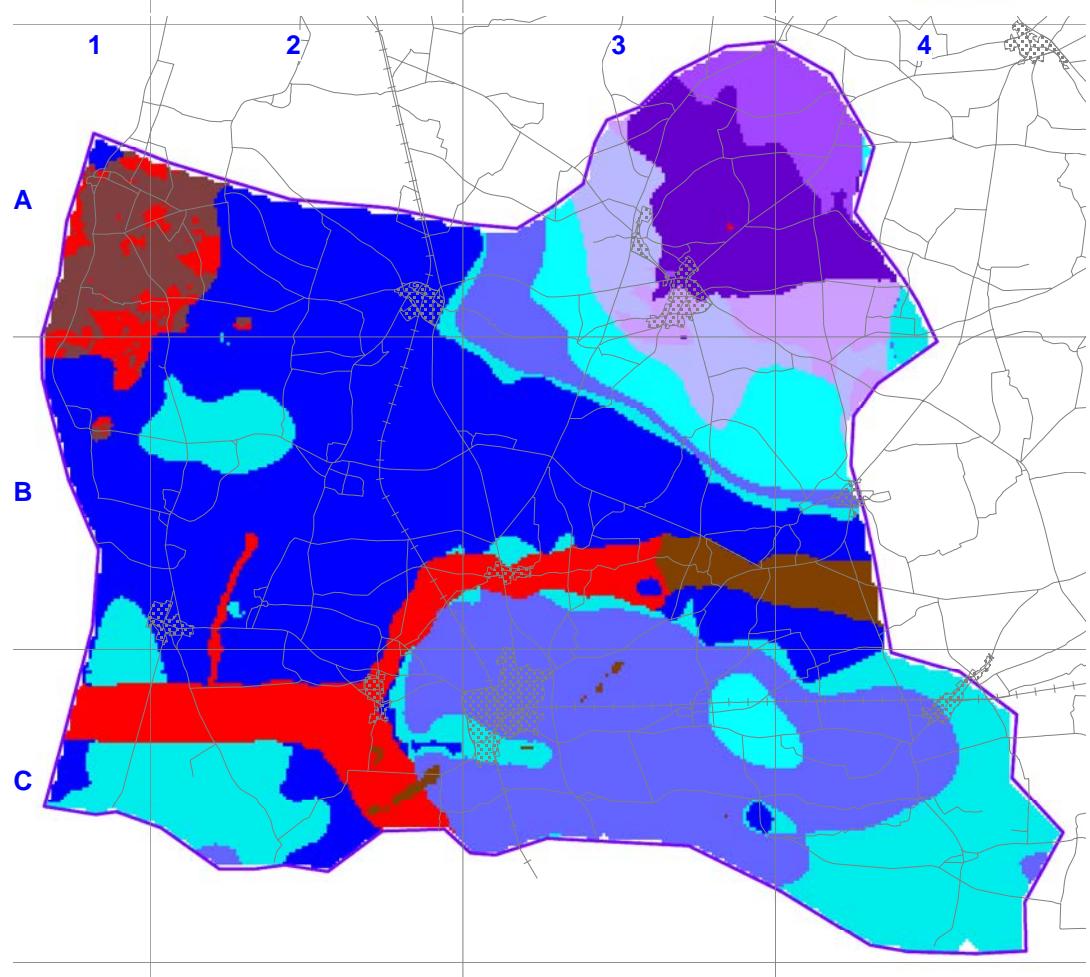


Bilag 6.2: Profilsnit igennem voxelmodellen, ØV

Voxelmodel
Kote -297,5
Legende: Se bilag 1

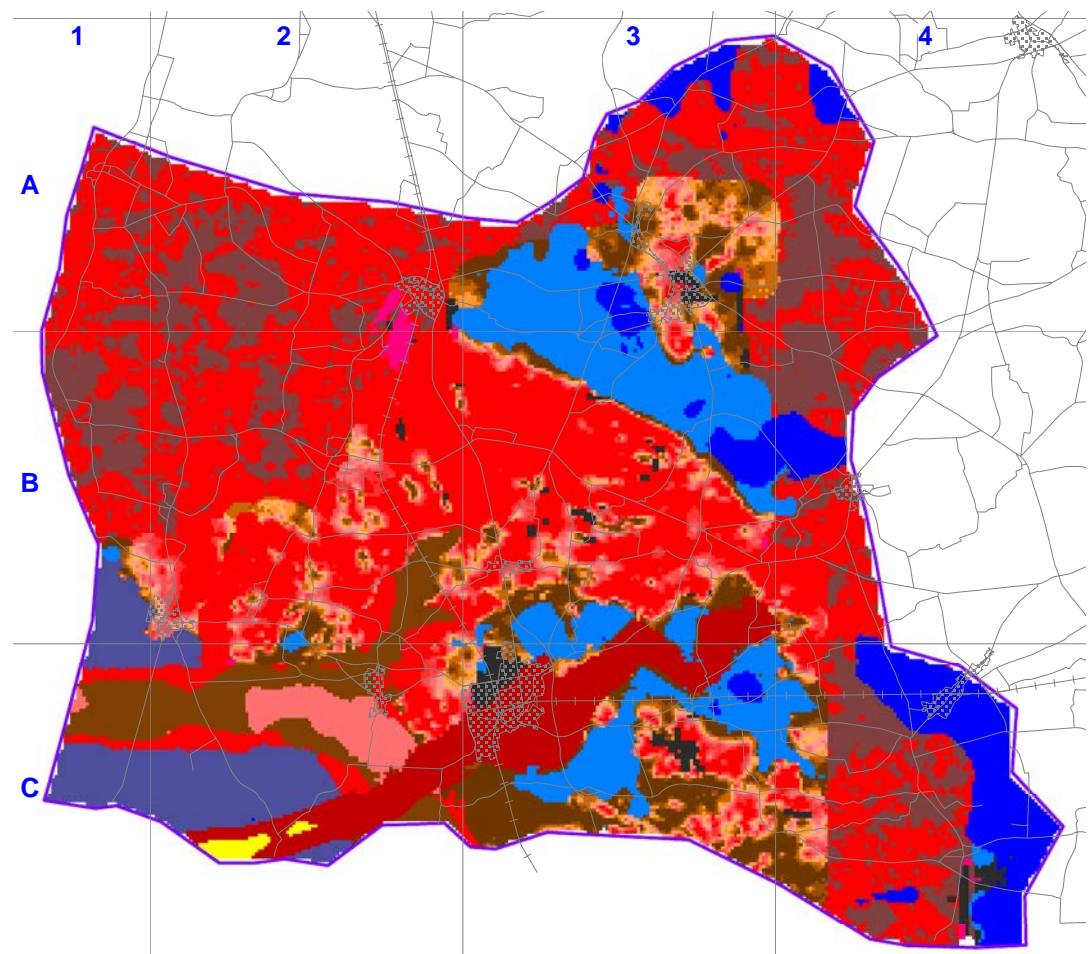


Voxelmodel
Kote -152,5
Legende: Se bilag 1

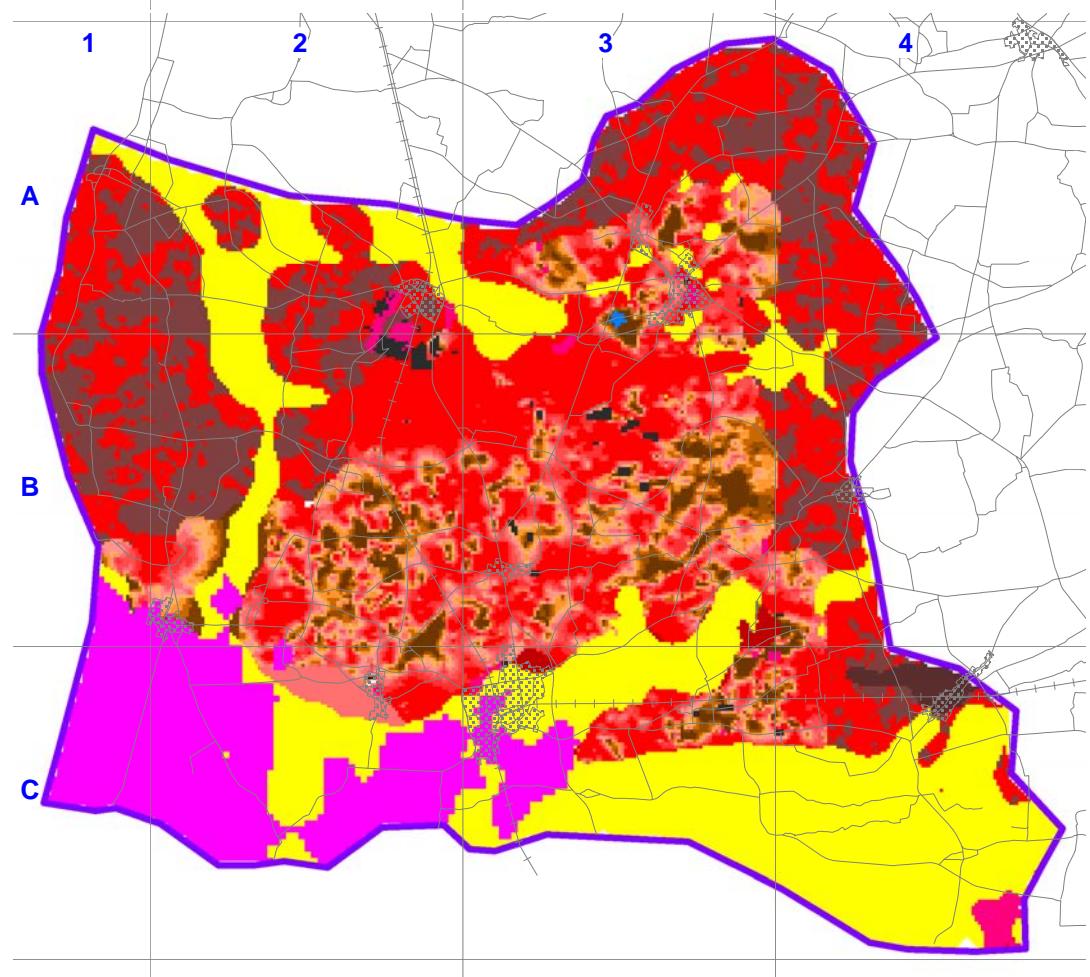


Bilag 7.1: Profilsnit igennem voxelmodellen, dybe del

Voxelmodel
Kote -37,5
Legende: Se bilag 1



Voxelmodel
Kote -2,5
Legende: Se bilag 1



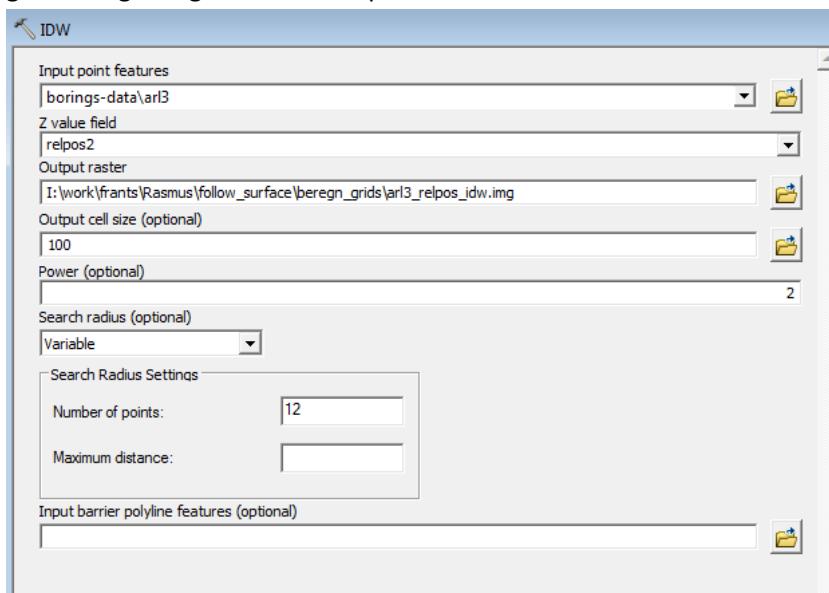
Bilag 7.2: Profilsnit igennem voxelmodellen, øvre del

GV zoner	VALUE	CODE	Color	TEXT	Quat./Pre-Quat.	Sand/Clay	High/LowK	Symbol	Number of cells	Number of cells	No of cells ver2	No of cells ver2
1		id		ikke defineret voxel								
2	2	SGI		SGEMS clay	Q	C	H	QCH	208.558		210.529	
3	1	SGs		SGEMS sand	Q	S	L	QSL	251.061		253.842	
4	401	SV10		SSV 0-10%	Q	S	H	QSH	106.923		107.001	
5	402	SV20		SSV 10-20%	Q	S	H	QSH	26.697		26.699	
6	403	SV30		SSV 20-30%	Q	S	L	QSL	22.227		22.229	
7	404	SV40		SSV 30-40%	Q	S	L	QSL	20.702		20.702	
8	405	SV50		SSV 40-50%	Q	S	L	QSL	19.790		19.791	
9	406	SV60		SSV 50-60%	Q	C	H	QCH	19.849		19.854	
10	407	SV70		SSV 60-70%	Q	C	H	QCH	19.924		19.942	
11	408	SV80		SSV 70-80%	Q	C	H	QCH	20.642		20.648	
12	409	SV90		SSV 80-90%	Q	C	L	QCL	23.144		23.158	
13	410	SV100		SSV_100%	Q	C	L	QCL	64.812		64.582	
4-9		SV10_60		SSV_0-60%	Q	S	L	QSL		216.188		216.276
10-13		SV60_100		SSV_60-100%	Q	C	H	QCH		128.522		128.330
14	571	PG		Post_glacial	Q	S	L	QSL	8.245		8.245	
15	572	PS		Sandur	Q	S	H	QSH	91.581		93.893	
17	574	EM		Eem	Q	C	L	QCL	3.962		3.962	
18	586	MADe		MaadeGroup_deforme	P	C	L	PCL	107.401		107.543	
19	576	MA		MaadeGroup	P	C	L	PCL	539.486		545.277	
20	577	OD3		Odderup_S3	P	S	L	PSL	175.044		190.237	
21	578	AR3		Arnum_L3	P	C	H	PCH	286.813		289.444	
22	579	OD2		Odderup_S2	P	S	L	PSL	286.982		287.806	
23	580	AR2		Arnum_L2	P	C	H	PCH	819.901		824.874	
24	585	KLI10		Klintinghoved_Clay_Upper_10	P	C	H	PCH	128.373		128.373	
25	581	BAS		Bastrup_Sand	P	S	H	PSH	116.329		116.329	
26	582	KLI9		Klintinghoved_Clay_Lower_9	P	C	H	PCH	233.708		233.708	
27	601	qs		Quaternary_Sand	Q	S	H	QSH	1.220		1.220	
28	602	ql		Quaternary_Clay	Q	C	H	QCH	6.028		6.028	
29	590	LG1_DS		Abild_Valley_Sand	Q	S	H	QSH	50.860		50.832	
30	591	Clay		Abild_Valley_Clay	Q	C	L	QCL	34.957		34.861	
31	593	SAND		Hoejær_Valley_Sand	Q	S	L	QSL	7.698		7.666	
32	592	Clay		Hoejær_Valley_Clay	Q	C	H	QCH	2.898		2.898	
33	595	Clay		Toender_Jejs_Valley_Clay	Q	C	H	QCH	11.385		12.469	
34	596	SAND		MoegelToender_Valley_Sand	Q	S	H	QSH	113.477		113.875	
35	597	Clay		MoegelToender_Valley_Clay	Q	C	L	QCL	19.801		20.587	
36	599	SAND		Toender_Jejs_Valley_Sand_Upper	Q	S	L	QSL	46.349		32.536	
37	603	QsedSA		QuartenarySediments_Saltwater	Q	C	L	QCL	37.524		37.623	
38	598	SAND		LoegumKloster1_Valley_Sand	Q	S	H	QSH	1.467		1.467	
39	622	Q_MC		Q_MC	Q	C	H	QCH	1.205		1.205	
40	625	SAND		MoegelToender_Valley_Upper_Sand	Q	S	H	QSH	0		12.072	
Bilag 8											3.974.007	

Procedure til delvist automatiseret rutine for modellering af mellemliggende lagflader

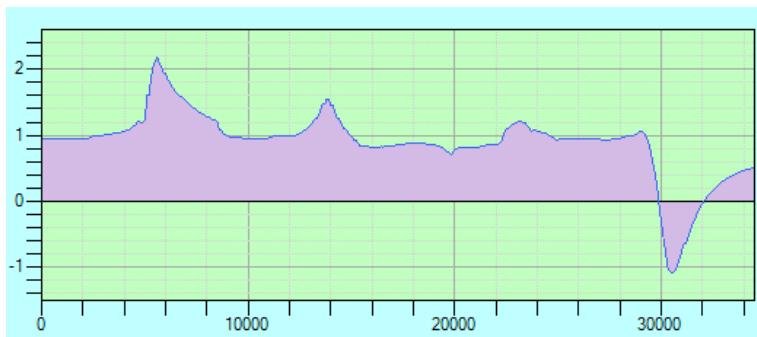
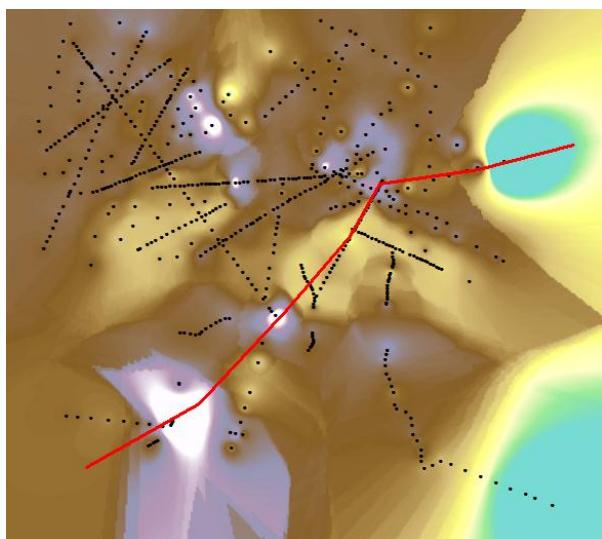
Denne procedure er benyttet ved generering af flader mellem to eksisterende referenceflader – ”gulv” og ”loft”. Formålet er at skabe en flade, der honorerer allerede afsatte fladetolkningspunkter på seismiske profiler og i enkelte borer, men hvor der, for at skabe en rumlig flade, ikke er afsat punkter imellem disse. Den skabte flade skal således honorere de allerede afsatte, men spredt beliggende, sikre eller relativt sikre tolkningspunkter i rummet mellem de to referenceflader og samtidig følge de samme overordnede rumlige variationer som referencefladerne følger. Sidstnævnte som en følge af at lagfladen der skal skabes er en del af en samlet lagserie (inklusive loft- og gulv-fladerne) med samme overordnede rumlige variationer. Proceduren er udviklet og anvendes for at undgå at digitalisering af usikre tolkningspunkter i rummet, hvilket er tidskrævende, og så længe tolkningen bag punkterne er usikker betyder automatiseringen kun minimalt for den endelige model. Proceduren er udviklet af Frants von Platen-Hallermund, GEUS og gennemføres i ArcGIS. Proceduren følger disse trin:

1. Til tolkningspunkterne fra et enkelt lag overføres værdierne fra gulv og loft vha. ExtractMultipleValuesToPoints.
2. Den aktuelle flades relative position melle gulv og loft beregnes og puttes i et nyt felt kaldet ”relpos”. Formlen er $\text{relpos} = (\text{z} - \text{gulv}) / (\text{loft} - \text{gulv})$. I principippet skal dette tal ligge mellem 0 og 1, men i praksis kan det godt gå ud over dette. Der rettes ikke på disse ”fejl” nu – først når den nye flade er beregnet.
3. Der interpoleres nu en flade ud fra de beregnede relpos. Cellestørrelsen skal være som den mindste af gulv- og loft-griddene (her 100 m). Bevar øvrige defaults. Der benyttes IDW, da denne er god til at gå langt væk fra datapunkterne.



Det er vigtigt her at sætte Environment til at Processing Extent bliver hele området.

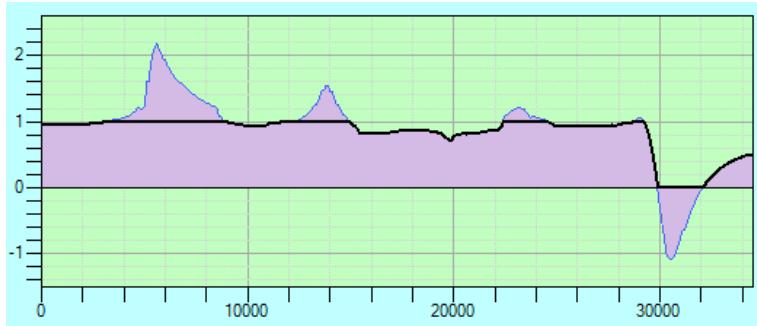
4. Dette kan godt give et mærkelig resultat. I principippet skal data ligge mellem 0 og 1. Der skæres af, så alt under 0 og over 1 fjernes.



5. Formlen for manipulation bliver:

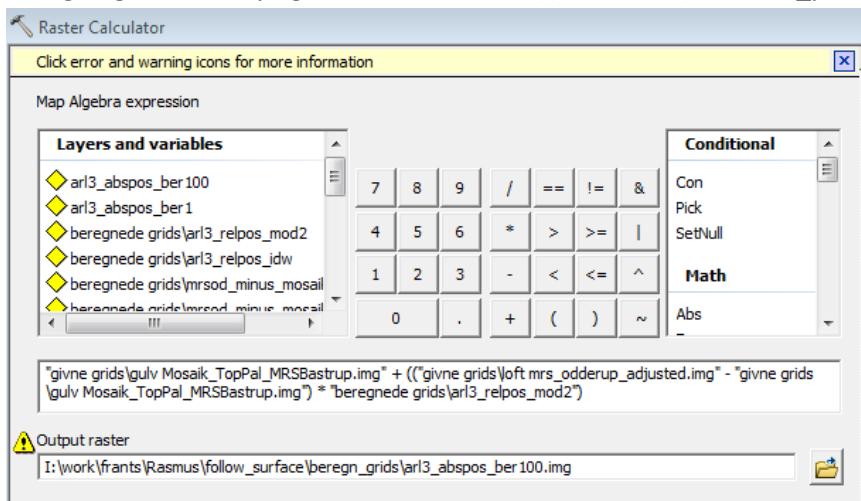
```
Con((Con(("arl3_renpos_idw" < 0), 0, "arl3_renpos_idw") > 1), 1, Con(("arl3_renpos_idw" < 0), 0, "arl3_renpos_idw"))
```

- og det giver den sorte linie vist nedenfor:

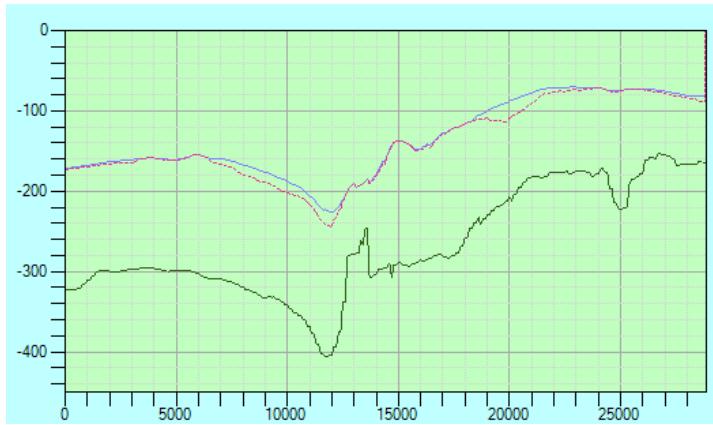


6. Det er en god ide at alle grids har samme gridstørrelse og alignet. Et reference-grid kan bruges til dette.

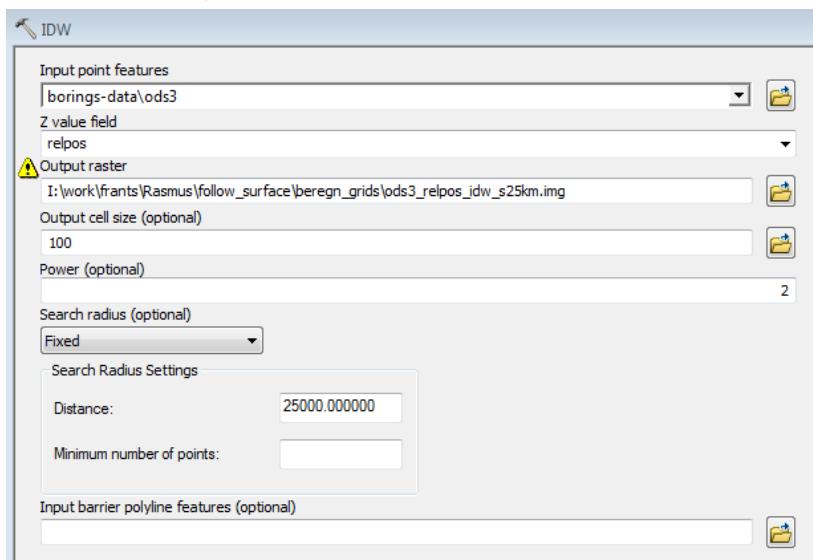
7. Beregningen af det nye grid bliver så: Gulv + ((Loft – Gulv) * relativ_position)



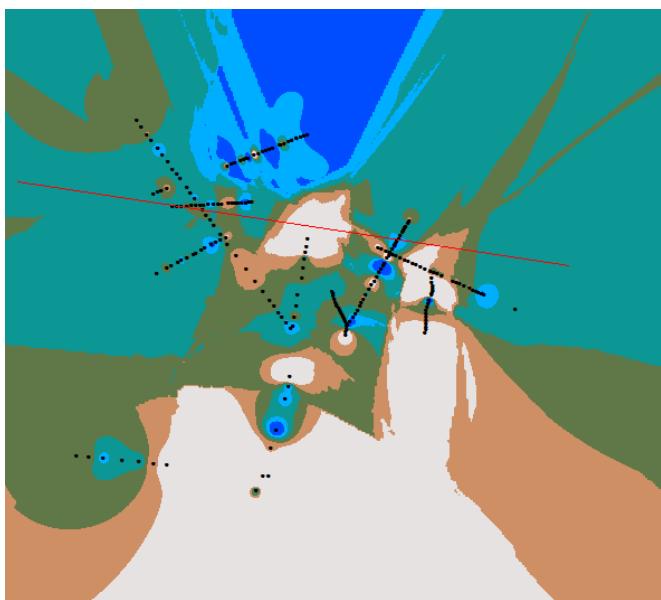
- og det ser sådan ud for et lag, der meget af tiden ligger helt op til loftet:



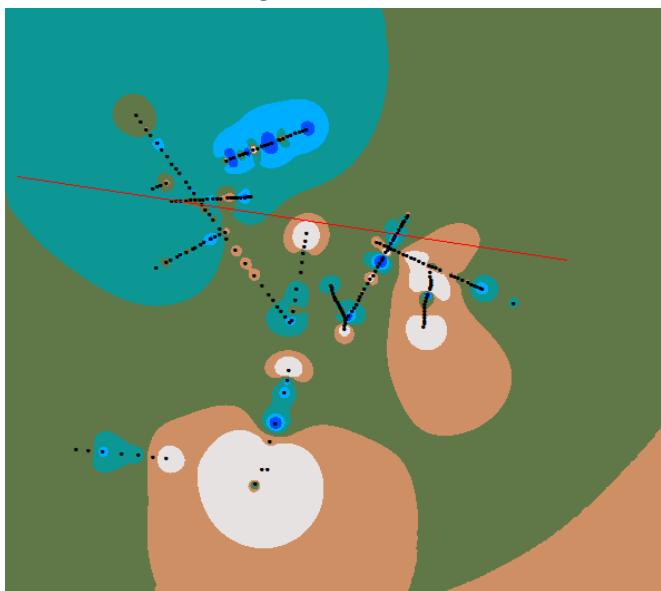
8. M.h.t. brug af IDW, så kendes de optimale settings for search parametre ikke. Det kan være default som vist ovenfor, eller denne:



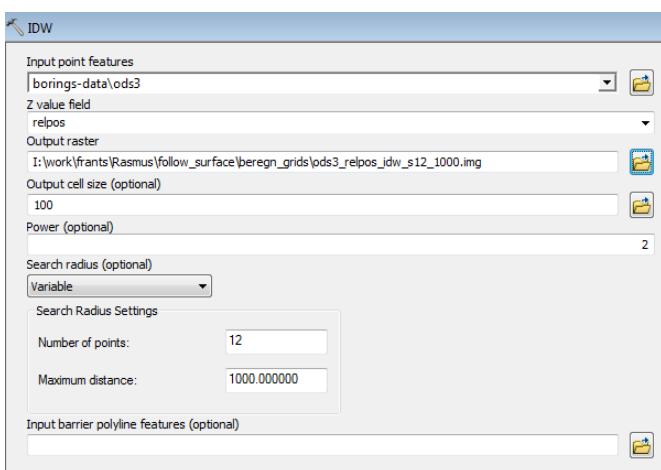
som giver et nænere billede. Default ser sådan ud:



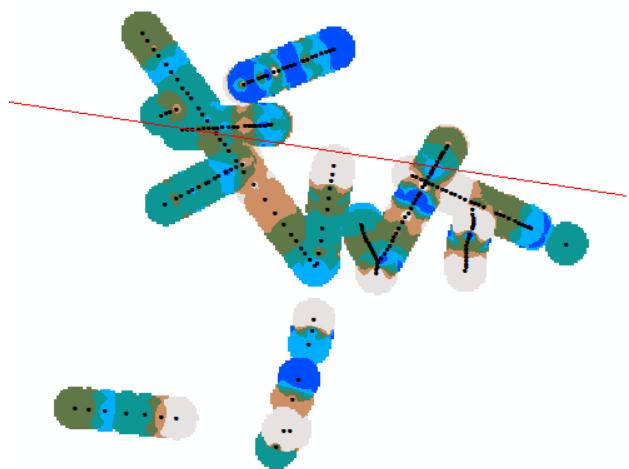
- mens search 25 km giver dette:



- mens denne:

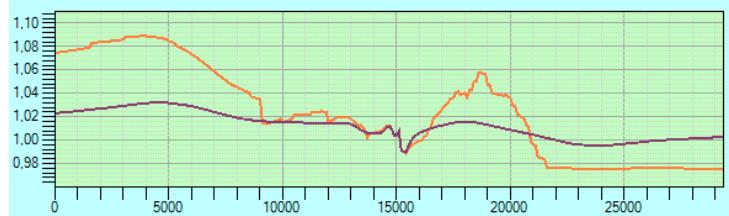


- giver dette:

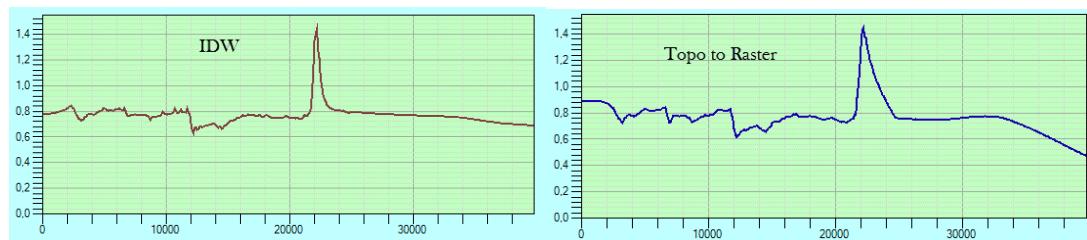
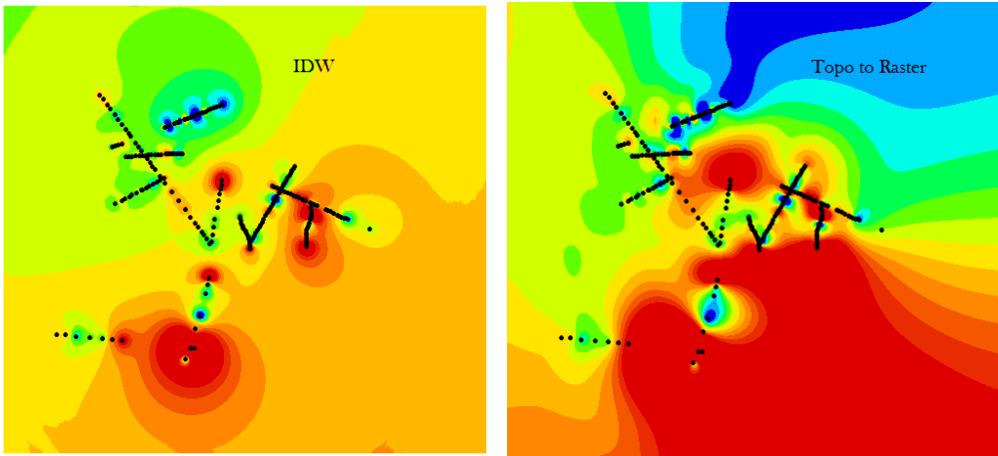


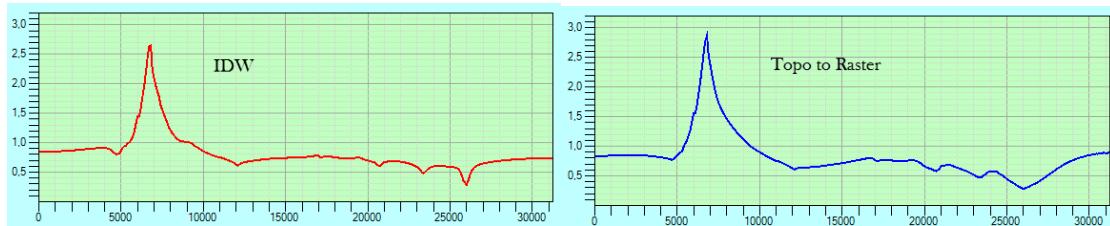
- og det duer ikke!

Forskellen på de 2 første ser sådan ud i profil (den mest rolige er den med 25 km søge radius):



9. Hvis der prøves med Topo to Raster i stedet. Her ses forskellen i kort og i profilsnit:





10. Alle grids beregnes først på denne måde, og så til sidst laves en kørsel, hvor der ned igennem lagene flyttes nedad hvis sekvensen ikke passer. Efter denne ”nedtrykning” kan det se således ud:

