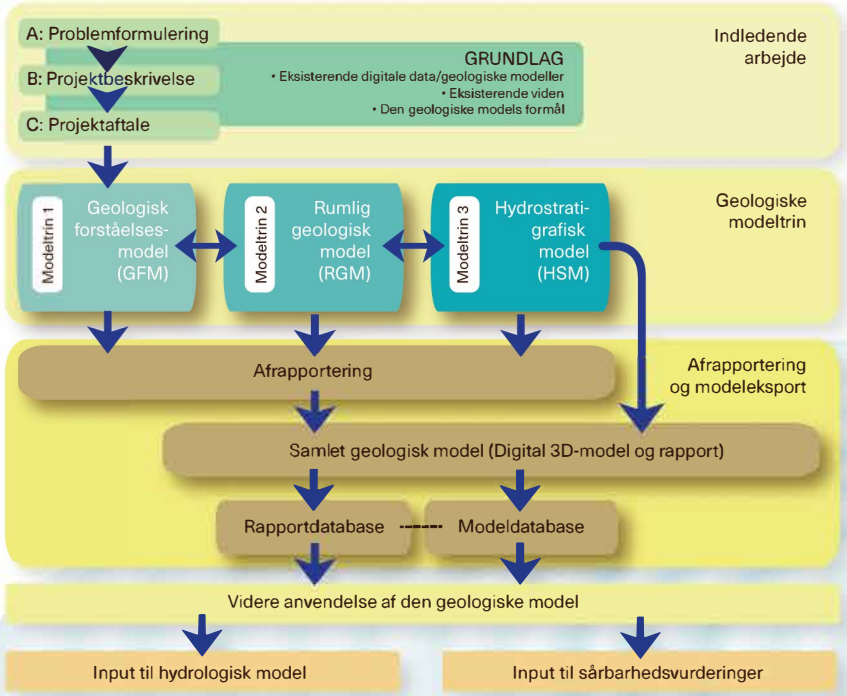
Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

Peter B.E. Sandersen, Flemming Jørgensen, Anders J. Kallesøe & Ingelise Møller

GEO-VEJLEDNING 2018/1



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
ENERGI-, FORSYNINGS- OG KLIMAMINISTERIET

GEUS

Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

G E O - V E J L E D N I N G 2018/1

Peter B.E. Sandersen
Flemming Jørgensen
Anders J. Kallesøe
& Ingelise Møller

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
KLIMA- OG ENERGIMINISTERIET

G E U S

Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

G E O - V E J L E D N I N G 2018/1

GEUS Særudgivelse

Repro: GEUS

Oplag: 25

Juni 2018

Print: ISBN 978-87-7871-496-1
Online: ISBN 978-87-7871-497-8

Vejledningen kan hentes på nettet: www.geovejledning.dk

Pris (indbundet): 200 kr.

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Øster Voldgade 10
DK-1350 København K
Telefon: 38142000

E-post: geus@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med Miljøstyrelsen, Fødevare- og Miljøministeriet.

Forord

”Geo-vejledning nr. 2018/1: Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering” er en opdatering og en viderebearbejdning af den første ”Geo-vejledning 3”, der udkom i 2008 (Jørgensen et al., 2008) som en ud af i alt ni Geo-vejledninger. ”Geo-vejledning 3” har siden været anvendt som fagligt grundlag i den nationale grundvandskortlægning.

Projektgruppen der varetog udarbejdelsen af den første version af Geo-vejledningen bestod af:

- Christina Hansen
- Anker Lajer Højberg
- Birthe Eg Jordt
- Flemming Jørgensen
- Knud Erik Klint
- Margrethe Kristensen
- Niels Richardt
- Peter Sandersen

Til udarbejdelse af enkelte afsnit blev der modtaget hjælp fra John Vendelbo Frandsen samt Birgitte Hansen og Claus Ditlefsen.

Opdateringen udgør en viderebearbejdning af den første udgave, og er udført i 2017 af GEUS i tæt samarbejde med Miljøstyrelsen. Opdateringen har været fulgt af en workshop-gruppe og en følgegruppe, som ved gennemlæsning af foreløbige udgaver og ved to workshops i marts og september, har kunnet følge med i opdateringsarbejdet og har kommenteret og bidraget med input. Workshop- og følgegrupperne bestod af fagfolk fra offentlige institutioner og private virksomheder, og deres bidrag har haft stor værdi for opdateringsarbejdet. Stor tak til alle deltagere og bidragydere.

Geo-vejledningens indhold kan tilgås på internettet, hvor der også er mulighed for at kommentere på indholdet. En redaktør vil løbende foretage opdateringer af indholdet på baggrund af indkomne kommentarer.

Arbejdsgruppen hos Miljøstyrelsen bestod af:

- Philip Grinder Pedersen
- Anders Pytlich
- Elise Schmidt

Opdateringen af Geo-vejledningen er hos GEUS udført af:

- Peter B.E. Sandersen
- Flemming Jørgensen
- Anders Juhl Kallesøe
- Ingelise Møller

Deltagere på workshops:

- Theis Raaschou Andersen, VIA Horsens
- Charlotte Bamberg, Skanderborg Kommune
- Lotte Banke, Region Midtjylland

- Jens Demant Bernth, Orbicon
- Ole Frits Nielsen, Cowi
- Dennis Noe, Struer Kommune
- Tom Martlev Pallesen, I-Gis
- Bianca Pedersen, Rambøll
- Niels Richardt, Rambøll
- Lars Holm Thomsen, Rambøll
- Gitte Hollenbo Westergaard, Niras
- Thomas Breum Andersen, GEO

Følgegruppen bestod af:

- Ole Frits Nielsen, Cowi
- Tom Martlev Pallesen, I-Gis
- Niels Richardt, Rambøll
- Theis Raaschou Andersen, VIA Horsens
- Jens Demant Bernth, Orbicon

Indhold

0. Indledning 9

0.1 Terminologi 10
0.2 Hvad består en geologisk model af? 11
0.3 Opbygningen af Geo-vejledningen 11

1. Generelle overvejelser inden modelleringen 13

1.1 Indledende overvejelser før modelopstillingen 13
1.2 Problemformulering 14
1.2.1 Formål og ambitionsniveau 14
1.2.2 Modelområde og datagrundlag 15
1.2.3 Særlige krav til modelopgavens løsning 16
1.2.4 Samlet problemformulering 17
1.3 Projektbeskrivelsen 18
1.3.1 Den geologiske modellering 18
1.3.2 Sagsstyring, dokumentation og afrapportering 19
1.4 Samarbejde om den geologiske modellering 19
1.4.1 Intern håndtering af modelprojektet 20
1.4.2 Samarbejde med opdragsgiveren 20
1.4.3 Samarbejde mellem institutioner 21
1.5 Fremtidig anvendelse af de geologiske modeller 22

2. Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling 23

2.1 Indledning 23
2.2 Modelarbejdets trin 24
2.3 Geologisk forståelsesmodel (Modeltrin 1) 27
2.3.1 Eksisterende geologisk viden og fortolkninger 27
2.3.2 Udarbejdelsen af den geologiske forståelsesmodel 29
2.3.3 Fra den geologiske forståelsesmodel til den rumlige geologiske model 32
2.4 Rumlig geologisk model (Modeltrin 2) 32
2.4.1 Geologiske tolkninger 33
2.4.2 Det geologiske datagrundlag 34
2.4.3 Modelleringsteknik og -procedurer 35
2.4.4 Dokumentation, kvalitetssikring og afrapportering 41
2.4.5 Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model 42
2.5 Hydrostratigrafisk model (Modeltrin 3) 42
2.5.1 Det hydrostratigrafiske datagrundlag 42
2.5.2 Modelleringsteknik og -procedurer 43
2.5.3 Dokumentation, kvalitetssikring og afrapportering 45
2.5.4 Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel 46
2.6 Overvejelser omkring prioritering af arbejdsindsatsen i de tre modeltrin 48
2.6.1 Sammenlægning eller udeladelse af modeltrin 48
2.6.2 Fokus på den rumlige geologiske model 49

3. 3D geologisk modellering - Data 53

3.1 Geologiske og topografiske data 53
3.1.1 Boredata 53
3.1.2 Informationer fra blotninger 64
3.1.3 Stratigrafiske data 66
3.1.4 Jordarts- og jordbundsdata 71
3.1.5 Topografiske data og geomorfologiske tolkninger 75
3.2 Geofysiske data 82
3.2.1 Refleksionsseismiske data 82
3.2.2 TEM-data 84
3.2.3 Geoelektriske data 91
3.2.4 Geofysiske borehulslogs 99
3.2.5 Andre geofysiske data 106
3.3 Andre data 110
3.3.1 Hydrologiske data 110
3.3.2 Kemiske data (grundvands- og sedimentkemi) 116

4. 3D geologisk modellering - Modelleringsprocedurer 123

4.1 3D modelleringssoftware 123
4.1.1 Krav til 3D modelleringssoftware 123
4.1.2 GeoScene3D 124
4.2 Modelafgrænsning 128
4.2.1 Problemstilling 128
4.2.2 Fastlæggelse af modelafgrænsningen 129
4.3 Prioritering og visualisering af data 131
4.3.1 Dataprioritering 132
4.3.2 Datavisualisering 132
4.4 Interpolation af data 136
4.4.1 Interpolationsrutiner og procedurer 137
4.4.2 Iterativ arbejdsgang 138
4.5 Opdatering af eksisterende geologiske modeller 140
4.5.1 Formålet med en modelopdatering 140
4.5.2 Vurdering af eksisterende model(ler) 140
4.5.3 Strategi og arbejdsgang 142
4.5.4 Opdatering af voxel-modeller 145
4.5.5 Dokumentation af udført opdatering 146

5. 3D geologisk modellering - Modelleringsteknik 149

5.1 Lagmodellering 149
5.1.1 Profilnetværk og projektionsafstande 149
5.1.2 Punkttolkning 153
5.1.3 Profiltolkning 159
5.1.4 Horisontaltolkning 160
5.1.5 Afgrænsning af lag og lagflader 161
5.1.6 Interpolation og bearbejdning af tolkede lagflader 161

5.1.7 3D-visualisering og -tolkning 164
5.1.8 Gridmodellering 166
5.2 Voxelmodellering 167
5.2.1 Manuel voxelmodellering 168
5.2.2 Automatisk voxelmodellering 169
5.3 Modellering af deformerede lagserier 171
5.3.1 Kortlægning og zonering af glacialtektonik 171
5.3.2 3D-modellering 173
5.4 Modellering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer 175
5.4.1 Fremgangsmåde 175
5.5 Andre emner 179
5.5.1 Usikkerhedsvurderinger 179
5.5.2 Kvalitetssikring af modelarbejdet 186
5.5.3 Input til sårbarhedsvurderinger 189

6. 3D geologisk modellering - Dokumentation og afrapportering 197

6.1 Dokumentation 197
6.1.1 Indledning 197
6.1.2 Omfang af dokumentationen 198
6.2 Afrapportering 200
6.2.1 Generel beskrivelse 200
6.2.2 Rapportens indhold 200
6.2.3 Rapportens omfang 202
6.3 Det digitale slutprodukt 203
6.3.1 Indledning 203
6.3.2 GeoScene3D-projektet 204
6.3.3 Andre digitale filer 204
6.4 Eksport af modeller til modeldatabasen 205
6.4.1 Generel beskrivelse 205
6.4.2 Fremgangsmåde ved eksport af modeller til modeldatabasen 206
6.4.3 Modeller lagret i modeldatabasen 207

7. Referencer 209

0. Indledning

Ved udgangen af 2015 blev Grundvandskortlægningen i sin hidtidige udformning afsluttet, men Miljøstyrelsen har fra 2016 igangsat en fem års kortlægningsperiode med fokus på kortlægning af nye indvindingsoplande udenfor områderne med særlige drikkevandsinteresser (OSD). Der har i forbindelse hermed vist sig et behov for en opdatering af den hidtidige "Geo-vejledning 3" fra 2008 (Jørgensen et al., 2008) med inddragelse af ny forskningsmæssig viden og erfaringer indhøstet i forbindelse med Grundvandskortlægningen siden 2008.

Geologiske modeller kan udføres på mange forskellige måder, med forskelligt formål, med forskellige redskaber og med forskelligt output. Derfor er det vigtigt, at der er fokus på, at opbygningen af geologiske modeller så vidt muligt standardiseres, så udarbejdede modeller sikres en høj kvalitet og så de lettere kan sammenlignes, sammenkobles og opdateres. En total standardisering af geologisk modellering er dog næppe ønskelig, da der er brug for, at den enkelte geologiske model skal kunne tilpasses det konkrete område og formål og samtidig opfylde modelkrav, som fra opdragsgiverens side ikke nødvendigvis er ensartede.

Det primære formål med Geo-vejledningen er at udgøre et fagligt fundament for opstilling af geologiske modeller i forbindelse med Grundvandskortlægningen og i forbindelse med dette at opridse en række anbefalinger til såvel modelleringsproces som til dokumentation og afrapportering af den endelige model. Sekundært er formålet, at Geo-vejledningen skal kunne udgøre en ramme ved opstilling af geologiske modeller i andre sammenhænge. Det forventes, at Geo-vejledningen vil bidrage til sikring af en øget kvalitet og en højere grad af standardisering af de geologiske modeller, der opstilles som et led i grundvandskortlægningen.

I Geo-vejledning 2018/1 er der fokuseret på geologiske modeller til anvendelse i forbindelse med grundvandsmodeller. Vejledningen indeholder en gennemgang og evaluering af forskellige fremgangsmåder, som afspejler opnåede erfaringer i forbindelse med geologisk modelarbejde, og Geo-vejledningen kan således bruges som en guide til det praktiske arbejde med modellerne. Geo-vejledningen skal bl.a. kunne sikre, at de geologiske modeller opbygges efter nogle ensartede arbejdsrutiner/-procedurer, så det er lettere for andre at vurdere kvaliteten og anvende det endelige produkt. Ved at bruge tankegangen og forslagene til arbejdsgange i Geo-vejledningen, vil det således være lettere at skabe geologiske modeller, som er opbygget på nogenlunde samme måde, og som indeholder nogenlunde samme elementer.

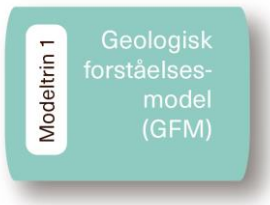
Vejledningens målgruppe er modelopstillere såvel som rekvirenter/opdragsgivere og øvrige brugere af geologiske modeller. Hvor den første version af Geo-vejledningen var søgt holdt uafhængig af specifikke softwareprodukter, gælder dette ikke for nærværende opdaterede version. Dette skyldes, at der i gennem en årrække er sket udbredt anvendelse af GeoScene3D (www.i-gis.dk), og at dette værktøj er blevet det mest udbredte i forbindelse med grundvandskortlægningen. GeoScene3D er løbende blevet udviklet og tilpasset, så stort set alle dele af den praktiske modelopstilling beskrevet i Geo-vejledningen kan udføres i GeoScene3D. Fokus på GeoScene3D er ikke udtryk for, at Miljøstyrelsen og GEUS kun anbefaler brug af dette softwareprodukt til geologisk modellering.

For år tilbage blev geologiske modeller ikke tænkt ind i større sammenhænge, og ofte blev modellerne opstillet uafhængigt af hinanden og uden egentlige retningslinjer. Det betød ofte, at modellerne blev udarbejdet til at give svar på specifikke spørgsmål og ikke var tiltænkt en videre anvendelse i andre sammenhænge og i et længere tidsperspektiv. Der var derfor en risiko for, at modellerne hurtigt blev uaktuelle og modelleringen kunne betragtes som statisk. I dag er situationen en anden, fordi de digitale muligheder er mangfoldige og fordi der i de senere år er tænkt mere i at gøre modellerne dynamiske, så de løbende kan opdateres, sammenstilles med andre modeller eller udbygges i takt med de teknologiske muligheder. Denne tankegang stiller store krav til såvel modellører som opdragsgivere, og omfanget af de moderne geologiske modeller er derfor også meget større end for 10-15 år siden. Opdragsgiverens inddragelse i modelarbejdet er også blevet større i de senere år, hvilket samtidig betyder, at opdragsgiverens indsigt i og ejerskab til modellen nu er større end tidligere.

0.1 Terminologi

Før udarbejdelsen af ”Geo-vejledning 3” i 2008 har der ikke været anvendt en ensartet terminologi i forbindelse med arbejdet med de geologiske modeller, og for at sikre en ensartethed blev det bestemt, at nedenstående benævnelser bør anvendes i forbindelse med geologisk modelopstilling.

"Geologiske modeller" anvendes som en bredt dækkende benævnelse, der omfatter tre modeltrin **"Den geologiske forståelsesmodel"**, **"Den rumlige geologiske model"** og **"Den hydrostratigrafiske model":**



Modeltrin 1 "Den geologiske forståelsesmodel" udgør en gennemgang af den geologiske opbygning, som den fremstår inden den digitale modellering starter. Den geologiske forståelsesmodel har til hensigt at give et overblik over geologien, som det fremgår af eksisterende materiale, til hjælp for opstillingen af den rumlige geologiske model. Forståelsesmodellen opstilles bl.a. på baggrund af tidligere tolkede nøgleboringer, hydrogeologiske rapporter, specialer, generel faglitteratur m.v. Den geologiske forståelsesmodel består hovedsageligt af geologiske beskrivelser, principskitser og en overordnet stratigrafi og dannelsesmodel for området. Den geologiske forståelsesmodel er som udgangspunkt en sammenstilling af tidligere geologiske tolkninger - eventuelt tilføjet geomodellørens egne vurderinger af disse. I forståelsesmodellen kan problemstillinger, som er vigtige for den efterfølgende modelopstilling, gennemgås og diskuteres med sigte på at målrette arbejdet med den rumlige geologiske model. Den geologiske forståelsesmodel kan forkortes ”GFM”.

Modeltrin 2 ”Den rumlige geologiske model” er en digital 3D model baseret på den geologiske forståelsesmodel, samt en detaljeret og integreret geologisk tolkning af alle tilgængelige data; primært boredata og geofysiske data. I dette trin fokuseres på tolkning af geologiske enheder og en opbygning af en 3D model af disse. Den rumlige geologiske model opstilles digitalt og med tilhørende skriftlig dokumentation, udarbejdelse af kort m.m. Den rumlige geologiske model udgør modellørens tolkninger af den rumlige geologiske opbygning ud fra alle data. Den rumlige geologiske model er altid digital og opstilles i hele modelrummet. Modellen kan betragtes som en status for kendskabet til geologien i det aktuelle område, og med anvendelse af alle relevante

data vil modellen reelt fungere som ”den gældende geologiske forståelse” i det aktuelle område. Efter opstillingen af den rumlige geologiske model kan problemstillinger, som er vigtige for den efterfølgende opstilling af den hydrostratigrafiske model, gennemgås og diskuteres med sigte på at målrette arbejdet. Den rumlige geologiske model kan forkortes ”RGM”.

Modeltrin 3 ”Den hydrostratigrafiske model” baseres på tolkningerne i den rumlige geologiske model. I den hydrostratigrafiske model inddeles undergrunden i hydrostratigrafiske enheder (akviferer og akvitarder), hvilket sker direkte på baggrund af lagene i RGM, og de hydrauliske egenskaber for lagene beskrives. De enkelte hydrostratigrafiske lag er i modellen karakteriseret ved som udgangspunkt at have ensartede hydrauliske egenskaber, men typisk beskrives variationer i laget med baggrund i data. Den hydrostratigrafiske model er altid digital og er tolket i hele modelrummet. Modellen udgør det hydrogeologiske grundlag for den efterfølgende grundvandsmodellering. I dette trin sker den væsentligste kommunikation med grundvandsmodellørerne inden grundvandsmodellen opstilles. Den hydrostratigrafiske model kan forkortes ”HSM”.

0.2 Hvad består en geologisk model af?

Den samlede geologiske model har såvel en digital del som en ikke-digital del. Foruden den digitale modelopbygning (i GeoScene3D eller i en anden tilsvarende type software), består det endelige model-produkt af en rapport, som i tekst beskriver arbejdet omkring modellens tilblivelse, dokumentation af foretagne tolkninger og resultaterne af modelleringen.

Den samlede geologiske model vil derfor typisk bestå af:

- **En rapport:** En samlet rapport indeholdende teknisk dokumentation og en videreformidling af modelresultaterne – herunder den geologiske forståelsesmodel, datagennemgang, modelopbygning, resultater osv.
- **Et digitalt modelprojekt:** Det samlede digitale modelprojekt fra f.eks. GeoScene3D, indeholdende den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model, med tilhørende data, tolkningspunkter (tolkningsdatabase) og interpolerede flader

Det er vigtigt at være opmærksom på, at en geologisk model ikke kun udgøres af digitale lagflader, og vigtigheden af at læse den tilhørende rapport inden videre brug af modellen, kan ikke understreges kraftigt nok. Selvom den digitale model ligger separat i Modeldatabasen og dokumentationen ligger i Rapportdatabasen (se senere kapitel 6), så udgør begge dele reelt den samlede model-afrapportering.

0.3 Opbygningen af Geo-vejledningen

Geo-vejledningen fra 2008 bestod af to indledende kapitler og en ”værktøjskasse”, som indeholdt en række datablade med konkrete forslag til anvendelse af f.eks. data eller metoder ved den geologiske modellering. I nærværende opdatering er de to første kapitler og deres overordnede indhold bibeholdt,

men kapitlerne er blandt andet tilføjet afsnit om modelsamarbejde, fremtidig anvendelse af geologiske modeller samt overvejelser om prioriteringer af arbejdet i de tre modeltrin.

Databladene i "værktøjskassen" er delt op i flere kapitler og ordnet i specifikke grupper for at forbedre overblikket. Teksten er opdateret og udvidet, og flere af de tidligere datablade er skrevet sammen. Herudover er der tilføjet afsnit om modelopdatering, modelafgrænsning, samt et afsnit om lertykkelseskort og sårbarhedsvurderinger.

Den opdaterede Geo-vejledning er således opdelt i følgende seks hovedkapitler:

Kapitel 1: Generelle overvejelser inden modelleringen

I dette kapitel beskrives den indledende fase med problemformulering og projektbeskrivelse, hvor væsentlige overvejelser og problemstillinger inden modelopstillingen gennemgås.

Kapitel 2: Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling

I dette kapitel beskrives arbejdsgangen ved den geologiske modellering; hvordan og i hvilken rækkefølge modelarbejdet gribes an.

Kapitel 3: 3D geologisk modellering - Data

I dette kapitel gennemgås de enkelte datatyper, som anvendes i forbindelse med den geologiske modellering.

Kapitel 4: 3D geologisk modellering - Modelleringsprocedurer

I dette kapitel gennemgås forskellige modelleringsprocedurer, som anvendes ved geologisk modellering.

Kapitel 5: 3D geologisk modellering - Modelleringsteknik

I dette kapitel gennemgås forskellige modelleringsteknikker samt vurderinger af usikkerheder og forslag til kvalitetssikring.

Kapitel 6: 3D geologisk modellering - Dokumentation og afrapportering

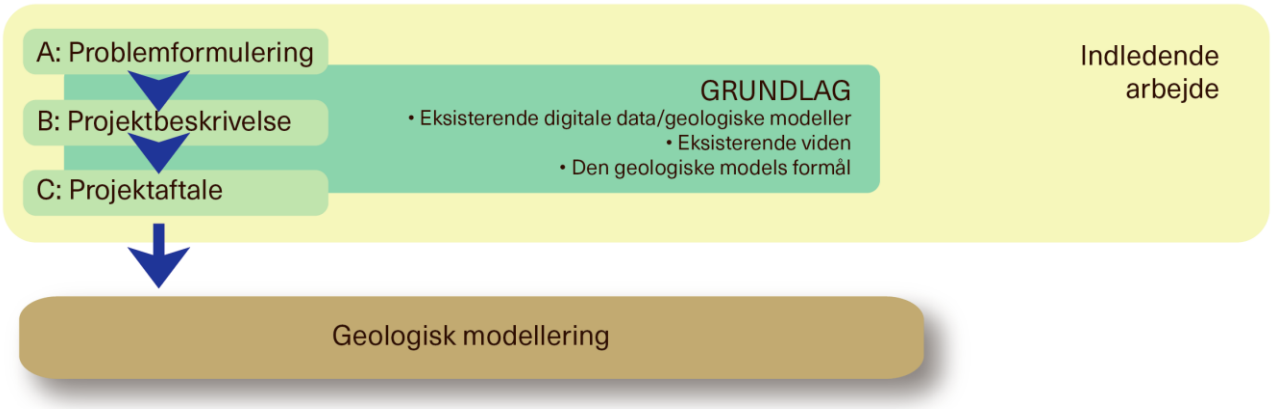
Dette kapitel gennemgår forslag til, hvordan modeldokumentation og –rapportering kan foretages.

1. Generelle overvejelser inden modelleringen

1.1 Indledende overvejelser før modelopstillingen

Inden påbegyndelsen af modelarbejdet er der en lang række overvejelser, der skal gøres omkring det forestående geologiske modelleringsprojekt. Disse overvejelser skal ske på baggrund af de eksisterende data i modelområdet, den aktuelle baggrundsviden og det påtænkte formål med den geologiske model.

Det kan anbefales at gøre dette i tre trin (*Figur **1-1***):



Figur 1-1: Indledende arbejde før opstart af den geologiske modellering.

A. **Problemformulering:** Før modelopstart skal en lang række emner gennemtænkes og diskuteres. Disse emner vil primært omfatte formål med modelleringen, geologiske problemstillinger, tilgængelige data og det generelle vidensniveau. Herudover bør ambitionsniveau, tidsplan/budget, rollefordelinger mv. drøftes. På baggrund heraf udarbejdes en problemformulering, hvor muligheder og eventuelle begrænsninger beskrives. Problemformuleringen skal danne grundlaget for den mere detaljerede projektbeskrivelse, hvor projektomfanget beskrives.
B. **Projektbeskrivelse:** Projektbeskrivelsen baseres på problemformuleringen og indeholder en nærmere beskrivelse af projektets formål, omfang, datagrundlag, ambitionsniveau, ønsker til modelopstillingen, forventninger til output, tidsplaner, rollefordelinger mv. Reelt vil projektbeskrivelsen kunne udgøre udbudsmaterialet til en geologisk modelleringsopgave, såfremt denne udbydes. I andre typer projekter, hvor modelarbejdet ikke er i udbud, kan projektbeskrivelsen udgøre modellørernes beskrivelse af omfang, og hvordan og hvornår projektet planlægges udført. Uanset om der er tale om en intern eller en ekstern modellering, vil en projektbeskrivelse være nødvendig.
C. **Projektaftale:** Projektaftalen - eller kontrakten – udgør den aftale, der indgås mellem opdragsgiver og modellør. I forbindelse med projektaftalen bør der også foretages en forventningsafstemning, hvor opdragsgiver og modellør i fællesskab drøfter forventningerne til

projektforløb og –output. Projektaftalen kan løbende suppleres med tillægsaftaler eller beslutningsreferater, hvis projektomfanget ændres gennem projektet.

1.2 Problemformulering

Ved at lave en gennemarbejdet problemformulering tidligt i projektforløbet fås et overblik over modelområdet og de udfordringer der kan ligge i det forestående arbejde. Et godt overblik over opgavens omfang og en efterfølgende indarbejdelse af dette i projektbeskrivelsen er med til at sikre, at opgaven indeholder realistiske faglige mål og realistiske tidsplaner og budgetter. Tidsplaner og budgetter vil afhænge af modelområdets størrelse såvel som den ønskede detaljeringsgrad. Der er f.eks. stor forskel på at opstille en regional ressourcemodel frem for en detaljeret oplandsmodel for en enkelt kildeplads. En grundig problemformulering vil alt andet lige mindske risikoen for, at der kommer tidskrævende overraskelser undervejs i modelopstillingen. Generelt kan det siges, at i jo højere grad man gennemtænker projektet indledningsvist, jo større chance er der for, at projektet kan gennemføres som planlagt.

Formålet med at lave en problemformulering er således at vurdere modelområdets datagrundlag og sætte det op mod de ønsker og krav, som haves til projektløsningen. Der kan opstilles følgende tre del-formål:

1) At definere formål med den geologiske modellering, herunder angivelse af ambitionsniveau
2) At klarlægge modelområdets størrelse, samt vurdere om det eksisterende datagrundlag er tilstrækkeligt
3) At klarlægge, om der er særlige krav til modellen og måden modelopgaven skal løses på

1.2.1 Formål og ambitionsniveau

I problemformuleringen skal der tages stilling til, hvad modellens formål er og de specifikke spørgsmål, der ønskes besvaret, skal konkretiseres. Alt efter opgavens formål vil der være forskellige krav til den færdige models detaljeringsgrad og dermed også til datagrundlaget. Ved en indledende vurdering af det eksisterende datagrundlag, er det derfor vigtigt, at kravene til den færdige model allerede er ridset op. De geologiske modeller, som opstilles i forbindelse med Grundvandskortlægningen, har som delmål at skulle kunne anvendes direkte i sårbarhedskortlægningen i form af vurdering af lertykkelser, og det er derfor i den forbindelse selvsagt vigtigt at beskrive, i hvilket omfang og på hvilken måde modellen skal levere lertykkelseskort og tilhørende beskrivelser til efterfølgende sårbarhedsvurderinger (Se også afsnit 5.5.3, om input til sårbarhedsvurderinger).

Ligesom det er vigtigt at overveje, hvilke spørgsmål modellen skal kunne svare på, er det faktisk lige så vigtigt, hvilke den IKKE skal kunne svare på. Skal der eksempelvis opstilles en grundvandsmodel med henblik på overordnede ressourcevurderinger, skal den geologiske model kunne levere netop et input, som matcher dette. Her vil en stor lokal detaljeringsgrad i den geologiske model ikke nødvendigvis være det, der bliver efterspurgt, og input til specifikke sårbarhedsvurderinger, som nævnt ovenfor, er måske slet ikke relevante.

I de fleste tilfælde vil det være vigtigt, at den geologiske model fremover kan opdateres og relativt let kan sammenkobles med nabomodeller. Dette vil dog kræve præciseringer af, i hvilke sammenhænge modellen på sigt tænkes at skulle indgå i, samt hvem, der er tiltænkt at skulle varetage den løbende opdatering.

Overvejelser som de ovenfor beskrevne er med til at definere modellens ambitionsniveau, og naturligvis skal ambitionsniveauet holdes op mod de givne budgetrammer, og være realistisk i forhold hertil. Hvis der er budgetmæssige begrænsninger, vil det være vigtigt at forholde sig til disse allerede på dette tidspunkt i arbejdet, og et vigtigt spørgsmål at stille er: Er en modellering med det ønskede ambitionsniveau overhovedet realistisk med det givne budget? Og vil projektet være af en type, hvor uforudsete udgifter vil være så sandsynlige, at en yderligere faseopdeling af projektet vil være hensigtsmæssig?

1.2.2 Modelområde og datagrundlag

Modelområdets størrelse vil afhænge af, hvilket formål modellen har. Generelt vil det være bedst at undgå, at modellens geografiske udbredelse ændres undervejs, da dette kan medføre et øget tidsforbrug. Der bør derfor tages højde for dette indledningsvist, og hvis for eksempel formålet er at modellere geologien til et indvindingsopland, bør der ske modellering af et område, som er noget større end selve oplandet. Modelområdet kan gøres større ved at tilføje en bufferzone eller så godt som muligt tage højde for de usikkerheder, som vil være knyttet til de tidligere oplandsberegninger. Den efterfølgende grundvandsmodel kan beregne et nyt opland med en ganske anderledes udbredelse, og det vil derfor være uheldigt, hvis store dele af dette ikke er dækket af den geologiske model. Optimalt set bør den geologiske model og det samlede hydrologiske opland for grundvandsmodellen, dække samme område. Men da hydrologiske oplande i mange tilfælde er store, laves der ofte geologisk modellering i et mindre (fokus)område og efterfølgende klippes modellens lag sammen med lag importeret fra eksisterende modeller, som dækker større områder, længere væk fra fokusområdet. I andre tilfælde modelleres geologien med størst detalje i fokusområdet og mere overordnet i områderne udenfor fokusområdet. Som regel vil der kunne findes ældre modeller, der dækker dele af det nye modelområde, og hvorvidt disse skal indgå i modelleringsprojektet er vigtigt at tage stilling til så tidligt som muligt. Se afsnit 4.2 om modelafgrænsning og afsnit 4.5 om modelopdatering.

Datagrundlaget har afgørende betydning for løsningen af opgaven, og derfor er det vigtigt indledningsvist at vurdere, om datagrundlaget er tilstrækkeligt til løsning af den konkrete opgave. Er området ”velkendt” eller er der tale om et område, som ikke førhen har været genstand for grundvandskortlægning, og er der påtænkt indsamling af nye data?

Ved en indledende vurdering af datagrundlaget er det vigtigt, at:

a) sikre, at data er af en type, der er tilgængelig og som kan anvendes i modelopstillingen
b) sikre, at der er et tilstrækkeligt datagrundlag til en modelopstilling (datatyper, datadækning mv.)
c) skabe et indledende overblik over datakvaliteten og kvalitetssikringen af data

Ad. a: Det er vigtigt, at der indledningsvist skabes et overblik over hvilke datatyper, der er til rådighed (boringer, geofysik, kemi, pejlinger m.v.), og der bør laves overordnede vurderinger af de datatyper, som

skal anvendes ved modelopstillingen. Gamle data og analoge data/informationer kan måske forefindes på en form, der ikke direkte kan indgå i en digital model, og der må så tages stilling til om og hvordan, de kan bringes på en form, så de kan indgå i modelopstillingen.

Ad. b: Der bør laves en indledende vurdering af, om de eksisterende datatyper er gode nok til at give den fornødne detalje i tolkningerne, samt om der rumligt set er data nok til at gennemføre en geologisk modellering. Hvis der findes store datasvage områder, må det overvejes, om der skal indhentes flere data før den geologiske modellering iværksættes. Her tænkes der både på fladedækning og dækning i dybden.

Ad. c: Ved den indledende gennemgang af data bør det vurderes, om der er foretaget kvalitetssikring i forbindelse med indhentning og lagring af data, samt om der er foretaget usikkerhedsvurderinger. Boringer kan f.eks. være lavet i forskellige sammenhænge, hvor formålet ikke nødvendigvis har været at beskrive hele lagserien, og beskrivelserne kan derfor være mangelfulde eller fejlagtige. Denne kvalitetssikring kan kun på dette tidspunkt udføres på en oversigtlig måde, da en mere detaljeret vurdering af data først foretages under selve modelopstillingen.

I nogle tilfælde er det nødvendigt at opstille en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model, før der kan dannes et fuldstændigt overblik over de modelmæssige konsekvenser af f.eks. datasvage områder. Ved opstilling af den hydrostratigrafiske model kan der anvendes hydrologiske og sedimentkemiske data, og derfor kan der opstå nye datasvage områder, som ikke var ”synlige” under opstillingen af den rumlige geologiske model.

Der kan med fordel laves en oversigt over tilgængelige data (type, kilde, alder, format mv.). Vurderingen af disse skrives ind i problemformuleringen.

1.2.3 Særlige krav til modelopgavens løsning

Særlige krav til modelopgavens løsning skal diskuteres og beskrives tidligt i processen. Opdragsgiveren kan have specielle krav til modellørerne og der kan være specielle roller eller rollefordelinger, som foretrækkes. Eksempelvis kan helt speciel erfaring hos modellørerne være efterspurgt, eller der kan være et ønske fra opdragsgivers side om at være tæt på – eller endog selv deltage i - modelleringsarbejdet undervejs i projektet.

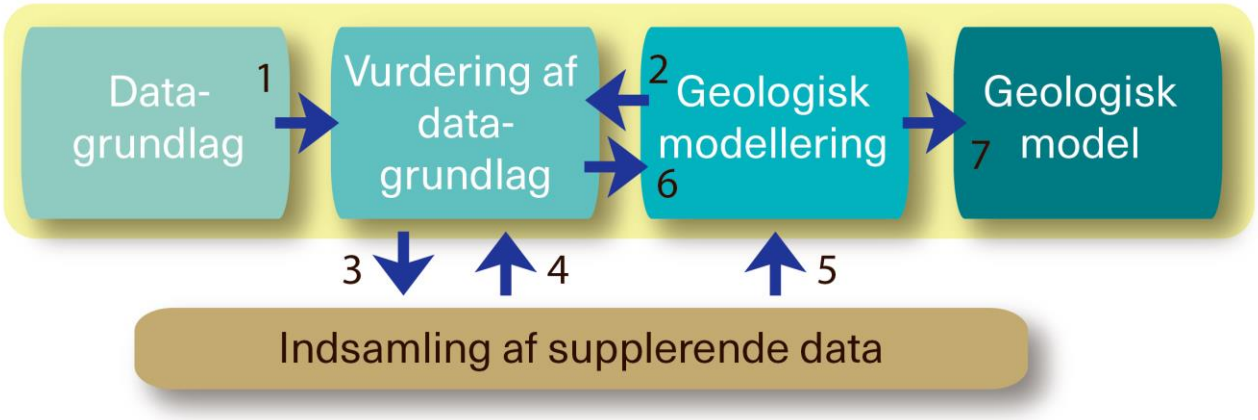
Der kan være specielle budgetmæssige eller tidsmæssige begrænsninger, som kan være afgørende for, om det påtænkte projekt kan lade sig gøre, og i den forbindelse er det vigtigt at få afklaret om projektet f.eks. skal have et lavere ambitionsniveau eller om projektet skal deles op i mindre dele.

Hvis der er geologiske problemstillinger i området, som kræver specielle overvejelser i forhold til datagrundlag og hvordan modelleringen skal foregå, er det vigtigt at dette diskuteres. Valg af modeltype er i den forbindelse vigtigt at forholde sig til.

Hvis modellen er tiltænkt at indgå i andre (interne/eksterne) sammenhænge, skal sammenkobles med andre modeller eller skal kunne håndtere mere specielle problemstillinger, er det vigtigt at gennemdiskutere dette i forhold til ambitionsniveau, modeltypevalg samt budget og tidsplan.

I mange tilfælde vil det være nødvendigt at supplere det eksisterende datagrundlag med ny-indsamling af data. Dataindsamling tager erfaringsmæssigt lang tid, og ofte vil der være tale om en periode, hvor den geologiske modellering afventer de nye data. Skal der oven i købet indsamles data i flere tempi, skal der ved de indledende overvejelser tages stilling til, om projektarbejdet skal forløbe som en iterativ proces eller i et sæt af rammer, der på forhånd er fastlagt.

Den mest optimale måde at gribe modelopstillingen an på, vil variere fra projekt til projekt, men det kan anbefales, at modelopstillingen foregår i en iterativ proces, hvor data indsamles ad flere omgange, og hvor der løbende sker en vurdering af datagrundlaget. I *Figur **1-2*** er denne arbejdsgang vist med pile:



Figur 1-2: Iterativ proces, hvor data gradvist indsamles og den geologiske model løbende opdateres. Numre: se tekst.

(1) Datagrundlaget vurderes og enten findes det tilstrækkeligt til videre geologisk modellering (2), eller også indsamles nye data (3). De indsamlede data kan give anledning til revurdering af datagrundlaget (4), eller direkte bidrage ved en fortsættelse af den geologiske modellering (5). Ved den geologiske modellering kan det vise sig, at der er behov for nye data (6), som derefter indsamles i en ny feltrunde (3). Disse data indgår derefter i den geologiske modellering og i den endelige geologiske model (7).

Der kan i et konkret projekt være flere iterationer, og i løbet af den iterative proces kan "nye" datasvage områder blive synlige og det kan være nødvendigt at indsamle flere data. Erfaringen er, at iterative processer i modelopstillingerne desværre kun sker sjældent. Grunden til dette er nok primært, at den iterative proces tager mere tid og sandsynligvis også vil være mere ressourcekrævende. Den iterative proces stiller med andre ord store krav til styringen af modelleringsprojektet.

1.2.4 Samlet problemformulering

Problemformuleringen bør afsluttes med en samlet vurdering af projektgrundlaget, hvor det eksisterende datagrundlag holdes op mod formålet og de krav der stilles til modelopstillingen. Hvis formålet og ambitionsniveauet for modelarbejdet vurderes at kunne opnås med det tilgængelige datagrundlag, vurderes projektgrundlaget at være i orden - dvs. at det indledningsvist vurderes muligt at opstille en geologisk model, der matcher formålet. Hvis den indledende vurdering af data antyder, at datadækningen

er mangelfuld, skal problemformuleringen centreres om dette, formålet omdefineres eller indsamling af supplerende data sættes i gang. Alternativt iværksættes et projekt, hvor data gradvist indsamles i en iterativ proces som beskrevet ovenfor. Hvis projektgrundlaget er dækkende, kan projektbeskrivelsen udarbejdes.

1.3 Projektbeskrivelsen

Projektbeskrivelsen er en udbygning af problemformuleringen, og kan anvendes som en del af et udbudsmateriale eller som et internt notat, hvis modellen skal opstilles internt. Projektbeskrivelsen omfatter en så detaljeret beskrivelse af indholdet af det påtænkte projekt som muligt. Hvis projektbeskrivelsen skal anvendes i et udbud, kan en gennemarbejdet projektbeskrivelse sikre, at tilbudsgiverne kan afgive så egnede og sammenlignelige tilbud som muligt. Da specifikationerne bliver en del af kontraktgrundlaget og genstand for en bedømmelse af, om leverandøren opfylder sine forpligtelser i henhold til kontrakten, skal specifikationer udformes så detaljeret som muligt.

I projektbeskrivelsen kan der stilles krav til opgaveløsningen, arbejdsprocessen og slutproduktet. Man skal dog være opmærksom på, at de enkelte krav ikke må være modstridende og ikke kommer til at virke som en hindring for projektgennemførelsen. Det er således vigtigt, at meget detaljerede kravspecifikationer til selve modelopstillingen udarbejdes af personer med indgående modelkendskab.

Kravspecifikationer for modellen skal som nævnt hænge sammen med formålet og den ønskede anvendelse af modellerne, og der kan f.eks. blive stillet krav til, hvordan forskellige data anvendes, hvordan de bliver bearbejdet, hvordan modellen opstilles, arbejdet dokumenteres/kvalitetssikres og hvordan modellen afrapporteres. Kravspecifikationerne kan samles i et bilag, hvis kravene er mange og detaljerede. Minimumskrav til modelopstillingen kan variere meget i forhold til flere forskellige faktorer, bl.a. formålet med modellen, og derfor vil der i denne vejledning kun i få tilfælde foretages egentlige beskrivelser af minimumskrav til modelopstillingen.

1.3.1 Den geologiske modellering

I projektbeskrivelsen noteres ønsker vedr. valg af modeltype og evt. måden modellen skal konstrueres på. Dette kan dreje sig om:

- Modeltype (lagmodel eller voxelmodel)
- Evt. sammenkobling med tidligere/andre modeller
- Eventuelt indledende definition af, hvilke lag, der skal indgå i modellen – eksempelvis med reference til Sjællandsmodellen eller Fynsmodellen (Højbjerg m.fl., 2015)
- Interpolation af data (bl.a. interpolationsrutine, cellestørrelse, søgeradius, konturering)
- Profilnetværk (udlægning, afstand, orientering m.m.)
- Projektionsafstande til profiler for forskellige typer af data og fladetolkningspunkter (bufferzone)
- Profiloptegning (bl.a. overhøjning, layout, datavisualisering)
- Modelvisualisering (2D eller 3D)

I projektbeskrivelsen kan der også beskrives ønsker vedr. den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning. Dette kan bl.a. dreje sig om:

- Afgrænsning af lag/lagflader
- Tolkningsmetoden (profil-, flade-, grid-, 3D-tolkning eller en kombination)
- Anvendelse af forskellige typer af tolkningspunkter
- Interpolation af tolkninger (bl.a. interpolationsrutine, cellestørrelse, søgeradius)
- Håndtering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer
- Håndtering af glacialtektonik/inhomogeniteter
- Håndtering af usikkerheder
- Samarbejde med grundvandskemiker
- Samarbejde med grundvandsmodellør

Det kan dog være vanskeligt i detaljer at redegøre for mange af ovenstående punkter før der er lavet en grundig datagennemgang og områdeafgrænsning, og det kan for eksempel være vanskeligt for en opdragsgiver uden egentligt modelleringskendskab, at lave meget specifikke krav til modelopstillingen. Typisk vil det være geomodellørerne, der kommer med forslag til detaljer i modelopstillingen.

1.3.2 Sagsstyring, dokumentation og afrapportering

I projektbeskrivelsen bør der stå hvilke forventninger (krav) der er til sagsstyring, projektdokumentation og afrapportering. Dokumentationen kan blive meget omfattende, hvis der skal meget detaljerede oplysninger med fra selve tolkningsarbejdet. Der skal tages stilling til, på hvilket niveau dokumentationen skal foregå. En udførlig dokumentation vil sikre, at modellen kan videregives, anvendes og forstås af efterfølgende brugere. I projektbeskrivelsen bør det beskrives, hvilke krav der stilles til sagsstyringen, samt hvordan og på hvilket niveau løbende projektstatus skal foregå – herunder hvornår i projektet, der skal afholdes statusmøder.

Relevant dokumentation, som kan efterspørges i projektbeskrivelsen kan være:

- Beskrivelser af tolkninger og tolkningsgrundlag
- Beskrivelser af beslutninger taget i forbindelse med tolkninger
- Beskrivelse af det udførte arbejde – arbejdsgangen
- Usikkerhedsvurderinger
- Elektroniske logbøger
- Statusnotater
- Kvalitetssikringsplan
- Rapport
- Dokumentation for projektforløbet (møddereferater, statusnotater mv.).

1.4 Samarbejde om den geologiske modellering

Hvor alle dele af en geologisk model for nogle år siden godt kunne udføres af én geolog, er mange modeller i dag så omfattende og komplicerede, at de typisk kræver bidrag fra flere personer. Hvor de

geologiske modeller førhen ofte havde et meget afgrænset formål, skal nutidens modeller – i hvert fald på sigt - gerne kunne afklare flere problemstillinger i forskellige sammenhænge.

Efter kortlægningen af OSD-områderne ligger fokus hos Miljøstyrelsen nu på kortlægning af områder udenfor OSD, og dermed er der typisk brug for sammenkobling af eksisterende, lokale modeller til større, regionale modeller. Med de nye teknologiske muligheder åbnes der således op for, at de geologiske modeller kan bruges af flere interessenter – og ikke kun fagfolk med geologisk baggrund. I dag skal der således tænkes "større" end for få år siden, hvilket ikke kun indebærer udfordringer for geo-modellørerne, men også for "nye brugere" i f.eks. kommuner, regioner, vandselskaber, som ikke tidligere har skullet forholde sig til geologiske modeller.

Samarbejde og fælles forståelse er i denne forbindelse vigtige nøgleord. Det giver sig selv, at mere komplicerede modeller kræver samarbejde internt i projektgruppen, men også mellem opdragsgiver og geo-modellører er samarbejde vigtigt. Den typiske opdragsgiver i dag vil gerne deltage i processen for på den måde aktivt at deltage i tilblivelsen af den geologiske model; dette giver ikke bare langt større sikkerhed for at eventuelle fejl bliver opdaget tidligt i processen, det giver også brugerne af modellen en langt større forståelse for, hvordan modellen er blevet til. Det giver en fælles forståelse af modelprojektet og de spørgsmål modellen skal kunne svare på. Behovet for en fælles forståelse rækker også længere ud end mellem opdragsgiver og geo-modellør. Eksempelvis skal Miljøstyrelsens grundvandskortlægning bruges i kommunerne, og her er det vigtigt, at resultaterne af de geologiske modeller kan sættes ind i den kontekst, der arbejdes med her.

1.4.1 Intern håndtering af modelprojektet

Internt i geo-modellørernes organisation vil en stram styring af et kompliceret geologisk modelleringsprojekt være nødvendig. Med definerede deadlines og økonomi samt flere personer på opgaven, vil det være nødvendigt at oprette en projektgruppe omkring projektet. Veldefinerede opgavefordelinger og veldefinerede aftaler mht. kommunikation med opdragsgiveren er vigtig.

Hos opdragsgiveren vil noget tilsvarende være gældende, da det skal sikres, at der er mandskab til at følge projektet tæt undervejs, og måske endog sættes tid af til aktiv deltagelse i modelleringen. Herudover vil der være behov for, at der sættes tid af til møder og gennemlæsning af rapporter m.v.

Det ligger ud over denne Geo-vejlednings sigte at gå nærmere ind i en beskrivelse af, hvordan modelprojekter kan håndteres i den enkelte institution, men punktet nævnes for at understrege, at arbejdet i forbindelse med geologisk modellering – "på begge sider" – kræver tid og fokus.

1.4.2 Samarbejde med opdragsgiveren

Generelt vil der være mange fordele ved, at opdragsgiver og modellører arbejder tæt sammen gennem hele modelprojektet. Ved et tæt samarbejde opnås en mere smidig sagsgang, hvor begge parter løbende orienteres og hvor faglige diskussioner kan tages med det samme, der er brug for det. Som nævnt i det foregående, gælder det, at et tæt samarbejde også betyder, at opdragsgiveren får større indsigt i modelopsætningen og det færdige produkt, og dermed et større ejerskab til modellen. Specielt tre punkter kan fremhæves:

- **Løbende kommunikation** helt fra starten af projektet, hvor regelmæssige møder, regelmæssige statusnotater og beslutningsreferater er en naturlig del af projektet. Alle problemstillinger eller tvister kan klares undervejs, sammen med den løbende gennemgang af delresultater. Er der undervejs blevet enighed om afvigelser i forhold til det oprindeligt aftalte, kan dette indgå i beslutningsreferater, og derved sikre enighed om projektets fremdrift og slutresultat.
- **Aktiv deltagelse i modelleringen**: Hvis ordregiveren har brug for at følge med i detaljer i modelleringen, kan denne følge modellens tilblivelse ved aktivt at deltage i arbejdet. Dette kræver dog kendskab til såvel områdets geologi som til modelredskaber og metoder.
- **Deltagelse i kvalitetssikrings- og godkendelsesprocedurer**: Opdragsgiver kan i et samarbejde få en rolle i kvalitetssikringen af modellen, ved f.eks. at få tilsendt tidlige modelversioner til gennemsyn. På den måde sikres det ikke alene, at fremdriften i arbejdet løbende godkendes, men også at eventuelle fejl kan opdages. Efter aftale med opdragsgiveren kan kvalitetssikringen af dele af modelarbejdet gøres på denne måde (se afsnit 5.5.2). Opdragsgiveren kan også indgå i en løbende godkendelsesprocedure, hvor delresultater – indlagt som milepæle – skal godkendes før projektet kan fortsættes. På den måde kan modelleringsarbejdet trinvist godkendes, hvilket betyder, at arbejdsbyrden ved den endelige godkendelse af arbejdet vil være reduceret. Hertil kommer, at risikoen minimeres for, at en tidlig opstået – og uopdaget - fejl eller mangel, først rettes til allersidst. Se yderligere beskrivelse i afsnit 5.5.2.

1.4.3 Samarbejde mellem institutioner

Som nævnt ovenfor kræves det i højere og højere grad, at de geologiske modeller i dag er opdatérbare, dynamiske størrelser, som skal kunne bruges i forskellige sammenhænge. Modelprojekter bliver i stigende grad til i et samarbejde mellem flere aktører og slutproduktet vil typisk også have flere andre interessenter og potentielle brugere.

Ideelt set vil en geologisk model, som er baseret på alle tilgængelige data og tolket i tilstrækkelig stor detalje, rumme muligheder for at løse geo/hydrorelaterede problemstillinger af alle typer. Det kræver dog – hvis det overhovedet er muligt – en stor indsats at nå så langt, men mindre kan også gøre det. Pointen er blot, at samarbejde omkring geologiske modeller er vigtigt for at få det optimale ud af de mange data, som ligger frit tilgængeligt, og den viden og erfaring, som er opsamlet gennem årtier. Hvis alle de parter, som har blot den mindste nuværende og/eller fremtidig interesse i, at der på sigt foreligger et fælles geologisk modelgrundlag, som alle i princippet kan trække på, så er der i stor stil basis for samarbejde mellem mange institutioner fremover. En udfordring i den sammenhæng er dog at skabe opmærksomhed omkring de geologiske modellers anvendelsesmuligheder i større sammenhænge.

Geologiske modeller, som dækker f.eks. kommuner vil oprindeligt kunne være stykket sammen af forskellige, eksisterende modeller, og efterfølgende målrettet mod de kommunale aktiviteter (se eksempel i Mielby m.fl., 2015 og Sandersen m.fl., 2015). Samarbejde mellem flere nabokommuner kunne skabe grobund for en fælles model, som kan håndtere f.eks. større ”klimamodeller” og vandindvinding på tværs af kommunegrænser.

Mulighederne er mange, men hvis det skal lykkes at gøre anvendelsen af de geologiske modeller større fremover, kræver det kommunikation på tværs og en fortsat udbygning af samarbejdet.

1.5 Fremtidig anvendelse af de geologiske modeller

Som allerede nævnt, skal modeller være levende og dynamiske for at kunne finde anvendelse fremover. En model, der ikke er opdateret mister hurtigt sin værdi, og nutidsværdien vil hurtigt gå mod nul. Der bør derfor, ikke alene i projektformuleringsfasen, men i alle led af modelarbejdet og model-samarbejdet på tværs, tænkes i fremtidig anvendelse og opdatering af modellerne. En ”færdig geologisk model” er blot et skridt på vejen – et øjebliksbillede, som allerede kort tid efter bør føres ajour med de nyeste data og den nyeste viden. Denne tankegang skal i første række opdragsgivere og geo-modellører have. Men tankegangen skal også videreføres til andre brugere af modellerne, så opmærksomheden omkring modelopdatering sikres.

I afsnit 4.5, som omhandler opdatering af eksisterende geologiske modeller, beskrives udfordringer og løsningsmuligheder i forbindelse med – ikke bare opdatering af geologiske modeller – men også sammenkobling af forskellige modeller.

Det anbefales:

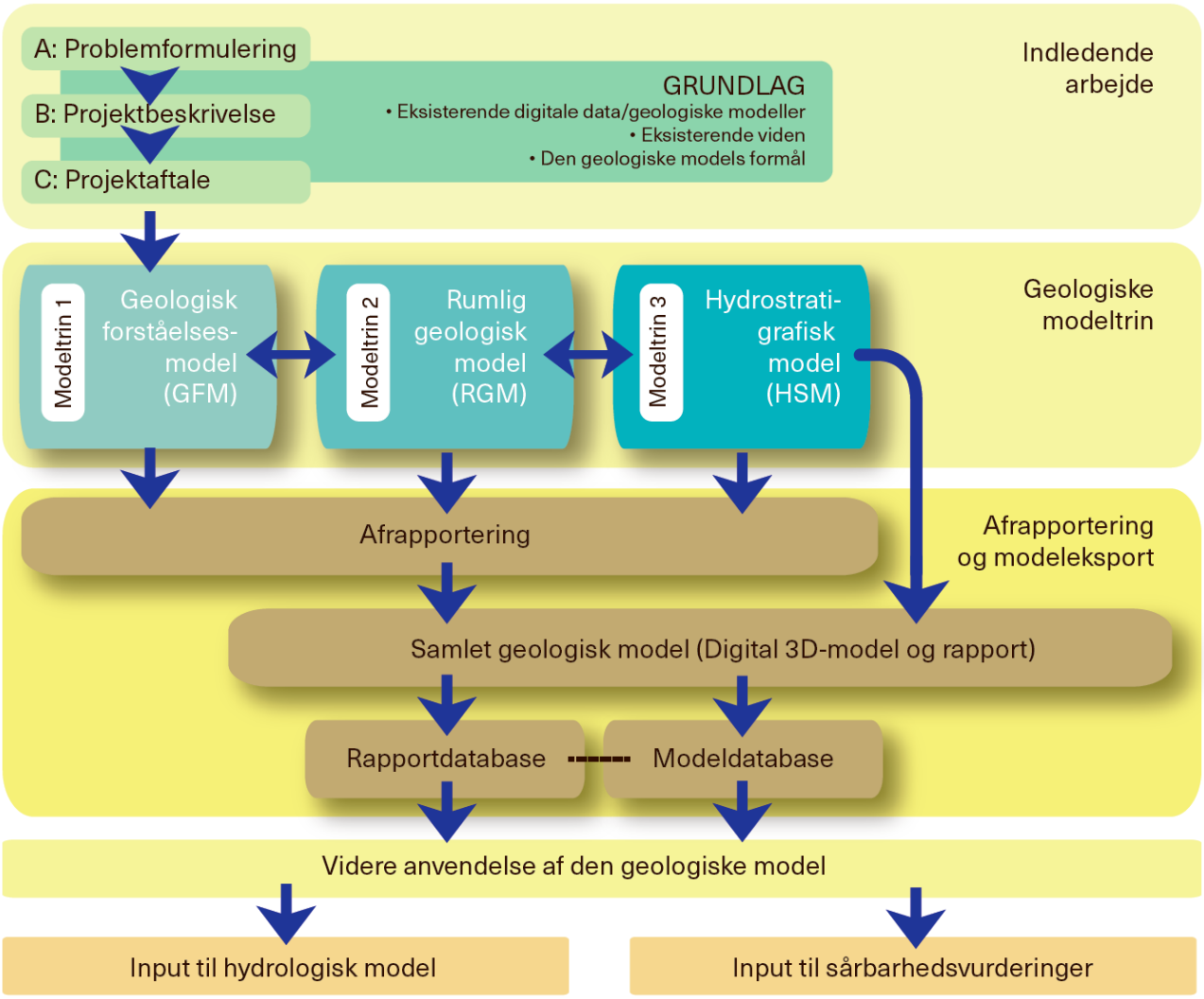
- at der haves fokus på at udarbejde en grundig problemformulering og projektbeskrivelse, da overvejelserne i projektets tidlige fase kan få stor indflydelse på det endelige resultat
- at sikre en løbende dialog med opdragsgiveren omkring projektets fremdrift samt i størst mulig grad involvere denne i arbejdsprocessen
- at sikre, at projektbeskrivelsen/-udbuddet beskriver grundlaget og rammerne (f.eks. formål, datagrundlag, tidsplan, økonomi) for modelleringsprojektet bedst muligt, så overraskelser så vidt muligt kan undgås
- at sikre, at projektbeskrivelsen/-udbuddet i så stor detalje som muligt beskriver ønsker til projektforløb (f.eks. iterativ tilgang, faseopdeling etc.), specifikke leverancer, deltagelse i modelleringsprocessen, inddragelse af eksterne parter m.v.
- at modelprojektet tænkes ind i en større sammenhæng allerede i de indledende faser, så opdatering af modellen fremover er mulig

2. Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling

2.1 Indledning

Det samlede geologiske modelarbejde kan, som illustreret på *Figur **2-1***, opdeles i:

- Det indledende arbejde
- De geologiske modeltrin
- Afrapportering og modeleksport



Figur 2-1: Flowdiagram, der viser arbejdsgangen gennem det samlede geologiske modelprojekt, fra det indledende arbejde, gennem de tre geologiske modeltrin og til afrapportering og modeleksport. Mulige iterationer/loops i projekt-flowet er udeladt for overskuelighedens skyld.

Arbejdet med problemformulering og projektbeskrivelse for den geologiske model er beskrevet i kapitel 1, og i nærværende kapitel gennemgås de geologiske modeltrin.

2.2 Modelarbejdets trin

Det anbefales at udføre modelleringen trinvist, hvor der i starten søges opnåelse af et geologisk overblik baseret på tidligere udført arbejde i det givne modelområde, dernæst udførelse af tolkning og modellering af den rent geologiske opbygning af modelområdet og endelig – på baggrund af geologien – en tolkning af områdets grundvandsmagasiner og mellemliggende lag (akviferer og akvitarder).

Denne gradvise arbejdsgang kan udmøntes i tre trin og tre forskellige typer af modeller, som er grundlæggende forskellige i koncept og konstruktion. Inddelingen og definitionen af disse modeltrin har til formål at overskueliggøre modelleringsprocessen og vejlede modelopstilleren igennem denne.

De tre modeltrin/typer er (*Figur **2**-**1***):

- Den geologiske forståelsesmodel (GFM)
- Den rumlige geologiske model (RGM)
- Den hydrostratigrafiske model (HSM)

De tre modeltrin er opbygget således, at der ved de to første modeltrin arbejdes med geologi i form af geologiske strukturer, lag og laggrænser, dannelsesprocesser og –miljøer, mens der i det tredje modeltrin arbejdes med grundvandsmagasiner og mellemliggende lag (akviferer og akvitarder) ud fra de to første geologiske modeltrin.

Den geologiske forståelsesmodel opstilles primært på baggrund af tidligere tolkninger og beskrivelser. Denne model er ikke digital, men er et geologisk overblik udformet som en beskrivelse i tekst, figurer og principskitser. Den rumlige geologiske model derimod, opstilles digitalt i 3D med udgangspunkt i forståelsesmodellen, og har til sigte at beskrive den rumlige udbredelse af jordlagene. I dette modeltrin indarbejdes modellørens egne tolkninger ved sammenstilling og -tolkning af alle data, og med forståelsesmodellen som ramme.

Den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model er grundlæggende meget forskellige. Den rumlige geologiske model er en 3D model af undergrundens fysiske opbygning, som også indeholder beskrivelser af dannelseshistorie og –processer for jordlagene. I den rumlige geologiske model er der fokus på den geologiske forståelse af områdets opbygning, og denne udgør kernen i de tolkninger, der udføres.

Den rumlige geologiske model danner grundlag for opstilling af den mere anvendelsesorienterede hydrostratigrafiske model, hvor grundvandet er i fokus. Den rumlige geologiske models lag danner grundlag for en tolkning af akviferer og akvitarder i lagserien, og der kan - om nødvendigt - ske sammenlægninger af lag, som eksempelvis vurderes at udgøre et samlet grundvandsmagasin med ensartede hydrauliske egenskaber. Tilsvarende kan ske for lerlag, der for eksempel vurderes at udgøre et samlet lerdække over et magasin. Disse sammenlagte lag kan eventuelt zoneres med baggrund i litologiske variationer.

Den rumlige geologiske model er en model, der gradvist kan udbygges, og hvis den løbende opdateres, vil den derfor altid udgøre det mest aktuelle billede af områdets geologiske opbygning. Den hydrostratigrafiske model vil således også altid kunne være baseret på et opdateret geologisk grundlag.

Hvis opdateringer derimod kun sker i den hydrostratigrafiske model, vil den geologiske forståelse ikke nødvendigvis blive forøget, da nye data kun anvendes som et bidrag til ny viden om grundvandsmagasinerne.

I den tidligere version af Geo-vejledningen blev det anbefalet, at den rumlige geologiske model kun blev tolket i de områder, hvor datamængden og datakvaliteten gjorde det muligt at lave en rimelig sikker geologisk tolkning. Den rumlige geologiske models lag skulle ikke nødvendigvis fylde hele modelrummet, hvilket betød, at den rumlige geologiske model let kunne komme til at fremstå som sporadiske tolkninger i modelrummet og at overblikket derfor let kunne gå tabt. Først i den hydrostratigrafiske model blev hele modelrummet udfyldt med tolkninger. Konsekvensen af dette kunne blive, at de geologiske vurderinger primært blev foretaget i forbindelse med den hydrostratigrafiske model, og at dette trin derfor kom til at indeholde en blanding af såvel hydrostratigrafiske som rent geologiske elementer.

For at sikre en bedre adskillelse mellem modeltrinnene og for at sikre, at den mest tidssvarende geologiske forståelse kommer til at indgå i den samlede geologiske modellering, anbefales det, at den primære arbejdsindsats fremover ligger i det rumlige geologiske modeltrin. På denne måde sikres det, at den geologiske forståelse af området forbliver central. Det anbefales derfor, at tolkningerne i den rumlige geologiske model foretages i *hele modelrummet*, og at arbejdet med den efterfølgende hydrostratigrafiske model mere handler om tilpasning af de rumlige geologiske modellag til et 3D-rum bestående af akviferer og akvitarder, end decideret modellering.

I praksis betyder det, at størstedelen af arbejdet med den geologiske modellering vil foregå i det rumlige geologiske modeltrin, og at det er her tolkningerne af lagenes udbredelse i hele 3D-rummet vil foregå. Da data som oftest er ujævnt fordelt og af forskellig type, vil der være områder med mange og gode data, hvor de geologiske tolkninger bliver sikre, mens der vil være andre områder, hvor sporadiske data medfører mindre sikre tolkninger. Denne problemstilling skal geo-modelløren redegøre for i den usikkerhedsvurdering, som følger med den rumlige geologiske model (se afsnit 5.5.1), således at brugerne af den geologiske model vil kunne se, hvor tolkningerne er sikre og hvor de er mindre sikre. De geologiske tolkninger kan indledningsvist udføres i de områder, hvor data er bedst og mest dækkende, og herefter kan der korreleres mellem disse områder, henover de mere datasvage områder. I denne proces er den geologiske forståelse af afgørende betydning, og geologens viden fra såvel forståelsesmodellen som arbejdet med data i den rumlige geologiske model, skal her anvendes fuldt ud. Gradvist kan tolkningerne komme til at udfylde hele modelrummet. Det er vigtigt, at geo-modelløren forinden har foretaget vurderinger af, hvor mange lag, der reelt kan opløses med de data, som haves. Det er klart, at hvis kun et mindre antal boringer viser en meget varierende geologi med flere, tynde lag, vil det være svært at korrelere disse med eksempelvis fladedækkende geofysiske data, hvor en tilsvarende opløsning af lagene måske ikke kan lade sig gøre. De detaljerede oplysninger i boringerne vil ikke kunne bruges til opstilling af en meget kompliceret model med mange lag, da korrelation af disse i 3D-rummet ikke kan lade sig gøre. Antallet af modellag må derfor begrænses til lag eller lagpakker, som reelt kan korreleres med en vis sikkerhed. De detaljerede oplysninger fra boringerne vil dog være værdifulde for forståelsen af lagserien og kan i stedet indgå i dokumentationens beskrivelser af lagserien og baggrunden for de udførte tolkninger.

De digitale tolkninger i form af tolkningspunkter og tilhørende lagflader vil, sammen med usikkerhedsvurderinger og dokumentation for de udførte geologiske tolkninger, udgøre den rumlige geologiske model.

Den hydrostratigrafiske model tager som nævnt udgangspunkt i den rumlige geologiske models flader og lag, og fokus i den hydrostratigrafiske model er at inddele lagserien i akviferer og akvitarder og beskrive de enkelte lags fysiske egenskaber med henblik på en vurdering af de hydrauliske egenskaber. Sidstnævnte bør foregå i tæt samarbejde med grundvandsmodellørerne. Den geologiske model giver lagseriens rammer, og hvis ikke der er belæg eller behov for at slå lag sammen (se afsnit 2.5), vil laginddelingen forblive den samme. Hvor de hydrologiske data (f.eks. prøvepumpninger og pejlinger) og de kemiske data (f.eks. forekomst af klorid, nitrat/sulfat og pesticider) blev brugt til at afklare lagsammenhænge i den rumlige geologiske model, kan disse data i den hydrostratigrafiske model bruges til at beskrive og estimere lagenes fysiske/hydrauliske egenskaber (se afsnit 2.5).

For at sikre en adskillelse af den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model, kan de rumlige geologiske lag kopieres og navngives med intuitive navne eller navngives på samme måde som omkringliggende modeller. Dette er naturligvis specielt vigtigt i de tilfælde, hvor lag er blevet slået sammen. I sådanne tilfælde vil der findes såvel en digital rumlig geologisk model som en digital hydrostratigrafisk model, som i antal lag og i navngivning adskiller sig fra hinanden. Anvendes de samme lag uændret i begge modeller, vil de rumlige geologiske lag og lagflader danne input til grundvandsmodellen, og den hydrostratigrafiske model vil udelukkende udgøres af beskrivelser af fysiske og/eller hydrauliske egenskaber af lagene på rapportform.

Naturligvis kan der ved geologisk modellering i forbindelse med et givent projekt være belæg for at tilgå modelleringen på en anden måde. I sådanne tilfælde er det dog vigtigt, at der allerede i det indledende arbejde foretages en begrundelse for valget, men det anbefales at de overordnede rammer, som er beskrevet i denne Geo-vejledning, følges. En nærmere diskussion af prioritering af arbejdsindsatsen i de forskellige modeltrin følger sidst i dette kapitel.

Under udarbejdelsen af geologiske modeller, bør der – som nævnt i kapitel 1 - tænkes iterativt. De geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger bør under hele arbejdsprocessen gøres til genstand for revurderinger, således at de arbejdshypoteser, der var opstillet i starten, kan tages op til genovervejelse og holdes op mod de nye tolkninger og modelresultater. Den iterative proces bør også fortsætte, når den hydrostratigrafiske model er overført til grundvandsmodellen, da det undervejs i kalibreringen og valideringen af denne kan vise sig, at det er nødvendigt at justere de geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger. En ulempe ved at gennemføre sit modelleringsprojekt iterativt er, at det på forhånd kan være svært at overskue og svært at planlægge. Det kan blive vanskeligt at udarbejde en præcis projektbeskrivelse og dermed også svært at udarbejde et samlet udbudsmateriale til eventuel udlicitering af hele modelarbejdet. En anden ulempe er, at forløbet højst sandsynligt vil strække sig over længere tid, end hvis det hele beskrives i en samlet projektbeskrivelse med et i store træk forudbestemt indhold. Fordelene vil dog være, at unødvendige data ikke indsamles, og at det kan sikres, at modellerne opnår den datadækning, der er nødvendig. Desuden er der plads til større fleksibilitet undervejs. Omfanget af den iterative proces på tværs af modeltrinnene og omfanget af indsamling af nye data, vil i praksis i høj grad være styret af projektets økonomi og tidsramme.

De tre modeltrin beskrives mere indgående i de følgende afsnit.

2.3 Geologisk forståelsesmodel (Modeltrin 1)

Den geologiske forståelsesmodel giver et indledende og overordnet geologisk overblik, hvorved geomodelløren allerede inden opstillingen af den rumlige geologiske model får en forståelse af de geologiske forhold samt et indblik i den geologiske dannelseshistorie for området.

Da den geologiske forståelsesmodel primært udarbejdes på baggrund af eksisterende viden, tolkninger og beskrivelser, vil egne tolkninger derfor som udgangspunkt ikke være i fokus i modellen. I praksis vil det dog være vanskeligt ikke i et vist omfang at inddrage egne vurderinger og tolkninger, men i så fald er det vigtigt, at egne vurderinger og tolkninger tydeligt adskilles fra de tidligere. Eksempelvis kan det være relevant, at der i et afsluttende resumeafsnit redegøres for den samlede geologiske opfattelse, der vælges som udgangspunktet for den efterfølgende rumlige geologiske model.

Modellen er ikke en digitaliseret, rumlig model med tolkningspunkter, flader og lag, men derimod en skriftlig redegørelse for de overordnede geologiske forhold, som de tidligere er blevet tolket.

Formålet med at opstille den geologiske forståelsesmodel er:

- at modellør og opgavestiller opnår en fælles forståelse af de geologiske forhold og den efterfølgende modellering
- at skabe et overblik over de geologiske forhold, således at den rumlige geologiske model efterfølgende kan opbygges på den mest hensigtsmæssige måde
- at påpege problemstillinger, som f.eks. begrænset baggrundsviden og særlige geologiske forhold, der kan have betydning for arbejdsgangen og slutproduktet
- at opstille arbejdshypoteser for den geologiske opbygning og geologiske udvikling af området
- at udarbejde en liste over eksisterende litteratur, rapporter mv., som anvendes i den reologiske modellering

En geologisk forståelsesmodel kan allerede være udarbejdet i forbindelse med tidligere projekter – eksempelvis i ”Trin 1-rapporter” i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning. Disse rapporter er udarbejdet forud for det videre geologiske modelarbejde i OSD-områderne, og vil typisk være det første grundlæggende arbejde, hvor der er gået i dybden med den geologiske forståelse. Men det er ikke sikkert, at eksisterende forståelsesmodeller præcist dækker det område, der er specificeret i projektbeskrivelsen og der kan være tilkommet ny viden. Der kan derfor blive tale om at kombinere og revidere eksisterende geologiske forståelsesmodeller. Eksisterende forståelsesmodeller vil normalt være baseret på tidligere indsamlet datamateriale, og som oftest vil der være geologiske hovedtræk, som ikke ændres nævneværdigt. Men det er vigtigt, at man altid forholder sig kritisk til gamle tolkninger, før man anvender dem som et led i den nye modelopstilling.

2.3.1 Eksisterende geologisk viden og fortolkninger

Den eksisterende viden findes på forskellig form, i forskellig skala og med varierende relevans for det aktuelle modelområde. Nogle eksisterende tolkninger findes på kort – andre på skrift – og generelt er der gode muligheder for download via internettet, køb hos institutioner og boghandlere eller lån på landets folkebiblioteker. Den eksisterende viden kan sammenstilles fra bl.a.:

Geologiske afhandlinger og artikler

Danmarks geologi er beskrevet i en lang række afhandlinger og artikler, som har en meget varierende alder og meget varierende emner og geografisk dækning. Publikationerne fra DGU/GEUS (www.geus.dk) og Dansk Geologisk Forening (DGF; www.2dgf.dk) har en stor faglig værdi og rækker helt tilbage til 1890. Herudover findes geologiske afhandlinger og lærebøger, hvoraf Sand-Jensen & Larsen (2006) specielt kan fremhæves, fordi den resumerer hovedtrækkene i den danske geologi. Specialer, som ikke er offentliggjorte, kan i mange tilfælde indeholde værdifuld viden, og kan ofte lånes af de respektive læreanstalter. Bogserien "Geologisk Set" fra Geografforlaget beskriver områder af national geologisk interesse, og disse bøger giver værdifulde beskrivelser af geologi og landskab ved de mange lokaliteter. Herudover indeholder bøgerne gode litteraturlister. I kortlægningsprojektet om begravede dale i Danmark (Sandersen & Jørgensen, 2016) er der for hver af de ca. 250 kortlagte lokaliteter udarbejdet en kortfattet gennemgang af områdernes geologiske opbygning, der kan bruges som indgangsvinkel til den geologiske forståelse i et givent modelområde. Desuden kan der findes videnskabelige artikler om den danske geologi i forskellige nationale og internationale tidsskrifter. Artikler kan fremsøges på internettet, og er de ikke umiddelbart tilgængelige til download, så kan kopier som oftest let fås ved direkte henvendelse til forfatterne.

Eksisterende geologiske modeller

Geologiske modeller er gennem årene opstillet flere steder for eksempel i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning, vandforsyningernes ressourcekortlægning, råstof- og forureningsundersøgelser, geotekniske undersøgelser og olieefterforskning. Da der er store forskelle i formål, alder, modeltype, detaljeringsgrad, geografisk dækning, datatyper og datamængde, vil der typisk kun kunne bygges direkte videre på den eksisterende geologiske model, hvis denne er relativt ny og har haft samme sigte (se afsnit 4.5). Men i de fleste tilfælde vil de ældre geologiske modeller kunne danne en vigtig forståelsesmæssig ramme for det nye arbejde, og dele af modeltolkningerne vil sandsynligvis kunne genanvendes. Under alle omstændigheder er det vigtigt at beskrive, hvad der tidligere er foretaget af tolkninger og på hvilken baggrund, de er sket. De geologiske modeller er i grundvandssammenhæng som oftest opstillet af de tidligere amter, Miljøcentre/Naturstyrelsen/-Miljøstyrelsen, DGU/GEUS og landets rådgivere.

De fleste geologiske modeller kan downloades fra modeldatabasen, som er en fællesoffentlig database, hvor geologiske modeller udført i forbindelse med grundvandskortlægning, er uploadet (se afsnit 6.4 om eksport af modeller til modeldatabasen). Modelrapporterne kan findes i og downloades fra rapportdatabasen (www.jupiter.geus.dk/Rapportdb).

Ældre hydrogeologiske undersøgelser

I grundvandssammenhænge kan der være udført hydrogeologiske undersøgelser, hvor der ikke nødvendigvis er opstillet en geologisk model, men hvor der er fokuseret på grundvand og geologi. Her kan f.eks. være tale om tolkninger af prøvepumpninger, pejlerunder (potentialekort), kemiske analyser m.v. Disse oplysninger kan udgøre værdifuldt input til den geologiske model, og selv ældre data kan være vigtige. Disse undersøgelser er typisk begrænsede rent geografisk og relaterer sig til et specifikt område. Undersøgelserne kan være udført af kommuner, de tidligere amter og statslige miljøcentre, DGU/GEUS og rådgivere. De fleste rapporter vil kunne hentes fra GEUS' rapportdatabase (www.jupiter.geus.dk/Rapportdb).

Landskabstolkninger
Tolkninger af landskabsformerne er et af de centrale elementer i den geologiske model. I det indledende arbejde med modellen, eller ved opstilling af mindre detaljerede modeller, kan eksisterende tolkninger af landskabsformerne være værdifulde. Per Smeds landskabskort (Smed, 1981) giver en overordnet tolkning af landskabsformerne, hvor der fokuseres på den geologiske tolkning af landskabet med udpegning af tunneldale, israndsbakker, smeltevandssletter m.v. Af andre landskabstolkninger kan nævnes DGU's kortblade, to gamle udgivelser af S. A. Andersen og V. Milthers (Andersen, 1933; Milthers, 1948, og en ny af J. Krüger (Krüger, 2006), hvor det danske landskabs udseende og dannelse beskrives og diskuteres. Disse kort og overordnede beskrivelser kan med fordel bruges som udgangspunkt for mere detaljerede landskabsanalyser. Se også gennemgangen i afsnit 3.1.5 om topografiske og geomorfologiske tolkninger.

Regionale og landsdækkende geologiske tolkninger
Gennem årene er der udarbejdet en række kort med geologiske tolkninger, der kan anvendes som grundlag for tolkningerne i den geologiske model:

- **Geologiske basisdatakort**: I forbindelse med DGU/GEUS' og amternes udarbejdelse af de geologiske basisdatakort, er der foretaget regionale geologiske tolkninger, som ikke altid fremgår af beskrivelserne i Jupiterdatabasen. Til basisdatakortene hører også i mange tilfælde overordnede beskrivelser (DGU Kortserie).
- **Prækvartærets jordarter**, f.eks. Håkansson & Pedersen (1992).
- **Prækvartæroverfladens højdeforhold**: Publicerede kort over den prækvartære overflade, enten for Danmark som helhed (Binzer & Stockmarr, 1994) eller for afgrænsede områder (f.eks. DGU, 1986).
- **Kalkoverfladen**: Kalkoverfladens morfologi er publiceret for Danmark i Ter-Borch (1991), og herudover findes kort fra GEUS (Vejbæk et al., 2007), som også omfatter Nordsøområdet.
- **Jordartskort**: Jordartskort, som viser jordarterne i den øverste meter, er publiceret af GEUS (f.eks. Hermansen & Jakobsen, 2000). Se afsnit 3.1.4 om jordarts- og jordbundsdata for yderligere beskrivelse.

Strukturer
Begravede dale til lands kan ses og downloades fra dal-projektets hjemmeside (www.begravededale.dk), mens dybe forkastninger i den danske undergrund f.eks. er vist i Vejbæk & Britze (1994) og Vejbæk (1997).

2.3.2 Udarbejdelsen af den geologiske forståelsesmodel

Arbejdet med den geologiske forståelsesmodel bør omfatte følgende punkter:

- Gennemgang og sammenstilling af eksisterende tolkninger og opfattelser
- Sammenfatning af geologisk dannelseshistorie
- Udarbejdelse af principskitser over den geologiske opbygning (se f.eks. *Figur **2-2*** og *Figur **2-3***)
- En beskrivelse af den overordnede lagserie

- Udarbejdelse af resumé inklusive beskrivelse af fokuspunkter for den efterfølgende rumlige geologiske modellering

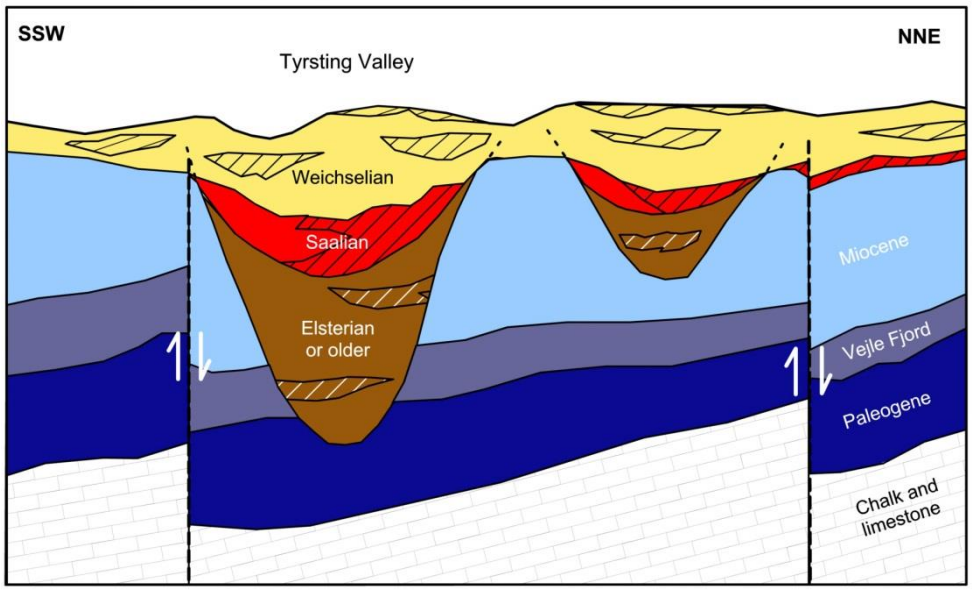
Det indsamlede materiale gennemgås og vurderes. Materialet kan være fragmenteret, og det er ikke sikkert, at der findes brugbare sammenfatninger, så ofte skal de forskellige geologiske tolkninger og opfattelser sammenholdes. Der kan være uoverensstemmelser mellem forskellige tolkninger. Nyere data kan f.eks. medføre nye tolkninger, som strider mod ældre tolkninger, og derfor bør der redegøres for de forskellige tidligere opfattelser, og hvordan de nye data har bidraget. Det er i denne forbindelse også vigtigt så vidt muligt at vurdere kvaliteten af de tidligere tolkninger.

Der kan foreligge særskilte tolkninger for forskelligartede datasæt (f.eks. fra topografiske data og gamle geofysiske data), og her kan tolkningerne være rettet mod forskellige dele af geologien. Ved at sammenholde disse tolkninger, kan man øge forståelsen af de geologiske forhold – og dermed allerede påbegynde ens egne geologiske tolkninger for området. Som nævnt indledningsvist, hører ens egne tolkninger i princippet dog først til i den rumlige geologiske model.

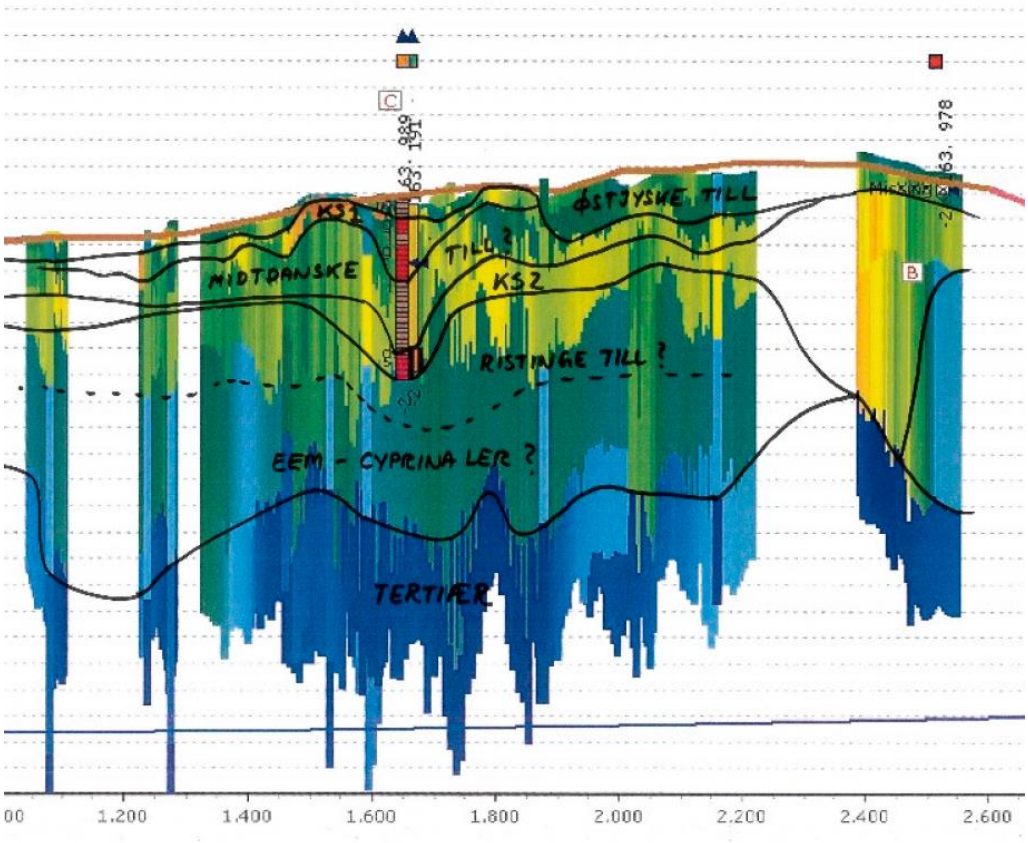
Under arbejdet med den geologiske forståelsesmodel bør der fokuseres på den overordnede geologi. Man må overveje hvilken detaljeringsgrad, der er påkrævet, og hvilke typer af geologiske tolkninger, der er relevante for problemstillingen i forbindelse med den efterfølgende modellering.

Det er vigtigt, at de tidligere tolkninger vurderes grundigt, da disse normalt vil være af meget varierende kvalitet og dermed have varierende usikkerhed. Gamle opfattelser af geologien kan have været gode, da de blev skrevet, men være uaktuelle i dag, og derfor er det vigtigt at sikre sig, at ældre, fejlagtige opfattelser af geologien ikke tages med videre. Usikkerheder, der kan være relevante at vurdere og beskrive, kan formuleres i følgende spørgsmål:

- Er de tidligere tolkninger troværdige, og bygger de på sikre datasæt?
- Er der dele af området og dele af den geologiske lagserie, der er bedre belyst end andre dele?
- Er der konflikter mellem de tidligere tolkninger?
- Er der særlige geologiske problemstillinger i området – f.eks. specielt forstyrrede områder eller begravede dale? Og er disse tilstrækkeligt beskrevne?
- Er der ældre opfattelser af den geologiske opbygning, som ikke længere er valide?



Figur 2-2: Principskitse, der viser den overordnede geologiske opbygning i et modelområde (fra Jørgensen et al., 2006).



Figur 2-3: Eksempel på geologisk forståelsesprofil, hvor reelle data er vist som baggrund; Avernakø (fra Orbicon, 2015).

På baggrund af gennemgangen udarbejdes et resumé, som beskriver de overordnede geologiske forhold i tekst og viser den overordnede geologi på kort- og profilskitser. Resumeet kan også indeholde sammenfattende kort, som viser flere forskellige eksisterende tolkninger sammen (f.eks. begravede dale

og israndslinier) og en overordnet stratigrafisk lagfølge med en tilhørende, generel beskrivelse af de forventede lag i området. Det anbefales, at der afslutningsvist opridses en række fokuspunkter for den efterfølgende rumlige geologiske modellering; om særlige geologiske forhold, som kræver speciel opmærksomhed. Afrapporteringen bør desuden indeholde en udførlig referenceliste over det baggrundsmateriale, der er blevet brugt. Særligt vigtigt materiale kan evt. scannes og vedlægges eller på anden måde indarbejdes i rapporten.

2.3.3 Fra den geologiske forståelsesmodel til den rumlige geologiske model

Som afslutning på arbejdet med den geologiske forståelsesmodel kan der foretages en status, hvor rapportteksten anvendes som et statusnotat, der evalueres inden arbejdet med den rumlige geologiske model iværksættes. Fokuspunkterne for den rumlige geologiske modellering opridses.

Gennem en forventningsafstemning mellem de involverede parter vurderes det, om der skal foretages justeringer af det planlagte videre forløb. Der vil på dette tidspunkt være opnået et forbedret indblik i de geologiske forhold, og det vil derfor være relevant at vurdere, om der stadig kan opstilles brugbare rumlige geologiske og hydrostratigrafiske modeller, eller om de til rådighed værende data er utilstrækkelige. En konsekvens af denne vurdering kan være, at der skal indsamles flere data end oprindeligt planlagt, og at en igangsættelse af den rumlige geologiske model må udsættes. En anden konsekvens kan være, at forventningerne til modellen skal revideres.

Afslutningsvist skal det bemærkes, at hvis der ved arbejdet med den efterfølgende rumlige geologiske model sker større ændringer af den geologiske forståelse af modelområdet, så bør en diskussion af uoverensstemmelserne skrives ind i den geologiske forståelsesmodel senere i modelforløbet.

2.4 Rumlig geologisk model (Modeltrin 2)

Den rumlige geologiske model er ikke alene en gengivelse af undergrundens fysiske opbygning, men også en model der beskriver dannelseshistorie og -processer. Der fokuseres primært på den fysiske opbygning af jordlagene – dvs. en korrekt rumlig gengivelse af jordlagenes lagfølge, strukturer og udbredelse. Jordlagene vil normalt blive defineret ud fra litologiske karakteristika, men kan også blive inddelt i forhold til bl.a. dannelsesmæssig oprindelse, herunder dannelsesmiljø og alder. Det er vigtigt, at al tilgængelig geologisk viden indgår i den rumlige geologiske modellering – enten direkte i de digitale tolkninger eller indirekte i form af beskrivelser i den medfølgende rapporttekst. Den rumlige geologiske model opbygges på baggrund af alle tilgængelige data, og af den dannelsesmæssige forståelse, der kommer ved samtolkningen af data.

Formålet med den rumlige geologiske model er:

- at udarbejde en rumlig model af jordlagenes fysiske og strukturelle opbygning i den ønskede detaljeringsgrad og som datagrundlaget samtidigt kan understøtte
- at modellere litologiske og stratigrafiske lagflader/lag og andre enheder, der er vigtige for forståelsen af områdets dannelse og opbygning

- at samtolke data; primært geologiske, geomorfologiske, litologiske, stratigrafiske, hydrologiske, kemiske og geofysiske data
- at tolke og indarbejde det geologiske dannelsesmiljø og den geologiske dannelseshistorie i den rumlige geologiske model
- at skabe et grundlag for videre brug i den hydrostratigrafiske model
- at skabe en "tolkningsdatabase", hvor de udførte geologiske tolkninger kan gemmes og derved genbruges og udbygges ved senere lejligheder

2.4.1 Geologiske tolkninger

Som nævnt indledningsvist anbefales det, at det primære tolkningsarbejde foretages i den rumlige geologiske model. Det er således i dette modeltrin, at undergrundens lagfølge skal modelleres – og vel at mærke, i hele modelrummet. Det betyder, at der skal fokuseres på den geologiske forståelse, som blev skitseret i den geologiske forståelsesmodel, og de geologiske tolkninger skal bruges til at:

- opbygge en digital 3D model af den geologi, som blev skitseret i GFM
- inddele lagserien i så mange reelle geologiske lag som muligt, men som samtidig er i overensstemmelse med formålet med modelarbejdet og ønsker til modellens detaljeringsgrad
- tolke disse lags udbredelse i modelrummet
- levere lagflader eller voxler, som dækker hele modelrummet, videre til det hydrostratigrafiske modeltrin
- levere litologiske beskrivelser af de enkelte lag og strukturel viden om undergrunden videre til det hydrostratigrafiske modeltrin

Det er vigtigt, at den lagserie, der skal modelleres, reelt kan tolkes i de forhåndenværende data. Dette kan være en stor udfordring, fordi data kan være meget ujævnt fordelt – både hvad angår geografisk fordeling og type. Hertil kommer, at kortlægningsmetoderne kan have fokus i forskellige dybder under terræn, hvilket betyder, at data ikke nødvendigvis viser sig at være optimal til opløsning af den aktuelle lagserie. Der kan eksempelvis være lag, som kun opløses i enkelte boringer, men som slet ikke kan tolkes i hele modelrummet. Sådan vil det være i stort set alle modelområder, og derfor er det vigtigt, at man inden tolkningerne i RGM begynder, har et overblik over geologien og allerede i store træk ved, hvilke lag den skal indeholde. Disse overvejelser kan gøres med afsæt i GFM og en række ”mellemregninger” i starten af RGM-trinnet, hvor man laver testprofiler og prøver at få lagserien defineret. I denne proces kan lokale forekomster eller stedvise detail-inddelinger af lagene udelades af den digitale model, fordi de kun findes i ganske få datapunkter. De detaljerede oplysninger vil i stedet kunne indgå i beskrivelsen af lagserien i rapporten. Kort sagt tilpasses modellagserien til de data man har, ud fra hvad det kan lade sig gøre at opløse. Hvis det efter disse indledende overvejelser viser sig, at data ikke indeholder den forventede grad af detalje, kan det være nødvendigt at revurdere problemformuleringen (afsnit 1.2) og måske indsamle nye og mere detaljerede data.

I praksis vil hver enkelt modellør have sin egen foretrukne måde at arbejde på. For nogle kan tilgangen til de geologiske tolkninger være, at der indledningsvist tolkes i de områder, hvor det er muligt at foretage rimeligt sikre tolkninger (reelt hvor geologien er nogenlunde homogen, datamængden størst og datakvaliteten bedst), og herefter bruges den geologiske forståelse til at fylde ud med tolkninger i de mellemliggende områder. Andre vil foretrække at ridse kendte strukturer op som en start, da disse ofte

vil danne rammerne for lagserien; eksempelvis begravede dale, glacialtektoniske deformationer eller prækvartæroverfladen. Når disse dele er på plads, kan lagserien indpasses i denne strukturelle ramme. Uanset den foretrukne arbejdsmåde er det vigtigste stadig, at geologen i RGM-trinnet får det totale overblik over den geologiske opbygning – også selvom dette overblik stedvist er usikkert, og måske vil udgøre ”det bedste bud” på lagseriens opbygning. ”Det bedste bud” vil dog være givet på baggrund af den opbyggede viden og vil derfor samtidigt være et ”kvalificeret bud”.

2.4.2 Det geologiske datagrundlag

Indledningsvist består arbejdet med den rumlige geologiske model i at samle datagrundlaget. Datagrundlaget består af alle tilgængelige og relevante data for opgaven. Dette bør allerede være blevet beskrevet i projektbeskrivelsen (se Kap. 1), men det anbefales, at modelløren undersøger, om der evt. findes yderligere data. Der kan forekomme data, som ikke er oplistet i projektbeskrivelsen, fordi de enten er blevet overset, eller fordi det på tidspunktet for udarbejdelsen af projektbeskrivelsen blev vurderet, at disse data ikke kunne bidrage med nyttig information til modelarbejdet. Dette arbejde vil typisk kunne medføre et ekstra tidsforbrug, som ligger ud over det, der oprindeligt var forudsat i projektbeskrivelsen.

De mest anvendte datatyper er nærmere beskrevet i Kap. 3. Data kan inddeles i:

- Geologiske data
    - Boredata
    - Informationer fra blotninger
    - Stratigrafiske data
    - Jordarts- og jordbundsdata
    - Topografiske data og geomorfologiske kort
- Geofysiske data
    - Seismiske data
    - Elektromagnetiske data
    - Geoelektriske data
    - Geofysiske borehulslogs
- Hydrologiske data
    - Pejledata
    - Hydraulisk ledningsevne
    - Prøvepumpningsdata
- Kemiske data
    - Grundvandskemi
    - Sedimentkemi

Herudover kan eksisterende tolkninger betragtes som en del af datagrundlaget:

- Den geologiske forståelsesmodel
- Eksisterende digitale modeller og tolkninger

De forskellige datatyper giver mere eller mindre direkte oplysninger om jordlagenes opbygning. De mest direkte oplysninger fås fra blotninger, hvor jordlagene kan betragtes umiddelbart. Intakte boreprøver kan

også siges at give direkte information om jordlagene, mens geofysiske data kun giver indirekte oplysninger. Seismiske data fortæller f.eks. noget om de akustiske forhold i jorden, mens de elektromagnetiske og elektriske data (f.eks. TEM, MEP og PACES) giver oplysninger om elektriske ledningsevner af jordlagene. De geofysiske data skal derfor først undergå en fortolkning, hvor de målte geofysiske værdier tolkes geologisk.

Hydrologiske og grundvandskemiske data er - set i relation til geologien - også indirekte data, der fortæller om, hvordan grundvandet strømmer i jordlagene, og ad denne vej kan man indirekte opnå information om jordlagenes opbygning. I kombination med øvrige data kan disse data være værdifulde indikatorer på mulige sammenhænge i den rumlige opbygning.

Fokusdybden varierer meget fra datasæt til datasæt. De fleste datasæt byder på oplysninger om de øvre jordlag, mens kun få datatyper kan give oplysninger om de dybere jordlag. TEM-data og seismiske data er eksempler på data, der kan nå til store dybder. Enkelte boringer giver også information om de dybere jordlag. Men generelt bliver datagrundlaget svagere og svagere med dybden.

De forskellige, relevante datatyper er beskrevet nærmere i Kapitel 3.

2.4.3 Modelleringsprocedurer og modelleringsteknik

Inden den egentlige tolkning i det digitale modelrum begynder, er der en del forhold, der skal afklares og fastlægges; hvilken modelleringssoftware skal bruges, hvilken modeltype skal vælges mv. Når modelkonstruktionen er fastlagt og modelskelettet er opbygget, kan man påbegynde sin egentlige rumlige geologiske modellering. Det er i princippet først på dette tidspunkt, at ens egne tolkninger bliver indbygget i modellen. I det følgende gennemgås kortfattet emnerne omkring modelleringsprocedurer og modelleringsteknik, som er detaljeret beskrevet i kapitel 4 og 5.

3D modelleringssoftware (se afsnit 4.1)
Den digitale geologiske modellering foregår i tolkningssoftware, hvor det er muligt at definere tolkningspunkter, flader, voxler m.m. i rummet og samtidig visualisere data hver for sig i diverse kombinationer. Modelrummet med både data og tolkninger skal kunne ses på vilkårlige vertikale profillinjer, på fladesnit og i forskellige former for 3D perspektiver. Således skal det geologiske tolkningssoftware indeholde moduler og databaser til håndtering af inputdata, tolkningsdata, 2D og 3D visualisering, GIS og diverse editeringsværktøjer. Softwarepakken GeoScene 3D er det mest anvendte 3D modelleringsprodukt på markedet i Danmark. GeoScene 3D er blevet udviklet af I-GIS (www.i-gis.dk) over de seneste 10-15 år i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Modelafgrænsning (se afsnit 4.2).
Inden modellen konstrueres skal der tages beslutning om dens præcise udbredelse. Udbredelsen vil være delvist foruddefineret af det undersøgelsesområde, der er vist i problemformuleringen og projektbeskrivelsen (afsnit 1.2 og 1.3), men under det indledende arbejde med modellen skal der defineres en afgrænsning, som ikke alene er bestemt af administrative forhold, men også af geologiske og hydrologiske forhold. Formålet med modellen inddrages i forbindelse med den endelige fastlæggelse af modelafgrænsning. Skal modellen senere benyttes som grundlag for en grundvandsmodel, er det de hydrologiske forhold, der bør styre afgrænsningen. Så vidt muligt bør grundvandssystemets naturlige

hydrologiske grænser følges. Her er det vigtigt at samarbejde med grundvandsmodelløren for at fastlægge den mest optimale afgrænsning.

Prioritering og visualisering af data (se afsnit 4.3)
Relevansen af de tilgængelige datasæt skal overvejes og datasættene skal holdes op mod hinanden og prioriteres i visningen. Dette er nødvendigt, da det typisk ikke er muligt at visualisere alle data på samme tid i modellen. Nogle data fylder meget visuelt, selvom de kun har mindre tolkningsmæssig værdi, mens andre data godt kan blive visualiseret uden at overblikket forstyrres. Prioriteringen afhænger også af formålet med modellen. Fokuseres der primært på de øvre jordlag, kan f.eks. seismik nedtones i visualiseringen.

Interpolation af data (se afsnit 4.4).
For at få et overblik over data, kan det være fordelagtigt at udføre interpolation af visse datasæt. Dette gøres typisk inden data vises i den geologiske model (f.eks. TEM-data). Formålet med at interpolere data er at give et forbedret grundlag for den geologiske tolkning. Fladedækkende data interpoleres typisk i horisontale snit (f.eks. geofysiske middelmodstandskort), til 3D-flader (f.eks. kote for god leder fra TEM) eller 3D grids. Profildata kan evt. interpoleres vertikalt. Interpolationsrutinerne er mange og forskellige, og valg af disse, samt benyttede indstillinger, kan være afgørende for resultatet. Valgene afhænger bl.a. af datatype, geologiske forhold, fokusdybde, datatæthed og sidst – men ikke mindst – formålet med interpolationen.

Opdatering og sammenstilling med andre modeller (se afsnit 4.5)
Er der tale om opdatering af en model, eller sammenkobling med eksisterende modeller, skal der ved valg af modelskelettet tages hensyn til, hvordan de tidligere modeller er opstillet. Specielt hvis der er krav om sammenkobling af modellerne, er det vigtigt, at modelskelettet i den nye model muliggør dette. I andre tilfælde vil man finde, at nabomodeller eller ældre modeller i samme område er af begrænset værdi og her er behovet for genbrug eller sammenstilling mindre vigtigt. I tilfælde, hvor modellen skal sammenstilles med andre modeller, bør der ske en vurdering af det oprindelige formål med de ældre modeller, samt en vurdering af modeltype, datagrundlag, modelafgrænsning/fokusområde mv. (Se afsnit 4.5).

Modeltype (se afsnit 5.1 og 5.2)
Tidligt i projektforløbet skal der tages stilling til, hvilken modeltype man vil benytte til den geologiske modellering. Oftest benyttes lagmodellen (se afsnit 5.1 om lagmodellering), men i særlige tilfælde kan det være fordelagtigt at opstille en voxelmodel (se afsnit 5.2 om voxelmodellering) eller en kombination af de to. Valget kan muligvis være taget allerede som en del af problemformuleringen og projektbeskrivelsen (afsnit 1.2 og 1.3).

Lagmodellen består grundlæggende af lagflader, som er opbygget af digitale punkter og/eller grids. Lag defineres som de mellemliggende enheder afgrænset af lagfladerne i top og bund. Voxelmodellen er opbygget af regulære voxler (”kasser”), der under modelleringsprocessen udfyldes med geologiske tolkninger. Voxelmodellen indeholder ikke egentlige lagflader, og laggrænser kan derfor ikke gengives korrekt og med samme præcision som ved lagmodellen. Voxelmodellen kan til gengæld gengive mere komplekse geologiske miljøer. Hvis der i modelområdet er geologisk belæg for det, kan der, som nævnt ovenfor, opstilles en kombineret lag- og voxelmodel. I visse tilfælde kan det vælges at foretage

gridmodellering, hvor griddede lag ændres uden at de tilgrundliggende tolkningspunkter ændres (se afsnit 5.1.8).

Profilnetværk og projektionsafstande (se afsnit 5.1).
Traditionelt bliver de fleste geologiske modeller bygget op omkring et profilnetværk, hvor i tolkningerne udføres. Det betyder reelt, at der tolkes i 2D, men at den endelige rumlige geologiske model er i 3D. Rent teknisk er det muligt at tolke direkte i 3D-rummet i GeoScene 3D, men da det er meget vanskeligt, vælges det typisk at bruge tolkning langs 2D profiler. På hvert enkelt profil projiceres data vinkelret ind fra fastlagte, maksimale projektionsafstande. På profilerne kan data således visualiseres og sammenholdes i to dimensioner. De projektionsafstande, der vælges, bør variere i forhold til et samspil mellem de forventede geologiske forhold, datatætheden og datatypen. Hvor der er homogen geologi, kan afstanden være stor, men i områder med kompleks geologi, bør der benyttes små projektionsafstande. Er der stor datatæthed kan man indskrænke sin projektionsafstand for at opnå et bedre overblik.

Profilerne kan udlægges i forskellige netværkstyper. Overordnet arbejdes der enten med regulære og objektivt placerede netværk, eller med irregulære netværk subjektivt placeret i forhold til både data og geologiske strukturer. Fordelene ved det irregulære netværk er, at man ved hjælp af knækpunkter kan styre sine profiler efter data og dermed søge at minimere projektionsafstandene. Desuden er det muligt at skære geologiske strukturer på en optimal måde – f.eks. vinkelret på aflange strukturer, så som dale og forkastninger. Det er også vigtigt, at strukturerne bliver afbildet på flere profiler og dermed kan ses fra flere vinkler og afspejlet i forskellige datasæt. Derfor er det allerede i de indledende faser af modelopstillingen fordelagtigt at have et forhåndskendskab til strukturernes art, orientering og mulige udbredelse. Dette vil muligvis fremgå af den geologiske forståelsesmodel. Profilerne bør dog udlægges, så de er nogenlunde retlinede for at opretholde et rumligt overblik over modelrummet.

En hensigtsmæssig arbejdsgang er først at udlægge et netværk af profiler, som inddrager alle relevante data på mindst et profil. Når man så når frem til tolkningsprocessen, kan man gradvist udbygge netværket i forhold til de geologiske forhold og i forhold til den detaljeringsgrad datatolkningen tillader. Generelt kan det anbefales at opbygge sit profilnetværk, så profilerne krydser hinanden. Det giver en sikkerhed for, at der er sammenhæng i de geologiske tolkninger på tværs. Herudover anbefales brug af dynamiske profiler til tjek af modellen i hele rummet og eventuelt til at tilføje supplerende tolkning.

Ved den rumlige geologiske modellering er der ikke nødvendigvis behov for at arbejde med fast definerede profillinjer. Dynamiske, flytbare profiler kan også bruges i GeoScene3D, men det bør dog tilstræbes at bruge en vis systematik i anvendelsen af de dynamiske profiler, for senere at kunne genskabe profilerne og se de tilhørende punkttolkninger. Dette kan gøres ved f.eks. at anvende faste orienteringer N-S eller V-Ø og faste afstande mellem ”profilspringene”.

Lagmodellering (se afsnit 5.1)
Den rumlige geologiske modellering foregår normalt ved hjælp af punkttolkning, som er en digitalisering af punkter i modelrummet; i praksis ofte på profiler. Tolkningspunkter afsættes i modelrummet, hvor en given flade tolkes at være til stede. Tolkningspunkterne udgør det grundlæggende element i den rumlige geologiske model. Tolkningspunkter, der tilsammen definerer en bestemt laggrænse, og som menes at angive et tilstrækkeligt forløb og en fyldestgørende form af laggrænsen, kan interpoleres til en gridflade, men det er stadig tolkningspunkterne, der udgør det grundlæggende element i modellen.

Der er defineret en række forskellige typer af digitale punkter. Disse er beskrevet under afsnit 5.1 og vil derfor kun blive kort beskrevet her. De digitale punkter omfatter:

- Tolkningspunkter:
    - Snappede tolkningspunkter
    - Frie tolkningspunkter
- Hjælpepunkter:
    - Styrepunkter
    - Afgrænsningspunkter
    - Negativpunkter
    - Maksimumkotepunkter
    - Minimumkotepunkter

Der skelnes mellem *tolkningspunkter* og *hjælpepunkter*, hvor *tolkningspunkter* benyttes til at definere og modellere laggrænsers og geologiske strukturers former, og hvor de *snappede tolkningspunkter* knyttes præcist til data i modelrummet. Bortset fra styrepunkterne er hjælpepunkterne ikke punkter, der definerer lagfladernes rumlige former, og de indgår derfor ikke nødvendigvis i interpolationen. Disse punkter anvendes primært som en hjælp ved modelleringsarbejdet. Det vil dog være geo-modelløren, der i den konkrete model afgør om hjælpepunkterne skal indgå i interpolationen eller ej.

Det bør generelt tilstræbes at gengive de geologiske forhold med anvendelse af så få tolkningspunkter som muligt, men dog sådan at der tilknyttes tolkningspunkter til alle relevante data. Optimalt set bør tætheden af tolkningspunkter som minimum være så stor, at fladen kan gengives tilfredsstillende ved en efterfølgende interpolation, men et vist råderum for modelløren kan anbefales. Eksempelvis vil holdningen om at begrænse antallet af frie tolkningspunkter være god for nogle modellører og mindre god for andre. Det vigtigste er, at modelleringen bliver transparent for andre end modelløren selv. Da der ligger en tolkning til grund for ethvert tolkningspunkt, bør punkterne tilknyttes information om tolkningen/antagelsen og dennes sikkerhed. Denne information bør løbende indbygges i modellen under modelarbejdet (tolkningsdatabasen).

Profiltolkning er den mest anvendte metode ved modelopstillinger. Profilerne viser vertikale snit gennem lagserien, hvor data ved visualiseringen projiceres ind fra valgte projektionsafstande. Punkterne består af forskellige typer af tolkningspunkter og hjælpepunkter. Tolkningspunkterne repræsenterer lagflader og lagfladerne kan være lateralt afgrænsede.

Horisontaltolkning er tolkning og modellering i det horisontale plan. Som grundlag benyttes ofte forskellige korttemaer og forskellige former for visualisering af data i horisontale snit. Horisontaltolkning vil sjældent kunne stå alene, og vil normalt fungere som et supplement til profiltolkningen. Ved at kombinere profiltolkning og horisontaltolkning får modelløren et godt 3-dimensionelt overblik over data og de tolkede lag og lagflader.

Interpolation af den tolkede lagflade kan foretages undervejs i tolkningsprocessen, hvor den interpolerede flade holdes op mod tolkningspunkterne såvel som mod grunddata og mod geologens forståelse af området. Hvis der er uoverensstemmelser, foretages justeringer i tolkningspunkterne og interpolationen foretages igen, indtil den ønskede form af lagfladen er opnået.

Interpolation af lagflader (se afsnit 5.1)
De tolkede lagflader skal interpoleres til grids. Valget af cellestørrelse kan med fordel ske i forhold til den forventede cellestørrelse i den efterfølgende grundvandsmodel. I praksis laves interpolationerne ofte med en cellestørrelse på 50 eller 100 meter og defineres bedst i samarbejde med grundvandsmodelløren. Valget af gridcellestørrelsen kan ses som et kompromis mellem detaljeringsgrad (små celler) og modellens håndterbarhed (store celler). Nogle interfaces til grundvandsmodeller giver dog mulighed for at arbejde med uafhængige gridstørrelser, og i sådanne tilfælde kan interpolation med fordel laves i den detaljeringsgrad, der er behov for i forhold til den geologiske kompleksitet.

Som interpolationsalgoritme anvendes ofte enten Inverse Distance, der som udgangspunkt er tro mod datapunkterne, eller Kriging, som ud fra en statistisk analyse kan optimere interpolationen, hvis der kan beskrives en bestemt fordeling af datapunkterne (tolkningspunkterne). Ved de fleste interpolationsalgoritmer skal der vælges en søgeradius, og valget af en sådan afhænger igen af parametre som afstanden mellem datapunkterne, korrelationen, ønsker om udglatning, samt den valgte cellestørrelse.

De interpolerede gridflader skal kontrolleres og kvalitetssikres. Det tjekkes, at der er overensstemmelse mellem centrale boringer og det færdige grid, ligesom det tjekkes, om der er irregulære former omkring profilkryds og omkring enkelte datapunkter. Det tjekkes også om profillinjerne kommer til udtryk i former som dale eller rygge. Da den rumlige geologiske model ikke må have krydsende lagflader, er det nødvendigt at sikre sig, at dette ikke er tilfældet efter interpolationen. Funktioner til at foretage dette, og til at korrigere de udarbejdede grids i tilfælde af krydsende flader, samt at tilpasse grids, så disse bliver sammenfaldende eller nært sammenfaldende, findes i GeoScene3D.

Voxelmodellering (se afsnit 5.2)
Voxelmodellering er et alternativ til lagmodellering, hvor konceptet bag er, at modelområdet opdeles i voxler (kasser). Voxler har en kvadratisk diskretisering i det horisontale plan, f.eks. 50 x 50 m eller 100 x 100 m, mens den vertikale diskretisering typisk 5 m eller tyndere, afhængigt af formål og ønsket detaljeringsgrad. Den færdige rumlige geologiske model eller hydrostratigrafiske model vil således bestå af et stort antal voxler, hvor hver voxel tilskrives tolkninger i form af f.eks. geologi, hydrauliske egenskaber, usikkerheder m.m. En væsentlig fordel ved voxelmodellering er, at det er let at foretage tolkning af ikke-sammenhængende og heterogene lag. Anvendelsen af voxelmodeller har dog den ulempe, at det kan være svært at opnå en præcis afgrænsning af de geologiske/hydrostratigrafiske lag og enheder både horisontalt og vertikalt. Valget af voxel-størrelse vil typisk være styret af tilgængelig computerkraft og datatæthed (se også afsnit 4.1 om 3D-modellerings software).

I GeoScene3D er der udviklet en række værktøjer til understøttelse af såvel manuel som automatisk/semiautomatisk voxelmodellering. Ved manuel voxelmodellering er det muligt at udvælge enkelt-voxler eller grupper af voxler og tilskrive disse en tolkning. Dette betyder, at geologen kan bruge sin geologiske viden under tolkningsproceduren på samme måde, som når der foretages punkttolkning af flader. Ved automatisk voxelmodellering tilskrives tolkningerne automatisk til voxlerne. Dette er naturligvis betydeligt mere effektivt end når manuel tolkning foretages, men udfordringen ved automatisk voxelmodellering er at få udnyttet og implementeret alle data og den geologiske viden.

Modellering af deformerede lagserier og geologiske strukturer (se afsnit 5.3 og 5.4)
Det kan være forbundet med problemer at få nogle geologiske strukturers former gengivet korrekt i modellen, også selvom strukturernes rumlige former forstås og kendes af modelløren. Dette gælder særligt, hvis strukturerne har en begrænset størrelse, er diffuse eller har en irregulær form. Sådanne strukturer kan f.eks. være begravede dale, forkastninger, saltstrukturer og glacialtektoniske foldninger og overskydninger. I nogle tilfælde, hvis kompleksiteten er for stor til enten at tolke de rumlige strukturer eller til at få dem modelleret, kan man vælge blot at registrere og indkredse områderne geografisk. Dette gælder typisk for stærkt glacialtektonisk forstyrrede komplekser, hvor en modellering af den nøjagtige geometri af overskydninger og hældende/foldede lagpakker ofte vil være umulig. Af denne grund bliver komplekst opbyggede områder i mange tilfælde ignoreret ved geologisk modellering, fordi en modellering ikke vil være mulig i en lagmodel. Men da inhomogeniteterne kan have stor betydning for f.eks. beregning af grundvandets strømningsmønstre, er det meget vigtigt, at områderne identificeres og afgrænses, hvis lagene ikke kan 3D-modelleres på traditionel vis.

Ofte forekommende strukturer er f.eks. begravede dale. Begravede dale forekommer overalt i landet og er generelt komplekst opbygget med mange interne, erosive lagflader og generationer af krydsende dale (www.begravededale.dk). De begravede dale er for langt størstepartens vedkommende dannet ved smeltevandserosion under istidernes gletschere og kan stedvist være dybere end 400 m. Dalene kan gennemskære dybereliggende grundvandsmagasiner og er vigtige at inkludere i den geologiske model. Ved profiltolkning bør profillinjerne placeres vinkelret på dalenes længderetninger og med en profilafstand, der er tæt nok til at beskrive dalene med tolkningspunkter langs profillinjerne. Der vil ofte være behov for at afgrænse lagene i dalene lateralt langs dalenes flanker. Da dalene er erosivt nedskåret gennem de omgivende lag, skal disse lag også afgrænses ind mod dalstrukturerne. Det kan være hensigtsmæssigt at benytte sig af horisontaltolkning med f.eks. baggrundskort konstrueret på baggrund af TEM-data. Den komplekse opbygning gør det ofte til en udfordring at få dalene modelleret, hvorfor flere forskellige typer af hjælpepunkter med fordel kan benyttes. Ikke desto mindre er det vigtigt at få dalene ordentligt modelleret, da de har stor indflydelse på grundvandets strømningsveje.

En væsentlig erfaring fra de seneste årtiers geologiske modellering i Danmark er, at prækvartæroverfladen er et meget vigtigt element i forståelsen af opbygningen af de øverste 300-500 meter. Prækvartæroverfladen danner en vigtig skillelinje i lagserien mellem de prækvartære og de kvartære aflejringer. Overfladen er generelt erosiv og har mange steder et betydeligt relief, som i mange tilfælde skyldes de nedskårne begravede dale. En kortlægning af prækvartæroverfladens relief er derfor vigtig at foretage, og det anbefales, at fladen inkluderes i alle modeller, forudsat at den ligger indenfor modellens fokus og datas rækkevidde.

Forkastninger er et andet eksempel på ofte forekommende geologiske strukturer, som både er væsentlige og vanskelige at modellere.

Usikkerhedsvurderinger (se afsnit 5.5.1)
De rumlige geologiske tolkninger er alle behæftet med usikkerhed. Når den færdige model efterfølgende anvendes i den videre proces, vil modellens usikkerheder bringes med videre og have betydning for det videre arbejde. For at andre skal kunne vurdere og bruge modellen og dens tolkninger, må de tilhørende usikkerhedsbetragtninger kendes, og det er derfor geologens opgave at vurdere og dokumentere de usikkerheder, der knytter sig til tolkningerne, samt at foretage en dokumentation, visualisering og formidling af usikkerhederne.

2.4.4 Dokumentation, kvalitetssikring og afrapportering

Foruden en overordnet dokumentation til brug ved projektstyringen foretages en teknisk dokumentation af modelleringsprocessen til brug ved kvalitetssikring eller ved overdragelse og videreudvikling af modellen. Alene det at benytte modellen – bl.a. i forbindelse med opstilling af en hydrologisk model – forudsætter, at en omfattende teknisk dokumentation foreligger (se kapitel 6).

Dokumentationen bør omfatte:

- Beskrivelse og vurdering af datasæt – begrundelse for anvendelse/eksklusion
- Beskrivelse af valg i forbindelse med modelkonstruktion
- Begrundelse for valg af tolkningslag og -laggrænser
- Beskrivelser af baggrunden for alle antagelser og tolkninger, der er indarbejdet i modellen
- Benyttede interpolationsrutiner og indstillinger for disse
- Usikkerhedsvurderinger

Detaljeringsgraden af dokumentationen afhænger af formålet, men skal modellen kunne reproduceres fuldstændigt, kræves en meget detaljeret dokumentation. For at kunne foretage en tilstrækkelig detaljeret dokumentation for en videre anvendelse af modellen, er det vigtigt, at dokumentationen foretages løbende. Det anbefales derfor, at der laves digitale logbøger, hvor i de tekniske detaljer noteres gennem hele projektet.

Som afslutning på den rumlige geologiske modellering kan det anbefales, at der opstilles en række fokuspunkter for den hydrostratigrafiske model, det vil sige geologiske forhold, som forventes at kunne have stor betydning for grundvandets strømning i undergrunden, og som derfor bør have speciel opmærksomhed.

Inden den rumlige geologiske model kan betragtes som færdig, bør den kvalitetssikres. Dette kan evt. foregå undervejs i modelarbejdet, og bør udføres på forskellige niveauer (se afsnit 5.5.2). Følgende bør kvalitetssikres:

- Datagrundlaget – de enkelte datasæt (graden af dette kan defineres i projektbeskrivelsen)
- Modelopsætningen
- Tolkningsprocedurerne
- De geologiske tolkninger
- Usikkerhedsvurderingerne
- Dokumentationen

Kvalitetssikringen kan ske ved en traditionel intern kvalitetskontrol eller evt. ved et eksternt peer review.

Slutproduktet for den rumlige geologiske model består af en rapporttekst og en digital model. Rapportens indhold er nærmere beskrevet i kapitel 6. Normalt afrapporteres alle dele af modelprocessen i en samlet rapport.

2.4.5 Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model

I forbindelse med afslutningen af den rumlige geologiske modellering bør der foretages en status, som inddrager de involverede parter i projektet. I denne status holdes resultatet op mod de mål, der blev beskrevet i projektbeskrivelsen. Hvis slutmålet er en grundvandsmodel med tilhørende definerede modelkrav, skal det vurderes, om den rumlige geologiske model danner tilstrækkeligt grundlag for at opstille den hydrostratigrafiske model. Det kan evt. have vist sig, at datadækningen, og dermed den geologiske forståelse i dele af området, er begrænset, og at modellen derfor i disse dele af området må forventes kun at kunne danne grundlag for en usikker hydrostratigrafisk model, og dermed også en usikker grundvandsmodel. Status kan derfor munde ud i en beslutning om at gennemføre en iteration mere ved indsamling af supplerende data og udbygning af den rumlige geologiske model, inden arbejdsgangen fortsætter med en hydrostratigrafisk model.

Geologiske zoneringstemaer kan bruges som en støtte ved overgangen fra den rumlige geologiske model til den hydrostratigrafiske model. Det kan især være nødvendigt med geologiske zoneringstemaer, hvis den rumlige geologiske model indeholder lag, som ikke defineres ud fra litologi, eller hvis der i den rumlige geologiske model kan ses tegn på litologiske variationer indenfor det enkelte lag.

2.5 Hydrostratigrafisk model (Modeltrin 3)

Som nævnt i det foregående er der en meget grundlæggende forskel mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Den rumlige geologiske model er en model over undergrundens fysiske opbygning, men samtidig også en model der beskriver geologisk dannelseshistorie og -processer. I modsætning hertil fokuseres der i den hydrostratigrafiske model på en beskrivelse af hydrostratigrafiske enheder ud fra litologi og hydrauliske egenskaber.

Ved tolkning i den hydrostratigrafiske model sammenstilles den rumlige geologiske model med hydrologiske og kemiske data, som primært skal bidrage med informationer om lagenes hydrauliske egenskaber. Modellen vil i mange tilfælde blive en forsimplet udgave af den rumlige geologiske model, da den hydrostratigrafiske model normalt kun indeholder grundvandsmagasiner og mellemliggende lag (akviferer og akvitarder). I lighed med den rumlige geologiske model dækker de hydrostratigrafiske tolkninger hele modelrummet, og som oftest vil der kunne ske genbrug af lagflader og tolkningsdatabase fra den rumlige geologiske model.

Det er vigtigt, at der tidligt i forløbet tages beslutning om, hvilke informationer der skal videregives til grundvandsmodelløren og på hvilken form. Derfor er dialog mellem geolog og grundvandsmodellør vigtig undervejs i opstillingen af den hydrostratigrafiske model.

2.5.1 Det hydrostratigrafiske datagrundlag

Datagrundlaget for den hydrostratigrafiske model udgøres af den rumlige geologiske model samt af data, der giver information om jordlagenes hydrauliske karakteristika og sammenhænge. Data, der direkte eller indirekte giver sådan information, er primært:

- Hydrologiske data (Pumpedata og pejledata)
- Boredata
- Geofysiske data
- Grundvandskemiske data

Datatyperne er nærmere beskrevet i afsnit 3.3.

2.5.2 Modelleringsteknik og -procedurer

Den hydrostratigrafiske model opstilles i samme digitale 3D-rum som den rumlige geologiske model, og i mange tilfælde vil de to modeller være mere eller mindre identiske digitale modeller. De hydrostratigrafiske tolkninger vil blive foretaget på baggrund af den rumlige geologiske model, men nogle gange kan det være nødvendigt at mindske antallet af lag og foretage strukturelle forsimplinger i lagserien. Da der i de tilfælde ikke vil være sammenfald med den rumlige geologiske models lag, skal der opstilles en ny lagserie i den hydrostratigrafiske model bestående af akviferer og akvitarder. Den hydrostratigrafiske lagserie kan eventuelt få færre lag end den rumlige geologiske model, da lag med sammenlignelige hydrauliske egenskaber vil kunne slås sammen, eller hvis modellen skal tilpasses et foruddefineret antal lag. En hydrostratigrafisk enhed kan således bestå af et eller flere geologiske lag. Forskellige sandlag dannet på forskellige tidspunkter eller ved forskellige geologiske processer kan f.eks. slås sammen, hvis disse skønnes at have tilnærmelsesvist ens hydrauliske egenskaber. Hvis der fra den rumlige geologiske model foreligger et geologisk zoneringstema (se afsnit 2.4.5), kan dette benyttes ved en zonering af de hydrostratigrafiske lag.

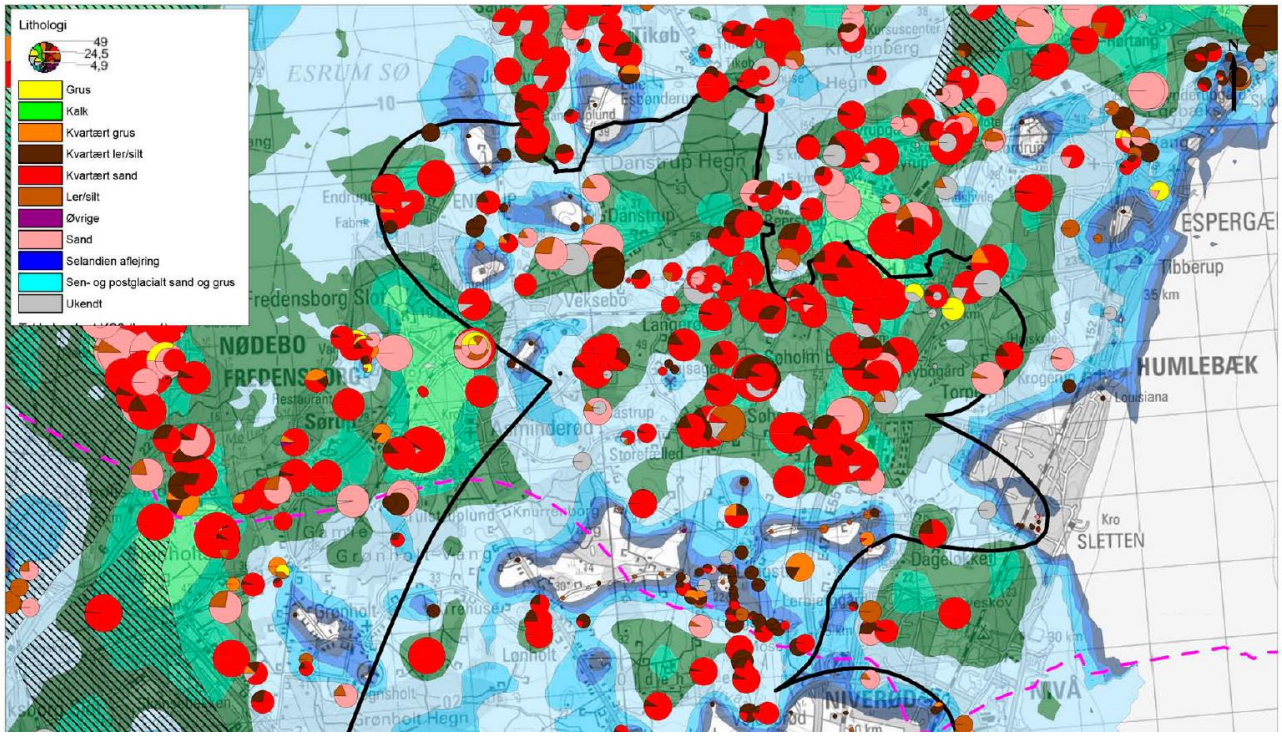
Den hydrostratigrafiske modellering
Som nævnt ovenfor opstilles den hydrostratigrafiske model i samme tolkningsmiljø som den rumlige geologiske model, så denne direkte kan benyttes som udgangspunkt. Der vil dog alligevel være flere ting at forholde sig til; bl.a. kan man i nogle tilfælde overveje, om man stadig vil arbejde med samme modeltype, eller om man evt. vil skifte fra en lagmodel til en voxelmodel eller omvendt. Der kan i forhold til grundvandsmodellen i nogle tilfælde være fordele ved at skifte til en voxelmodel (se afsnit 5.2 om voxelmodellering).

Det er vigtigt, at der fra starten tages overordnede beslutninger omkring den hydrostratigrafiske model; specielt den nødvendige vertikale detaljering af modellen. De hydrostratigrafiske enheder vil som regel kunne følge den vertikale opdeling af de rumlige geologiske lag, men ofte kan der være tale om, at nogle sandlag er gennemgående, mens andre kun genfindes som afgrænsede legemer. Et eksempel herpå kan være et område karakteriseret ved moræneler med indslag af sandlegemer i forskellige områder. Her er det nødvendigt at definere, hvor mange vertikale niveauer af sandlag, der skal medtages i modellen for en korrekt rumlig repræsentation. F.eks. et niveau, der repræsenterer de øvre sekundære magasiner, et til to niveauer der beskriver de dybereliggende regionale magasiner, og et nedre niveau reserveret til de mere dybtliggende magasiner i f.eks. begravede dale. Oftest vil disse niveauer ikke udgøre sammenhængende magasiner, men bestå af spredte legemer. I nogle områder vil der således kunne genfindes sandlegemer i samtlige niveauer, mens der i andre områder kun er sandlegemer i få niveauer. Modellen skal afgrænses nedadtil, hvor der ideelt set hverken sker strømning ud eller ind i modellen (se afsnit 2.5.4 om overgangen fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel). Denne nedre grænse er typisk defineret ved et impermeabelt lag dybt i lagserien (se afsnit 4.2 om modelafgrænsning).

Opstillingen af den hydrostratigrafiske model foregår ved en integreret vurdering og tolkning af datagrundlaget. Der foretages en vurdering af de enheder, som i strømningsmæssig forstand er sammenhængende, og på baggrund af kendskabet til de hydrauliske egenskaber, vurderes det om – og i hvilket omfang – udvalgte lag kan slås sammen. På baggrund heraf navngives de enkelte lagflader i relation til den hydrostratigrafiske lagserie. Ved voxelmodeller vurderes de hydrauliske egenskaber kvalitativt på baggrund af litologien fra den rumlige geologiske model, og der sammenstilles med hydrologiske data. Det er vigtigt, at opstillingen af den hydrostratigrafiske model sker i samarbejde med grundvandsmodelløren og i forhold til de mål, der er beskrevet i projektbeskrivelsen.

Interpolation af flader og lag

Hvis der er sket ændringer i de oprindelige interpolerede flader, som er importeret fra den rumlige geologiske model eller hvis der i den hydrostratigrafiske modellering er sket tilføjelser af tolkningspunkter til fladerne kan der være behov for fornyet gridning og interpolation.



Figur 2-4: Et eksempel på litologisk zonering i Gribskov og Fredensborg (fra Orbicon, 2013). Litologi indenfor "Lag 4 (KS2)" er vist med "lagkage-signatur" ovenpå et kontureret tykkelseskort; blå er tyndest og lysegrønne tykkest.

Hydrostratigrafiske zoneringstemaer

Hvis der fra den rumlige geologiske model foreligger et geologisk zoneringstema, kan dette benyttes til udarbejdelse af hydrostratigrafiske zoneringstemaer tilknyttet et hydrostratigrafisk lag, eksempelvis:

- Den horisontale udbredelse af sedimenttyper (f.eks. dl, ml eller ds, dg, ms, mg), der typisk er adskilt i den rumlige geologiske model, men kan være samlet i et hydrostratigrafisk lerlag eller sandlag (se f.eks. *Figur **2-4***)

- Prøvepumpningsdata, der har haft betydning for tolkningen af de hydrostratigrafiske lag, kan videregives som et zoneringstema med T-værdier.

Der kan også f.eks. udarbejdes zoneringstemaer over grundvandets salinitet, hvis det er et problem der skal tages højde for i en efterfølgende grundvandsmodel. Da de hydrologiske og grundvandskemiske data ofte er begrænsede i mængde og detaljer, kan de dog være svære at udbrede som zoneringstema for hele modelområdet.

Usikkerhedsvurderinger
Da den rumlige geologiske model danner grundlag for den hydrostratigrafiske model, vil usikkerhederne fra den rumlige geologiske model alt andet lige også gælde for den hydrostratigrafiske model (se afsnit 5.5.1 om usikkerhedsvurderinger). Der kan dog i tilfælde af simplificeringer af lagserien eller andre typer af ændringer være behov for at justere usikkerhedsvurderingerne.

2.5.3 Dokumentation, kvalitetssikring og afrapportering

Dokumentation foretages, som for den rumlige geologiske models vedkommende, og foruden en overordnet dokumentation til brug ved projektstyringen, foretages en teknisk dokumentation til brug ved kvalitetssikring eller evt. overdragelse og videreudvikling af modellen.

Dokumentationen omfatter typisk:

- Beskrivelse og vurderinger af datasæt – begrundelse for anvendelse/eksklusion
- Beskrivelse af valg i forbindelse med modelkonstruktion – eventuelle ændringer sammenlignet med den rumlige geologiske model
- Beskrivelse af den valgte hydrostratigrafiske opbygning
- Beskrivelser af baggrunden for alle antagelser og tolkninger, der er indarbejdet i modellen
- Beskrivelse af baggrunden for valg af eventuelle zoneringstemaer
- Eventuelle benyttede interpolationsrutiner og indstillinger for disse
- Den forløbne arbejdsgang/arbejdsproces

Generelt vil der være behov for en relativ stor detaljeringsgrad af dokumentationen (se generelt kapitel 6). For at kunne foretage en tilstrækkelig detaljeret dokumentation for en videre anvendelse af modellen, er det i lighed med den rumlige geologiske model vigtigt, at dokumentationen foretages løbende. Det anbefales derfor, at der laves en digital logbog der understøtter tolkningsdatabasen og hvori de tekniske detaljer noteres gennem hele projektet.

Ovenstående udgør den grundlæggende dokumentation for det udførte modelarbejde. Modelleringen skal afrapporteres i en samlet rapport, hvori der gives et samlet overblik over modelleringsprocessen og dens resultater. Det vil sige et resumé af ovennævnte punkter, samt en række uddybende kort, skitser og beskrivelser, der giver et overblik over de hydrostratigrafiske forhold i området. Dette bør bl.a. omfatte:

- En præsentation og beskrivelse af de tolkede hydrostratigrafiske enheder
- Eventuelle hydrostratigrafiske zoneringstemaer

- Overfladekort og tykkelseskort over de modellerede enheder, hvis disse ikke allerede er udarbejdet i den rumlige geologiske model
- Generaliserede profilskitser, der overordnet viser den hydrostratigrafiske opbygning
- Udvalgte profiler
- Sammenlignende kort og skitser, der viser forskellene mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model
- Betragtninger over usikkerhed

Der skal laves kvalitetssikring af den hydrostratigrafiske model. Dette gøres principielt på samme måde som beskrevet under den rumlige geologiske model (se afsnit 2.4.4).

Den hydrostratigrafiske model holdes i øvrigt op mod den rumlige geologiske model, og forskellene beskrives. Den faglige kvalitetssikring af den hydrostratigrafiske model kan med fordel udføres gennem en diskussion med både en erfaren geolog og erfaren hydrolog/hydrogeolog. Det bør også kontrolleres, at de tolkede flader dækker hele det område, som grundvandsmodellen skal dække, og at lagene i øvrigt er udarbejdet på en måde, så de direkte kan anvendes i grundvandsmodellen. Det kan eksempelvis være vigtigt at tjekke, at der stadig er overensstemmelse mellem boringernes filterindtag og de tolkede grundvandsmagasiner.

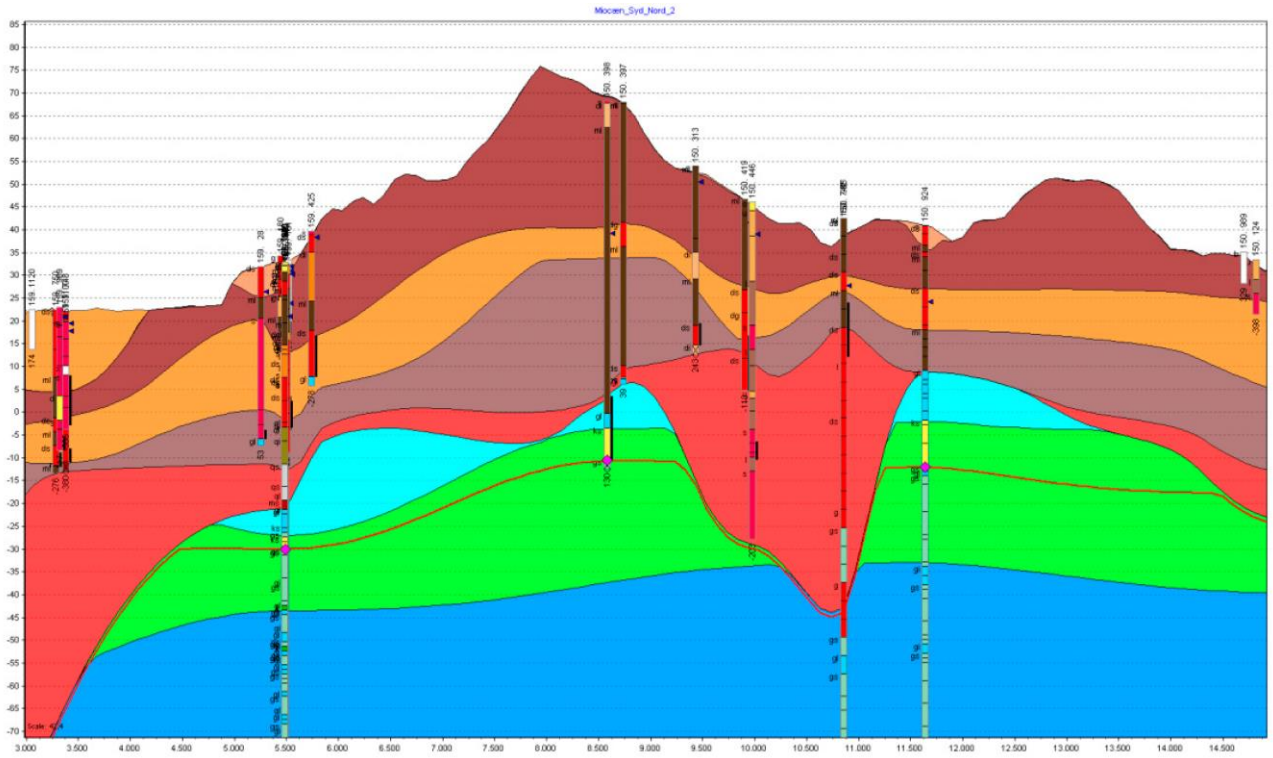
2.5.4 Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel

I forbindelse med afrapporteringen bør der foretages en status med deltagelse af de involverede parter i projektet. Resultatet skal i denne status holdes op mod det mål, der blev beskrevet i projektbeskrivelsen. Det vurderes, om den udarbejdede model danner tilstrækkeligt grundlag til at opstille en grundvandsmodel. Det kan evt. have vist sig, at datadækningen og dermed den hydrostratigrafiske forståelse i dele af området er begrænset, og at grundvandsmodellen derfor i dele af området må forventes at give for usikre resultater. Status kan derfor munde ud i en beslutning om at gennemføre en iteration mere ved indsamling af supplerende data, for at opnå en forøget viden. Dette vil resultere i, at den rumlige geologiske model først udbygges, og at der dernæst foretages en opdatering af den hydrostratigrafiske model.

Slutproduktet i opstilling af den hydrostratigrafiske model er foruden en beskrivende rapporttekst og dokumentation, en rumlig model på digital form, som dækker hele det område, som grundvandsmodellen skal dække. Denne model skal konverteres til det valgte grundvandsmodel-software, hvor den skal indbygges i et numerisk grid. I denne proces bør der være et tæt samspil mellem geolog og grundvandsmodellør til sikring af, at den geologiske forståelse og de identificerede hydrogeologiske karakteristika bedst muligt bliver repræsenteret i grundvandsmodellen.

Er den hydrostratigrafiske model opstillet som en lagmodel, anvendes de hydrostratigrafiske enheder oftest som beregningslag i grundvandsmodellen, evt. med en vertikal underopdeling af lagene for en bedre opløsning af grundvandsstrømningerne. For geologisk komplekse områder vil det dog ikke altid være muligt at definere beregningslagene, så de er sammenfaldende med de hydrostratigrafiske enheder. Et eksempel herpå er forekomsten af dale, (se *Figur **2-5***), hvor der stilles særlige krav til den numeriske diskretisering, så der kan opnås en korrekt vandudveksling mellem sedimenterne i dalen og de omkringliggende sedimenter.

Ligeledes kan valget af den vertikale diskretisering have stor betydning for den simulerede grundvands- og overfladevandsinteraktion. I et område med moræneler i de øvre lag kan selv en mindre sandlinse/sandlag omkring et vandløb have stor betydning for de aktuelle strømningsveje. Repræsenteres dette sand ikke eksplicit i modellen pga. den valgte vertikale diskretisering, men kun ved en effektiv ledningsevne (en vægtet midling mellem sandet og det omkringliggende ler) kan dette resultere i en fejlagtig gengivelse af strømningsvejene (Nielsen, 2007). Anvendes modellen til en vurdering af den overordnede vandressource, vil dette være mindre betydningsfuldt, mens det kan have stor betydning for meget detaljerede studier omkring vandløb.



Figur 2-5: Udvalgt profilsnit gennem hydrostratigrafisk model. Profilet viser overvejende sandfyldte, kvartære begravede dalstrukturer (rød), som er eroderet ned i vekslende sandede og lerede tertiære aflejringer (blå/grøn). Brune og orange farver angiver kvartære sand- og lerlag. Fra geologisk model for Bevtoft-Hovslund kortlægningsområde (COWI, 2010).

En af de primære opgaver under kalibreringen af en grundvandsmodel er justering af de hydrauliske parametre; specielt de hydrauliske ledningsevner for de hydrostratigrafiske enheder. Dette er en krævende opgave med mange faldgruber; ikke mindst risikoen for overparametrisering. Indføres der mange ”frie” parametre i modellen, kan man populært sagt få modellen til at passe med hvad som helst, men dens prediktive evne vil være meget tvivlsom (Refsgaard, 2005). Det er derfor vigtigt, at geologen deltager i den endelige parametrisering af de hydrostratigrafiske enheder. Her kan bidrages med vurderinger af, hvilke hydrostratigrafiske enheder, der kan antages at have samme strømningsmæssige egenskaber. Geologen kan ligeledes have opnået en viden om eventuelle væsentlige forskelle inden for en hydrostratigrafisk enhed, f.eks. på baggrund af forventet dannelsesmiljø, som kan give problemer under kalibreringen. Endelig er der behov for et geologisk input til fastsættelse af initiale værdier for de hydrauliske ledningsevner, ligesom der skal fastsættes realistiske intervaller for disse parametre.

Anvendes urealistiske startværdier, kan det give problemer under kalibreringen. Omvendt kan kalibrerede parametre med urealistiske værdier indikere problemer med modelkonceptet, og det vil være nødvendigt at revurdere dette, herunder den rumlige geologiske og den hydrostratigrafiske model. Den hydrostratigrafiske model bør således ledsages af zoneringskort, der angiver variationer i lagenes fysiske egenskaber (se afsnit 2.4.5). Ligeledes bør der opstilles en tabel med realistiske variationsbredder for de hydrostratigrafiske enheders hydrauliske ledningsevner. Er det ikke muligt at give et bud på absolutte hydrauliske ledningsevner, bør der som minimum opstilles en liste over relative ledningsevner.

En væsentlig og ofte dominerende kilde til usikkerheder på modelsimuleringer er usikkerhederne i de tolkninger, der er indeholdt i den rumlige geologiske og den hydrostratigrafiske model. En væsentlig udfordring her er at finde en metode, som kan håndtere geologens kvalitative vurderinger af usikkerheden. For at nå dette mål er der stadig behov for udvikling af procedurer og metoder. I afsnit 5.5.1 om usikkerhedsvurderinger er der givet et forslag til, hvordan en usikkerhedsanalyse kan gennemføres. Der er ingen tvivl om, at hvis man ønsker at vurdere usikkerheden stammende fra de kvalitative tolkninger på en effektiv måde, så er det af afgørende vigtighed, at der er en god og løbende kommunikation mellem den geologiske modellør og grundvandsmodelløren. Det er også meget væsentligt, at geologen foretager en grundig dokumentation (se kapitel 0). Se i øvrigt Henriksen et al. 2017.

2.6 Overvejelser omkring prioritering af arbejdsindsatsen i de tre modeltrin

2.6.1 Sammenlægning eller udeladelse af modeltrin

I flere geologiske modelleringsprojekter udført i de senere år, er den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model ikke udarbejdet adskilte, som anbefalet i Geo-vejledningen fra 2008 (se f.eks. Andersen & Nyholm, 2012 og Rambøll, 2011). Årsagerne til dette har sandsynligvis været at finde i faglige eller mere projektrelaterede overvejelser, så som:

Faglige argumenter

- Eksisterende modeller i området har givet en tilstrækkelig grundig oversigt over den rumlige geologi i området
- Lagene i den rumlige geologiske model vurderedes at være de samme, som ville komme med i den hydrostratigrafiske model
- Den hydrostratigrafiske model indeholdt en blanding af geologi og hydrostratigrafi
- Den rumlige geologiske model var vanskelig at opstille og tolke, fordi data ikke gav anledning til andet end tolkning af overordnet litologi (gælder ofte for store dele af den kvartære lagserie)

Projektrelaterede argumenter

- Hverken økonomi eller tidsplan tillod udarbejdelse af andet end en forståelsesmodel og en kombineret rumlig geologisk og hydrostratigrafisk model
- Udarbejdelse af en separat rumlig geologisk model vurderedes at være for tidskrævende og den vurderedes vanskelig at formidle videre

- Opdragsgiveren efterspurgte ikke den rumlige geologiske model, fordi den generelt er vanskelig at forstå og fordi den vil fremstå som en ”mellemregning”

De faglige argumenter nævnt ovenfor er stærke og har kunnet gøre det vanskeligt at argumentere for ikke at slå de to modeltrin sammen. I mange tilfælde vil geomodelløren have haft veldefinerede prækvartære lag, som direkte kunne indgå i den hydrostratigrafiske model. Den kvartære lagserie derimod, har tit en mere kompleks opbygning, hvor en detaljeret opdeling af lagserien baseret på rene geologiske kriterier og aldre, vil være svær.

De projektrelaterede argumenter har sandsynligvis haft udspring i tidsplan og økonomi, hvor der er søgt besparende tiltag i et måske i forvejen stramt projekt. Dog vil de to sidste punkter vist ovenfor kunne være udslagsgivende, fordi geomodelløren har skullet overbevise opdragsgiveren om, at det er en god ide med tre separate modeltrin.

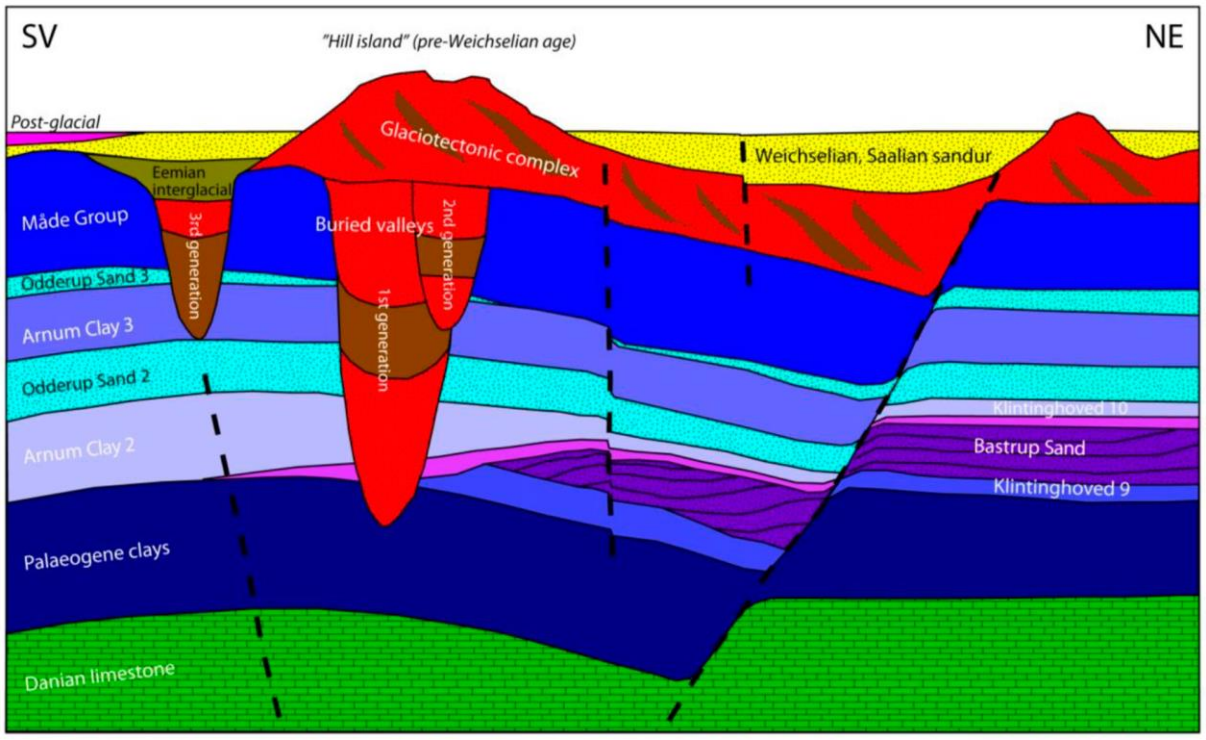
Hvis den rumlige geologiske model ikke er opstillet separat, vil der ved senere opdateringer være en risiko for, at det kun bliver hydrostratigrafien, som opdateres, og ikke nødvendigvis forståelsen af de geologiske sammenhænge. Det betyder, at det geologiske vidensniveau ikke gøres bedre, og at information i værste fald går tabt. Også i tilfælde af, at modeller sammenkobles, vil de væsentligste argumenter for korrelationer af grundvandsmagasinerne i den hydrostratigrafiske model let kunne blive reduceret til, om lagene kotemæssigt befinder sig i samme niveau.

I tilfælde af, at der findes nyere og fyldestgørende geologiske forståelsesmodeller, som dækker det aktuelle modelområde, vil argumenter for at fravælge den geologiske forståelsesmodel være til stede. Hele det første modeltrin kan således reduceres til at bestå af et kort resume og reference til tidligere forståelsesmodeller. Det er dog stadig vigtigt at have et overblik over eventuel ny information, samt at modelløren har forholdt sig kritisk til de tidligere forståelsesmodeller.

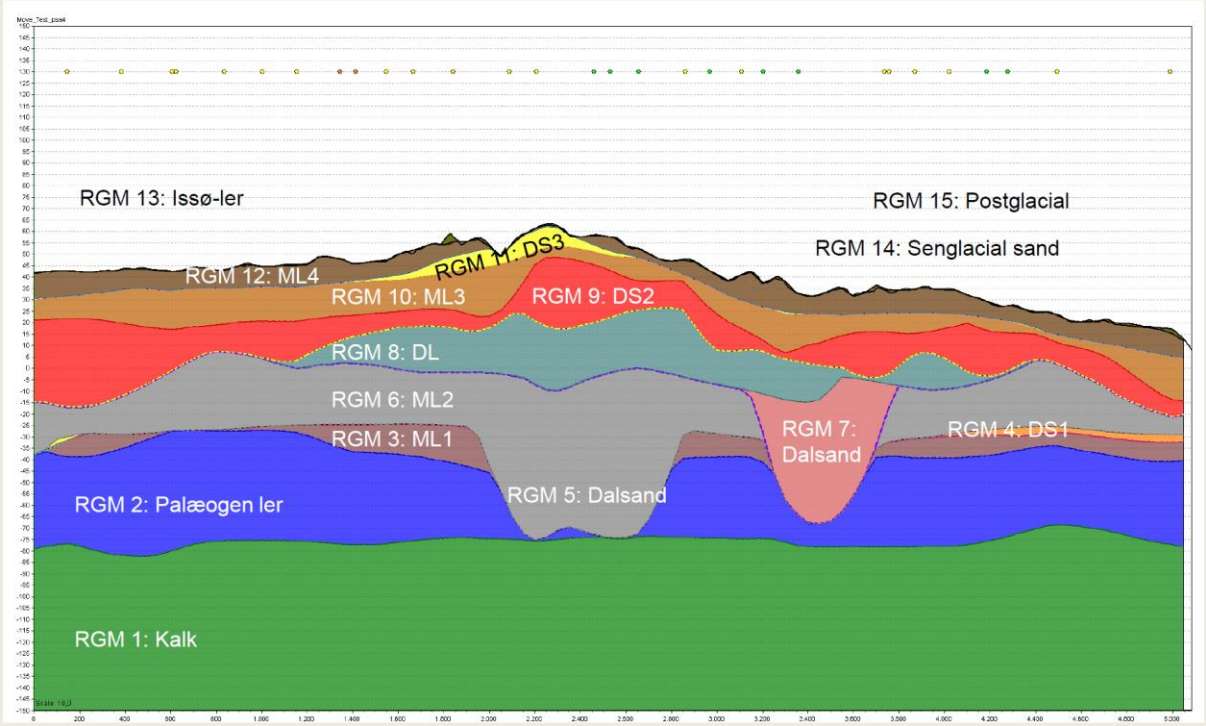
Et andet tilfælde, hvor modeltrin vil kunne fravælges, er ved modelprojekter, hvor formålet ikke er opstilling af en grundvandsmodel. I disse tilfælde kan den hydrostratigrafiske model naturligvis udelades.

2.6.2 Fokus på den rumlige geologiske model

En manglende forståelse af den geologiske opbygning vil gøre det svært at give kvalificerede faglige argumenter for, at et givent lag forløber på en bestemt måde i undergrunden, og i så fald vil der være mange forskellige tolkningsmuligheder i spil. I Seifert et al. (2007) blev seks forskellige ”konceptuelle geologiske modeller” sat til at danne grundlag for seks individuelle grundvandsmodeller. Konklusionen var, at resultaterne fra de seks grundvandsmodeller var meget forskellige, hvilket understreger vigtigheden af den geologiske forståelse. I Seifert et al. (2007) argumenteredes der for, at der bør udarbejdes flere forskellige geologiske modeller i samme modelområde. Dette sker under normale omstændigheder ikke, da det vil være meget omkostningskrævende at opstille flere geologiske modeller i samme område, med mindre man bruger en statistisk fremgangsmåde, hvor de forskellige model-realisationer ikke nødvendigvis vil være baseret på geologiske argumenter (se afsnit 5.2.2).



Figur 2-6: Skitse af geologisk opbygning i Tønder-området (fra Jørgensen et al., 2014; Tønder). Den rumlige geologiske model er opstillet som en kombineret lag- og voxelmodel.



Figur 2-7: Profilsnit gennem rumlig geologisk model (RGM) i Odense Vest (Sandersen & Kallesøe, 2017) Figuren viser de 14 RGM-lag, som er tolket i hele modelrummet.

For at sikre fokus på den geologiske forståelse, anbefales det i nærværende geo-vejledning, at den største arbejdsindsats ved geologisk modellering i grundvandssammenhænge lægges på den rumlige geologiske model (se tidligere afsnit). De tre modeltrin bibeholdes; den geologiske forståelsesmodels betydning er uændret, mens en stor del af arbejdet, der tidligere lå i den hydrostratigrafiske model eller i forskellige "blandingsformer" mellem de to modeller, flyttes over i den rumlige geologiske model. Den rumlige geologiske model vil derfor fremover være dér, hvor den primære modellering finder sted. Det kræver derfor, at der er fokus på forståelse og modellering af de rent geologiske sammenhænge og at der – i modsætning til tidligere - modelleres i hele modelrummet i det rumlige geologiske modeltrin. Det betyder reelt, at arbejdet med den hydrostratigrafiske model i mange tilfælde vil reduceres til mindre justeringer af lag/lagtolkninger i den rumlige geologiske model samt vurderinger af lagenes hydrauliske egenskaber i et tæt samarbejde med grundvandsmodellørerne.

Eksempler på geologiske modelprojekter, hvor fokus har ligget på den rumlige geologiske model er Jørgensen et al. (2014); Tønder (*Figur **2**-**6***) og Sandersen & Kallesøe (2017); Odense Vest (*Figur **2**-**7***).

Det anbefales:

- at alle tre modeltrin tages i brug ved geologiske modelleringsprojekter
- at den væsentligste arbejdsindsats i det geologiske modelleringsprojekt sker i den rumlige geologiske model, og at der her tolkes i hele 3D-modelrummet
- at hvis et modeltrin fravælges eller to modeltrin slås sammen, bliver diskussionerne og beslutningerne omkring dette dokumenteret som en del af afrapporteringen
- at hvis der allerede findes nyere geologiske forståelsesmodeller, kan arbejdet med forståelsesmodellen reduceres til et resume af eksisterende forståelsesmodeller

3. 3D geologisk modellering - Data

3.1 Geologiske og topografiske data

3.1.1 Boredata

Boredata udgør ofte nøgledata ved geologisk modellering, fordi de giver direkte oplysninger om den litologiske lagfølge. Det er ved brug af boredata dog vigtigt at have for øje, at boredata har meget vekslende kvalitet og ofte kan være fejlbehæftede. Vurdering og kontrol af boredata inden anvendelse til modelopstilling er derfor vigtig.

Ud over standardboredata er der til nogle boringer knyttet supplerende stratigrafiske data (se afsnit 3.1.3 om stratigrafiske data) og/eller geofysiske borehulslogs (se afsnit 3.2.4 om geofysiske borehulslogs).

Figur 3-1: Indretning af boreplads ved skylleboring med lufthæve-metoden. Foto: Tom Martlev Pallesen.

Boremetoder og prøvehåndtering

Kvaliteten af boredata afhænger blandt andet af boremetoden (Sørensen & Schmidt, 2001). De mest benyttede boremetoder i Danmark er tørboring, direkte skylleboring og omvendt skylleboring. Tørboringer udføres med snegl, forskellige typer sandspande og slagværktøjer. Forede snegleboringer, hvor et arbejdsrør føres med ned under borearbejdet, giver mulighed for en ret præcis bestemmelse af

laggrænser og giver typisk gode prøver til litologisk beskrivelse, fordi opblanding af materiale fra flere niveauer mindskes. Prøver udtaget med sandspand er sammenblandede indenfor et større prøvetagningsinterval (typisk 1 m) og er af varierende kvalitet.

Direkte skylleboringer, hvor det løsborede materiale transporteres op til overfladen af boremudder mellem borestang og boringens væg, giver en upræcis bestemmelse af laggrænser og ofte dårlige prøver til litologisk bestemmelse. I modsætning hertil giver omvendte skylleboringer, der blandt andet inkluderer lufthæveboringer (se *Figur **3-1***), en bedre bestemmelse af laggrænser samt bedre prøver til litologisk beskrivelse, fordi prøven løftes op til overfladen inde i borerøret. En mere indgående beskrivelse af boreteknikker og deres indflydelse på prøvekvaliteten findes i Ditlefsen et al., 2008.

Figur 3-2: Overskuelig oplægning af jordprøver på borepladsen. Foto: Tom Martlev Pallesen.

Ud over boremetoden har typen af sedimentfang og den omhyggelighed, hvormed borearbejdet, prøvetagningen og prøvebeskrivelsen er udført, stor betydning for kvaliteten af data (Ditlefsen et al., 2008). Dette kan bl.a. være grundigheden, hvormed brøndboreren har beskrevet laggrænser og lag under arbejdet og antallet af prøver, der er udtaget til beskrivelse. Prøvekvaliteten afhænger også af typen og karakteren af de gennemborede lag og eksempelvis kan boring i hårde jordlag betyde, at den opborede prøve bliver lille og indeholder knust materiale. På den måde kommer prøven ikke på den bedste måde til at repræsentere det gennemborede lag.

Geotekniske boringer er som regel af god kvalitet og er velbeskrevne, mens kvaliteten af prøver og prøvebeskrivelse fra vandindvindingsboringer varierer. Dette skyldes overordnet set, at geotekniske boringer altid har et specifikt formål (vurderinger i forbindelse med fundering) og at dette kræver en systematik og ensartethed i såvel arbejdets udførelse som i tolkning og afrapportering. I forbindelse med grundvand og drikkevand kan formålet med boringerne variere, lige fra undersøgelsesboringer uden filtersætning til fuldt udbyggede produktionsboringer ved et vandværk. Generelt har der ikke været så stor fokus på de opborede prøvers kvalitet, som det har været tilfældet for de geotekniske boringer, da succeskriteriet typisk har været lokalisering af vandførende lag. Der har således gennem årene ikke været det samme incitament til at ensrette metoder og procedurer, men i de senere år er der i kraft af bl.a. nye vejledninger (Bastrup et al., 2013; Ditlefsen et al., 2008; Gravesen et al., 2004; Larsen et al., 1995; Sørensen & Schmidt, 2001), arbejdet med at øge ensartetheden. Nogle boreentreprenører har gennem tiden traditionelt været omhyggelige med borearbejde og beskrivelser, mens andre har været mindre omhyggelige (*Figur **3-2***).

Jupiterdatabasen

Indberetning af boringer til GEUS

I henhold til vandforsyningsloven og råstofloven af 2007 samt bekendtgørelse om udførelse og sløjfning af boringer og brønde på land af 2007 (se f.eks. www.retsinformation.dk), skal alle informationer, data og boreprøver fra grundvandsboringer og råstofboringer indberettes til GEUS. Det er almindeligvis brøndboreren, som indberetter boringerne, men det kan også være konsulentfirmaer og offentlige institutioner. Borejournaler og data tilgår Borearkivet ved GEUS, mens prøver sendes til Boreprøvelaboratoriet på GEUS (Gravesen, 1993).

I Boreprøvelaboratoriet modtages og behandles årligt mellem 16.000 og 18.000 boreprøver. Prøverne, der beskrives geologisk, stammer fra alle typer vandforsyningsboringer, fra overvågnings- og moniteringsboringer, fra råstofboringer samt fra et mindre antal videnskabelige boringer. Metoderne til beskrivelse af jordprøverne følger Larsen et al. 1995, og er blevet udviklet på GEUS gennem de sidste 30 år. Efter behandling lagres alle informationer i GEUS centrale boringsdatabase Jupiter.

Indberetning af boringer til GEUS fremgår af Boringsbekendtgørelsen og en vejledning om registrering og indberetning af boringer kan findes på www.geus.dk/borearkiv. Indberetning til GEUS er et krav for:

- Alle boringer efter vandforsyningsloven, inkl. erstatningsboringer
- Alle boringer efter råstofloven
- Boringer til vertikale jordvarmeanlæg efter miljøbeskyttelsesloven
- Øvrige boringer, hvis der er stillet krav herom i tilladelsen

I boringsbekendtgørelsen skelnes mellem A- og B-boringer (Bastrup et al., 2013):

Kategori A-boringer:

1) Boringer til vandindvinding, jf. kapitel 4 i lov om vandforsyning m.v., samt undersøgelsesboringer, prøveboringer og boringer til kortlægning af vandressourcer m.v.
2) Boringer til permanent grundvandssænkning.
3) Boringer til grundvandssænkning, som kræver tilladelse lov om vandforsyning m.v.
4) Permanente pejleboringer.

5) Moniteringsboringer.
6) Miljøtekniske boringer, hvor der efterlades filter- eller forerør.
7) Miljøtekniske afværgeboringer.
8) Boringer til tilledning af vand til undergrunden
9) Boringer til vertikale jordvarmeanlæg, jf. bekendtgørelse om jordvarmeanlæg
10) Andre boringer, hvor der efterlades installationer.

Kategori B-boringer:

1) Boringer til midlertidig grundvandssænkning der ikke kræver tilladelse efter lov om vandforsyning m.v.
2) Miljøtekniske boringer, hvor der ikke efterlades filter- eller forerør.
3) Geotekniske boringer.
4) Råstofboringer.
5) Andre boringer, hvor der ikke efterlades installationer.

Øvrige boringer kan indberettes frivilligt. B-boringer kan indberettes til Jupiterdatabasen, som også er udvidet med nye faciliteter til indberetning af geotekniske parametre (Hansen et al. 2015).

Indberettede boredata

Prøvebeskrivelserne i Jupiter kan overordnet opdeles i to grupper:

1) Prøvebeskrivelser med tolket dannelsesmiljø og alder, beskrevet af geologer og
2) Prøvebeskrivelser, der ikke er tolket geologisk, og som typisk er foretaget af brøndboreren i felten.

Lag med geologbedømte prøver har i Jupiter-databasen betegnelser bestående af to bogstaver, f.eks. ML (moræneler) og DS (diluvial smeltevandssand). Det første bogstav beskriver det tolkede dannelsesmiljø, mens det andet beskriver litologien. Det er vigtigt at være opmærksom på, at den samlede geologiske prøvebeskrivelse med angivelse af hoved- og bikomponenter, farve og kalkholdighed m.m. ud over de nævnte jordartssymboler findes i Jupiter-databasen. Prøver, som ikke er bedømt af geologer, eller hvor geologen af forskellige grunde ikke har kunnet tolke dannelsesmiljøet, angives med betegnelser bestående af ét bogstav, som kun beskriver litologien, f.eks. L (ler) og S (sand).

For boringer med geologbedømte prøver har brøndboreren i de fleste tilfælde indsendt prøver til GEUS, jf. ovenstående. Boringer udført i forbindelse med den amtslige og den nationale grundvandskortlægning, vil dog ofte være beskrevet af geologer i felten, som typisk er fra et rådgiverfirma eller fra det amt/miljøcenter/styrelse, der har bestilt boringen. Antallet af indsendte prøver varierer fra ganske få prøver pr. boring til én prøve pr. boremeter, plus yderligere prøver ved hyppige lagskift. Hvis der er langt mellem prøverne, kan der være stor usikkerhed på de angivne laggrænser, som er angivet af brøndboreren. Der kan dog være tilfælde, hvor oplysninger om laggrænser ikke er registreret, og i de tilfælde vil der blive registreret en tolket laggrænse med baggrund i de beskrevne prøver. Brøndborernes optegnelser kan i de fleste tilfælde findes på Jupiter-databasens hjemmeside for den pågældende boring (GEUS, Jupiterdatabasen).

Sammenligning med brøndborerjournalerne kan også i nogle tilfælde vise andre fejl eller uoverensstemmelser i data, så som åbenlyst forkerte litologiske beskrivelser, som f.eks. kan skyldes ombytning af prøver eller en ikke repræsentativ prøveudtagelse. Det er vigtigt at tage i betragtning, at

brøndboreren eller feltgeologen har haft god mulighed for at følge med i boreprocessen og bedømme hele det opborede materiale i felten, mens geologen i laboratoriet kun har haft en lille, og måske tilfældigt udtaget prøve, at forholde sig til. Brøndborerens borejournal og øvrige feltjournaler udgør derfor ofte et værdifuldt supplement til de prøvebeskrivelser og geologiske tolkninger, der er registreret i Jupiter.

Boredata

Datatyper

Den typiske kilde til boredata er GEUS' Jupiter-database. I Jupiterdatabasen ligger data fra primært vandforsyningsrelaterede boringer på digital form (Jupiter-format) og kan indlæses direkte i de gængse geologiske tolkningsprogrammer. Jupiter indeholder, som nævnt ovenfor, ud over de digitale data også en række scannede dokumenter så som de originale brøndborerjournaler og informationer om prøvepumpninger, analyser og lignende. Andre kilder til originale brøndborerjournaler er offentlige myndigheder samt brøndborerfirmaer.

Foruden vandforsyningsboringer findes der også mange geotekniske boringer, råstofboringer og miljøtekniske boringer i Jupiter. Men der er imidlertid mange af denne type boringer, som af forskellige årsager ikke er indrapporteret til Jupiter. Eksempelvis ligger Regionerne inde med boredata fra miljøundersøgelser lagret i egne GeoGIS databaser. Dette betyder, at data derfor også kan findes lokalt hos geotekniske firmaer, rådgivere, boreentreprenører, Banestyrelsen, råstofindvindere og andre myndigheder.

De mest almindelige datatyper er opsummeret i nedenstående *Tabel **3-1***:

Tabel 3-1: Datatyper

Datatype	**Dataformat**	**Bemærkninger**
Boringer i Jupiter	JupiterXL	På forskellige database-formater.
Originale brøndborerjournaler	Analoge	Ofte findes scannede borejournaler i Jupiter (pdf-format), og kan tilgås ved at opsøge den pågældende boring på Jupiterdatabasens hjemmeside.
Geotekniske boringer, råstofboringer, miljøtekniske boringer	Analoge, GeoGIS, andre digitale, nogle i JupiterXL	Findes hos geotekniske firmaer, rådgivere, Regionerne og Banestyrelsen, m.fl.

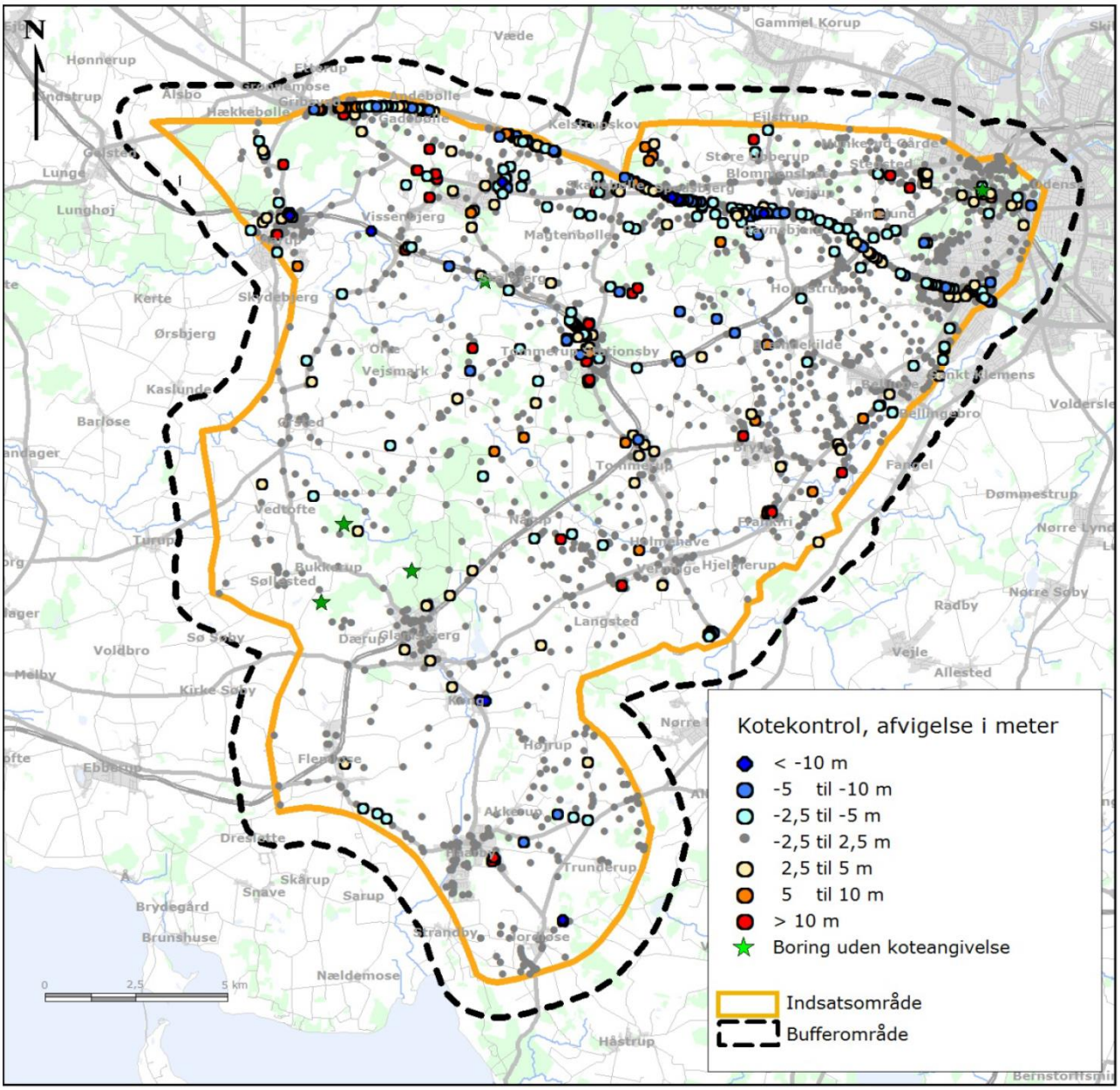
Datakvalitet

Kvaliteten af boredata afhænger, som ovenfor beskrevet, af boremetode, boreentreprenørens omhyggelighed med borearbejdet, samt tætheden og kvaliteten af de prøver, der er udtaget og efterfølgende indsendt til GEUS.

Med en varierende kvalitet af boredata er det vigtigt at få et overblik over boringernes kvalitet for at sikre, at de bedste boredata får størst vægt i det videre arbejde. Boringerne kan inddeles i kategorier i forhold til kvaliteten, hvilket kan gøres på mange forskellige måder. Listen nedenfor viser et eksempel på en overordnet inddeling i fem kategorier af boringer med aftagende kvalitet:

1. Detaljeret beskrevne geologbedømte boringer med stratigrafiske data
2. Øvrige detaljeret beskrevne, geologbedømte boringer
3. Øvrige geologbedømte boringer
4. Boringer uden geologbedømmelse
5. Boringer uden litologiske oplysninger

Ovenstående liste kunne eksempelvis også udbygges ved at inddrage kvalitet/omfang af brøndborerbeskrivelserne, der som regel også findes i databasen.



Figur 3-3: Eksempel på kotekontrol for boringer; fra Odense Vest kortlægningsområde (Rambøll, 2012).

Udsøgningen i Jupiterdata kan ske automatisk ud fra opstillede kriterier, som matcher den kategorisering, som er valgt for det givne projekt. Ønskes der en mere detaljeret analyse kan der suppleres med manuel sortering i søgningerne.

De boringer, som har den højeste kvalitet og som samtidigt er de dybeste eller er vigtige indvindingsboringer, kan eventuelt udpeges som nøgleboringer i forbindelse med de geologiske tolkninger.

Fejl og mangler ved data

Foruden ovennævnte variationer i kvaliteten af boredata kan der forekomme deciderede fejl i boringsoplysningerne i Jupiter. Disse fejl kan være sket i alle led af arbejdsprocessen. Der kan eksempelvis være tale om fejl i stamoplysninger (X, Y og Z koordinater), i registrering af filterintervaller, i prøvebeskrivelser og i registrering af laggrænser:

- **Fejl i X og Y koordinater** kan være vanskelige at afsløre. Forkerte stednavne kan indikere fejl, ligesom placeringer i søer, i veje, til havs osv. kan pege på unøjagtige boringslokaliseringer. En visuel kontrol på topografiske kort kan måske fange fejlplacerede boringer, men det gælder i sagens natur ikke boringer, som fejlagtigt er placerede udenfor det aktuelle område. Et eksempel på kotekontrol af boringer i et kortlægningsområde kan ses i *Figur **3-3***.
- **Fejl i terrænkoten (Z)** kan kontrolleres ved hjælp af en digital højdemodel, og at der konstateres fejl på mere end 2,5 m i 5-10 % af boringerne er ikke ualmindeligt (Storstrøms Amt, 2006). Hvis Z-koordinaten afviger meget i enkelte boringer, kan der være tale om, at boringen har fejl i lokaliseringen, og derfor skal der i disse tilfælde også ske en kontrol af X-Y koordinaterne. Mange boringer uden korrekt Z-koordinat vil vise sig som boringer, der har top i kote 0 eller som tydeligvist ligger alt for dybt eller alt for højt i kote, og disse er typisk lette at identificere. Sværere er det at identificere de boringer, som kun afviger med +/- et par meter.
- **Fejl i registrering af filterintervallerne** kan i nogle tilfælde afsløres ved hjælp af brøndborerjournalen, skønt der også er eksempler på, at denne kan indeholde åbenlyse fejl.
- **Evt. fejl i lagbeskrivelser** i Jupiter kan kontrolleres ved hjælp af originale brøndborerjournaler, hydrauliske data og geofysiske logs. En registreret filtersætning i et lerlag, samtidig med at der er registeret en god ydelse fra boringen, er en klar indikation af fejl i prøvebeskrivelse, i laggrænse eller i det registrerede filterinterval.
- **Fejl i laggrænser** kan som nævnt kontrolleres ved hjælp af brøndborerjournaler og geofysiske logs.

Graden af kontrol afhænger af skala, ambitioner og budget for den geologiske model. Procedurer, kriterier og resultater af kvalitetskontrollen skal dokumenteres. Under alle omstændigheder er det vigtigt, at de mest betydningsfulde fejl rettes inden anvendelsen i den geologiske modellering.

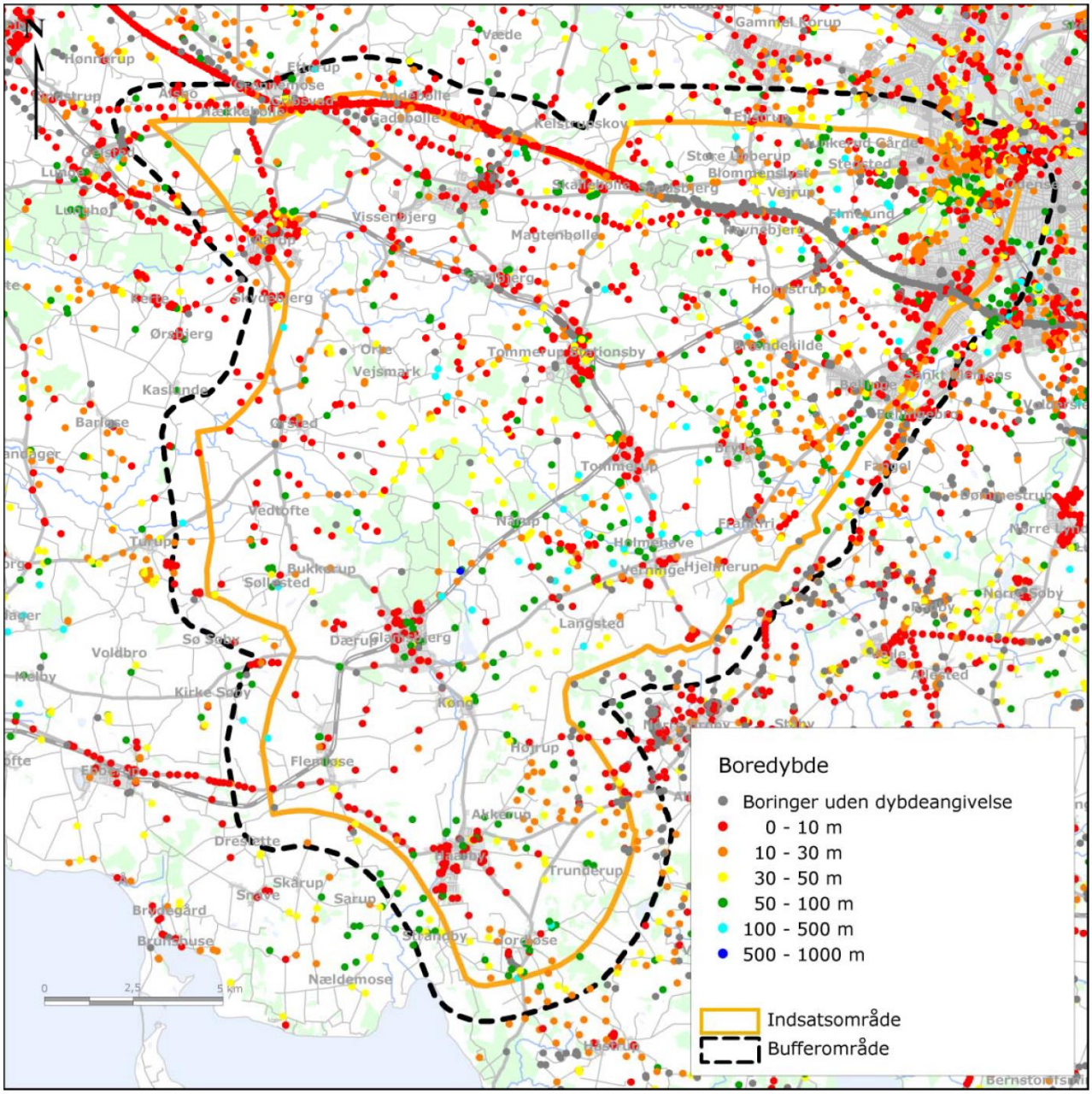
Praktisk anvendelse i den geologiske model

Visualisering og tolkning

Tæthed og dybde af boringer i det aktuelle modelområde vises på GIS-kort, som det kan ses i eksemplet *Figur **3-4***, hvor farvesignaturer angiver dybden af den enkelte boring. Boringsdybden kan også vises med varierende punktstørrelse i forhold til boredybden, eller boringsdybderne kan alternativt deles ud på flere

kort, hvor boredybden vises separat for valgte dybdeintervaller. Hvilken metode der anvendes, er ikke afgørende; det vigtigste er, at der opnås et overblik over data.

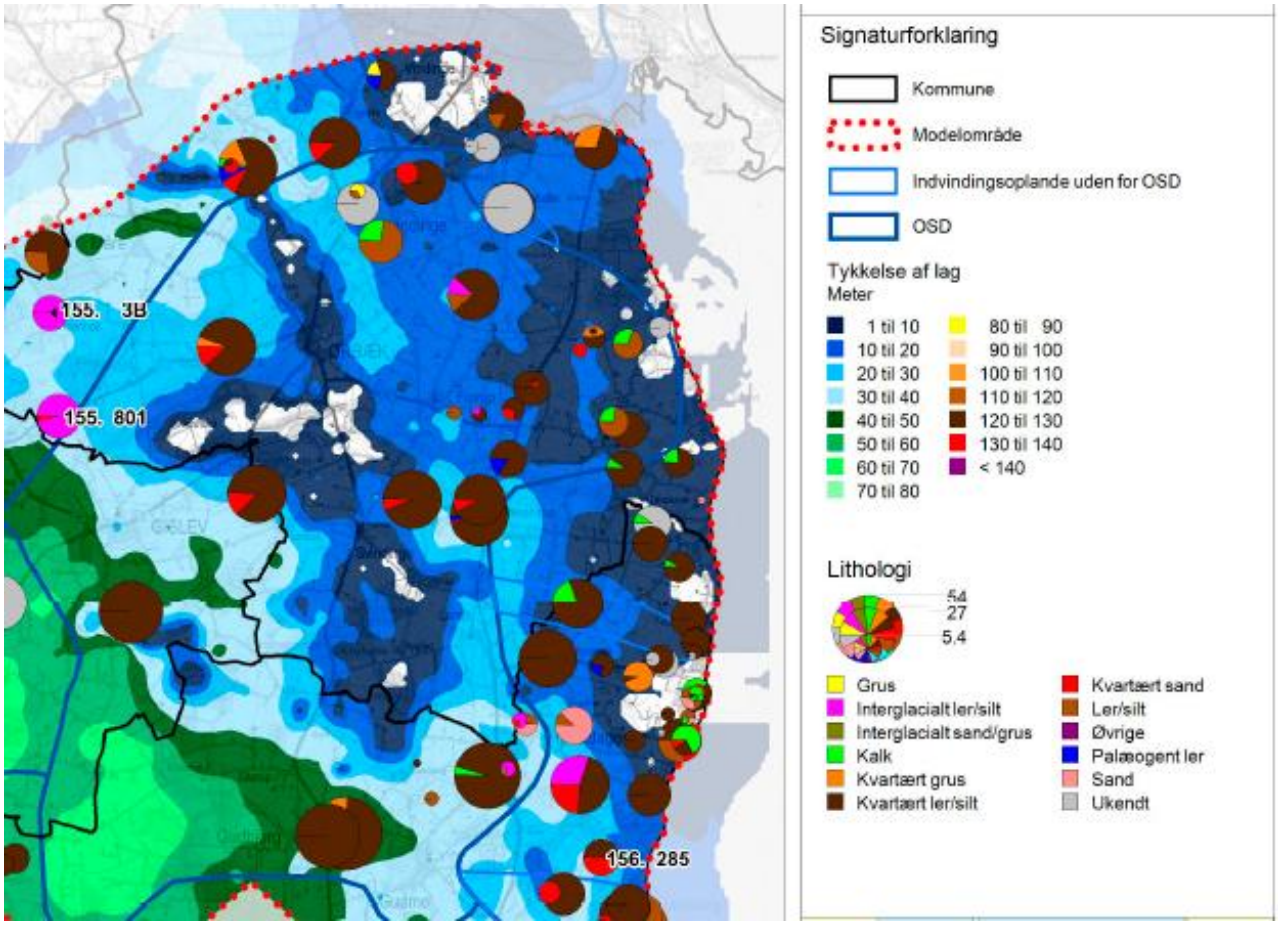
Boringernes litologi for specifikke lag kan også vises på GIS-kort, hvor der samtidigt vises tykkelse af det pågældende lag (se eksempel i *Figur **3-5***). Kort som dette kan dog først laves efter at den geologiske model er udført, da det kræver de enkelte lags modellerede top og bund, fordi udsøgningen af litologierne sker i Jupiterdata med baggrund i lagets koteintervaller. Denne visualiseringsmåde er avanceret og kortene kan være svære at overskue, men der kan opnås et overblik over litologiske variationer indenfor laget og samtidig kan kortene virke som en kvalitetskontrol på laggrænserne.



Figur 3-4: Eksempel på visualisering af boredybder (Jupiterdata). Fra Odense Vest kortlægningsområde (Rambøll, 2012).

Visualiseringen af boringer i det geologiske modelleringssoftware sker typisk ved profiloptegning. Det anbefales at benytte GEUS' DGU-standardfarveskala til visualisering af litologier. I følge DGU-standardfarveskalaen gives der kun farvesignatur til lag med dobbeltsymboler – dvs. lag der er geologisk tolkede både mht. dannelsesmiljø og litologi. Hvis man ønsker at tildele farvesignatur til lag med enkeltsymboler, bør man altid anvende farver, der afviger fra standardfarveskalaen i GeoScene 3D, således at det er let at se forskel på hhv. tolkede og ikke tolkede lag.

Den geologiske tolkning af boringer udgør kernen i de fleste geologiske modelprojekter. Ved tolkningsarbejdet kan der med fordel tages udgangspunkt i de bedst beskrevne boringer og i eventuelle andre nøgleboringer, som er vigtige i det konkrete projekt. Hvis der findes boringer med stratigrafiske data (se afsnit 3.1.3) eller boringer med geofysisk logstratigrafi (se afsnit 3.2.4) giver disse et naturligt udgangspunkt for tolkningen. Herefter kan der fortsættes med tolkning af boringer af mindre god kvalitet. På dette stadie i tolkningsprocessen inddrages øvrige datatyper i tolkningsarbejdet – ikke mindst geofysiske data, der kan støtte tolkningerne mellem boringerne. I andre situationer, hvor boredata spiller en mindre betydningsfuld rolle, evt. pga. af manglende sikre boredata, kan arbejdsgangen være anderledes. Her vil geofysiske data blive taget i betragtning på et tidligere tidspunkt i tolkningsprocessen.



Figur 3-5: Litologisk zonering af specifikt modellag på baggrund af Jupiterdata. Udsnit af kortbilag fra kortlægning på Sydøstfyn (Orbicon, 2014).

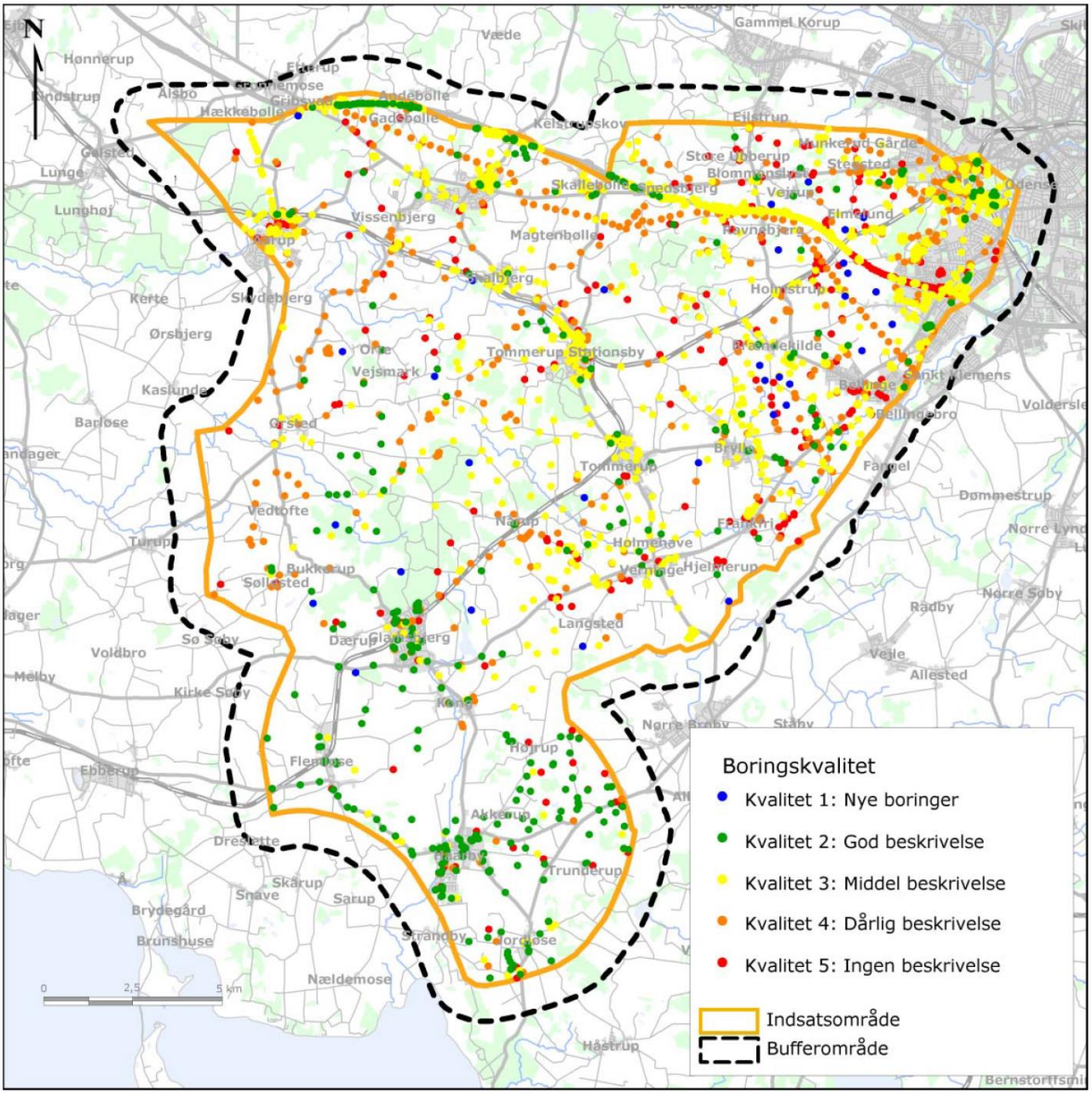
Boringsrating

For at opnå et billede af boredatas kvalitet og dermed værdi for det konkrete geologiske modelleringsprojekt, kan der – som nævnt i det foregående - foretages analyser af data i Jupiter. Dette kan have et forskelligt omfang og ske på forskelligt niveau. Ratingen er vigtig for tolkningsarbejdet, fordi den giver geologen en fornemmelse af pålideligheden af boredata som helhed og giver mulighed for at pege på grupper af boringer, som skal nedprioriteres eller helt frasorteres. Herudover giver analysen modtageren af modellen mulighed for at få en systematisk vurdering af boredatasættets kvalitet og dermed også et billede af eventuelle svagheder her i.

I *Figur **3-6*** er der vist et eksempel på en inddeling i fem kvalitetskategorier (Rambøll, 2012). I dette tilfælde er der sket en direkte søgning i Jupiterdata, men i nogle tilfælde lader det sig ikke gøre at finde veldefinerede kategorier til en udelukkende automatisk søgning i Jupiter. Eksempelvis er det ikke altid let at finde ud af, om det er en geolog, der har beskrevet prøverne, og i mange boringer betyder anvendelsen af dobbeltsignatur ikke nødvendigvis, at en geolog har stået for beskrivelsen, og heller ikke hvorvidt den er udførlig eller ej. Det betyder, at man i nogle tilfælde kan være nødt til at kombinere automatiske søgninger med et eller flere manuelle trin. Ligeledes kan det være nyttigt systematisk at gennemgå de boringer, som ikke har nogen registreret litologi. I mange tilfælde ligger der brugbar litologi i de PDF-dokumenter, som er tilknyttet boringen. Eksempelvis er der i Grontmij (2012) i ca. ¾ af de gennemsete boringer uden litologi fundet værdifulde supplerende oplysninger om lagserien i de scannede PDF-borejournaler, og i næsten halvdelen af disse kunne der findes endog meget detaljerede oplysninger. I sådanne tilfælde vil flere boringer kunne skifte til en højere kvalitetskategori, såfremt disse oplysninger var en del af Jupiterdatabasens digitale data.

Kvalitet	Beskrivelse	Antal boringer	Andel %
1	Nyere undersøgelsesboringer	32	1,2
2	Tolkede og velbeskrevne boringer	396	14,7
3	Boringer hvor der er foretaget en udførlig beskrivelse	1351	50,2
4	Boringer hvor der alene er angivet hovedlitologi	599	22,3
5	Boringer uden oplysninger om litologi	314	11,7

Figur 3-6: Oversigt over kvaliteten af de litologiske beskrivelser for boringerne i kortlægningsområde Odense Vest (Rambøll, 2012). Boringskategorierne er visualiseret på Figur 3-7.



Figur 3-7: Eksempel på oversigt over kvaliteten af boringernes litologiske oplysninger; fra Odense Vest kortlægningsområde (Rambøll, 2012). Se også Figur 3-6.

Det anbefales:

- at kvaliteten af boredata nøje vurderes inden anvendelse i den geologiske modellering, og at der foretages en rating i forhold til kvalitet
- at fejlbehæftede boringer frasorteres
- at boredata visualiseres på temakort så som f.eks. type, boringstæthed, dybde og kvalitet

3.1.2 Informationer fra blotninger

Informationer fra blotninger omfatter data indsamlet direkte i felten ved opmåling og inspektion af blottede profiler i kystklinter, råstofgrave eller udgravninger foretaget i forbindelse med anlægsopgaver, forureningsundersøgelser eller videnskabelige undersøgelser. I det følgende fokuseres der på de konkrete informationer, der kan eller er blevet indsamlet fra blotninger i eller i nærheden af et modelområde og som kan bruges som datagrundlag ved den geologiske modellering.

Fra observationer af blottede aflejringer kan man, i modsætning til boredata, få meget værdifulde oplysninger om bl.a. strukturer, udbredelse af laggrænser og deformationer. Boringer udgør 1D data, mens blotninger giver et 2D- eller måske endog et 3D-billede af lagserien, som ellers ikke vil kunne opnås.

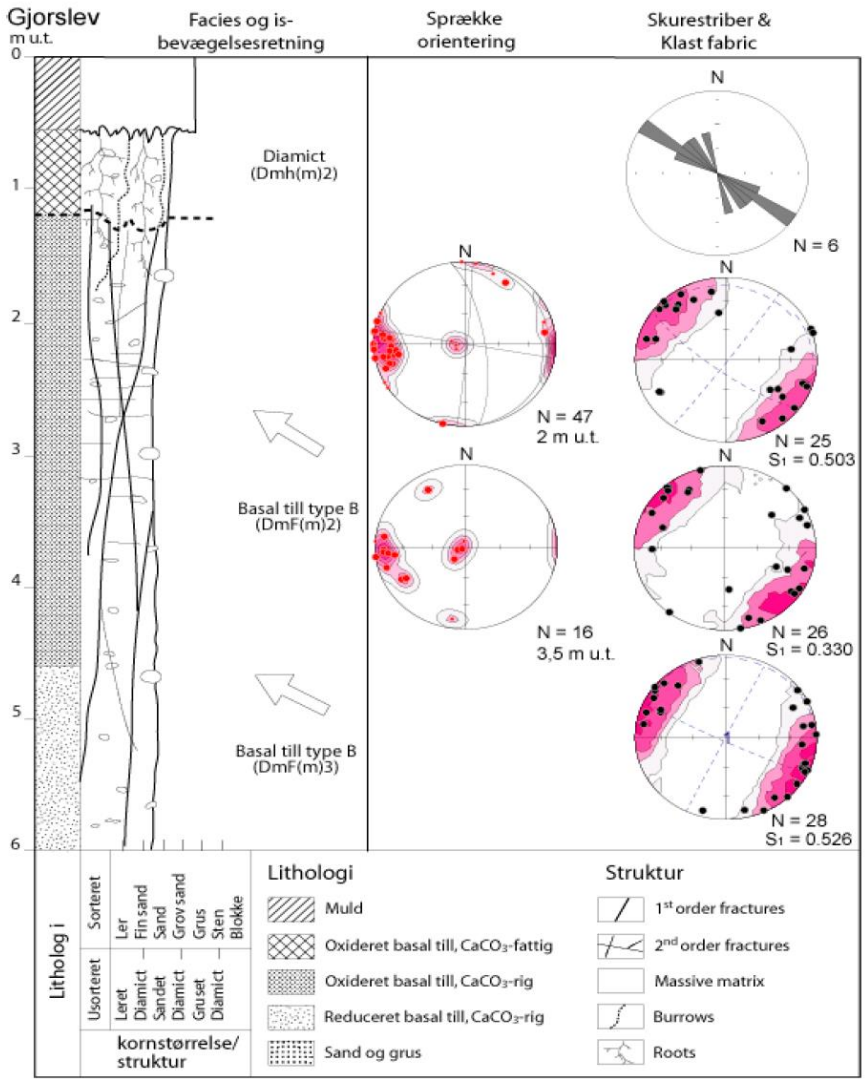
Data
Detaljerede beskrivelser af blotninger vil typisk være tilgængelige fra bibliotekerne på de geologiske institutter på Københavns og Århus Universitet i form af videnskabelige afhandlinger (MSc og PhD-afhandlinger). Råstofrapporter lå tidligere hos amterne, men kan nu rekvireres fra regionerne og til dels GEUS. Rapporter fra strategiske forskningsprojekter ligger typisk hos de tidligere sektorforskningsinstitutioner (nu universiteter eller GEUS), og derudover findes der vigtige data fra forureningsundersøgelser og større anlægsopgaver f.eks. hos regionerne. Endelig findes meget detaljerede beskrivelser af blotninger i videnskabelige artikler.

Data indsamlet fra blotninger omfatter bl.a. litologiske, palæontologiske, kemiske og strukturelle beskrivelser og analyser. Disse data benyttes typisk til at klassificere jordlagene og tolke deres dannelseshistorie og stratigrafiske placering.

Undersøgelsesmetoder
Undersøgelser af blotninger omfatter traditionel bjergartsbeskrivelse og tolkning af aflejringsmiljø (Larsen et al., 1995), og i glaciale aflejringer yderligere undersøgelser af bl.a. isbevægelsesindikatorer (Berthelsen,1978), som f.eks. folder, forkastninger, sprækker (Klint, 2001), skurestriber (Jørgensen & Piotrowski, 2003) samt klast-fabric (Hicock et al. 1996). Disse data kan benyttes ved klassifikation og karakterisering af morfogenetiske enheder som bundmoræner, flydemoræner m.m. Endelig kan fingrusanalyse af moræneler med stor fordel benyttes til at adskille enheder og identificere vigtige laggrænser samt opstille stratigrafiske enheder med regional udbredelse (Kronborg et al. 1990).

Data fra udtagning af prøver til absolut datering kan være af stor betydning for opstilling af stratigrafier. For kvartære sedimenter kan ^{14}C og OSL (Optisk Stimuleret Luminicens) anvendes på henholdsvis organisk materiale og fluviale/æoliske aflejringer (Houmark-Nielsen & Kjær, 2003). Marine sedimenter analyseres ud fra deres indhold af mikrofossiler, hvorimod pollenanalyse kan benyttes på søaflejringer. Se også afsnit 3.1.3 om stratigrafiske data.

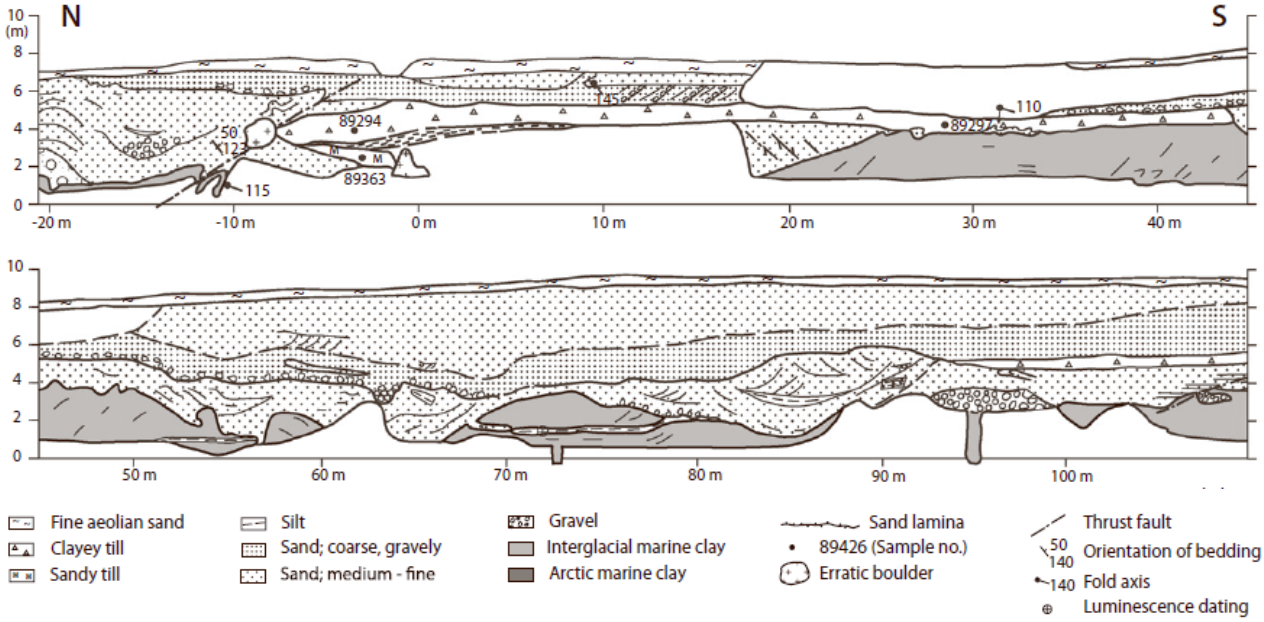
Dataformat
De indsamlede data præsenteres dels systematisk i litologiske logbeskrivelser (*Figur 3-8*) og dels på profilskitser af blotningerne (*Figur 3-9*). Den litologiske log tillader sammenligning af alle indsamlede data og danner baggrund for tolkning af aflejringsmiljø, for klassifikation af litologiske enheder og for opstilling af en stratigrafi. Indsamlede data fra blotninger i flere forbundne profiler kan præsenteres som 3D blokdiagrammer, der bidrager til den rumlige visualisering af områdets geologi.



Figur 3-8: Eksempel på litologisk log, samt fabric- og sprækkeopmåling fra Gjorslev (Klint, 2004).

Anvendelse i den geologiske model

Geologiske enheder, der er klassificeret og opstillet på baggrund af data fra blotninger kan evt. indgå som nøglelokaliteter i den geologiske model. Glaciale aflejringer vil ofte kunne korreleres til regionale stratigrafiske enheder på baggrund af aldersdateringer, litologiske, strukturelle og dannelsesmæssige forhold. Prækvartære og interglaciale aflejringer kan korreleres på baggrund af aldersdateringer samt bio- og litostratigrafiske egenskaber. Stratigrafiske korrelationer kan i den geologiske model give grundlæggende oplysninger, som kan bidrage væsentligt til samtolkningen af de øvrige data i modellen.



Figur 3-9: Eksempel på optegning af kystklint (Kås Hoved). Modificeret efter Knudsen et al. (2014).

Det anbefales:

- at blotninger af lagserien - eller beskrivelser af samme - i modelområdet inddrages i den geologiske modellering, da blotninger giver unik, direkte information om lagserien
- at selv gamle publikationers beskrivelser gennemses, da der her kan gemme sig information, som måske ikke kan fås i dag

3.1.3 Stratigrafiske data

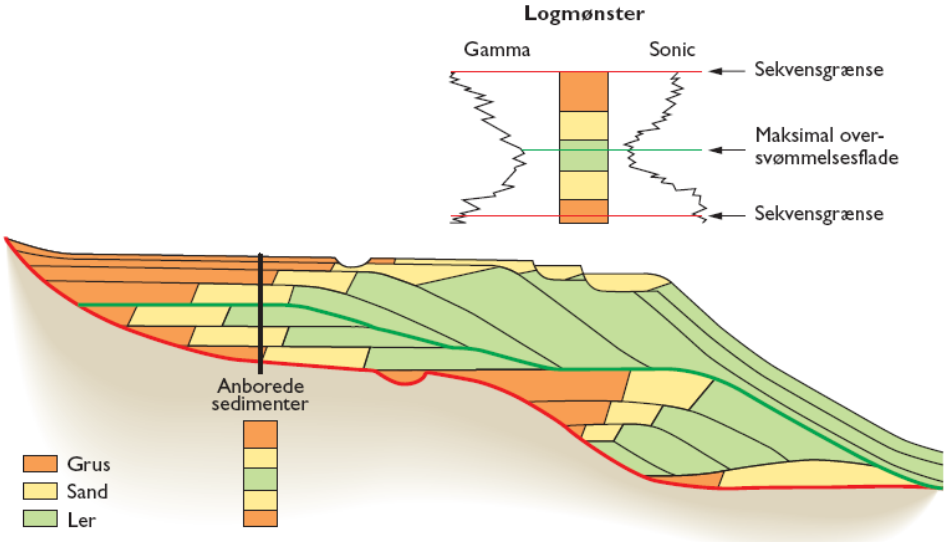
Stratigrafiske data spænder over en række forskelligartede data omfattende bl.a. geofysiske logdata, aldersdateringer, litologi og mikrofossiloptællinger. Fælles for disse data er, at de kan benyttes til at opstille forskellige typer af stratigrafier, omfattende bl.a. glacialstratigrafi, sekvensstratigrafi, biostratigrafi, kronostratigrafi, litostratigrafi og logstratigrafi. Ved opstilling af en stratigrafi inddeles undergrunden i et antal lagdelte enheder, som kan erkendes i hovedsageligt boringer, geofysiske data eller blotninger. Ved stratigrafisk korrelation knyttes de genkendelige lag i f.eks. en boring sammen med tilsvarende lag i en anden boring eller ved en lokalitet. Denne sammenknytning er typisk ikke rumlig, hvilket betyder at stratigrafien ikke nødvendigvis beskriver de geologiske variationer mellem de korrelerede boringer/lokaliteter.

Ved opstilling af en litostratigrafi defineres lagfølgen ud fra litologiske karakteristika og korrelationen mellem lokaliteter foregår ud fra disse. Det vil sige, at f.eks. et lerlag med samme kornstørrelse, sorteringsgrad, mineralogi, farve m.m. i to forskellige boringer, korreleres.

Fingrusanalyser og andre sedimentologiske analyser kan i nogle områder af Danmark benyttes som en form for fingeraftryk for en glacial aflejring (Kronborg et al. 1990; Kronborg et al. 2004). Fingrusmetoden

er baseret på, at isfremstød under sin bevægelse over forskellige typer underlag optager og aflejrer forskelligt materiale. Ud fra sedimentprøver og korrelationer af disse er det i mange tilfælde muligt at beskrive hvilke isfremstød, der har været til stede i et område. Lermineralindholdet samt tilstedeværelsen af spormineraler kan også i visse tilfælde benyttes ved glacialstratigrafiske korrelationer. På denne baggrund kan der opstilles en glacialstratigrafi, som beskriver det glaciale hændelsesforløb.

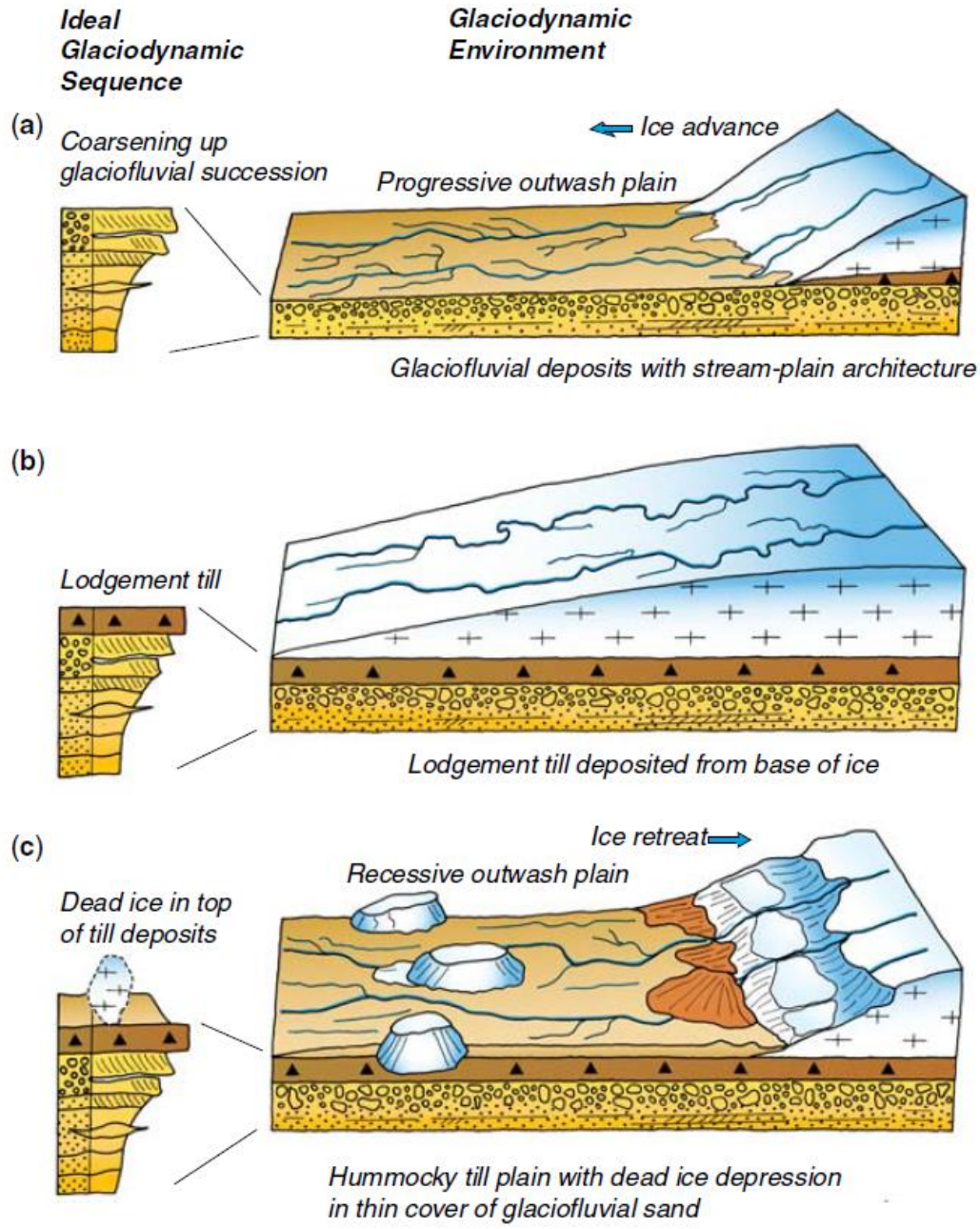
På baggrund af mikropalæontologiske undersøgelser (mikrofossiler) og palynologiske undersøgelser (sporer og pollen) kan lagfølger inddeles i biozoner. Biozoner med ensartede indhold af fossiler kan identificeres på flere geografisk adskilte lokaliteter, som på denne baggrund korreleres og opstilles i en biostratigrafi. Ledefossiler er karakteristiske for bestemte tidsafsnit og benyttes typisk ved korrelationer. Ud fra kendskabet til mikrofossilers økologiske krav kan indikatorer om klima og miljø på aflejringstidspunktet udledes (Kristensen et al. 2000). Kvartærperioden er dog for kort til, at der kan anvendes ledefossiler til stratigrafiske inddelinger, og i stedet anvendes der her faunasammensætninger og ændringer af disse gennem tiden (se f.eks. Knudsen et al. 2009). I biostratigrafiske undersøgelser anvendes ofte foraminiferer og andre kalkskallede fossiler. Men de kalkskallede fossiler er f.eks. i de miocæne formationer i Danmark ofte opløste, og kan således ikke her benyttes til biostratigrafi. Til gengæld forekommer der generelt et stort indhold af organisk materiale og dermed også dinoflagellater (Krathus, 2002).



Figur 3-10: Fordelingen af grus, sand og ler indenfor en sekvens. En tænkt gennemboret lagfølge er angivet ved sort streg. Øverst er vist, hvordan gamma- og sonic-logs vil se ud for den gennemborede lagfølge. Placeringen af sekvensgrænser og maksimal oversvømmelsesflade er angivet på loggen med henholdsvis rød og grøn streg. Eksemplet er fra Dybkjær & Rasmussen (1998).

Sekvensstratigrafi

Ved sekvensstratigrafi inddeles lagfølgen i aflejringssekvenser. En sekvens afgrænses af en nedre og en øvre sekvensgrænse og består af de aflejringer, der er aflejret inden for en havniveau-cyklus (se *Figur 3-10*). En sekvensgrænse er en lagflade, der fremkommer på det tidspunkt, hvor det relative havniveau var lavest i en havniveau-cyklus. Datagrundlaget for sekvensstratigrafi udgøres typisk af en kombination af seismik, geofysiske logs, litologi og biostratigrafi.



Figur 3-11: Illustration af en typisk glaciodynamisk sekvens (til venstre) og det glaciodynamiske aflejringsmiljø (til højre). Fra Pedersen (2012).

En lignende tilgang er foreslået i Pedersen (2012) for glaciale aflejringer, hvor en "glaciodynamisk sekvens" omfatter episoder med aflejring, erosion og deformation i forbindelse med et isfremstød og den efterfølgende tilbagesmeltning (*Figur **3-11***).

Ved en kronostratigrafisk inddeling inddeles jorden i tidsenheder som æraer, systemer, serier, etager, m.m. Til dette anvendes dateringer af varierende art, bl.a. OSL og ^{14}C.

Data

En stor del af de stratigrafiske data stammer fra boreprøver og analyser af disse. De mest almindelige af disse er opsummeret i **Error! Reference source not found.***Tabel **3-2***.

Tabel 3-2: Almindelige stratigrafiske datatyper stammende fra boreprøver.

Datatype	Dataformat	Bemærkninger
Boringer i Jupiter	Jupiter	
Originale brøndborerjournaler	Analoge	For mange områder findes scannede borejournaler i Jupiter (pdf-format)
Stratigrafiske undersøgelser	Analoge	Rapporter vil ofte indeholde oplysninger som ikke forekommer i Jupiter f.eks. fingrusanalyser, tabel over registrerede fossiler. Rapporter over stratigrafiske undersøgelser vil dog ofte kunne findes i Jupiter-databasen som tilknyttede PDF-filer.

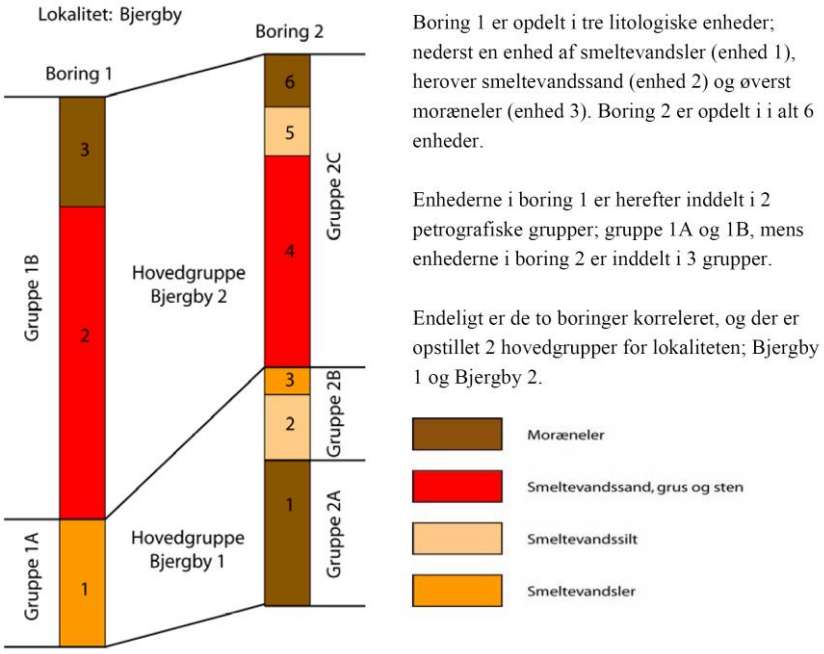
Boredata, der er indsamlet med henblik på stratigrafisk tolkning, vil ofte have en høj kvalitet, da der normalt stilles skærpede krav til borearbejdet for at boreprøverne kan anvendes. Når en boreprøve bringes op til terræn, skal det ved prøveudtagningen sikres, at der opnås den bedst mulige prøvekvalitet. Prøvekvaliteten afhænger blandt andet af boremetoden, borearbejdets udførelse, lagseriens beskaffenhed, brøndborerens prøvehåndtering og omhyggelighed, (se afsnit 3.1.1. om boredata). For at kunne udføre en optimal prøvebeskrivelse, er det vigtigt at prøvebeskriveren sætter sig ind i de forhold, der kan have haft indvirkning på kvaliteten af de prøver, der skal beskrives.

Praktisk anvendelse ved geologisk modellering

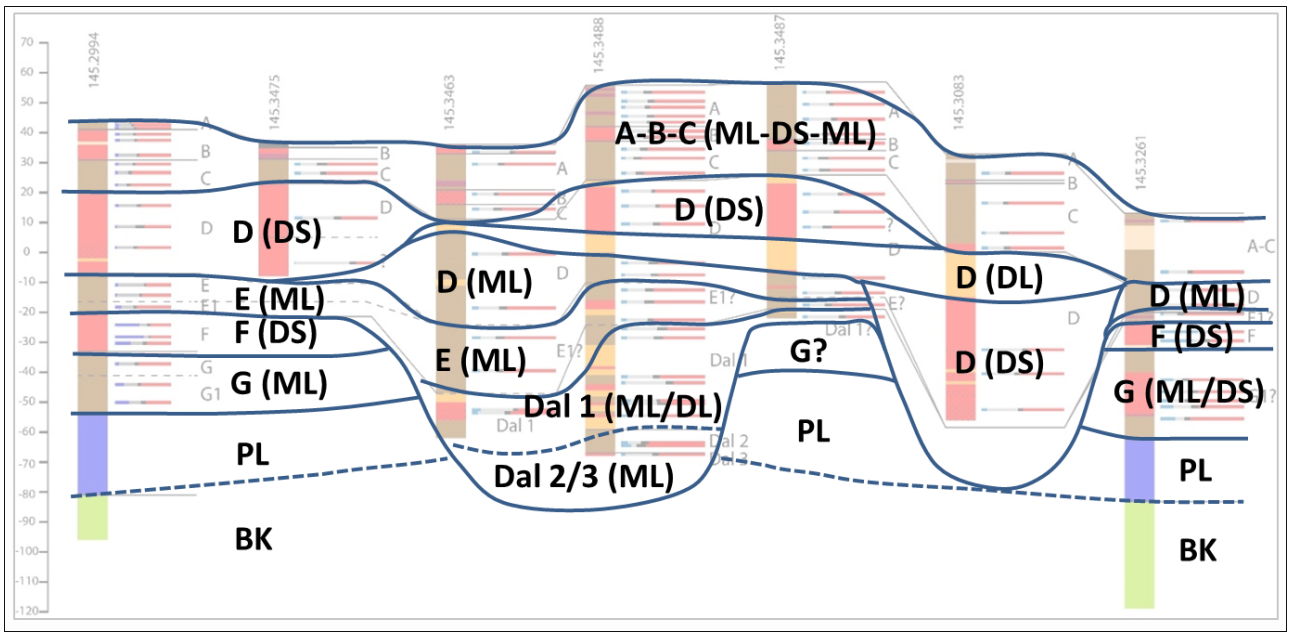
I *Figur **3-12*** ses et eksempel på en petrografisk opdeling og korrelation af to boringer fra en fiktiv lokalitet (Sørensen et al. 2005). På baggrund af bl.a. fingrusanalyser er de litologiske enheder inddelt i grupper med samme petrografiske karakteristika. Herefter er der sket korrelation til andre boringer og eventuelt daglokaliteter, og der opstilles petrografiske hovedgrupper for lokaliteten/området. Sedimenterne i en petrografisk hovedgruppe er typisk aflejret i forbindelse med én begivenhed, f.eks. ét bestemt gletscherfremstød. På baggrund af korrelationerne kan der ofte opstilles en overordnet glacialstratigrafi for et område. Det er dog vigtigt at påpege, at en glacialstratigrafi ikke afspejler den rumlige opbygning af lagserien. Glacialstratigrafien benyttes som støtte og grundlag for den rumlige geologiske modellering af de litostratigrafiske enheder. Indpasning i en mulig glacialdynamisk sekvensstratigrafi, som beskrevet i Pedersen (2012), vil kunne skitsere en overordnet ramme for den modellerede lagserie.

Fingrusanalyser er introduceret i den nationale grundvandskortlægning (se fx Sørensen et al. 2005) og data har været anvendt i større eller mindre grad i forbindelse med den geologiske modellering i de kortlagte områder. Hvis det i et givent område er vanskeligt at udrede den kvartære geologi, kan fingrusanalyser med fordel anvendes som supplement til de gængse geologiske og geofysiske data. Fingrusanalyserne alene kan ikke nødvendigvis bruges absolut til at fastslå et tilhørsforhold til specifikke isfremstød, men primært til at "skille lagserien ad" i lag med forskellig petrografisk signatur. Findes der dateringer og andre data/iagttagelser, er der mulighed for at gøre den stratigrafiske indplacering mere sikker.

Et eksempel på anvendelse af fingrusanalyser er fra Odense, hvor udførelse af fingrusanalyser (Sørensen & Andersen, 2016) har bidraget til en udredning af lagserien i området og derved gjort den efterfølgende 3D geologiske modellering mere sikker (Sandersen & Kallesøe, 2017); se *Figur **3-13***.



Figur 3-12: Eksempel på opdeling og korrelation af to boringer ved anvendelse af petrografiske grupper og hovedgrupper. Eksemplet er fra Sørensen et al. (2005).



Figur 3-13: Eksempel på anvendelse af fingrusanalyser ved geologisk modellering i Odense Vest (Sandersen & Kallesøe, 2017). Korrelationspanel for fingrusanalyserne (Sørensen & Andersen, 2016) ses i baggrunden, og i forgrunden ses de tolkede sammenhænge i lagserien baseret på den samlede datamængde.

I de senere år er der blevet udført sekvensstratigrafiske analyser af de neogene aflejringer i Jylland (Rasmussen et al., 2010), og den sekvensstratigrafiske tilgang har været en stor hjælp for opstilling af geologiske modeller for de neogene aflejringer (fx Kristensen et al. 2014). Ofte vil en sekvens indeholde både sandede og lerede aflejringer, da den kan være opbygget af såvel fluviale sedimenter, deltasedimenter som marine sedimenter, men metoden er en hjælp, fordi den opstillede sekvensstratigrafi beskriver den geologiske dannelseshistorie for området i detaljer. Når dannelseshistorien kendes, kan de forventede sedimenttyper i området lettere forudsiges og indarbejdes i den geologiske model.

Anvendelse af glacialstratigrafi og sekvensstratigrafi i forbindelse med opstilling af de geologiske modeller skal ses som overordnede rammeværktøjer.

Det anbefales:

- at det undervejs i den geologiske modellering vurderes, om en sekvensstratigrafisk tankegang kan anvendes i det aktuelle kortlægningsområde på såvel den kvartære som den prækvartære lagserie
- at den prækvartære stratigrafi understøttes af biostratigrafiske analyser
- at glacialstratigrafien i kortlægningsområdet understøttes af fingrusanalyser, biostratigrafi, dateringer eller lignende, med det formål at gøre tolkningerne i den kvartære lagserie mere sikker

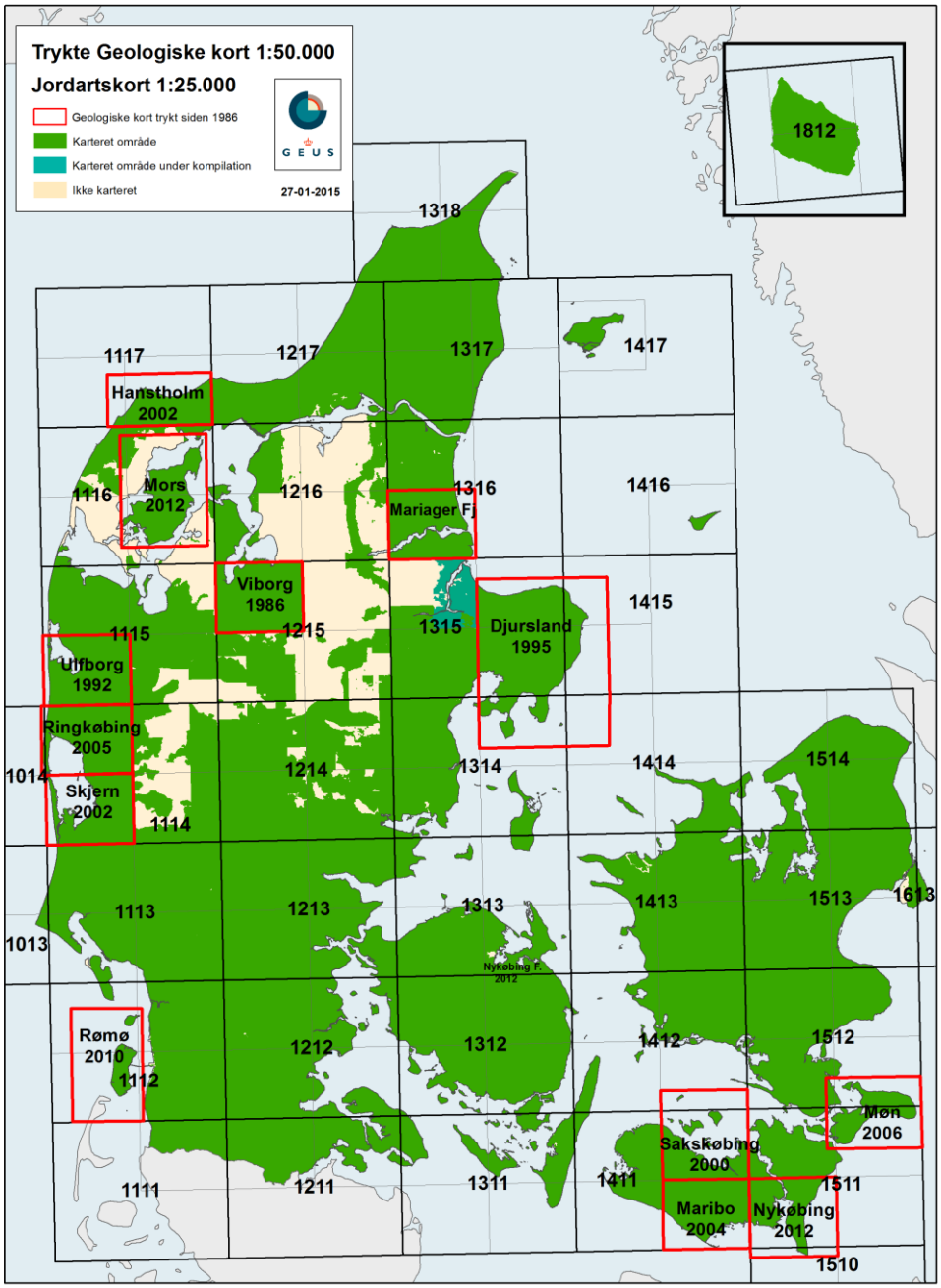
3.1.4 Jordarts- og jordbundsdata

Jordarts- og jordbundsdata omfatter oplysninger om de helt overfladenære lag i Danmark (se: http://www.djfgeodata.dk og Jakobsen et al. 2015).

Jordartskort

Siden 1888 har GEUS kortlagt Danmarks overfladegeologi. Kortlægningen er foretaget i målestoksforholdet 1:25.000 (dog 1:20.000 før 1978). Informationerne er indsamlet ved feltarbejde, hvor jordprøver fra 1 meters dybde tages med 100-200 meters mellemrum under kultur- og pløjelag. Prøverne vurderes og tolkes i felten og resultatet noteres ned på et kort. Jordartsdata er derfor opdelt i *tolkede* geologiske enheder som f.eks. smeltevandssand, flyvesand og hedeslettesand.

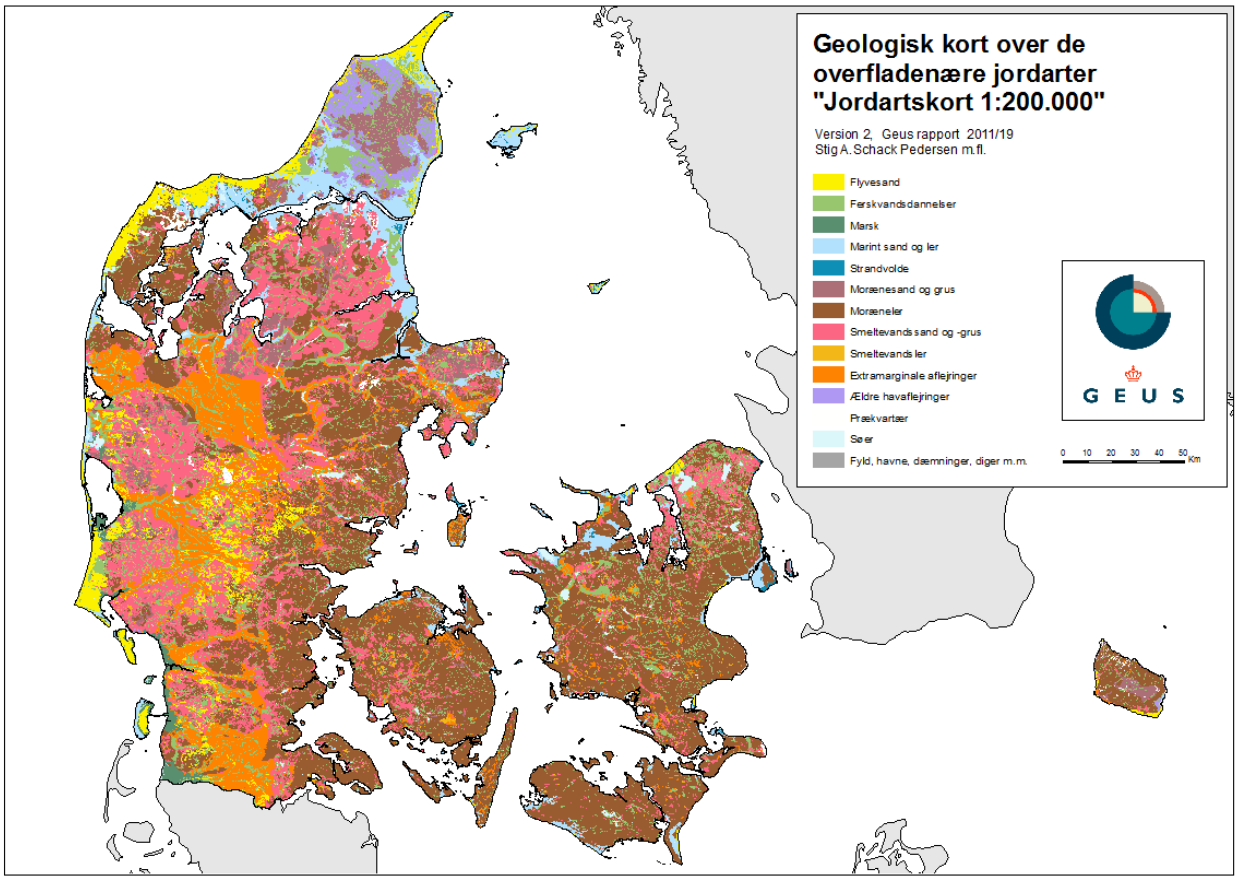
Det digitale jordartskort er fremstillet med henblik på anvendelse og opdatering via GIS, således at digitale geografiske analyser og beregninger nu er mulige. Kortet består af ca. 274.000 geografiske polygoner (jordartsenheder) fordelt på 362 kortblade i 1:25.000 (Jakobsen et al. 2015; Pedersen et al. 2011). Kortlægningsresultaterne er offentliggjort i række kortblade med tilhørende kortbladsbeskrivelser. Fra 1888 til 1979 blev kortbladene og kortbladsbeskrivelserne publiceret i DGU's skrifter 1. række under titlen "Geologiske kort over Danmark, 1: 100.000. (Kortbladet Løgstør dog i 1:50.000 fra 1979). Herefter er jordartskortlægningen præsenteret i DGU's/GEUS's kortserie "Geologisk kort over Danmark 1:50.000". Kortet er endnu ikke fuldstændigt, men dækker ca. 88 % af Danmarks areal (2015; se *Figur **3-14***). Jordarterne er opdelt i 67 forskellige kvartære samt 16 prækvartære jordarter, og GEUS' officielle jordartsklassifikation og farvekode er benyttet.



Figur 3-14: Oversigt over områder der er kortlagt pr. januar 2015 (grønne områder) samt udsnit af jordartskort 1:25.000 (Jakobsen et al. 2015).

Nøjagtigheden af de i alt 362 foreliggende digitale kort er i høj grad præget af tidspunktet, de blev karteret på. Nyere kort har ofte en bedre nøjagtighed både hvad angår klassifikationen og geometrien. Bl.a. for at tage højde for dette, findes der til kortværket en metadatabase med oplysninger om karteringstidspunkt for det enkelte kortblad.

Kortene anses, trods den noget varierende nøjagtighed, for at være anvendelige i målestoksforholdet 1:25.000. Den anvendte karteringsmetode indebærer dog, at en grænse mellem to jordarter kan ligge forskudt op til 50-100 meter i forhold til virkeligheden. På det digitale jordartskort 1:200.000 (*Figur **3-15***) er kortet - i de områder, der endnu ikke er kortlagt i felten - baseret på tolkning ud fra boredata og geomorfologiske data, og må derfor anses for at være temmelig usikre. Derudover er der på visse ældre kort i sjældne tilfælde ikke foretaget fuldstændig korrelation af jordarter på hver side af alle kortgrænser, hvilket også kan medføre unøjagtigheder. De digitale jordartskort i 1:25.000 og 1:200.000 er frit tilgængelige på GEUS´ hjemmeside (http://www.geus.dk).



Figur 3-15: Geologisk kort over de overfladenære jordarter (1:200.000; Pedersen, et al. 2011).

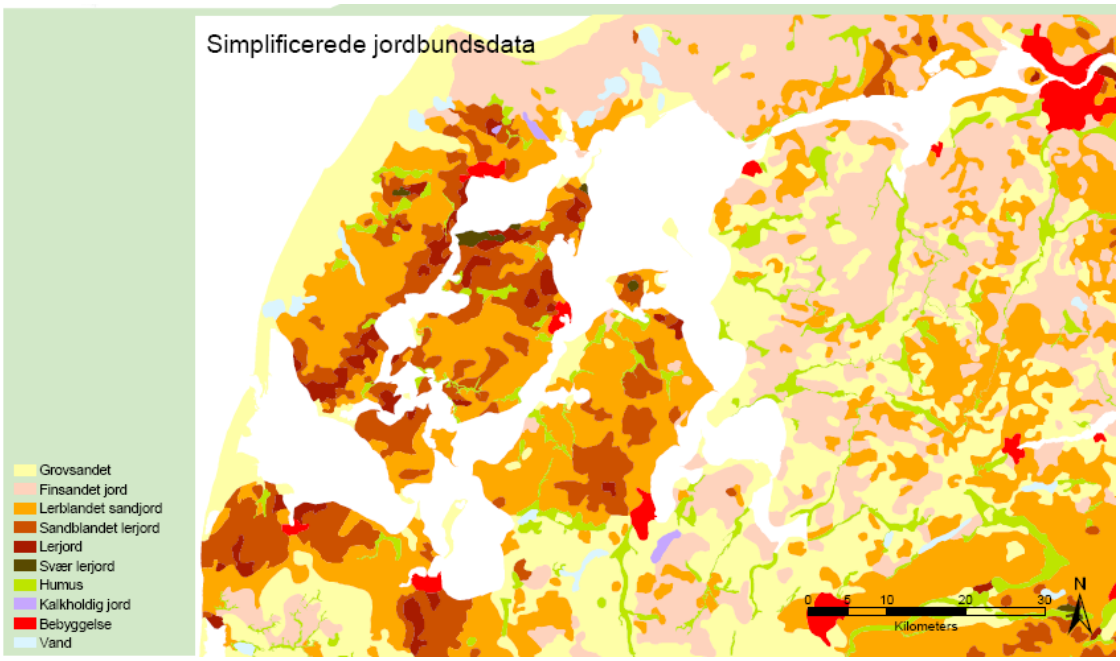
Jordbundskort

Simplificerede jordbundsdata findes i DJF's database og omfatter en simpel opdeling efter teksturen i pløjelaget (www.djfgeodata.dk). Pløjelagets tekstur er inddelt i 8 farvekoder, se *Tabel **3-3***. Grænsedragning (for de otte farvekoder) er sket i samarbejde med landbrugets konsulenttjeneste samt Hedeselskabet på baggrund af 40.000 prøver udtaget i pløjelaget.

Resultaterne fra den landsomfattende Jordklassificering er publiceret dels i form af et landsdækkede digitalt kort i 1:750.000 (se *Figur **3-16***) og dels i form af basisdata-kort i 1:50.000.

Tabel 3-3: Jordtyper opdelt efter tekstur i pløjelaget (www.djfgeodata.dk).

Jordtype	Teksturdefinition for jordtype	Symbol	JB-nr.	Vægtprocent				
				Ler under 2 µm	Silt 2-20 µm	Finsand 20-200 µm	Sand, ialt 20-2000 µm	Humus 58.7% C
1	Grovsandet jord	GR.S.	1	0-5	0-20	0-50	75-100	Under 10
2	Finsandet jord	F.S.	2			50-100		
3	Grov lerblandet sandjord	GR.L.S.	3	5-10	0-25	0-40	65-95	
	Fin lerblandet sandjord	F.L.S.	4			40-95		
4	Grov sandblandet lerjord	GR.S.L	5	10-15	0-30	0-40	55-90	
	Fin sandblandet lerjord	F.S.L.	6			40-90		
5	Lerjord	L	7	15-25	0-35		40-85	
6	Svær lerjord	SV.L.	8	25-45	0-45		10-75	
	Meget svær lerjord	M.SV.L.	9	45-100	0-50		0-55	
	Siltjord	SI.	10	0-50	20-100		0-80	
7	Humus	HU.	11					Over 10
8	Speciel jordtype	SPEC.	12					



Figur 3-16: Eksempel på jordbundskort 1: 750.000 (eksemplet stammer fra www.djfgeodata.dk).

Praktisk anvendelse i den geologiske modellering

Eftersom jordartskortet udgør det øverste tolkede interval i enhver geologisk model, har det stor betydning for opstilling af geologiske modeller. Kortet viser dog kun geologien i en dybde af 1 m, hvilket er meget overfladenært i forhold til den skala, der normalt arbejdes med ved geologisk modellering i grundvandsmæssig sammenhæng. Men ofte kan oplysningerne om den overfladenære geologi

anvendes i sammenhæng med andre data, og den vil dermed bidrage med et godt tolkningsgrundlag for den dybereliggende geologi.

Jordbundsdata kan sammenholdes med jordartskortet, og bruges til at lave en yderligere opdeling af f.eks. moræneler i områder med varierende lerindhold.

Sammenholdt med topografiske data kan jordbunds- og jordartsdata benyttes til at opstille geomorfologiske enheder, der yderligere kan støtte opstilling af geologiske modeller (se afsnit 3.1.5).

Det anbefales:

- at jordartskort og andre kort, som bidrager med information om de helt overfladenære lag inddrages i de geologiske tolkninger
- at oplysninger om den overfladenære litologi sammenholdes med topografiske kort og anvendes ved afgrænsning af overfladenære lag

3.1.5 Topografiske data og geomorfologiske tolkninger

Topografi er en beskrivelse af variationerne i landskabets fysiske overflade, mens geomorfologi er læren om landskabets former og de processer, der har dannet dem.

Ved topografiske data forstås i denne forbindelse data, der beskriver terrænets højdeforhold. De topografiske data findes i forskellige formater, og ofte har man brug for at inddrage flere typer af data i modelarbejdet. Anvendelsen af topografiske data i den geologiske model kan ske på flere måder - fra analyse af gamle målebordsblade til detaljeret geologisk analyse og tolkning af digitale højdedata, samt den direkte anvendelse af højdemodel-grids i den digitale geologiske 3D model. De topografiske data har stor betydning ved den geologiske modellering, da landskaberne afspejler såvel geologiske hændelser som egenskaber ved jordlagene, og de geomorfologiske tolkninger er derfor vigtige for en forståelse af det aktuelle områdes geologiske historie.

Topografiske data
De topografiske data udgøres af:

Topografiske kort
Topografiske kort er udarbejdet i forskellige udgaver, hvilket kan ses på Styrelsen for Dataforsyning og Effektiviserings webside (oversigt på: https://sdfekort.dk/spatialmap), og heraf kan nævnes:

- *Ældre topografiske kort:* Målebordsblade findes i målestok 1:20.000 og atlasblade i målestok 1:40.000. Kortene er opmålt og ajourført i perioden 1842 – 1940. Kortenes højdekurveækvidistance er for de ældstes vedkommende ca. 2 m (5 fod) og for de yngste 2,5 m. Kortenes alder betyder at områder, som i dag er dækket af by eller er terrænreguleret, kan ses som de tog sig ud for mange årtier siden. Kortene har en stor detailrigdom og er specielt gode til detailstudier af højdekurvemønstre i områder, hvor terrænet siden er blevet reguleret eller bebygget. Herudover er kortene gode, hvis man vil se, hvordan dræneringen af et givent område er ændret (drængrøfter,

regulering af åløb, tørlægning af søer og moser mv.) samt ved opsøgning af gamle gravområder eller søer/lavninger, som nu er opfyldte.

- *Nyere topografiske kort:* Findes som 1-cm kort i målestok 1:100.000 (højdekurveækvidistance 5 m), 2-cm kort i målestok 1:50.000 (højdekurveækvidistance 5 m) og 4-cm kort i målestok 1:25.000 (højdekurveækvidistance 2,5 m). De nyere topografiske korts højdekurver er baseret på gamle højdeopmålinger udført i forbindelse med produktionen af de ældre topografiske kort.

Digitale højdemodeller

- *Ældre højdemodeller*: Tidligere har højdedata kunnet fås som 25 og 50 m grids, som er baseret på de topografiske korts højdekurver (Top10-DK). De digitale højdedata giver derfor ikke mere detaljeret information end de topografiske kort.
- *Nyere højdemodeller:* "Danmarks Højdemodel" (http://sdfe.dk/hent-data/danmarks-hoejdemodel/) er en meget detaljeret højdemodel, som dækker hele landet. Højdemodellen består af flere datasæt, der er indsamlet ved laserscanning foretaget fra fly (LiDAR; Light Detection and Ranging). Laserstrålen reflekteres af terrænet eller andre overflader, og tiden det tager for den reflekterede laserstråle at returnere til flyet, bruges til en beregning af terrænets eller overfladens højde. Efter dataindsamlingen er der sket en bearbejdning af data, som har resulteret i et fint grid for terrænet i hele landet. Resultaterne fra kortlægningen afspejler højdeforholdene i landskabet i relation til det gennemsnitlige havniveau med høj detaljeringsgrad og stor nøjagtighed. Højdemodellen er ifølge Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering formentligt verdens bedste landsdækkende højdemodel. Modellen består af 415 milliarder punkter i et 0,4 m grid og findes i to versioner: DHM/terræn og DHM/overflade. DHM/Terræn er en højdemodel af terrænet, mens DHM/Overflade er en digital højdemodel af den fysiske overflade, som beskriver højden af bygningsanlæg og vegetation (se *Figur **3-17***). Højdemodellen kan downloades via ovennævnte webside. Kurveplaner, som er udarbejdet på baggrund af den detaljerede højdemodel, også downloades.

Geomorfologiske kort

Geomorfologiske tolkninger findes typisk som beskrivelser og fladekort. Som det kan ses af nedenstående liste er en del af de geomorfologiske beskrivelser og kort af ældre dato, men nyere kort for dele af Danmark er udarbejdet og flere er på vej. Mens man ved analyser af digitale højdemodeller kan opnå objektive tolkninger af landskabets fysiske udformning, så er de geomorfologiske tolkninger subjektive. Her er det den tolkende geolog/naturgeograf, som anvender viden om de geologiske processer til en tolkning af landskabsformerne. På grund af dette – og på grund af variationer i de topografiske datas kvalitet - kan der ses en vis forskel i de morfologiske tolkninger i de forskellige udgivelser. Typisk kan vi i dag se mange flere detaljer i terrænet, som man tidligere ikke havde mulighed for at se, takket være nye og avancerede, højtopløselige kortlægninger af topografien (LiDAR-data; se ovenfor).

Figur 3-17: Danmarks Højdemodel: DHM/overflade øverst og DHM/terræn nederst (vist som skyggekort). Korteksempler fra www.sdfe.dk.

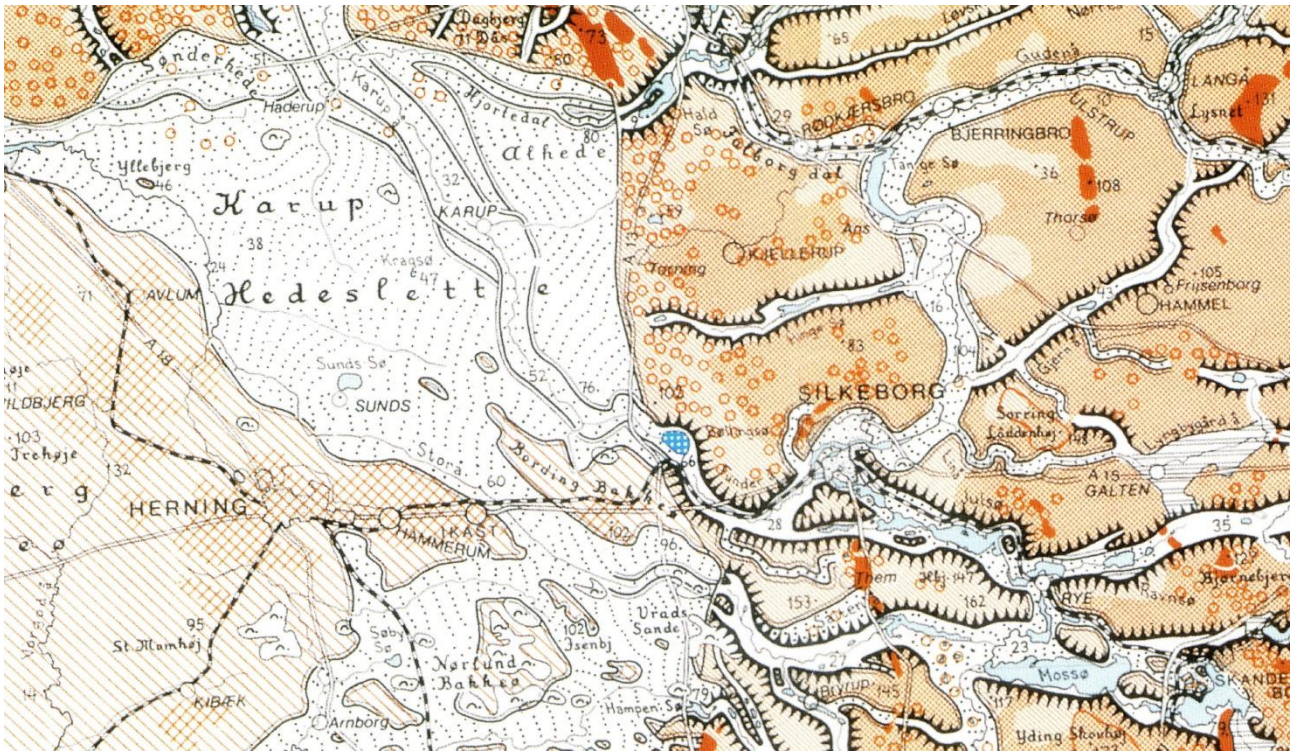
Geomorfologiske udgivelser

- *Afhandlinger:* Per Smeds afhandling om landskabet på Fyn (Smed, 1962) er en detaljeret tolkning af landskabsformerne på Fyn, hvor der fokuseres på den geologiske tolkning af landskabet med udpegning af tunneldale, israndsbakker og smeltevandssletter m.v. Af anden vigtig litteratur kan nævnes DGU's kortbladsbeskrivelser, S. A. Andersens beskrivelse af det danske landskabs historie (Andersen, 1933), V. Milthers bog om istidslandskabets udformning og dannelse (Milthers 1948), samt Axel Schous klassiske arbejde om det danske landskab (Schou, 1949). En nyere opsummering af de danske landskabsformer er udarbejdet af J. Krüger (Krüger, 2006), Herudover er der i diverse rapporter og publikationer foretaget geomorfologiske tolkninger i lokale og regionale områder.

- *Geomorfologiske kort:*
  - *"Per Smed-kort":* Af tolkede landskabskort er f.eks. Per Smeds landskabskort (Smed, 1981) meget anvendelige og meget populære (*Figur **3-18***). At de er populære ses blandt andet af,

at de i daglig tale ikke benævnes ved deres egentlige navn (Landskabskort over Danmark), men i stedet blot ”Per Smed-kort”. Kortene er ikke lavet på baggrund af de topografiske forhold alene, men også jordartsoplysninger m.m. er anvendt. Målestokken er ganske stor, men kortene er gode til at få et overblik og til brug som grundlag for mere detaljerede, lokale tolkninger.

- *Digitalt morfologisk kort over Danmark*: Det morfologiske kort over Danmark viser landskabstyperne i Danmark i 1:200.000 (*Figur **3-19***) (Jakobsen, 2014). Tolkningerne er foretaget på baggrund af topografiske kort, digitale højdedata (LiDAR-data) og desuden er tidligere udgivne morfologiske kort og landskabsbeskrivelser og –tolkninger inddraget. I 2017 er Sjælland, øerne og Bornholm publiceret, mens Fyn er kortlagt, men endnu ikke publiceret. Kortlægning af den resterende del af landet er planlagt.



Figur 3-18: Landskabskort over Danmark – ”Per Smed-kort” (udsnit; Smed, 1981).

- *”Polymorfologisk kort”:* En ny type tematisk kort er udarbejdet for Sjælland og øerne (se *Figur **3-19***) (Klint et al. 2014). Kortet tager udgangspunkt i det digitale, geomorfologiske kort (Jakobsen, 2014), og idéen har været at videreudvikle dette kort, så det ikke kun viser de øverste landskabsformer, men også inddrager de underliggende og ældre, ”begravede landskabsformer”. Ved at kombinere med andre geologiske data (f.eks. boringer, feltbeskrivelser og nye højdedata) har det vist sig muligt at konstruere et kort, der inddrager underliggende landskabsformer. Det ”polymorfologiske kort” kan primært bruges til at opdele et givent område i mindre enheder med forskellig geologisk opbygning og heterogenitet, og derved åbnes der mulighed for at få et bidrag til den geologiske information fra en lidt anden vinkel.

Praktisk anvendelse ved den geologiske modellering

Ved 3D geologisk modellering er der brug for at indlægge en digital højdemodel for at fastlægge terrænets placering i rummet. Men herudover er det vigtigt at anvende viden om terrænoverfladen, da terrænets udformning og dannelse kan bruges i den samlede udredning af modelområdets geologiske historie. Dette sker typisk i landskabsanalysen, som anbefales udarbejdet i forbindelse med den geologiske model.

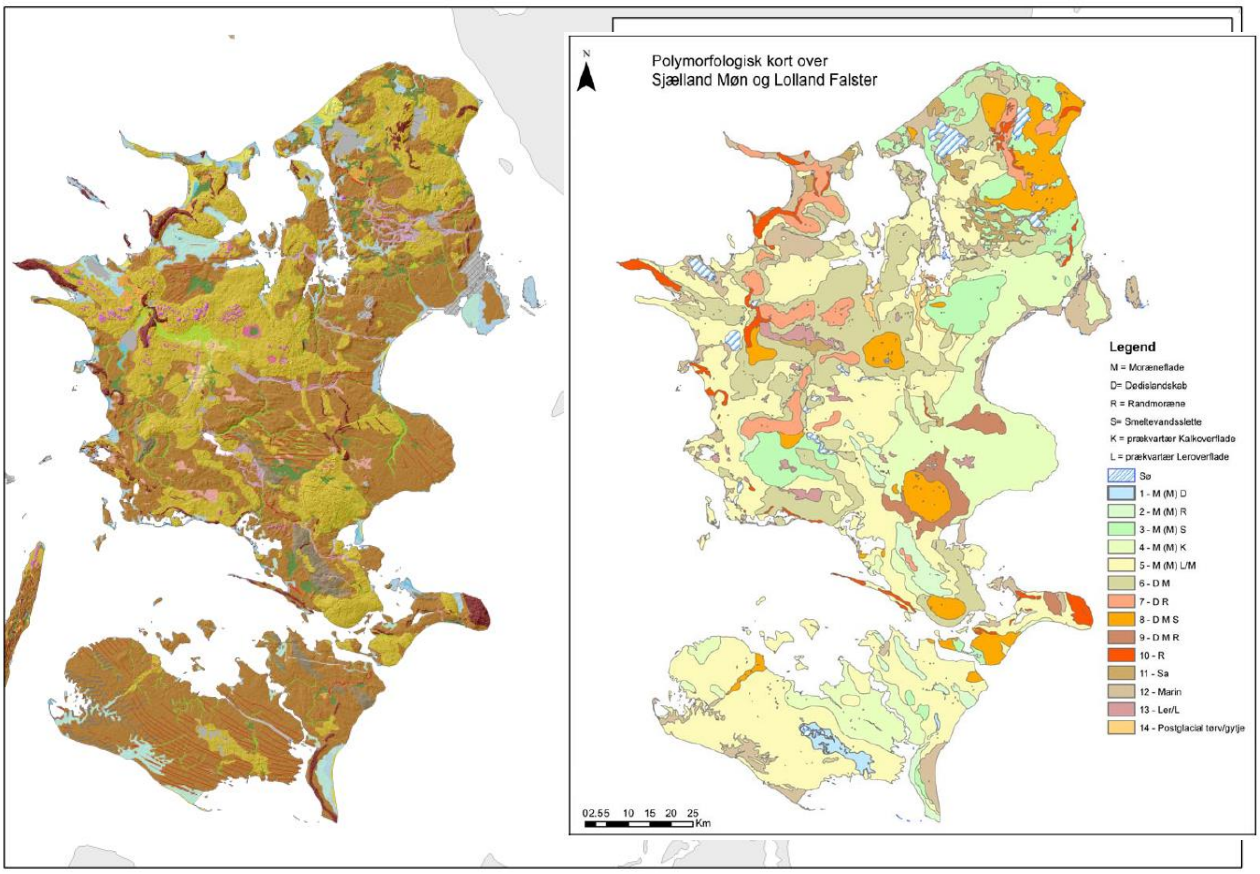
Landskabsanalysen bygger primært på topografiske data og kort, samt eksisterende geomorfologiske tolkninger og kan bidrage med vigtige informationer til den geologiske model. Landskabsformerne er et produkt af de geologiske hændelser, der danner de geologiske legemer og af erosionens efterfølgende påvirkning. Landskaberne kan rumme værdifulde oplysninger om jordlagenes egenskaber og dermed bidrage med information, som de øvrige datasæt ikke nødvendigvis kan bidrage med. Informationer fra landskabsanalysen er værdifulde for de geologiske tolkninger, og derfor er det vigtigt, at resultaterne af landskabsanalysen indarbejdes fuldt ud i den geologiske model. Landskabsanalysen har til formål at uddrage mest mulig geologisk information af terrænet, og det bør sikres, at disse informationer kommer til at indgå i de geologiske modeltolkninger på lige fod med de øvrige geologiske data.

Ved landskabsanalysen kan der f.eks. ske udpegning og afgrænsning af:

- Landskabselementer, så som smeltevandssletter, israndsbakker, issøbakker, dødidlandskaber og terrassedannelser
- Landskabselementer dannet ved erosion, så som tunneldale, smeltevandsdale, ådale og kystskrænter
- Landskabselementer, som falder uden for ovenstående kategorier, men som kan karakteriseres ved f.eks. stejle skrænter, linearitet eller specielle kurvemønstre
- Delområder med ensartede højdekurvemønstre, som afviger fra naboområder (se *Figur **3-20***)
- Delområder, som kotemæssigt afviger fra naboområder (se *Figur **3-20***)
- Forekomst af søer, åer og andre vådområder

Disse elementer kan give information om den underliggende geologi, som vil kunne indbygges i den geologiske model. Ved denne proces, hvor der ses på sammenhænge mellem landskabsformerne og de underliggende lag, kan der i øvrigt inddrages analyse og tolkning af øvrige data, f.eks. jordartskort og boredata.

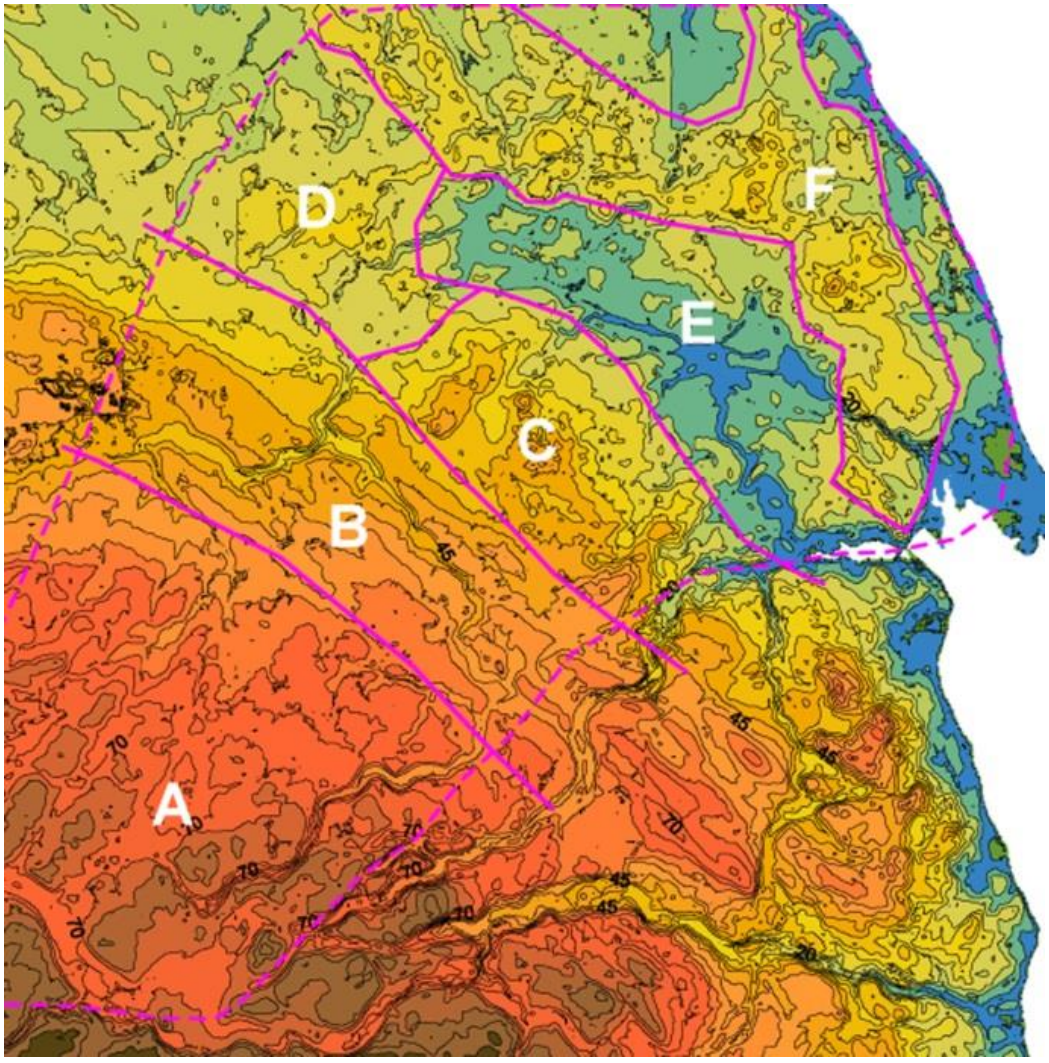
Det to første punkter i listen ovenfor udgør den ”klassiske” landskabsanalyse, som udpeger specifikke landskabstyper, hvorimod de efterfølgende punkter udgør et supplement hertil. Der kan i et område være tale om landskabselementer, som ikke så let kan kategoriseres, men som har et særegent højdekurvemønster (*Figur **3-20***)**.** Forskellene i kurvebilledets udformning kan pege på, at den geologiske opbygning inden for de enkelte områder er forskellig. Hvis modelområdet kan inddeles i delområder med markant forskellige kurvebilleder, vil disse afgrænsninger kunne hjælpe ved de geologiske tolkninger langs den geologiske models profiler. Formodningerne om forskelligartet geologi indenfor delområderne – på baggrund af kurvebilledet - vil kunne efterprøves i de geologiske og geofysiske data. Afgrænsningen mellem to topografiske delområder kan eksempelvis udgøre grænsen mellem et bakket glacialt landskab og en postglacial marin flade. Ud fra terrænudformningen ved vi, hvor den geologiske grænse går, og derfor kan den indtegnes på det geologiske profil – også selvom der ikke findes øvrige data lige ved afgrænsningen.



Figur 3-19: Digitalt morfologisk kort over Danmark i 1:200.000 (Sjælland, Øerne og Bornholm) til venstre (Jakobsen, 2014) og Polymorfologisk kort over Sjælland, Møn og Lolland-Falster til højre (Klint et al. 2014).

Iagttagelser af søer, moser, vandløb og andre vådområder på de topografiske kort kan anvendes i den geologiske model som en mulig indikator på forekomst af lerlag i de overfladenære lag. Mængden af boredata og geofysiske data kan i visse områder være meget begrænset, men her kan den topografiske analyse i mange tilfælde bidrage med information om karakteren af den overfladenære lagserie. Detaljer i kurvebilledets udformning – om skrænterne i terrænet er stejle og furede eller ej, om der er knæk og plateauer i landskabet eller lignende - kan pege på skift i karakteren af de overfladenære jordlag. Landskabsanalysen udgør en tolkning af landskabsformer og kurvebilleder, som kun indirekte afspejler de overfladenære jordlag. Landskabsanalysens udpegninger af områder med forskellige lagtyper skal derfor helst understøttes af andre datasæt, og har primært til formål at bidrage med information til tolkningerne af andre data.

Det gælder således om at samle alle de iagttagelser fra topografien, som indirekte beskriver lagserien. Dette har store fordele i områder med få data, men også i områder med god datadækning kan de topografiske informationer anvendes til præcisering af lagudbredelser og -sammenhænge. De topografiske data udgør faktisk det eneste datasæt i den geologiske modellering, som dækker hele området med tætliggende data, og hvor data-usikkerheden er forsvindende lille i sammenligning med alle de andre anvendte datasæt.



Figur 3-20: Inddeling i topografiske delområder på baggrund af forskelle i kurvebillede. Nyborg-området; fra Watertech (2004).

Det anbefales:

- at de nye højdemodeller, som er udarbejdet på baggrund af højopløselige LiDAR data anvendes i den geologiske model
- at eksisterende geomorfologiske kort vurderes og inddrages i den geologiske modellering
- at der på baggrund af de nye højdemodeller foretages en landskabsanalyse med det formål at udpege specifikke landskabselementer og afgrænsning af områder med forskellig udformning
- at der søges uddraget så meget som mulig information om de dybere geologiske lag fra landskabsformer og topografi

3.2 Geofysiske data

3.2.1 Refleksionsseismiske data

Den refleksionsseismiske metode er blevet et udbredt redskab i den danske grundvandskortlægning. Til brug ved grundvandskortlægning er der udviklet højopløselige varianter af metoden, som muliggør detaljeret kortlægning af de øverste grundvandsrelaterede jordlag. Metoden udføres ved at sende trykbølger ned i jorden og måle deres refleksioner fra jordlagene i en række af modtagere – geofoner. Lydkilden er typisk store vibratorer monteret på køretøjer. Geofonerne udlægges manuelt eller, mere almindeligt, slæbes i en lang række efter et køretøj (Vangkilde-Pedersen et al. 2003). Ved grundvandskortlægning optages data i 2D langs profillinjer, og der fås et detaljeret billede af jordlagenes strukturelle opbygning. De seismiske data giver kun begrænsede oplysninger om lithologiske forhold, men ved detaljeret tolkning af seismiske facies, understøttet af specielt boredata, kan der i mange tilfældes tolkes lithologi i dele af de seismiske profiler.

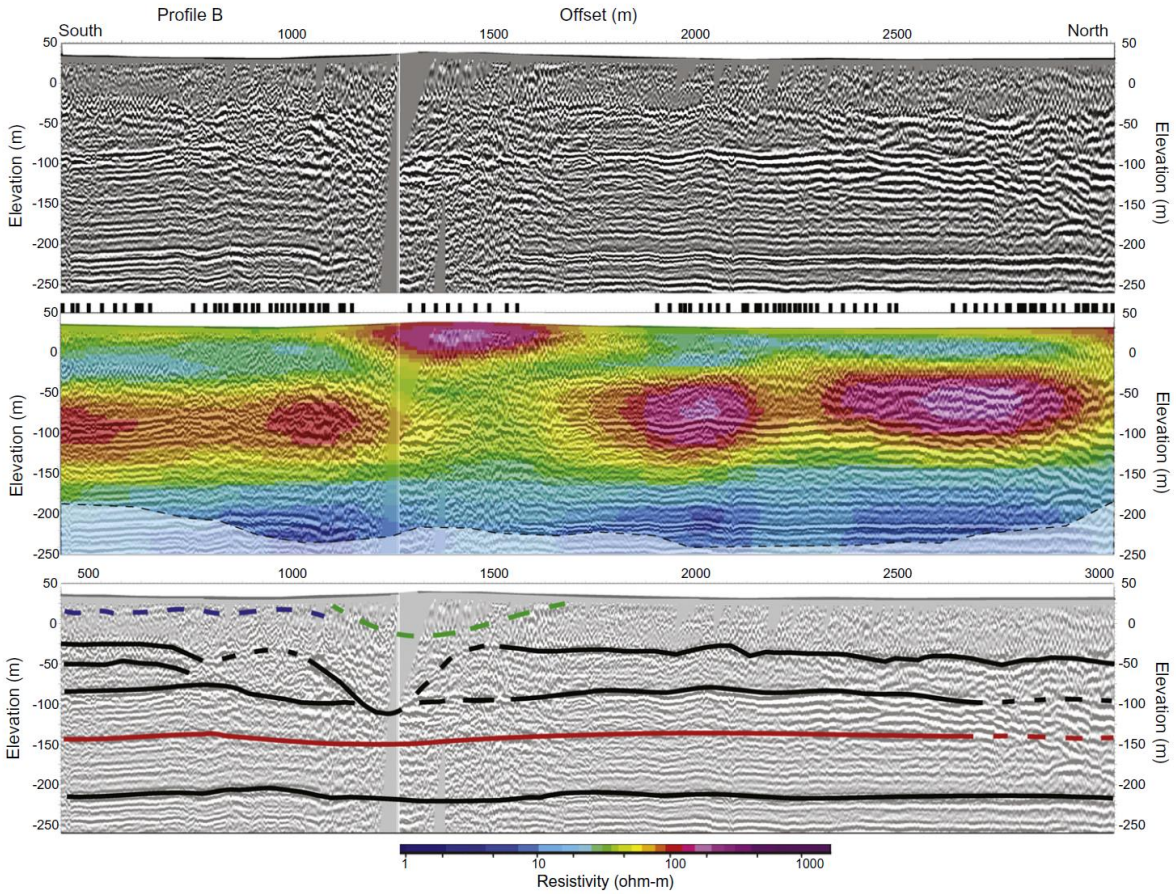
Den seismiske metode har vist sig særlig god i forbindelse med kortlægning af begravede dale, forkastninger og større sammenhængende prækvartære lagserier. Derimod kan det være vanskeligt at opløse forstyrrede kvartære lagserier. Det kan også være svært at indsamle gode data overalt – særligt i områder med stor umættet zone.

Aarhus Universitet har udarbejdet en vejledning og kravspecifikation til hvorledes refleksionsseismiske data optages og processeres i forbindelse med grundvandsundersøgelser (Nørmark & Lykke-Andersen, 2009).

Data
De færdigprocesserede data findes typisk i SegY-format og grafikformat. Både rådata og forskellige versioner af stackede seismiske data i henholdsvis Seg-Y- og grafikformat gemmes i GERDA-databasen og alle nyere data vil følge kravspecifikationerne i Nørmark & Lykke-Andersen (2009). Data i både Seg-Y- og grafikformat samt en positionsfil kan downloades fra GERDA-databasen anvendes i Geoscene3D.

Der er stor forskel på datakvaliteten af konventionel olieseismik og højopløselig grundvandsseismik. Konventionel olieseismik kan kun i nogle tilfælde og i helt overordnet omfang benyttes ved geologisk tolkning og modellering i grundvandsmæssig sammenhæng, f.eks. ved tolkning af forkastninger i undergrunden. Datakvaliteten af grundvandsseismik afhænger dels af hvilket udstyr, der er anvendt under dataindsamlingen, og dels af de naturgivne forhold (Nørmark & Lykke-Andersen, 2006). Eksempelvis kan datakvaliteten blive ringe i områder med en tyk umættet zone bestående af sand eller grus. Desuden har dataprocesseringen stor betydning for resultatet.

Metoden egner sig ikke til detaljeret kortlægning af de terrænnære jordlag. Kun i ekstraordinære tilfælde med meget gode opmålingsforhold og med et optimeret måleudstyrs-setup, kan det lade sig gøre at få brugbare data på dybder mindre end 20-30 m. Ved dataprocesseringen gennemgår de rå data en lang behandlingsproces, hvor en række antagelser og tolkninger omkring de geologiske forhold implementeres. De afrapporterede data skal derfor ses som et udkast fra geofysikernes side. Ved den geologiske tolkning af seismikken er det meget vigtigt at tage højde for dette og at inddrage geofysikeren i arbejdet.



Figur 3-21: Eksempel på tolkning af seismisk sektion ved hjælp at interpolerede TEM-data (fra Høyer et al. 2011).

Anvendelse i den geologiske model

Med den seismiske metode opnås et detaljeret billede af jordens strukturelle opbygning. Herved fås informationer om forskellige former for laggrænser. For at laggrænserne skal kunne opløses, skal der være kontraster i lagenes seismiske hastigheder og dermed lithologiske egenskaber (primært porøsiteten). Lagenes strukturelle opbygning kan give informationer om aflejringsmiljøet og dermed også indirekte om lithologiske forhold. Sådanne forhold kan f.eks. ses ved at identificere forskellige former for laggrænser og i forskellige slags refleksionsmønstre (se bl.a. Jørgensen et al. 2003).

Den geologiske tolkning foregår typisk ved, at laggrænser følges gennem den seismiske sektion. Der opnås derved en god 2D forståelse af de strukturelle geologiske forhold samt informationer om dannelsesmiljøet, men indblikket i de lithologiske forhold vil ofte mangle. Det er derfor generelt nødvendigt at have boredata til at beskrive de lithologiske forhold. Disse boredata kan med fordel suppleres med opmåling af vertikale seismiske profiler (VSP) eller sonic logs i borehullerne, således at forholdene mellem tid og dybde kan præciseres. Endvidere kan TEM-data med fordel anvendes i kombination med seismikken (Jørgensen et al. 2003; Høyer et al. 2011) (se *Figur **3-21***). TEM-data kan give vigtige indikationer om både lithologi og dybder.

Seismikken præsenteres normalt med en vertikal tidsskala. Da jordlagenes lithologi og seismiske hastigheder ofte ikke kendes i tilstrækkelig detalje, er det typisk forbundet med usikkerhed at konvertere den vertikale skala til en dybdeskala. Nogle af de danske jordartstypers hastigheder er undersøgt i Jørgensen et al. 2003. Typisk er hastighederne 1700-1900 m/s, men for morænelers vedkommende alene er hastigheden 2000-2300 m/s. Hastighederne for kalk og kridt er endnu højere. For at kunne sammenligne præcist med andre datatyper, er det nødvendigt at konvertere tiden ved brug af en målt eller anslået hastighed, så der opnås en dybde. En gennemsnitshastighed på 1800-1900 m/s er erfaringsmæssigt et godt udgangspunkt for en sådan konvertering. Ved anvendelse af en gennemsnitshastighed for et helt seismisk profil vil laterale variationer i geologien kunne give stedvise afvigelser. Dette kan i mange tilfælde håndteres visuelt under selve tolkningsarbejdet, men det vil være mere optimalt gradvist, og som en del af den geologiske tolkning, at opstille en to-dimensionel hastighedsmodel for hvert seismisk profil. Dette er dog en tidskrævende proces.

Der findes mange forskellige måder at visualisere de seismiske data på. Der kan f.eks. anvendes både farveskala og sort-hvid skala. Der kan ikke gives specifikke anbefalinger på anvendeligheden af de forskellige visualiseringsmåder – det afhænger bl.a. af datakvalitet, modeltype og geologi.

GeoScene 3D kan åbne SegY-filer, men oftest lægges de ind i modelprojekterne som billedfiler. Hvis der i et område er udført flere seismiske profiler, kan det som et led i tolkningsarbejdet være en fordel at visualisere og tolke profilerne samlet i et 3D-miljø (se afsnit 5.1.7).

Opsummering
Fordele ved den seismiske metode:

- Metoden giver detaljerede strukturelle oplysninger
- Metoden kan give unikke oplysninger om aflejringsmiljøer
- Metoden giver kontinuerte 2D data

Ulemper ved den seismiske metode:

- Metoden er relativt dyr, hvis der skal kortlægges store arealer
- Metoden giver kun få oplysninger om lithologi
- Metoden har begrænsede muligheder for anvendelse i områder med stor umættet zone

Anbefalinger
Det anbefales:

- at anvende seismiske data i områder, hvor andre datatyper ikke bidrager med strukturel information om undergrunden
- at de seismiske data anvendes i kombination med andre data, såsom boringer og TEM

3.2.2 TEM-data

TEM-metoden er den mest udbredte metode til fladedækkende kortlægning af grundvandsressourcerne i Danmark. I 90'erne blev metoden mest benyttet af vandværker og vandforsyninger i deres søgen efter nye egnede kildepladser, men amterne benyttede den også i stigende grad i deres mere generelle vandressourcekortlægning. Siden da er anvendelsen af TEM-metoden, bl.a. som et resultat af den nationale grundvandskortlægning, blevet kraftigt intensiveret og store dele af landet er blevet kortlagt.

Metoden har udviklet sig fra at blive udført på landjorden som enkeltsonderinger til at blive udført fra luften i kontinuerte opmålinger langs flyvelinjer (Sørensen & Auken, 2004).

TEM-metodens styrke er, at den er relativt prisbillig at udføre, og at den kan kortlægge den del af lagserien, som typisk er interessant i grundvandssammenhæng. TEM-målinger kan med relativ stor nøjagtighed bestemme dybden til overfladen af et godt elektrisk ledende lag, ligesom lagfølgen imellem denne og jordoverfladen til en vis grad også kan opløses. Ulempen er, at metoden er følsom overfor støjkilder (f.eks. strømførende ledninger), at kun et begrænset antal lag kan opløses, og at der ikke findes nogen mulighed for direkte oversættelse af de målte data til geologi eller litologi.

GeoFysikSamarbejdet har udarbejdet vejledninger til, hvordan TEM-kortlægninger bør gennemføres og anvendes (GeoFysikSamarbejdet 2002, 2003, 2007, 2008[4]).

Teknisk udvikling

Som ovenfor nævnt har metoden udviklet sig fra at være en jordbaseret metode til at være en luftbåren metode. Op gennem 90'erne blev data typisk indsamlet med Geonics ProTEM udstyr, ofte benævnt 40x40 TEM efter senderspolens konfiguration med kvadratisk udlæg med en sidebredde på 40 m. I dag er det altovervejende den luftbårne variant, SkyTEM, der anvendes i Danmark. Dog anvendes den jordbaserede metode stadig ved mindre kortlægninger, nu med anvendelse af WalkTEM udstyr. Fremover må man forvente, at det nyudviklede jordbaserede tTEM vil blive brugt i mange sammenhænge.

Der tilbydes forskellige SkyTEM systemer (se www.skytem.com), og valget afhænger af faktorer som terrænnær opløsning, dyb kortlægning, lateral dækning. Der er et trade-off mellem at opnå god terrænnær opløsning og samtidig en dyb kortlægning. Nogle af de systemer, der er anvendt over de seneste år, har ikke en særlig stor indtrængningsdybde, men til gengæld en god opløsningsevne i toppen. Dette skal man være opmærksom på f.eks. ved at iagttage DOI (Depth Of Investigation; Christiansen & Auken, 2012). Det modsatte, hvor opløsningsevnen er mindre god i toppen, gør sig også gældende for nogle af de indsamlede datasæt.

Data

Dataprocesseringen har, specielt i forhold til erkendelsen af støjpåvirkede data (kobling til hegn og elektriske installationer), stor betydning for den endelige geofysiske model. Nogle typer af koblinger skjuler sig, fordi de har bløde kurveforløb og kan forveksles med responser fra geologiske formationer. Ofte betyder koblinger, at der fremkommer et kunstigt lag med en lav modstand højt i modellen.

Korrekt tilskrivelse af usikkerhed er meget vigtig i den geofysiske tolkningsproces. Tilskrives for stor usikkerhed, får man ikke alle informationer ud af sine data. Omvendt, hvis man tilskriver for lidt usikkerhed, risikerer man at misfortolke sine data. Støjen indgår også i beregningen af model-parameterusikkerheden.

En efterfølgende datamodellering (den geofysiske tolkning) foregår ved inversion og resulterer i en lagmodel bestående af modstande og dybder. Den primært benyttede inversionsrutine til SkyTEM-data er Spatially Constrained Inversion (SCI) og er beskrevet i Geofysiksamarbejdet (2008[4]); Viezzoli et al. (2008). Det grundlæggende ved datamodelleringen er, at de resulterende modeller kan være meget forskellige; alt afhængig af hvilken type af inversion der er benyttet, og hvordan inversionen er gennemført. Derfor er det vigtigt at vide, hvordan den geofysiske tolkning er udført, før der foretages en

geologisk tolkning af data. En meget væsentlig ting i denne forbindelse er omfanget af subjektiv viden tilført under tolkningen (Geofysiksamarbejdet, 2003). På baggrund af a priori-viden kan der f.eks. være brugt bindinger i tolkningen. Ofte findes der flere ækvivalente modeller, som er meget forskellige, men som tilpasser data lige godt. I sådanne tilfælde spiller udvælgelsen af modellen og eventuelt valg af inversionsrutine en særlig rolle.

En væsentlig ting at være opmærksom på ved vurdering af modellerne er, hvor godt data tilpasser modellen. Et stort data-residual indikerer en upålidelig model, hvorimod et lille residual indikerer en mere pålidelig model.

Ved den geofysiske tolkning kan der være inddraget subjektiv viden eller eventuelt information fra andre typer af data – f.eks. boredata. Hermed er der taget forskud på den geologiske tolkning allerede under den geofysiske tolkning, og det medfører, at det efterfølgende er vanskeligt at udbygge den geologiske tolkning eller at integrere denne i en geologisk model. Som minimum kræves der i sådanne tilfælde en meget nøjagtig beskrivelse af, hvad der er foretaget og hvilke usikkerheder, der er forbundet med dette.

Det skal i første omgang tilstræbes at gennemføre den geofysiske tolkning så objektivt som muligt. I det efterfølgende arbejde med den geologiske tolkning kan det derimod være særdeles relevant i en iterativ proces, gradvist at tilføre inversionen og evt. dataprocesseringen a priori-viden for at optimere resultatet.

Foruden traditionelle fålagsmodeller bør der udføres mangelagsmodeller med op til 30 lag. Mangelagsmodeller giver supplerende geologiske informationer, som fålagsmodellerne ikke giver. Disse forhold er beskrevet i GeoFysikSamarbejdet (2007). Erfaringsmæssigt giver mangelagsmodellerne mere detaljerede resultater og typisk et mere naturligt og realistisk billede af geologiens opbygning. Der kan være ret store forskelle på mangelagsmodeller og fålagsmodeller (se ***Figur 3-22*** og *Figur **3-23***).

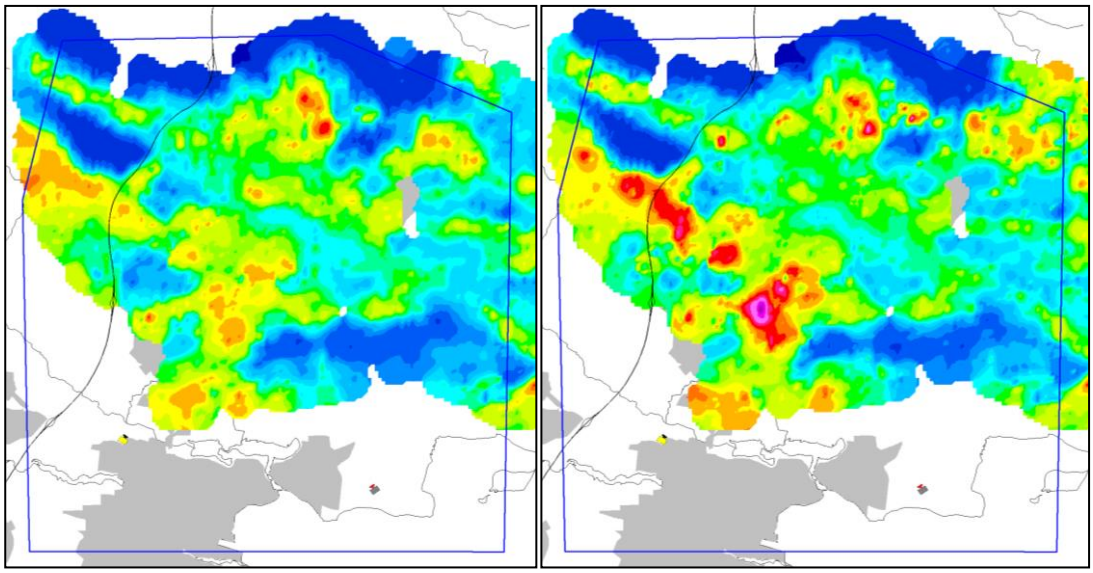
En nyere variant er den såkaldte sharp inversion (Vignoli et al., 2015). Ved anvendelse af denne inversionstype kan dybder til kontrastrige laggrænser beskrives mere præcist end ved mangelagsmodelleringen (Vignoli et al., 2017; *Figur **3-24***). Sharp inversion vil således kunne erstatte fålagsmodellerne, men der er behov en nærmere analyse af fordele og ulemper ved de forskellige inversionstyper.

Til behandling af TEM-data benyttes normalt programpakken Aarhus Workbench udviklet ved Århus Universitet. Både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i GERDA-format og alle data gemmes i GERDA-databasen (www.gerda.geus.dk). Herfra kan data downloades og viderebehandles i Workbench og GeoScene 3D.

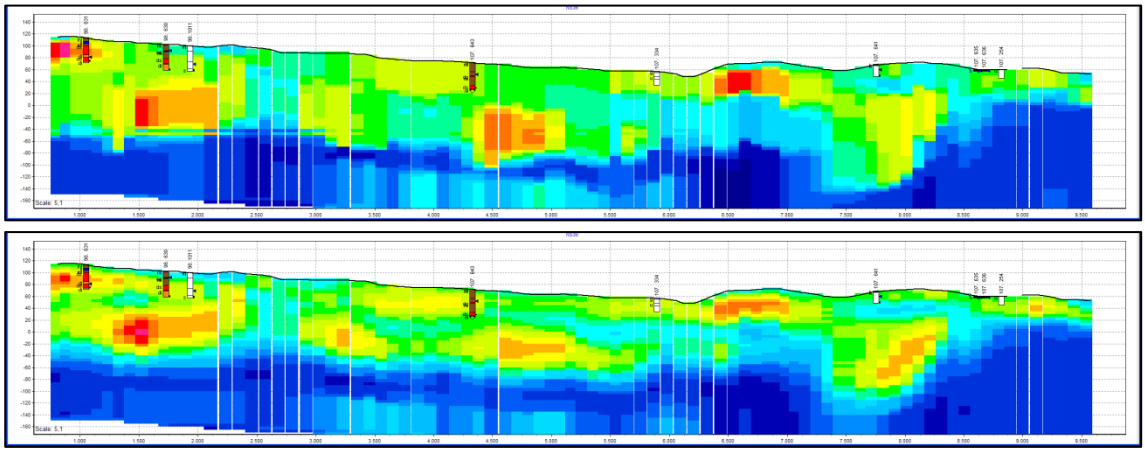
Anvendelse i den geologiske model

Modstandsværdier og opløsningsevne

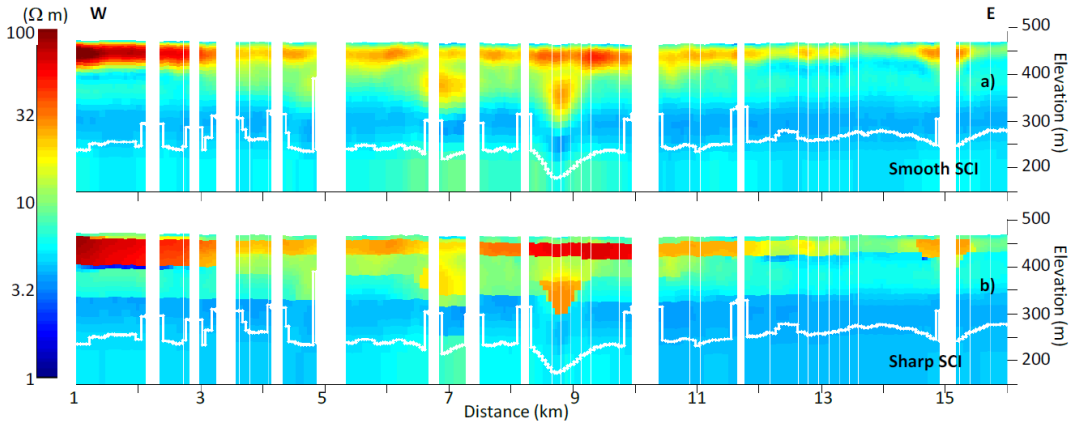
Jordens elektriske modstand er afhængig af lerindhold, lertype, porevandets ionindhold og mætningsgrad. Det er primært sedimentets lerandel, der udgør grundlaget for den geologiske fortolkning af TEM-data, men de øvrige parametre skal også altid tages i betragtning. I Geofysiksamarbejdet (2003) gennemgås typiske målte modstande for danske aflejringstyper.



Figur 3-22: Forskelle på mangelags- og fålagsmodeller. Tilfældigt horisontalt snit gennem et modstandsgrid i samme koteinterval. Til venstre: Mangelagsmodel. Til højre: Fålagsmodel. Fra Møller & Jørgensen (2011).



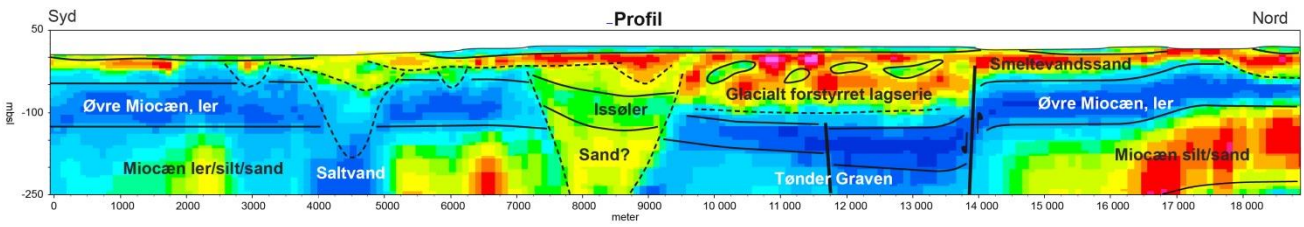
Figur 3-23: Forskelle på mangelags- og fålagsmodeller. Tilfældigt vertikalt snit gennem et modstandsgrid. Øverst: Fålagsmodel. Nederst: Mangelagsmodel. Fra Møller & Jørgensen (2011).



Figur 3-24: Eksempel mangelags-inversion (Smooth SCI) og sharp inversion (Sharp SCI) på VTEM data fra Canada (Vignoli et al., 2017). DOI er vist med hvid linje.

Som tommelfingerregel kan man sige, at et lag kun kan opløses, hvis det er mindst halvt så tykt som dybden til laget. Den vertikale opløsning aftager dermed med dybden. Det kan dog lade sig gøre at opløse væsentligt tyndere lag, hvis de har lave modstande. Foruden den vertikale opløsningsevne tales der også om horisontal opløsningsevne (Geofysiksamarbejdet, 2003). Den horisontale opløsningsevne aftager også med dybden men er desuden afhængig de aktuelle geologiske forhold. Begrænsninger i målemetoden medfører, at den har vanskeligt ved at opløse den øverste geologi. På grund af intensiv instrumentudvikling er dette dog blevet forbedret over de senere år, således at der nu, under ideelle forhold og med de rette tekniske målesystemer, kan opløses lag på ned til 5-10 m tykkelse (Gravesen et al., 2014; Schamper et al., 2014).

Ved databehandlingen, dvs. processeringen og tolkningen, bliver der også udledt et estimat af kortlægningsdybden (DOI) (Christiansen & Auken, 2012). Dette er normalt i form af en ”Lower DOI” og en ”Upper DOI”. Ved tolkningen af TEM data er det meget vigtigt løbende at observere, hvor dybt DOI befinder sig. Den varierer ofte meget og bør vises på profilsnit ved tolkning. Ligeledes bør den anvendes ved tolkning på middelmodstandskort og fladesnit.



Figur 3-25: Eksempel på geologisk tolket fladesnit og profilsnit gennem 3D resistivitetsgrid interpoleret på baggrund af indsamlede SkyTEM-data. Eksemplet er fra Tønder-området (Jørgensen et al., 2016).

Datapræsentation og tolkning

TEM-data præsenteres normalt på kort eller profiler. Ved den geologiske modellering anvendes desuden forskellige typer af dataudtræk. Særligt anvendelige udtræk er koten for den gode leder og middelmodstandskort. Koten for den gode leder kan udtrækkes på forskellige måder og bør tilpasses den lokale geologi (Geofysiksamarbejdet, 2003). Koten for den gode leder kan bestå af fedt tertiært ler, smeltevandsler, interglacialt ler, saltvand eller af blandinger af disse. Ved hjælp af middelmodstandskort fås et godt overblik over den rumlige fordeling af modstandene i et kortlægningsområde. For at få mange detaljer med og for ikke at miste information er det tilrådeligt at anvende 5 m koteintervaller.

Ved interpolation af middelmodstande og af koten for den gode leder, kan det anbefales at benytte *kriging* eller *inverse distance* (se afsnit 4.4 om interpolation af data). Søgeradius og cellestørrelse bør afhænge af datatætheden. Er der tale om tætliggende data, f.eks. en flyvelinjeafstand på 200 m, kan en søgeradius på 350 m og en cellestørrelse på 50 m anbefales. Ved højere flyvelinjeafstande eller hvis der f.eks. er store område med frasorterede, koblede data, kan en søgeradius på 500 m og en cellestørrelse på 100 m anbefales som startværdier - se også Geofysiksamarbejdet (2003). Værdierne kan tilpasses de lokale geologiske forhold, ligesom variogramanalyse med fordel kan benyttes i områder med ensartede geologiske miljøer.

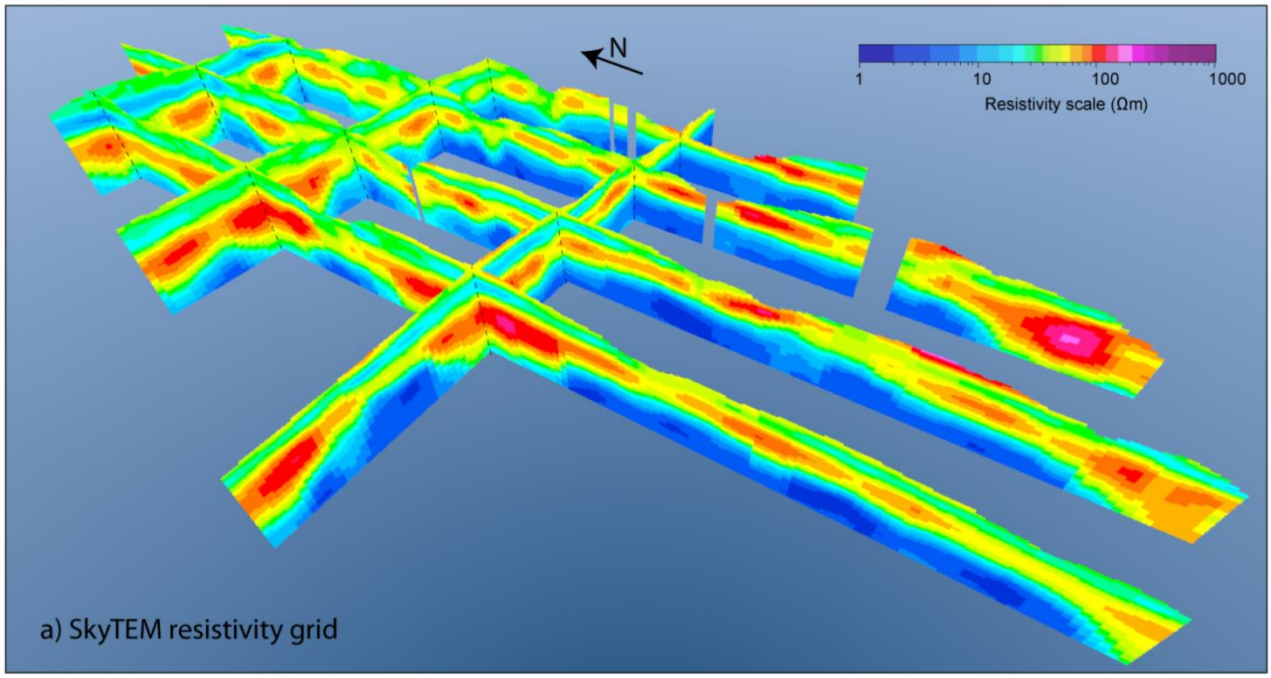
På profiler kan TEM-data grundlæggende vises som enkeltstående modeller med farver repræsenterende de enkelte lag i modellerne. Det kan anbefales, at der ved visningen af sonderingerne knyttes en visualisering af usikkerheden på data og model. Ved profiloptegning kan en projektionsafstand på 250 m anbefales, men dette afhænger selvfølgelig også af de lokale geologiske forhold. Hver TEM-sondering er i princippet en punktmåling, men man skal ved den geologiske fortolkning være opmærksom på, at målingen afspejler et stort respons-rum i dybden og et mindre respons-rum i lagseriens øvre dele. Ved anvendelse af information fra enkeltsonderinger skal det også iagttages, at disse er blevet bundet sammen med horisontale bånd under inversionsprocessen, hvis der er anvendt f.eks. SCI. Hermed kan kraftige laterale variationer være blevet udglattet.

En anden metode til præsentation af data på profiler eller horisontale snit er ved skæring af interpolerede middelmodstandsgrids (se *Figur **3-25***). Herved vises interpolerede værdier langs profillinjen og problemet med projektionsafstand fra TEM-sondering til tolkningsprofil imødekommes herved. Et 3D resistivitetsgrid kan produceres ved at lægge koteinterval-grids ovenpå hinanden, og der opnås derved et 3D grid, der dog kun er lateralt interpoleret, se også afsnit 4.4 om interpolation af data. Det bliver herefter muligt i f.eks. GeoScene 3D, at vise vilkårlige både horisontale og vertikale snit gennem griddet.

Resistivitetsgrids kan også vises i 3D (se f.eks. *Figur **3-26***). Dette kan gøres i GeoScene3D, f.eks. ved hjælp af fence diagrammer, hvor griddet skæres vertikalt af et valgbart antal profiler. Det kan også skæres med horisontale planer.

Ved visning af TEM-data på såvel profiler og kort anvendes som udgangspunkt en fast, primær modstandsskala. Modstandsskalaen har varme farver for høje modstande og kolde farver for lave modstande. Typisk anvendes en skala, der på det nærmeste er kontinuert på grund af et stort antal intervaller. Det er dog ofte en fordel at fremhæve strukturer ved at benytte færre intervaller, men der findes ingen standarder for dette. I forhold til koteskala, anvendes der ofte en skala der spænder fra -300 m til +100 m. Denne anbefales dog kun, hvis de højdeforskelle man gerne vil vise udfylder hele dette interval. Det er mest optimalt at udnytte hele farvespektret (lilla-blå-grøn-gul-rød) på de kort man gerne

vil optegne. Dette giver størst detaljeringsgrad. I lighed med det beskrevne ovenfor, kan der være fordele ved at udarbejde kort med både diskrete og kontinuerte farveskalaer.



Figur 3-26: Eksempel på 3D visualisering af resistivitetsdata ved hjælp af et fence-diagram gennem et interpoleret 3D resistivitetsgrid. Vist i GeoScene 3D. Fra Høyer et al. (2015).

3.2.3 Geoelektriske data

PACEP og PACES

Figur 3-27: Foto fra testlinje ved Skjød. Verner Sønder-gaard.

PACES (Pulled Array Continous Electrical Sounding) og PACEP (Pulled Array Continous Electrical Profiling) data omfatter information indsamlet med den slæbegeoelektriske metode, som gennem en årrække frem til omkring 2010 har været den mest udbredte metode til kortlægning af modstandsforholdene i den øvre del af lagserien. I forbindelse med grundvandskortlægning er metoden udviklet med henblik på at undersøge dæklag over grundvandsmagasiner og indgår typisk i vurdering af grundvandets sårbarhed. Metoden er udviklet på Aarhus Universitet (Sørensen, 1996).

Den slæbegeoelektriske metode benytter sig af jævnstrøm (DC-metode), og er ikke i samme grad som de elektromagnetiske metoder følsom overfor kulturelle støjkilder. Metodens styrke er, at der, i forhold til håndudlagt måleudstyr, kan indsamles store mængder tætliggende data på kort tid - specielt i det åbne land (*Figur 3-27*). Til gengæld kræver udstyret åbne og fremkommelige arealer, hvilket kan være en begrænsning i anvendelsesmulighederne. Data indsamles langs linjer med en typisk indbyrdes afstand på 250 meter.

De tidlige udgaver af metoden bestod af et system med 3 elektrodeafstande (10 m, 20 m og 30 m i en Wenner-opstilling) og benævnes PACEP. Metoden er senere udviklet til at omfatte et 8-kanalssystem, der kombineres i forskellige opstillinger med elektrodeafstande på mellem 2 og 30 meter. Derved kan data tolkes som egentlige sonderinger, og metoden omtales som PACES. Det skal bemærkes, at PACEP også findes i en udgave med kortere afstand mellem elektroderne.

Der foreligger vejledninger fra GeoFysikSamarbejdet, som beskriver udførelse af PACES i felten (Geofysiksamarbejdet, 2008[1]), samt anvendelse af den mest anvendte processerings- og tolkningssoftware og indberetning til GERDA-databasen (Geofysiksamarbejdet, 2008[2], 2012).

Data

Dataindsamlingen foregår ved, at et langt elektrodekabel slæbes henover jorden. Dette kabel er forsynet med to strømelektroder og 11 potentialeelektroder. Mens der køres, registrerer systemet spændingsforskellen mellem elektroder i forskellige målekombinationer. Målingerne optages løbende og omsættes til modstandsværdier langs profillinjen. Man kan ikke præcist angive metodens indtrængningsdybde, da den er stærkt afhængig af de specifikke modstande i jorden, men under danske forhold opnås maksimale indtrængningsdybder på mellem 15 og 30 meter.

Data indsamlet med PACES-metoden er som hovedregel indberettet til GERDA-databasen og kan downloades herfra (http://gerda.geus.dk). Tolkede modstandsmodeller fra PACEP-målinger findes også

i GERDA-databasen. Her er der i flere tilfælde foretaget retolkning af ældre data, som herefter er indberettet. I det omfang kortlægninger ikke er indberettet, kan tolkede modstandsmodeller findes digitalt i rapporter, typisk som tekstfiler og/eller regneark. Filerne vil ofte danne grundlag for kort med middelmodstande og såkaldte isoohmmeter kort (modstandskort for de enkelte elektrodeafstande).

Til inversionskørsler af de filtrerede PACES-data benyttes Workbench. Herfra kan både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i PCGerda-format, og alle data uploades til GERDA-databasen. Modellerne kan indlæses som tolkningsgrundlag i GeoScene 3D.

Kvaliteten af rådata afhænger bl.a. af kontakten mellem elektroderne og jorden under feltarbejdet. Tør/hård jord resulterer i dårlig jordkontakt og fejl i målingerne. Geofysiksamarbejdet anbefaler, at der ikke måles, hvis mere end 25 % af målingerne har fejl. I dataprocesseringen omregnes måleværdierne til tilsyneladende modstande (Rhoa), og der foretages en manuel beskæring af støjede data, som f.eks. kan forekomme ved passager af veje og højspænding. Endvidere påføres data en midling/filtrering (Geofysiksamarbejdet, 2008[1]).

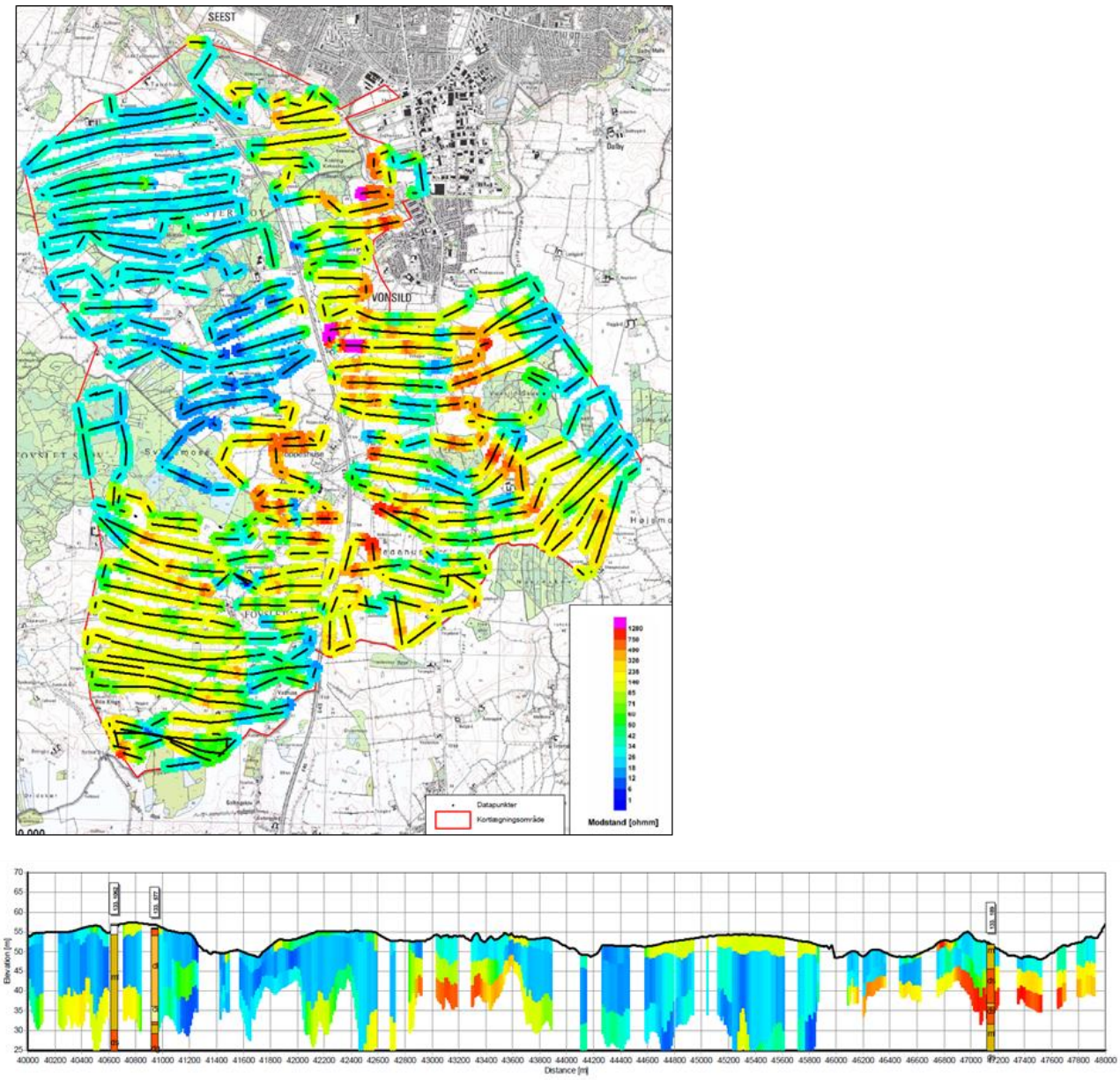
Anvendelse i den geologiske model

Efter den indledende databehandling udtrækkes geoelektriske sonderinger langs PACES profilerne (normalt for hver 10 meter) til 1D lagmodeller med modstande og dybder. Den geofysiske tolkning udføres gennem inversionskørsler oftest med 1D-LCI tolkningsmetoden.

PACES modeller er traditionelt tolket med 3-4 lag. Mangelagstolkning er anvendt sammen med fålagstolkning i de nyere kortlægninger og giver et mere nuanceret modstandsbillede af lagserien. Ved tolkning af de geofysiske resultater er det vigtigt at være opmærksom på ækvivalens-problematikken, dvs. at forskellige modeller ofte vil kunne tilpasse det samme datasæt. Det er muligt at inddrage boringsinformation (a priori-viden) ved at bruge bindinger i den geofysiske tolkning. Som hovedregel bør det dog tilstræbes at udvælge de mest objektive modeller, med mindre integration af a priori viden sker i et iterativt forløb. I forhold til den geologiske tolkning er det vigtigt at være opmærksom på kriterierne for den valgte model og den usikkerhed, der ligger i den geofysiske tolkning. Tilpasningen af tolkningen kan aflæses af det såkaldte residual for en række modelparametre. Residualet skal helst ligge mellem 1 og 1,5. Højere residual kan forekomme på grund af 2D-effekter, støjede data, mangelfuld udsortering/beskæring af rådata og valg af model.

Den målte elektriske modstand i jorden afhænger af andelen af lermineraler, lertype, vandindhold og porevandets ledningsevne. Rammerne for forskellige sedimenters modstande er meget vide, hvorfor den geologiske tolkning af modstandsmodeller skal foretages med omtanke. Typiske modstande for danske sedimenter målt med geoelektriske metoder fremgår bl.a. af (Skov- og Naturstyrelsen, 1987).

PACES-kortlægninger vil ofte være udført i områder, hvor der har været særligt ønske om at vurdere dæklagene over grundvandsmagasinerne. Dette kan typisk være i eksisterende eller potentielle oplande til kildepladser. Modstandsmodeller tolket fra PACES/PACEP-data kan med fordel inddrages i den geologiske model i disse områder. Som regel er der udarbejdet en række kort i forbindelse med PACES-kortlægningen. Disse omfatter typisk en interpolation af modstanden i de enkelte modellag og middelmodstand indenfor kote eller dybdeintervaller (f.eks. 5 eller 10 meter) (se *Figur **3-28***).



Figur 3-28: Øverst ses et eksempel på et PACES-middelmodstandskort for dybdeintervallet 5-15 m. Nederst ses et profil langs en kørelinje med PACES 3-lagsmodeller. Eksemplet er fra Vonsild syd for Kolding (Rambøll, 2005).

I GeoScene 3D kan PACES-modellerne visualiseres på tolkningsprofiler som enkeltstående stave med farve, der repræsenterer modstanden i de enkelte modellag. Der kan f.eks. også indlæses et interpoleret 3D-resistivitetsgrid i programmet. Dette kan med fordel anvendes i tolkningsarbejdet, idet der kan opnås et overblik – vertikalt såvel som horisontalt – over variationerne i den overfladenære geologi.

Den slæbegeoelektriske metode giver detaljeret information om både strukturelle og lithologiske forhold i de øverste jordlag. Men ofte er der ikke tydelig korrelation mellem data på de indsamlede målelinjer, da disse ligger for langt fra hinanden. Det er derfor vanskeligt at opbygge en rumlig geologisk model udelukkende på baggrund heraf. I områder med homogen geologi eller tætliggende målelinjer er det dog ofte muligt.

MEP

I forbindelse med kortlægning af grundvandsforholdene har der i Danmark i udstrakt grad været anvendt geoelektriske metoder. Siden 1960'erne har man anvendt Schlumberger-sonderinger (DC-sonderinger) til kortlægning af dybereliggende jordlag, og Wenner-profilering til kortlægning af variationer i de overfladenære lag. Begge metoder er relativt simple og robuste og benytter det grundlæggende princip: Strøm sendes ned i jorden via to strømelektroder (jordspyd) og spændingsforskellen måles over to potentialeelektroder. Den målte spændingsforskel omregnes til en elektrisk modstand. En beskrivelse af metoderne findes bl.a. i Skov- og Naturstyrelsen (1987). Fra første halvdel af 90'erne blev den klassiske geoelektrik med spyd erstattet af andre kortlægningsmetoder – bl.a. MEP-metoden (Multi Elektrode Profilering, eller på engelsk: CVES - Continuous Vertical Electrical Sounding eller ERT – Electrical Resistivity Tomography), som på den måde er en videreudvikling af traditionel geoelektrik. Ved MEP sættes et stort antal spyd langs en profillinje, og der måles på mange forskellige spydkombinationer. Metoden anvendes typisk til detailkortlægning af dæklag over grundvandsmagasiner samt kortlægning af de øvre dele af grundvandsmagasiner. MEP-metoden er beskrevet i Møller et al. (2006).

MEP-metoden er relativ robust overfor menneskeskabte støjkilder. Metodens styrke er, at der indsamles store mængder tætliggende data i forskellige dybder langs målelinjerne. Dette giver mulighed for en god opløsning af de overfladenære lag samtidigt med opnåelse af en relativ stor indtrængningsdybde. I forhold til PACES-metoden (se ovenfor) er feltarbejdet tidskrævende. Til gengæld kan MEP-udstyret anvendes på vanskeligt fremkommelige arealer (f.eks. i skov) og dermed i nogen udstrækning indsættes som erstatning for PACES.

Ældre DC-kortlægninger (Schlumberger-sonderinger og Wenner-profilering) er i vid udstrækning indberettet i GERDA databasen; dog ikke konsekvent med retolkede modstandsmodeller.

Der foreligger vejledninger fra Geofysiksamarbejdet, som beskriver udførelse af MEP i felten, anvendelse af den mest anvendte processerings- og tolkningssoftware (Geofysiksamarbejdet, 2005; 2008[4]), samt indberetning til GERDA (Geofysiksamarbejdet, 2012).

<u>Data</u>

Fra metodens start og frem til omkring 2005 har der traditionelt været anvendt Wenner måle-konfigurationer med elektrodeafstande på mellem 5 og 120 meter. Jo større afstand mellem elektroderne, jo større og dybereliggende jordvolumen afspejler målingerne. Siden 2005 er der i stor udstrækning anvendt såkaldte gradient-array protokoller, der måler potentialer over flere elektrodesæt samtidigt. Herved indsamles på samme tid langt flere data, der afspejler samme måledybde. Denne metode giver således en bedre datakvalitet.

Data indsamlet med MEP-metoden er som hovedregel indberettet til GERDA og kan downloades herfra. Det er muligt at indberette geofysiske MEP-modeller både som 1D- og 2D-tolkning i det omfang begge tolkningstyper er gennemført (se nedenfor). I de ældste MEP-kortlægninger er tolkningen udelukkende udført som 2D.

Til inversionskørsler af de processerede MEP-data benyttes i dag brugerfladen i programpakken Workbench. Herfra kan både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i GERDA-format og uploades til GERDA. Modeller i GERDA format kan herefter indlæses i GeoScene 3D.

Kvaliteten af rådata afhænger bl.a. af kontakten mellem jordspyddene og jorden under feltarbejdet. Sandede og tørre forhold kan resultere i, at kontakten mellem spyd og jord bliver dårlig, og at der ikke kan sendes tilstrækkelig strøm ud i jordlagene. Meget tørre forhold, baggrundsstøj eller instrumentfejl kan bevirke at datakvaliteten ikke kan overholde en række specifikke krav, som GeoFysikSamarbejdet anbefaler. Fejlbehæftede datapunkter fjernes også ved dataprocesseringen. En samlet reduktion af datapunkter gennem feltarbejde og processering på max. 10 % anses for acceptabel (Geofysik-samarbejdet, 2008[3]).

Som ved PACES kan man ikke præcist angive metodens indtrængningsdybde, da den er stærkt afhængig af de specifikke modstande i jorden. Med et maksimalt elektrodeudlæg på 400 meter opnås erfaringsmæssigt indtrængningsdybder på mellem 40 og 60 meter.

Anvendelse i den geologiske model

Den geofysiske tolkning af et MEP-datasæt kan foretages med forskellige metoder. I mange tilfælde er der foretaget en 2-dimensional tolkning af hele profilet, hvilket giver en "blød" modstandsmodel (Loke & Dahlin, 2002). Der foretages ikke opdeling i sonderinger ved denne tolkningstype. Alternativt, eller som supplement, foretages en opsplitning i 1D-sonderinger langs profilet, som herefter inverteres (Geofysiksamarbejdet, 2005). Inversionen udføres ofte med LCI metoden (*Figur **3-29***).

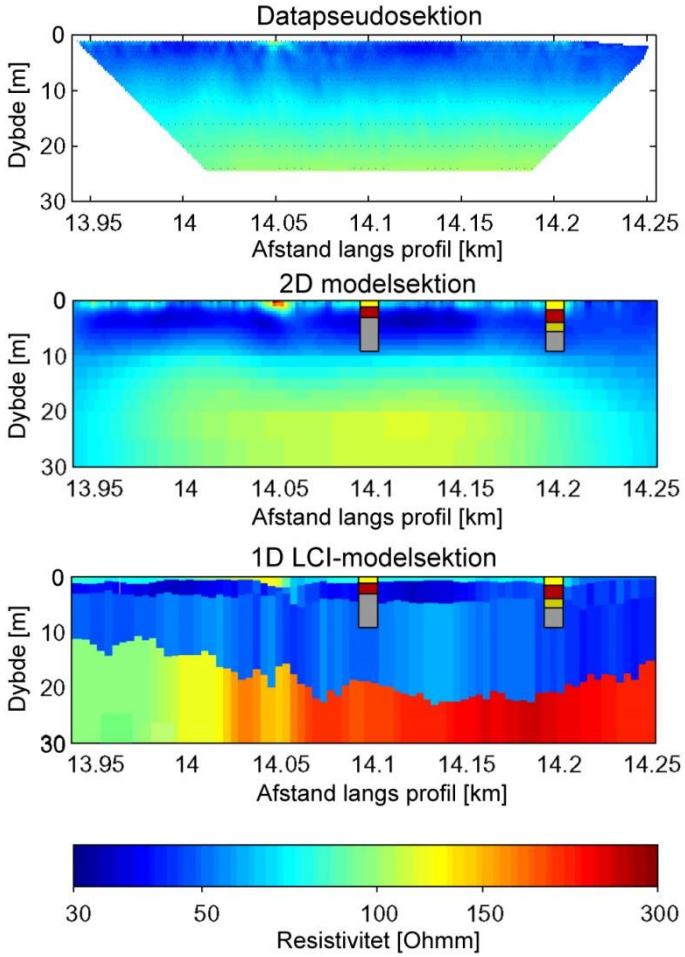
I GeoScene 3D er det muligt at indlæse modeller fra både 1D- og 2D-tolkningsmetoden. Som ved PACES beskrevet ovenfor, er det ved geologisk tolkning af MEP og anden DC-geoelektrik vigtigt, at være opmærksom på ækvivalens-problematikken. Det bør som hovedregel tilstræbes, at udvælge de mest objektive modeller, og eventuel integration af a priori viden bør ske i et iterativt forløb. I forhold til den geologiske tolkning, er det vigtigt at være opmærksom på kriterierne for den valgte model, og den usikkerhed der ligger i tolkningen. Tilpasningen af tolkningen aflæses af residualet for en række modelparametre. Dette skal helst ligge mellem 1 og 1.5. Ved 2D-tolkningsmetoden beregnes et samlet residual for hele profilet.

Den målte elektriske modstand i jorden - og i sidste ende de geofysiske modeller, der skal tolkes, afhænger af samme parametre og begrænsninger, som beskrevet ovenfor under PACES-metoden.

MEP-kortlægninger er ofte udført i mindre områder, hvor der har været særligt ønske om detaljeret kortlægning af dæklagene samt overgangen til grundvandsmagasinerne (typisk i eksisterende eller potentielle oplande til kildepladser). Metoden er desuden i vid udstrækning anvendt til regionale kortlægninger på den nordlige del af Sjælland, hvor den er rettet mod den overfladenære geologi og den øvre del af kalkmagasinerne.

I GeoScene 3D kan 1D-modeller fra MEP visualiseres på tolkningsprofiler som enkeltstående stave med farve, der repræsenterer modstanden i de enkelte modellag. 2D-modellerne vises med farvede punkter, der evt. kan interpoleres. Det anbefales så vidt muligt, at begge modeltyper indlæses.

Udover 1D- og 2D-modstandsprofiler kan det give mening at interpolere data i 3D, men dette kræver at linjerne er tætliggende og/eller at geologien er homogen, således der er korrelation mellem data på linjerne. Geofysiksamarbejdet har udarbejdet en modstandsskala specielt beregnet for DC-metoder.



Figur 3-29: Eksempel på MEP-profil, hvor data er vist som data-pseudosektion og tolket med henholdsvis 2D tolkning og 1D LCI tolkning. Modificeret efter Auken et al., 2005.

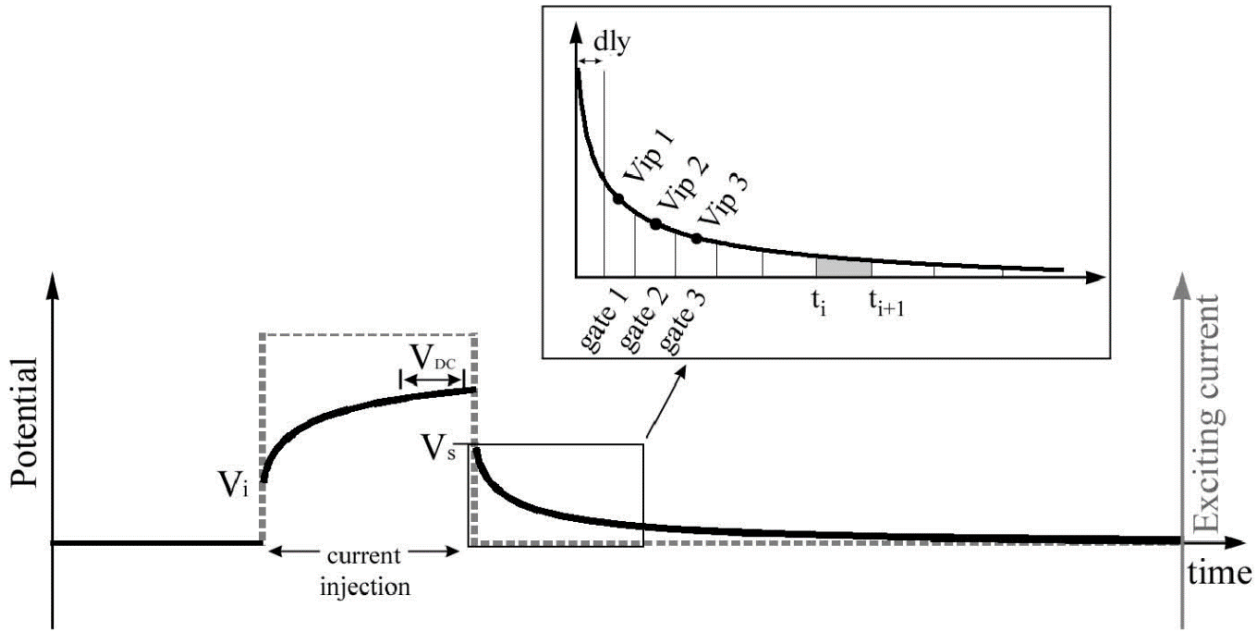
DCIP

Induceret polarisation (IP), som ellers er betragtet som en fejlkilde i geoelektriske metoder, kan indeholde væsentlig information om jordlagenes litologi og disse målinger kan være med til at reducere flertydigheden i den geologiske tolkning. Induceret polarisation måles sammen med DC signalet, hermed navnet DCIP (Direct Current og Induced Polarisation), eller TDSIP (Time Domain Spectral Induced Polarization). Med IP metoden måler man jordens evne til at virke som en kapasitor. Der er forskellige polarisationsmekanismer, som giver anledning til, at elektriske ladninger ophobes, når de påtrykkes et elektrisk felt, men i danske jorde er fænomenet oftest relateret til lermineraler. En IP måling foretages ved, at man måler det tidslige henfald af potentialet i en række tidsvinduer, efter at strømmen er slukket (*Figur **3-30***).

DCIP metoden har været igennem en meget omfattende udvikling fra oprindeligt at have været brugt i udlandet til mineralefterforskning, hvor man har målt den integrerede opladningsevne (chargeability), til at blive brugt i forureningsundersøgelser og grundvandsundersøgelser, først ved at man har målt den integrerede opladningsevne (Slater & Lesmes, 2002), til at man nu kan bestemme det tidslige henfald meget nøjagtigt efter en stringent processering af dataene (fx Olsson et al., 2016). I en efterfølgende inversion af data kan man bestemme de såkaldte ”Cole-Cole”-parametre, som er en matematisk-empirisk

beskrivelse af IP henfaldet givet ved resistivitet, opladningsevne, tidskonstant og en eksponentiel faktor, se fx Fiandaca et al. (2013) og Maurya et al. (2018).

I grundvandssammenhæng og ved en litologisk tolkning af data, vil en høj opladningsevne være relateret til lerholdige sedimenter, mens lerfrie sandlag vil have meget lav opladningsevne. Organiske sedimenter kan også give anledning til relativ høj opladningsevne. Den nyeste forskning viser, at det ud fra resistivitets- og opladningsevne-værdierne, samt en empirisk relation, er muligt at bestemme den hydrauliske ledningsevne (Maurya et al., 2017). De seneste udviklinger af DCIP metoden peger hen mod, at denne metode har et stort potentiale i grundvandskortlægning og geologisk modellering (*Figur **3-31***).



Figur 3-30: Skitse of måleprincippet for en DCIP måling. Strøm som funktion af tid er plottet med stiplet linje. Strømmen tændes og slukkes instantant. Den sorte fede kurve viser potentialet som funktion af tiden. Det langsomt opstigende potentiale, når strømmen tændes, samt henfaldet efter at strømmen er slukket skyldes IP. IP parameteren opladningsevne måles i tidsvinduer. Efter Gazoty et al., 2012.

Data

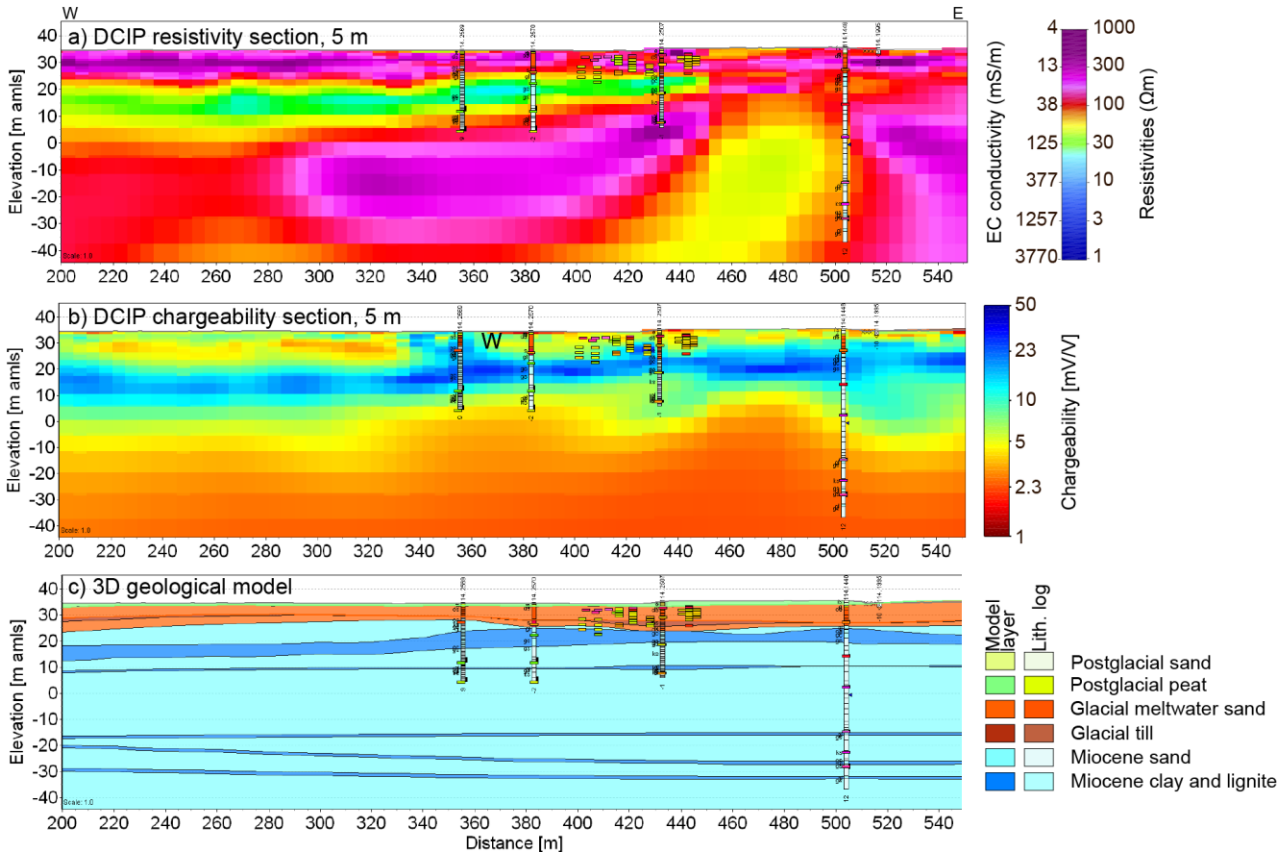
DCIP data måles typisk med gradient-array protokoller. Da de målte signaler i tidsvinduerne er væsentligt mindre end DC målingen, er IP data udsatte for støj, og det er nødvendigt med en omhyggelig frasortering af "dårlige" datapunkter og processering af signalerne (Olsson et al., 2016). Data kan processeres og inverteres i Aarhus Workbench. Data tolkes i dag oftest med 2D modeller Fiandaca et al. (2013). Data og modeller kan gemmes i PC-GERDA format og det er muligt at indlæse dem i GERDA. Der er endnu ikke indberettet DCIP data til GERDA.

Anvendelse i den geologiske model

I Geoscene3D er et ikke muligt at indlæse IP-parametrene direkte, men opladningsevne og de andre Cole-Cole parametre kan indlæses som bitmaps på profiler, eller der kan konstrueres 3D grids af IP-

parametrene, som så læses ind. Hvis man vælger en kort søgeradius ved konstruktionen af 3D-griddene kan IP-parametrene reelt vises som 2D profiler.

Opladningsevne-sektioner kan understøtte resistivitetssektionen i tolkningen af, hvad der er ler og sandlag (Gazoty et al., 2012; Maurya et al 2018). Indtil videre har chargeability-modelsektioner mest været anvendt i opstilling af geologiske modeller i forurenede områder. I forurenede områder kan en forureningsfane med lav porevandsmodstand medføre, at sandlag får lav resistivitet og ikke kan adskilles fra lerlag ud fra resistivitet-sektionerne. Det er derimod muligt ud fra opladningsevne-sektionerne, som ikke i samme grad påvirkes af forureningsfanens porevand med lav resistivitet (Maurya et al. 2018).



Figur 3-31: Eksempel på et DCIP profil (a, b) med tilhørende geologisk model (c), opmålt med 5 m elektrodeafstand og gradient-array protokoller. Data er inverteret med 2D modeller. Profilet er opmålt ved Grindsted Å i Grindsted. Udover 2D resistivitetsmodellen (a) og opladningsevne-sektionen (b) vises litologiske logs fra boringer (stave) og porevandsmodstanden målt på vandprøver (små farvekodede kasser) i alle tre sektioner. Fra Møller et al., 2017.

Det anbefales:

- at data fra de geoelektriske metoder kombineres med så mange andre datasæt som muligt
- at de geologiske tolkninger af de geoelektriske data sker på baggrund af nøje overvejelser omkring metodernes styrker og svagheder

3.2.4 Geofysiske borehulslogs

Geofysiske borehulslogs omfatter et meget vidt spænd af geofysiske målinger udført i borehuller. Metoden anvendes til at give information om litologiske, fysiske og/eller hydrogeologiske egenskaber i den enkelte borings umiddelbare nærhed eller information om boringens tekniske tilstand. I grundvandskortlægningen er borehulslogging således primært anvendt til litologisk tolkning, stratigrafisk korrelation, bestemmelse af vandkvalitet, kortlægning af porøsitet, sprækker og indstrømningsmønstre og korrelation med seismiske data (Vangkilde-Pedersen, 2010). I forbindelse med indvindings- eller undersøgelsesboringer kan borehulslogging bl.a. anvendes til verifikation af boringsudbygning og filtersætning, lokalisering af utætheder i forerør, tilstand af filter og forureningsudbredelse. Flere logs i et område kan anvendes til at opstille en log-stratigrafi.

I det følgende er der fokus på de mest anvendte logging-tools i grundvandssammenhænge. Mere dybtgående beskrivelser kan findes i Vangkilde-Pedersen (2010), Skov- og Naturstyrelsen (1987), Rider (1996), samt http://www.geus.dk/departments/hydrology/borehulslogging/logging-dk.htm.

Loggingmetoden
Borehulslogging kan enten udføres i forbindelse med boringens etablering eller i færdigudbyggede boringer. I forbindelse med boringens etablering logges i uforet borehul. Dette giver mulighed for anvendelse af en række loggingtools, der ellers vil blive påvirket af forskellige typer casing. Ved logging i uforede borehuller vil borehullet være fyldt med boremudder, hvilket påvirker nogle logtyper i større eller mindre grad. Formålet med at logge i uforede boringer kan være at indhente supplerende data om litologi og laggrænser, at indhente oplysninger til brug ved filtersætningen af boringen, eller at skaffe oplysninger om de gennemborede formationers seismiske hastigheder og modstandsforhold til brug i forbindelse med tolkning og kalibrering af overfladegeofysik.

Ved logging i færdigudbyggede boringer sætter boringsudbygningen en række begrænsninger for hvilke loggingtools, der kan anvendes, idet nogle tools ikke kan gennemtrænge plastik- og/eller stålrør. Til gengæld er borehullet fyldt med formationsvæske, hvorfor der også kan måles på væskens fysiske og kemiske egenskaber, ligesom der kan udføres flowlogs med henblik på at fremskaffe hydrauliske informationer om de vandførende og filtersatte lag. Formålet med at logge i færdigetablerede boringer kan være de samme som for boringer under etablering. Derudover kan der indsamles basal geologisk viden om boringer med ukendt geologi, og der kan som nævnt indsamles viden om formationsvæske og om magasiners hydrauliske egenskaber.

Logging-tools
I *Tabel **3-4*** ses en kort gennemgang af egenskaber og anvendelse for en række af de mest almindelige logtyper.

Tabel 3-4: Forskellige logtypers egenskaber og anvendelse.

Logtype	Egenskaber og anvendelse
Naturlig gamma	Med gammalog-toolet måles den naturlige gammastråling fra jordlagene. Den naturlige gammastråling kan måles gennem foring af både stål og plastik (dog vil signalet til en vis grad dæmpes). Den naturlige gammalog afspejler variationer i gammastrålingen fra de

	geologiske lag. Ler har en høj naturlig gammastråling, og ren sand og kalk har en lav naturlig gammastråling. Gammastråling fra boremudder eller fra boringsudbygning (f.eks. bentonitafpropninger) vil også måles med sonden. Gammaloggen benyttes til tolkning af geologi og til opstilling af logstratigrafi.
Naturlig spektral gamma	Med spektralgamma-toolet måles den naturlige gammastråling fra jordlagene. Der kan måles gennem foring af både stål og plastik. Toolet måler mængden af stråling, der stammer fra specifikke radioaktive grundstoffer i et jordlag i stedet for en samlet værdi for gammastrålingen fra alle radioaktive kilder i jordlagene. Den spektrale gammalog kan i nogle tilfælde give et bedre grundlag for en logstratigrafi end en almindelig naturlig gammalog, da målingen af flere, specifikke radioaktive grundstoffer nuancerer billedet af jordlagene, idet forskellige lertyper vil have forskelligt indhold af de målte grundstoffer. Ligesom for sonden, der måler den naturlige gammastråling, måler spektralgamma sonden også stråling fra boremudder eller fra boringsudbygning (f.eks. bentonitafpropninger).
Resistivitet	Resistivitetslogs kan kun udføres i uforede borehuller. Dog kan en fokuseret resistivitetslog i visse tilfælde give et billede af formationens resistivitet ved måling gennem filtrene i en filtersat boring. Resistivitetslogs vil være mere eller mindre påvirkede af boremudder, afhængigt af typen af resistivitetslog. Resistivitetslogs måler formationens elektriske modstand, og benyttes derfor til tolkning af geologi og til logstratigrafi. Der findes en række forskellige typer af resistivitets-loggingtools. Fokuseret resistivitetslog giver den bedste vertikale opløsning og den største indtrængningsdybde i formationen og er derfor mindre påvirket af boremudder end andre typer resistivitetslogs. Ved boringer udført med boremudder kan efterladte mudderkager være en kilde til fejlmålinger.
Induktion	Induktionsloggen kan anvendes i uforede huller og gennem foring med plastik. Beskriver formationens elektriske ledningsevne og har samme anvendelse som resistivitetslogs. Normalt har den dog en dårligere vertikal opløsning. Til gengæld har den fordelen af at kunne udføres i færdigudbyggede boringer med forerør af plastik. Hvis der forekommer stål i forerørssamlinger eller styr, giver det fejlsignaler. Desuden kan metoden måle i tørre lag over grundvandsspejlet.
Temperatur- og fluid resistivitet	Kan anvendes i åbne huller og i færdigudbyggede boringer. Ved logging i åbne huller måles på boremudderet. Målingerne kan benyttes i forbindelse med vurdering af resultaterne af resistivitetslogs og induktionslogs. Ved logging i færdigudbyggede boringer måles på formationsvæsken. Kan give et salinitetsprofil ned gennem boringen og kan i nogle tilfælde give indikationer om vandindstrømningens fordeling.
Porøsitet	Porøsitetsloggen måler ligesom naturlig gamma gennem foring af både stål og plast. Loggen måler formationens porøsitet og vandindhold. I lerede/sandede aflejringer benyttes de relative

	variationer i porøsitetsloggen til geologisk tolkning. Moræneler viser ofte en relativt lav porøsitet, sand en høj porøsitet, mens ler viser meget høje porøsitetsværdier. Porøsitetsloggen kan også benyttes til at kortlægge porøsitetsvariationer i f.eks. et kalkmagasin. Porøsitets-loggen er ikke en del af de standardprogrammer, som normalt udføres i forbindelse med grundvandsboringer.
Sonic log	Sonic-loggen måler forskelle i densitet og porøsitet, og der fås således information om laggrænser, porøsitet, formationsstyrke og elasticitet. Sonic loggen giver desuden information om lagenes seismiske hastigheder.
Caliper log	Loggen er udstyret med mekaniske arme, som måler borehullets diameter. Loggen kan anvendes i forbindelse med boringsudbygningen, vurdering af boringens tilstand og til måling af diametervariation i en ny, uforet boring. Oplysninger om diameteren af hullet er vigtige at have ved tolkning af flowlog i åbne boringer (se ”flowlog”). Også i forbindelse med f.eks. gammaloggen, kan det være vigtigt at kende borehullets diameter, da en stor diameter i boringen som følge af skred, kan betyde at signalet fra selve formationen bliver lavere end normalt.
Flowlog	Kan anvendes i færdigudbyggede boringer med åbenstående kalk eller i allerede udbyggede boringer med lange eller flere filtre. Flowloggen måler vertikale strømninger i borehullet. Ved logging uden pumpe måles det naturlige flow i boringen (drevet af potentialeforskelle mellem forskellige vandførende horisonter). Hvis boringen også logges med caliperlog (åbne huller i kalk) kan der beregnes indstrømning med korrektion for variationer i boringens diameter.

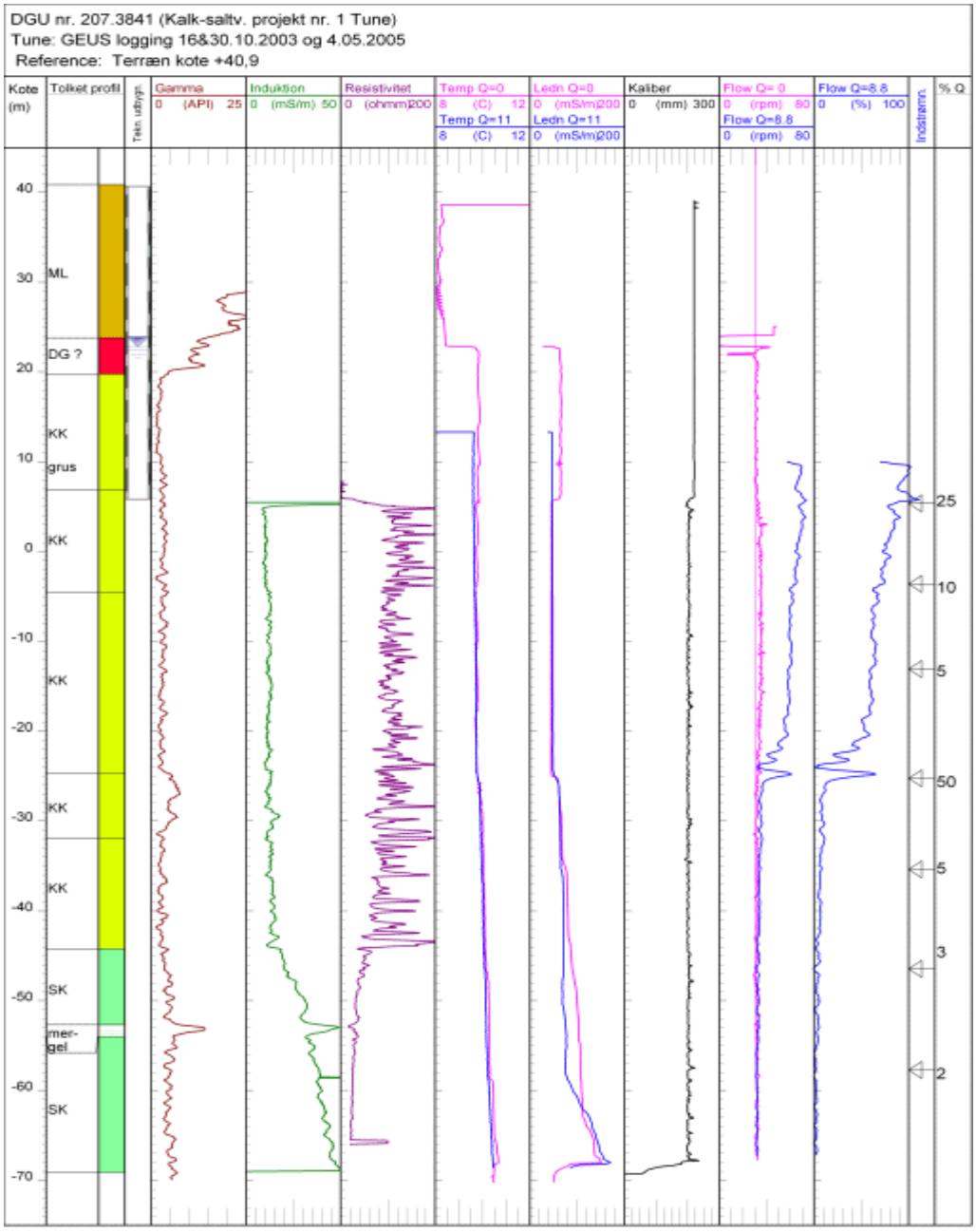
Ud over de ovennævnte logtyper udføres der en række andre typer geofysiske borehulslogs, f.eks. optisk/akustisk televiewer. Danske beskrivelser af en række loggingtyper findes f.eks. i Vangkilde-Pedersen (2010), Skov- og Naturstyrelsen (1987) og mere indgående beskrivelser findes f.eks. i Rider (1996).

Data

I GERDA-databasen (www.gerda.geus.dk) findes logdata på formatet LAS. Foruden borehulslogs målt i forbindelse med grundvandsrelaterede undersøgelser vil der kunne findes ikke-indberettede borehulslogs hos firmaer, myndigheder eller universiteter. Disse data kan enten være digitale (typisk LAS-format) eller analoge. I mange tilfælde ligger de analoge versioner i Jupiterdatabasen eller i Rapportdatabasen som PDF-filer

I forbindelse med udførelse af geofysisk borehulslogging er der en række kvalitetssikringsprocedurer, der bør følges. Hvis de geofysiske borehulslogs er fulgt af en datarapport, vil disse procedurer ofte være beskrevet. Til en del geofysiske borehulslogs findes der imidlertid ingen tilgængelig rapport, og vurderingen af loggingens kvalitet kan derfor være vanskelig. Det er vigtigt at have information om, hvordan loggingen er udført, specielt hvis man skal bruge eksakte målte værdier, eller hvis man skal

korrelere mellem logs af forskellig alder. Der bør derfor være oplysninger om tools (specifikationer), log-hastighed, datafiltrering, referencepunkt m.m.



Figur 3-32: Eksempel på geofysiske borehulslogs (fra www.gerda.geus.dk).

En oplagt fejlkilde i logs er placeringen af referencepunktet. Et forkert angivet referencepunkt kan forskyde logs systematisk. Denne fejl kan i mange tilfælde afsløres ved sammenligning med borejournaler.

Geofysiske borehulslogs optegnes normalt i et logoptegningsprogram. Sammen med de geofysiske logs optegnes normalt borejournal m.v. (se *Figur **3-32***).

Anvendelse i den geologiske model

I forbindelse med opstilling af en rumlig geologisk model, kan geofysiske borehulslogs bidrage med oplysninger om geologi, ikke alene i et punkt (boringen), men også i større områder (korrelation mellem flere boringer).

I den enkelte boring giver loggingen et værdifuldt supplement til informationen fra jordprøverne, og denne information kan i mange tilfælde være afgørende for forståelsen af lagseriens opbygning. Mange oplysninger kan trækkes ud af logs – ikke kun oplysninger om lagseriens inddeling - men også oplysninger om saltindhold, variationer i lerindhold og -type, tilstedeværelsen af tungsand, opad grovende eller opad finende sekvenser, laggrænsernes typer osv. Ofte er man nødt til at kombinere forskellige logs for at få den fulde historie om lagserien frem, og ofte er det i kombinationen med prøvebeskrivelserne, at der opnås det bedste billede af lagserien.

Har man flere boringer med logs i et område, er der åbnet op for muligheden for at korrelere mellem boringerne. Logmønstrene i de enkelte boringer kan sammenlignes fra boring til boring, og ved kombination med prøvebeskrivelser kan korrelationen gøres mere sikker. Dette øger sikkerheden af tolkningerne i den geologiske model, da der kan ses andre sammenhænge, end man umiddelbart har mulighed for at se i prøvebeskrivelserne. Logkorrelationen kan give mulighed for at se kornstørrelsesvariationer i et givent lag – såvel vertikalt som horisontalt. Eksempelvis kan lag med samme logmønster være korrelerbare, men laget kan være sandet mod vest og leret mod øst. Sådanne faciesvariationer vil sandsynligvis give en anden korrelation af lagene end foretaget på baggrund af prøvebeskrivelser alene. I *Figur **3-33*** ses et eksempel på en logstratigrafisk tolkning for nogle prækvartære bjergarter, der kun vanskeligt kan modelleres ud fra andre datatyper (Klitten, 2003), og i *Figur **3-34*** ses et eksempel for en kvartær lagserie, hvor borehulslogs bidrager til den samlede korrelation (Sandersen et al., 2009).

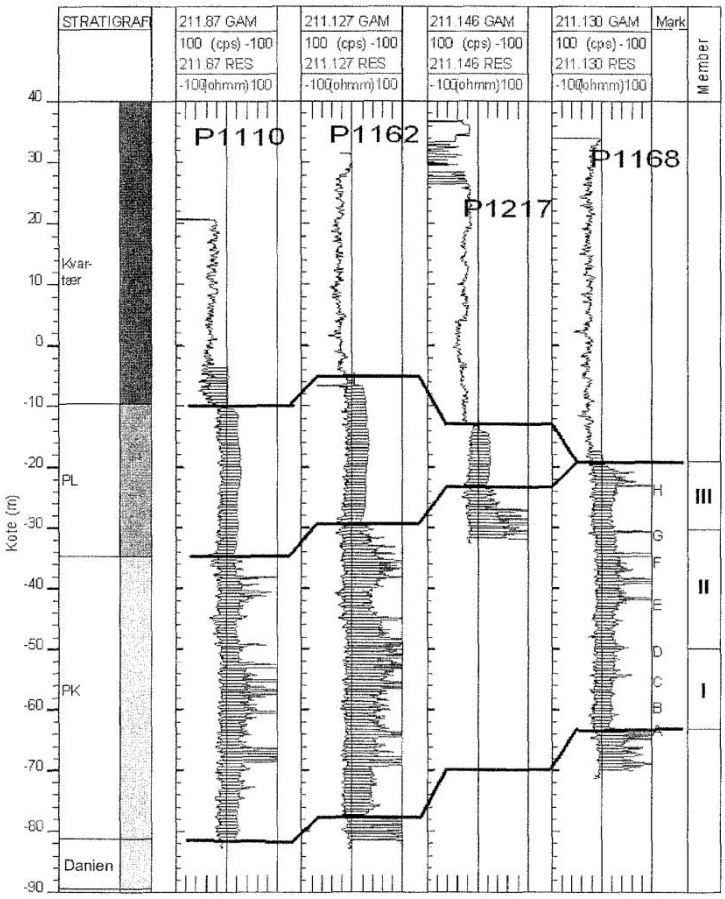
Ved opstilling af hydrostratigrafiske modeller kan geofysiske borehulslogs desuden bidrage med oplysninger om f.eks. indstrømningshorisonter i heterogene magasiner.

Data fra borehulslogging kan overordnet set anvendes ved de geologiske tolkninger på i hvert fald tre forskellige måder:

- Data kan tolkes udenfor det geologiske tolkningsprogram og der opstilles en resulterende ”pseudoboring” med tolkningsresultatet (se f.eks. *Figur **3-32***). Tolkningsresultatet vil normalt være et udtræk af de forskellige geofysiske logs, borejournalen og andre oplysninger. Den resulterende pseudoboring indlæses i det geologiske tolkningsprogram og benyttes i det videre arbejde med den geologiske model
- Borehulslogs fra de aktuelle boringer korreleres udenfor det geologiske tolkningsprogram (se f.eks. *Figur **3-33***), og korrelationen anvendes herefter som koncept for lagseriens opbygning ved de videre tolkninger af alle data i det geologiske tolkningsprogram
- De geofysiske borehulslogs importeres direkte i det geologiske tolkningsprogram og indgår i de samlede geologiske tolkninger

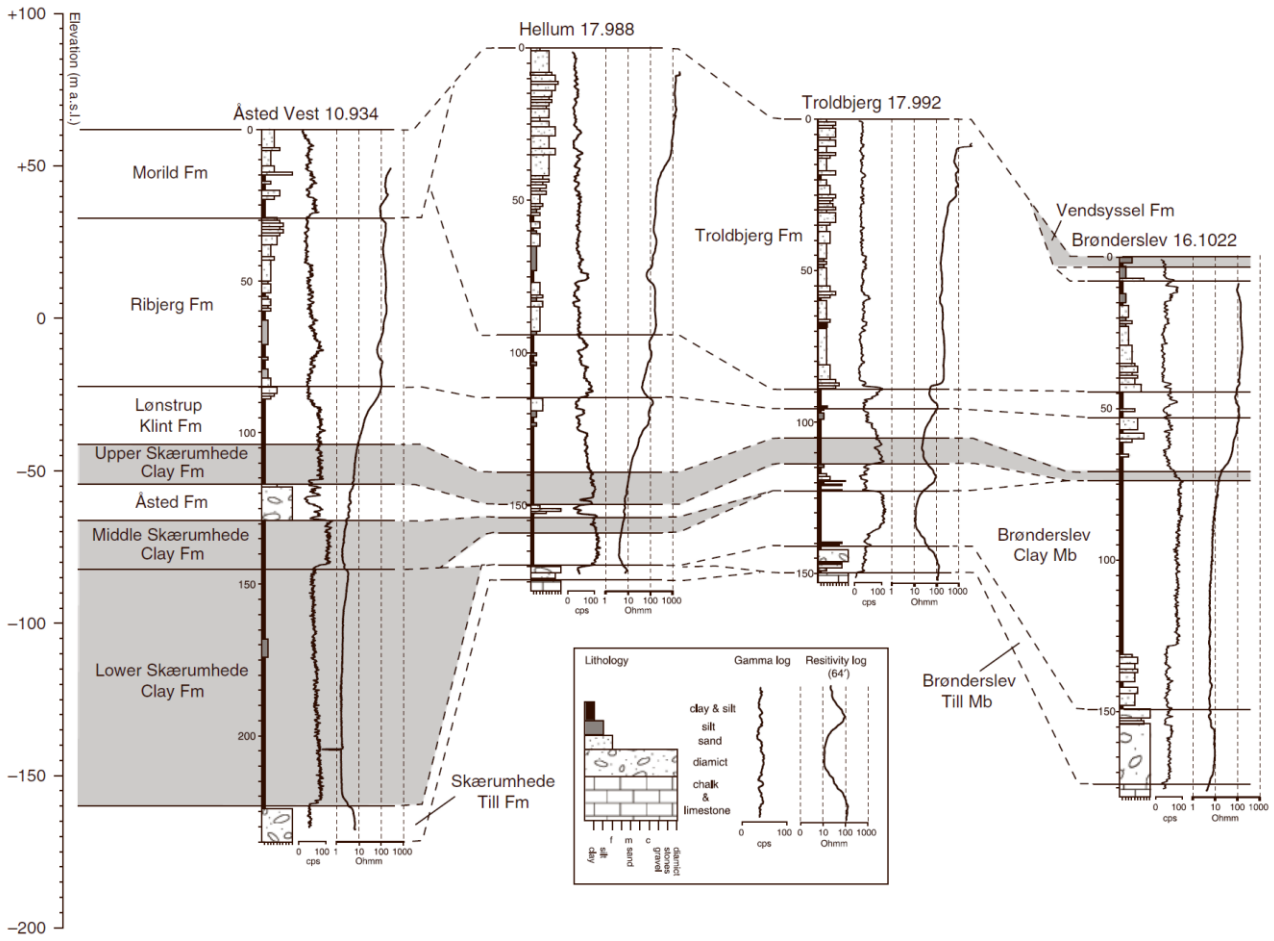
Hvilken af de ovennævnte fremgangsmåder for tolkning der konkret vælges, afhænger ofte af modellørens erfaringsbaserede præferencer, men det er vigtigt at sikre, at informationerne fra logdata

rent faktisk anvendes i de geologiske tolkninger – og dette kræver typisk tolkningsarbejde udenfor "det digitale rum".



Figur 3-33: Eksempel på logstratigrafisk tolkning af en prækvartær lagserie (fra Klitten, 2003).

Hvis der ved tolkningen af log-data viser sig belæg for en retolkning af den lagserie, som fremgår af den oprindelige borejournal, vil den resulterende "pseudoboring" nævnt under pkt. 1, skulle erstatte den eksisterende tolkning. Dette vil kræve en overskrivning af de oprindelige data for boringen i modellen samt en anmeldelse til GEUS' borearkiv for at få rettelsen til at indgå permanent i Jupiterdatabasen. Borehulslogs kan som nævnt i pkt. 3 importeres i GeoScene 3D, men hvis der er udført et omfattende loggingprogram, kan det være vanskeligt at overskue de mange borehulslogs i tolkningsprogrammet. Til gengæld sikres det, at grunddata er repræsenteret i det geologiske tolkningsprojekt, således at det er lettere at geninddrage logresultaterne i forbindelse med en senere opdatering af den geologiske model.



Figur 3-34: Eksempel på anvendelse af borehulslogs ved korrelation af boringer. Eksemplet er fra Vendsyssel og viser de tolkede formationer, litologi samt gamma- og resistivitetslogs (Sandersen et al., 2009).

Det anbefales:

- at de eksisterende borehulslogs kommer til at indgå som centrale data i de geologiske tolkninger - også selvom logs ikke hentes direkte ind i det digitale 3D tolkningsrum
- at mulighederne for korrelation mellem boringer baseret på borehulslogs prioriteres højt, da logs vil kunne vise variationer og sammenhænge i lagserien, som geofysiske data og boredata i øvrigt, ikke kan bidrage med
- at loggingdata anvendes til at se nærmere på de enkelte lags resistiviteter – f.eks. niveauer og variationer af samme – og derefter holde denne information op mod de øvrige data (eksempelvis TEM)

3.2.5 Andre geofysiske data

Foruden de nævnte geofysiske datatyper findes en række andre datatyper, som bliver benyttet mere sporadisk i grundvandskortlægningen. Disse omtales kort i dette afsnit.

Magnetisk Resonans Sondering (MRS)
Magnetisk resonans sondering (MRS) har været udført i grundvandskortlægningen siden midten af 00'erne (Nielsen et al., 2007). MRS metoden er en speciel elektromagnetisk metode, som anvender samme teknik som en hospitals-MNR-scanner (Behroozmand et al., 2014). Ved at påtrykke jorden med et magnetfelt med en bestemt frekvens, ændrer man spinnet på hydrogenatomerne i vandmolekylerne. Når det udsendte magnetfelt slukkes, vil hydrogenatomernes spin bevæge sig tilbage til den normale tilstand og samtidig udsende et signal, der kan registreres på jordoverfladen. Efter stakning og processering af dette signal kan man bl.a. estimere jordlagenes vandindhold. Der er også information om transmissivitet og permeabilitet, dog skal disse parametre kalibreres med prøvepumpningsdata eller slugtests. MRS målinger udføres som enkeltstående sonderinger og under normale forhold er det muligt at opnå information om jordlagenes vandindhold til en dybde på 80 m. Med nuværende udstyr er det muligt at udføre 1-2 sonderinger pr. dag. Der er indsamlet et par hundrede sonderinger i grundvandskortlægningen, som afventer en udbygning af GERDA-databasen inden de kan indberettes til denne.

Metoden er nærmere beskrevet i fx Behroozmand et al. (2014).

HEM
Ligesom TEM-metoden er HEM-metoden (Helicopter borne ElectroMagnetic) også en elektromagnetisk metode, men HEM-metoden anvender et frekvensdomænesystem i modsætning til TEM som anvender et tidsdomænesystem. Der måles således med forskellige frekvenser. Måleudstyret er placeret i en "bird", som svæver 35 - 60 m over terræn. Typisk bliver koblede sonderinger ikke frasorterede ved dataprocesseringen, og derfor er det den geologiske tolkers arbejde at fjerne/se bort fra koblede sonderinger. HEM-data i nærheden af veje, linjeføringer og andre elektriske installationer (100-150 meter) skal derfor betragtes som usikre, idet risikoen for kobling til disse kan være til stede. Indtrængningsdybden er under danske forhold normalt mellem 50 og 100 m (Christensen et al., 2002). Denne dybde er afhængig af lagseriens modstande, således at meget ler vil skærme af for indtrængningen, mens sand giver stor indtrængning.

Anvendelsen af HEM-metoden til grundvandskortlægning under danske forhold er blevet undersøgt i et samarbejde mellem en række amter, GEUS og Aarhus Universitet (Christensen et al., 2002). I Christensen et al. (2002) findes en teoretisk gennemgang samt en sammenligning med PACES, MEP og TEM, som viser, at den laterale opløsning er ringere end for PACES og MEP, og den vertikale opløsning samt dybdeindtrængning er ringere end TEM. Derudover er metoden meget følsom over for ændringer i flyvehøjden, og data skal tolkes med korrekt flyvehøjde for at undgå fejlagtige tolkninger af resistivitetsforholdene. Da metoden er luftbåret, kan der indsamles ca. 300 km profil pr. dag.

Figur 3-35: GCM system trukket efter en firehjulet motorcykel. Den ca. 4 m lange sensor er placeret i det hvide beskyttelsesrør, som er monteret på to slæder. En GPS antenne er placeret i forenden af røret over senderspolen. En datalogger og en computer, som styrer dataindsamlingen, er placeret på køretøjet. Fra Klint et al. (2017).

Ground Conductivity Meter (GCM)

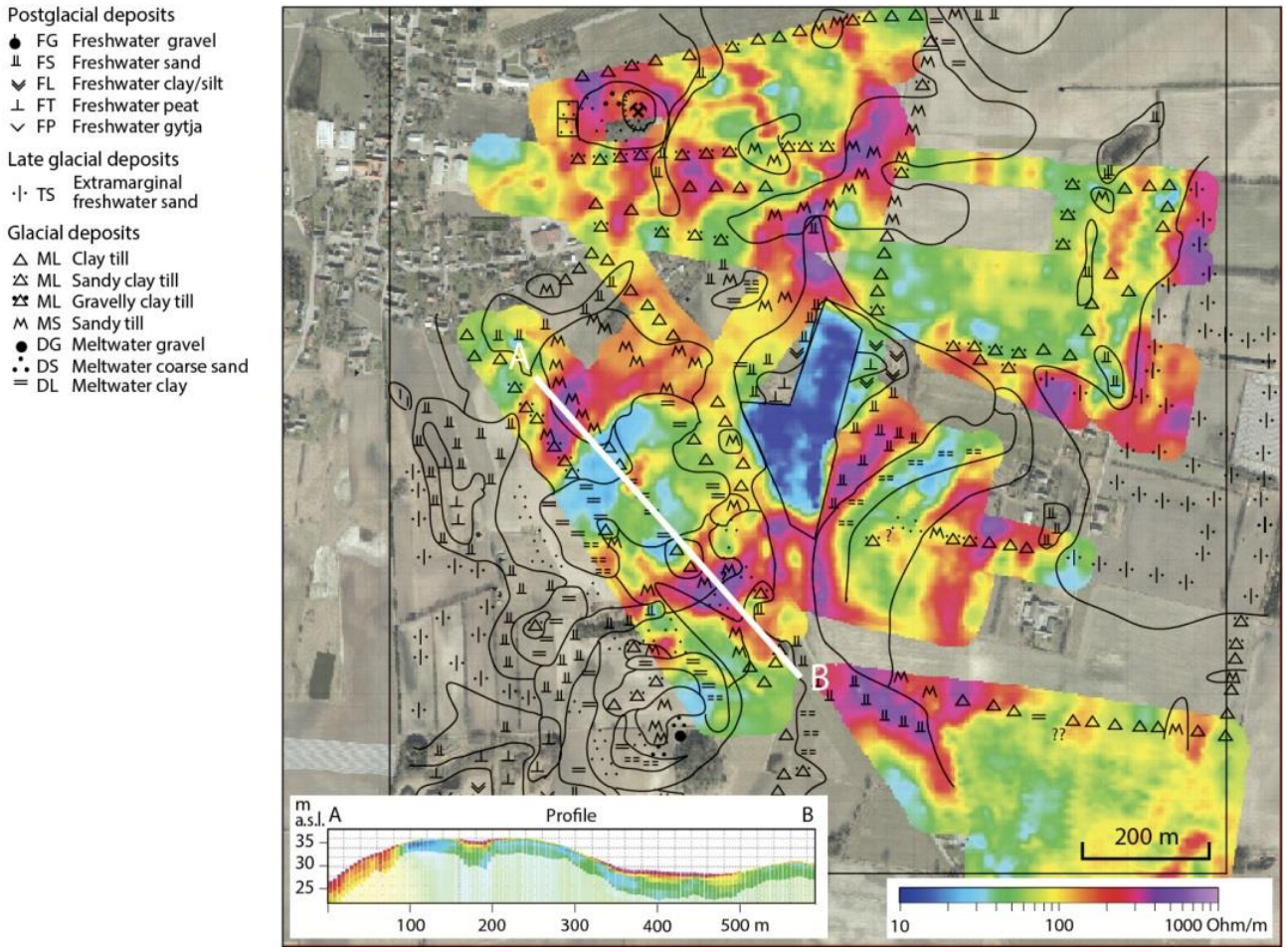
Ground conductivity meter, GCM (tidligere kaldet stangslingram, og i international litteratur Electromagnetic Induction, EMI) er små, let håndterbare frekvensdomæne elektromagnetiske instrumentsystemer (*Figur **3-35***). Disse kan være f.eks. EM38 og EM31 med en enkelt spolekonfiguration, der er anvendt inden for ler- og jordbundskortlægning, eller nyere systemer som DualEM21S og DualEM421S med henholdsvis 4 og 6 spole-konfigurationer. Der anvendes kun en frekvens. Man opnår det største udbytte af en GCM kortlægning, hvis data processeres og inverteres (Christiansen et al., 2016). DualEM421S systemet anvendes i mange sammenhænge til kortlægning af de øverste 5-8 m af jorden og kan give meget detaljeret information om de mest terrænnære geologiske strukturer (Christiansen et al., 2016; Frederiksen et al., 2017; Klint et al., 2017). *Figur **3-36*** viser et eksempel på en GCM kortlægning, hvor interval-resistivitetskortet for 1-2 meters dybde er sammenstillet med en detaljeret jordartskartering (Klint et al., 2017), Der er ikke indberettet GCM data til GERDA-databasen, men det er muligt.

Metoden er nærmere beskrevet i Christiansen et al. (2016) og Frederiksen et al. (2017).

Georadar

Georadarmetoden er en elektromagnetisk metode, som bygger på bølgeudbredelse og refleksion, og er derfor mere beslægtet med refleksionsseismik end elektromagnetiske induktionsmetoder. En georadar udsender elektromagnetiske bølger i jorden og registrerer signaler, som reflekteres fra laggrænser, hvor der er ændringer i dielektrisitetskonstanten. Under danske forhold er dielektrisitetskonstanten primært relateret til vandindhold og i mindre grad porøsitet. Derfor giver såkaldte radargrammer eller georadarprofiler kontinuerte profilsnit af f.eks. sedimentologiske strukturer langs de opmålte linjer.

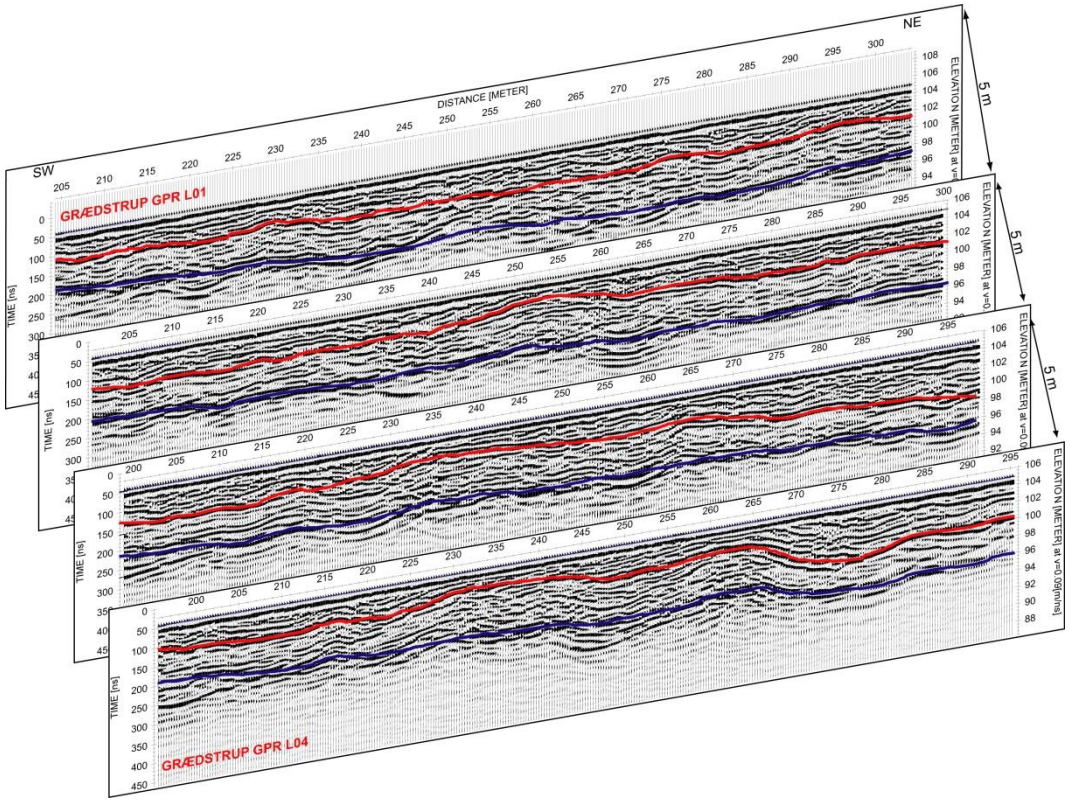
Metoden giver et meget detaljeret billede af jordens strukturelle opbygning og heraf kan aflejringsmiljøer ofte tolkes (se *Figur **3-37***). Ulempen ved metoden er, at den ikke kan gennemtrænge lerede lag, og at indtrængningsdybden er begrænset. Metoden er nærmere beskrevet i Møller (2006[1]).



Figur 3-36: Eksempel på GCM kortlægning ved Pillemark på Samsø. Interval-resistiviteten i 1-2 meters dybde er vist på kortet sammen med et profilsnit. I samme område er der udført jordartskartering og resultatet er markeret med karteringssymboler på kortet. Fra Klint et al. (2017).

Ellog-boring

Ellog-boring er en metode, der kan måle direkte på de gennemborede lag under borearbejdet. Tool'et til måling af den elektriske formationsmodstand er monteret på en hul boresnegl, og gammatool'et er monteret inden i denne. Metoden giver også mulighed for at udtage vandprøver i forskellige dybder ved hjælp af en indbygget mekanisme i boreudstyret. Således kan en eventuel vandkemisk lagdeling i grundvandsmagasinet kortlægges. Elloggen registrerer de gennemborede lags elektriske modstand med intervaller på få cm. Under optimale forhold har det været muligt at bore til ca. 80 m dybde. Ellog-metoden er udviklet ved Geofysisk Afdeling, Århus Universitet (Sørensen, 1989; Skov- og Naturstyrelsen, 1989). I 2015 er Ellog-udstyret blevet renoveret og udvidet til også at udføre DCIP målinger (Auken et al., 2016). Det nye udstyr har p.t. en maksimal boredybde på 30 m.



Figur 3-37: Eksempel på georadarprofiler. Her er 4 georadarlinjer placeret med en afstand på 5 m. To markante refleksioner er tegnet op på profilerne. Fra Møller (20062).

Gravimetri

Med den gravimetriske metode måles anomalier i jordens tyngdefelt. Metoden har vist sig brugbar ved især kortlægning af storskala-strukturer som begravede dale og saltstrukturer. En nærmere beskrivelse af metoden og dens resultater kan findes i Thomsen & Gabriel (2006). Gravimetriske undersøgelser har kun fundet marginal anvendelse indenfor grundvandskortlægningen, dog findes enkelte eksempler (Poulsen & Christensen, 1999). Den begrænsede anvendelse skyldes, at andre fladedækkende datatyper såsom TEM har været foretrukket på grund af større rumlig opløsning af geologien.

Det anbefales:

- at data indsamlet med de ovennævnte metoder ikke prioriteres lavt, fordi de enten ikke direkte kan importeres i GeoScene 3D eller fordi de kun dækker en mindre del af lagserien eller et mindre areal. Disse data kan bidrage med information, som ikke nødvendigvis kan fås fra andre geofysiske metoder

3.3 Andre data

3.3.1 Hydrologiske data

En række forskellige typer af hydrologiske data kan bidrage med vigtige informationer til den geologiske model. De hydrologiske data kan give oplysninger om grundvandsressourcens tilgængelighed, størrelse og kvalitet, samt oplysninger om, hvordan grundvandet strømmer i jordlagene. De hydrologiske data kan opfattes som en slags støttedata, som særligt i kombination med de geologiske data kan være værdifulde indikatorer på mulige sammenhænge i den rumlige geologiske og hydrostratigrafiske opbygning.

Data
Typiske hydrologiske data og tolkninger, der kan nyttiggøres i forbindelse med den geologiske modellering omfatter:

- Pejledata og potentialekort
- Prøvepumpnings- og renpumpningsdata
- Transmissivitetsdata og –kort
- Dateringer af grundvand

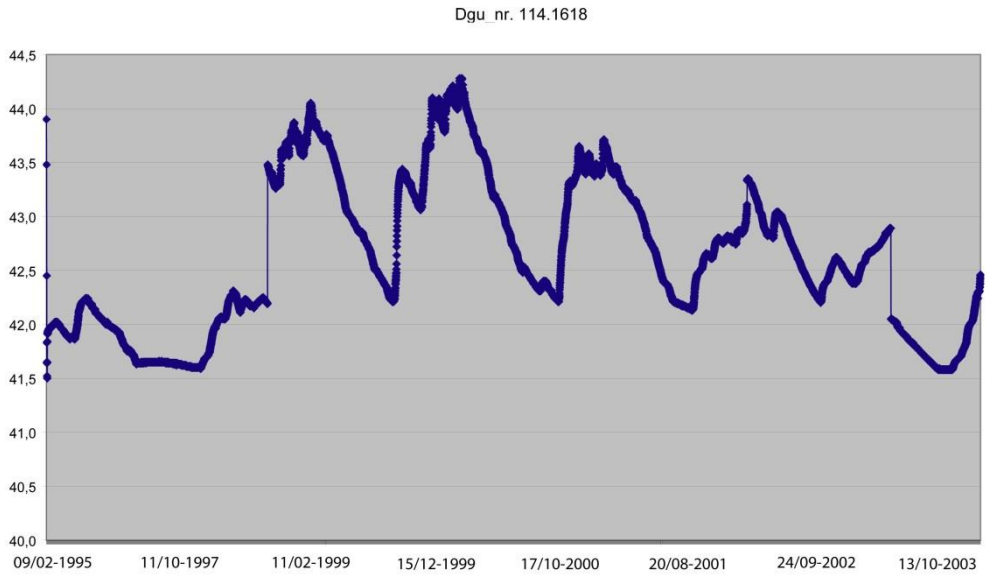
Pejledata og potentialekort
Kilder til pejledata og potentialekort, samt faktorer man bør være opmærksom på ved brugen af disse data, er samlet i *Tabel **3-5***.

Tabel 3-5: Kilder til pejledata og potentialekort.

Kilder til pejledata	**Hvad skal man være opmærksom på ved brug af pejledata?**
• Jupiter • Tidsserier fra vandforsyninger m.fl. • Pejledata fra dataloggere indsamlet af vandforsyninger og Miljøstyrelsen	• Datakontrol – indmåling (GPS, nivellement), pejlepunkt og grundvandsspejl (nedstik og kote) • Filtersætning – hvilket magasin repræsenterer pejlingen? • Tidspunkt for pejling – problemer med nærtliggende oppumpning, lufttrykspåvirkninger, årstidsvariationer og årsvariationer? • Findes der hydrauliske data (T-værdier) og andet, der kan understøtte en tolkning af pejledata?

Kilder til potentialekort	**Hvad skal man være opmærksom på ved brug af potentialekort?**
• Kort fra Miljøstyrelsen, kommuner, regioner og GEUS • Kort fra vandforsyninger • Aktive potentialekort • Synkronpejlerunder • Udtræk fra grundvandsmodeller	• Repræsenterer kortet ét magasin eller stammer det fra flere magasiner? • Er potentialekortet lavet på baggrund af synkronmålinger? Hvis ikke – hvad er der så gjort for at kompensere for årstids- og årsvariationer? • Er tolkningen af pejlekortet understøttet af hydrauliske data?

Det er vigtigt at være opmærksom på, hvilke usikkerheder der er på pejledata, når der udarbejdes potentialekort baseret på data fra store tidsintervaller og fra forskellige årstider.



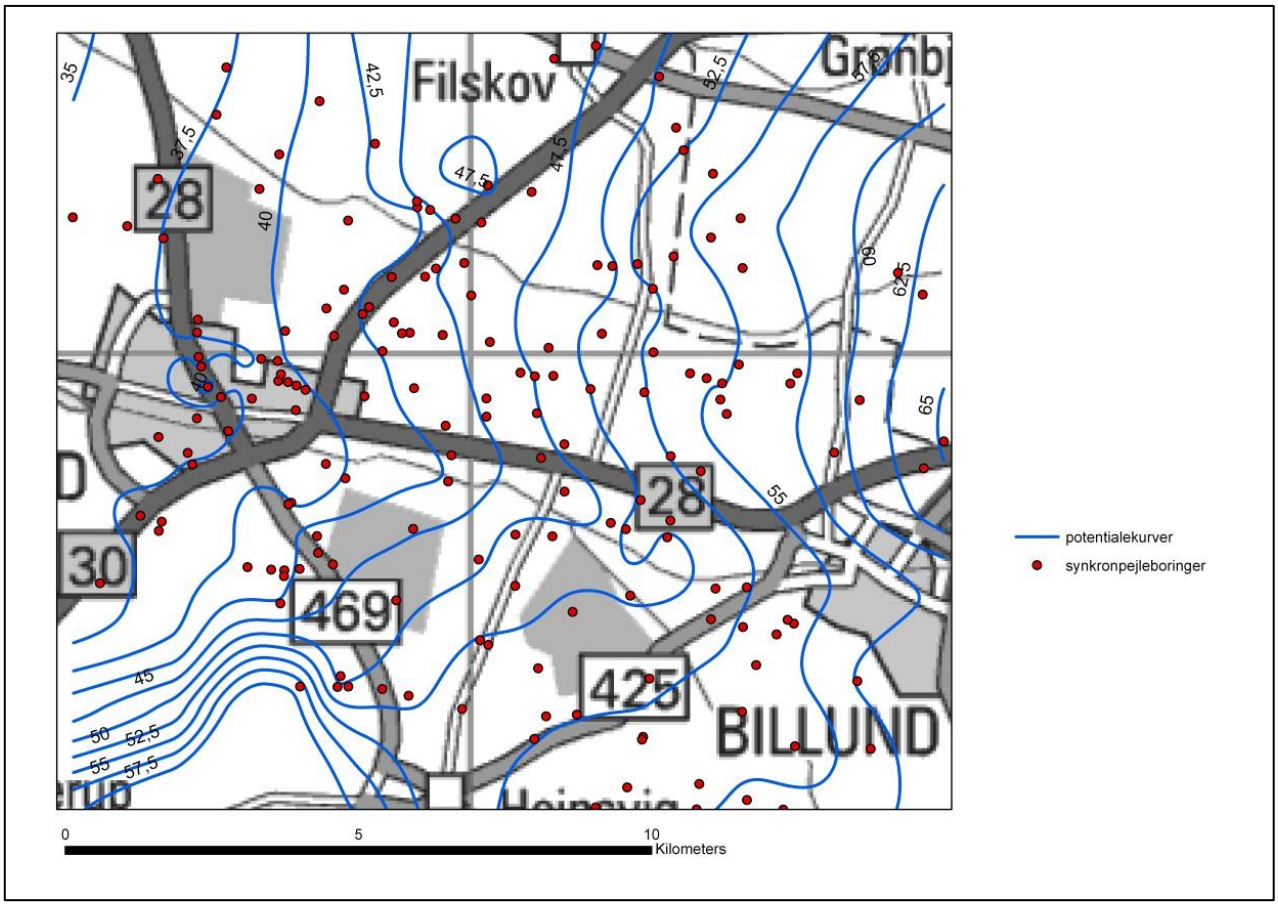
Figur 3-38: Eksempel på pejletidsserie fra boring nær Grindsted (eksemplet er modificeret fra Ribe Amt (2006[1]).

I *Figur **3-38*** ses en pejletidsserie opsamlet fra en datalogger i en boring. Der ses store årlige vandstandsvariationer (i dette tilfælde ca. 2 meter). Over en længere årrække (10 år) kan variationen være større (i dette tilfælde ca. 3 meter). Vandspejlet er ofte kraftigt påvirket af oppumpning, og dette forhold skal derfor tages i betragtning ved brug af pejledata i modelarbejdet.

Tabel 3-6: Kilder til prøvepumpningsdata og transmissivitetskort.

Kilder til prøvepumpnings- og renpumpningsdata:	**Hvad skal man være opmærksom på ved brug af prøvepumpnings og renpumpningsdata?**
• Jupiterdatabasen • Prøvepumpningsforsøg fra Miljøstyrelsen, regioner, vandforsyninger m.fl. (rapporter og logger-data). • Rådgivere	• Datakontrol – indmåling (GPS, nivellement), pejlepunkt og grundvandsspejl (nedstik og kote) • Filtersætning – hvilket magasin er pumpningen udført i? • Tidspunkt for pumpningen – problemer med lufttrykspåvirkninger, årstidsvariationer og årsvariationer? • Placering og afstand mellem pumpeboring og observationsboringer • Evt. pejleprogram i sammenhæng med prøvepumpning

Kilder til transmissivitetskort	**Hvad skal man være opmærksom på ved brug af transmissivitetskort?**
• Kort fra Miljøstyrelsen og GEUS • Kort fra vandforsyninger • Kort udarbejdet i forbindelse med anlægsprojekter	• Repræsenterer kortet ét magasin eller er det en blanding af flere magasiner? • Er transmissivitetskortet lavet på baggrund af prøvepumpnings- eller renpumpningsdata.



Figur 3-39: Potentialekort lavet ud fra synkronpejlinger (eksemplet stammer fra Ribe Amt (2006[2]).

*Figur **3-39*** viser et potentialekort lavet ud fra synkronpejlinger opmålt i maj 2005 (Ribe Amt, 2006[2]). Pejlingerne er hovedsagelig foretaget i markvandingsboringer før vandingssæsonen starter. Der ses et jævnt faldende potentiale mod nordvest, hvilket kunne tyde på, at boringerne er filtersat i samme lag, eller i hvert fald i lag med hydraulisk kontakt. Mod sydvest ses dog nogle uregelmæssigheder, som muligvis viser, at boringerne her er filtersat i et andet lag eller i et lag uden hydraulisk kontakt med det øvrige område. Disse informationer kan benyttes ved opstillingen af en geologisk model over området.

Prøvepumpnings- og renpumpningsdata samt transmissivitetskort

Kilder til prøvepumpningsdata og transmissivitetskort, samt faktorer man bør være opmærksom på ved brugen af disse data er samlet i *Tabel **3-6***. Prøvepumpnings- og renpumpningsdata fra boringens etablering kan i mange tilfælde findes i Jupiterdatabasen, men generelt forventes det, at mange prøvepumpnings- og renpumpningsdata fra vandforsyningsboringer findes i arkiver lokalt hos f.eks. vandforsyninger og derfor ikke vil være umiddelbart tilgængelige. Prøvepumpningsrapporter vil eventuelt kunne findes i Rapportdatabasen.

Renpumpningsdata stammer fra pumpning umiddelbart efter boringens udførelse og adskiller sig fra en prøvepumpning ved at have en kortere varighed. Ofte pejles samtidigt i andre filtre i boringen. Data fra en renpumpning fortæller kun om forhold lige omkring boringen. Data fra renpumpninger kan findes i Jupiter.

Prøvepumpning, der udføres over lang tid, kan give oplysninger om strømningsforhold i grundvandsmagasinet. Ved en prøvepumpning kan der måles på ændringer i vandspejlet i pumpeboringen og andre boringer i området. Derved kan magasinets ydeevne og til dels udstrækningen af magasinet vurderes. Prøvepumpning kan endvidere give viden om, hvorvidt der er kontakt mellem magasinerne.

Boringsoplysninger kan suppleres med en prøvepumpning for at få et mere præcist billede af grundvandsmagasinet og deres hydrauliske egenskaber.

Den hydrauliske ledningsevne varierer meget fra lag til lag. Sand og grus har generelt høje hydrauliske ledningsevner, hvorimod silt og ler har lave hydrauliske ledningsevner (Bai, 2014). Transmissiviteten er et udtryk for den integrerede hydrauliske ledningsevne over hele lagets tykkelse. Ved langtidsprøvepumpninger fås transmissivitetsværdier, der repræsenterer et større område end der fås ved renpumpning. Derfor er disse langtidsprøvepumpninger mere anvendelige i forbindelse med geologisk modellering.

Datering af grundvand

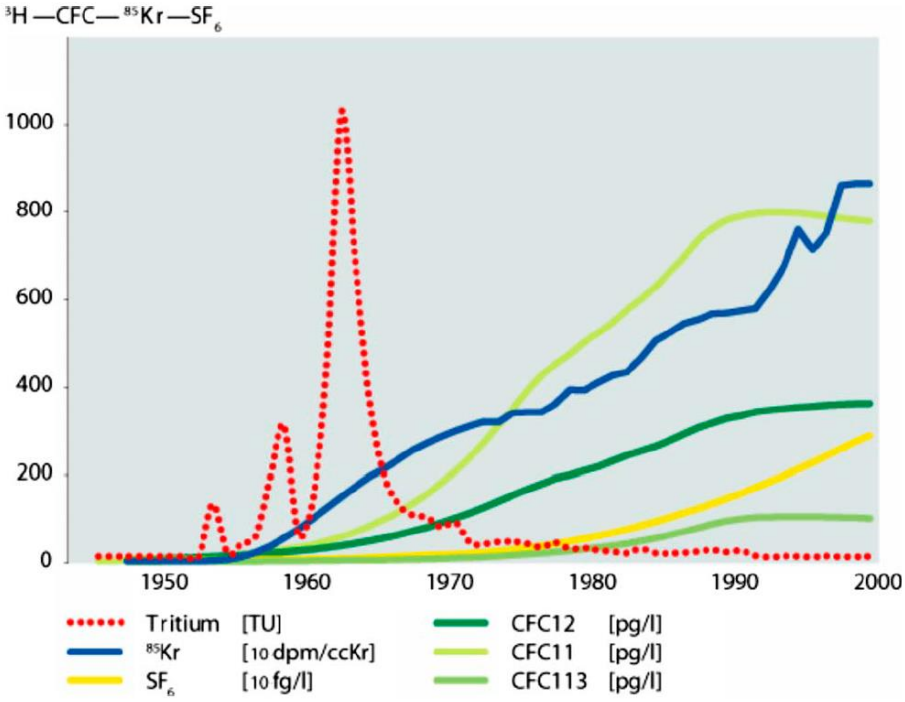
Grundvandets strømningshastighed gennem jordlagene varierer og en god måde at undersøge strømningshastigheden, er ved at datere grundvandet. Grundvandets alder er det tidsrum grundvandet har opholdt sig i magasinet, siden det faldt som nedbør (Hinsby, 2001).

Der findes en række metoder til datering af grundvand, hvor de enkelte metoder dækker forskellige tidsperioder/grundvandsaldre. Det yngste vand vil kunne være påvirket af menneskelige aktiviteter, og her kan sporstoffer i atmosfæren anvendes til datering af grundvandet. *Figur **3-40*** viser koncentrationsudviklingen af sporstoffer i atmosfæren siden 1950, hvor der mellem 1950 og 1970 var forhøjede koncentrationer af isotoper relateret til atomprøvesprængninger (fx ^{3}H/Tritium), mens der siden 60'erne har været en stigning i isotoper relateret til atomkraftværker (^{85}Kr) samt CFC- og SF_6-gasser anvendt i industrien (Hinsby, 2001; Troldborg et al., 2008). Disse stoffer optages i regnen og ender i grundvandet – dog i meget små koncentrationer. Men indholdet er stort nok til, at en given grundvandsprøves indhold af isotoper kan muliggøre bestemmelse af vandets alder, såfremt det er dannet efter 1950. Da grundvandets strømning i jordlagene typisk er meget kompleks vil alderen af grundvandet dog som regel være udtrykt som en aldersdistribution snarere end en eksakt alder (Troldborg et al., 2008; IAEA, 2013).

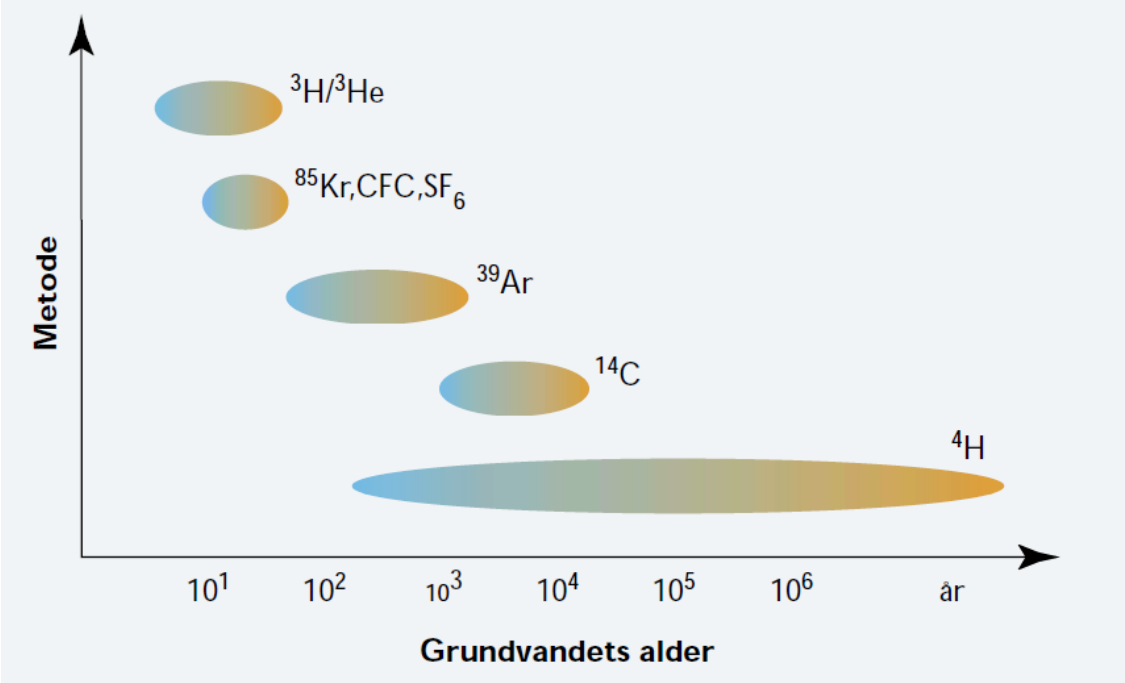
Er grundvandet ældre end ca. 1950, så vil de ovenfor nævnte isotoper ikke findes i grundvandet, med mindre der er sket en opblanding med yngre vand. Ved aldersbestemmelse af ældre vand (ældre end 70 år) er det nødvendigt at bruge andre metoder, som fx ^{14}C eller ^{39}Ar (*Figur **3-41***).

Miljøfremmede stoffer, såsom pesticider, kan bruges som en indikator for alderen af grundvandet, da mange stoffer har kendte tidsperioder for anvendelse (se f.eks. Rügge et al. 2005).

Meget grundvand i Danmark er ungt, med en alder på op til 50 år, men visse steder indvindes grundvand, som er nogle hundrede år gammelt – eksempelvis ved Tørskind og Kolding, hvor der indvindes grundvand med en alder på godt 300 år (se også Hinsby, 2001).



Figur 3-40: Koncentrationsudvikling af sporstoffer i atmosfæren. Fra Troldborg et al. (2008).



Figur 3-41: Sporstoffer, som kan anvendes til datering af grundvand med en alder på op til 1 million år. Fra Hinsby (2001).

Anvendelse ved geologisk modellering

Hydrologiske data kan med fordel anvendes ved den geologiske modellering. I områder hvor geologiske og geofysiske data ikke giver tilstrækkelig viden om sammenhæng mellem lagene, kan de hydrologiske data kan højne forståelsen af geologiske og hydrostratigrafiske forhold. De hydrologiske data kan give fingerpeg omkring de hydrauliske forhold og indbyrdes sammenhænge mellem boringer. De hydrologiske data giver indirekte informationer, som skal tolkes med forsigtighed, når de bruges til at sammenbinde lag i modelopstillingen.

Ved anvendelsen af potentialekort i tolkningsarbejdet kan der tages udgangspunkt i kurvebilledets udseende (Sørensen & Nielsen, 2014). I det følgende gives nogle eksempler på dette:

- Hvis potentialekurverne viser et "dalstrøg", der ikke findes i terrænoverfladen, vil dette typisk være tegn på, at der i dette strøg findes jordlag med relativ stor hydraulisk ledningsevne, f.eks. sand eller grus, eller at der pejles i forskellige magasiner.
- Hvis der generelt er en lille gradient og der ses et roligt forløb af kurverne, tyder det på udbredte, sammenhængende jordlag med god hydraulisk ledningsevne.
- Stor gradient tyder på forekomst af jordlag med lille hydraulisk ledningsevne, idet der her sker en opstuvning af vandet med et stort tryktab over kort afstand til følge. Det kan også vise at boringerne er filtersat i forskellige lag.
- Et meget uroligt potentialebillede kan indikere forekomst af komplekst opbyggede jordlag, som hydraulisk set ikke er sammenhængende.

I det følgende gives nogle eksempler på anvendelse af pumpeforsøg og transmissivitetsværdier:

- Påvirkning af observationsboringer viser, at der er hydraulisk kontakt mellem pumpeboringen observationsboringerne.
- Observationsboringer, der ikke påvirkes af pumpningen, indikerer en afgrænset udbredelse af magasinet.
- Observationspejlinger i flere filtre i pumpeboringen giver informationer om de vertikale, boringsnære hydrauliske sammenhænge.
- Variationer i transmissiviteten er styret af magasinets tykkelse og lithologi. Hvis transmissiviteten er kendt, kan tykkelse/lithologi til en vis grad estimeres.

Aldersdateringer af grundvand kan bruges i forbindelse med:

- Validering af den geologiske/hydrostratigrafiske model (magasinsammenhænge, magasinafgrænsninger mv.)
- Vurdering af risiko for grundvandsforurening af et givent magasin
- Hydrologiske modeller, hvor grundvandets strømning i grundvandsmagasinet beregnes. Aldersbestemmelser af grundvandet kan udgøre vigtige data til validering af modelberegninger

Det anbefales:

- at hydrologiske data ikke kun anvendes i forbindelse med den hydrostratigrafiske model, men også ved den rumlige geologiske modellering, da data eksempelvis kan bidrage med information om lagsammenhænge, afgrænsninger af sand/gruslag og tilstedeværelse af større strukturer

3.3.2 Kemiske data (grundvands- og sedimentkemi)

Kemiske data indgår i geologiske modeller som støttedata (Hansen & Thorling, 2018). De kan ikke bruges direkte til fastsættelse af geologiske laggrænser, men til gengæld give indikationer på f.eks. udbredelse og tykkelse af dækkende lerlag, tilstedeværelse af huller i dæklaget, magasinsammenhænge og på grundvandsgennemstrømning.

Erfaringen fra grundvandskortlægningen viser, at der er et stort potentiale i at udnytte grundvands- og sedimentkemiske data ved opstilling af geologiske og hydrologiske modeller. I Geo-vejledningen om Kemisk grundvandskortlægning findes en gennemgang af arbejdsgang, dataindsamling og –håndtering, visualisering og samtolkning med andre data (Hansen & Thorling, 2018). I nærværende Geo-vejledning fokuseres der i stedet på den praktiske anvendelse af de kemiske data med fokus på den geologiske og hydrostratigrafiske modellering. For en mere detaljeret gennemgang henvises til Geo-vejledningen kemisk grundvandskortlægning og referencerne her i.

I det følgende vil der vises eksempler på hvordan kemiske data hidtil er blevet anvendt i opstillingen af geologiske modeller.

Data

Data indlægges af GEUS i Jupiterdatabasen, eller ved direkte, eksternt upload til databasen af kommuner, regioner, Miljøministeriet, laboratorier m.fl. De grundvandskemiske data kan udtrækkes fra Jupiterdatabasen og viderebearbejdes, eller data kan visualiseres direkte i en web-browser (se *Figur 3-42*). Herudover søges der normalt efter supplerende grundvandskemiske data fra kommuner, vandværker, regioner m.fl. - typisk fra projekter, hvor der ikke har været indberetningspligt.

Sedimentkemiske data kan i nogle tilfælde findes som supplerende information i Jupiterdatabasen, men som oftest vil der ved den geologiske modellering være tale om anvendelse af nyindsamlede data eller data, som kun findes i regneark og databaser hos rekvirenterne. Grundvands- og sedimentkemiske data er sjældent jævnt fordelt i et område - hverken i tid eller rum. Der er typisk en forholdsvis lille tæthed af de grundvandskemiske data, og der er sjældent udtaget vandprøver fra alle boringer i et område.

De grundvands- og sedimentkemiske data gennemgår en kvalitetssikring af både prøvetager, laboratorie og af rekvirent (kommune, vandværk, rådgiver mv.) inden de indlægges i Jupiter-databasen, jf. Dataansvarsaftalen (Dataansvarsaftalen, 2007). Dog vil der altid kunne være fejl i databasen, som måske først opdages, når data tolkes f.eks. i forbindelse med grundvandskemisk kortlægning eller ved opstilling af geologiske modeller.

Visualisering af kemiske data kan gøres på mange måder, afhængigt af formålet og de til rådighed værende data – se Geo-vejledning om kemisk grundvandskortlægning (Hansen & Thorling, 2018).

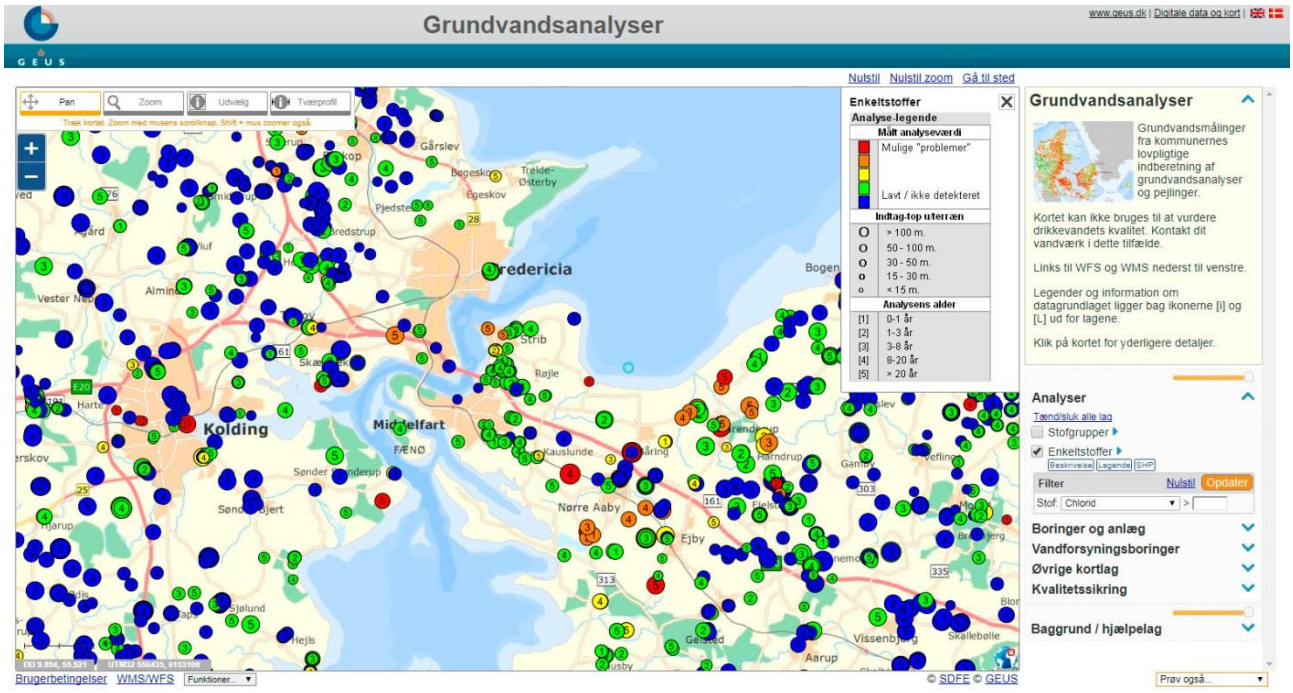
Anvendelse af kemiske data ved den geologiske/hydrostratigrafiske modellering

Lerdæklagets udbredelse og redoxgrænsens beliggenhed

Jordlagenes evne til at fjerne nitrat afhænger af indholdet af reducerende stoffer såsom pyrit, jern og organisk stof. I gennemiltede lag, som findes tæt ved jordoverfladen, findes der ikke længere reducerende stoffer, som kan fjerne nitrat. Grænsen mellem øvre, nitratholdige jordlag og dybere, reducerede og

nitratfrie jordlag kaldes redoxgrænsen. Redoxgrænsen bevæger sig langsomt nedad efterhånden som de reducerende stoffer, der kan fjerne nitrat, opbruges i jordlagene. Beliggenheden af redoxgrænsen er afhængig af lerdæklagstykkelsen, heterogeniteten i de overfladenære lag, indholdet af nitratreducerende stoffer samt iltningsgraden af sedimentet.

Et af formålene med anvendelse af grundvands- og sedimentkemiske data i forbindelse med opstilling af geologiske modeller er, at identificere og verificere lerlagsgrænser og variationer i lerets udbredelse i de øverste jordlag. Forudsætningen for at kunne bruge kemiske data i den sammenhæng er, at der kan findes en sammenhæng mellem nedtrængningsdybden af nitrat i grundvandet og tykkelsen af de beskyttende lerdæklag. Hvis denne sammenhæng kan påvises, er der mulighed for identifikation af f.eks. huller i lerdæklaget, dvs. steder hvor leret ikke er sammenhængende, og hvor der i stedet for ler findes permeable, sandede områder ved jordoverfladen og hydraulisk kontakt nedadtil. Anvendelse af de kemiske data kan derfor være et vigtigt element i udpegningen af de dele af modelområdet, hvor dækkende lerlag er tynde eller usammenhængende og grundvandet dermed er sårbart over for nitrat.



Figur 3-42: Visualisering af klorid-data i Jupiter (www.geus.dk)

Redoxforholdene

Kemiske analyser af nitrat, ilt og sulfat kan anvendes til bestemmelse af redoxvandtypen, jf. Hansen & Thorling (2018), *Tabel **3-7***.

Ved tolkning af profilsnit i den geologiske/hydrogeologiske model kan vandtyperne visualiseres på boringerne i den dybde, som vandanalysen stammer fra. Derved kan kemiske oplysninger sammenstilles med lerlagstykkelser i de øvre jordlag. Stoffer der er specielt følsomme overfor redoxforholdene er f.eks. nitrat, nitrit, ilt og sulfat. Stigende sulfatkoncentrationer kan skyldes pyritoxidation og er en indikation på risiko for gennemslag af nitrat.

Tabel 3-7: Oversigt over typiske koncentrationer af redoxaktive kemiske stoffer i grundvandet (fra Hansen & Thorling, 2018).

Zone	Ilt	Nitrat	Nitrit	Mangan	Jern	Sulfat	Sulfid	Metan
Iltet ***Vandtype A***	3-10	1-150	<0,01	<0,3	<0,1	10-70	<0,05	<0,05
Anoxisk nitratreducerende ***Vandtype B***	<3	1-150	0,01-1	0,1-2	<0,1	20-150	<0,05	<0,05
Svagt reduceret ***Vandtype C***	<3	<1	<0,01	0,1-2	0,1-5	20-400	0,01-5	0,01-5
Stærkt reduceret ***Vandtype D***	<3	<1	<0,01	0,1-2	0,1-5	0-20	0,01-5	0,01-5

På samme vis kan oplysninger om sedimenternes farveskift ud fra brøndborebeskrivelser indsættes på boringerne i profilsnit og dermed bidrage til tolkningen af lertykkelsen og beskyttelsesgraden af grundvandsmagasninet f.eks. nitratsårbarheden. Sedimenternes farve og farveskift med dybden afspejler beliggenheden af redox-fronter. Jordlag med "røde", "gulbrune", "olivenbrune" og lignende farver henføres til den oxiderede zone, mens jordlag med "grå", "gråbrune", "olivengrå", "sorte" eller lignende farver tolkes som tilhørende den reducerede zone.

Med hensyn til farvebeskrivelserne af sedimentprøver fra boringer, har disse data ofte samme tæthed som de geologiske data, som stammer fra boringsoplysninger. Kvaliteten af farvebeskrivelserne kan være svingende, hvilket kan skyldes, at formålet med boringerne og beskrivelserne har været forskellig fra boring til boring, samt at farvebestemmelserne er subjektive. Ofte ses det på farvebeskrivelserne, at oprindeligt reducerede prøver er iltede, inden prøverne beskrives af GEUS. Derfor er det vigtigt, at tillægge brøndborerens (og boretilsynet ved undersøgelsesboringer) større vægt end f.eks. GEUS farvebeskrivelser, som kan være foretaget flere år efter, at prøven er udtaget. Det er også vigtigt at være opmærksom på, at redoxgrænsens beliggenhed kan have ændret sig siden boringerne blev udført. Dette kan være tilfældet ved kraftig indvinding med store sænkninger på grundvandsspejlet, som kan resultere i dannelse af en sænkningstragt på redoxgrænsen på grund af øget omsætning af pyrit (Bay et al. 2004).

Ionbytningsgraden

Ionbytningsgraden beregnes som forholdet mellem antal ækvivalenter af natrium og klorid (Na/Cl). Parameteren beskriver ionbytning mellem Ca/Mg og Na. En ionbytning tæt på 1 indikerer, at der er ligevægt mellem grundvandets og sedimentets indhold af salt. En høj ionbytning indikerer, at grundvandet er blevet mere ferskt med tiden, idet natriumioner, der blev bundet til sedimentet under de mere salte forhold, frigives til grundvandet. I dette tilfælde bindes Ca/Mg fra grundvandet til sedimentet, mens Na frigives. Denne vandtype træffes især i dybe magasiner, i såvel sandede aflejringer som kalkmagasiner.

Omvendt ionbytning finder sted, når saltvand fortrænger ferskvand. Da bindes natrium fra grundvandet til sedimentet, mens Ca/Mg frigives. Denne vandtype forbindes ofte med kystnære områder, hvor havvand trækkes ind i ferskvandsmagasiner, når oppumpningen er for stor, ved påvirkning med vejsalt eller ved saltgrænsen i dybe magasiner.

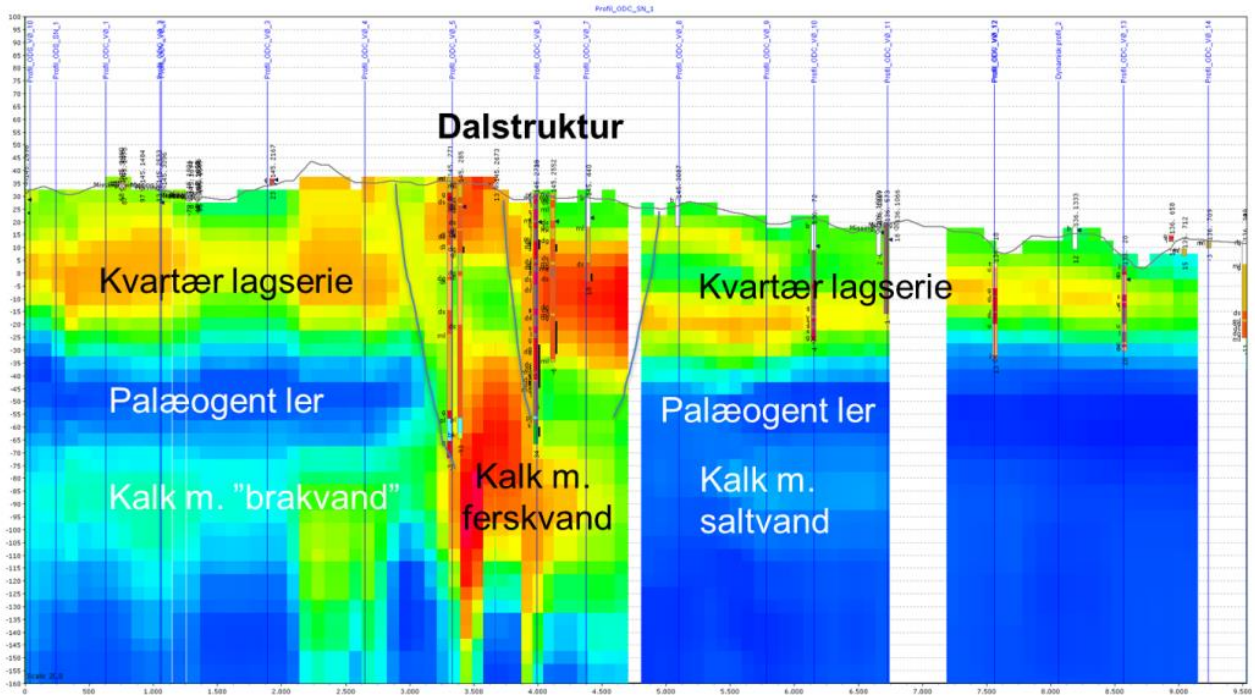
Forvitringsgraden

Forvitringsgraden beregnes som summen af Ca og Mg divideret med hydrogencarbonat (målt i ladningsækvivalenter) (Bay et al., 2004). Forvitringsgraden belyser i princippet, i hvilket omfang andre syrer end kulsyre er neutraliseret ved opløsning af kalk. Forvitringsgraden påvirkes af mange processer, herunder pyritoxidation, hvor der dannes svovlsyre. Tilsvarende vil tilførsel af kalksalpeter i landbruget (calciumnitrat) øge forvitringsgraden. Ligeledes kan atmosfærisk deposition af kvælstof, i form af ammoniak fra landbrugsaktiviteter eller svovlsyre fra forbrændningsprocesser, medvirke til en høj forvitringsgrad af jordlagene.

En lav forvitringsgrad (<=1) kan skyldes sulfatreduktion, hvor organisk stof omdannes til hydrogencarbonat. En lav forvitringsgrad kan også skyldes ionbytning, hvor grundvandets indhold af calcium-ioner falder, da de adsorberes til sedimentet og hermed bytter plads med natrium-ioner. En høj forvitringsgrad (>1,2) kan være en indikation på, at grundvandsmagasinet er sårbart enten på grund af en stor nitratudvaskning, eller en dårlig beskyttelse i form af manglende lerdæklag. En høj forvitringsgrad kan også indikere en kraftig indvinding, der betinger forceret omsætning af pyrit under kraftig syredannelse.

Kalkmætningen

Kalkmætningen eller mætningsindexet angiver grundvandets mætningstilstand i forhold til kalk i sedimentet. Er kalkmætningen positiv er grundvandet overmættet i forhold til kalk i sedimentet. Kalkmætningen bidrager med oplysninger om graden af forsuring af jordlagene.



Figur 3-43: Salt porevand i dybtliggende kalk og nedadrettet transport af fersk grundvand via en begravet dalstruktur. Eksempel fra VTU Odense modellen (Sandersen et al., 2015). Blå farver udgør lave elektriske modstande; orange/røde farver høje modstande.

Tilstedeværelsen af specifikke grundvandskemiske parametre

Udover de parametre, som er nævnt ovenfor, kan der være andre parametre, som specifikt kan bruges ved de geologiske tolkninger. Specielt tilstedeværelsen af klorid er vigtig, da denne parameter kan give information om tilstedeværelse af marine aflejringer, tilstedeværelse af dybtliggende residualt saltvand, indtrængning af saltvand fra kystområder, magasinsammenhænge, magasin-gennemstrømning mv. Endelig er tilstedeværelsen af klorid i grundvandet vigtig i forbindelse af tolkning af elektriske og elektromagnetiske undersøgelser, fordi disse metoder måler på selve formationen inklusive porevandet. Saltholdigt porevand kan betyde, at jordlag, som normalt har høj elektrisk modstand fremstår med lave modstande. Et eksempel på dette kan ses på *Figur **3-43***, hvor den dybtliggende kalk viser sig med lave til moderat lave elektriske modstande – bortset fra den centrale del, hvor en nederoderet dalstruktur har fjernet det palæogene ler og dermed åbnet op for nedsivning af fersk porevand til kalken.

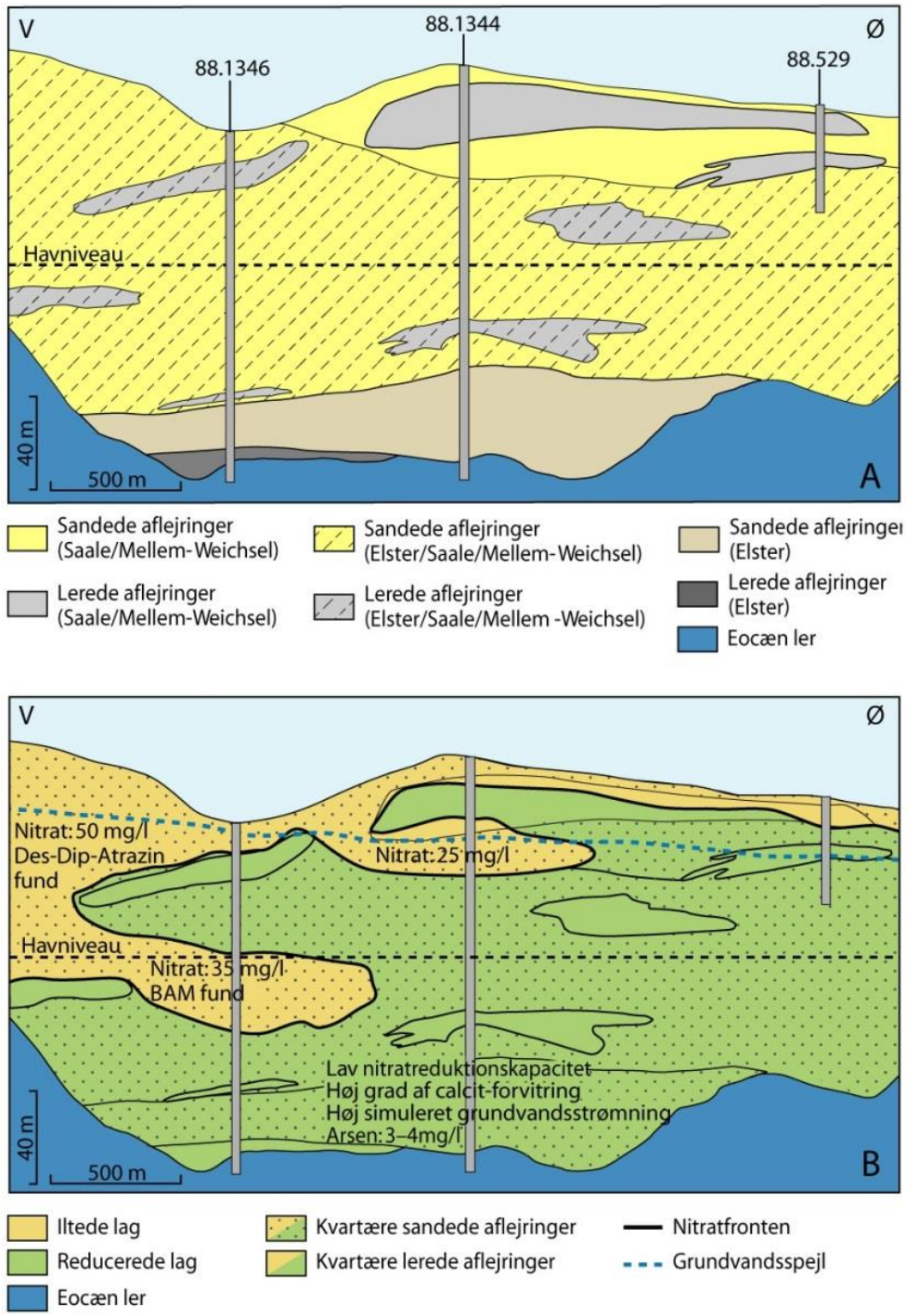
Udover klorid kan andre grundvandskemiske parametre anvendes ved de geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger, eksempelvis fosfor, som kan pege på tilstedeværelse af marine aflejringer. Tilstedeværelsen af miljøfremmede stoffer i grundvandet peger på ungt vand og mulighed for nedsivning af overfladevand til dybere niveauer. Hvilke parametre, som kan være vigtige at inddrage, afhænger af det konkrete modelområde.

Eksempler på praktisk anvendelse af kemiske data

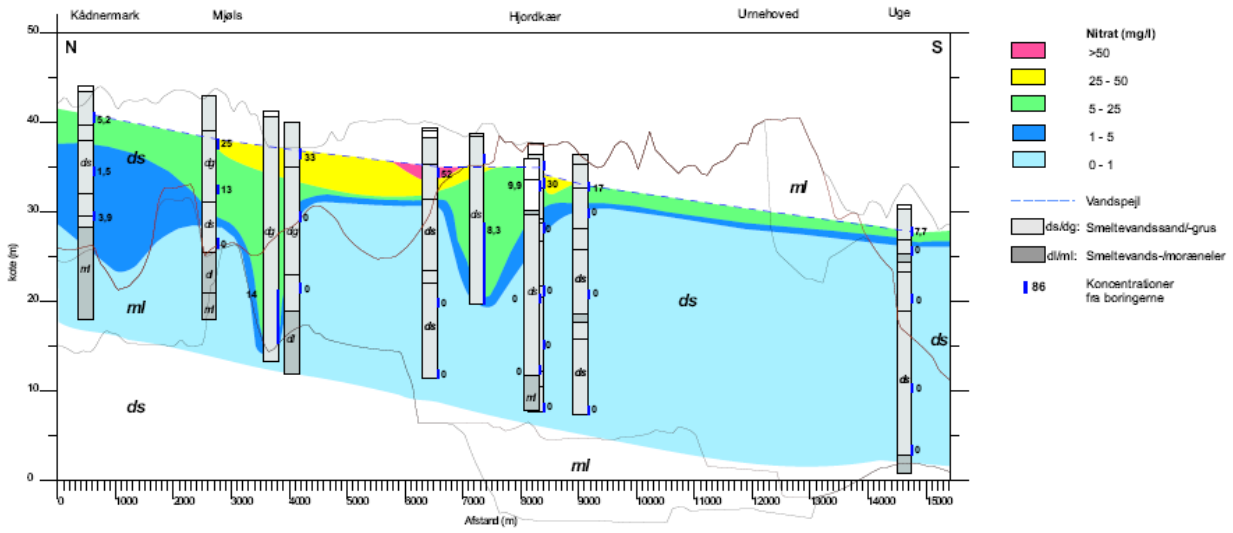
Ved at kombinere grundvands- og sedimentkemiske data (grundvandskemi, sedimentkemi, farvebeskrivelser, kalkindhold mv.), med geologiske og geofysiske oplysninger kan data supplere hinanden i tolkningen af laggrænserne (Hansen & Thorling, 2008).

Et eksempel på en sådan sammentolkning kan ses i *Figur **3-44***, hvor et ca. 4 km langt geokemisk og geologisk profilsnit gennemskærer en begravet dal syd for Århus (Århus Amt, 2006). De kemiske data er her brugt til at verificere den geologiske model for området, og lerlaget er tolket som usammenhængende, da redoxgrænsen optræder under et lerlag. I eksemplet sammenstilles således såvel kemiske som geologiske informationer.

På *Figur **3-45*** er vist nitratkoncentration og den geologiske lagserie i boringerne langs et ca. 15 km langt profil ved et vandværksopland ved Rødekro (Sønderjyllands Amt, 2005). Nedtrængningen af nitrat i grundvandsmagasinet er sammenfaldende med steder med begrænset lerdække. Udbredelsen af nitrat i grundvandets dybere dele er samtidig sandsynligvis også påvirket af indvindingen i området, som forcerer omsætningen af pyrit og trækker nitratholdigt vand ned i grundvandsmagasinet (se f.eks. Bay et al., 2004).



Figur 3-44: Øverst geologisk profilsnit gennem en begravet dal syd for Århus. Nederst vand- og geokemisk profilsnit gennem samme begravede dal. Eksemplet er fra Århus Amt (2006).



Figur 3-45: Illustration af nitratmålinger fra boringer med flere indtag. Vandværksopland ved Rødekro Eksemplet er fra Sønderjyllands Amt (2005).

4. 3D geologisk modellering - Modelleringsprocedurer

4.1 3D modelleringssoftware

4.1.1 Krav til 3D modelleringssoftware

Digital tolkning står i modsætning til analog tolkning med ”papir og blyant”. Den digitale tolkning foregår i et geologisk tolkningssoftware, hvor det er muligt at definere tolkningspunkter, flader, voxler m.m. i rummet. Tolkningspunkterne defineres i 3 dimensioner med et sæt geografiske koordinater (x, y) og en kote (z) og kan tilknyttes værdier, tekst, usikkerheder, m.v. Den digitale tolkningsprocedure foregår i princippet på samme måde som ved den analoge tolkning, men den digitale tolkning muliggør en mere effektiv og overskuelig tolkningsprocedure.

Det digitale tolkningsmiljø skal kunne facilitere visualisering af data hver for sig i diverse kombinationer. Modelrummet med både data og tolkninger skal kunne ses på vilkårlige vertikale profillinjer, på fladesnit og i forskellige former for 3D perspektiver. Således skal det geologiske tolkningssoftware indeholde moduler og databaser til håndtering af input data (f.eks. geofysiske data), tolkningsdata, 2D og 3D visualisering, GIS, og diverse editeringsværktøjer.

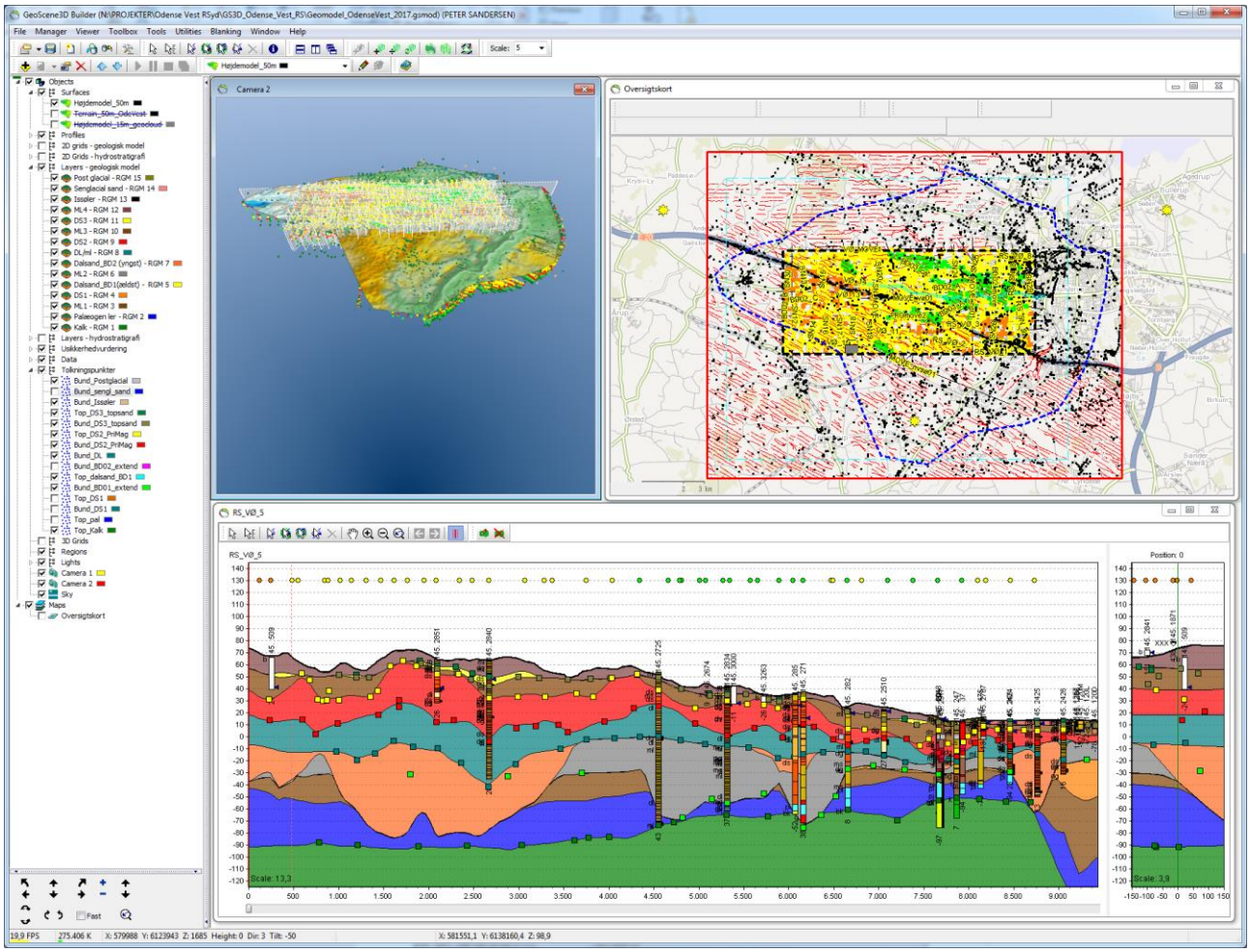
Input data kan udgøres af adskillige former for geofysiske data, boredata, geologiske data, terrændata osv. Disse data skal bl.a. kunne sorteres, filtreres, visualiseres, interpoleres, kontureres og skaleres i størrelse. Visualiseringen er et vigtigt element, så modelløren kan skabe sig et overblik og et godt grundlag for sine tolkninger. Dette indebærer, at det anvendte tolkningssoftware skal indeholde en lang række visualiseringsfunktioner, især på vertikale profiler og i 3D miljøet. GIS-delen er også en vigtig funktion, da tolkningsarbejdet er tæt integreret med anvendelsen af diverse korttyper. Sidst men ikke mindst skal der være et bredt udvalg af editeringsværktøjer. De grundlæggende editeringsværktøjer omfatter teknikker til punkttolkning og interpolation samt procedurer til håndtering af laggrænser (etablering af hierarki og vertikal/horisontal afgrænsning). De seneste år er der sket en betydelig udvikling indenfor voxelmodellering, så værktøjer til håndtering af dette er også vigtige. Herunder er det vigtigt at programmet kan etablere, visualisere og editere voxelmodeller.

En udfordring for software-produktet vil stort set altid være at stille tilstrækkelig performance til rådighed. 3D visualisering kræver stor grafisk hukommelse på computeren, men der er også andre performance-begrænsninger, f.eks. i anvendelsen af databaser. Kravene øges hele tiden, da dataomfanget gradvist stiger og modelområderne bliver større.

Et andet væsentligt krav til det valgte 3D modelleringssoftware er muligheden for interaktion med andre programmer, databaser og platforme. F.eks. er det essentielt, at der er fuld kompatibilitet med Gerda-databasen og Jupiter-databasen, og det er vigtigt, at filformater er let læsbare i forbindelse med senere anvendelse af modellen, f.eks. ved efterfølgende grundvandsmodellering. I det hele taget er det afgørende, at de anvendte filformater opfylder gængse standarder både ved import og export af modeller og data.

4.1.2 GeoScene3D

Softwarepakken GeoScene3D er det førende 3D modelleringsprodukt på markedet i Danmark. GeoScene3D er blevet udviklet af I•GIS over de seneste 10-15 år i forbindelse med grundvandskortlægningen. Udviklingen hos I•GIS er sket i tæt samarbejde med geologer ved GEUS og i Miljøstyrelsen og er tilpasset de typer af data, der typisk anvendes i Danmark, samt de normalt anvendte databaser for geofysik (Gerda), boringer (Jupiter) og modeller (Modeldatabasen). Desuden pågår der en løbende dialog med de daglige brugere hos eksempelvis rådgivningsfirmaer i forhold til optimeringer og nye funktionaliteter i GeoScene3D. Programmet er desuden tilpasset den traditionelle måde at opstille modeller på i Danmark, nemlig ved lagmodellering langs profillinjer. Udviklingen af GeoScene3D startede i midten af 2000-tallet som et visualiseringsprogram til formidling af undergrundsforhold til interessenter og offentlighed. Efter 2007 blev GeoScene3D videreudviklet til at kunne håndtere egentlig opstilling af 3D modeller – det blev udvidet med et editeringsmodul til lagflademodellering.



Figur 4-1: Screen-dump fra GeoScene3D med object-menu til venstre, øverst 3D-vindue (”3D-miljø”) og kortvindue (”2D-miljø”) ved siden af hinanden, og herunder udvalgt 2D-profilsnit (”2D-miljø”).

Siden er programmet løbende blevet videreudviklet indenfor lagflademodellering og kompatibilitet med diverse data og databaser. Desuden er der blevet udviklet flere andre moduler i forbindelse med forskellige forsknings- og udviklingsprojekter. Blandt andet et voxel-modul med tilhørende manuelle voxel-editeringsværktøjer i regi af Hyacints-projektet (Jørgensen et al., 2013) og i regi af ERGO-projektet

værktøjer til automatiseret lagfladem odellering (Smart Interpretation) og til stokastisk voxelmodellering (Guldbrandsen et al., 2017). Af andre værktøjer, der er blevet udviklet, kan nævnes værktøjer til opstilling af by-geologi, hvor eksempelvis antropogene strukturer som ledningsgrave, vejkasser og bygningskældre, kan indbygges i modellerne (Pallesen & Jensen, 2015). Desuden er der udviklet værktøjer til udarbejdelse af magasinspecifikke potentialekort og simple sænkningstragtsberegninger.

I det følgende beskrives opbygningen af GeoScene3D i hovedtræk:

Tolkningsmiljøer

Grundlæggende består programmet af tre forskellige tolkningsmiljøer: Et 3D-miljø, hvor modelrummet med data og tolkninger kan anskues fra alle ønskede vinkler, et vertikalt 2D-miljø ("Profilsnit"), hvor data og tolkninger visualiseres på profiler, og et horisontalt miljø (Kortvinduer"), hvor der kan vises snit gennem data, og hvor data, tolkninger og kort kan vises i GIS-miljø (se *Figur **4-1***). Der er fuld integration mellem de tre miljøer, således at de kan anvendes samtidigt. Der kan desuden defineres et brugervalgt antal 3D vinduer, kortvinduer og profilsnit, som alle kan være åbne samtidig.

Tabel 4-1: Dataformater i GeoScene3D

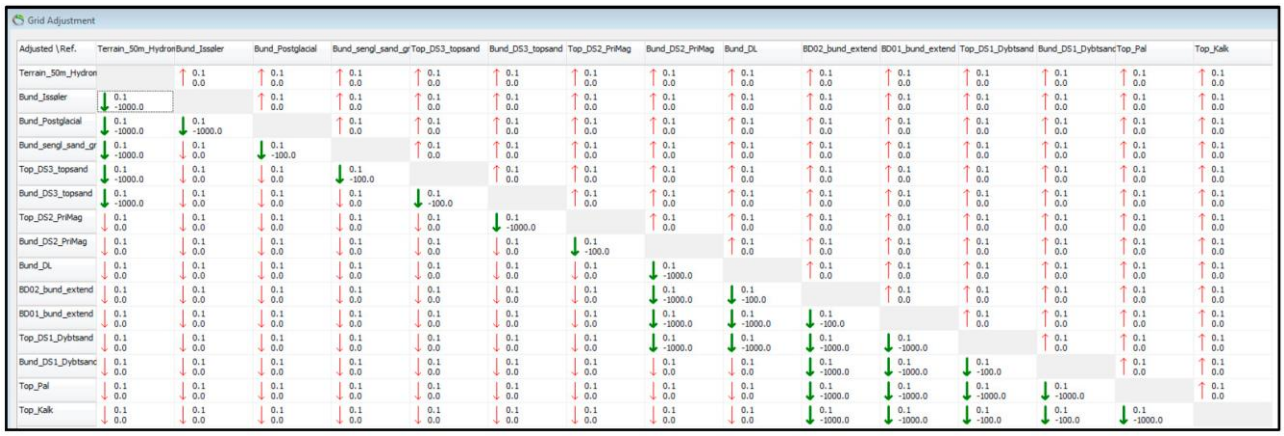
Format	Beskrivelse
Boredata	GeoSoft XYZ, CSV, Jupiter, Database-tabeller/views i Microsoft® Access og Firebird.
1D geofysiske data (AEM, TEM, ERT, DC, MRS, ...)	GeoSoft XYZ, CSV, Gerda, Database-tabeller/views i Microsoft® Access og Firebird.
2D geofysiske data (ERT)	Gerda, CSV
Logging-data	GeoSoft XYZ, CSV, LAS, Gerda/Jupiter, Database-tabeller/views i Microsoft® Access og Firebird.
2D-flader/grids	Surfer Binary, Surfer ASCII, Arc View ASCII, Vertical Mapper Grid, CSV
3D-Grids	GRD3D (Stacked 2D grids), Arc View ASCII, CSV
2D-punkter	CSV, tabular data/views in Microsoft® SQL Server, Microsoft® Access og Firebird.
Bitmaps registreret i rummet	bmp, jpg, tiff
Seismik	SEGY
GIS data	shp, tab

Data

Et stort antal datatyper kan importeres og visualiseres i GeoScene3D (*Tabel **4-1***). Dette gælder bl.a. boredata, diverse typer af geofysiske data, lagflader, XYZ punkter, 3D grids, vektorbaserede data og information, jpg/bmp/tiff filer, seismiske SEG Y-data, log data, digitale terrænmodeller og GIS-data (typisk i *.tab eller *.shp format).

Lagmodulet i GeoScene3D (”Layer Builder”)

Lagmodulet i GeoScene3D indeholder specialiserede værktøjer til modellering af lag og er velegnet til opstilling af regionale modeller, som f.eks. hydrogeologiske modeller. Når en lagmodel opstilles følges et veldefineret koncept. Først importeres alle grundlæggende data og visualiseres i 3D miljøet, på profiler og kort. På baggrund af geologens tolkning af data afsættes tolkningspunkter for den pågældende lagflade der tolkes. Herefter anvendes interpolationsrutiner løbende til at generere gridflader. Gridfladerne, der således beskriver de tolkede lagflader, indplaceres i et lagflade-hieraki og selve de geologiske lag, der udfylder rummet mellem lagfladerne, dannes. Inden denne proces gennemføres, tilpasses lagfladerne, så de ikke skærer hinanden vertikalt (se *Figur **4-2***), og det er også nødvendigt at afskære dem horisontalt.



Figur 4-2: Gridjusterings-tool i GeoScene3D. Anvendes ved tilpasning af de genererede lagflader, så der ikke er overlap og der defineres en minimumstykkelse for lagene. Screendump fra GeoScene3D.

I GeoScene3D findes der forskellige semiautomatiske metoder til at hjælpe modelløren med tolkningsopgaven. Smart Interpretation metoden (SI) kan på baggrund af input fra modelløren automatisk sætte tolkningspunkter og dermed reducere det manuelle arbejde i forbindelse med eksempelvis tolkning af store geofysiske datasæt. Der er også metoder, der ud fra lagfølge (såvel lithologisk som resistivitetsmæssigt), automatisk kan indsætte tolkningspunkter på brugerdefinerede laggrænser.

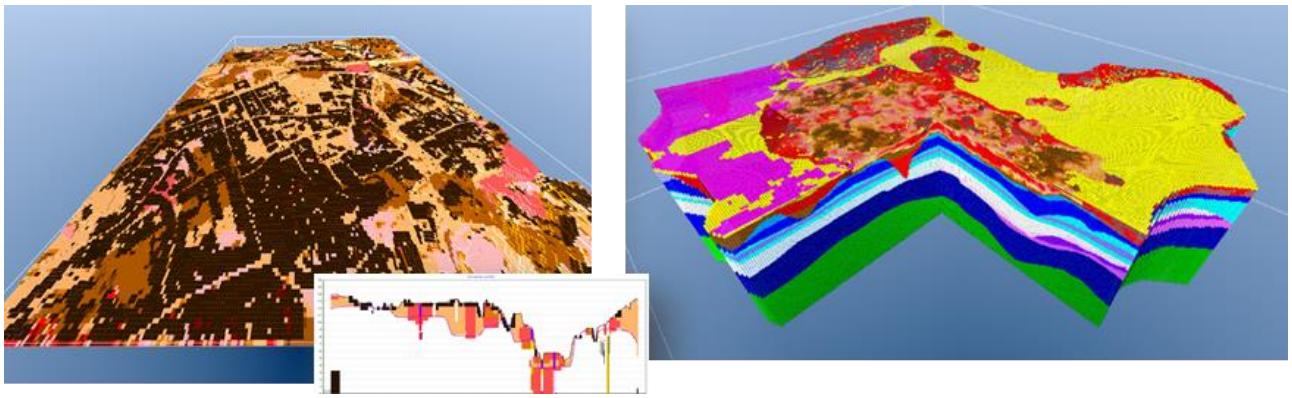
I lagmodulet er der implementeret forskellige metodikker til geostatistisk analyse. Til interpolation/gridning kan der benyttes kriging, inverse distance weighting og nearest neighbour. Der findes værktøjer for variogramanalyse og estimering af usikkerheder på interpolerede flader. Der er mulighed for at tilføre usikkerhed på tolkede punkter, så dette implementeres i kriging-interpolationen.

Voxelmodulet i GeoScene3D (”Voxel Builder”)

Voxelmodulet omfatter forskellige værktøjer designet til visualisering og modellering af primært kompleks og detaljeret geologi og menneskeskabte installationer (se *Figur **4-3***, til venstre). Mange af værktøjerne

kan med fordel anvendes i den geologiske tolkningsproces, særligt i forbindelse med tolkning af detaljeret geofysik. Værktøjerne anvendes til sortering, udvælgelse og selektion af enkelt-voxler eller voxel-grupper og til tildeling af tolkningsparametre på baggrund af andre datatyper. En stor fordel ved voxelmodulet er muligheden for implementering og visualisering af komplekse strukturer. Det er f.eks. let at implementere kældre, vejkasser, vandledninger osv. i by-geologiske modeller.

Voxelmodeller er baseret på regulære 3D grids, hvor hver enkelt celle er defineret som en voxel (se f.eks. *Figur **4-3***, til højre). Gridstørrelsen er valgbar, og der kan arbejdes med flere millioner voxler i samme scene extent. Voxelparametrene kan være adskillige, f.eks. lithologi, lithofacies, geologisk formation, aflejringsmiljø, alder, porøsitet osv. Flere voxelgrids kan linkes til hinanden, og de kan også linkes til datagrids, som f.eks. resistivitetsgrids. Herved opnås muligheden for dedikeret selektion af voxler på baggrund af data, og der kan desuden anvendes f.eks. lagflader og regioner i afgrænsningen af voxel-selektionen. Vektorfiler kan også anvendes ved udvælgelsen af voxler.



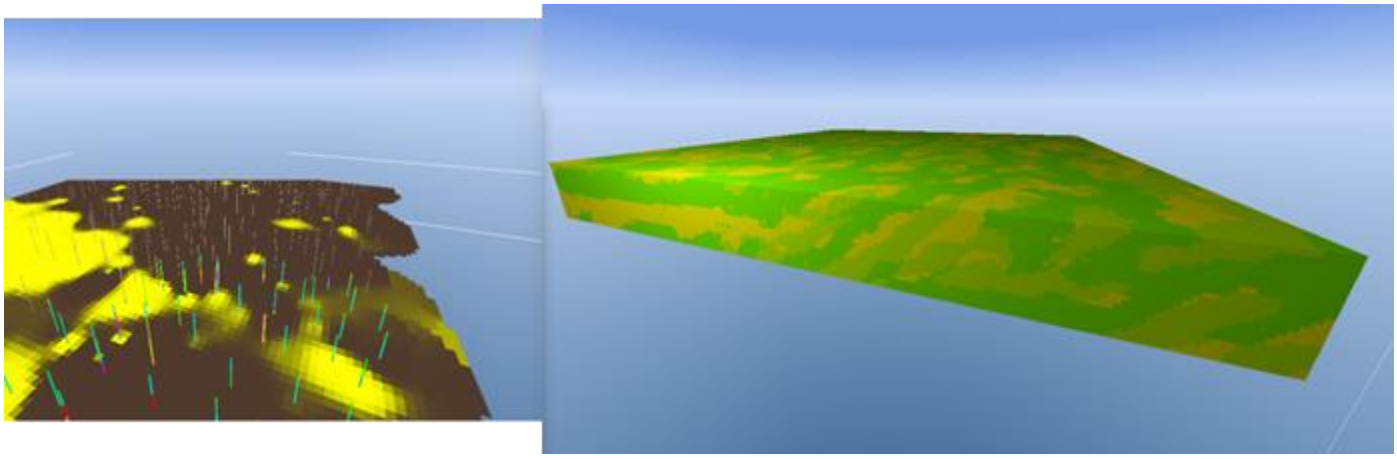
Figur 4-3: Eksempel på en by-geologisk model med en størrelse på 3 km² horisontalt og 20 meters dybde (til venstre): Voxel-cellestørrelse: 5 m x 5 m x 0,5 m. I alt 5 mill. voxler (Pallesen & Jensen, 2015). Til højre: Eksempel på en regional voxelmodel med en størrelse på 1000 km² og med en dybde på godt 800 m. Voxel-cellestørrelse 100 m 100 m x 5 m. I alt ca. 17 mill. voxler (Jørgensen et al., 2014).

Til voxelmodulet hører et simuleringsmodul, hvor der kan gennemføres stokastiske simuleringer af forskellige parametre i 3D-voxelgrids. Den indbyggede simuleringskode baserer sig på MPS (Multiple Point Statistics), og der er indarbejdet et workflow med tilhørende værktøjer. Dette omfatter oprettelse af ”soft data” og ”hard data” ud fra geofysiske data og boredata, dannelse af 3D træningsbilleder simulerings-setup og kørsel, evaluering og inspektion af simuleringsresultater og generering af afledte kort som f.eks. E-type maps.

MPS-modulet kan med fordel anvendes til at tildele f.eks. lithologi til en geologisk model i et komplekst og detaljeret område (*Figur **4-4***). Dette kræver dog, foruden et tilstrækkeligt datagrundlag, at geologen har en forhåndsopfattelse af de strukturelle geologiske forhold og kan påføre simuleringen denne opfattelse gennem et træningsbillede og stort kendskab til de geofysiske usikkerheder også set i sammenhæng til geologisk tolkning.

Toolbox

GeoScene3D rummer en Toolbox, der er en samling af værktøjer, der primært anvendes til gridredigering. Her kan eksempelvis foretages beskæring, blankning, resampling, samling m.m. af et eller flere grids.



Figur 4-4: Eksempler på Voxel-modelgrids fra MPS simuleringer i GeoScene3D.

4.2 Modelafgrænsning

Modelafgrænsningen definerer den horisontale udbredelse af det aktuelle geologiske modelområde. Det er vigtigt at forsøge at definere modelområdet så tidligt som muligt i det samlede projekt, fordi ændringer i modelområdets udstrækning undervejs i modelleringen kan være meget tidskrævende at udføre. I forbindelse med grundvandskortlægningsopgaver, hvor der på baggrund af en geologisk model skal opstilles en grundvandsmodel, vil det være denne, som reelt definerer udbredelsen af det geologiske modelområde. Det primære input fra den geologiske model til grundvandsmodellen vil således være hydrostratigrafiske lagflader, hvor disse som minimum dækker hele grundvandsmodellens område.

Modelafgrænsningen omfatter reelt også en afgrænsning vertikalt - det vil sige - hvilken del af lagserien, der skal indgå i modelleringen og hvordan bunden af dette lag, og hermed modellen, defineres. Der vil her være tale om en definition af det dybeste lag, som har relevans i grundvandsmæssig sammenhæng, og da denne er dikteret af den aktuelle indvindingssituation i området eller et ønske om at finde nye, dybere ressourcer, vil den nedre afgrænsning som oftest være beskrevet allerede i problemformuleringen og projektbeskrivelsen. I det følgende fokuseres derfor på den horisontale områdeafgrænsning.

4.2.1 Problemstilling

I grundvandssammenhæng er de fleste geologiske modeller opstillet med et specifikt geografisk fokus – for eksempel vandværksoplande, oplande til boringer eller OSD-områder. Den geologiske modellerings primære fokus vil derfor tildeles de udpegede områder, mens de rand-nære områder typisk tildeles sekundær fokus. Da der indsamles flest hydrogeologiske data i områderne med størst fokus, kan den geologiske tolkning tæt på modelranden være behæftet med en større usikkerhed.

Skal der alene opstilles en geologisk model uden en efterfølgende grundvandsmodel, kan det i mange tilfælde være tilstrækkeligt at foretage en afgrænsning ved at lægge en buffer rundt om et valgt fokusområde. Er formålet imidlertid opstilling af en grundvandsmodel, er det vigtigt, at den geologiske model som minimum dækker området for grundvandsmodellen, og ofte vil det være nødvendigt at

definere en modelafgrænsning, der endog er lidt større. Denne modelafgrænsning bør foretages så tidligt som muligt i det samlede projekt, herunder plan for evt. sammenlægning af flere geologiske modeller.

Et eksempel på et projekt, hvor kortlægningsområde og hydrologisk modelområde ikke er sammenfaldende kan ses i *Figur **4-5***. Aktivitetsområdet Padborg, Gråsten, Egernsund m.fl. omfatter OSD-områder og en række indvindingsoplande uden for OSD med et samlet areal på 266 km^2 (NIRAS, 2015). Der er udført rumlig geologisk og hydrostratigrafisk modellering i aktivitetsområdet, som er godt 40% mindre end det hydrologiske modelområde. For at sikre optimale randbetingelser til den hydrologiske model, er modelområdet udvidet i den hydrostratigrafiske model med inddragelse af data og eksisterende hydrostratigrafiske modeller fra tilstødende områder (*Figur **4-5***).

Men det er dog ikke altid muligt at fastlægge det hydrologiske modelområde tidligt i processen, så i disse tilfælde kan der i stedet fokuseres på, at den nye geologiske model vil kunne kobles sammen med eksisterende nabomodeller uden større problemer. I *Figur **4-6*** ses to kortlægningsområder på Nordsjælland, hvor hydrologiske modelområder ikke har haft indflydelse på det geologiske modelområde (Orbicon, 2013). Kortlægningsområderne er tillagt en bufferzone på 1 km, således at sammenhængen med nabomodeller er gjort så god som mulig. Ved opstilling af geologiske modeller, skal der altid ske en sammenkobling til lagdelingen i nabomodeller, så en senere sammentolkning er mulig og evt. problemfelter er kendte.

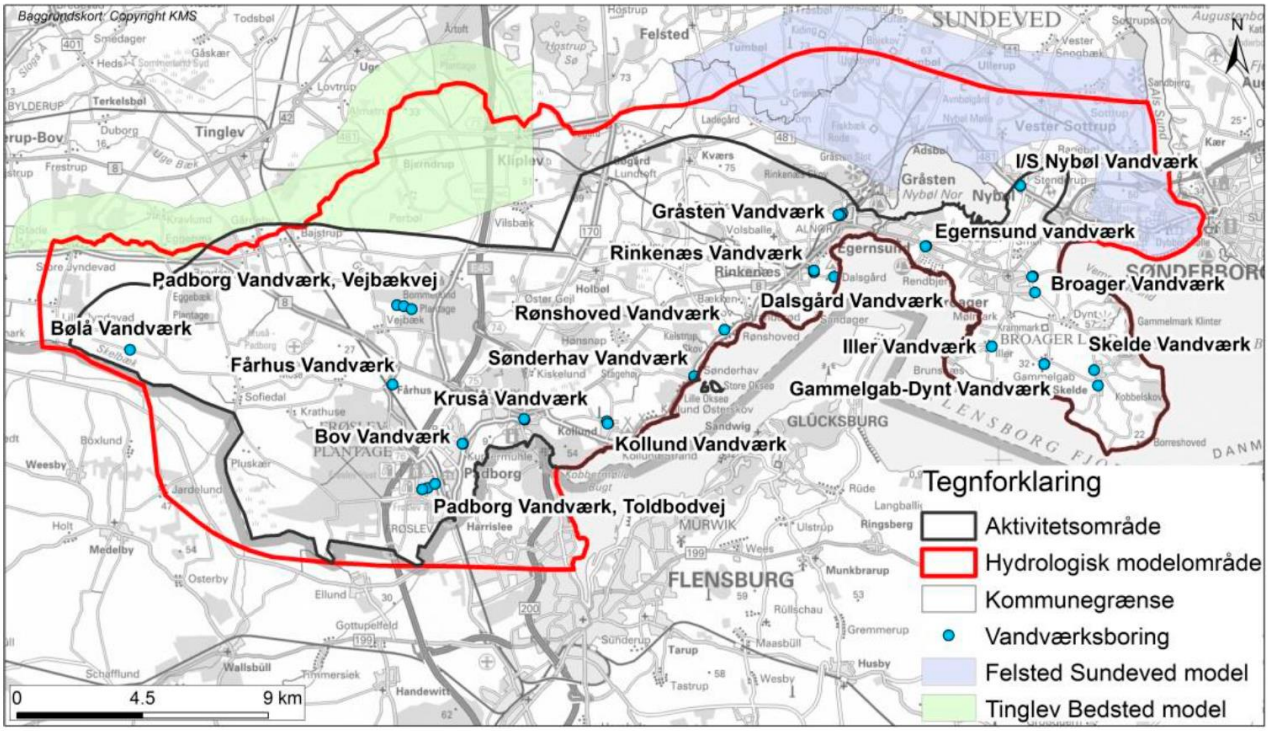
4.2.2 Fastlæggelse af modelafgrænsningen

Den endelige afgrænsning af grundvandsmodelområdet og dermed også området for den geologiske model bør indledningsvist afklares mellem geolog og grundvandsmodellør. Er der tale om et udbud, bør opdragsgiverens egne (eller tilknyttede) geologer og hydrologer i fællesskab udpege modelområdet i forbindelse med problemformulering og udarbejdelse af projektbeskrivelse. Hvis der er et behov for at definere delområder med forskellig detaljeringsgrad i den geologiske model for f.eks. at begrænse udgifter og/eller timeforbrug, kan dette passende ske i samme ombæring.

I de tilfælde, hvor det af forskellige årsager ikke er muligt at udpege et hydrologisk modelområde ved projektstart, bør der foruden en bufferzone omkring kortlægningsområdet, ske en nøje vurdering af, hvordan man sikrer, at der senere i forløbet eventuelt kan ske en udvidelse af modelområdet uden at det får negative konsekvenser. Eksempelvis kan der i forbindelse med problemformuleringen ske en beskrivelse af, hvordan man indledningsvist forestiller sig at eksisterende nabomodeller kan sammenkobles og derved danne en ramme, som den nye geologiske model kan klippes ind i, eller en beskrivelse af, hvordan og med hvilken detaljeringsgrad et eventuelt supplerende areal kan modelleres. Skal der modelleres i områder med mange eksisterende modeller, kan den primære udfordring måske i stedet ligge i en prioritering af eksisterende modeller og forslag til, hvordan disse på bedst mulig måde kan sammenkobles (se afsnit 4.5 om opdatering af eksisterende modeller).

Vigtige overvejelser i forbindelse med modelafgrænsning er, at området skal være så tilpas stort, at de valgte randbetingelser ikke skønnes at få uønsket indflydelse på beregningsresultaterne i grundvandsmodellen. Indvindingsoplande der skal beregnes med en model må ikke være påvirket af en rand.

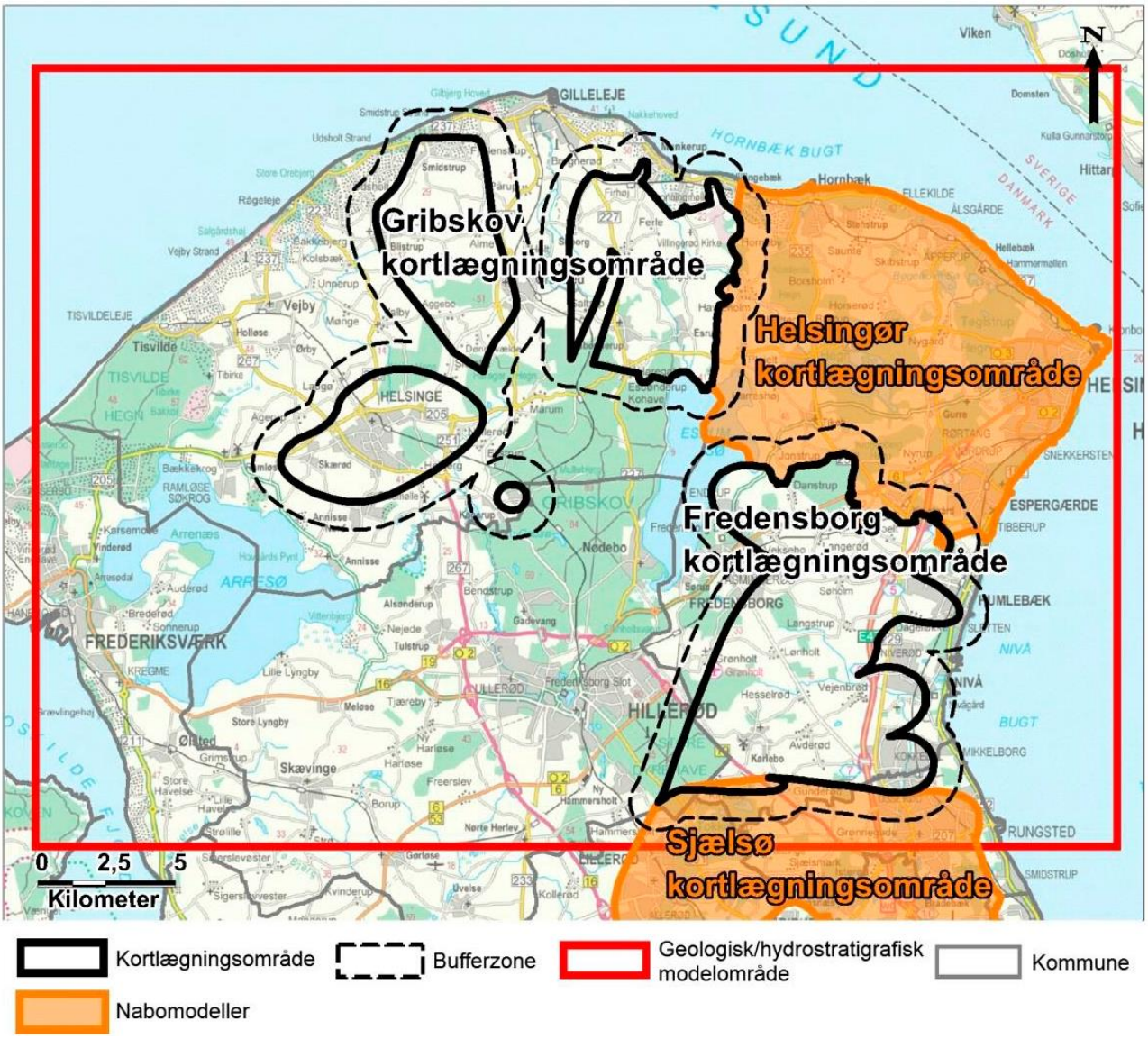
Beskrives forslagene ovenfor ikke i projektformuleringen og dermed i udbuddet, kan det i stedet være en del af opgaveløsningen at foreslå den bedste måde til at imødegå og løse problemstillingerne.



Figur 4-5: Aktivitetsområde for rumlig geologisk/hydrostratigrafisk model samt hydrologisk model (Aktivitetsområde Padborg, Gråsten, Egernsund m.fl.). Fra NIRAS (2015).

Det anbefales:

- at områdeafgrænsningen for den geologiske model afklares så tidligt i projektforløbet som muligt
- at områdeafgrænsningen sker i et samarbejde mellem geo-modellør og grundvandsmodellør
- at der i tilfælde af, at en afgrænsning af det hydrologiske modelområde ikke indledningsvist kan foretages, så tidligt som muligt sker en beskrivelse af, hvordan en eventuel udvidelse af den geologiske model kan foretages
- at alle geologiske modeller tilføjes en fast bufferzone udenfor det udpegede modelområde



Figur 4-6: Gribskov og Fredensborg kortlægningsområder, samt nabomodellernes udstrækning. Bufferzoner på 1 km er vist med stiplet linje Fra Orbicon (2013).

4.3 Prioritering og visualisering af data

Under arbejdet med at opstille den digitale geologiske model er der behov for en prioritering og en visualisering af de datasæt, der arbejdes med. Normalt skal der i tolkningsarbejdet inddrages oplysninger fra en lang række forskelligartede datasæt, og det er således ikke muligt at have overblik over alle informationer fra disse datasæt, uden først at prioritere mellem hvordan, og hvornår disse skal være aktive/synlige. Der skal endvidere prioriteres eller sorteres mellem data indenfor de enkelte datasæt. F.eks. kan det være nødvendigt at nedprioritere usikre boringer fremfor sikre boringer.

4.3.1 Dataprioritering

Dataprioriteringen afhænger af datasættets anvendelighed i den aktuelle situation samt af datatypen. I en tolkningssituation skal der, alt efter anvendeligheden og målet med tolkningen, hele tiden lægges forskellig vægt på de enkelte datasæt. De mest anvendelige datasæt skal derfor selvfølgelig prioriteres højest i datavisualiseringen. Datasættenes anvendelighed afhænger af flere forskellige ting, bl.a. formålet med modellen, modellens fokusdybde, datatæthed, datakvalitet og usikkerhed m.m. Relevansen af at vise datasættene varierer med andre ord fra model til model, men kan også variere inden for den enkelte model. F.eks. kan PACES-data nedprioriteres til fordel for TEM-data, hvis formålet er at modellere på stor skala, og nyudført SkyTEM kan opprioriteres til fordel for ældre TEM-data, som evt. vurderes at være usikre. Eksempelvis kan også gamle DC-sonderinger nedprioriteres, hvis der foreligger nyere TEM-data. Data af ringe kvalitet samt datasæt med en ringe dækning/tæthed kan generelt nedprioriteres i forhold til data af god kvalitet og med en god dækning.

Nogle datasæt – så som borehulslogs – kan være vanskelige at visualisere direkte i den digitale modellering. Borehulslogs anses generelt for meget værdifulde i den geologiske modellering (se afsnit 3.2.4), men hvis de originale log data importeres (i LAS-format) vil loggens høje grad af detalje kun kunne ses ved at zoome kraftigt ind, og herved kan overblikket over sammenhængen med andre data mistes. Hertil kommer, at der som regel findes et sæt af forskellige logtyper knyttet til den loggede boring, hvilket gør, at der under alle omstændigheder skal tages et valg af, hvilken log, der skal visualiseres. I *Figur **4-7*** er vist et eksempel på et profil, hvor en log er udvalgt for en enkelt boring. Her er loggen tydelig, men da boringen er mere end 300 meter dyb kan loggens reelle detaljeringsgrad ikke visualiseres. Profilet i figuren er udvalgt til præsentation i en publikation, og der er derfor sorteret i data for at give bedst muligt overblik, men det illustrerer forskellen i de forskellige datatypers fremtræden. I kortlægningen af de miocæne aflejringer i Jylland (Kristensen et al., 2015) er logdata sammen med seismiske profiler meget centrale, og her er loggningdata derfor prioriteret højt (se *Figur **4-8***). I mange tilfælde vil loggingdata være prioriteret lavt i visualiseringen i GeoScene 3D på grund af vanskelighederne nævnt ovenfor, og i stedet er logtolkninger af lagserien typisk foretaget udenfor GeoScene og derefter taget i anvendelse ved de samlede geologiske tolkninger.

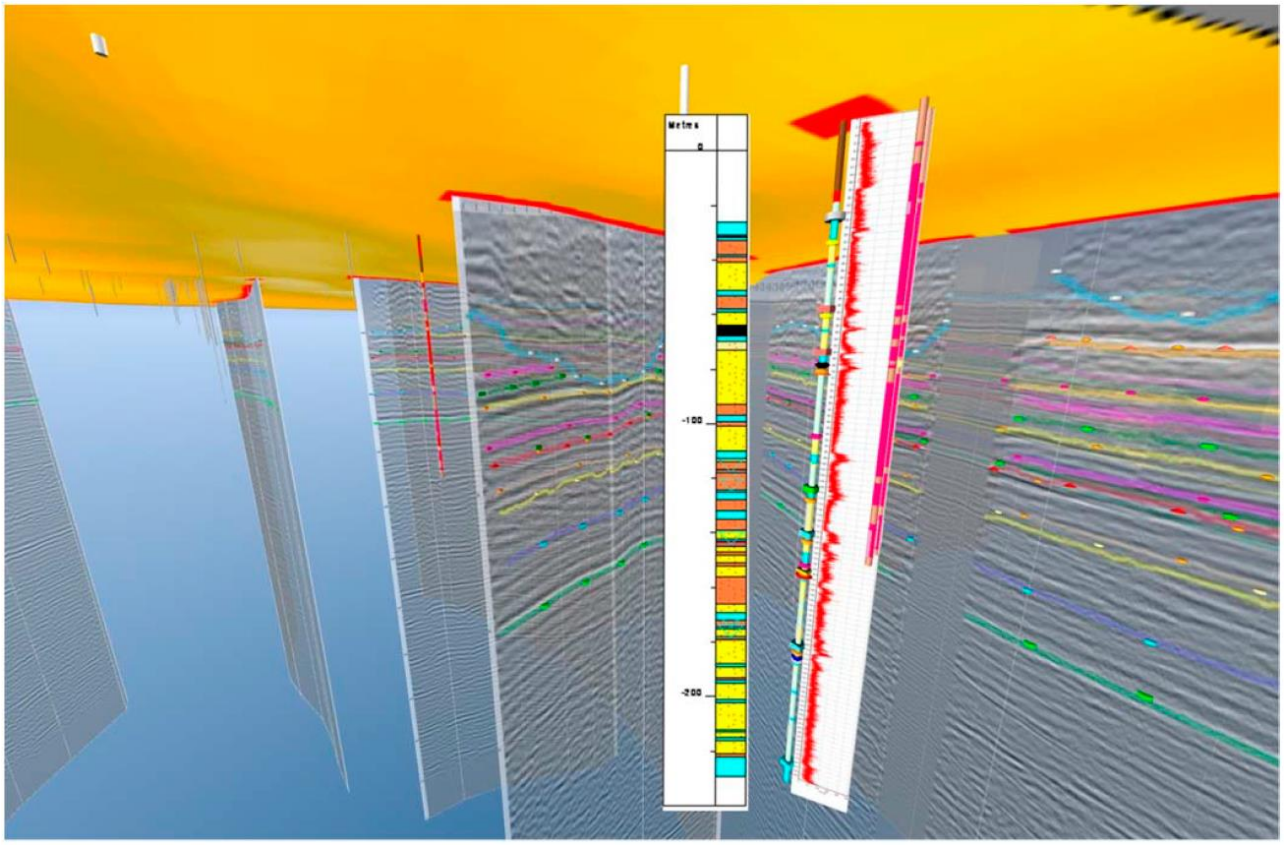
Ved dataprioriteringen kan man vælge at udelukke visning af mindre brugbare datasæt eller at nedtone datasættets visuelle udtryk, således at de mest relevante datasæt træder tydeligst frem. Dette kan f.eks. gøres ved at ændre på stolpetykkelse, ændre på værdiskalaer, eller ved at gøre datasættet transparent.

4.3.2 Datavisualisering

De data, der danner basis for de geologiske tolkninger, bliver traditionelt visualiseret i horisontale flader og på vertikale profiler. Det er på profilerne, at man normalt sætter sine tolkningspunkter (se afsnit 5.1 om lagmodellering). Ved direkte tolkning i 3D-rummet spiller profilerne en mindre betydningsfuld rolle, da man her ikke er bundet til profiler og horisontale flader. Ved optegning af profilerne kan der benyttes forskellige fremgangsmåder, hvilket er nærmere beskrevet i afsnit 5.1.

For at kunne overskue et modelområde på et profil, er man normalt nødsaget til optegne profilet med en vertikal overhøjning. Geometrisk set forvrænger dette virkeligheden kraftigt, og geologiske strukturer får unaturlige former. Det vil sige, at man ved tolkning skal have en imaginær forståelse af, hvordan strukturerne vil se ud i den valgte overhøjnings forvrængede form, og man skal også kunne modellere de

tolkede geologiske strukturer i samme forvrængede form. Dette betyder, at man altid skal forsøge at begrænse overhøjningen mest muligt. Overhøjninger på mere end omkring 10 gange kan være meget svære at håndtere, hvis man stadig vil kunne genkende geologiske strukturer i sine data.



Figur 4-7: 3D-visualisering af seismiske data og logging-data (fra Kristensen et al., 2015). De seismiske profiler ses som de lodrette "gardiner" i baggrunden, mens en borehulslog er visualiseret til højre for midten, tæt ved en boring.

Layoutet på profilet bør indeholde:

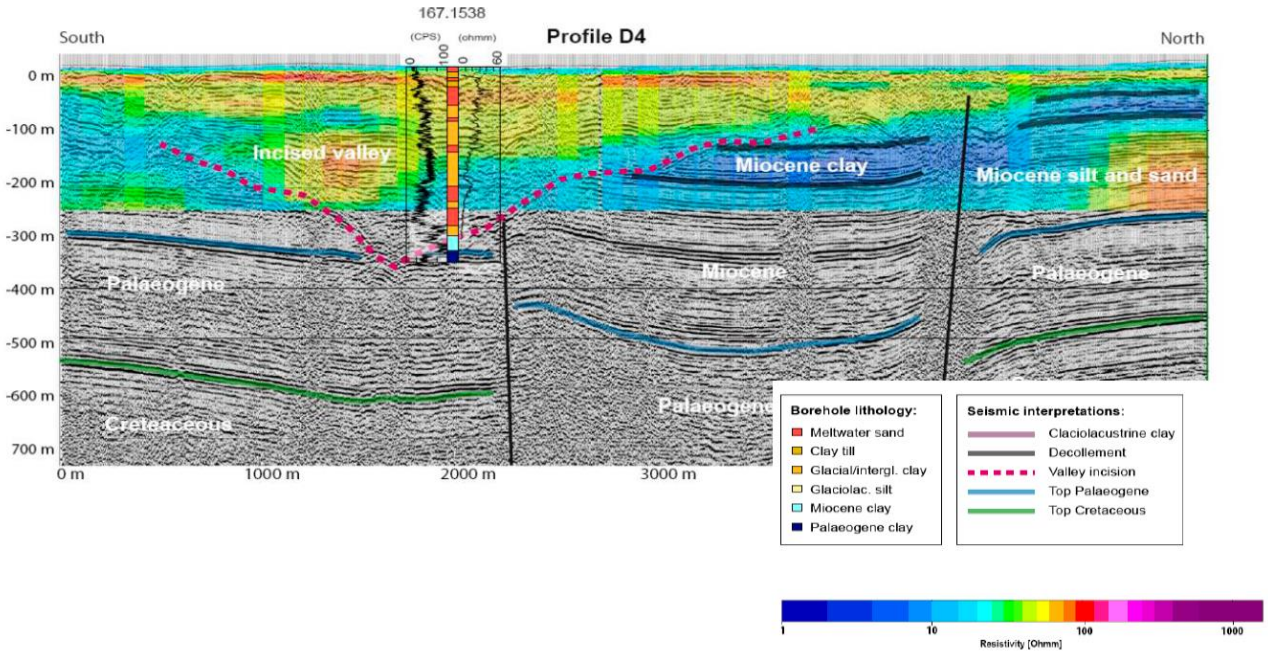
- Læsbare akseskalaer med meterangivelser
- Legender for benyttede skalaer
- Projektionsafstande for data
- Terrænoverfladen på baggrund af et detaljeret grid
- Evt. eksakte værdier på farvetematiserede data
- Eventuelt navne/numre på datapunkter
- Verdenshjørner
- Angivelse af overhøjning
- Skæring af andre profiler
- Et kort der viser profilets beliggenhed
- Angivelse af eventuelle knækpunkter på profilet

Der skal i løbet af tolkningsprocessen være mulighed for at fravælge og tilvælge både datasæt og enkelt-data fra datasættene. Dette er nødvendigt for at kunne øge overskueligheden og for at kunne udføre en

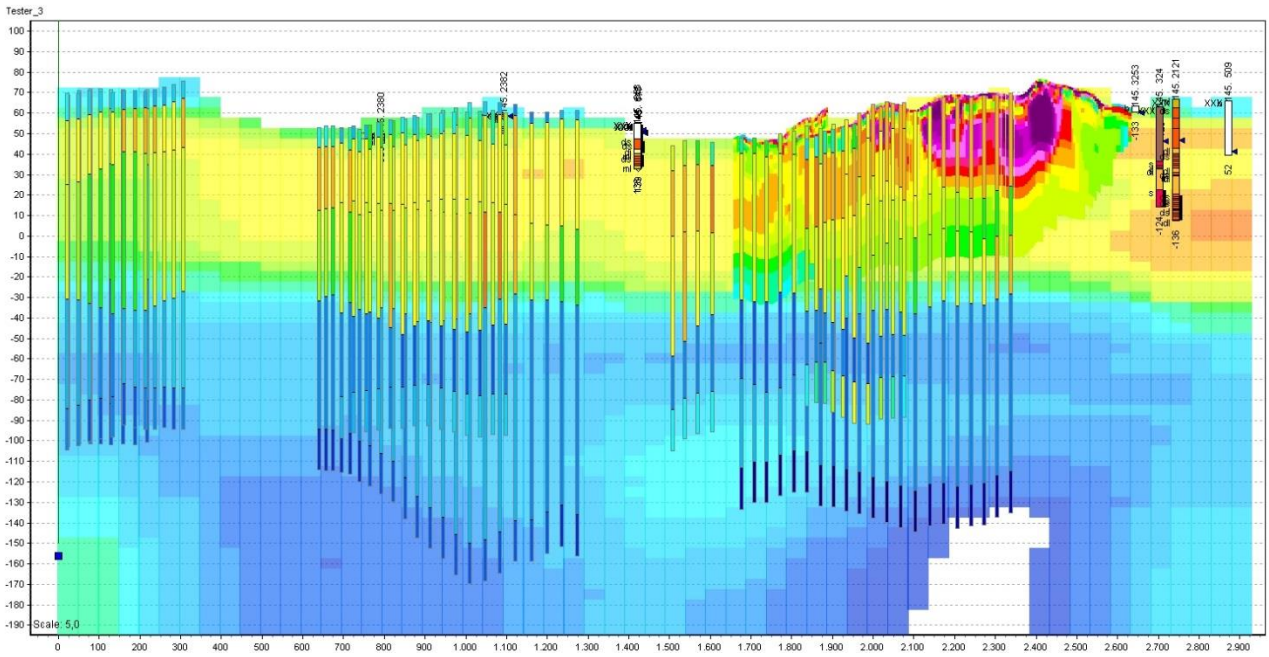
iterativ tolkningsproces. Det skal også være muligt at til- og fravælge de øvrige ting i layoutet, f.eks. eksakte værdier og navne. Layoutet bør desuden tage hensyn til selve tolkningsarbejdet og f.eks. kunne skelne mellem/tematisere forskellige tolkningspunkter, usikkerhedsvurderinger og anden dokumentation (se afsnit 5.1 om lagmodellering og afsnit 5.5.1 om usikkerhedsvurderinger). Alle disse ting vedrørende layoutet er mulige i GeoScene3D.

Da datatyperne ofte er grundlæggende forskellige, kan de vises på en række forskellige måder i modellen. F.eks. vises seismiske data normalt som et dækkende vertikalt "gardin" ned gennem modellen, mens boringer blot er stolper, som ikke dækker hele det vertikale plan. Seismikken "fylder" derfor mere i modellen end boredata, selvom det ikke nødvendigvis giver mere information. Det er ikke muligt at vise to kontinuerte datasæt i samme profil på samme tid, med mindre der arbejdes med f.eks. en sort-hvid skala for det ene datasæt og en farveskala for det andet datasæt. Heraf skal det ene datasæt være transparent. Et 2D-tolket MEP-profil eller et 3D resistivitetsgrid fra SkyTEM kan f.eks. vises ovenpå et seismisk profil ved at gøre farverne transparente, således at man kan se sort-hvid seismik nedenunder (se eksempel i *Figur **4-8***).

Typisk vil TEM-sonderinger og boringer vises som farvelagte stolper vertikalt opdelt i lag. For boringers vedkommende bør GEUS' officielle jordartsfarvekode benyttes og ved geofysiske sonderinger benyttes Geofysiksamarbejdets modstandsskala som udgangspunkt. Punktdata, som f.eks. vandkemi kan vises ved hjælp af farvetematiserede punkter. Ligesom seismiske profiler kan eksisterende geologiske tolkninger (f.eks. scannede, håndtolkede profiler) tages ind på profilet som billedfiler i GeoScene3D. Fladekort, som f.eks. potentialekort eller prækvartæroverfladen kan vises som streger på profilerne ved hjælp af 2D-grids. Jordartskortet kan vises som en 1 m tyk farve-tematiseret streg langs terrænoverfladen.



Figur 4-8: Seismisk profil, som er vist sammen med et transparent SkyTEM 3D-grid (farvede områder) og boredata i form af litologisk log og borehulslog (gamma-log). Fra Jørgensen et al. (2012[2]).



Figur 4-9: Eksempel fra GeoScene3D, hvor der i et profil vises et SkyTEM 3D-grid som baggrund for de enkelte sonderinger, som udgør datagrundlaget for griddet (vertikale stolper), samt MEP-data øverst i profilets højre side og boringer (med DGU-numre).

Det er selvsagt også vigtigt at vise datasættene i optimal rækkefølge, således at data visualiseret som punkter og stolper placeres ovenpå kontinuerte datasæt (se *Figur **4-9***). Dækkende eller mindre brugbare datasæt placeres så langt tilbage som muligt eller nedtones. Kontinuerte datasæt med en lille indtrængningsdybde kan med fordel placeres ovenpå kontinuerte datasæt med en mere dybtgående fokus (f.eks. PACES ovenpå TEM eller seismik; *Figur **4-9***).

Det vil ofte være svært at vise alle data på samme profil. Derfor må man løbende aktivere og deaktivere de forskellige datasæt før det komplette overblik opnås. Eksempelvis kan der skiftes mellem visning af enkeltsonderinger i et SkyTEM-datasæt og 3D-griddet. Der kan også arbejdes med flere profiler med identisk geografisk position og således kan forskellige datasæt vises samtidigt, blot på flere profilpaneler.

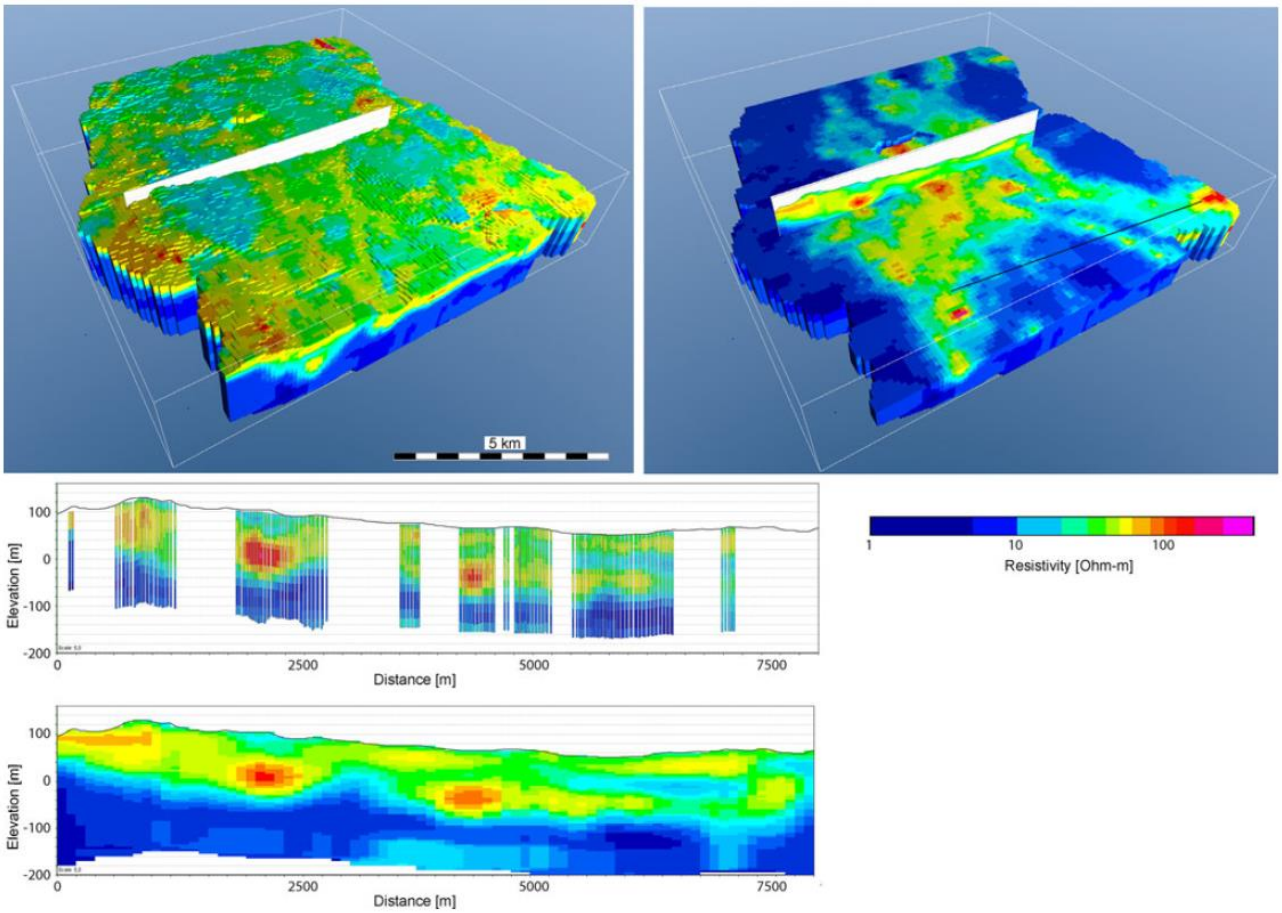
Det anbefales:

- at visningen af data i GeoScene 3D balancerer datas vigtighed i tolkningerne med de konkrete muligheder for visualisering. Eksempelvis vil det være en fordel at benytte sig af muligheden for at tænde og slukke for specifikke datasæt.
- at det nøje vælges hvilke data, der skal visualiseres i tolkningsrummet, og hvilke data, som ikke visualiseres, men blot skal bidrage til den geologiske fortolkning og dokumentation i tolkningsdatabasen

4.4 Interpolation af data

For at skabe et overblik over data i det digitale tolkningsrum, kan det være fordelagtigt at udføre interpolation af visse datasæt. Vi taler ikke her om interpolation af tolkede flader på baggrund af tolkningspunkter (se afsnit 5.1.6), men om interpolation af for eksempel fladedækkende data, såsom SkyTEM (se *Figur **4-10***).

Ved en interpolation beregnes forventede værdier i områder uden data. Herved fås et tæt netværk af beregnede værdier – et såkaldt *grid.* Griddet kan tematiseres på forskellig vis - f.eks. farvelægges i forhold til de beregnede værdier og en valgt farveskala (*Figur **4-10***). Et grid kan også *konturere*s, hvorved der optegnes en række konturlinjer gennem griddet, og hvor det fremkomne konturkort efterfølgende kan farvelægges. Data kan interpoleres både to-dimensionelt (2D) og tre-dimensionelt (3D). Ved 2D-interpolation arbejdes med vertikale planer (profiler), horisontale planer (kort) eller rumlige flader. I de horisontale planer interpoleres værdier, som knyttes til geografiske koordinater (f.eks. målte elektriske modstande). Hvis de interpolerede værdier definerer koter dannes rumlige flader (f.eks. overfladen af en målt god elektrisk leder).



Figur 4-10: Eksempel på et 3D-resistivitetesgrid baseret på SkyTEM-data. Øverst til venstre ses et 3D-view af hele griddet, mens der øverst til højre ses et snit gennem griddet i kote -25 m. De to profiler i bunden af figuren viser i midten de enkelte sonderinger og nedenunder et vertikalt snit gennem 3D-griddet. Fra Jørgensen et al. 2013.

Størstedelen af den interpolation der foretages, sker i 2D. Men det giver i nogle tilfælde også mening at interpolere data i tre dimensioner. Herved beregnes de forventede værdier ikke kun i det horisontale plan eller i det vertikale plan, men i hele det kortlagte volumen på én gang (horisontale og vertikale plan samtidigt). Fordelen ved 3D interpolation er, at man, særligt hvis der arbejdes i programmer med mulighed for 3D-visualisering, direkte og interaktivt kan se griddet i vilkårligt valgte snit.

De datatyper, der normalt bliver udsat for interpolation, er fladedækkende data eller kontinuerte profildata. Typisk vil dette være geofysiske data, men det kan også være f.eks. grundvandspotentiale, udtræk af boredatabaser m.m. Se også beskrivelse om interpolation under ”Elektromagnetiske data”.

4.4.1 Interpolationsrutiner og procedurer

Der findes en lang række forskellige interpolationsrutiner, og indenfor hver rutine er der en række indstillinger. Disse kan give meget forskellige resultater, og det er i en tolkningssituation nødvendigt at vide, hvordan interpolerede kort er udarbejdet. Størrelsen af søgeradius er eksempelvis meget vigtig, da der med en øget søgeradius sker inddragelse af og dermed midling af en større og større mængde data. Ved anvendelse af en stor søgeradius vil man opnå, at der skabes et grid henover datasvage områder, men hvor detaljer i geologien til gengæld vil blive udvisket. Omvendt vil der ved anvendelse af en lille søgeradius opnås et grid med mange huller, men hvor lokale geologiske variationer vil stå bedre frem. Konceptuel viden om geologiske inhomogeniteter i modelområdet holdt op mod den aktuelle datatæthed og den aktuelle datatype er derfor vigtig at holde op mod hinanden, inden interpolationen foretages. Når det således er vigtigt, at man anvender sin konceptuelle forståelse af geologien ved fastlæggelse af settings i sin interpolation, vil det ikke være muligt at fremsætte generelle retningslinjer herfor.

Den hyppigst anvendte interpolationsrutine ved fremstilling af fladekort på baggrund af geofysiske data er *kriging*. Ved kriging anvendes *variogrammer*, som bestemmer, hvorledes datapunkternes værdier skal vægtes som funktion af afstand og retning. Der kan anvendes et lineært variogram som standard, men i princippet bør der ved kriging anvendes tilpassede variogrammer, som ud fra en variogramanalyse beskriver den statistiske fordeling af netop det datasæt, der skal griddes. I GeoScene3D kan der udarbejdes tilpassede variogrammer ved hjælp af forskellige variogram model-typer, f.eks. sfærisk, eksponentiel og linært, som er de mest benyttede. Der kan anvendes anisotrope variogrammer når geologiske strukturer f.eks. har foretrukne retninger. Ved anvendelsen af kriging-interpolerede data skal man som modellør være opmærksom på, at det griddede ikke altid er ”tro” mod data (griddet stemmer ikke nødvendigvis med data i alle datapunkter). Variogrammet er styrende for dette, og det er også nødvendigt at være opmærksom på, at variogrammet i nogle tilfælde kan være opbygget på basis af anden information (f.eks. subjektiv geologisk baggrundsviden omkring foretrukne retninger).

Et problem med anvendelse af variogrammer er også, at der i et modelområde normalt findes flere forskellige typer af geologier (f.eks. sedimentære miljøer), med varierende statistiske fordelinger. Ved anvendelse af samme variogram for et helt område risikerer man således, at generalisere troværdige detaljer væk i nogle delområder og fremhæve ikke-eksisterende trends i andre delområder.

En anden udbredt og meget anvendt interpolationsrutine til geofysiske data er *Inverse Distance Weighting (IDW)*. Heri anvendes ikke variogrammer og de beregnede grids er således i højere grad ”tro” mod data (griddet stemmer med data i datapunkterne). Denne metode er umiddelbart mere objektiv at

forholde sig til på grund af ovennævnte problemstillinger. Omvendt vil den ikke i samme grad som kriging kunne fremhæve geologiske strukturer. Det kan derfor være en fordel at gridde sine data med anvendelse af både kriging og IDW.

Som ovenfor nævnt findes der en række forskellige indstillingsmuligheder ved interpolation. Herunder har valget af *cellestørrelse* og *søgeradius* en særlig betydning. Disse størrelser bør bl.a. varieres i forhold til den undersøgte geologi og datatæthed. Ved stor søgeradius medtages informationer fra mange datapunkter, mens der ved en lille søgeradius kun medtages informationer fra få datapunkter. Ved en lille cellestørrelse er der i højere grad mulighed for at fremhæve uregelmæssigheder i data, mens en stor cellestørrelse vil have tendens til at udjævne uregelmæssigheder.

Ved kortlægninger kan der være forskellige formål med at interpolere data. Måske vil man søge at fremhæve større overordnede strukturer på stor dybde eller modsat fokusere på detaljer i de overfladenære jordlag for at kortlægge sårbarhed og variationer. Til disse formål kan interpolationsparametrene med fordel tilpasses. Valget afhænger primært af de lokale geologiske forhold, datatype, dybde og formålet med interpolationen.

Inden enhver interpolation af data bør man spørge sig selv, om det giver mening at interpolere. Hvis der er stor afstand mellem datapunkter og der dermed ikke er nogen korrelation mellem disse vil et interpoleret grid kun være misvisende ved den efterfølgende geologiske tolkning af data. I sådanne datatomme områder med inhomogen geologi skal der ikke interpoleres og griddet skal være blankt. Dette kan til dels styres med størrelsen af søgeradius eller ved efterfølgende blanking af griddet i datafattige områder. I inhomogene områder er der ofte ringe eller ingen korrelation mellem f.eks. PACES-målinger med indbyrdes afstande på 250 m (mellem målelinjer). Her bør man således vælge en lille søgeradius, der passer til de geologiske forhold. Der kan derimod godt være korrelation mellem f.eks. TEM-målinger, selvom disse står med samme afstand i samme område, fordi disse måler på et større jordvolumen.

I afsnit 3.2.2 om TEM-data, er der givet anbefalinger til størrelse af søgeradius og cellestørrelse for TEM-data.

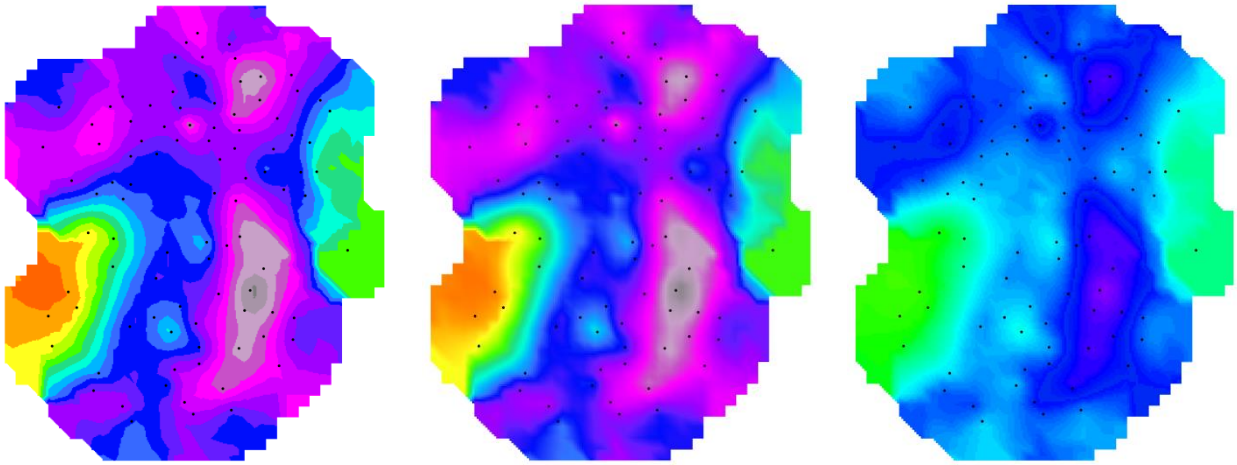
Ved 3D gridning af data gælder samme overordnede betragtninger som beskrevet ovenfor. Man skal dog være opmærksom på at anvende en meget begrænset vertikal søgeradius, således at data ikke midles vertikalt i selve målepunktet. En søgeradius, der ikke er større end cellestørrelsen bør vælges her. Den vertikale cellestørrelse kan f.eks. være 5 eller 10 m, hvis der er tale om 3D-gridning af SkyTEM-data. Det er muligt at udføre 3D interpolation i GeoScene3D.

4.4.2 Iterativ arbejdsgang

Datainterpolation bør som udgangspunkt foregå så objektivt som muligt. Herved har man et godt udgangspunkt for sin tolkning og modelopbygning. Men der kan samtidigt hentes yderligere informationer ud af data, hvis tolkningen foregår i en iterativ proces, hvor interpolationerne undervejs i den geologiske tolkning gradvist målrettes de geologiske forhold og den geologiske forståelse af det aktuelle område. Typisk kan man ved finpudsning og målretning af interpolationsproceduren gradvist opnå et bedre og bedre indblik i den geologiske opbygning. På den måde kan man finde den bedst mulige indstilling af interpolationsparametrene for det aktuelle område.

Tematisering og konturering af de interpolerede grids skal ligeledes optimeres efter de gældende geologiske forhold. Griddet kan f.eks. direkte visualiseres ved, at hver enkelt gridcelle farvetematiseres efter sin beregnede værdi. Her kan der arbejdes med diskrete eller kontinuerte farveskalaer. Ved anvendelsen af diskrete farveskalaer bliver griddet kontureret i et antal farvelagte intervaller. Fordelen ved at arbejde med diskrete farveskalaer er, at eventuelle trends og forskelle fremhæves og bliver lettere at overskue (se *Figur **4-11***). Ulempen er, at detaljer kan blive skjult indenfor de enkelte intervaller.

Valg og tilpasning af selve farveskalaen er ligeledes af stor betydning for den geologiske tolkning og bør også fastlægges gennem en iterativ arbejdsproces. I *Figur **4-11*** ses et eksempel, hvor griddet er det samme, men hvor farveskalaen er ændret. Det er ved valg af farveskala vigtigt at finde den indstilling, som på den bedst mulige måde visualiserer områdets geologi, og i eksemplet i *Figur **4-11*** står den nord-syd gående dalstruktur bedst frem på plottet i midten og til venstre.



Figur 4-11: Eksempel på forskellig visualisering af samme grid. Til venstre er griddet vist med diskret farveskala med få intervaller og der er udnyttet et bredt farvespektrum. I midten er samme farvespektrum benyttet, men der er benyttet kontinuert farveskala. Til højre er der benyttet en diskret farveskala med mange intervaller og med et smalt farvespektrum.

Der bør knyttes stor opmærksomhed til, hvordan et interpoleret datasæt er fremkommet, hvis det benyttes ved geologisk tolkning og modelopstilling. Hvis ikke modelløren har en viden om udarbejdelsen af de interpolerede kort, kan der meget let opstå fejltolkninger. I nogle interpolationsprocedurer kan der f.eks. blive indarbejdet mere eller mindre subjektive antagelser, mens der andre gange er benyttet procedurer, som enten fremhæver falske strukturer eller udvisker reelt forekommende strukturer. Datainterpolation, tematisering, konturering og skalavalg skal behandles med stor varsomhed ved geologisk tolkning og modellering, og dokumentation af hvert enkelt trin i processen er vigtig.

Det anbefales:

- at anvende interpolation til at gøre store datasæt lettere at overskue i tolkningsrummet
- at interpolationen sker med grundige overvejelser af eksempelvis konsekvenser af valg af søgeradius og tematisering

4.5 Opdatering af eksisterende geologiske modeller

Opdateringer af eksisterende geologiske modeller er ikke nogen triviel opgave. Dette skyldes primært, at geologiske modeller kan være meget forskelligt opbygget, fordi formålet med modellerne har varieret og fordi kravene til modellerne er steget i takt med de tekniske landvindinger på området. Modellernes "nutidsværdi" er derfor meget varierende, hvilket medfører spørgsmål om, hvordan det eksisterende modelarbejde bedst udnyttes ved en efterfølgende opdatering eller anvendelse i anden sammenhæng (Jørgensen et al., 2009).

Den følgende tekst er centreret omkring ”modelopdatering”, hvilket foruden egentlig opdatering af en enkelt model også indbefatter sammenkobling af flere modeller til én samlet model. Med ”modeller” menes der i det følgende udelukkende geologiske modeller. Den følgende tekst er primært en viderebearbejdelse og en opdatering af tidligere arbejde (Sandersen & Sørensen, 2010).

4.5.1 Formålet med en modelopdatering

Typisk vil det være aktuelt at bringe eksisterende geologiske modeller i spil i en af følgende situationer (Sandersen & Sørensen, 2010):

- hvor der ønskes en opdatering af en eksisterende model, fordi der er tilkommet nye data siden den seneste modelopstilling
- hvor der ønskes en opdatering og eventuelt udvidelse af en eksisterende model, fordi modellen ikke lever op til de krav, der stilles nu
- hvor der ønskes en opstilling af en ny model, der skal bygge videre på én eller flere ældre modeller
- hvor der ønskes en sammenstilling af eksisterende modeller i et område til én ny, samlet model

For at undgå at skulle kassere tidligere udført, omfangsrigt arbejde, men samtidig også undgå at utidssvarende og dårligt dokumenterede modeller uhensigtsmæssigt kommer i spil, er det vigtigt, at der sker en nøje gennemgang og vurdering, samt en efterfølgende prioritering af de eksisterende modeller.

4.5.2 Vurdering af eksisterende model(ler)

Det er nødvendigt at gennemføre en vurdering af den eller de eksisterende geologiske modeller som omfattes af opdateringen og/eller modelsammenstillingen. Dette kræver en systematisk gennemgang af modellernes ”nutidsværdi” med en efterfølgende prioritering og evt. frasortering af nogle af modellerne eller dele heraf.

Vurderingen af de eksisterende modeller anbefales udført inden det egentlige opdateringsarbejde igangsættes. Gennemgangen bør udføres, således at de vigtige, sammenlignelige dele af modellerne gennemgås, herunder data, antal lag i modellen, fordeling af tolkningspunkter, interpolationsrutine til generering af lagflader mv. Herved opnås et ensartet grundlag for modelvurderingerne, og tydelige forskelle vil træde frem. I forbindelse med vurderingen er det derfor væsentligt at tage stilling til en række spørgsmål – både overordnede spørgsmål og mere data- og tolkningsspecifikke spørgsmål. Eksempler på sådanne spørgsmål er sammenfattet i *Tabel **4-2***.

Tabel 4-2. Væsentlige punkter ved vurdering af eksisterende geologiske modeller

Vurdering af eksisterende model					
Hovedoplysninger	*Opklarende spørgsmål*				*Uddybende tekst*
	I hvilket modelværktøj (software) er modellen opbygget?				Hovedparten af modellerne fra den nationale grundvandskortlægning er opstillet i GeoScene3D (I-GIS)
	Er modellen tre-delt i geologisk forståelsesmodel, rumlig geologisk model og hydrostratigrafisk model?				I henhold til beskrivelsen i nærværende Geo-vejledning.
	Modeltype – lagmodel eller voxelmodel? Hvad er antallet af modellag i den enkelte model?				Er der f.eks. beskrevet en entydig kobling mellem antallet af modellag og tolkede lagflader (lagmodel)?
	Er modellen i overensstemmelse med den nyeste geologiske opfattelse af området?				
	Er der tilkommet nye data, som ændrer/kan ændre opfattelsen af de geologiske forhold?				Har nye fladedækkende geofysiske data givet et forøget vidensgrundlag, der ændrer den konceptuelle opfattelse af geologien?
	Dokumentation	Er der en veldokumenteret kvalitetssikring af modellen?			
		Er der udført usikkerhedsvurderinger af tolkningerne?			
		Foreligger alle nødvendige filer digitalt?			På hvilke filformater ligger data, og er disse kompatible med den software der anvendes til opdateringen?
		Hvilken dokumentation foreligger på tolkningspunkter og lagflader? (eller voxels?)			
		Tolkningsprocedure	Opbygningen af profilnet, og/eller tolkning med flytbare profiler? Er der oprettet et regulært eller irregulært profilnet?		Hvor tæt ligger profilerne? Er de optegnet efter retningslinjer eller genereret automatisk?
			Hvilken projektion af data på profiler er anvendt?		
			Med hvilken tæthed er der afsat tolkningspunkter, og hvordan er den rumlige fordeling af punkterne?		
			Er der beskrevet en prioritering af datatyper og datasæt i forbindelse med tolkningen?		
			Er modellen sammentolket med eventuelle nabomodeller ved modelranden?		
			Data	Hvilke boredata er anvendt? Hvad er kvaliteten af data?	Findes der nøgleboringer med borehulslogs og prøvepumpninger mv.
				Er der anvendt geofysiske data? Hvad er kvaliteten af eventuelle geofysiske datasæt?	SkyTEM, TEM40, seismik, geofysiske logs, MEP, PACES, GCM mv.
				Er eventuelle geofysiske datasæt prioriteret i forhold til hinanden?	Er der f.eks. anvendt både geofysiske fålags- og mangelags-modeller (SkyTEM)?
				Er der anvendt hydrologiske datasæt?	Prøvepumpninger, pejledata mv.
				Er der anvendt grundvandskemiske data?	Grundvandskemiske nøgleparametre der kan anvendes i tolkningen af magasintyper
				Øvrige datakilder	Digitale højdemodeller, jordartskort, geomorfologisk kort, MRS mv.

På basis af vurderingen anbefales det, at der udføres en overordnet cost/benefit analyse, hvorved omfanget af modelopdateringen/sammenstillingen af modeller kan præciseres - under hensyntagen til de tidsmæssige og økonomiske faktorer, som arbejdet er underlagt.

4.5.3 Strategi og arbejdsgang

Med afsæt i den udførte vurdering og prioritering af den/de eksisterende geologiske modeller kan der herefter opsættes en arbejdsgang, der tager højde for de eksisterende modellers styrker og svagheder. De efterfølgende trin i opdateringsprocessen kan opdeles i flere delopgaver med forskellig relevans og fokus alt efter resultatet af vurderingen af det eksisterende modelgrundlag og formålet med opdateringen. Arbejdsgangen er vist i flowdiagrammet i *Figur **4-12*** og beskrevet i det følgende:

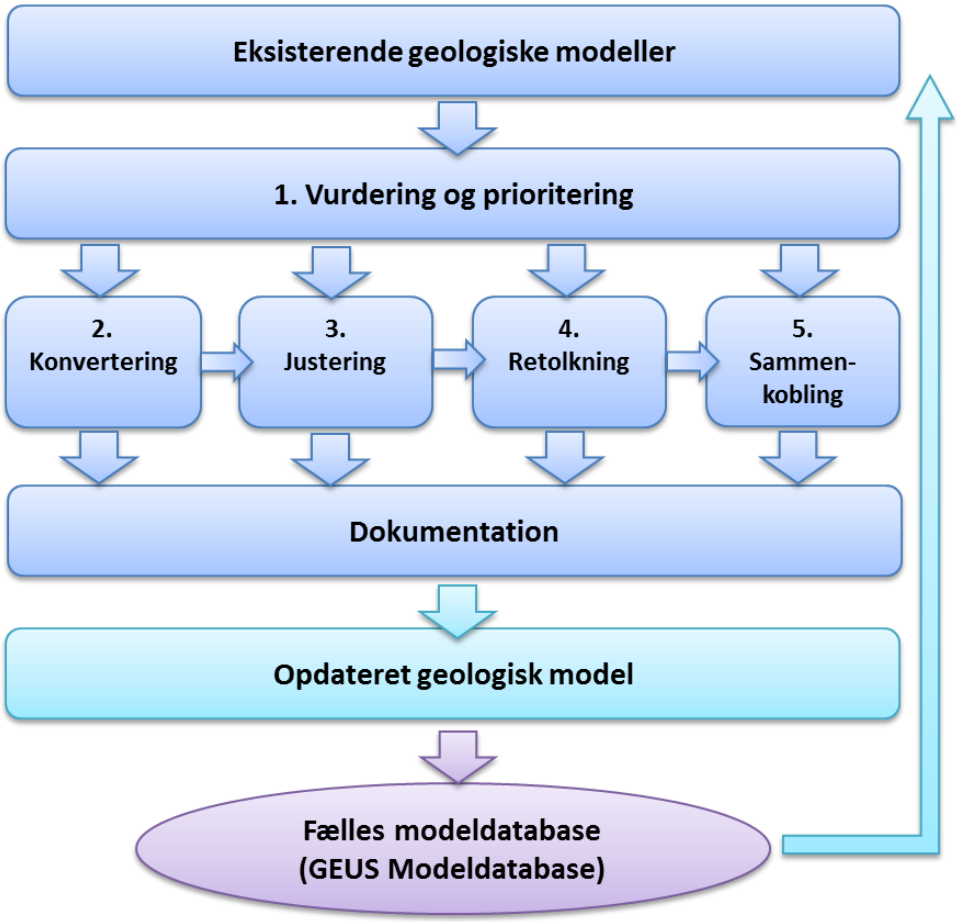
2) Konvertering
Ved en konvertering af en eksisterende model sørges for, at modellen rent teknisk bringes up-to-date, se *Figur **4-12***. Her vil f.eks. modellens flader og profiler med tilhørende tolkningspunkter overføres til det modelværktøj, der anvendes i dag.

Konvertering af ældre modeller opstillet i modelværktøjer, der ikke længere benyttes, kan være ressourcekrævende. Ved ældre modeller vil tolkningspunkter eksempelvis være placeret direkte på forholdsvis få tolkningsprofiler og ikke placeret direkte i boringernes XYZ-koordinater, hvilket kan gøre konverterede tolkningspunkter uanvendelige i en opdatering. Det er derfor centralt med en vurdering af tolkningspunkternes tæthed og rumlige fordeling i den eksisterende model inden en evt. konvertering igangsættes og i hvor høj grad eksisterende tolkningspunkter kan dokumenteres ved data eller ej. For at en model kan kendetegnes som veldokumenteret, er det væsentligt, at modellen bæres af tolkninger på data.

3) Justering
Ved justering af en model bibeholdes lagfølgen fra den eksisterende model, og der sker alene justering med nye data eller anden ny viden. Justeringerne kan omfatte såvel den geologiske forståelsesmodel, den rumlige geologiske model som den hydrostratigrafiske model. For den geologiske forståelsesmodels vedkommende kan der være tale om at tilføje supplerende viden til den eksisterende beskrivelse, mens der for den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model typisk vil være tale om at tilføje nye tolkningspunkter samt flytte eksisterende tolkningspunkter, så lagfølgen tilpasses de nye data (gældende for lagmodeller).

En justering af en model kan f.eks. også være i anvendelse af en anden interpolationsrutine på de eksisterende tolkningspunkter eller eventuelt optegning af et antal nye profiler. Efter ændring og tilføjelse af tolkningspunkter skal der foretages en ny interpolation og validering samt en ny usikkerhedsvurdering i de områder, hvor justeringer er foretaget. Ligeledes kan det være nødvendigt at supplere beskrivelsen af modellen, og det anbefales, at der i forbindelse med justeringen føres en detaljeret logbog over de foretagne justeringer, samt i størst muligt omfang indlægges information direkte i tolkningsdatabasen.

Såfremt det i forbindelse med en justering opdages, at lagfølgen ikke kan tilpasses de nye data, stoppes processen og der foretages en fornyet vurdering af modellen (pkt. 1). På baggrund af de anbefalinger, som vurderingen munder ud i, kan det eksempelvis vælges at retolke modellen.



Figur 4-12: Flowdiagram for opdatering af geologiske modeller (modificeret efter Sandersen & Sørensen, 2010).

4) Retolkning af eksisterende geologiske modeller

Ved en retolkning af en model gennemføres grundlæggende ændringer i modellen, f.eks. ved tilføjelse eller fjernelse af modellag eller ved grundlæggende ændringer i lagkorrelationerne. En retolkning begrundes ud fra en fornyet og bedre forståelse af geologien.

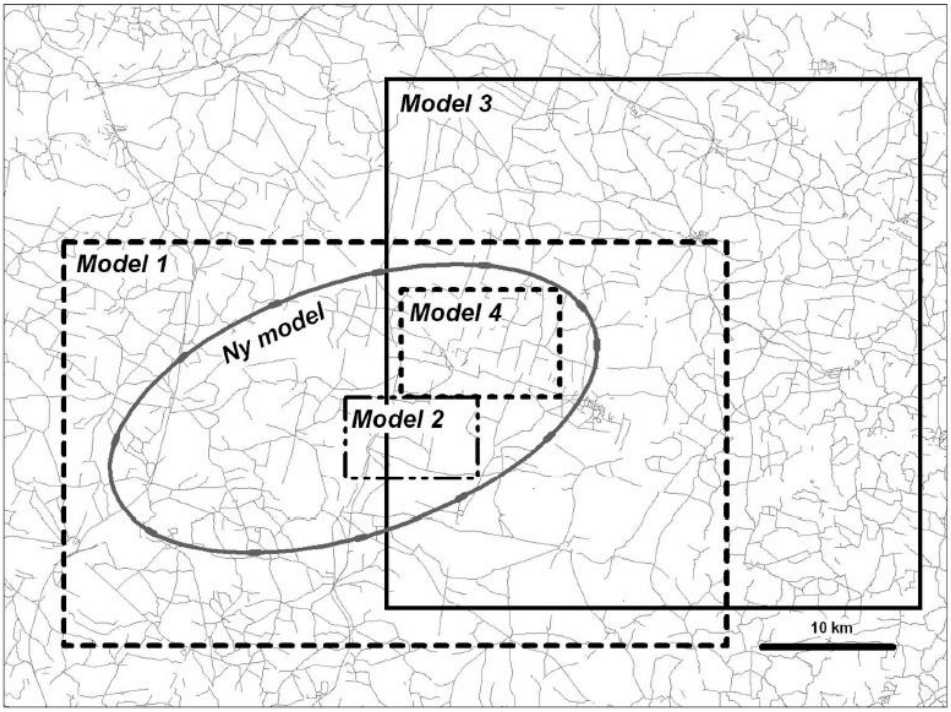
En retolkning vil omfatte gennemgribende retolkninger af store dele af lagserien i hele eller dele af modelområdet. Retolkningen kan derfor reelt resultere i en helt ny rumlig geologisk og hydrostratigrafisk model. Erfaringsmæssigt vil indsamling af ny fladedækkende geofysik, såsom SkyTEM, bidrage til et forøget geologisk vidensniveau og dermed initiere gennemgående retolkninger i områder, der tidligere er geologisk tolket uden SkyTEM data.

I forbindelse med en retolkning er det vigtigt at forholde sig til de tolkningsmæssige retningslinjer som eventuelt er opsat i den eksisterende model. Det kan eksempelvis være en definition af, hvorledes geofysiske modstande vægtes i henhold til geologisk tolkning af sandmagasiner. Et andet eksempel på tolkningsmæssige retningslinjer er, at der bl.a. på Fyn, i en hydrostratigrafisk kontekst, arbejdes med koteniveauer relateret til forskellige sandmagasiner. Det skal inden retolkningen besluttes om disse retningslinjer kan videreføres eller skal tilpasses i forbindelse med retolkningen.

Det anbefales, at der i forbindelse med retolkningen løbende føres en logbog, der dokumenterer de markante forståelsesmæssige forskelle mellem den eksisterende tolkning og den nye retolkning. Som minimum bør der i en logbog leveres en kortfattet skriftlig afrapportering af de foretagne ændringer. Ved omfangsrige retolkninger vil afrapporteringen i højere grad ligne en egentlig model-afrapportering.

5) Sammenkobling af eksisterende geologiske modeller

Ved sammenkobling af geologiske modeller forstås en fysisk sammenkobling af flere lokale og/eller regionale modeller til én samlet model. Som udgangspunkt vil formålet med den sammenkoblede model være udslagsgivende for modellens detaljeringsgrad. Modellerne kan grænse op til hinanden, være helt eller delvist overlappende eller ligge et stykke fra hinanden (*Figur **4-13***). Derfor skal der også tages stilling til, hvorledes disse forskellige situationer skal håndteres.



Figur 4-13: Eksisterende modeller (Model 1–4) og en ny, planlagt model (Tænkt eksempel; fra Sandersen & Sørensen, 2010).

Ved sammenstillingen af modellerne skal den nye, samlede model gerne være sammenhængende og have en ensartet opbygning. Det kan være, at der alene er tiltænkt en sammenkobling af eksisterende lagflader i modellerne (2D grids) eller måske en mere indgående sammenkobling af hele modelstrukturen (tolkningspunkter, interpolation af nye lagflader m.v.). En typisk problemstilling i processen vil være, at modellerne er opstillet på forskellig måde, har haft forskellige formål, og består af forskellige laginddelinger (eller litologiklasser ved voxels). Dette kræver, at der inden modellerne kan sammenkobles, sker en vurdering af forskelle og ligheder mellem modellerne (pkt. 1).

Selvom to modeller grundlæggende er ens opbygget, så vil de dog altid være opstillet individuelt som lokalmodeller med forskellige fokusområder. Det betyder, at modelrandene – som typisk udgør de områder, hvor lagene skal kobles sammen – samtidig er de områder, hvor modellen er mest usikker. For at sikre en ensartethed i den sammenstillede model, er det typisk nødvendigt at udvide det eksisterende

profilnetværk og foretage supplerende tolkninger i randområderne og gennemføre supplerende tolkning i henhold til punkt 3. og/eller 4.

4.5.4 Opdatering af voxel-modeller

Voxelmodeller (se afsnit 5.2) er opbygget af ”kasser” med fastlagte dimensioner (XYZ) der udfylder hele modelrummet, og som i modelleringen tilskrives egenskaber, såsom litologitype. Det er en væsentligt anderledes tilgang end lagmodellering, og principperne i voxelmodellering medfører derved nogle overvejelser og udfordringer med henblik på opdatering af en voxelmodel og/eller sammenkobling af en voxelmodel med én eller flere lagmodeller.

Opdatering af eksisterende voxel-modeller
Voxelmodeller vil udover et eller flere 3D grids, indeholdende de tolkede litologiske egenskaber i hver enkelt voxel, også typisk have tilknyttet nogle tolkede lagflader, som benyttes til afgrænsning af skift i geologi/stratigrafi. Det er centralt at have et kendskab til og dokumentation af disse hjælpeflader, for at have det rette overblik, inden en opdatering påbegyndes.

Selve opdateringen skal resultere i, at et ønsket antal voxler i det samlede 3D-modelgrid er blevet erstattet med opdaterede egenskaber, typisk en specificeret litologi. Afhængig af omfanget af den pågældende opdatering er der flere tilgange:

- Det kan i nogle tilfælde være tilstrækkeligt at justere tilknyttede lagflader (de beskrevne principper for lagmodellering, se afsnit 5.1), og derefter overskrive eksisterede voxels med nye egenskaber afgrænset i rummet af de justerede lagflader
- Hvis opdateringen baserer sig på nye fladedækkende geofysiske data, kan der på grundlag af et 3D resistivitetsgrid med samme dimensioner som voxelgriddet, foretages en opdatering med udgangspunkt i definerede resistivitetsniveauer med henblik på at overskrive voxels med opdaterede egenskaber
- Et 3D boringsgrid kan ligeledes anvendes som et opdateringsgrundlag, hvor voxels ved nye boringer tilskrives opdaterede egenskaber. Der skal her foretages en faglig vurdering af, hvor langt informationerne fra boringsdata kan interpoleres ud i modelrummet.
- Det kan i nogle tilfælde være nødvendigt med en mere manuel gennemgang og retolkning af den eksisterende model, hvor de tilgængelige værktøjer i den anvendte software benyttes (typisk GeoScene3D)
- Endvidere er det en mulighed at kombinere en modelopdatering med anvendelse af geostatistiske metoder, såsom Multi Point Statistics (MPS), se afsnit 5.2.

Udfordringer ved sammenkobling af voxelmodeller med lagmodeller
At koble en voxelmodel og lagmodel er ikke en ligefrem øvelse, da voxelmodellen indeholder information i alle voxler og dermed typisk indeholder en højere detaljerigdom. Endvidere er der den afgørende forskel, at voxelmodellen ikke er repræsenteret ved gennemgående lagflader for hvert modellag/litologi-klasse. Det vil derfor give tab af informationer og typisk være omstændeligt, hvis en voxelmodel skal konverteres til en lagmodel.

For at imødekomme problemstillingen kan det derfor være nødvendigt at tilskrive modellagene i den/de tilstødende lagmodeller litologiske klasser fra den aktuelle voxelmodel. Dvs. udvide 3D griddet og derved opnå en udvidet voxelmodel, hvor informationerne i den eksisterende voxelmodel bevares og modellagene i lagmodellen tilskrives voxels med samme dimensioner, som det oprindelige 3D grid.
Hvorvidt denne fremgangsmåde er brugbar vil afhænge af, hvad den sammenkoblede models overordnede formål er, og hvordan den efterfølgende skal anvendes.

4.5.5 Dokumentation af udført opdatering

Uanset om processen med opdatering har omfattet en konvertering af en model, en modeljustering, en retolkning af én/flere model(ler) eller en sammenkobling af modeller, så bør arbejdet dokumenteres så det er synligt, hvilket arbejde der er udført. Ligeledes giver dokumentationen en tryghed for brugerne af den opdaterede model og et grundlag, der kan udbygges ved senere opdateringer. Konkret er det væsentligt at inkludere følgende i dokumentationen:

Dokumentation ved ændringer af den geologiske forståelse

- Det bør dokumenteres, hvis ny viden har medført introduktion af nye modellag og dermed et supplement af tolkningspunkter. Erfaringsmæssigt vil fladedækkende data bidrage til at opløse eksempelvis begravede dalstrukturer eller områder, der er præget af glacialtektonik, hvilket kan have en direkte indvirkning på den hydrogeologiske forståelse
- Den tolkningsmæssige usikkerhed efter endt opdatering bør dokumenteres, da den vil adskille sig fra situationen før opdateringen

Dokumentation i tolkningsdatabase

- Det bør dokumenteres, hvorfra de enkelte tolkningspunkter i den opdaterede database kommer. Hvert tolkningspunkt bør tilskrives et unikt ”stempel”, som angiver, hvorvidt tolkningspunktet er fra den seneste opdatering eller en tidligere tolkning
- Ved sammenkobling af flere modeller bør alle attributter til de enkelte tolkningspunkter videreføres til den nye samlede tolkningsdatabase, såsom usikkerhed på tolkningspunkter og eventuelle bemærkninger tilknyttet punktet

Dokumentation af lagflader

- Ved opdatering af lagmodeller vil der typisk blive genereret nye lagflader på grundlag af det opdaterede tolkningspunkttema. Valg af interpolationsrutine bør dokumenteres så lagfladerne kan genskabes og sammenlignes
- Ligeledes er det centralt at dokumentere, hvilke lagflader, der er tilknyttet de enkelte modellag, så der ikke kan opstå tvivl herom

Dokumentation ved voxelmodellering

- Det er ved voxelmodeller væsentligt at dokumentere, hvilke litologiklasser, som indgår i voxelgriddet, og hvorledes disse er fastlagt. Er der f.eks. tilskrevet nye litologiklasser til voxelgriddet i forbindelse med opdateringen?
- Det bør dokumenteres hvilke 2D lagflader, der indgår som støtteflader i modelleringen, og hvordan er de fremkommet og justeret i forhold til hinanden. Det kunne f.eks. være tolkning af

bunden af kvartære dalstrukturer mv. Ligeledes skal tolkningspunkter og lagflader anvendt til afgrænsning af geologiske eller litologiske enheder dokumenteres efter opdateringen

Det anbefales:

- at der sker en nøje gennemgang, vurdering og prioritering af de data, der ligger til grund for de eksisterende geologiske modeller, som skal sammenkobles og/eller opdateres. Dette skal gøres for at undgå at skulle kassere tidligere udført arbejde, men også for at undgå at utidssvarende og dårligt dokumenterede modeller kommer i spil
- at vurderingen af de eksisterende modeller foretages inden opdateringsarbejdet igangsættes, for bedre at kunne estimere den samlede opdaterings omfang
- at der udføres en cost/benefit analyse af modelopdateringen/-sammenkoblingen
- at der sker en grundig dokumentation af modelopdateringen/-sammenkoblingen

5. 3D geologisk modellering - Modelleringsteknik

5.1 Lagmodellering

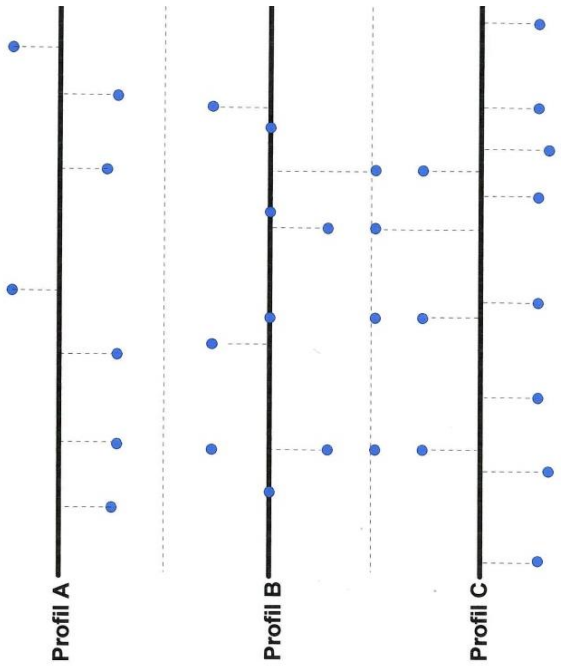
En lagmodel består i princippet af lagflader, som for hver enkelt lags vedkommende defineres af et sæt tolkningspunkter i rummet og en tilhørende interpoleret flade. Disse punkter indarbejdes normalt i modellen ved digitalisering/tolkning på profiler og/eller horisontale snit. Selve lagfladen i lagmodellen består derfor af et sæt grundlæggende tolkningspunkter med tilhørende interpolerede gridflader. Lagfladerne kan alternativt tolkes ved hjælp af modellering af selve griddet (se afsnit 5.1.8), men ved denne proces indlægges der ikke tolkningspunkter i modellen.

På grundlag af de skabte flader defineres mellemrummene mellem fladerne som lag. Både lag og lagflader tilknyttes diverse information om f.eks. tolkninger, beslutninger, datagrundlag og usikkerhed. Dette gøres i tilhørende tekst, men så vidt muligt også direkte i modellen på digital form.

Lagmodellen skal ikke nødvendigvis bestå af gennemgående lagflader/lag. Lag og lagflader kan afgrænses lateralt, hvis de har en geologisk set begrænset udbredelse.

5.1.1 Profilnetværk og projektionsafstande

Tilgangen til opstilling af en geologisk lagmodel kan variere fra situation til situation, men i de fleste tilfælde bygges modellen op omkring et profilnetværk, som på passende måde dækker modelområdet. Profilerne danner udgangspunkt for en modellering af de laggrænser og lag som skal definere modellen. Det kan vælges at arbejde med et regulært eller et irregulært profilnetværk eller en blanding af de to typer. Det mest hensigtsmæssige profilnet for en given model opbygges på baggrund af en afvejning af flere forhold, så som modellens ønskede detaljeringsgrad, antal og type af datapunkter/dataprofiler og forventet forekomst af geologiske strukturer. I langt de fleste tilfælde er det mest fordelagtigt at anvende et irregulært netværk af profiler, fordi det med dette vil være muligt at lade profilerne gå gennem eller tæt på udvalgte, vigtige data.



Data vil normalt blive projiceret vinkelret ind på det geologiske profil og det enkelte datapunkt vil derfor ikke nødvendigvis vises på det korrekte geografiske sted. Dette er illustreret på *Figur **5-1***.

.

Figur 5-1: Projektion af datapunkter til profiler.

Afhængig af den valgte maksimale projektionsafstand (også kaldet ”bufferafstand”; vist med stiplet linje), vil data fra varierende afstande komme til at stå side om side på profilerne. Generelt vil det være at foretrække, at data har så lille en afstand til profilet som mulig, da projektionsfejlen herved minimeres. Men samtidigt er det vigtigt at samle så mange data på profilet som muligt, for at få skabt et overblik over data og geologi. Tolkning langs profiler er den foretrukne fremgangsmåde ved geologisk modellering, hvilket vil sige, at tolkningen reelt sker i 2D – ikke i 3D (se også afsnit 5.1.7 om 3D-visualisering og tolkning). Det er af praktiske grunde ikke muligt at undgå projektion af data og det er vigtigt at modelløren under sit arbejde hele tiden tager højde for de enkelte datas projektionsafstande og at problemstillingen vurderes og beskrives nøje.

Ved projektion af data ind på profilet vil der, hvis der ikke i tolkningen tages højde for det, påføres en usikkerhed. Dels giver projektionen af data et forvrænget billede af geologien, og dels kan frie tolkningspunkter blive afsat forkert i forhold til de betragtede data. Tolkningspunkter der ”snappes” til datapunktet (projiceres ud i datapunktet og væk fra profilet) uanset afstand fra profilet, og frie tolkningspunkter vil altid ved profiltolkning blive sat på profillinjen.

Fremgangsmåde og problemstillinger

I første omgang kan det være nyttigt at udarbejde nogle nøgleprofiler gennem modelområdet, som via en illustration af stratigrafien kan give et overblik over den overordnede geologi. Til dette formål kan det f.eks. være tilstrækkeligt med få velvalgte profillinjer placeret på tværs af vigtige geologiske strukturer og gennem dybe velbeskrevne boringer. Dernæst kan der dannes et profilnet, der dækker hele modelområdet. Profilnettet kan opbygges fra starten af modelarbejdet, men kan også opbygges undervejs. Nogle optegner indledningsvist et dækkende netværk af profiler, hvori man så udfører de grundlæggende tolkninger. Herefter kan der så udlægges supplerende profillinjer, som tilfredsstiller nye synsvinkler og opfattelser af data opnået under den indledende tolkning og modelopstilling. Endvidere vil der ofte være behov for at optegne profillinjer alene ud fra et behov for at få digitaliseret yderligere tolkningspunkter, således at den flade der arbejdes med, bliver tilstrækkeligt rumligt modelleret.

Det vil normalt være fordelagtigt at placere profillinjer langs geofysiske målelinjer. Dette kan f.eks. være langs seismiske linjer, MEP-linjer eller SkyTEM-linjer. Dette gøres for at undgå projektionsafstandene til disse data, således at profilet viser de korrekte geometriske forhold af data, så placering af tolkningspunkter sker i de rigtige rumlige positioner.

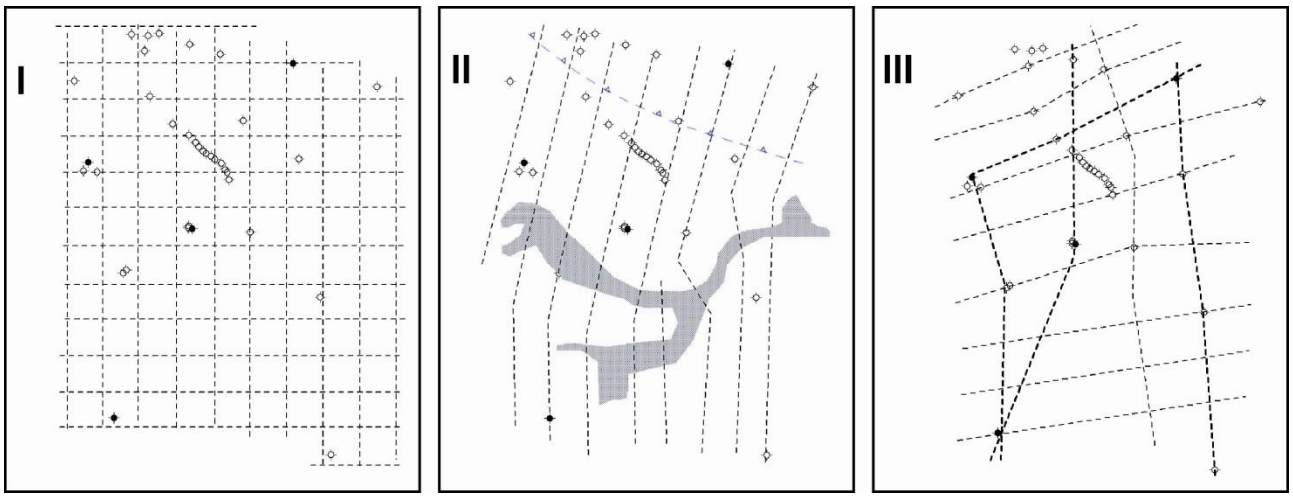
Den projektionsafstand, der vælges for de enkelte datatyper, bør variere i forhold til datatype, datatæthed og geologi. Dog skal det altid sikres at projektionsafstanden i forhold til geologiske forhold er gennemtænkt.

<u>Projektionsafstand i forhold til geologi:</u>

Det væsentligste er, at de data der projiceres ind på profillinjerne på trods af projektionsafstanden, også repræsenterer de geologiske forhold på selve profillinjen. Det vil sige, at der skal være korrelation mellem de informationer data giver og så de forventede geologiske forhold langs profillinjen. Projektionsafstanden mellem data og profil kan derfor uden problemer være stor i områder med homogene geologiske forhold, mens den bør være lille når geologien er inhomogen.

Projektionsafstand i forhold til datatæthed:
I datasvage modelområder kan man vælge at gøre sin buffer større end normalt, for at få så mange data som muligt ind på profilerne, og omvendt kan bufferen i modelområder med mange data gøres mindre, så man kan reducere datamængden på profilerne. Igen skal man være varsom med store projektionsafstande, hvis geologien er inhomogen.

Projektionsafstand i forhold til datatype:
Projektionsafstanden anbefales som udgangspunkt at være individuelt fastlagt for hvert enkelt datasæt. Jo mindre fokusdybden for datasættet er, desto mindre bør projektionsafstanden generelt være. Hvis man f.eks. sammenligner TEM og PACES vil TEM primært fokusere på relativt store dybder med midling over store jordvoluminer, mens det modsatte gælder for PACES. Derfor kan man typisk tillade en stor projektionsafstand for TEM (f.eks. 250 m) og kun en forholdsvis lille afstand for PACES (f.eks. 75 m). For nogle datatyper er det muligt at reducere problemet med store projektionsafstande. TEM-data kan f.eks. vises som middelmodstandsgrids på profilerne som støtte for tolkningen. Herved vises de interpolerede værdier på profillinjernes position (se afsnit 3.2.2).



Figur 5-2: Profilnetværkstyper. I: Regulært, ortogonalt netværk. II: Irregulært netværk udlagt i forhold til geologi. III: Irregulært netværk udlagt i forhold til data (udarbejdet af John Vendelbo Frandsen, Orbicon).

Samtidig med at man sikrer, at ovennævnte hensyn er taget, er det vigtigt at finde en balance mellem profilafstanden og projektionsafstanden for profilerne, således at man på den ene side får så mange relevante data med som muligt, og på den anden side ikke drukner profilerne i data, så overblikket tabes. Optimalt set kan man sige, at bufferen for boringerne og andre centrale datatyper som minimum bør sættes således, at alle boringer og andre relevante data vises på mindst ét profil. På den måde sikrer man, at alle vigtige data faktisk tages i betragtning i modelleringen. Hvorvidt det skal tilstræbes at få så mange data med som muligt på profilerne, vil i øvrigt også afhænge af faktorer som områdets størrelse og den ønskede detaljeringsgrad.

Profil-netværkstyper
Når der optegnes profiler i modellen vil profilerne kunne placeres tilfældigt i forhold til data, dvs. typisk i et regulært orthogonalt netværk, eller i et mere subjektivt placeret, irregulært netværk, hvor profilerne i højere grad følger data (se *Figur **5-2***). Det irregulære profilnetværk vil typisk give profiler med knæk, og projektionsafstanden kan derved minimeres. Men da det sjældent kan lade sig gøre at få profilerne til at

gå lige gennem alle de ønskede data, må en vis projektionsafstand accepteres – i hvert fald for nogle af datasættene.

I det følgende gennemgås kort problemstillinger omkring anvendelsen af henholdsvis regulære og irregulære profilnetværk.

Regulært profilnetværk

Når der arbejdes med regulære profilnetværk betyder det ofte, at der kan opstå relativt store projektionsafstande. For hver enkelt datatype vælges størrelser for projektionsafstande, som på den ene side søger at imødekomme ønsket om at bibeholde geologisk korrelation mellem datapunkt og profillinje, og på den anden side søger at opnå tilstrækkeligt med data på profilerne, således at der gennem en visualisering af disse kan opnås en geologisk forståelse.

Fordelen ved at anvende det regulære profilnetværk er, at man får en så objektiv tilgang til data som muligt. Efterfølgende kan man aktivt frasortere data, der enten er for langt fra profilet eller er for dårlige – eller begge dele. På den måde får man et godt overblik over sine data inden de geologiske tolkninger foretages. Ulemperne er, at der kan fås store projektionsafstande, og at det efterfølgende kan være nødvendigt af frasortere vigtige data på grund af for store projektionsafstande.

Irregulært profilnetværk

I det irregulære netværk lader man profilernes placering styre af, hvor data findes, og der oprettes typisk knækkede profiler fra datapunkt til datapunkt eller tæt forbi de væsentligste datapunkter for at minimere projektionsafstanden. På trods af, at der arbejdes med knækkede profillinjer, bør linjerne have et nogenlunde retlinet forløb gennem modelområdet, da muligheden for at forstå de geologiske forhold langs de enkelte profiler ellers kan gå tabt. Det er normalt ikke muligt at lade profilerne gå direkte gennem alle datapunkter, og derfor må der foretages en prioritering af, hvilke data det er vigtigst at minimere projektionsafstanden til. Det kan eksempelvis vælges, at profilerne går fra boring til boring, hvorved det bliver de geofysiske data, der projiceres ind på profilerne. For at mindske projektionsfejlen, kan der anvendes interpolerede 3D-resistivitetsgrids. En anden mulighed vil være at lade profilerne følge SkyTEM-flyvelinjerne, hvis der er forefindes SkyTEM-data.

Ved udlægning af irregulære netværk kan der også tages hensyn til de geologiske forhold. Har de geologiske strukturer en overordnet hældning eller foretrukken retning er det fordelagtigt at udlægge profilerne i forhold til dette (vinkelret på strukturernes retning og parallelt med hældningsretningen).

Flytbare profiler

I modsætning til ovennævnte faste profiler kan der arbejdes med flytbare profiler. Med flytbare profiler kan man vise modelrummet og dets data alle steder og i alle retninger, og man kan nemt afsætte tolkningspunkter præcist der hvor man gerne vil have dem placeret. Ulempen ved at arbejde med flytbare profiler er, at det er vanskeligt at dokumentere sit arbejde, da disses placeringer ikke bliver gemt, og profilerne kan dermed ikke så let genskabes. En anden ulempe er, at de flytbare profiler i GeoScene 3D er rette, hvilket betyder en anden grad af projektion end de irregulære profiler, hvis modellen i øvrigt er opbygget af sådanne. En kombination mellem faste og flytbare profiler er en god mulighed eller man kan vælge kun at bruge flytbare profiler til kontrol af modelleringen undervejs i processen.

Det anbefales:

- at der anvendes en blanding af profiltyper, som er tilpasset de aktuelle problemstillinger i modelområdet
- at der oprettes en række nøgleprofiler, som går gennem højt prioriterede data og som samtidigt forventes at give et godt indblik i områdets geologiske opbygning
- at der ved anvendelse af irregulære profiler tilstræbes en vis ensartethed – f.eks. overordnet V-Ø og S-N – for at kunne opretholde overblikket undervejs i modelleringen
- at data generelt får så lille en afstand til profilet som mulig, da projektionsfejlen herved minimeres. Men samtidigt er det også vigtigt, at samle så mange data på profilet som muligt, for at få skabt et overblik over data og geologiske forhold

5.1.2 Punkttolkning

Punkttolkning er et grundlæggende element i den geologiske modellering. Med punkttolkning menes digitalisering eller afsætning af tolkede punkter i rummet. Disse punkter benævnes tolkningspunkter og anvendes normalt til at angive beliggenhed af geologiske og hydrostratigrafiske laggrænser. Ved placering af hvert tolkningspunkt hører en tolkning og en antagelse af tilstedeværelsen af en laggrænse i netop det valgte sted i modelrummet. Tolkningspunkterne er den geologiske models grundlag, og punkterne kan interpoleres til lagflader. Hovedparten af arbejdet med punkttolkning foregår ved tolkning på vertikale profiler, men der kan også laves punkttolkning i kortplanet og i egentlige 3D tolkningsmiljøer.

Terminologi og definitioner
Der findes forskellige typer af punkter og disse kan inddeles i tolkningspunkter og hjælpepunkter:

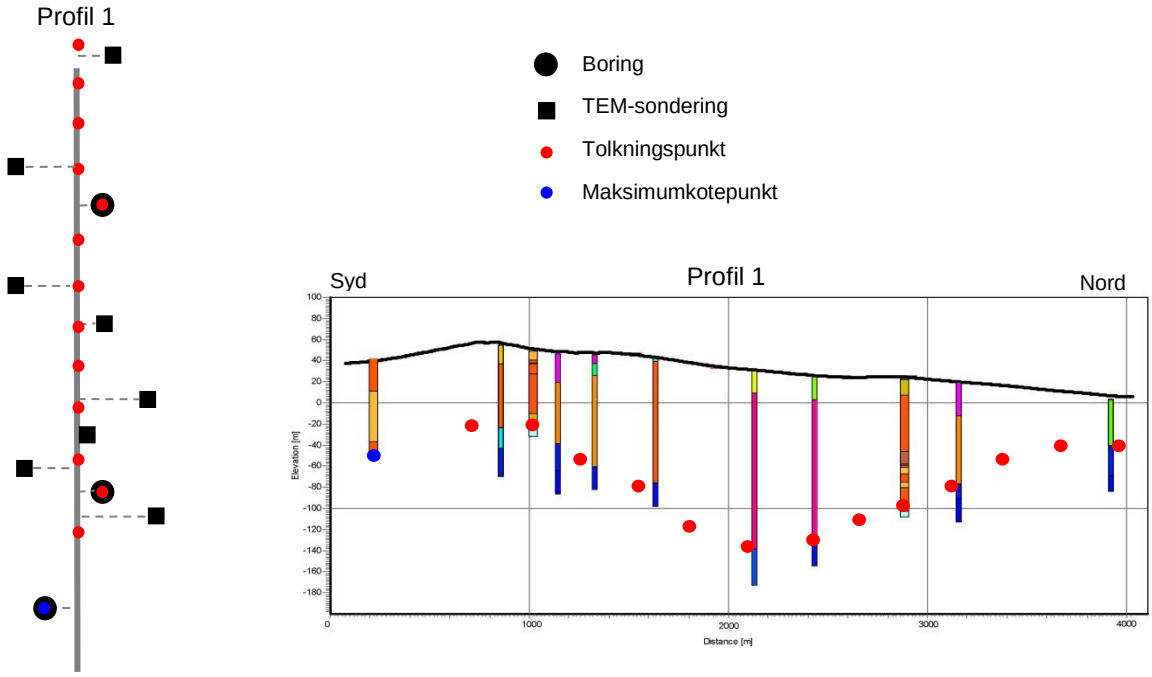
- *Tolkningspunkter:*
  - *Snappede tolkningspunkter:* Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet. Et snappet tolkningspunkt er tilknyttet et datapunkt i modelrummet. Dette vil normalt være en laggrænse i en boring, i en geofysisk sondering eller på et seismisk profil.
  - *Frie tolkningspunkter:* Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet og har i modsætning til det snappede tolkningspunkt ingen præcis tilknytning til datapunkter. Et frit tolkningspunkt afsættes typisk på et vertikalt profilsnit eller et horisontalt kortsnit.

- *Hjælpepunkter:*
  - *Styrepunkter: Et styrepunkt er et frit punkt, der alene benyttes som styringspunkt når tolkningspunkterne skal interpoleres til grids. Styrepunkter angiver i udgangspunktet ikke en tolkning, men anvendes når man ønsker at styre sit grid på en forudbestemt måde – eksempelvis hvis man vil tvinge sin lagflade til at krydse en anden lagflade.*
  - *Afgrænsningspunkter: Afgrænsningspunkter definerer den laterale afgrænsning af en laggrænse.*
  - *Negativpunkter: Negativpunkter er en særlig type punkter, der anvendes, hvor et lag ikke eksisterer.*

- *Maksimumkotepunkter: Et maksimumkotepunkt definerer, at den tolkede laggrænse ligger dybere end punktet. Med andre ord vil det sige, at den tolkede laggrænse ikke menes at være til stede ovenfor punktet.*
- *Minimumkotepunkter: Minimumkotepunkter definerer, at den tolkede laggrænse ligger højere end punktet. Med andre ord vil det sige at tilstedeværelsen af den tolkede laggrænse ikke er til stede nedenfor punktet.*

I forhold til den første version af Geo-vejledningen er der foretaget følgende ændringer: 1) "Tolkningspunkter" blev tidligere benævnt "Fladetolkningspunkter", men definitionen er den samme. 2) "Styrepunkter" blev tidligere benævnt "støttende fladetolkningspunkter". Disse punkter er nu defineret som hjælpepunkter, og betragtes ikke længere som egentlige tolkningspunkter – de benyttes alene til at styre grids, hvor det ikke giver mening at tolke lagfladen – f.eks. over terræn. Negativ, maksimum og minimumkotepunkter er en del af tolkningspunkterne, men kan have en større usikkerhed i laggrænse

*Figur **5-3*** illustrerer brugen af tolkningspunkter. Frie tolkningspunkter er knyttet til profilet, mens de snappende tolkningspunkter er projiceret ud på data - i dette tilfælde boringer. Brugen af maksimumkotepunkter er også vist. Her ses den tolkede flade ikke i boringen, og den tolkede flade har derfor ved boringslokaliteten en maksimal kote i boringens bund.



Figur 5-3: Anvendelse af tolkningspunkter (se forklaring i teksten).

Tolkningspunkterne benyttes til at definere og modellere lagfladers former. Det er disse punkter, samt eventuelle styrepunkter, der indgår ved en eventuel interpolation af lagfladen/laggrænsen.

Bortset fra styrepunkterne er hjælpepunkterne ikke punkter, der definerer lagfladernes rumlige former, og de indgår derfor ikke i interpolationen. Disse punkter anvendes som en hjælp ved modelleringsarbejdet. I *Figur **5-3*** ses brugen af nogle af de forskellige punkter.

Anvendelse

Snappede tolkningspunkter

Snappede tolkningspunkter afsættes normalt på profiler. I GeoScene 3D kan man vælge at binde/snappe sine tolkningspunkter til data, der er vist på profilet. Dette foregår ved, at det afsatte punkt fra profilet projiceres ud på datapunktet. Data vil normalt være boringer eller geofysiske sonderinger, og ved snap kan der vælges en laggrænse i datasøjlen, således at tolkningspunktet også bliver knyttet til en kote. Data kan også være seismiske profiler, men her snappes kun geografisk og ikke til en kote.

Fordelen ved at snappe sine tolkningspunkter til data er selvfølgelig, at de bliver mere præcist anbragt i modelrummet. Man skal dog her huske, at profilet visualiserer geologien i det valgte profilsnit med data projiceret ind fra valgte projektionsafstande fra begge sider af profilet, og at det der ses, således er et slags gennemsnit af geologien inden for bufferzonerne fra selve profilsnittet. Ved at snappe til datapunkter afviges der fra dette gennemsnit. Med andre ord kan geologien være afvigende ude i de enkelte datapunkter i forhold til den geologi, der tolkes på profillinjen. Denne problemstilling stiger naturligvis med øget profilafstand og store dataprojektionsafstande. Baseres tolkningen af en given lagflade primært på interpolerede data langs profillinjen, eksempelvis 3D-datagrids (se afsnit 4.4 om interpolation af data og afsnit 3.2.2 om TEM-data), der jo visualiserer interpolerede værdier langs profillinjen, skal der i udgangspunktet ikke anvendes snappede tolkningspunkter.

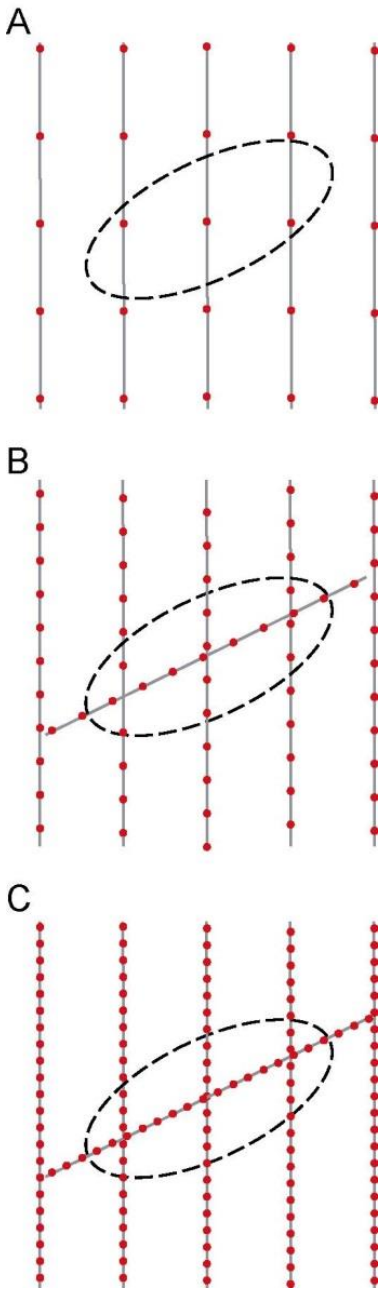
I GeoScene 3D er det muligt at tilskrive en standardafvigelse (usikkerhed) til ethvert tolkningspunkt. Der kan også defineres en standardafvigelse til de enkelte datasæt, og denne standardafvigelse kan automatisk sættes til at blive overført til de tolkningspunkter, der snappes til det pågældende datasæt. Man kan vælge at lade standardafvigelserne indgå i kriging-interpolationen af punkterne.

Frie tolkningspunkter

Frie tolkningspunkter har ingen specifik datatilknytning (dvs. ej snappede), og kan enten digitaliseres i vertikale profiler eller i kortplan. Ved tolkning i profiler placeres punkterne, så lagfladen får et forløb, der stemmer overens med geologens forventninger.

De frie tolkningspunkter afsættes på steder, hvor den tolkede flade vurderes at befinde sig. Ofte vil fladen i et profil kunne tolkes kontinuert gennem profilet, og så skal fladen digitaliseres med et passende antal tolkningspunkter. Det anbefales som udgangspunkt, at antallet af tolkningspunkter langs den tolkede laggrænse tilpasses den opløselighed af geologien, som data og tolkning muliggør – det vil sige detaljeringsgraden af tolkningen (*Figur **5**-**4***). På profilet skal rette linjer mellem tolkningspunkterne kunne afbilde laggrænsen, så den gengiver den opnåede forståelse/tolkning af laggrænsens forløb. Når dette er opnået, er det i princippet ikke nødvendigt at afsætte yderligere punkter (se *Figur **5**-**5***). Dog kan det ofte være fordelagtigt at tilføje yderligere tolkningspunkter i områder med få tolkningspunkter af hensyn til interpolationen. Dette gøres for at begrænse størrelsen af den anvendte søgeradius.

Frie tolkningspunkter bliver ofte omtalt som ”støttepunkter”, men dette er en misvisende benævnelse, da disse punkter ofte anvendes som en grundlæggende del af modelleringen og således ikke kun anvendes som sekundær støtte. Der vil normalt ikke være data nok til, at der med snappede tolkningspunkter kan dannes naturlige og troværdigt formede lagflader (i forhold til geologens tolkning og forståelse). De frie tolkningspunkter vil derfor generelt skulle benyttes i stor udstrækning og vil ofte have en stor grad af sikkerhed.



Ved modellering med frie tolkningspunkter i profiltolkning kan det give mening at afsætte sine frie tolkningspunkter på en ret linje mellem de to nærmeste datapunkter og ikke på profilet (se *Figur **5-6***). Dette kræver et supplerende profil, evt. et flytbart profil.

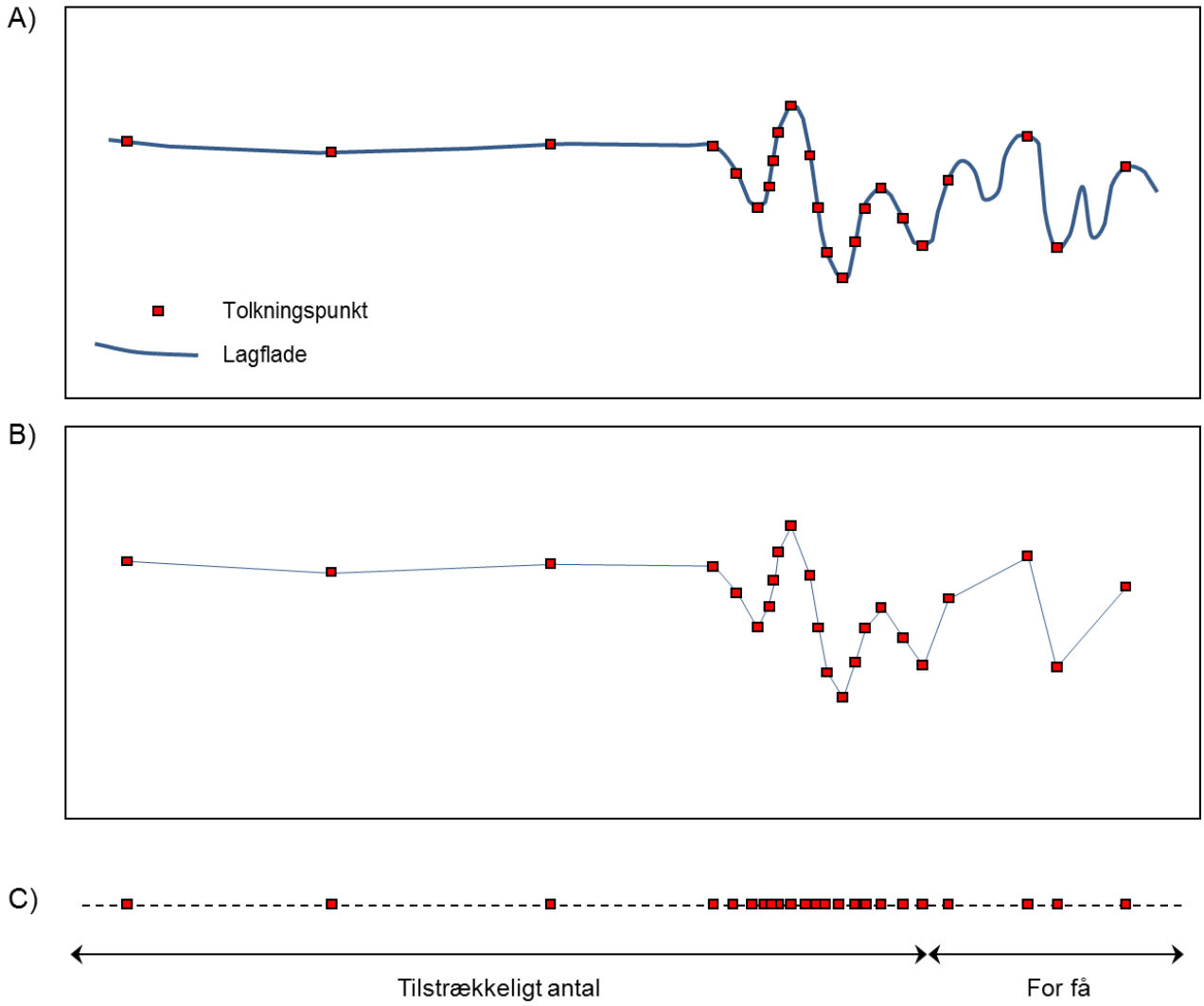
Styrepunkter

Styrepunkter anvendes alene med henblik på at sikre, at interpolationer af de tolkede lagflader kan styres. Dette vil typisk være i randområderne af et lags udbredelse, hvor man f.eks. gerne vil have lagflader til at krydse hinanden (hvis der f.eks. forekommer en erosionsflade) eller hvis man gerne vil have en lagflade til at krydse terrænoverfladen. I sidstnævnte tilfælde kan det være fordelagtigt at placere styrepunkter over terræn. Styrepunkterne er derfor ikke et tolkningspunkt, da det ikke angiver en tolket placering af en lagflade. Styrepunkter kan anvendes som en hjælp under modelleringen, da det i randområderne kan være meget tidskrævende at styre sine grids alene ved hjælp af tolkningspunkter.

Afgrænsningspunkter

Ofte vil en lagflade tolkes at have en begrænset udbredelse, og for at modellere dette anvendes afgrænsningspunkter. Disse indarbejdes i modellen langs den tolkede lagflades maksimale udbredelse. Uden en afgrænsning vil det i modellen fremstå som om lagets eller lagfladens fortsættelse er uvis og dermed utolket. Afgrænsningspunkterne tilknyttes ikke en bestemt kote. Det er kun X- og Y-koordinaterne, der skal benyttes i det videre arbejde. Punkterne anbringes i modellen ved hjælp af horisontaltolkning. Punkterne danner en region, som kan anvendes når grids skal begrænses i udbredelse ved afskæring. Denne procedure er understøttet af GeoScene 3D. Punkterne kan også anvendes i anden forbindelse; f.eks. ved optegning af forkastningsforløb (se afsnit 5.4 om modellering af forkastninger, begravede dale og andre strukturer).

Figur 5-4: Punkttæthed. Geologisk struktur vist med sort stiplet linje, profiler med grå linjer og tolkningspunkter med røde punkter. A: For få punkter til at beskrive strukturen. B. Passende punkttæthed. C. For mange punkter.



Figur 5-5: Tæthed af tolkningspunkter. A) Tolkningspunkter afsat på lagflade langs et profil. B) Samme tolkningspunkter forbundet med rette linjer. C) Den laterale tæthed af tolkningspunkter langs profilet. I den højre del af profilet er der afsat for få tolkningspunkter for at gengive formen af lagfladen tilstrækkeligt. Bemærk, at den tilstrækkelige tæthed af tolkningspunkter er afhængig af fladens detaljeringsgrad.

Negativpunkter

En særlig type punkter er "negativpunkter", som er hjælpepunkter til afgrænsning af flader. Punkterne placeres f.eks. på boringer, hvor eksistensen af et givent lag eller laggrænse kan udelukkes. Anvendelsen af negativpunkter er nærmere beskrevet senere i afsnittet om afgrænsning af lag og lagflader.

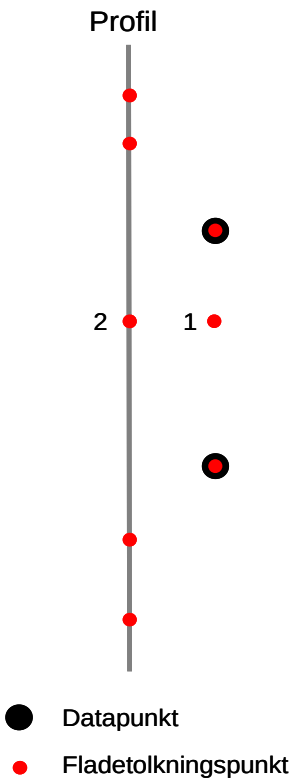
Maksimumkotepunkter

Maksimumkotepunkter afsættes på steder, hvor en laggrænse forventes at være til stede, men hvor den ligger dybere end data giver information om. Maksimumkotepunktet angiver derfor en maksimal kote (minimumsdybde) af den tolkede laggrænse. Sådanne punkter anvendes f.eks. hvis der forekommer en begravet dal i modellen, og hvor dalens bund og sider kun indirekte træder frem i data. På baggrund af maksimumkotepunkterne samt tolkningspunkterne kan der udtegnes et maksimumkotekort, som vil

kunne afsløre forløbet af dalen, men ikke den præcise dybde – kun minimumsdybden. Maksimumkotepunkterne kan evt. snappes til datapunkternes undergrænse.

Minimumkotepunkter

I specielle tilfælde kan man også benytte sig af minimumkotepunkter, hvis der f.eks. findes data, der ikke opløser geologien øverst i lagsøjlen (f.eks. boringer, der starter med en brønd i borebeskrivelsen). Minimumkotepunkter angiver en minimal kote (maksimal dybde) for en terrænnær laggrænse, der ikke ses i datapunktet, men som ud fra data kan udelukkes at befinde sig dybere end det pågældende niveau.



Usikkerheder og dokumentation

Tolkningspunkterne udgør et grundlæggende element i den rumlige geologiske model. De tolkninger der er udført, er repræsenteret i tolkningspunkterne. Skal modellen opdateres, rettes eller udbygges, er det tolkningspunkterne, der tages udgangspunkt i. Principielt ligger der antagelser og vurderinger bag ethvert tolkningspunkt, og uden en beskrivelse af disse, er tolkningen i realiteten uanvendelig for andre. Det vil sige, at alle tolkningspunkter på en eller anden måde bør tilknyttes beskrivelser af, hvad der danner baggrund for deres placering. Det kan naturligvis ikke lade sig gøre at dokumentere disse antagelser for hver gang et tolkningspunkt afsættes, og det må i stedet foregå på en mere effektiv måde. F.eks. kan man lave en beskrivelse af de antagelser, der gjort for hver tolket flade på hver profil, men mest optimalt er det, at indarbejde disse beskrivelser digitalt i modellen. Man kan evt. tilknytte kommentarer for hver gang man afslutter en digitaliseringsproces og har afsat en række tolkningspunkter. Der kan ligeledes tilknyttes en usikkerhed på hvert enkelt tolkningspunkt. Disse funktioner understøttes af GeoScene 3D. (Se i øvrigt afsnit 5.5.1 om usikkerhedsvurderinger og afsnit 6.1 om dokumentation).

Figur 5-6: Placering af frie tolkningspunkter ved profiltolkning. Enten placeres punktet mellem de to nærmeste tolkningspunkter (1) eller på profilet (2).

Det anbefales:

- at terminologien for tolkningspunkter og hjælpepunkter anvendes
- at typen af alle anvendte punkter registreres i tolkningsdatabasen i GeoScene 3D
- at der løbende ved de geologiske tolkninger tages stilling til, om antallet af afsatte punkter er optimalt

5.1.3 Profiltolkning

Profiltolkning står i modsætning til horisontaltolkning, gridtolkning og egentlig 3 D-tolkning.

Profiltolkning er den mest anvendte metode til opstilling af rumlige geologiske og hydrostratigrafiske modeller. Profilerne viser vertikale snit gennem lagserien, hvor data er projiceret ind fra valgte projektionsafstande. Profilerne udtegnes i regulære eller irregulære netværk gennem modelområdet, således at de dækker alle, eller i det mindste alle relevante data, og samtidig giver mulighed for, at de tilstedeværende geologiske strukturer kan opløses af de tolkningspunkter, der placeres langs linjerne (se tekst ovenfor om punkttolkning). Selve profiloptegningsproceduren er gennemgået tidligere.

Ved profiltolkning digitaliseres de tolkede punkter ind på profilet. Punkterne består af forskellige typer af tolkningspunkter og hjælpepunkter (se tidligere tekst om ”Punkttolkning”). Tolkningspunkterne repræsenterer lagflader og lagfladerne kan være lateralt afgrænsede.

Formål og fremgangsmåde
Formålet med profiltolkningen er, på en effektiv måde, at kunne opbygge en rumlig geologisk model eller en hydrostratigrafisk model, der bedst muligt repræsenterer den geologiske opbygning eller de hydrostratigrafiske forhold i et givet modelområde. Ved profiltolkning kan der effektivt sammenstilles forskellige datatyper inden for en begrænset zone gennem det geologiske modelområde. Således opnås et 2-dimensionelt overblik over sammenhængen mellem de forskellige forekommende datatyper og tolkninger.

Ved at starte med at tolke profiler med stratigrafisk informative nøgleboringer, og andre profiler med god datadækning, fås et grundlag for tolkningen af øvrige områder, hvor der er mindre god datadækning.

For at kunne overskue et modelområde på et profil, er man normalt nødsaget til at optegne profilet med vertikal overhøjning. Dette forvrænger virkeligheden og geologiske strukturer får unaturlige former. Det vil sige, at man ved tolkningen skal have en abstrakt forståelse af, hvordan strukturerne ser ud i data, og at man skal kunne modellere geologiske strukturer med den benyttede overhøjning. Man bør altid søge at begrænse overhøjningen mest muligt, og overhøjninger på mere end 10x er vanskelige at håndtere ved geologisk tolkning og modellering.

På profilet kan data visualiseres på en lang række forskellige måder. Dette er beskrevet under afsnit 4.3 om prioritering og visualisering af data og under beskrivelsen af de enkelte datatyper.

Det anbefales:

- at starte med at tolke profiler med stratigrafisk informative nøgleboringer, og andre profiler med god datadækning, da der derved fås et godt grundlag for tolkningen af områder med mindre god datadækning
- at der anvendes en visualisering af profilerne, som giver den bedst mulige gengivelse af de tolkede data og de geologiske forhold

5.1.4 Horisontaltolkning

Med horisontaltolkning menes tolkning og modellering i det horisontale plan. Som grundlag benyttes ofte forskellige korttemaer og forskellige former for visualisering af data i horisontale snit. Horisontaltolkning vil sjældent kunne stå alene, og vil normalt fungere som et supplement til profiltolkningen. Ved at kombinere profiltolkning og horisontaltolkning får modelløren et godt 3-dimensionelt overblik over data og de tolkede lag og lagflader. Et alternativ til denne pseudo-3D-modellering kan være egentlig 3D-modellering.

Horisontaltolkning i praksis
Horisontaltolkning kan i princippet udføres på to forskellige måder. På den ene måde digitaliseres tolkningspunkterne og eventuelle hjælpepunkter direkte på kortvinduets viste horisontale snit, hvorved ethvert afsat punkt tilknyttes det pågældende snits kote som Z-koordinat. I disse snit kan man som baggrund anvende data og korttemaer, der afspejler forskellige geologiske eller geofysiske forhold. Baggrundsdata kan være interpolerede geofysiske kort (f.eks. middelmodstandskort) eller punktdata (f.eks. boringer). I princippet foregår der her præcis det samme som ved profiltolkningen, blot er modelrummet drejet 90º. I snittene digitaliseres laggrænsernes skæring med det pågældende horisontale snit.

På den anden måde kan der i det horisontale view digitaliseres punkter med valgbare koter og herved opnås en optegning af punkter, som angiver konturlinjer for en given lagflade. Denne proces kan hjælpe til udformningen af lagfladerne. Når der digitaliseres punkter med valgbar kote vil horisontaltolkningen i de fleste tilfælde tage udgangspunkt i både tolkningspunkter fra profiltolkninger, hvor boredata, geofysiske data m.v. er blevet tolket i et netværk af profiler. Tolkningspunkterne for den laggrænse, der ønskes modelleret, afbildes i det horisontale plan med label for kote.

Evt. håndkonturerede kort for en given laggrænse baseret på fladekort og fladedata, samt både tolkningspunkter og hjælpepunkter kan indscannes, og de enkelte konturlinjer kan digitaliseres ind i modellen ved hjælp af horisontaltolkning og ved hjælp af valgbar kote.

Det vil typisk være frie tolkningspunkter, der digitaliseres ved horisontaltolkningen. Ved tolkning af laggrænsers og lags maksimale udbredelse kan negativpunkter og afgrænsningspunkter med fordel anvendes i horisontaltolkningen.

Det anbefales:

- at anvende horisontaltolkning som supplement til profiltolkning, hvor der skal ske modellering af geologiske legemer med afgrænset udbredelse – eksempelvis begravede dale
- at horisontaltolkning sker på baggrund af korttemaer eller 3D grids

5.1.5 Afgrænsning af lag og lagflader

Den geologiske model er normalt opbygget af geologiske enheder, hvoraf nogle kun findes udbredt inden for dele af modelområdet, og det er derfor nødvendigt at kunne indarbejde laterale afgrænsninger, der definerer hvor en given enhed findes, og hvor den ikke findes. Afgrænsningen er vigtig at udføre, da det i modellen ellers kan fremstå som om lagfladens fortsættelse er uvis og dermed utolket.

Formål og fremgangsmåde
Formålet med at afgrænse lagflader, er at kunne opbygge en geologisk model, der er så tro mod den virkelige geologiske opbygning i et givent område som muligt.

Den laterale afgrænsning af lag og lagflader foretages lettest ved en kombination af profiltolkning og horisontaltolkning (se tidligere tekst). I profiler digitaliseres foruden top og bund af laget også negativpunkter, dvs. punkter hvor data viser, at den pågældende digitaliserede enhed tolkes ikke at forekomme. Negativpunkter tolkes typisk på boringer og på geofysiske data. Ved linje- eller fladedækkende geofysik er det i gunstige tilfælde muligt at tolke lagets laterale afgrænsning præcist. Tolkningspunkterne fra profiltolkningen samt negativpunkter afbildes nu i horisontalplan sammen med eventuelle støttende korttemaer. Det er nu muligt med afgrænsningspunkter at digitalisere afgrænsningen af lagfladen mellem områder med tolkningspunkter (hvor laget findes) fra områder med negativpunkter (hvor laget ikke findes). Outputtet er et selvstændigt sæt af punkter, der beskriver en afgrænsningsregion rundt om en bestemt geologisk enhed. I GeoScene 3D kan vælge at lade afgrænsningsregionen styre interpolationen, således at der kun interpoleres indenfor regionen. Man kan også efterfølgende beskære sine lagflader med afgrænsningsregionen i GeoScene 3D's Toolbox. Dette er nødvendigt, fordi det interpolerede grid normalt, på grund af søgeradius, vil brede sig uden for området, hvor det er tolket med tolkningspunkter.

Afgrænsning af lagflader kan også ske ved at beskære med andre lagflader. Dette gøres hvor en lagflade stopper ved en anden lagflade, f.eks. en erosionsflade. Her kan man ved hjælp af gridblanking skære den borteroderede lagflade væk, se afsnit 5.1.6 om interpolation og bearbejdning af tolkede lagflader. Dette kan ligeledes gøres i GeoScene 3Ds Toolbox.

Det anbefales:
- aktivt at tolke geologiske legemers afgrænsninger, såfremt der i data er viden om en begrænset udbredelse
- at anvende afgrænsningsregioner og negativpunkter

5.1.6 Interpolation og bearbejdning af tolkede lagflader

Interpolation af tolkede flader og lag er et vigtigt element i arbejdet med både den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. For den rumlige geologiske models vedkommende er det en vigtig ting, at kunne udarbejde interpolerede flader som en del af tolkningsprocessen, og for at visualisere indholdet af modellen (se *Figur **5**-**7***). For den hydrostratigrafiske models vedkommende er det endelige produkt en digital hydrostratigrafisk model bestående af interpolerede gridflader, der kan benyttes i en grundvandsmodel.

I afsnit 4.4 om interpolation af data er flere forskellige forhold vedr. interpolation gennemgået. Disse vil ikke blive gentaget i dette afsnit. Der vil her være fokus på de forhold der gør sig gældende når tolkede lagflader skal interpoleres.

Anvendelse og fremgangsmåde

Grundlaget for interpolation af en flade er en sværm af tolkningspunkter. Ideelt set interpoleres disse punkter løbende til en grid-lagflade, således at modelløren under modelleringen kan tilpasse sin lagflade i forhold til den geologiske tolkning og forståelse af lagfladens form og udbredelse. Operationen er en iterativ proces, hvor fladen interpoleres og sammenlignes med data og den geologiske forståelse. Der justeres eller tilføjes tolkningspunkter løbende (både frie og snappede tolkningspunkter), fladen interpoleres indtil den stemmer overens med geologens forståelse. Efterfølgende kan der suppleres med styrepunkter for at styre griddet i dets randområder.

Gridcellestørrelse

Valget af gridcellestørrelsen for de interpolerede flader kan ses som et kompromis mellem detaljeringsgrad (små celler) og modellens håndterbarhed (store celler). I praksis laves interpolationerne ofte med en cellestørrelse på 50 eller 100 meter, og for hydrostratigrafiske modellers vedkommende kan der eventuelt med fordel tages højde for den cellestørrelse, grundvandsmodellen er valgt at blive opbygget med. Derfor bør grundvandsmodelløren inddrages i valg af cellestørrelsen samt ved vurdering af gridnode-placering, dvs. placering af nulpunktet – origo – i griddet.

Når det drejer sig om den rumlige geologiske model, vil der på baggrund af datatætheden og opløseligheden i tolkningen kun sjældent være behov for en mindre cellestørrelse end 50 m. Ved cellestørrelser over 100 meter risikerer man omvendt, at væsentlige geologiske strukturer ikke kan repræsenteres tilstrækkeligt i det færdige grid.

Interpolationsalgoritme og søgeradius

Interpolationen af lagflader kan udføres med en række forskellige interpolationsalgoritmer (se også afsnit 4.4 om interpolation af data). Der kan vælges en interpolationsalgoritme, der er meget tro over for datapunkterne (her tolkningspunkterne), eller en algoritme, der giver et mere udglattet billede. Ønskes en datatro interpolation kan man f.eks. benytte IDW (Inverse Distance Weighting). Hvis der benyttes kriging, bør der tages beslutning om evt. benyttelse af variogramanalyse, eller om der blot benyttes et lineært variogram uden tilpasning til det aktuelle datasæt. Uanset hvilken interpolationsalgoritme, der vælges, skal den valgte algoritme samt cellestørrelse og søgeradius naturligvis fremgå tydeligt af modeldokumentationen.

Ved de fleste interpolationsalgoritmer skal der vælges en søgeradius. Valget af en sådan afhænger igen af parametre som valgt algoritme, afstanden mellem datapunkterne (tolkningspunkterne), ønsker om udglatning, samt den valgte cellestørrelse. Det anbefales, at man prøver sig frem med forskellige størrelser af søgeradius. En god størrelse for søgeradius ved en gennemsnitlig punktafstand på 250 m og en gridcellestørrelse på 100 m vil være 500 m.

Kontrol og justering af interpolerede flader

Som ovenfor beskrevet er interpolationen af lagflader oftest en iterativ proces, hvor den interpolerede flade holdes op mod såvel tolkningspunkter som grunddata og geologens forståelse af området.

Efterfølgende bør de interpolerede flader kontrolleres for uhensigtsmæssigheder som f.eks., hvis grids lokalt skærer hinanden. Til dette findes et grid-justeringsværktøj i GeoScene 3D, som automatisk flytter grids op eller ned i de berørte områder i forhold til et foruddefineret hierarki. Dette kan gøres samtidigt for alle lagflader i modellen (se afsnit 4.1).

Det er i GeoScene 3D i øvrigt muligt at udføre en lang række andre grid-editeringsfunktioner, bl.a. at kombinere flere flader til et samlet grid. Det er også muligt at modellere griddet direkte ved hjælp af gridmodellering. Her formes griddet interaktivt og direkte i tolkningsmiljøet.

Resampling af lagflader

Det kan også være relevant at resample sine grids (ændring af gridgeometri og udbredelse). Resamplingen har typisk følgende formål:

- Fladebearbejdning: For at kunne bearbejde, herunder beskære, kombinere og udarbejde eksempelvis tykkelseskort for lag i modellen, skal det sikres, at alle gridflader er defineret inden for samme udbredelsesområde (extent) og har samme gridgeometri. Dette kan ske ved resampling, hvor der foruden ensretning af extent også sikres sammenfald af gridnoder mellem de enkelte grids.
- Solid Layers: Med henblik på i profilsnit i GeoScene3D at anvende ”solid layers” (udfyldning med farve mellem de enkelte lagflader), skal det sikres, at fladerne har samme gridstørrelse, og at gridnoderne er sammenfaldende.
- Voxellering af lagmodel: Med henblik på at anvende lagmodellen som grundskelet i voxelmodellen, skal der være sammenfald mellem gridnoder og cellestørrelser i de grids som anvendes som afgrænsning for voxelleringen.

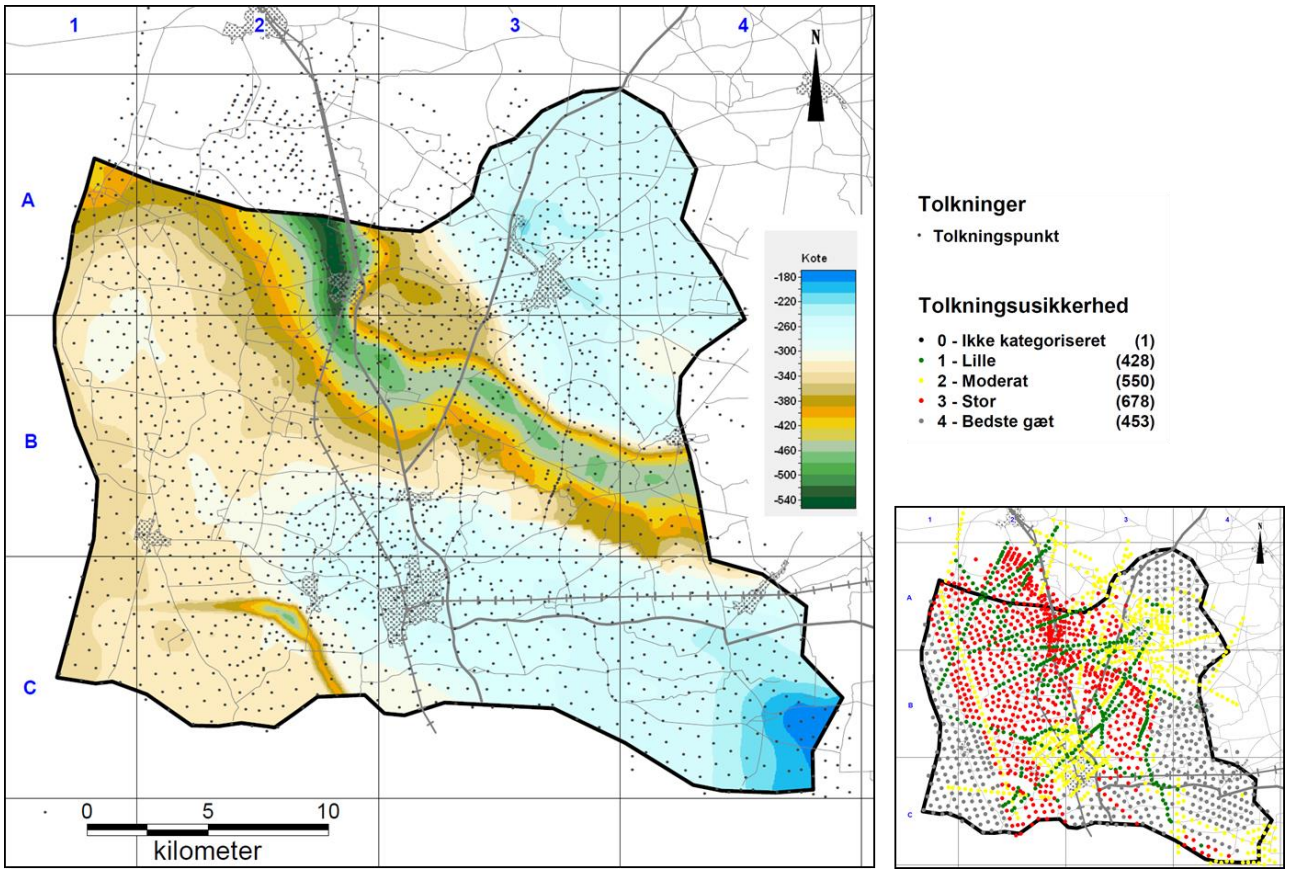
Ved resampling skal man være opmærksom på, at man uagtet kan få sit grid udglattet, således at det ikke længere er lige så tro mod data, som det var inden resamplingen.

Vægtet interpolation

Det er muligt i GeoScene 3D at vægte sine datapunkter med en variabel usikkerhed og så lade denne vægtning indgå i interpolationen. Dette gøres ved at anvende kriging og angive forskellige standardafvigelser for sine tolkningspunkter. Således vil der blive lagt mindre vægt på usikre punkter og større vægt på sikre punkter. Man kan også vælge at få standardafvigelserne overført fra data, hvis der snappes til disse, og hvis der er angivet en standardafvigelse for det pågældende datasæt.

Det anbefales:

- at interpolation opfattes som en iterativ proces, hvor fladen interpoleres og sammenlignes med data og den geologiske forståelse.
- at der er opmærksomhed på at kriging med et variogram er en ”stationær” opsætning baseret på datagrundlaget og med det formål at tilpasse bedst muligt til datasættet
- at der vælges mellem kriging og inverse distance weighting, hvor valget valideres ved kontrol af tilpasning til data og gengivelse af ”fladens forventede geologi”
- at de interpolerede flader kontrolleres for uhensigtsmæssigheder som f.eks. skærende grids, og at justeringer foretages med grid-justeringsværktøjet i GeoScene 3D



Figur 5-7: Eksempel på modelleret og interpoleret lagflade (top Palæogen ved Tønder, fra Jørgensen et al. (2014). Tolkningspunkterne er forholdsvist jævnt fordelt (ca. 500 m), og de fleste punkter er frie tolkningspunkter. Angivelse af usikkerhed på tolkningspunkterne ses til højre. De fleste punkter med lille usikkerhed er afsat på seismiske linjer (de rette linjer af grønne punkter) eller i boringer. Lagfladen er interpoleret vha. kriging med cellestørrelse på 200 m og søgeradius på 1000 m.

5.1.7 3D-visualisering og -tolkning

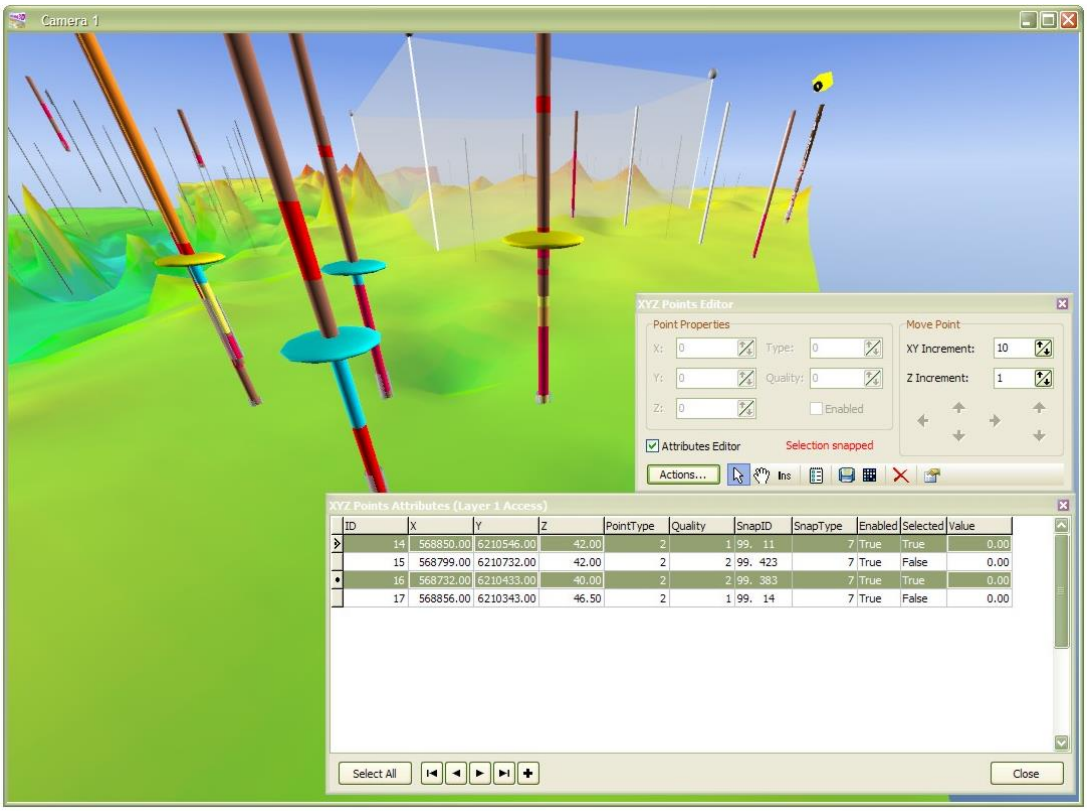
Formålet med anvendelse af 3D-værktøjer er at udnytte datagrundlaget fuldt ud og at lette arbejdsgangen ved geologisk tolkning.

Ved 3D-visualisering perspektiveres modelrummet i tre dimensioner, således at brugeren via computerskærmen opfatter sig selv placeret i selve modelrummet (se *Figur **5-8***). Data, profillinjer, lagflader, tolkningspunkter m.m. placeres visuelt i det rumlige miljø. Brugeren opnår derved reelle opfattelser af både proportioner og beliggenhed af de visualiserede elementer i modelrummet.

3D-visualiseringen giver mulighed for et forbedret overblik over data, tolkninger og geologiske strukturer, og faciliterer dermed bl.a. strukturgenkendelse og andre centrale forhold i den geologiske tolkningsproces. 3D-visualiseringen kan også anvendes ved inspektion og validering af de lagflader, der er dannet ved hjælp af traditionel punkttolkning med efterfølgende interpolation til grids. I 3D-miljøet er

det let overskueligt om f.eks. lagflader krydser hinanden, eller om f.eks. punktdata eller 2D-data passer med de dannede lagflader.

3D visualisering og tolkning/modellering kan foretages i GeoScene 3D, hvor der findes en lang række værktøjer til dette formål.



Figur 5-8: Eksempel på digitalisering af tolkningspunkter direkte i GeoScene 3Ds 3D-tolkningsmiljø.

Som beskrevet i det følgende afsnit om Gridmodellering, kan tolkning og modellering af grids udføres i 3D-miljøet. Men også punkttolkning kan foretages her i, hvis man f.eks. afsætter sine tolkningspunkter på et defineret vertikalt plan eller horisontalt plan i modelrummet. Således kan man indlægge et profil gennem modelrummet, som tydeligt skal kunne ses som f.eks. et transparent ”gardin”, og på dette bliver alle punkter påhæftet. Profilet kan så gradvist skubbes gennem modelrummet, mens tolkningspunkterne afsættes.

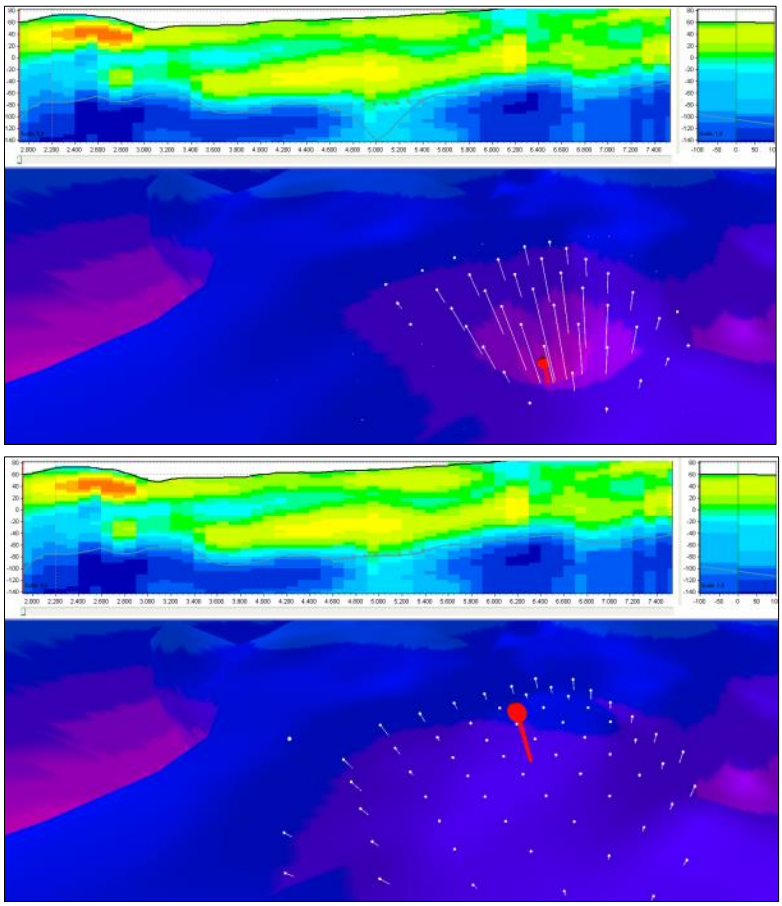
Tolkning direkte i 3D-miljøet er vanskelig og kræver tilvænning. Det er svært at udøve præcis modellering her i, og det kan være svært at overskue alle data. Tolkning i 3D kræver derfor normalt, at der løbende suppleres med tolkning og visualisering i 2D, på kort og profiler.

Det anbefales:

- at tolkning direkte i 3D rummet foretages med varsomhed, da det kan være svært at overskue data
- at tolkning direkte i 3D rummet løbende suppleres med tolkning og visualisering i 2D, på kort og profile

5.1.8 Gridmodellering

Ved geologisk modellering er et af de primære mål at få skabt en række flader, som udgør laggrænserne mellem de lag, den geologiske model består af. Disse laggrænser kan skabes på forskellig vis. Den typiske måde er ved punkttolkning med efterfølgende interpolation. En anden tilgang til at få skabt lagflader, er ved gridmodellering. Ved denne proces formes griddet direkte i tolkningsmiljøet, hvor man interaktivt modellerer en form ud fra et givet udgangspunkt (et eksisterende grid). På denne måde formes griddet uafhængigt af data og udelukkende ved manuel tilpasning i rummet. Gridmodellering kan finde anvendelse ved modellering, hvor data er sparsomme og hvor arbejdshypoteser peger på en bestemt geologisk opbygning, som er vanskelig at modellere på traditionel vis.



Figur 5-9: Eksempel på gridmodellering af lagflade i GeoScene 3D (fra Møller & Jørgensen, 2011). Profilsnit gennem SkyTEM-data med den tolkede laggrænse delvist langs toppen af den gode leder (her top Palæogen). Under profilsnittet ses et 3D-view af lagfladen med selekterede gridnoder. Øverst ses lagfladen før gridmodellering, nederst efter gridmodellering.

Gridmodellering i praksis

Et eksempel på gridmodellering kan ses på *Figur **5-9***, hvor der foretages modellering af et grid for den "gode leder" (Top Palæogen). Griddet kan gradvist formes i det digitale tolkningsmiljø, indtil det har opnået den form, som den geologiske tolkning og forståelse peger på. Denne proces kan foretages direkte i GeoScene 3D.

Gridmodellering kan anvendes alene uden brug punktolkning, men det kan være hensigtsmæssigt at kombinere gridmodellering med punktolkning. Efter at man på mere traditionel vis har dannet nogle grids ved hjælp af punkttolkning og interpolation, kan de fremkomne grids modificeres og tilrettes ved hjælp af gridmodellering.

Ved gridmodellering er det vigtigt at bevare overblikket over, hvor griddet er tolket (modelleret), og hvor det ikke er tolket. Det skal sikres, at griddet formes overalt, således at der ikke efterlades ikke-tolkede områder i det udlagte grid. Områder uden tolkninger bør blankes af, således at det tydeligt fremgår, hvor den pågældende lagflade eventuelt ikke eksisterer.

Fordele og ulemper ved gridmodellering

Fordelen ved gridmodellering er, at man kan forme lagfladerne præcist som man vil have dem, da fladerne ikke nødvendigvis skal tilgodese data.

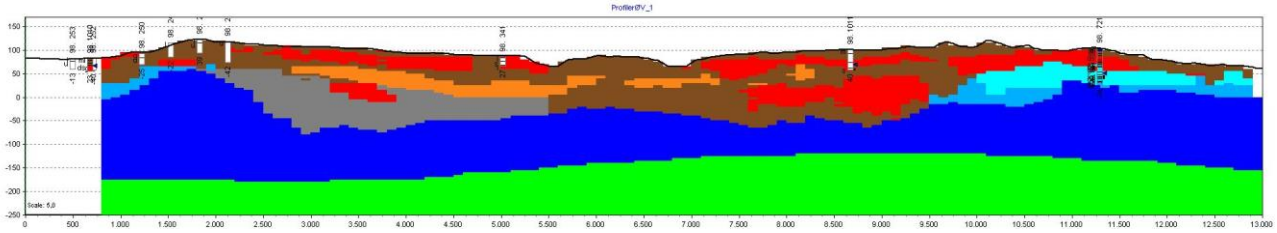
Men en væsentlig ulempe ved gridmodellering er, at der ikke findes et understøttende datagrundlag og at der ikke skabes et blivende tolkningspunktgrundlag til griddet. Det er derfor vanskeligt at dokumentere de tolkninger, der ligger til grund for den gridmodellerede flade. Manipulationen af fladen kan beskrives i en rapporttekst, men de digitale bearbejdninger i rummet vil ikke kunne beskrives. De gridmodellerede flader eksisterer kun i denne ene version og de kan derfor ikke genskabes ved senere bearbejdning, opdatering eller sammenkobling med andre modeller.

Det anbefales:

- at gridmodellering kun anvendes i meget særlige tilfælde, hvor man f.eks. ønsker at visualisere en hypotetisk geologisk opbygning i et område
- at gridmodellering ikke anvendes i grundvandssammenhæng (Gridmodellering anvendes ikke i Grundvandskortlægningen)

5.2 Voxelmodellering

Voxelmodellering er et alternativ til lagmodellering. Konceptet bag voxelmodellering er, at modelområdet opdeles i voxler (kasser). Voxler har en kvadratisk diskretisering i det horisontale plan, f.eks. 50 x 50 m eller 100 x 100 m. Den vertikale diskretisering er typisk 5 m eller tyndere, afhængigt af formål og ønsket detaljeringsgrad. Den færdige rumlige geologiske model eller hydrostratigrafiske model vil således bestå af et stort antal voxler, hvor hver voxel tilskrives tolkninger i form af f.eks. geologi, hydrauliske egenskaber, usikkerheder m.m. Et eksempel på en voxelmodel er illustreret i *Figur **5-10***.



Figur 5-10: Et profilsnit gennem rumlig geologisk voxelmodel. Fra Møller & Jørgensen (2011).

Opstillingen af en voxelmodel foretages ved at tilskrive tolkningsparametre for de enkelte voxler. Dette kan enten ske ved horisontaltolkning på profiler, eller direkte i et 3D-miljø. Der er udviklet en række tolkningsværktøjer i GeoScene 3D, som understøtter voxelmodellering.

En væsentlig fordel ved voxelmodellering er, at det er let at foretage tolkning af ikke-sammenhængende og heterogene lag. Anvendelsen af voxelmodeller har den ulempe, at det kan være svært at opnå en præcis afgrænsning af de geologiske/hydrostratigrafiske lag og enheder både horisontalt og vertikalt. Anvendes f.eks. en vertikal tykkelse på 5 meter, kan der være en fejl på den vertikale afgrænsning af geologiske/hydrostratigrafiske enheder på op til 2,5 m. Tilsvarende forhold gør sig gældende med hensyn til den horisontale opløsning, hvor f.eks. smalle begravede dalstrukturer ikke vil kunne fremgå i en voxelmodel med grov horisontal opløsning. Dimensionerne af voxlerne skal derfor vælges med omhu med baggrund i modellens formål, datatætheden og den forventede heterogenitet i området. Problemet med opløsningen kan i nogen grad imødegås ved anvendelsen af variable voxelgrids, hvor det f.eks. kan være en mulighed at anvende en finere vertikal opløsning i den øverste del end i den nederste del af modellen.

Valget af voxelstørrelse vil være styret af tilgængelig computerkraft. Er det et lille område med få data, og har man en kraftig computer til rådighed, giver det måske ikke mening at spare på antallet af voxler i modellen (se også afsnit 4.1 om 3D-modelleringssoftware).

5.2.1 Manuel voxelmodellering

Som omtalt under afsnit 4.1 om 3D modelleringssoftware, er der i GeoScene 3D udviklet en række værktøjer til understøttelse af manuel voxelmodellering. Ved manuel voxelmodellering er det muligt at udvælge enkeltvoxler eller grupper af voxler og tilskrive disse en tolkning (Jørgensen et al., 2013). Dette betyder, at geologen kan anvende og implementere sin geologiske viden under tolkningsproceduren – på samme måde, som når der foretages punkttolkning af flader. Udfordringen ved den manuelle tolkning består bl.a. i at udvælge voxler, men omvendt er det en styrke, at der ved udvælgelsen kan linkes til andre 3D grids, som f.eks. resistivitetsgrids. Ved brug af værktøjet ”region grow” kan man automatisk udvælge voxler, der i det linkede resistivitetsgrid har en resistivitet, der befinder sig indenfor et forudbestemt interval. Kun sammenhængede voxler udvælges og man har således mulighed for at udvælge rumlige strukturer bestående af voxelgrupper defineret indenfor et valgt resistivitetsinterval. Man kan således få enheder bestående af høje modstande og som er indlejret i lavmodstandslag udvalgt automatisk og tilskrevet en tolkning – f.eks. smeltevandssand. Der er andre måder at udvælge voxler på, men dette vil ikke blive gennemgået her.

Den manuelle tolkning foregår bedst på dynamiske (flytbare) profiler, som gradvist flyttes gennem modelrummet efterhånden som modellen opbygges. Det kan også være en fordel at arbejde med fladetolkning, hvor det horisontale niveau gradvist flyttes én voxelstørrelse op og ned gennem modellen. Mest optimalt er en kombination af fladetolkning og profiltolkning.

Da det kan være en omstændelig proces at opbygge sin voxelmodel manuelt, kan man anvende lagflader som afgræsningsflader ved udvælgelsen af voxelgrupper. Nogle gange, hvis der er tale om større, sammenhængede enheder i modellen, kan dette være en fordel, mens det ved mindre enheder bedst kan betale sig at udvælge voxelgrupperne med de forskellige udvælgelsesværktøjer.

5.2.2 Automatisk voxelmodellering

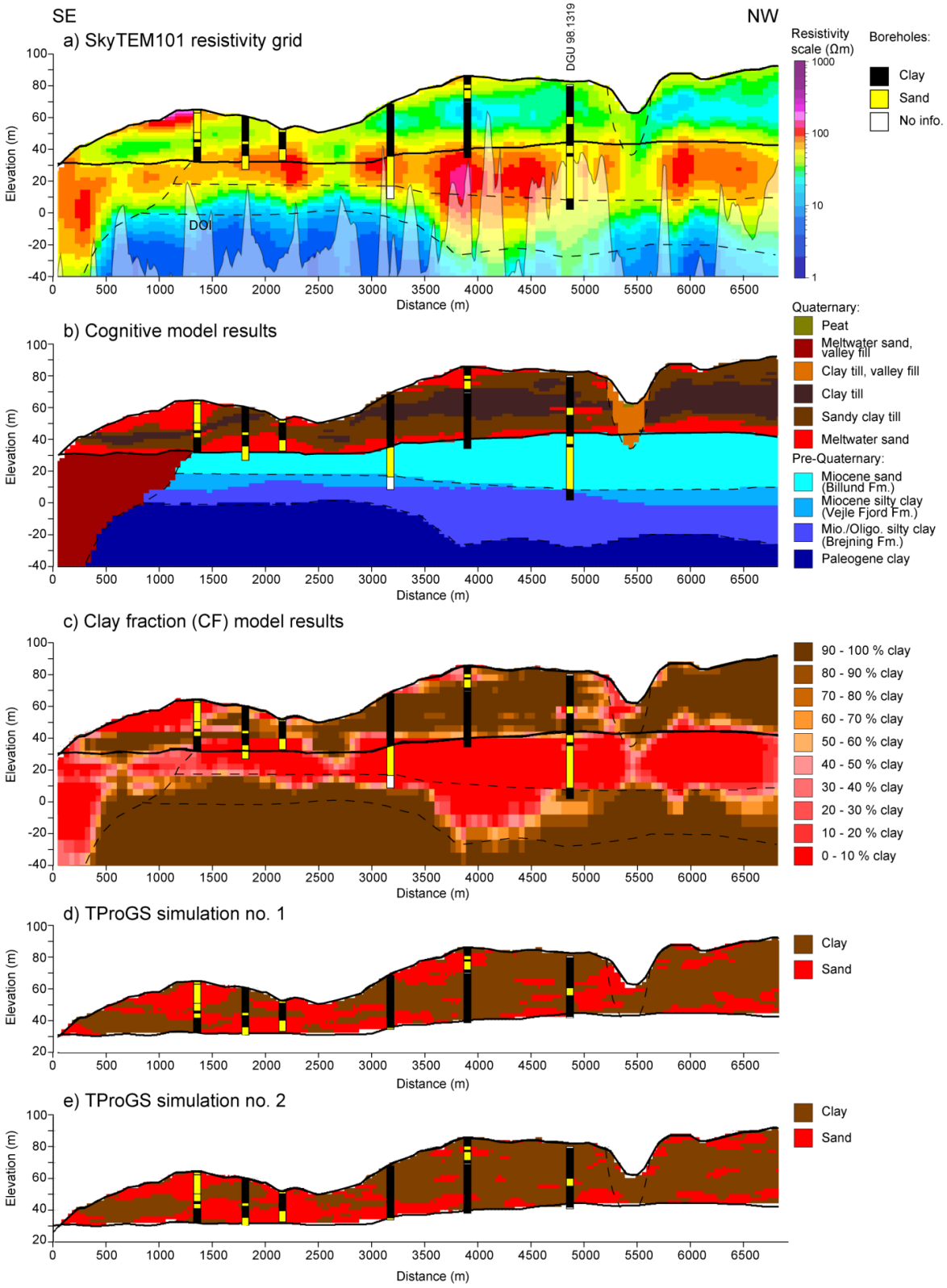
Ved automatisk voxelmodellering tilskrives tolkningerne automatisk – og på samme tid – til voxlerne. Dette er naturligvis betydeligt mere effektivt end når manuel foretages – det være sig lagmodellering som voxelmodellering. Udfordringen ved automatisk voxelmodellering er, at få udnyttet og implementeret den geologiske viden.

F.eks. kan hydrauliske ledningsevner fra boredata interpoleres til en voxelmodel direkte. I nogle tilfælde bliver resistiviteter fra f.eks. SkyTEM oversat direkte til hydraulisk ledningsevne og også interpoleret til en voxelmodel. Disse fremgangsmåder kan ses som automatiserede metoder til konstruktion af en hydrostratigrafisk model direkte uden udarbejdelse af en forståelsesmodel og en rumlig geologisk model. Dette er imidlertid problematisk, da geologiske strukturer med stor indflydelse på de hydrauliske karakteristika risikerer at blive overset ved simpel oversættelse af resistiviteter og interpolation af hydrauliske ledningsevner. Der bliver så at sige ikke udført en geologisk tolkning, og de synteser og observationer der fremkommer gennem den geologiske tolkning, bliver ikke udnyttet.

For at imødekomme ovenstående udfordringer med sikring af geologisk viden i modellerne, udvikles der på flere fronter, herunder særligt ”Clay fraction modelling” (eller SSV-modellering) og multiple point statistics (MPS). Ved førstnævnte metode anvendes information fra boredata til at oversætte SkyTEM-data til lertykkelse eller lerandel per voxel (Foged et al., 2015). SSV-konceptets oprindelige implementering var tænkt som et værktøj til kortlægning af lerdæklagstykkelser. Det er siden blevet videreudviklet, således at det er muligt at estimere ler-andelen i et givent volumen og dermed producere et 3D-voxelgrid, der viser lerandele i de enkelte voxler. Denne anvendelse er blevet benyttet i forbindelse med opstillingen af geologiske modeller ved Ølgod og Tønder, hvor geologiens kompleksitet udgjorde en stor udfordring i forhold til traditionel lagmodellering (Jørgensen et al., 2012[1], 2014); se også afsnit 5.3 om modellering af deformerede lagserier. Det er kun i begrænset omfang muligt at implementere sin geologiske viden gennem denne metodik. Fra borebeskrivelsernes er det kun angivelsen af lerindholdet, der anvendes, og dette kun for at finde lokale forskelle i oversætterfunktionen for resistivitet til lerindhold. Konceptet er primært udviklet til geologiske miljøer bestående af sand og ler og fungerer bedst, når der er gode resistivitetskontraster mellem disse to typer af lithologi.

Ved den sidstnævnte fremgangsmåde anvendes stokastiske simuleringer, særligt i form af multiple point statistics (MPS). Ved brugen af MPS er det i et vist omfang muligt at implementere sin geologiske baggrundsviden ved anvendelse af såkaldte ”træningsbilleder”. Et træningsbillede er en digital skitse af, hvordan geologen forventer, at den strukturelle geologiske opbygning ser ud i et område. Ved simuleringerne anvendes denne information sammen med øvrige data, såsom boredata og geofysiske data. Outputtet er et antal simuleringer af geologien, som alle tilpasser det givne input lige godt. Forskellen mellem simuleringernes resultater angiver usikkerheden (i forhold til de pålagte forudsætninger). I sidste ende skal der udvælges en enkelt simulering til det videre brug.

Der findes også andre stokastiske metoder til fremstilling af 3D geologiske modeller, herunder f.eks. T-Progs (Weissmann et al., 1999; Højbjerg & Refsgaard, 2005). Ved denne metode er det dog ikke muligt at anvende træningsbilleder, så her er muligheden for geologisk tolkningsinput begrænset. I *Figur **5-11*** ses et eksempel fra Norsminde, hvor der er udført henholdsvis manuel modellering (kognitiv modellering), clay-fraction modellering, og T-Progs modellering (Høyer et al., 2015). Der ses tydelige forskelle mellem de forskellige modeller.



Figur 5-11: Sammenligning af modelresultater fra område ved Norsminde (Høyer et al., 2015). Samme profilsnit med samme boringer i alle paneler. a) SkyTEM-data interpoleret til 3D-grid. b) Resultat fra manuel geologisk model (tolket parameter: lithologi, lithofacies, lithostratigrafi). c) Resultat fra clay-fraction model (tolket parameter: voxel-lertykkelse). d+e) To T-Progs simuleringer (tolket parameter sand/ler, kun udført ned til prækvartæroverfladen).

Det anbefales:

- at voxelmodellering anvendes ved modellering, hvor for eksempel den geologiske opbygning ikke kan foretages ved traditionel lagmodellering, hvor voxelmodellens output passer bedre til den videre anvendelse eller hvor der er specifikke krav til modellens detaljeringsgrad
- at dimensionerne af voxlerne vælges med omhu med baggrund i modellens formål, datatætheden og den forventede heterogenitet i området
- at der ved manuel voxelmodellering anvendes en kombination af fladetolkning og profiltolkning
- at hvis statistiske metoder tages i anvendelse skal der stadig holdes fokus på at anvende den eksisterende geologiske viden

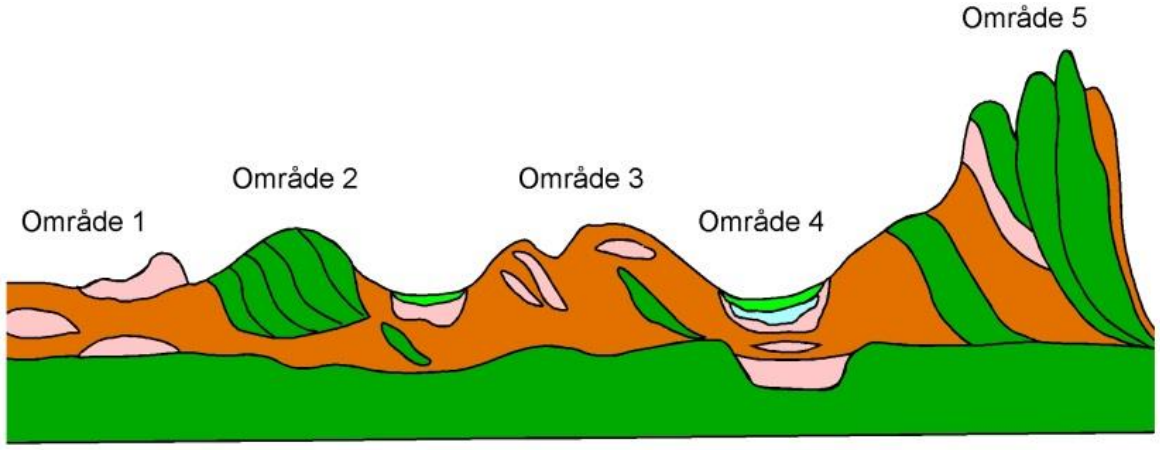
5.3 Modellering af deformerede lagserier

Glacialtektoniske deformationer, der deformerer og bryder ellers regulære lag i stykker, repræsenterer et af de største usikkerhedselementer i forbindelse med modellering af den danske lagserie. Samtidig har deformationerne potentielt meget stor betydning for grundvandsdannelse og grundvandsstrømning. Det er således vigtigt, at viden om deformationerne inddrages i modelleringen.

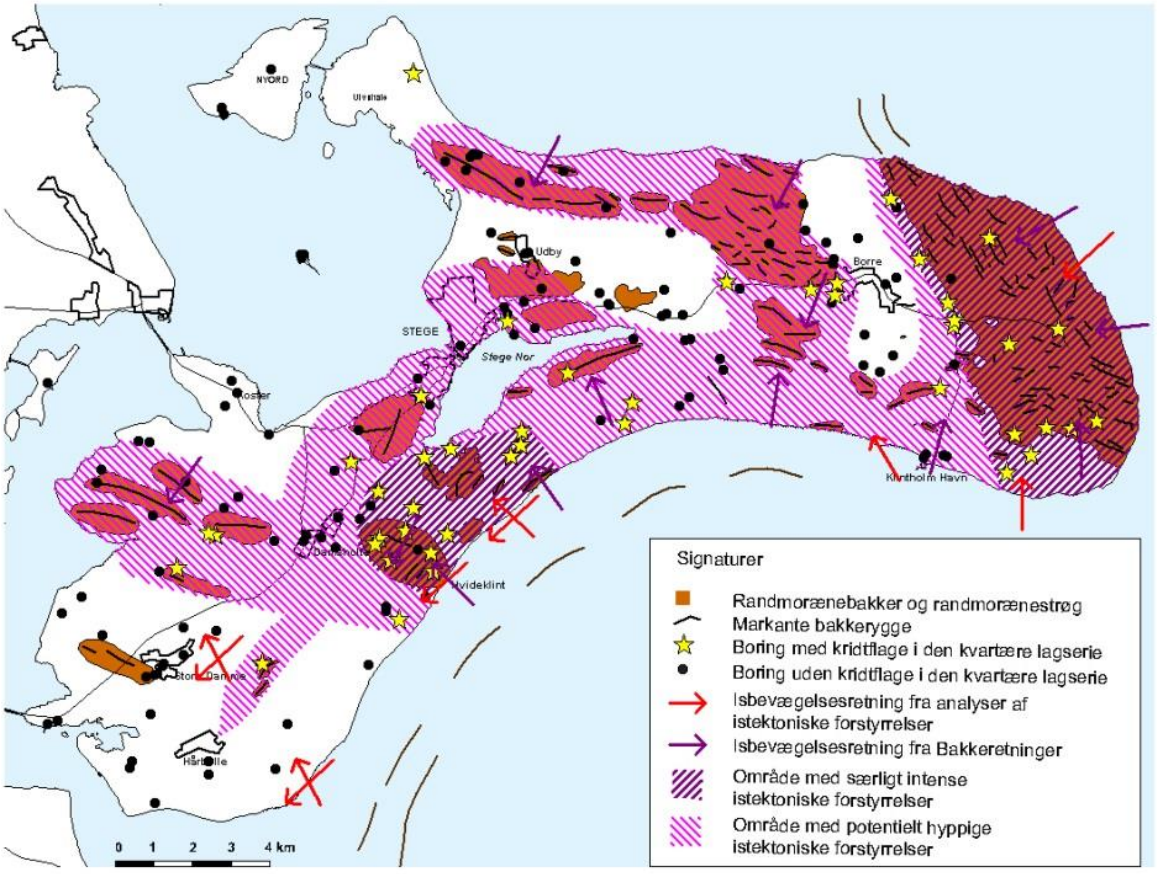
At modellere den nøjagtige geometri af de enkelte strukturelle elementer i glacialtektonisk deformerede områder – det være sig opskudte flager eller foldede lagpakker - vil normalt være umuligt på grund af et misforhold mellem datadækning og de strukturelle elementers skala og kompleksitet. I nogle tilfælde vil det på geofysiske data dog være muligt at se de deformerede strukturer, og det vil her måske være muligt at modellere flagernes geometri direkte på basis af disse data. I sjældne tilfælde vil det på baggrund af gode boredata være muligt at foretage en grov modellering af opskudte flager. Men i langt de fleste tilfælde må man i stedet anvende en løsning, hvor man blot kortlægger de deformerede områder og beskriver disse i en tilhørende tekst til modellen. Ved modellering af deformerede områder kan det dog være relevant at kombinere geostatistiske metoder og voxelmodellering.

5.3.1 Kortlægning og zonering af glacialtektonik

Fremgangsmåden ved en typisk kortlægning af glacialtektonisk deformation kunne være først at kortlægge deformationerne i kystklinter og råstofgrave. Denne kortlægning kan indledningsvist gøres på baggrund af eksisterende geologisk litteratur, som typisk findes i DGU/GEUS-publikationer, DGF-publikationer, kvartærgeologiske specialer m.v. Der kan eventuelt udføres supplerende feltstudier, hvis der findes egnede lokaliteter. Dernæst foretages en sammenstilling af isbevægelsesretninger og israndspositioner, samt kortlægning af landskabselementer, der erfaringsmæssigt ofte er associeret med intensiteten af glacialtektonisk deformation – typisk randmoræner og overskredne randmoræner. Dette baseres normalt på eksisterende litteratur og kort, men kan suppleres af tolkninger fra en landskabsanalyse (se afsnit 3.1.5 om topografiske data). Dette giver et første fingerpeg om forekomsten af glacialtektonisk deformation i et modelområde (*Figur **5-12***).



Figur 5-12: Principskitse for geologien på Møn. Brun: Kvartær ler, Rød: Kvartær sand, Grøn: Skrivekridt. Fra Richardt (2008).



Figur 5-13: Zonering af glacialtektoniske deformationer på Møn. Der er også risiko for at finde deformationer i de hvide områder. Sandsynligheden for at finde hyppige og/eller intense forstyrrelser er blot større i de skraverede områder. Der kan foretages en yderligere zonering, hvor der også zoneres vertikalt. Efter Richardt (2008).

Derefter foretages en kortlægning af tegn på deformation i boringer og geofysiske data. I boringer er flager af formodede prækvartære bjergarter i den kvartære lagserie tegn på deformationer, mens tæt ved hinanden liggende boringer med store afvigelser i lagserien, også kan indikere deformationer. I de geofysiske data ses deformationerne i gunstige tilfælde – dog kun i stor skala og sjældent i 3D. Kortlægningen af tegn på deformationer i boringer og geofysiske data foretages bedst i forbindelse med profiltolkning under arbejdet med den rumlige geologiske model. Om muligt modelleres top og bund af den deformerede lagserie. Ellers kan datapunktet markeres som et punkt med deformationer, evt. med en kommentar om deformationernes karakter, formodede dybde m.v.

Sammenstilling af alle de ovennævnte tolkninger og data foretages lettest i et GIS-miljø. Her kan modelområdet inddeles i zoner med forskellig hyppighed og intensitet af deformationerne (se f.eks. *Figur **5-13***).

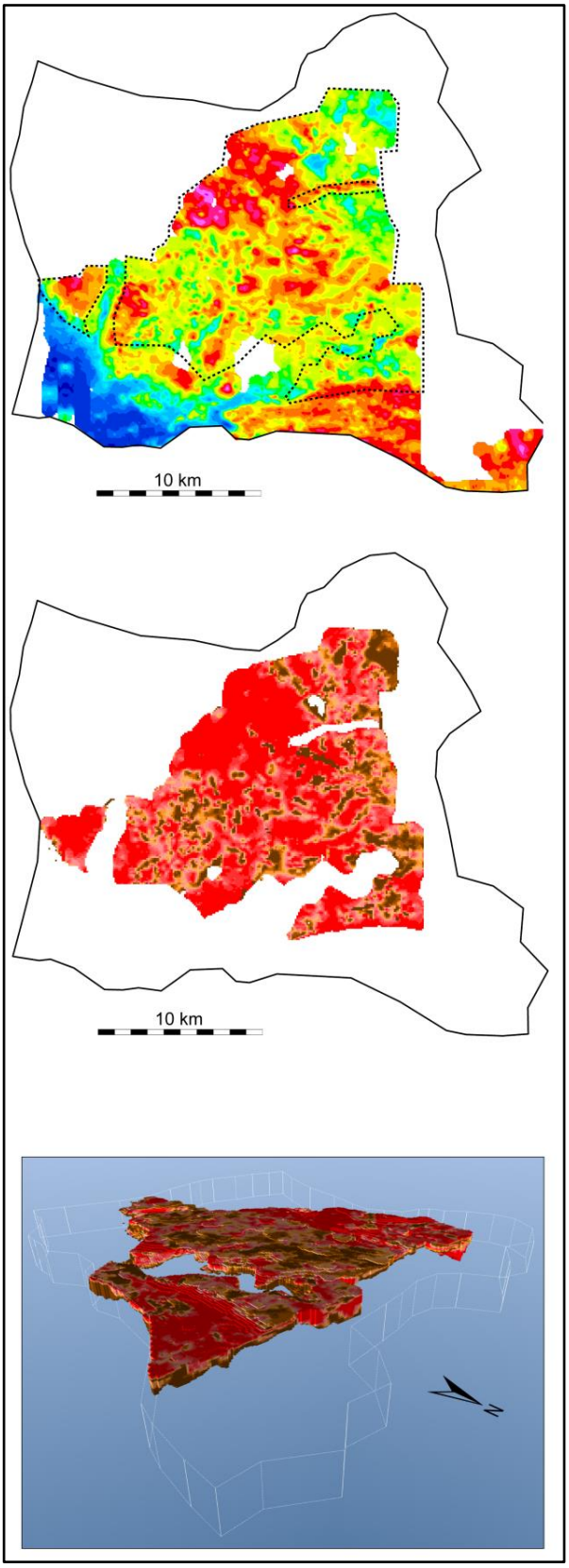
Visualisering af kortlægningen kan f.eks. ske ved en skravering, der lægges hen over de geologiske modellag. Den bæres med fra den rumlige geologiske model til den hydrostratigrafiske model. Ved overgangen mellem geologisk modellering og grundvandsmodellering, tolker geolog og hydrogeolog den hydrauliske betydning af deformationerne og de implementerer dem sammen i grundvandsmodellen, f.eks. ved parameterisering af de hydrauliske egenskaber i de deformerede zoner.

5.3.2 3D-modellering

Udfordringen med at modellere den nøjagtige geometri af de enkelte strukturelle elementer i glacialtektonisk deformerede områder er normalt uoverstigelig, hvis der benyttes manuel digitalisering af tolkningspunkter og lagflader. Lagserien vil bestå af et større antal små, usammenhængende enheder, der også ofte forekommer i flere niveauer (f.eks. ved foldninger og overskydninger). En løsning på problemet med at repræsentere strukturerne og deres detaljeringsgrad i modellen, kan være at anvende voxelmodellering med en diskretisering, der er lille nok til at opløse den pågældende geologi.

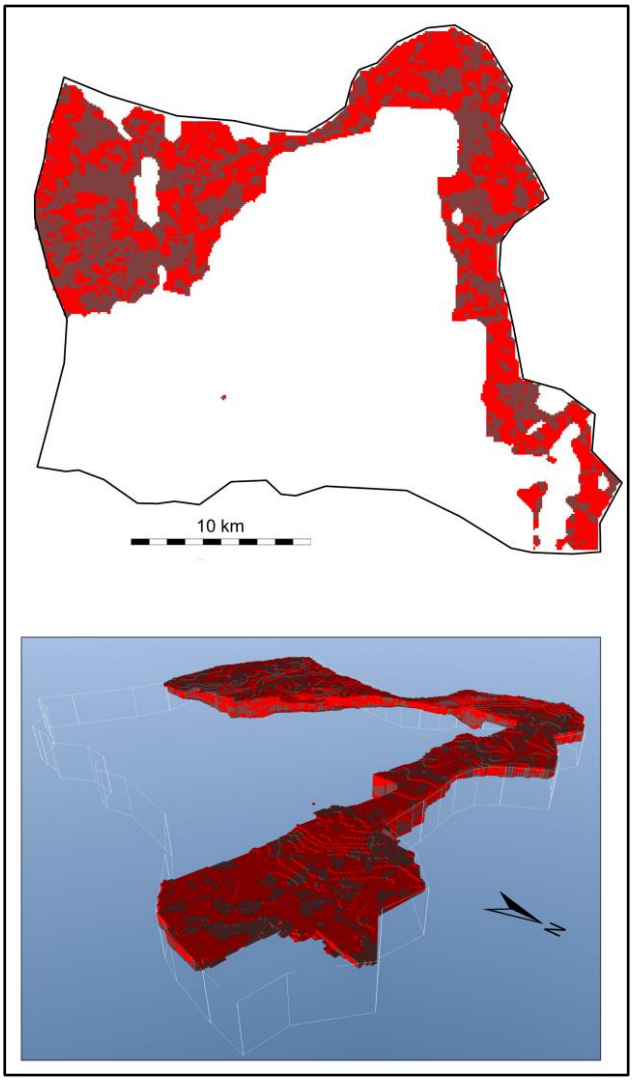
Næste udfordring er at tildele hver enkelt voxel en parameterværdi (eksempelvis litologi). Dette kan gøre manuelt, hvilket dog er en yderst tidskrævende opgave. Tildelingen kan også foregå automatisk ved hjælp af geostatistiske metoder. De geostatistiske metoder, der bliver benyttet i Danmark til dette formål, falder primært indenfor to kategorier. Ved den ene metode anvendes information fra boredata til at oversætte SkyTEM-data til lertykkelse eller ler-andel per voxel (SSV-konceptet eller ”Clay fraction modelling”; Foged et al., 2014). Ved den anden metode anvendes stokastiske simuleringer, særligt i form af multiple point statistics (MPS).

Ved Tønder er der i en geologisk model lavet både clay fraction-modellering og MPS-modellering over et område med kraftig glacialtektonisk deformation (Jørgensen et al., 2014, 2015). Dele af området er kortlagt med SkyTEM, og her er der anvendt clay fraction modellering (se *Figur **5-14***), mens der i området udenfor, hvor der kun findes boredata og seismiske data, er anvendt MPS (se *Figur **5-15***).



Figur 5-14: Clay fraction-modellering som en del af en geologisk model ved Tønder (Til venstre). Øverst ses et middelmodstandskort med stor heterogenitet grundet kraftige glacialtektoniske deformationer. I midtes ses resultatet af clay fraction-modelleringen. Rød farve angiver meget sand og brun farve angiver meget ler. Nederst ses resultatet i 3D. Fra Jørgensen et al. (2015).

Figur 5-15: MPS-modellering som en del af en geologisk model ved Tønder (herover). Øverst resultatet af med rød farve der angiver sand og brun farve der angiver meget ler. Nederst ses resultatet i 3D. Fra Jørgensen et al. (2015).



Det anbefales:

- at det nøje vurderes, om der indenfor det planlagte modelområde findes deformerede lagserier, som kræver en speciel modelleringstilgang, og at disse områder udpeges
- at det vurderes, hvorvidt den valgte modeltype kan opløse/håndtere den deformerede lagserie, eller om alternative modelleringsteknikker skal anvendes for hele eller dele af området

5.4 Modellering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer

I alle modeller er der en grænse for detaljeringsgraden. Den valgte detaljeringsgrad vil afhænge af, hvad modellen skal bruges til. Der er samtidig også en grænse for, hvor detaljeret det kan lade sig gøre at tolke og modellere geologiske strukturers rumlige former og udbredelse, og der skal som udgangspunkt ikke være konflikt imellem, hvad der er behov for at få modelleret, og hvad der i praksis kan lade sig gøre.

Selvom strukturernes rumlige former forstås og kendes af modelløren, kan det også ofte være en udfordring at få formerne gengivet korrekt i modellen. Dette gælder, hvis der er tale om små strukturer, hvis de er diffuse eller har irregulære former. Sådanne strukturer kan f.eks. være begravede dale, forkastninger, saltstrukturer og glacialtektoniske foldninger og overskydninger. I nogle tilfælde, hvis kompleksiteten er for stor til enten at tolke de rumlige strukturer eller til at få dem modelleret, kan man vælge blot at registrere og kortlægge områderne (se afsnit 5.3 om modellering af deformerede lagserier).

Det er generelt vigtigt at få indarbejdet geologiske strukturer som f.eks. begravede dale i både den rumlige geologiske model og i den hydrostratigrafiske model, da disse kan have stor indflydelse på grundvandsstrømningen (Jørgensen et al. 2008).

5.4.1 Fremgangsmåde

I modelleringsprocessen er det vigtigt at forholde sig til problemstillingerne omkring de geologiske strukturer hele vejen gennem den digitale modelopstilling:

Allerede i de indledende faser af modelopstillingen er det vigtigt at have et godt forhåndskendskab til strukturernes art, detaljeringsgrad, orientering og mulige udbredelse. Der kan herved tages højde for strukturernes tilstedeværelse ved opsætningen af modellen, og det vil være lettere at udlægge et optimalt profilnetværk. De geologiske profiler kan placeres således, at de geologiske strukturer kan ses afbildet på flere profiler, og dermed kan ses fra flere vinkler og afspejlet i forskellige data. Hvis ingen eller kun få af områdets geologiske strukturer kendes på forhånd, vil det være en fordel at optegne profilerne løbende under tolkningsarbejdet. Først udlægges et sæt profiler, som har fokus på optimal udnyttelse af data. Når tolkning af disse profiler er foretaget, kan der suppleres med flere profiler på de steder, hvor profilerne ikke giver tilstrækkelig oplysning om de geologiske strukturer.

De geologiske strukturer kan være så små, at de kun vanskeligt kan gengives rumligt, uden at der skal indlægges et stort antal tolkningspunkter (se afsnit 5.1). Det bør altid tilstræbes, at gengive en struktur bedst muligt med anvendelse af så få tolkningspunkter som muligt. Antallet af punkter bør dog som minimum være så stort, at en interpolation kan gengive fladen tilstrækkeligt godt. En måde at "skyde genvej" til modellering af komplekse eller små strukturer kan være at anvende gridmodellering. Interpolerede flader, der ikke gengiver de forventede strukturer korrekt i første omgang, kan herved omformes og finjusteres. Man skal dog her være opmærksom på, at de grundlæggende fladetolkningspunkter ikke samtidigt vil blive justeret. Det vil sige, at tolkningerne ikke længere kun er repræsenteret i fladetolkningspunkterne, men også i de interpolerede flader, der er blevet bearbejdet.

Begravede dale

Fremgangsmåder for kortlægning og 3D-modellering af begravede dale er detaljeret beskrevet i Sandersen & Jørgensen (2016). I det følgende vil disse kortfattet blive opridset:

Begravede dale er et eksempel på geologiske strukturer, der kan være svære at modellere. Dalene er komplekst opbygget med mange interne lagflader og forekommer i flere krydsende generationer. Endvidere kan mange af dem være så smalle, at de er vanskelige at opløse i modellen. Dalene indeholder typisk afgrænsede geologiske og hydrologiske enheder, der kun forekommer i dalene. Da der typisk findes mange af sådanne afgrænsede enheder i et område med begravede dale, kræver modellen ofte mange lag og laggrænser. Dalene tolkes typisk ved at kombinere informationer fra boringer med geofysiske data.

Den store kompleksitet forårsaget af dalene betyder, at en traditionel tilgang med anvendelse af simpel lagmodellering ikke nødvendigvis kan anvendes. Ved simpel lagmodellering arbejdes der med få gennemgående lag for hele modelområdet. I sådanne modeller bliver forskellige geologiske enheder normalt slået sammen for at begrænse antallet af lag, uanset at de f.eks. tilhører forskellige dalgenerationer. Normalt er det ved modellering af områder med begravede dale nødvendigt at arbejde med langt flere geologiske enheder, end der er mulighed for i en simpel lagmodel; dette gælder særligt, hvor der er mange begravede dale eller anden kompleks geologi. Derfor er en løsning med kombineret lagmodellering og voxelmodellering en mulighed. På den måde vil der reelt ikke være nogen øvre grænse for antallet af geologiske/hydrostratigrafiske enheder i modellen. Fremgangsmåden er overordnet set, at der først konstrueres en række afgrænsede lagflader for de enkelte dales erosionsflader og indfyld, og efterfølgende anvendes disse flader som afgrænsningsflader ved manuel voxellering af dalfyldet.

Selve digitaliseringen af tolkningspunkterne, som jo udgør grundlaget for dannelsen af lagfladen, foregår bedst på flytbare/dynamiske vertikale profiler. Disse profilsnit skal være orienteret på tværs af den modellerede dalstruktur, og de flyttes gradvist på langs med dalen med en afstand svarende til den punktafstand, der arbejdes med. Tolkningspunkterne afsættes med en ensartet indbyrdes afstand uanset graden af usikkerhed. For at kunne få dalformerne gengivet tilstrækkeligt detaljeret vil der typisk skulle anvendes flader med en indbyrdes afstand mellem punkterne på minimum 250 m (se *Figur **5-16***). I tilfælde af stor detaljerigdom kan en tættere punktafstand være nødvendig. På langs af det flytbare profil afsættes således punkter med indbyrdes afstand på f.eks. 250 m, og dette gøres for hver gang profilet rykkes i dalens længderetning. Dermed opnås et rimeligt ensartet netværk af tolkningspunkter med indbyrdes, gennemsnitlig afstand på 250 m. Foruden de tværgående profiler anvendes et enkelt ikke-flytbart profil, som placeres præcist i dalens længderetning, langs dalens bund. Der kan med fordel

indledningsvist afsættes punkter på dette profil, og det anvendes desuden som kontrol til de tværgående profiler.

Under arbejdet med digitalisering af tolkningspunkter foretages en løbende interpolation af lagfladen. På denne måde kan fladen hele tiden iagttages, og formen af fladen kan interaktivt styres i retning af den ønskede form. Interpolationen foretages i GeoScene 3D med Kriging. Hvis punktafstanden er 250 m anbefales en cellestørrelse på 100 m og søgeradius på 500 m.

Ved interpolationen af fladen skal det sikres, at denne dækker hele udbredelsen af selve erosionstrukturen. For at sikre dette, kan der optegnes afskæringspolygoner rundt om erosionsstrukturens udbredelse (typisk langs dalens skuldre) og denne kan enten benyttes ved senere afskæring af griddet eller direkte som afgrænsningsregion under interpolationen. Som en del af tolkningsproceduren kan der ofte med fordel anvendes maksimumkotepunkter, negativpunkter og afgrænsningspunkter (se afsnit 5.1.2 om punkttolkning og afsnit 5.1.5 om afgrænsning af lag og lagflader). Maksimumkotepunkter anvendes ofte i mangel af fladedækkende data eller hvor data ikke når ned til dalenes bund.

Begravede dale kan også modelleres ved hjælp af horisontaltolkning. Dette kan ske ved at arbejde med foruddefinerede horisontalsnit og f.eks. benytte middelmodstandskort, eller ved at arbejde med valgbare koter og f.eks. benytte kotekort for en god elektrisk leder. En anden mulighed for modellering af begavede dale er at foretage gridmodellering. Efter dannelsen af lagfladerne i dalene kan disse benyttes til at afgrænse voxelgrupper i voxelleringen. Denne proces er nærmere beskrevet i afsnit 5.2 om voxelmodellering.

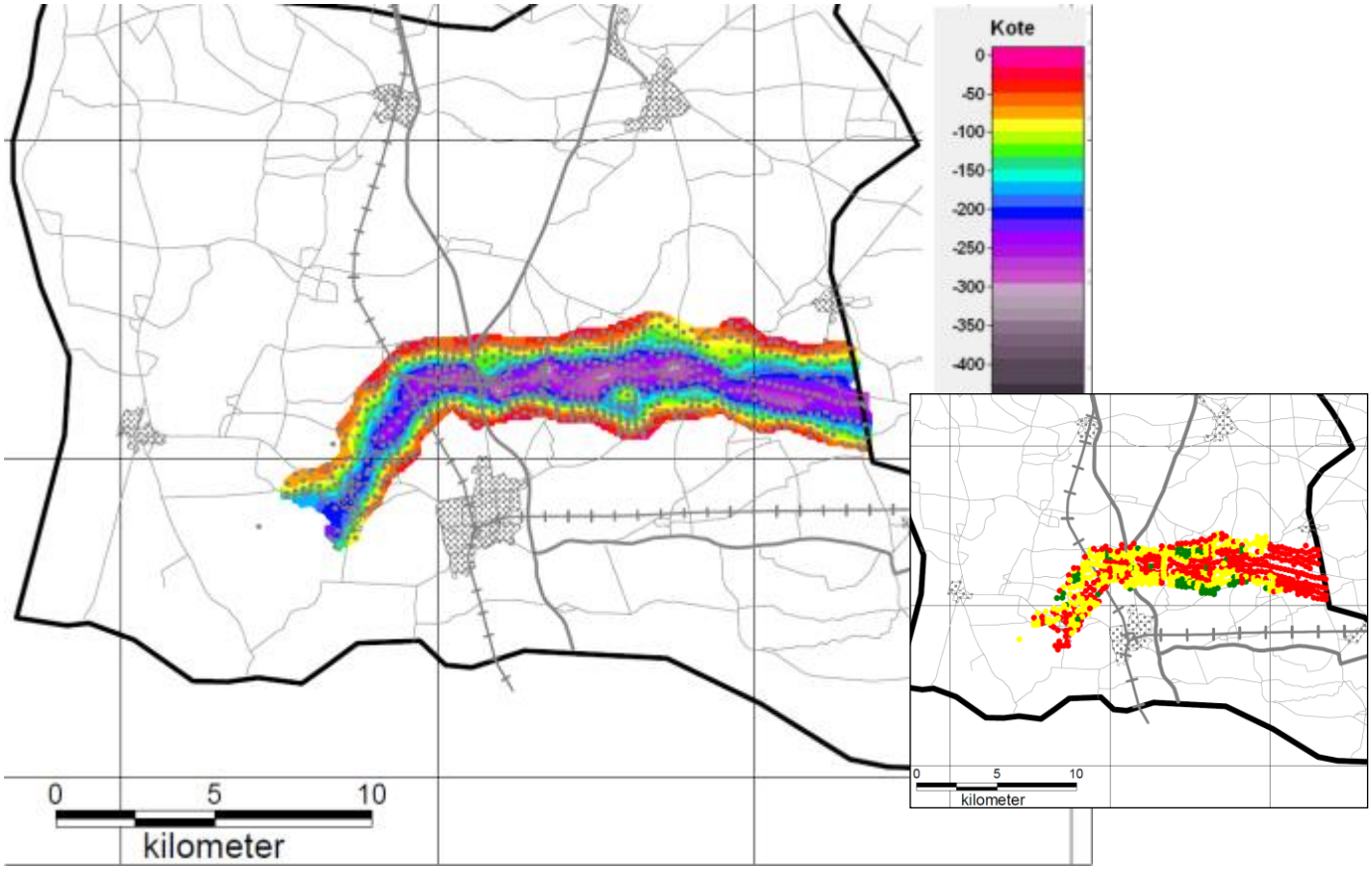
Forkastninger

Da forkastninger forskyder lagfølgen i et vertikalt eller næsten vertikalt plan, er det en udfordring at gengive disse i rumlige geologiske modeller. Undertiden kan forskydningen være så stor, at et lag mister kontakt på tværs af forkastningsplanet. Ved forekomster af forkastninger udviser laggrænserne store variationer over korte afstande, og hvis disse variationer skal modelleres, kræves et stort antal tolkningspunkter for at laggrænsen i rummet (hvis overhovedet muligt) skal gengives tilfredsstillende ved efterfølgende interpolation.

Problemet med at modellere forkastninger kan i nogen grad håndteres ved, at indlægge et stort antal tolkningspunkter omkring forkastningen og langs forkastningsplanet. Det kan være en fordel at digitalisere forkastningens forløb ind ved hjælp af horisontaltolkning først, så forkastningens beliggenhed angives på profilerne. Ovennævnte procedure kan kun benyttes ved normalforkastninger.

Det anbefales:

- at det nøje afvejes, om de strukturer, som forventes at være til stede i modelområdet kan opløses i de forhåndenværende data, og rent faktisk kan modelleres med den valgte modeltype og den valgte detaljeringsgrad
- at valg af modelleringsmåde nøje overvejes inden arbejdet påbegyndes
- at modelprofilerne placeres således, at de geologiske strukturer kan ses afbildet på flere profiler og dermed kan ses fra flere vinkler og afspejlet i forskellige data



Figur 5-16: Modelleret begravet dal ved Tønder (Sandersen & Jørgensen, 2016). Tolkningspunkterne er afsat med omtrent 250 m mellemrum. Usikkerheden på tolkningspunkterne er vist i det lille udsnit til højre (grøn lille, gul middel, rød stor usikkerhed).

5.5 Andre emner

5.5.1 Usikkerhedsvurderinger

Når en geologisk model opstilles, anvendes en lang række forskelligartede data, som hver har deres egen usikkerhed. I hvert led, helt fra dataindsamlingen over modelleringen og til de konklusive slutprodukter, introduceres der usikkerheder. Usikkerhederne er mangfoldige og omfatter bl.a. specifik usikkerhed på målte data, metodeusikkerheder, processerings- og beregningsusikkerheder og usikkerhed på de udførte tolkninger (Caers, 2011; Sandersen, 2008). En geologisk models samlede usikkerhed består derfor af en blanding af datausikkerheder og usikkerheder på subjektive geologiske tolkninger, og en vurdering af, hvordan disse bidrag samlet set influerer på slutproduktet, er en kompliceret sag.

Den geologiske model efterfølges som regel af vurderinger og beregninger, som tager afsæt i den geologiske models ramme, og helt naturligt mødes geomodellørerne med krav om en usikkerhedsvurdering fra brugerne af modellen. Derfor er det vigtigt med en videreformidling af modelusikkerhederne, og det vil være geologens opgave at søge at identificere, vurdere og dokumentere de forskellige typer af usikkerheder og endelig foretage en visualisering af resultatet.

I dag er det dog sådan, at der – selv efter mange års geologisk modellering i vand- og miljøsammenhænge – endnu ikke findes et fælles koncept for vurdering af usikkerheder på geologiske modeller; hverken i Danmark eller internationalt for den sags skyld. Ikke fordi der ikke er et behov, men fordi problemstillingen er uhyre kompliceret. En kvantificering af usikkerheden på specifikke datasæt er mulig, men en kvantificering af de subjektive elementer i tolkningerne af flere sammenstillede datasæt er derimod meget vanskelig (Sandersen, 2008). Men udarbejdes der ikke en usikkerhedsvurdering af den geologiske model, kan der som en konsekvens blive sået tvivl om slutproduktets troværdighed. Det er derfor vigtigt, at modellører, brugere og administratorer, som til daglig arbejder indenfor grundvandsområdet, kan opnå en fælles forståelse for hele spektret af usikkerheder og i fællesskab pege på fokusområder og løsninger.

Usikkerhedsvurdering af hvad – og hvornår?
Usikkerhedsvurderinger er generelt tidskrævende at udføre, og derfor vil det være vigtigt at målrette indsatsen, så anvendeligheden i forbindelse med f.eks. grundvandsmodellering eller sårbarhedsvurderinger bliver så stor som mulig. Ved sårbarhedsvurderinger, eksempelvis, kan det være vigtigt at fokusere usikkerhedsvurderingerne på lagseriens øvre dele, mens fokus bør være på den nedre del af lagserien ved ressourcevurderinger af dybe magasiner. Ved geologiske modeller, hvor der er mange del-formål, kan der være behov for at lave en række forskellige usikkerhedsvurderinger, såsom usikkerhedsvurderinger af de dækkende lerlag, det betydende magasin, prækvartæroverfladen og modellen som helhed. Det bør allerede ved projektstart diskuteres, hvilket fokus usikkerhedsvurderingerne skal have, og hvilket output der vil være brug for.

Usikkerhedsvurderingerne kan enten udføres undervejs i tolkningsprocessen eller når modellen er færdig. Valg af procedure vil helt afhænge af formålet med modellen og formålet med usikkerhedsvurderingerne: Er det valgt at udføre en meget detaljeret usikkerhedsvurdering på tolkningspunktniveau, så giver det sig selv, at usikkerheden skal vurderes undervejs i modelleringen,

mens mere overordnede usikkerhedsvurderinger bedst foretages efter at modellen er færdig. Under alle omstændigheder er det vigtigt, at der undervejs i modelleringen sker optegnelser af vurderinger af usikkerhederne på data såvel som tolkningerne til hjælp for det samlede overblik, når modellen er færdigtolket.

Kvantitativ eller kvalitativ usikkerhedsvurdering?
En kvantificering af usikkerheden vil kunne udføres på de enkelte datasæt i den geologiske model, men en kvantitativ usikkerhedsvurdering for modellen som helhed kræver en nøje vurdering af en række delbidrag, hvis indbyrdes relationer ikke nødvendigvis lader sig beskrive numerisk. En kvantificering af usikkerheden vil være optimal, fordi der derved opnås mulighed for at beregne og dermed udføre vurderingen maskinelt. På hvert datasæt kan der i princippet foretages en objektiv usikkerhedsvurdering, som tager afsæt i måleudstyr, data/prøveindsamling, datatolkning o.s.v., og en talværdi for usikkerheden kan i mange tilfælde påhæftes det enkelte datasæt.

Når de forskellige datatyper sammenstilles, og der foretages en tolkning af områdets geologiske forhold, introduceres subjektivitet. Tolkningerne vil tage afsæt i geomodellørens viden og erfaringer, og det subjektive aspekt er ofte så stort, at dette vil kunne gøre betydningen af usikkerhederne på de enkelte datasæt mindre (Sandersen, 2008). Det betyder, at man ikke kan kvantificere usikkerheden på en geologisk model ved blot at sammenstykke de enkelte datausikkerheder, fordi det subjektive aspekt fra tolkningerne ikke kommer med. Og hvis man lagde de forskellige datausikkerheder sammen, ville man få et udtryk for den samlede modelusikkerhed, som reelt ville være proportional med datamængden. Det vil sige; få data: lille usikkerhed – mange data: stor usikkerhed, hvilket åbenlyst ikke er korrekt. I stedet vil der være mulighed for en betydelig mindskelse af den samlede modelusikkerhed, fordi de forskellige datasæt understøtter hinanden (Sandersen, 2008). Dette er en erkendelse, som først kan opnås ved de geologiske tolkninger, og derfor vil en samlet, kvantitativ beregning af usikkerheden på en geologisk model være nærmest umulig at udføre, og hvis den udføres, vil den kunne risikere at vildlede mere end vejlede.

Som nævnt ovenfor, vil det være muligt at foretage en kvantificering af usikkerheden på de enkelte datasæt med afsæt i måleudstyr, data/prøveindsamling, dataprocessering o.s.v., og en talværdi for usikkerheden kan påhæftes det enkelte datasæt. En sådan kvantificering af usikkerheden er optimal, fordi man kan foretage maskinelle, objektive beregninger. Men det er ikke så simpelt, at alle datatyper kan vurderes objektivt. F.eks. vil det altid være en subjektiv vurdering, om en TEM-sondering er koblet, eller hvordan boreprøver er beskrevet. Dette betyder, at der allerede når datagrundlaget skal tolkes, er der introduceret subjektivitet og tolkningsusikkerheder.

Konklusionen er derfor, at en kvantitativ og objektiv usikkerhedsvurdering af den geologiske model som helhed ikke kan udføres. En blanding af kvantitative og kvalitative vurderinger af usikkerhederne på delelementerne i en model synes derfor at være den bedste måde at visualisere og videreformidle den geologiske models usikkerheder. Dette er også generelt den fremgangsmåde, som er valgt ved geologiske modeller udarbejdet i forbindelse med grundvandskortlægningen (se f.eks. Rambøll, 2012, 2013; Orbicon, 2014; Sandersen & Kallesøe, 2017).

Vurderinger og visualiseringer af usikkerheder
Det anbefales på baggrund af ovenstående, at en vurdering af den samlede usikkerhed af en geologisk model sker ved at kombinere vurderinger/visualiseringer af usikkerhederne på de enkelte datasæt med

en kvalitativ usikkerhedsvurdering af de geologiske tolkninger. De kvalitative usikkerhedsvurderinger af de geologiske tolkninger vil også rumme en vurdering af usikkerhederne på data, men vil i sagens natur være overskygget af geologens egne vurderinger af modellens styrker og svagheder (Sandersen, 2008). Her skal det for god ordens skyld bemærkes, at usikkerhedsvurderingerne ikke skal ses som en indirekte vurdering af geomodellørens evner; en usikkerhedsvurdering er et mål for, hvor sikre geomodellørerne er på, at modellen på bedste vis beskriver de fysiske forhold ud fra de givne data og den gældende baggrundsviden.

Usikkerheden på den geologiske model foreslås derfor visualiseret i forskellige temaer, såsom datatætheden, usikkerheden på de enkelte datasæt og den kvalitativt vurderede usikkerhed på modeltolkningerne.

Datatæthed

Den geografiske tæthed af data har i sagens natur en indflydelse på usikkerheden af den geologiske model, og en visualisering på et eller flere oversigtskort vil f.eks. give et godt overblik over hvilke områder, der er datatynde. Det er dog vigtigt at huske på, at der ikke nødvendigvis er en direkte sammenhæng mellem datafordeling og modelusikkerhed, da geologien kan veksle mellem komplicerede og mindre komplicerede forhold, og da data indenfor modelområdet ikke nødvendigvis afspejler geologien lige godt. Visualiseringer af geografisk fordeling af data på oversigtskort er normalt inkluderet i afrapporteringer af geologiske modeller, men der kan i relation til usikkerhed suppleres med andre temaer, såsom summeret datadensitet pr. arealenhed.

Usikkerhed på de enkelte datasæt

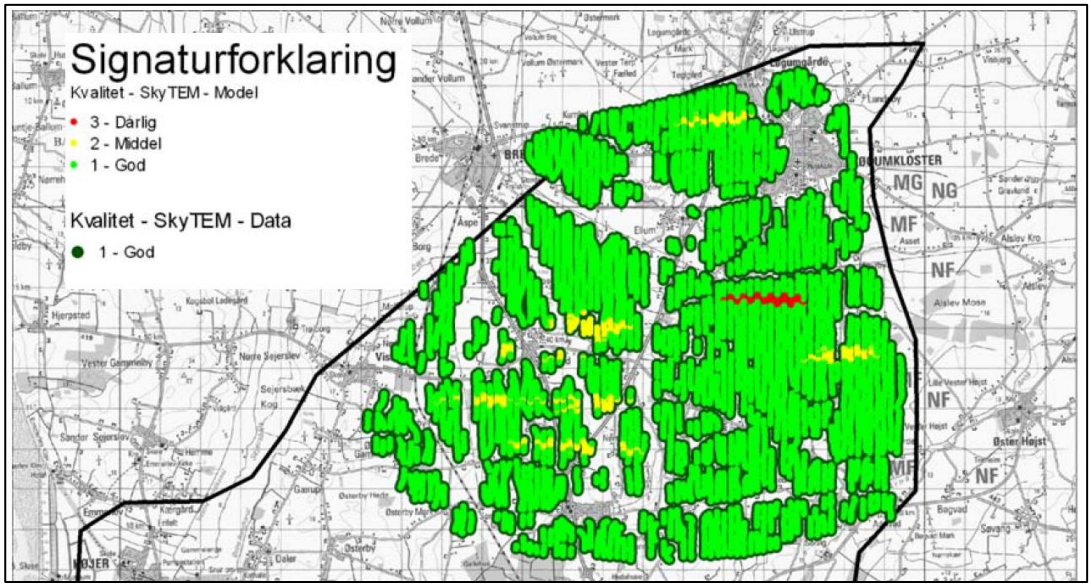
De enkelte datasæt har ofte både en kvantificerbar usikkerhed og en kvalitativ usikkerhed. Førstnævnte usikkerhed hidrører fra målinger og beregninger, og kan eksempelvis visualiseres på fladekort. Den kvalitative usikkerhed hidrører fra tolkninger og antagelser i forbindelse med fremstillingen af datasættet, og denne usikkerhed er vanskelig at visualisere. Det kan anbefales at samle usikkerhederne for de enkelte datasæt i én vurdering, hvor der evt. påhæftes en usikkerheds- eller kvalitetsvurdering på de enkelte data i form af en rating, som eksempelvis kan vises med en farveskala på fladekort. Denne rating bør skræddersys til det aktuelle modelområde. For boringers vedkommende kan parametre som for eksempel boringens alder, dybde, boremetode, detaljeringsgrad af prøvebeskrivelser, antal prøver, borehulslog/ikke borehulslog og tilstedeværelse af bestemte litologiske enheder indgå i ratingen (se afsnit 3.1.1). Et eksempel på kvalitetsvurdering af SkyTEM-data kan ses på *Figur **5-17***.

Usikkerhed på de geologiske tolkninger

I Sandersen (2008) beskrives en simpel metode til kvalitativ usikkerhedsvurdering af rumlige geologiske og hydrostratigrafiske modeller. Den tager udgangspunkt i en vurdering af usikkerhederne på den færdige geologiske tolkning langs profilerne i den geologiske model. Metoden samler alle usikkerheder under ét og holder vurderingerne så simple som muligt. Kernen i metoden er en erkendelse af, at det subjektive aspekt i de geologiske tolkninger let kan overskygge usikkerhederne på de enkelte datasæt.

Metoden anvendes på profilbaserede geologiske modeller, hvor geologen foretager en kvalitativ usikkerhedsvurdering af modellens samlede usikkerhed langs de enkelte profiler. Ved usikkerhedsvurderingen inddeles i et antal kategorier (typisk tre) for graden af usikkerhed, som specifikt formuleres til det aktuelle modelområde (se eksempel i *Tabel **5-1***). De tre kategorier lægges ind i

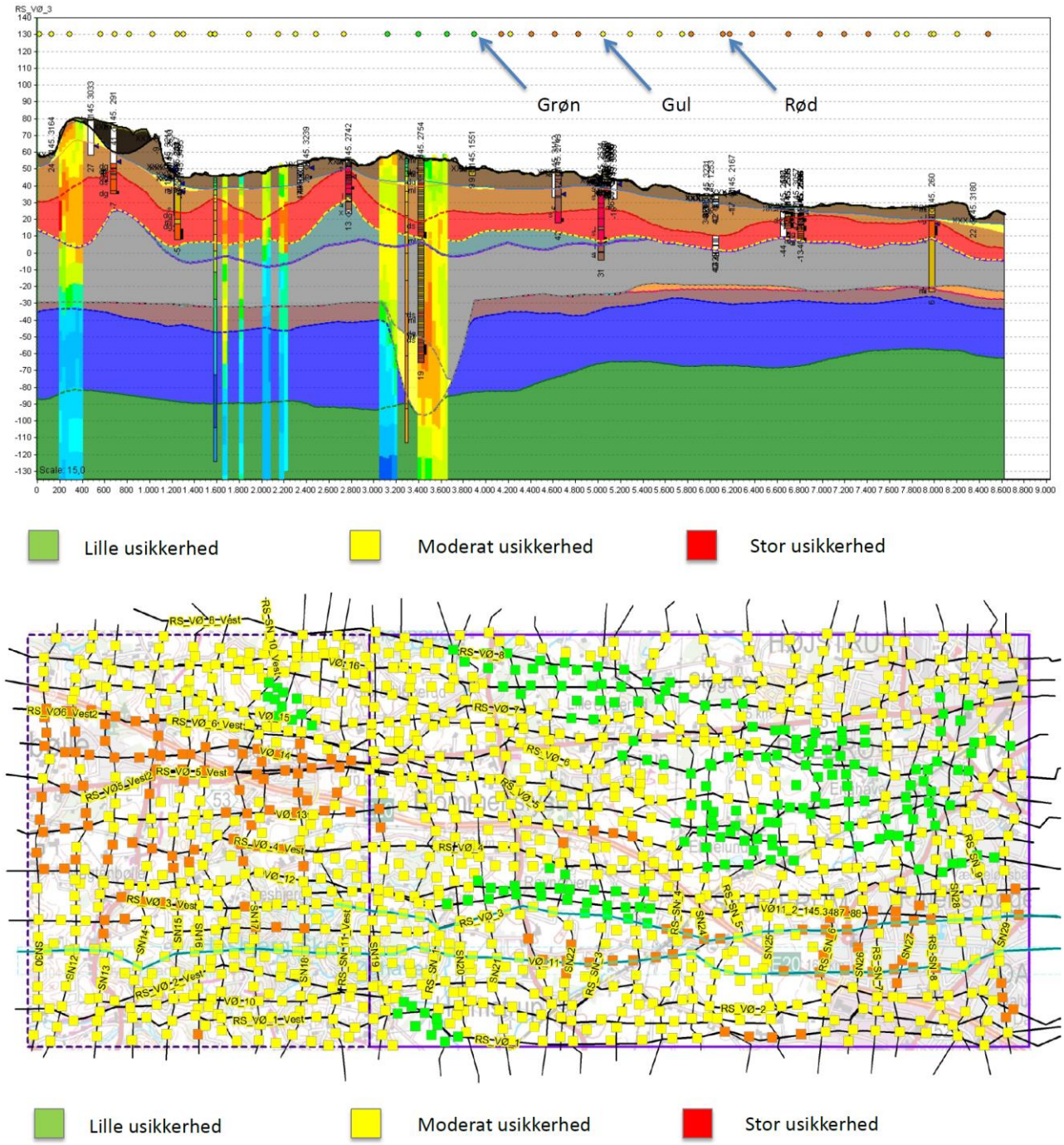
GeoScene3D langs hvert profil, hvor hver usikkerhedskategori oprettes som separate modelflader; i det viste eksempel i kote +130 m (*Figur **5-18***).



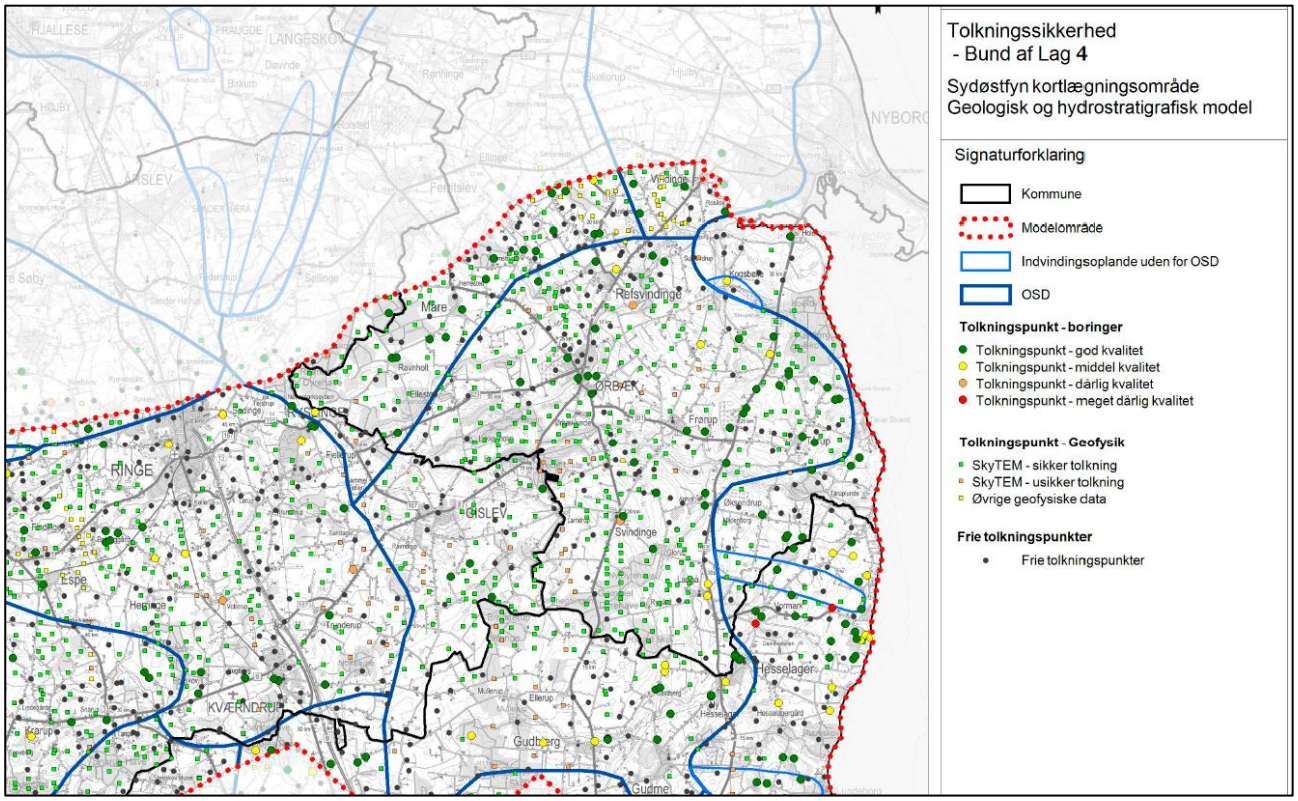
Figur 5-17: Eksempel på en kvalitetsvurdering af SkyTEM-data. Fra Grontmij (2012).

Tabel 5-1: Eksempel på usikkerhedskategorier for en usikkerhedsvurdering af en hydrostratigrafisk model sydvest for Århus. Fra Rambøll (2013).

Usikkerhed	Data	Modellørens vurdering	Farve på kort
Velbestemt	Områder med høj datadensitet og god datakvalitet samt mange dybe boringer (>50 m u.t.)	Geologien er velbestemt. God overensstemmelse mellem alle datatyper og geologien er modelleret med stor sikkerhed.	Grøn
Moderat bestemt	Områder med lav datadensitet og moderat datakvalitet samt mange relativt korte boringer (<50 m u.t.) uden stratigrafiske beskrivelser	Geologien er moderat bestemt. Der ses en begrænset datadækning af boringer og en begrænset opløsningsevne i de geofysiske data således at geologien har været svær at modellere med sikkerhed. Dette er især gældende for de begravede dale	Gul
Dårligt bestemt	Ingen eller få boringer og geofysik som ikke kan opløse geologien	Geologien dårligt bestemt. Flere steder er data mængden stærkt begrænset og der er derfor foretaget mange forenklinger og antagelser ved modelleringen	Rød



Figur 5-18: Visualisering af en usikkerhedsvurdering af en geologisk model vest for Odense. Øverst ses usikkerhedsvurderinger er indsat ovenover et udvalgt profil, og nederst ses usikkerhedsvurderingerne visualiseret for alle profiler på et oversigtskort. Fra Sandersen & Kallesøe (2017). Usikkerhedsvurderingerne følger metoden beskrevet i Sandersen (2008).



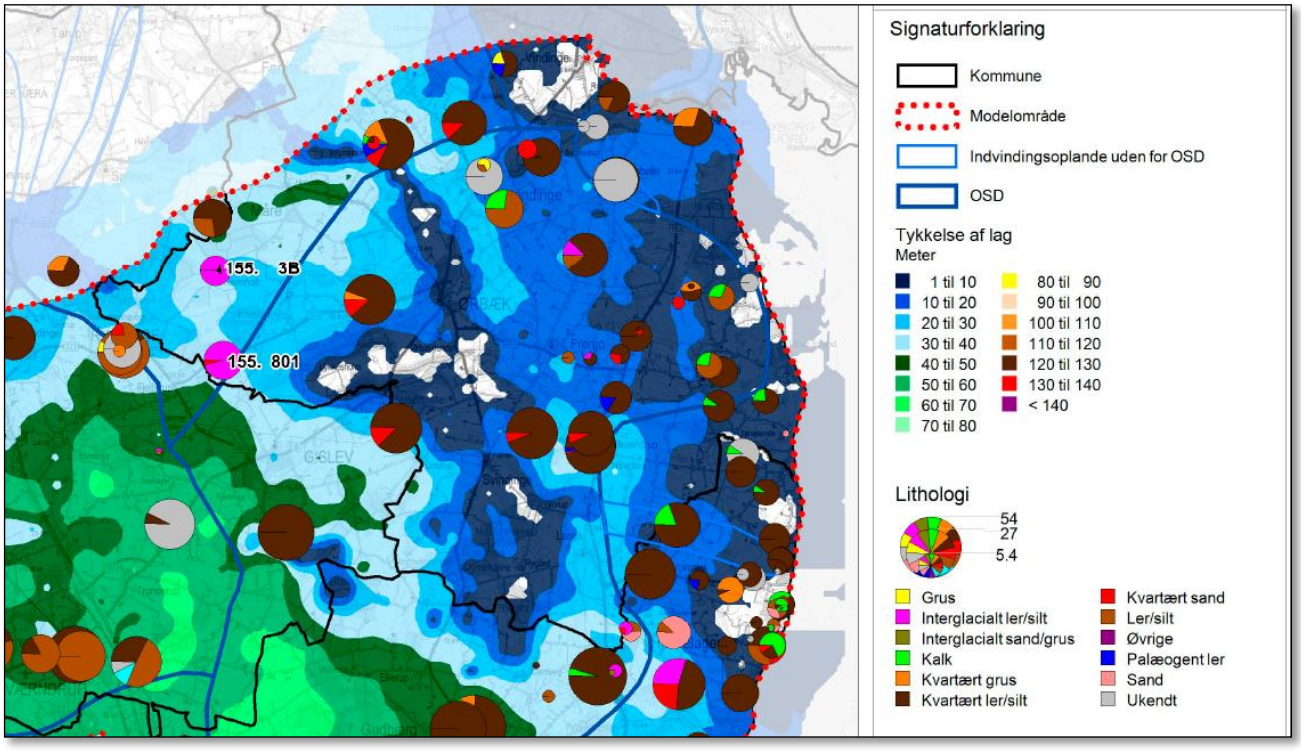
Figur 5-19: Visualisering af "tolkningssikkerhed" på specifik lagflade. Et eksempel fra Sydøstfyn. Udsnit fra Orbicon (2014).

Det skal understreges, at usikkerhedskategorierne er knyttet til de konkrete geologiske modeller, og derfor kan usikkerhedsvurderinger for forskellige områder ikke nødvendigvis sammenlignes. Det kan dog tilstræbes, at der ved definition af usikkerhedskategorier for nye modeller sker sammenligning og eventuelt tilpasning til nabomodellers kategorier. Usikkerhedsvurderingerne visualiseres såvel langs profilerne som i fladen. Disse vurderinger gælder den samlede model, men metoden kan også anvendes for enkelte lag/lagflader (*Figur **5-19***) eller udvalgte dele af lagserien (se f.eks. Rambøll, 2012) alt efter fokus.

Som regel udføres der kun én usikkerhedsvurdering af enten den rumlige geologiske model eller den hydrostratigrafiske model, da de geologiske betragtninger følger begge modeller.

En meget mere detaljeret usikkerhedsvurdering kan opnås ved, at der i hvert enkelt tolkningspunkt sker en indtastning af usikkerhedskategori, som afspejler modellørens vurdering af den samlede usikkerhed på tolkningspunktet. Usikkerhedsværdierne indlægges i GeoScene3 som attribut til hvert tolkningspunkt, og usikkerheden for hvert lag eller lagflade kan let visualiseres. Principperne for disse detaljerede usikkerhedsvurderinger er de samme som for den overordnede usikkerhedsvurdering beskrevet ovenfor, og finder størst anvendelse, hvor stor detaljeringsgrad er nødvendig.

Samme fremgangsmåde som ovenstående kan i princippet anvendes ved voxelmodellering, da der her skal ske en vurdering af usikkerheden i hver voxel i GeoScene3D. For såvel tolkningspunkter som for voxler kan der i GeoScene3D foretages tildeling af usikkerhedsværdi til flere punkter/voxler på én gang.



Figur 5-20: Litologisk zonering af "Lag 6" i geologisk model fra Sydøstfyn (Orbicon, 2014).

I Orbicon (2014) er der gennemført en litologisk zonering i en geologisk/hydrostratigrafisk model på Sydøstfyn (*Figur **5-20***). Zoneringen i sedimentgrupper er baseret på de boringsdata, som ligger indenfor den vertikale afgrænsning af de enkelte geologiske og hydrostratigrafiske modellag. Foruden at være tiltænkt anvendelse ved kvalitetssikring af modellagene og som støtte ved zonering i den hydrologiske model, er den litologiske zonering anvendt i forbindelse med usikkerhedsvurderinger af de modellerede lag (Orbicon, 2014).

Perspektiver

I de seneste 10-15 år er der blandt aktørerne i geologisk model-sammenhæng fundet forskellige måder at vurdere og visualisere usikkerhed på. Metoderne beskrevet i det foregående kan groft set betragtes som værende dem, der anvendes i dag, og som må betragtes som værende en slags konsensus på området. Arbejdet med at finde mere hensigtsmæssige måder at vurdere og visualisere usikkerhed på, vil givet vis fortsætte hen mod mere veldefinerede procedurer eller måske standarder, som vil være målrettet geologisk modellering til brug i grundvandssammenhæng. Her vil det være i fokus at udvikle metoder, som alle aktører finder relevante og så tilstrækkeligt simple, at de er praktisk anvendelige.

Det anbefales:

- at usikkerhedsvurderinger af den geologiske modellering afspejler geomodellørens vurdering af modellens pålidelighed
- at en vurdering af den samlede usikkerhed af en geologisk model bedst sker ved at kombinere vurderinger/visualiseringer af usikkerhederne på de enkelte datasæt med en kvalitativ usikkerhedsvurdering af de geologiske tolkninger
- at målrette usikkerhedsvurderingerne, så anvendeligheden i forbindelse med f.eks. grundvandsmodellering eller sårbarhedsvurderinger bliver så god som mulig
- at usikkerhedsvurderingerne for et givent modelområde relateres specifikt til områdets data og geologiske tolkninger
- at rammerne for udførelsen af usikkerhedsvurderingerne samt kriterierne for vurderingerne beskrives nøje i afrapporteringen for at sikre den bedst mulige overlevering

5.5.2 Kvalitetssikring af modelarbejdet

Kvalitetssikring (KS) af en geologisk model indeholder en række opgaver, der spænder fra en detaljeret gennemgang af kvaliteten af de anvendte data og databehandlingen, til en vurdering af den samlede modelopstilling og den udarbejdede rapport. Mens der i nogen grad kan opstilles retningslinjer og procedure for KS af data, er det langt vanskeligere at opstille stringente retningslinjer for KS af de dele af modelleringen, der har en mere subjektiv karakter, f.eks. geologiske tolkninger og de tilgrundliggende antagelser.

Under arbejdet med den geologiske modelopstilling bør der, undervejs i specielt de to modeltrin rumlig geologisk model og hydrostratigrafisk model, foretages en kvalitetssikring af modelarbejdet. Geologiske tolkninger og vurderinger er ofte subjektive og basalt set vil kvaliteten af modellen afhænge af den tolkende geologs erfaringer kombineret med de omstændigheder, der har udgjort opgavens udgangspunkt. ”Kvalitet” af en model er et vidt begreb, som vanskeligt lader sig definere, og i nærværende vejledning benyttes der ikke en gradbøjning af kvaliteten i fx god, middel og dårlig. I stedet betragtes en ”kvalitetssikret model” som en model, der:

- har gennemgået en vurdering af interne og/eller eksterne fagfæller
- har gennemgået rettelser baseret på denne gennemgang
- lever op til de krav, der er stillet i opgaveformuleringen

Typer af kvalitetssikringer

Intern og ekstern KS

KS – eller reviews af geologiske modeller - kan bestå i, at en anden geolog er med til at gennemgå modellen, stiller spørgsmål og diskuterer tolkningsresultaterne. Omfanget af denne form for KS vil variere fra projekt til projekt og afhænge af opgavens omfang og formål, og det vil indenfor hvert af de tre modeltrin være forskelligt, hvad kvalitetssikringen skal omfatte. Med ”intern” KS menes, at

kvalitetssikringen foregår blandt modellørens kolleger – enten i eller udenfor projektgruppen, og med ”ekstern” KS menes kvalitetssikring foretaget af fagfolk udenfor modellørernes organisation. Erfaringsmæssigt er intern KS hyppigst anvendt ved modelopgaver i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Den interne KS kan følge tre niveauer, fra højt til lavt:

- Intern KS – Niveau 1: KS af udpeget KS-person, som ikke tager del i det faglige arbejde
- Intern KS – Niveau 2: KS af person, som er sparring/projektmedarbejder
- Intern KS – Niveau 3: Egenkontrol

Niveau 1 er det højeste niveau for kvalitetssikring. En person, der ikke er en del af projektet vil kunne kontrollere mere objektivt end en medarbejder, som selv er involveret. Denne form for KS er dog meget tidskrævende, når det gælder selve modelarbejdet, da geologiske modeller ofte er meget komplekse og baseret på mange data og mange (subjektive) tolkninger.

Niveau 2 er sparring og KS mellem projektmedarbejderne; eksempelvis kan den interne KS af modelarbejdet f.eks. foregå ved, at de primære projektmedarbejdere gennemgår hinandens arbejde ad flere omgange både ved mundtlig status undervejs i arbejdet, og ved gennemgang af tolkede profiler og interpolerede flader. På baggrund af gennemgangen af delresultaterne kan der foretages nødvendige justeringer af modellen.

Kvalitetssikringer på niveau 1 og 2 er værdifulde, fordi det er muligt at få en fagligt baseret dialog om de antagelser og tolkninger, modellen er baseret på, hvilke problemer der evt. er opstået undervejs, hvilke svagheder der er i modellen, og hvad der i givet fald kræves for at rette op på disse. Denne dialog kan munde ud i en vurdering af, hvorvidt modellen stadig forventes at kunne leve op til de formål og krav, der indledningsvist blev stillet til opgaven, eller om det er nødvendigt at korrigere den videre fremdrift.

Niveau 3 udgør det laveste KS-niveau, hvor kontrollen foretages af modelløren selv. Selvom ”egenkontrol” signalerer begrænset værdi, så er det vigtigt, at modelløren selv laver tjek af modellen, så som f.eks.:

- at kontrollere, at modellens lag overholder den stratigrafi, som er opstillet
- at modellens geologiske opbygning er tro mod den geologiske viden i området
- at profilerne dækker området og går gennem aftalte nøgleboringer
- at tolkningspunkterne er jævnt fordelt
- at flader/voxler beskriver geologien som ønsket
- at interpolerede flader på bedst mulig vis afspejler tolkningspunkterne
- at der ikke er krydsende flader og at fladerne skærer hinanden som forventet
- at det digitale modelprojekt er opbygget intuitivt, så modtageren let kan bruge modellen
- osv……

Hvis der løbende er sket ekstern kontrol og godkendelse undervejs i projektet (se senere), kan det for eksempel aftales med opdragsgiveren, at den interne KS af modellen kun foretages på niveau 2 og 3.

Ekstern kontrol og godkendelse

Modelarbejdet vil typisk blive gennemgået af opdragsgiveren eller f.eks. en konsulent udpeget af denne, enten undervejs i modelarbejdet og/eller ved arbejdets afslutning. Det mest optimale er en løbende kommunikation mellem modellørgruppe og opdragsgiver, hvor problemstillinger kan diskuteres og beslutninger om eventuelle afvigelser fra den oprindelige plan kan tages i fællesskab. Denne fremgangsmåde er en stor fordel for modellørerne, fordi det vil være muligt at få faglig feedback undervejs i forløbet og samtidig få godkendelser af delresultater. Opdragsgiveren vil på denne måde kunne følge med i arbejdets fremdrift og vil på den måde få langt større indsigt i det faglige og dermed større ejerskab til modellen. Sker kontrol og godkendelse først når modelarbejdet reelt er færdigt, vil man kunne risikere, at tidligt opståede fejl kan have haft stor indflydelse på slutresultatet, og at dele af arbejdet skal gøres om.

Den mest hensigtsmæssige eksterne kontrol og godkendelse foretages derfor af opdragsgiveren (eller en anden, udpeget af denne) ved aftalte milepæle i modelleringsarbejdet, og kan foregå ved, at delresultater og projektstatus fremlægges på møder, pr. telefon eller fremsendes pr. mail. Godkendelsen af resultaterne kan følge tre niveauer, fra højt til lavt:

- Ekstern godkendelse – Niveau 1: Skriftligt materiale fremsendes til opdragsgiveren til godkendelse. Respons er nødvendig før arbejdet kan fortsættes
- Ekstern godkendelse – Niveau 2: Resultater diskuteres via telefon eller ved møde. Der gives respons med det samme
- Ekstern godkendelse – Niveau 3: Orientering om resultater via mails, hvor respons ikke er nødvendig

Herudover kan der ske fremlæggelse af delresultater på fællesmøder i projektgruppen, hvor der er deltagelse af repræsentanter for hver partner, og hvor der kan ske godkendelse af delresultater i et bredere forum. Fremlæggelserne vil dog ved sådanne møder typisk være af orienterende karakter.

Det kan anbefales, at der ved projektstart aftales nærmere med opdragsgiveren, hvornår og på hvilket niveau den eksterne kontrol og godkendelse skal ske. Et eksempel kan findes i Sandersen & Kallesøe (2017); bilag 1.

Omfang af kvalitetssikringen

Kvalitetssikring af modelrapport

For rapportens vedkommende udgør KS typisk gennemlæsning og kommentering af tekstudkast. Niveauet for den interne KS defineres indledningsvist; om det kun er en sproglig/layoutmæssig KS eller om det også er en KS af det faglige indhold. Efter rettelser vil rapporten være klar til fremsendelse til opdragsgiveren.

Den geologiske forståelsesmodel fremlægges i selve rapporten, og den faglige KS bør omfatte en gennemgang af udarbejdet tekst, figurer, skitseprofiler m.v. Kvalitetssikringen bør udføres af en geolog med et godt kendskab til den regionale geologi og et godt kendskab til de tidligere udførte tolkninger i området. En kvalitetssikring af slutproduktet vurderes normalt at være tilstrækkeligt for den geologiske forståelsesmodel, men det er anbefalelsesværdigt, at den geologiske forståelsesmodel fremlægges og diskuteres med opdragsgiveren tidligt i projektforløbet.

Kvalitetssikring af den digitale rumlige geologiske model

Ved faglig KS af den rumlige geologiske model bør det vurderes, om alle relevante data er inddraget, og om problemformulering og projektbeskrivelse er fulgt – særligt set i forhold til modellens formål. Det bør vurderes om, og i hvilket omfang, den opstillede rumlige model adskiller sig fra den geologiske forståelsesmodel, og afvigelser skal være forklaret. KS af den rumlige geologiske model udføres ideelt set af en erfaren geolog med detaljeret kendskab til områdets geologiske opbygning samt viden om geologiske processer og geologisk modellering. I forbindelse med opstillingen af den rumlige geologiske model kan det være en fordel med flere reviews undervejs i forløbet.

Kvalitetssikring af den digitale hydrostratigrafiske model

Ved tolkningen af den hydrostratigrafiske model inddrages der typisk andre datatyper i tolkningen som f.eks. pejledata, vandkemiske data m.m., der kan støtte inddelingen i hydrostratigrafiske enheder. Ved KS skal den hydrostratigrafiske model holdes op mod den rumlige geologiske model, og forskellene skal diskuteres og forklares. KS/review af den hydrostratigrafiske model kan med fordel udføres som en diskussion mellem en erfaren geolog og erfaren hydrogeolog. Eventuel modstrid i forhold til den geologiske model bør diskuteres og endelig bør det kontrolleres, at de tolkede flader dækker hele området, og at lagene i øvrigt er udarbejdet, så de kan benyttes videre i strømningsmodellen. I forbindelse med opstillingen af den hydrostratigrafiske model kan det være en fordel med flere reviews undervejs i forløbet.

Dokumentation af kvalitetssikringen

Dokumentationen af KS af modelrapporten sker typisk i form af kommentarer indskrevet direkte i tekstdokumentet. Det er vigtigt at gemme den kvalitetssikrede/kommenterede version. Modellørens rettelser af væsentlige, faglige punkter kan dokumenteres i en logbog.

Dokumentation af den faglige KS kan gøres i en logbog, hvor det noteres, hvilke problemstillinger der er tjekket/diskuteret og hvilke fejl/mangler, der har givet anledning til rettelser. Omfanget af logbogsnotaterne vil afhænge af de involverede parter og eventuelle aftaler med opdragsgiveren.

Det anbefales:

- at omfanget af kvalitetssikring i modelleringsprojektet defineres og aftales såvel internt (hos modelløren) som eksternt (hos opdragsgiveren eller en ekstern reviewer)
- at kvalitetssikringen skrives ind i projektets tidsplan og at holdet af kvalitetssikrere udpeges ved projektets start
- at ekstern kontrol og godkendelse foretages ved aftalte milepæle i modelleringsarbejdet

5.5.3 Input til sårbarhedsvurderinger

Menneskelige aktiviteter på jordoverfladen kan skabe nedsivning af uønskede kemiske stoffer til grundvandet. Grundvandskortlægningen har bl.a. til formål at indsamle en robust viden til kortlægning af drikkevandsressourcer og deres sårbarhed mod nedsivende forurening. Ved vurdering af et

grundvandsmagasins sårbarhed overfor uønskede, nedsivende stoffer vurderes en række parametre, så som:

- Jordlagenes naturlige kapacitet for nedbrydning/adsorption af nedsivende stoffer
- Redox-frontens dybde under terræn
- Grundvandets gradientforhold (opadrettet eller nedadrettet gradient)
- Tykkelsen af lerlag over grundvandsmagasinet
- Deformationer af lagene over grundvandsmagasinet

Disse parametre kan derefter holdes op mod hvilke kemiske stoffer, der er tale om, og på baggrund heraf foretages en vurdering af grundvandsmagasinets sårbarhed overfor specifikke stoffer. En vurdering af et grundvandsmagasins sårbarhed overfor nedsivende forurening indbefatter således såvel sediment- og grundvandkemiske aspekter som hydrologiske og geologiske aspekter.

I dette afsnit fokuseres der på det input til sårbarhedsvurderingerne, som kan udtrækkes af den geologiske model, og her vil der i al væsentlighed være tale om lertykkelse samt type og opbygning af lerlagene ovenover grundvandsmagasinerne. Redox-frontens beliggenhed og jordlagenes reduktionskapacitet vil typisk indgå i den geokemiske kortlægning, mens grundvandets strømning og magasinernes gradientforhold vil blive beregnet i forbindelse med grundvandsmodellering. I nogle tilfælde har kortlægning af redox-grænsen dog været en del af det geologiske modelleringsprojekt; se f.eks. Orbicon (2013) og Rambøll (2015).

I det følgende gennemgås, hvordan den geologiske model kan bidrage med information om lertykkelserne ovenover grundvandsmagasinerne, samt input vedrørende graden af deformation af jordlagene ovenover grundvandsmagasinerne.

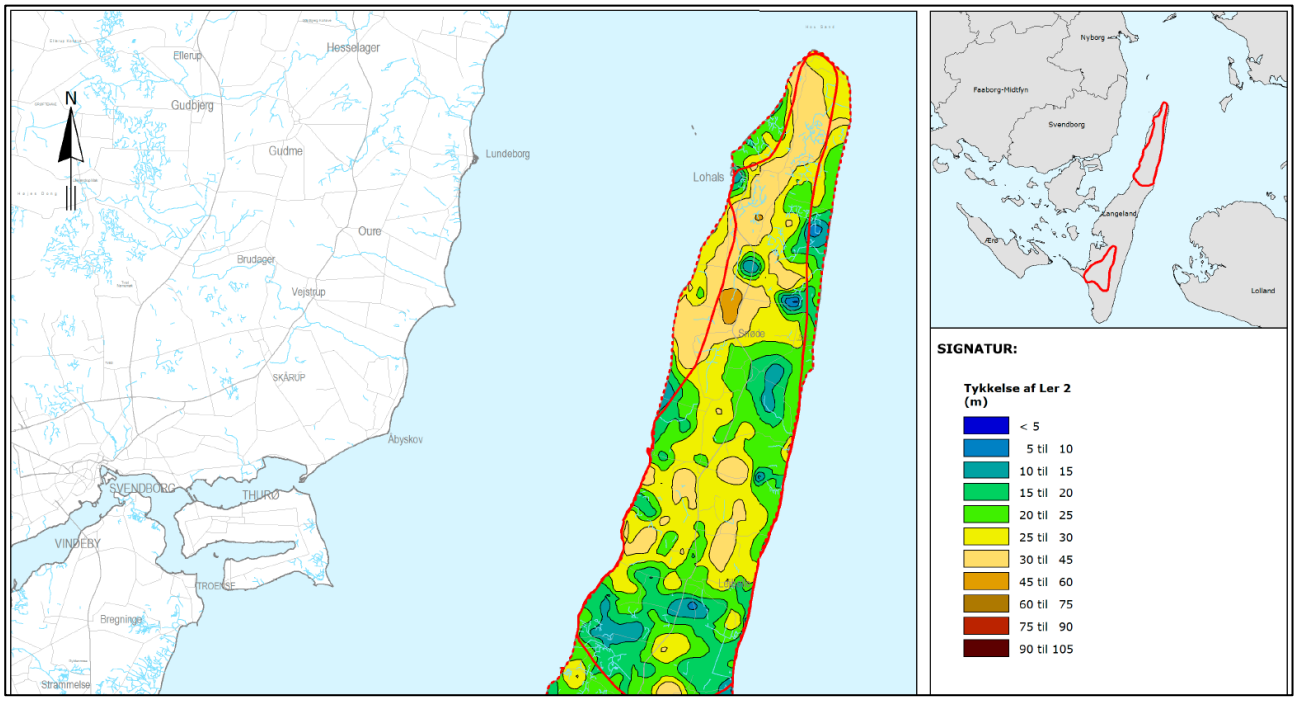
Lerets grundvandsbeskyttende evne
Generelt vil lerlag have en naturlig beskyttende effekt overfor grundvandet nedenunder - helt overordnet på grund af to faktorer: kapaciteten til at reducere kemiske stoffer og evnen til at begrænse hastigheden af grundvandets nedsivning gennem lagene. I hvor stor grad de to faktorer for et givent lerlag bidrager til at nedsætte sårbarheden af det underliggende grundvand afhænger overordnet af:

- Lerlagets tykkelse
- Mineralsammensætningen af laget
- Andelen af lermineraler i laget
- Lerlagets porøsitet/permeabilitet (porer, sprækker m.v.)
- Indhold af organisk stof
- Lerlagets deformationsgrad
- Om lerlaget er under mættede eller umættede forhold

Ovenstående punkter giver kun mening, hvis der hydraulisk set er en nedadrettet gradient gennem lerlaget; hvis ikke - eller hvis der reelt er en opadrettet gradient - vil lerets egenskaber ikke have indflydelse på det dybe grundvands sårbarhed. Men da gradientforholdene kan ændre sig over tid på grund af naturlige ændringer i vandstand eller på grund af ændringer i vandindvindingen, vil en vurdering af lerlagene i hele kortlægningsområdet altid være relevant.

Ved en 3D-modellering af geologien i et kortlægningsområde vil tykkelsen af de enkelte lerlag ovenover magasinerne kunne beregnes, men som det kan ses af ovenstående punkter, er det vigtigt at kende lerlagets type – og dermed geologiske dannelse. Det er ikke alene nok blot at kortlægge "ler". Det er ved den geologiske modellering vigtigt at adskille forskellige lertyper i separate geologiske lag, så der efterfølgende kan foretages en vurdering af, hvorvidt de enkelte lerlag må forventes at indgå med et positiv bidrag i grundvandsbeskyttelsen eller ej. I mange tilfælde haves der kun sparsomme data, der kan fortælle om lerets mineralsammensætning, den procentvise andel af lermineraler og den reelle porøsitet og permeabilitet af laget, og derfor vil mange af vurderingerne være af kvalitativ art, som læner sig op ad generelle beskrivelser af kendte geologiske formationer eller måske sporadiske, detaljerede beskrivelser af boreprøver fra laget.

Foruden en skelnen mellem forskellige lerlag er det mindst lige så vigtigt at vurdere graden af deformation af den lagserie, som lerlagene indgår i, fordi en deformeret lagserie ofte er karakteriseret ved usammenhængende, ikke-horisontale lag med begrænset udbredelse. Den beregnede, samlede lertykkelse over grundvandsmagasinerne kan derfor i nogle tilfælde risikere at give et misvisende billede af lerlagenes naturlige grundvandsbeskyttende effekt.



Figur 5-21: Tykkelse af specifikt lerlag ("Ler 2"). (Udsnit af bilag A 2.18; Rambøll 2015).

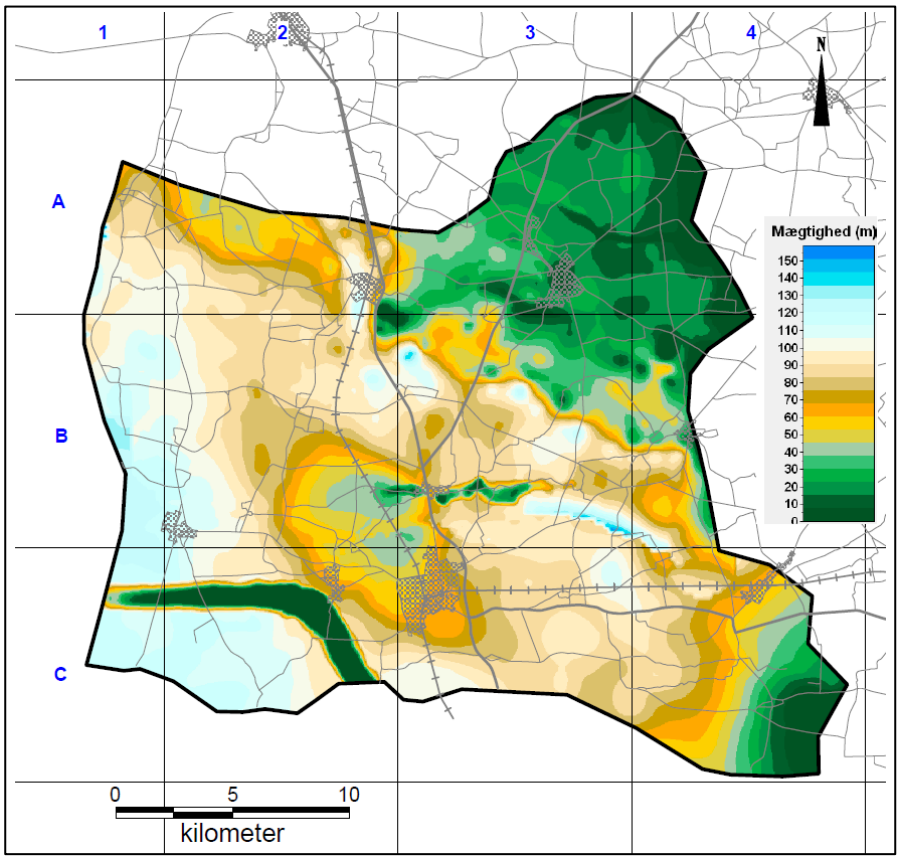
Kortlægning af lertykkelser over grundvandsmagasinerne

Lagmodeller

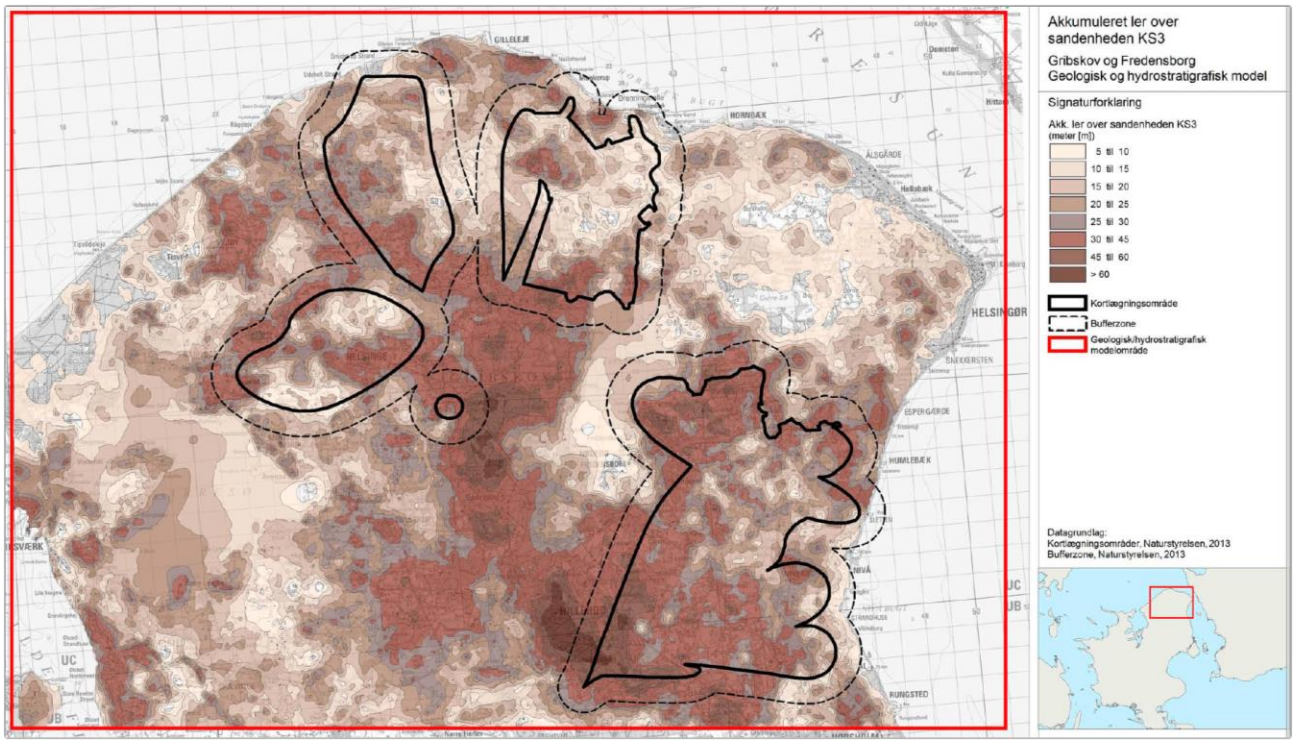
I traditionelle lagmodeller afgrænses de enkelte lag med interpolerede lagflader, og tykkelsen af et givent lag kan derved beregnes ved at subtrahere koten for lagets bund med koten for lagets top. Dette kan gøres direkte i GeoScene 3D. I en lagmodel med flere magasiner og flere lerlag kan der derfor foretages beregninger af eksempelvis:

- Tykkelse af de enkelte lerlag i lagserien
- Samlet lertykkelse over specifikke grundvandsmagasiner
- Samlet tykkelse af lerlag i den kvartære lagserie
- Samlet tykkelse af prækvartært ler

I *Figur **5-21*** og *Figur **5-22*** ses eksempler på beregninger af tykkelsen af specifikke lerlag, mens der i *Figur **5-23*** ses et eksempel på beregning af akkumuleret ler over et specifikt magasin. Disse beregninger gengiver tykkelsen på baggrund af den opstillede geologiske model, som den fremgår i GeoScene 3D. Ved akkumulerede lertykkelser er der på kort som det viste (*Figur **5-23***) som regel ingen information om, hvorvidt der er tale om flere forskellige lertyper. Den information skal hentes i selve rapportteksten og ved gennemgang af modelopbygningen.



Figur 5-22: Tykkelse af "Arnum Ler 2". Fra Jørgensen et al. (2014).



Figur 5-23: Kort over samlet lertykkelse over magasin "KS3". (Udsnit af bilag 7.1c; Orbicon, 2013).

Voxelmodeller

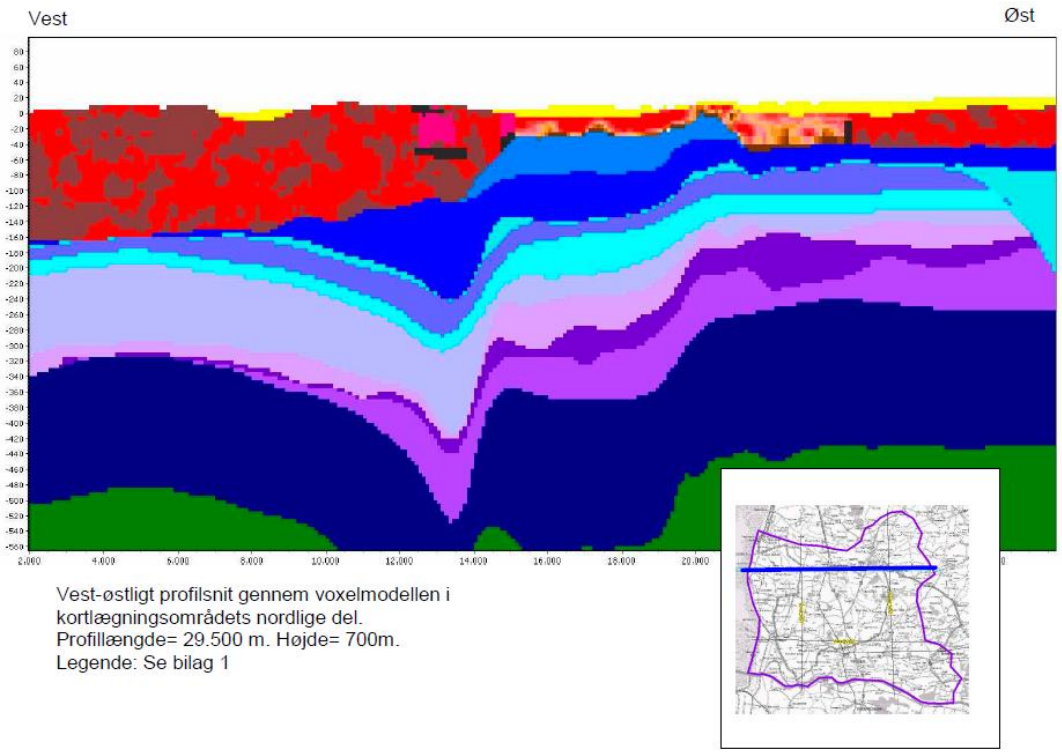
Ved voxelmodellering modelleres i volumetriske celler – voxler – og ikke i lag (se afsnit 5.2 om voxelmodellering). Dog kan der ved kombinerede modeller, være tale om, at nogle dele af lagserien modelleres med lag og andre dele med voxler (se *Figur **5-24***). Den voxel-modellerede del af lagserien vil bestå af voxler med forskellige værdier, som kan være enten forskellige litologiske klasser (specifikke formationer eller ler/sand) eller en ler-procent (ler-andel). Da der ikke udarbejdes lagflader i en voxelmodel og da der i visse tilfælde kan være tale om voxler med gradueret ler/sand-ratio, kan udarbejdelse af input til sårbarhedsvurderinger være vanskelig, men dog ikke umulig.

Et eksempel på lertykkelsesberegninger baseret på ler/sand-ratioer kan ses i *Figur **5-25***. Indenfor det område, der er kortlagt med SkyTEM, er den omtrentlige akkumulerede tykkelse af voxler med mere end 50 % ler mellem terræn og toppen af det primære grundvandsmagasin vist. Derudover er tykkelsen af ler over magasinet i indvindingsoplandene uden for det SkyTEM kortlagte område vist som minimumstykkelsen over magasinet i indvindingsboringerne (Naturstyrelsen/Orbicon, 2014). Kortet angiver den akkumulerede lertykkelse over magasinet, men angiver ikke hvor sammenhængende lerlagene i givet fald er. Da beregningerne er baseret på ler/sand-forholdet vil den viste lertykkelse udgøre et estimat baseret på en række forudsætninger.

Kortlægning af deformationsgraden af lagene over grundvandsmagasinerne

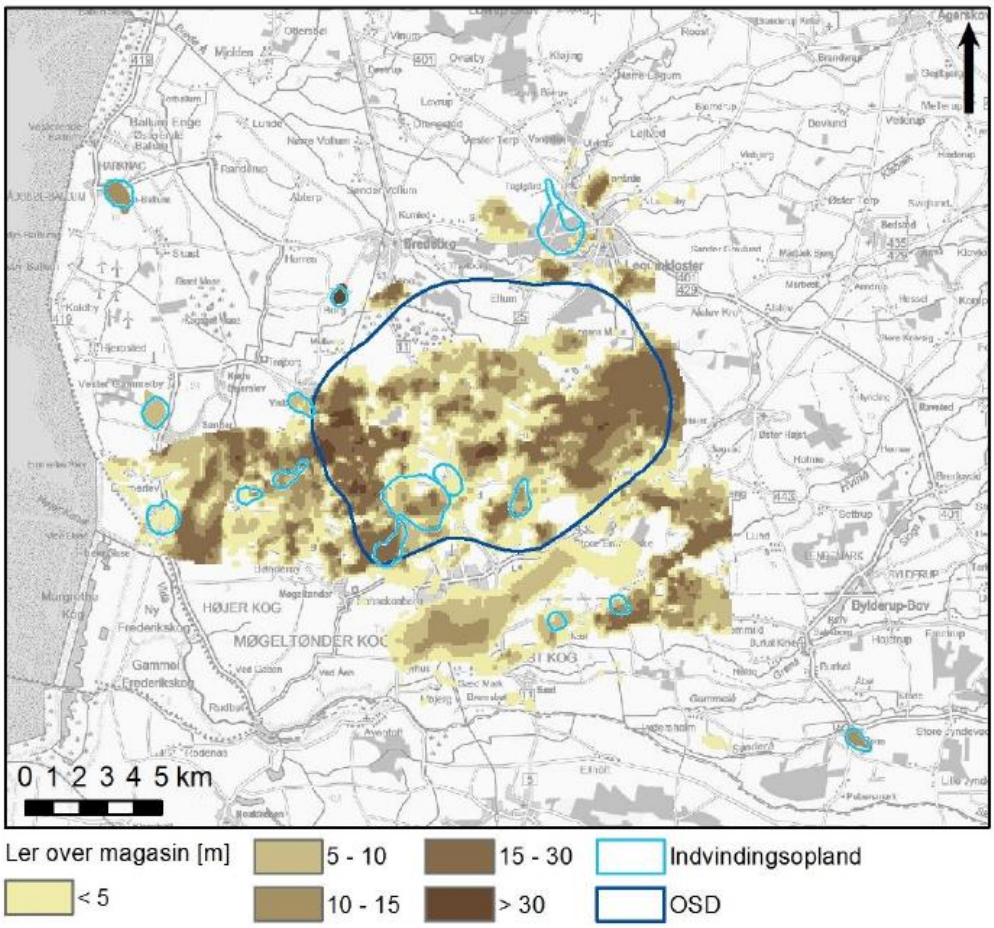
Hvis lerlagene er usammenhængende og måske tilmed stærkt deformerede, vil den naturlige, beskyttende evne overfor nedsivende, forurenet grundvand alt andet lige være nedsat. Deformationsgraden af lerlagene er derfor en vigtig parameter i forbindelse med sårbarhedsvurderinger.

Deformationsgraden af en given lagserie kan være meget varierende og i mange tilfælde er der tale om en serie af deformationshændelser i kombination med såvel erosion som aflejring. Deformerede lagserier findes mange steder i Danmark, og hovedparten af disse er glacialtektoniske deformationer (Jakobsen, 1996, 2003), mens en mindre del kan relateres til dyb tektonik (se f.eks. Jakobsen & Pedersen, 2009; Sandersen & Jørgensen, 2015).



Figur 5-24: Profilsnit gennem voxelmodel. Den nederste del af lagserien (grønne/blå/lilla lag) er modelleret som en lagmodel, mens den øvre del (røde/brune farver) er modelleret med voxler på baggrund af MPS (Multi Point Statistics). Fra Jørgensen et al. (2014).

Kompleksiteten af de deformerede lagserier kan vanskeliggøre kortlægningen og modelleringen af lagene i 3D, og derfor kan der ved sårbarhedsvurderinger være tale om en stor usikkerhed i forhold til lerlagenes samlede beskyttende evne. De geofysiske metoders mulighed for at opløse deformationerne i de overfladenære lag er blevet væsentligt bedre i de senere år, men på trods af dette kan det være vanskeligt – og i mange tilfælde umuligt – at 3D-modellere en given, kompleks geologi. I Jørgensen et al. (2014) er der anvendt stokastisk modellering til kortlægning af et glacialtektonisk kompleks og modellering med voxler, hvilket blandt andet gjorde det muligt at konstruere et lertykkelseskort (*Figur **5-25***). Denne fremgangsmåde kan være tidskrævende, men valget af en statistisk indgangsvinkel kombineret med modellering med voxler kan være det bedste alternativ til lagmodellering.

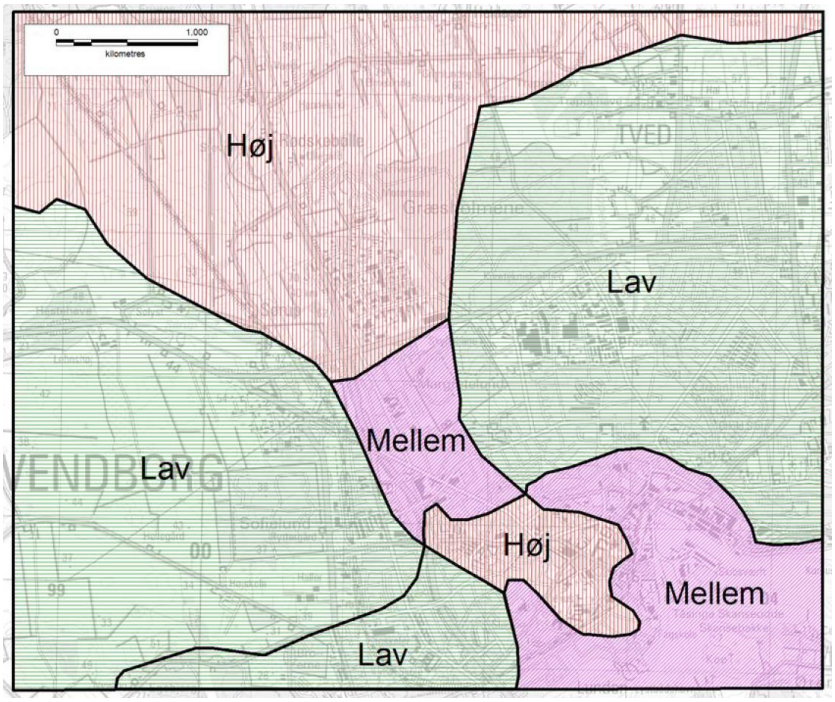


Figur 5-25: Akkumuleret lertykkelse over det primære grundvandsmagasin nord for Tønder (Naturstyrelsen/Orbicon; 2014). Kortet dækker kun indvindingsoplande og den danske del af det område, der er dækket af SkyTEM data.

I andre tilfælde kan manglen på data eller lagseriens kompleksitet være så stor, at lagserien - uanset modelleringsmetoden - ikke vil kunne kortlægges tilfredsstillende. Et alternativt input til sårbarhedsvurderingerne kan i stedet være en kvalitativ vurdering af deformationsgraden på baggrund af den geologiske model og den geologiske baggrundsviden. Et eksempel på dette er fra Svendborg, hvor vurderingen af deformationsgraden har taget udgangspunkt i en topografisk analyse kombineret med resultater og viden fra den geologiske 3D-modellering (Sandersen, 2013). Resultatet var et kort med angivelse af deformationsgraden af den øvre del af lagserien med følgende inddeling (*Figur **5-26***):

- **Lav deformationsgrad:** Lagserien er kun deformeret i mindre grad og lagtykkelser og lagsammenhænge vurderes ikke at være nævneværdigt ændret som følge af deformationer.
- **Mellem deformationsgrad:** Lagserien er i nogen grad deformeret, og det forventes at deformationerne kan have påvirket såvel lagtykkelser og lagsammenhænge. Flager kan forventes.
- **Høj deformationsgrad:** Lagserien er stærkt deformeret, og det kan ikke forventes at lagene ligger på primært leje. Lagsammenhænge og lagtykkelser er stærkt varierende, og flager, folder og overskydninger er hyppigt forekommende.

Kortet over deformationsgraden kunne derefter indgå i de samlede vurderinger af risikoen for grundvandet.



Figur 5-26: Kvalitativt vurderet deformationsgrad for den øvre del af lagserien i Svendborg (fra Sandersen, 2013).

Det anbefales:

- at der ved voxelmodellering tidligt i projektforløbet tages aktivt stilling til, hvordan beregninger af lertykkelser skal kunne eksporteres fra modellen
- at der ved kortlægning af lerlag ovenover grundvandsmagasinerne foruden beregninger af lerlagenes samlede tykkelse over grundvandsmagasinerne også sker en:
  - kortlægning af lerlagenes individuelle udbredelse
  - beskrivelse af de individuelle lerlag ud fra data (jordprøvebeskrivelser, kornstørrelsesanalyser, sedimentkemi, resistivitetsniveau/variation m.v.)
  - beskrivelse af lerlagenes dannelse og mulige alder
  - vurdering af graden af deformation af lagserien, hvori lerlagene indgår
  - beskrivelse af særlige geologiske forhold, som kan have betydning i forhold til efterfølgende grundvandsmodellering og sårbarhedsvurderinger (samt eventuelt udarbejdelse af zoneringskort)

6. 3D geologisk modellering - Dokumentation og afrapportering

6.1 Dokumentation

6.1.1 Indledning

En geologisk model, der skal anvendes som baggrund for videre beslutningsprocesser, har kun ringe værdi, hvis der ikke foreligger en udførlig dokumentation af det udførte arbejde. Udarbejdelse af en geologisk model er typisk en kompliceret arbejdsopgave med mange delaktiviteter, som er baseret på subjektive vurderinger og opbygget erfaring, og som blandt andet omfatter dataindsamling, databehandling samt geologiske/hydrogeologiske tolkninger og vurderinger. Modtagerne af modellen skal ved at læse dokumentationen kunne få et overblik over modelresultaterne og de vigtigste dele af modelarbejdet samt kunne vurdere, om modellen er udført i henhold til det aftalte, og at den er af en acceptabel kvalitet. Omfanget og kvaliteten af dokumentationen er ligeledes afgørende, hvis en modelopgave skal overdrages til en anden modellør, eller hvis modellen på et senere tidspunkt skal danne grundlag for en opdateret model. En mangelfuld dokumentation kan medføre, at modellen ikke er gennemskuelig og der er således risiko for, at den ikke vurderes troværdig, og derfor ikke kommer til at kunne anvendes som oprindeligt tiltænkt.

Dokumentation i forbindelse med geologisk modellering kan udføres på forskellige måder, og der bør ved projektets start ske en aftale mellem opdragsgiver og modellør omkring omfang og niveau for dokumentationen. Detaljeret dokumentation udgør en ikke ubetydelig arbejdsbyrde under modelopstillingen, men denne tid vil dog som regel være godt givet ud. Skal modellen senere opdateres, vil den ekstra tid anvendt på dokumentationen kunne tjenes ind ved en mindre arbejdsindsats under opdateringen og under alle omstændigheder vil det sikres, at modellen ikke afskrives som uanvendelig.

I et projektforløb kræves der naturligvis en del administrativ dokumentation. Særligt i de tilfælde, hvor modelopstillingen er ordret hos en rådgiver. Der tænkes i denne forbindelse på tidsplaner, møde/beslutningsreferater, statusnotater mv., som kan være af stor betydning for de involverede parter i tilfælde af, at projektets omfang ændres undervejs. Den administrative dokumentation vil dog ikke blive beskrevet nærmere her, da de forskellige firmaers og institutioners interne procedurer vil variere. Men det kan anbefales, at der løbende i modelleringsprojektet sker en optegnelse af fremdrift og aftalte ændringer i statusnotater, da modelleringsopgaver erfaringsmæssigt kan være svære at planlægge ned i mindste detalje. Herved sikres det, at modelarbejdets delresultater løbende godkendes af alle parter.

I denne vejledning skelnes mellem afrapportering og dokumentation, hvor førstnævnte udgør afrapporteringen af modelarbejdets resultater og sidstnævnte udgør dokumentation af procedurer og tolkninger undervejs. I sagens natur vil der være en del overlap, idet den samlede afrapportering vil indeholde begge dele. Nærværende afsnit omhandler den tekniske dokumentation, mens afsnittet om afrapporteringen (afsnit 6.2) fokuserer på selve rapportopbygningen.

6.1.2 Omfang af dokumentationen

Foruden at fungere som en afrapportering for modtagerne af den geologiske model, så bør en model altid dokumenteres så den kan overtages af tredje part, eller så det gøres muligt at videreføre modelleringen på et senere tidspunkt i forbindelse med en opdatering. Principielt set bør dokumentationen give mulighed for en fuldstændig reproduktion af det udførte arbejde. Dette stiller store krav til dokumentationen, hvor i princippet alle udførte tolkninger og antagelser, samt de gennemførte procedurer, skal dokumenteres.

En modeldokumentation bør samles i én rapport, og hvis omfanget er stort, kan dokumentationen opdeles i en hovedtekst (den egentlige modelrapport) samt en teknisk dokumentation placeret i en række bilag/appendiks. Foruden rapporten vil en dokumentation også bestå af selve det digitale 3D modelprojekt. En del af dokumentationen af tolkninger, såsom redegørelser for geologiske tolkninger og annoteringer i tolkningsdatabasen, vil være indlejret i den digitale model, og omfanget af dette bør beskrives nærmere i rapporten.

Detaljeringsgraden af modelrapporten vil afhænge af det specifikke formål og aftalerne med opdragsgiveren, men generelt anbefales et minimumsniveau, som sikrer en videre anvendelse af modellen.

Enhver modelopstilling er unik pga. eksempelvis formål, modelstruktur, tilgængelige data, projektforløb, modelopstillerens foretrukne arbejdsproces og så videre. Det er derfor ikke muligt at opstille en detaljeret og specifik liste over, hvad der skal dokumenteres på de enkelte stadier af modelopstillingen, og hvordan denne dokumentation skal foretages. En brugbar retningslinje er dog, at modelopstilleren under hele processen stiller sig selv spørgsmål som: Hvilke tolkninger gennemfører jeg? Hvilke analyser, data og baggrundsviden bygger mine tolkninger og antagelser på? Hvad skal dokumenteres, for at modellen skal kunne undergå en kvalitetssikring eller et review, eller hvad skal dokumenteres, hvis modellen skal kunne reproduceres?

I forbindelse med den geologiske forståelsesmodel vil det primært være dokumentation i form af udførlig tekst, referencer, figurer eller tegninger, der vil være behov for. Under arbejdet med den rumlige geologiske model vil det primært være en beskrivelse af de udførte geologiske tolkninger, dvs. detaljerede beskrivelser af benyttelse af basisviden, anvendte data, tolkningsprocedurer, korrelationer af laggrænser, kvalitetsvurderinger af data, usikkerhedsvurderinger af de udførte tolkninger mv. I forbindelse med interpolationer af flader er det også vigtigt med grundig dokumentation af f.eks. gridningsprocedurer, settings m.m.

Dele af dokumentationen for de geologiske tolkninger kan registreres for hver enkelt tolkningspunkt i rummet, ved at tildele hvert tolkningspunkt attributter (se under afsnit 5.1 om lagmodellering). Dette er typisk en tidskrævende proces, og i stedet for at dokumentere for hvert eneste digitaliserede fladetolkningspunkt i tolkningsdatabasen, kan man udarbejde en samlet beskrivelse for en gruppe af fladetolkningspunkter – f.eks. på profilniveau eller på fladeniveau. Det er vigtigt, at mulighederne for tilføjelse af information til hvert tolkningspunkt i tolkningsdatabasen nøje overvejes. Det er centralt, at de enkelte tolkningspunkter dokumenteres, og det skal beskrives, hvorledes f.eks. frie tolkningspunkter er benyttet i tolkningen og hvilken mærkning har de i databasen, så deres betydning for modellen kan vurderes i sammenhæng med nye data og ved modelopdatering. For den hydrostratigrafiske models

vedkommende er det på tilsvarende måde vigtigt, at der foretages grundig dokumentation af det udførte arbejde.

For at kunne foretage en tilstrækkelig detaljeret dokumentation for en videre anvendelse af modellen, er det vigtigt, at dokumentationen foretages løbende. Forsøger man at udføre dokumentationen til slut i projektet, vil en stor del af detaljerne højst sandsynligt være glemt. Det anbefales derfor, at der laves en digital logbog, hvori de tekniske detaljer noteres gennem hele projektet. Informationerne i denne logbog vil sjældent være relevante for ikke-fagpersoner. Logbogen skal således ikke være pædagogisk opbygget med forklaring, men en nøgtern beskrivelse af relevante delopgaver, gerne suppleret med "screen-dumps" og kommentarer. Ved afrapporteringen kan logbogen læses igennem, og de betydende tolkninger og antagelser eller eventuelle problemstillinger indsættes i rapporten.

En stor udfordring ved at føre en teknisk logbog er at få den organiseret, så de rigtige informationer kan findes igen. Principielt kan enhver udforme sin egen struktur for logbogen, men man skal blot huske på, at et af formålene er, at andre kan overtage arbejdet. Det gælder derfor om at lave en logisk struktur, som andre også kan finde rundt i. To eksempler på logbøger kan findes i Niras (2015) og Rambøll (2015).

Det anbefales:

- at der løbende i modelleringsprojektet sker en optegnelse af fremdrift og aftalte ændringer i statusnotater. Herved sikres det, at modelarbejdets delresultater løbende godkendes af alle parter
- at dokumentationen holdes på et detaljeringsniveau, som sikrer fremtidig anvendelse af modellen
- at model-dokumentationen foretages løbende undervejs i modelleringsprojektet
- at der i udstrakt grad anvendes log-bøger til optegnelser af den løbende, tekniske dokumentation

6.2 Afrapportering

6.2.1 Generel beskrivelse

Når arbejdet med den geologiske modelopstilling er afsluttet, skal der afleveres en modelrapport sammen med den digitale model. Modelrapporten skal sammen med en beskrivelse af de geologiske og hydrostratigrafiske forhold og den tekniske dokumentation være en redegørelse for det arbejde, herunder overvejelser, tolkninger m.m., der er udført i forbindelse med modelopstillingen. Det er ofte en god idé, at der så tidligt som muligt i projektforløbet sker en forventningsafstemning med hensyn til rapportens indhold og omfang.

Modelrapporten skal udarbejdes, så den sammen med den mere tekniske dokumentation (se afsnit 6.1) gør det muligt for projektmodtageren at sætte sig ind i og forstå områdets geologi og hydrostratigrafi, og hvordan arbejdet er udført. Formålet er også, at tredje part skal kunne arbejde videre med den opstillede model eller bruge den i andre sammenhænge.

6.2.2 Rapportens indhold

Modelrapporten inddeles mest hensigtsmæssigt i en tekstdel og en bilagsdel, da denne type rapporter erfaringsmæssigt indeholder et større antal kortbilag, profilsnit o. lign.

I rapportens tekstdel skal der redegøres for det indledende arbejde, arbejdet der er udført indenfor hvert af de tre trin i modelopstillingen, ligesom de samlede resultater af arbejdet skal præsenteres. I vejledningens kapitel 2 kan der for hvert af de 3 trin ses en mere detaljeret beskrivelse af, hvad arbejdet under de 3 trin bør omfatte. Rapporten bør også indeholde andre typer dokumentation (se afsnit 6.1).

I *Tabel **6-1*** er der givet et forslag til en disposition på kapitelniveau for en standard-modelrapport. Til hvert kapitel er givet en række emner, som bør indgå i rapportteksten.

Tabel 6-1: Forslag til indhold og opbygning af en geologisk modelrapport

Kapitel	Forslag til indhold
Rapporttitel og titelblad	Dækkende titel for rapportens indhold. Derudover bl.a. • Forfatternes navne, • Navn på den der har godkendt rapporten • Måned og år • Rekvirent/opdragsgiver
Indholdsfortegnelse	Indholdsfortegnelse inkl. bilagsoversigt og appendiksoversigt
Resumé	Resumé af indholdet i rapporten, herunder delkonklusioner og konklusion
Kaptel 1 **Indledning**	Indledning, hvor den overordnede baggrund og formålet med projektet beskrives. Indledningen kan med fordel indeholde en kort præsentation af rapportens opbygning
Kapitel 2 **Problemformulering**	I dette kapitel redegøres der nærmere for bl.a.: • Formål med modelarbejdet, herunder ønskerne til efterfølgende anvendelse

	• Modelområde og fokusområde • Ønsket detaljeringsgrad • Særlige problemstillinger i området
Kapitel 3 **Plan for modelarbejdet**	En overordnet beskrivelse af arbejdsgangen ved løsning af opgaven, kapitlet kan bl.a. indeholde: • Modeltypevalg • Modelleringsstrategi • Anvendt software, type og version • Generelt om tolkningsmetoder og -procedurer • Kvalitetssikring • Evt. beskrivelse af sagsforløb
Kapitel 4 **Datagrundlag**	Præsentation af datagrundlaget. • Gennemgang af datatyper - Datakilder - Datadækning - Datakvalitet • Eksisterende modeller i området • Samlet vurdering af datagrundlaget
Kapitel 5 **Geologisk forståelsesmodel**	I dette kapitel beskrives den overordnede geologiske og strukturelle opbygning, baseret på eksisterende litteratur, kort og rapporter. Kapitlet kan bl.a. indeholde • Datagrundlag og vurdering heraf • Sammenstilling af geologien i området, som den fremgår af eksisterende materiale • Rids af geologiske problemstillinger og/eller uafklarede forhold, som er af vigtighed for den geologiske modellering
Kapitel 6 **Rumlig geologisk model**	Opstillingen af rumlige geologiske model for området beskrives, og resultater fremlægges. Kapitlet kan typisk indeholde: • Definition af lagserien • Beskrivelse af geologiske strukturer • Evt. genanvendelse af eksisterende modeller • Modelopsætning i GeoScene3D • Til- og fravalgte data • Anvendelsen af kemiske data, potentiale m.m. • Profillayout og tolkningsprocedurer • Udførte geologiske tolkninger • Lagenes udbredelse • Usikkerhedsvurderinger • Resultater af modelleringen • Fokuspunkter for den hydrostratigrafiske model
Kapitel 7 **Hydrostratigrafisk model**	Opstillingen af den hydrostratigrafiske model beskrives og eventuelle forsimplinger i forhold til den rumlige geologiske model beskrives. I kapitlet redegøres bl.a. for • Definition af lagserien • Evt. genanvendelse af eksisterende modeller • Modelopsætning i GeoScene3D • Fravalgte og tilvalgte data • Anvendelsen af kemiske data, potentiale m.m. • Profillayout og tolkningsprocedurer • Interpolation af flader • Fladejusteringer i GeoScene3D • Usikkerhedsvurderinger

	• Resultater af modelleringen
Kapitel 8 **Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel**	Anvendelsen af den hydrostratigrafiske model i det videre modelarbejde i forbindelse med opstilling af en grundvandsmodel beskrives. Hvis der er særlige forhold, der skal tages hensyn til, bør disse beskrives. • Fokuspunkter for den hydrologiske model • Hydrauliske egenskaber af modellagene beskrives med baggrund i de litologiske beskrivelser fra den rumlige geologiske model
Kapitel 9 **Konklusioner og anbefalinger**	Konklusionerne fra modelarbejdet samles og der kan eventuelt gives anbefalinger til videre arbejde eller forbedringer af datagrundlag og model
Kapitel 11 **Det digitale slutprodukt**	Beskrivelse af det digitale slutprodukts opbygning. Hvis der udover GeoScene3D-projektet er flere mapper med filer relateret til projektet, bør disse inkluderes.
Kapitel 12 **Referencer**	Angivelse af referencer
Appendix og bilag	Disse samles bagest i rapporten. Indeholder alle kort, profilsnit, logbøger, notater mv.

Normalt indeholder en modelrapport en del bilag i form af kort, profilsnit, notater og logbøger, som det vurderes relevant at afrapportere. Det anbefales på så tidligt et tidspunkt som muligt, at få afklaret med opdragsgiveren hvilke profiler, kort og korttemaer, der som minimum forventes vedlagt rapporten.

6.2.3 Rapportens omfang

Omfanget af forslaget til rapportdisposition i *Tabel **6-1*** er det anbefalede minimum. Uanset hvor meget tekst og hvor mange figurer de enkelte punkter ledsages af, er det vigtigt, at de hver især beskrives og inkluderes i rapporten. Hvis disse oplysninger ikke findes i rapporten, vil det være meget svært at genanvende modellen fremover, da kun den udførende modellør vil vide, hvordan modellen er blevet til. Hertil kommer, at selvom geomodelløren selv kommer til at tage modelarbejdet op igen efter nogle år, så er det uomtvisteligt, at en del viden vil være glemt. Vigtigheden af en god og tilstrækkelig afrapportering kan ikke fremhæves for meget, og i samme åndedrag skal det understreges, at det er mindst ligeså vigtigt, at rapporten rent faktisk bliver læst af de modellører, som senere arbejder videre med modellen. Det er meget vigtigt at huske, at en geologisk model ikke kun består af en række digitale flader i rummet; en geologisk model består af BÅDE en rapport OG et digitalt modelprojekt (fx et GeoScene3D-projekt).

Det skal også understreges, at indholdet af en geologisk modelrapport bestemmes af geologerne, der udfører arbejdet, og et indhold af en rapport kan og må godt afvige fra listen i *Tabel **6-1***. Det vigtigste er, at alle relevante dele af modelarbejdet dokumenteres og samles i på en lettilgængelig form, og at den samlede historie fortælles, så brugerne af modellen er fuldt orienteret om modellens tilblivelse. Det anbefales dog, at der allerede tidligt i projektet haves en dialog med opdragsgiveren om den endelige rapports indhold. Med baggrund i *Tabel **6-1*** eller egen erfaring fra tidligere modelopgaver vil det være uproblematisk allerede fra projektstarten at skitsere det forventede indhold af den endelige rapport. Ændringer til denne skitse af indholdsfortegnelsen kan løbende justeres i samråd med opdragsgiveren.

Modelrapporten uploades til GEUS' rapportdatabase (www.geus.dk). I rapportdatabasen kan der findes mange eksempler på forskelligt opbygget, men stadig fyldestgørende afrapportering.

Det anbefales:

- allerede ved projektets start, at oprette en indholdsfortegnelse for modelrapporten. Denne kan løbende justeres i samråd med opdragsgiveren
- på så tidligt et tidspunkt som muligt, at få afklaret med opdragsgiveren hvilke profiler, kort og korttemaer, der som minimum forventes vedlagt rapporten
- at rapporten fortæller den samlede historie, så slutbrugerne er fuldt orienteret om modellens tilblivelse

6.3 Det digitale slutprodukt

6.3.1 Indledning

Den geologiske model består, som beskrevet i afsnit 6.2, af såvel en rapport som et digitalt modelprojekt (fx i GeoScene 3D). Dette kapitel omhandler den sidstnævnte del.

Basalt set består rumlige geologiske og hydrostratigrafiske lagmodeller af lagflader og tilhørende lag. Lagfladerne er grundlæggende defineret af fladetolkningspunkter med tilhørende metadata lagret i tolkningsdatabasen (punkttype, usikkerhedsvurdering, mv.), mens lagene er defineret som rummet mellem lagfladerne. Fladetolkningspunkterne interpoleres og griddes og de producerede lagflader justeres, klippes og sammenkobles i GeoScene3Ds toolbox, og i nogle tilfælde formes lagfladerne ved hjælp af gridmodellering, hvor der ikke genereres eller flyttes tolkningspunkter.

Grundstenene i den digitale del af den geologiske lagmodel er derfor tolkningspunkter og tilhørende interpolerede gridflader. Dette lyder umiddelbart simpelt, men med et stort antal tolkningspunkter i rummet fordelt på mange grænseflader og med forskellige tilknyttede attributter/metadata, samt mange flader, som hver især har forskellige afgrænsninger og justeringer, så er en digital geologisk model blevet en ganske kompliceret sag. Ældre modeller, som findes i Modeldatabasen (se 6.4), kan være simpelt opbygget med tolkningspunkter uden metadata og med interpolerede lagflader i en simpel lagkagestruktur – eller måske kun bestå af de interpolerede lag. I dag, hvor GeoScene3D har fundet bred anvendelse indenfor grundvandskortlægningen (se afsnit 4.1 om 3D modelleringssoftware), er mulighederne mange og kompleksiteten øget betydeligt. Ud over lagmodellerne haves voxelmodellerne eller kombinerede lag- og voxelmodeller, som gør modelprojekterne omfattende og måske endnu mere kompliceret opbygget. Hertil kommer, at dele af modellen kan være lavet i andre softwarepakker og derefter importeret i GeoScene3D.

6.3.2 GeoScene3D-projektet

Det digitale slutprodukt er på grund af ovenstående typisk kompliceret opbygget, og hvis ikke der sker en strukturering af indholdet, så kan modellen være svær at tilgå for andre end modellørerne selv. I mange tilfælde ønsker opdragsgiveren kun at se den udarbejdede model i GeoScene3D-vieweren og ikke dykke ned i modeldetaljerne, og specielt i det tilfælde er det ekstra vigtigt, at strukturere opbygningen så f.eks. ”mellemregninger” enten fjernes eller samles i mapper og undermapper i modelstrukturen.

Hvis projektet indeholder store mængder data, kan der laves en kopi af GeoScene3D-projektet, hvor kun et ”billede” af data er inkluderet, og hvor alle ”mellemregninger” er fjernet. En sådan kopi vil være lettere at distribuere og vil være målrettet visualisering i GeoScene3D-vieweren uden muligheder for editering. Det endelige GeoScene3D-projekt vil derefter bestå af BÅDE det fulde GeoScene3D-projekt og det reducerede projekt målrettet visualisering.

Der vil være forskellige måder at ”klargøre” sit endelige digitale produkt på, hvilket vil afhænge af modellørernes præferencer og erfaring, samt ønskerne fra opdragsgiverens side. Men på grund af risikoen for at levere et unødigt kompliceret GeoScene3D-projekt anbefales det, at der sker en målrettet klargøring af det digitale slutprodukt med tanke for den efterfølgende anvendelse.

I mange tilfælde, hvor grundvandsmodellører skal bruge modellen efterfølgende, kan der være brug for at eksportere modellagene, så de direkte kan anvendes uden at grundvandmodellørerne skal bruge GeoScene3D. Denne dialog omkring eksport af modellag kan med fordel foretages undervejs i arbejdet med den geologiske modellering.

6.3.3 Andre digitale filer

Filer, som stammer fra bearbejdning af data i andre softwarepakker eller eksporterede lag, som nævnt ovenfor, kan lægges i separate mapper, som leveres sammen med GeoScene3D-projektet. Hvis der er tale om GIS-filer kan disse enten lægges ind i GeoScene3D-projektet eller samles i mapper med tydelig navngivning alt efter indholdstype. GeoScene3D-projektet og de supplerende mapper udgør derefter til sammen det digitale slutprodukt. Indholdet af dette bør beskrives i den medfølgende rapport.

Det anbefales:

- at opbygningen af GeoScene 3D-projektet beskrives i afrapporteringen
- at der sker en målrettet klargøring af det digitale slutprodukt med tanke for den efterfølgende anvendelse
- at sikre en dialog omkring eksport af modellag til f.eks. grundvandsmodellørerne undervejs i arbejdet med den geologiske modellering.

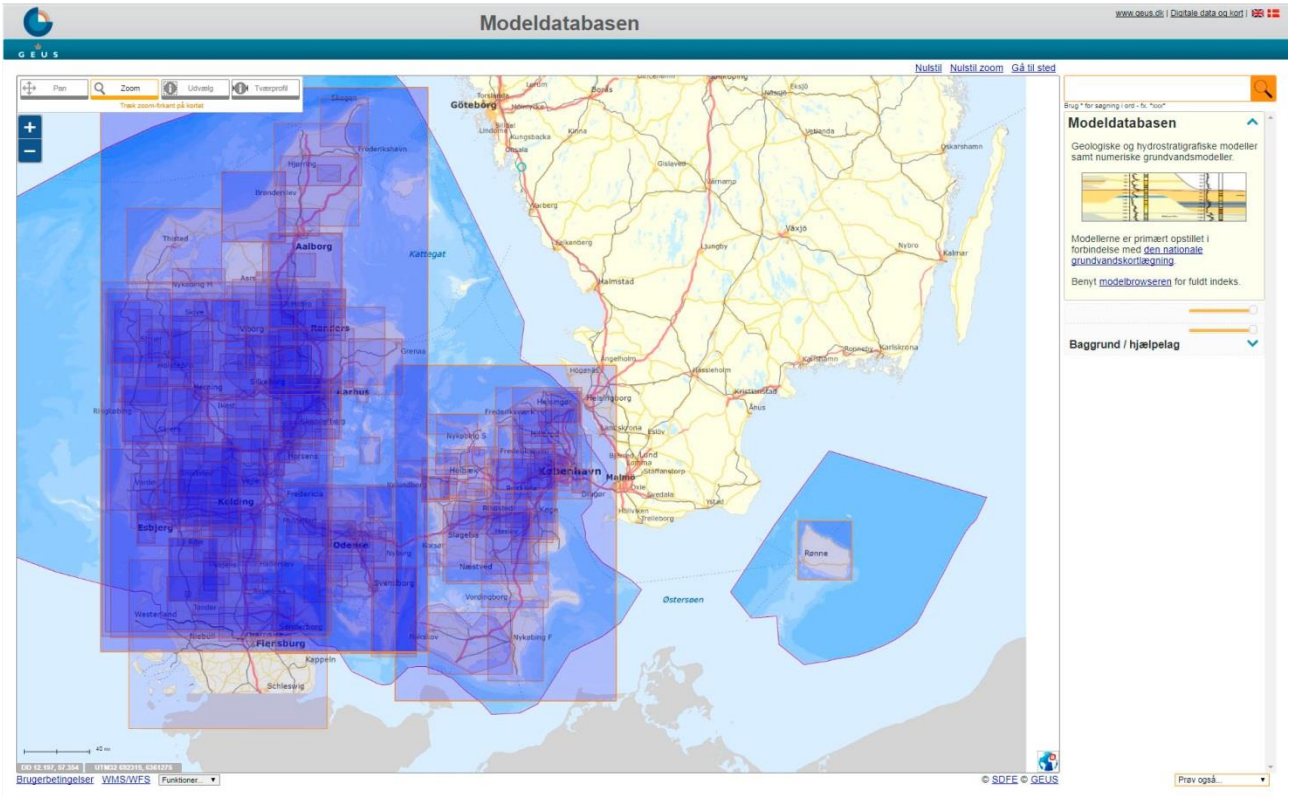
6.4 Eksport af modeller til modeldatabasen

6.4.1 Generel beskrivelse

Modeldatabasen er en fælles offentlig database til lagring af geologiske modeller (*Figur 6-1*). Den er oprindeligt udviklet i et samarbejde mellem GEUS og de tidligere amter og har primært til formål at lagre og udveksle rumlige geologiske og hydrostratigrafiske modeller m.v. Databasen har til formål at sikre lagring af geologiske modeller på en ensartet måde, således at modeller eller dele af modeller løbende kan genbruges og udbygges i takt med, at nye data indsamles. Derved har databasen været et vigtigt led i lagringen af data fra grundvandskortlægningen, således at alle modeller udført i det danske område i forbindelse med grundvandskortlægningen, kan downloades fra Modeldatabasen.

Modeldatabasen kan tilgås fra GEUS' hjemmeside (www.geus.dk) og rummer følgende modeltyper:

- Geologiske forståelsesmodeller
- Rumlige geologiske modeller
- Hydrostratigrafiske modeller
- Lagmodeller for grundvandsforekomster



Figur 6-1: Modeldatabasen; Screendump af interface fra GEUS' hjemmeside.

Endvidere er det muligt at lagre og downloade eksterne datafiler knyttet til de enkelte modeller. Dette omfatter bl.a. mulighed for at lagre numeriske grundvandsmodeller og GIS data. I modeldatabasen lagres interpolerede flader i en grid-struktur bestående af dataceller med en prædefineret størrelse og et

geografisk startpunkt. Til hvert grid kan der være knyttet flere interpolationer (f.eks. topkoter, bundkoter og grundvandspotentialer) og til hver interpolation / tema kan endvidere være knyttet et sæt punktdata, som repræsenterer det primære sæt af datapunkter, der er grundlag for interpolationen (Ditlefsen et al., 2012).

I Geo-vejledning 9 (Ditlefsen et al., 2012) beskrives databasen mere indgående og der er inkluderet dels en vejledning i praktisk brug af databasen, dels et tilhørende appendiks med beskrivelse af database format og ekstra IT-værktøjer til hjælp ved inddatering af modeller. I Jørgensen et al. (2009) er der udarbejdet et datablad, som skal hjælpe med beskrivelse af de basale informationer om modeller, der lagres i Modeldatabasen. Databladet skal sikre dokumentation og lagring af udførte tolkninger, samt de informationer, der tilvejebringes ved modelopstillingen, så de er let tilgængelige for fremtidig brug. Databladet kan tilgås i Modeldatabasen.

Modeldatabasen er løbende blevet udviklet. Eksempelvis er det muliggjort at uploade dokumenter og andre eksterne filer, som er tilknyttet den enkelte model. Endvidere er der arbejdet på at udvikle digitale hjælpeprogrammer, som kan benyttes til at opbygge en PC-model til indlæsning ud fra løsrevne model data (grids og punkter). Hjælpeprogrammerne er udviklet for at imødekomme ønsker om også at kunne indlæse ”gamle” modeller.

6.4.2 Fremgangsmåde ved eksport af modeller til modeldatabasen

Indlæsning af en model i modeldatabasen foregår i tre trin (Ditlefsen et al., 2012):

- Generering af en lokal eksport database i det såkaldte PCModel-format.
- Upload af PCModellen til modeldatabasen hos GEUS
- Angivelse/dokumentation af modellens opbygning

Generering af en PC-model
Indberetning til modeldatabasen foregår som nævnt ved hjælp af PCModel-format, der bredt giver mulighed for indlæsning af punkter, profiler og grid med tolkede laggrænser og andre attributter som f.eks. grundvandspotentialer. Dette format benyttes både ved upload til modeldatabasen samt ved download af modeller fra denne.

Upload af en PCModel
For at kunne benytte modeldatabasen og uploade modeller, skal man være registeret som bruger af databasen. Dette foregår via databasens hjemmeside, hvor vejledning vedrørende dette findes. Upload af modeller foregår, efter man er logget på, ved en simpel udpegning af den eksport-fil, der indeholder PCModellen. Herefter checkes formatet af den oploadede model, og brugeren modtager en mail fra databasen, der giver brugeren ret til at dokumentere modelopbygningen. Eventuelle udbredelsespolygoner brugt ved generering af lagflader, modelafgrænsningspolygoner og eventuelle zoneringstemaer, skal uploades sammen med modellen.

Dokumentation af PCModellens opbygning
Sidste led i upload af modellen er en online dokumentation af, hvordan modellen er opbygget. Før de uploadede data er dokumenteret, kan modellen ikke tilgås af andre. Brugerens e-mailadresse, der

fungerer som brugernavn, skal endvidere være registreret i PC-modellen, for at man har ret til at foretage den sidste registrering. Dokumentationen består bl.a. i at definere de enkelte lag ved at præcisere fladerne, der udgør top og bund af disse. Upload af tilhørende dokumenter udføres også på dette tidspunkt.

6.4.3 Modeller lagret i modeldatabasen

Når en model er tilstrækkeligt dokumenteret i Modeldatabasen, vil den kunne ses af alle databasens brugere. Modeller i databasen kan opsøges dels ved hjælp af en søgefunktion, hvor man kan søge på type, modelejer, geografisk delområde m.m. Alternativt kan modellerne opsøges på kort ved hjælp af en GIS-funktion. Indholdet af den enkelte model kan herefter nærmere inspiceres ved hjælp af en såkaldt ”modelbrowser”, og der kan ses forskellige oversigtskort med temaer for de enkelte lag i modellen. Endelig kan man som bruger af modeldatabasen downloade alle tilgængelige modeller.

For nærmere beskrivelse af up- og download til/fra Modeldatabasen, se Ditlefsen et al. (2012).

7. Referencer

Amtsrådsforeningen, 2002: Grundvand som drikkevandsressource. Beskrivelse af grundvand, vandindvinding, vandforsyning og grundvandsforurening. Amtsrådsforeningen, pp. 1-38. ISBN 87-7723-275-5.

Andersen, L.T. & Nyholm, T. 2012: Hydrostratigrafisk model for Lindved Indsatsområde, Intern rapport. Naturstyrelsen Århus. Rapportdatabase ID: 87870.

Andersen, S. A. 1933: Det danske landskabs historie. Levin & Munksgaard, København.

Auken, E., Fiandaca, G., Christiansen, A.V., Maurya, P.K., Holm, H., 2016. Mapping the lithotypes using the in-situ measurement of time domain induced polarization: El-log, in: Proceedings of the 4th International Workshop on Induced Polarization. Aarhus, pp. 3.

Auken, E., Christiansen, A. V., Jacobsen, B. H., Foged, N. og Sørensen, K. I. 2005: Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. Geophysical Prospecting Vol. 53, pp. 497-506.

Bai, W., 2014: Grundvandets strømning. I: Vandforsyning, Nyt Teknisk Forlag, 784 sider, ISBN 978-87-571-2799-7

Bay, H., Tyge, P., Rasmussen, L. & Nicolaisen, J., 2004: Forceret omsætning af reduktionskapacitet for nitrat i nærzonen til kildepladser. ATV møde. Vintermøde om Jord- og Grundvandsforurening, Vingstedcentret 9. – 10. marts 2004.

Bastrup, J., Baumann, J. & Villumsen (Red.), 2013: Vejledning om boringer på land. Miljøstyrelsen 2013, ISBN nr. 978-87-7279-617-8.

Behroozmand, A.A., Keating, K., Auken, E., 2014. A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization. Surveys of Geophys. 36, 27–85. doi:10.1007/s10712-014-9304-0.

Berthelsen, A., 1978: The methodology of kineto-stratigraphy as applied to glacial geology. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 27, Special Issue, pp. 25-38.

Binzer, K. & Stockmarr, J. 1994: Prækvartæroverfladens højdeforhold. Geologisk kort over Danmark, DGU Kortserie nr. 44. København 1994.

Caers, J., 2011: Modeling uncertainty in the earth sciences, 229 sider, John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-1-119-99262-2.

Christensen, N.B., Møller, I., Rasmussen, T.M., Sørensen, K.I. og Tølbøll, R.J. 2002: En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomænemetoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark. DGU-Rapport 2002/77, GEUS, 240 p.

Christiansen, A.V., Pedersen, J.B., Auken, E., Søe, N.E., Holst, M.K., Kristiansen, S.M., 2016. Improved Geoarchaeological Mapping with Electromagnetic Induction Instruments from Dedicated Processing and Inversion. Remote Sensing 8, 1022. doi:10.3390/rs8121022.

Christiansen, A. V., and E. Auken, 2012: A global measure for depth of investigation, Geophysics, 77, 4, WB171-WB177.

COWI, 2010: Geologisk model for Bevtoft-Hovslund kortlægningsområde. Udarbejdet for Miljøcenter Ribe. Rapport, december 2010, 48 sider.

Dataansvarsaftalen, 2007: (findes på Miljøportalen): http://www.miljoeportal.dk/myndighed/-registrer_dataansvar/Sider/forside.aspx#MyndighedDataansvar

DGU. 1986: Prækvartæroverfladens højdeforhold. Kortblade 1216, 1316, del af 1215 Himmerland.
Hermansen B. og Jakobsen P.R. 2000: Danmarks Digitale jordartskort 1:25.000 version 2.0, Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelse, rap. nr 81.

Ditlefsen, C., Gausby, M., Salomonsen, J. & Hansen, M. 2012: Vejledning i anvendelse af Modeldatabasen. Geo-vejledning 9, GEUS Særudgivelse. ISBN 978-87-7871-340-7. (Kan hentes på: http://jupiter.geus.dk/ModelDBDoc/VejledningIAanvendelsenAfModeldatabasen.pdf)

Ditlefsen, C., Sørensen, J., Pallesen, T. M., Pedersen, D., Nielsen, O. B., Christiansen, C., Hansen, B. og Gravesen, P. 2008: Jordprøver fra grundvandsboringer. Vejledning i udtagelse, beskrivelse og geologisk fortolkning i felten. Geo-Vejledning 1. GEUS særudgivelse, p. 108.

Dybkjær, K & Rasmussen, E. S. 1998: Sekvensstratigrafi. Geologi - Nyt fra GEUS nr. 1/98.

Knudsen, K.L., Kristensen, P. & Larsen, N.K., 2009. Marine glacial and interglacial stratigraphy in Vendsyssel, northern Denmark: foraminifera and stable isotopes. Boreas, Vol. 38, pp. 787–810. 10.1111/j.1502- 3885.2009.00103.x. ISSN 0300-9483.

Fiandaca, G., Ramm, J., Binley, A., Gazoty, A., Christiansen, A.V., Auken, E., 2013. Resolving spectral information from time domain induced polarization data through 2-D inversion. Geophysical Journal International 192, 631–646. doi:10.1093/gji/ggs060.

Foged, N., Marker, P.A., Christansen, A.V., Bauer-Gottwein, P., Jørgensen, F., and Høyer, A. 2014: Large scale 3D-modeling by integration of resistivity models and borehole data through inversion. Hydrology and Earth System Sciences, 18, 4349–4362, 2014. DOI: 10.5194/hess-18-4349-2014.

Frederiksen, R.R., Christiansen, A.V., Christensen, S., Rasmussen, K.R., 2017. A direct comparison of EMI data and borehole data on a 1000 ha data set. Geoderma 303, 188–195. doi:10.1016/j.geoderma.2017.04.028.

Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., Christiansen, A.V., Pedersen, J.K., 2012. Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. Hydrology and Earth System Sciences 16, 1793–1804. doi:10.5194/hess-16-1793-2012.

GeoFysikSamarbejdet, 2012: Reporting Data and Models to GERDA using Aarhus Workbench.

GeoFysikSamarbejdet, 2008[1]: Vejledning i udførelse af PACES målinger.

GeoFysikSamarbejdet, 2008[2]: Opsætning i processeringssoftwaret PACES.

GeoFysikSamarbejdet, 2008[3]: Vejledning og kravspecifikation for MEP-målinger, dataprocessering og tolkning (med rettelser oktober 2015).

Geofysiksamarbejdet, 2008[4]: Spatially constrained inversion of SkyTEM data. Concept and examples. http://www.hgg.geo.au.dk/Rapporter/Spatially_Constrained_Inversion_of_SkyTEM_data.pdf

GeoFysikSamarbejdet 2007: Mangelagstolkning af TEM data - test og sammenligninger.

GeoFysikSamarbejdet, februar 2005: Processering og tolkning af MEP-data målt med gradient- array konfigurationer.

GeoFysikSamarbejdet 2003: Anvendelse af TEM-metoden ved geologisk kortlægning.

GeoFysikSamarbejdet 2002: Vejledning i udførelse af TEM-målinger.

GEUS: Jupiter databasen (http://www.geus.dk/jupiter/index-dk.htm).

Gravesen, P, 1993: DGU´s Boreprøvelaboratorium. Årsberetning 1992, side 83-85.

Gravesen, P., Balling, I.M. Vignoli, G., Klint, K.E.S., Brüsch, W., Nilsson, B., Larsen, C.L., Juhler, R. & Rosenbom, A., 2014: Vurdering af mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme leromåder (SFO-ler) på grundlag af eksisterende data. Udarbejdet for Naturstyrelsen, GEUS rapport 2014/2.

Gravesen, P. Larsen, C.L., Brüch, W., Nygaard, E., Klitten, K., Kelstrup, N. & Krüger, N., 2004: Geologi og grundvand. Håndbog og undervisningsmateriale til brøndboreruddannelsen. Miljøstyrelsens serie om boringer på land.

Grontmij, 2012: Trin 1 – kortlægning af Tønder, Løgumkloster og Løgumgårde, Højer og Daler samt Rørkær – Jejsing kortlægningsområder. Udført for Naturstyrelsen, april 2010.

Gulbrandsen, M.L., Cordua, K.S., Bach, T. & Hansen, T.M., 2017: Smart Interpretation - automatic geological interpretations based on supervised statistical models. Computational Geosciences (2017) 21:427–440. DOI 10.1007/s10596-017-9621-8.

Hansen, B.G. & Thorling, L., 2018: Geo-vejledning 2018/2: Kemisk grundvandskortlægning. Opdatering (Under udarbejdelse).

Hansen, B & Thorling, L. 2008: Geochemistry and groundwater vulnerability mapping in Denmark. Review of survey activities 2007 Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 15 pp 45-48. ISBN 978-87-7871-21-4.

Hansen, B., Mossin, L., Ramsay, L., Thorling, L., Ernstsen, V., Jørgensen, J. & Kristensen, M., 2009: Kemisk grundvandskortlægning, Geo-vejledning 6, GEUS Særudgivelse, ISBN 978-87-7871-261-5.

Hansen, M., Wiese, M., Gausby, M. & Mielby, S. 2015: Udvikling af en 3D geologisk/hydrogeologisk model som basis for det urbane vandkredsløb, Delrapport 6 – Teknisk håndtering og lagring af data og modeller. GEUS Særudgivelse. Kan downloades på www.geus.dk.

Henriksen, H.J., Troldborg, L., Sonnenborg, T., Højberg, A.L., Stisen, S., Kidmose, J.B., & Refsgaard, J.C., 2017: Geo-vejledning 2017/1: Hydrologisk vejledning. Se geovejledning.dk.

Hicock, S.R., Goff, J.R., Lian, O.B. & Little, E.C. 1996: On the interpretation of subglacial till fabric. Journal of Sedimentary Research, Vol. 66, no. 5, 928-934.

Hinsby, K., 2001: Ferskvand, samfundets vigtigste ressource. I: Temanummer Ferskvand, samfundets vigtigste ressource – Geologi og grundvandsmodeller, Nyt fra GEUS, Nr. 1/01, s. 2-6.

Houmark-Nielsen, M. & Kjær, K.H. 2003: Southwest Scandinavia, 40–15 kyr BP: palaeogeography and environmental changes. Journal of Quaternary Science 18, pp. 765–786.

Højberg AL & Refsgaard JC (2005) Kapitel 19, Metoder til usikkerhedsvurdering, i Sonnenborg TO & Henriksen HJ (eds.) (2005) Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2005/80.

Højberg, A.L., Stisen, S., Olsen, M., Troldborg, L., Uglebjerg, T.B. & Jørgensen, L.F. 2015: DK-model 2014 - Model opdatering og kalibrering. GEUS rapport 2015/8, København.

Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Foged, N., He, X. and Christiansen, A.V. 2015: Three-dimensional geological modelling of AEM resistivity data - a comparison of three methods. Journal of Applied Geophysics, 115, 65-78. DOI:10.1016/j.jappgeo.2015.02.005

Høyer, A., Lykke-Andersen, H., Jørgensen, F. and Auken, E. 2011: Combined interpretation of SkyTEM and high-resolution seismic data. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 36, pp. 1386-1397.

Håkansson, E. & Pedersen, S. S. 1992: Geologisk kort over den danske undergrund, Varv 1992.

IAEA, 2013: Isotope methods for dating old groundwater – Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013.

Jakobsen, P.R. 2014: Det digitale morfologiske kort over Danmark 1:200.000, Sjælland, Øerne og Bornholm. (http://www.geus.dk/DK/services/databank-info/Sider/dkgis-products-dk.aspx).

Jakobsen P.R., 2003. GIS based map of glaciotectonic phenomena in Denmark. Geological Quarterly, 47, 331-338.

Jakobsen, P.R., 1996. Distribution and intensity of glaciotectonic deformation in Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark. 42, 175-185.

Jakobsen P.R., Hermansen B. & Tougaard, L. 2015: Danmarks Digitale jordartskort 1:25.000 version 4.0 Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelse rap. 2015/30.

Jakobsen, P.R. & Pedersen, S.A.S, 2009. Fracture valleys in central Jylland – a neotectonic feature. Review of Survey activities 2008. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 17, 33-36.

Jørgensen, F., Sandersen, P., Høyer, A.-S. & Sonnenborg. T.O. 2016: Geologisk kortlægning i et kystnært område – et eksempel fra Vadehavet. Geologisk Viden, Nr. 2, 2016, 7-8.

Jørgensen, F., Høyer, A.-S., Sandersen, P.B.E, He, X., and Foged, N. 2015: Combining 3D geological modelling techniques to address variations in geology, data type and density – an example from southern Denmark. Computers & Geosciences 81, 53–63. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.04.010.

Jørgensen, F., Sandersen, P., Høyer, A.-S., Møller, R.R., Pallesen, T.M., He, X., Kristensen. M. & Sonnenborg, T. 2014: 3D geologisk model ved Tønder. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2014/39. 126 pp.

Jørgensen, F., Møller, R.R., Nebel, L., Jensen, N.-P., Christiansen A.V. and Sandersen, P.B.E. 2013: A method for cognitive 3D geological voxel modelling of AEM data. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 72, 3, 421-432. DOI: 10.1007/s10064-013-0487-2.

Jørgensen, F., Møller, R.R., Høyer, A.H. & Christiansen, A.V. 2012[1]: Geologisk model ved Ølgod og Skovlund – eksempel på effektiviseret modellering i et heterogent geologisk miljø. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2012/82. 83 pp.

Jørgensen, F., Scheer, W., Thomsen, S., Sonnenborg, T. O., Hinsby, K., Wiederhold, H., Schamper, C., Burschil, T., Roth, B., Kirsch, R. & Auken, E. 2012[2]. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise. Hydrol. Earth Syst. Sci., 9, 2629–2674, 2012.

Jørgensen, F., Kristensen, M., Højbjerg, A.L., Klint, K.E.S., Hansen, C., Hjort, B.E., Richardt, N. & Sandersen, P., 2008: Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. GEO-VEJLEDNING 3, GEUS Særudgivelse, 175 sider, ISBN 978-87-7871-227-1.

Jørgensen, F., Damgaard, J. and Olesen, H. 2008: Impact of geological modelling on groundwater models – a case study from an area with distributed, isolated aquifers. In: Refsgaard, J.C., Kovar, K., Haarder, E. and Nygaard, E. (Eds), Calibration and Reliability in Groundwater modelling: Credibility of Modelling. IAHS Publication 320. pp. 337-344.

Jørgensen, F., Johnsen, R., Pedersen, J., Christensen, J.F. & Sandersen, P.B.E., 2006: Investigations in the pilot project areas – Tyrsting. In: Kirsch et al. (Eds), Groundwater in buried valleys – a challenge for geo-sciences, Leibnitz Institute for Applied Geosciences, Hannover, pp. 181-190.

Jørgensen, F., Lykke-Andersen, H., Sandersen, P. B. E., Auken, E., and Nørmark, E. 2003: Geophysical investigations of buried Quaternary valleys in Denmark: An integrated application of transient electromagnetic soundings, reflection seismic surveys and exploratory drillings. Journal of Applied Geophysics. Vol. 53, 4, pp. 215-228.

Jørgensen, F. and Piotrowski, J. A. 2003: Signature of the Baltic Ice Stream on Funen Island, Denmark during the Weichselian glaciation. Boreas, Vol. 32, pp. 242-255.

Jørgensen, L. F., Sandersen, P., Sørensen, J., Troldborg, L., Ditlefsen, C., Højbjerg, A.L., Møller, R.R. & Iversen, C.H., 2009: Dokumentation af informationer om modeller – sikring af fremtidig genanvendelse. Projekt udført for By- og Landskabsstyrelsen. GEUS Rapport 2009/87, 31 sider.

Klint K.E.S., 2004: Undersøgelse af de geologiske forhold ved Gjorslev, Højstrup, Mammen og Grundfør. I: Afprøvning af Undersøgelsesmetoder med henblik på etablering af zoneringskoncept for danske lerjorde. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer, KUPA. Editor Vibeke Ernstsen. GEUS & DJF, Bilag 2, side 1-24.

Klint, K.E.S., Møller, I., Maurya, P.K., Christiansen, A.V., 2017. Optimising geological mapping of glacial deposits using high-resolution electromagnetic induction data. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 38, 9–12. Open access: www.geus.dk/publications/bull.

Klint, K.E., Nilsson, B., Troldborg, L. & Jakobsen, P.R., 2013: A poly morphological landform approach for hydrogeological applications in heterogeneous glacial sediments. Hydrogeology Journal (2013) 21: 1247–1264.

Klint, K.E.S., Abildtrup, CA., Gravesen, P., Jakobsen, PR., Vosgerau, H. 2001: Sprækkers oprindelse og udbredelse i moræneler i Danmark. Vand og Jord 8, 3, pp.111-119.

Klitten, K. 2003: Log-stratigrafi for Selandien Lellinge Grønsand formationen og Kerteminde Mergel formationen. Geologisk Tidsskrift 2003, hæfte 2, pp. 20-22, København.

Knudsen, K. L., Ditlefsen, C., Penney, D. N., Kristensen, P., Kronborg, C. & Eiríksson, J. 2014: Elsterian-Holsteinian deposits at Kås Hoved, northern Denmark: sediments, foraminifera, ostracods, and stable isotopes. Boreas, Vol. 43, pp. 251–271.

Krathus, T., 2002: Dinoflagellater – et værktøj til biostratigrafisk tolkning. Geologisk Nyt 1/02.

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

Kristensen, M., Vangkilde-Pedersen, T. Rasmussen, E.S., Dybkjær & Andersen, L.T., 2014: Miocæn 3D opdateret 2014. Den rumlige geologiske model. GEUS rapport 2014/75.

Kristensen, P., Gibbard, P., Knudsen, KL., Ehlers, J. 2000: Last Interglacial stratigraphy at Rislinge Klint, South Denmark. Boreas, Vol. 29, pp 103-116. ISSN 0300-9483.

Kronborg, C., Nielsen, O.B., Sørensen, J., Krohn, C. og Kragelund, A., 2004: Kortlægning og korrelation af grundvandsførende sedimenter i Jylland og på Fyn. Vintermøde om jord- og grundvandsforurening, bind II. Vingstedcentret 9.-10. marts 2004, pp. 253-266.

Kronborg, C, Bender, H., Bjerre, R., Friborg, R., Jacobsen, H. O., Kristiansen, L., Rasmussen, P., Sørensen, P. R. & Larsen, G. 1990: Glacial stratigraphy of East and Central Jutland. Boreas, Vol. 19, pp 273-287. ISSN 0300-9483.

Krüger, J. 2006: Nutidens landskab. pp. 361-394. I: *Sand-Jensen, K. & Larsen G. (ed.) 2006: Naturen i Danmark – Geologien; Bind 2. 552 sider, Gyldendal*

Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B., Baumann, J. 1995: Vejledning i ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse, Dansk Geoteknisk Forening Bulletin, revision 1, 130 pp.

Loke, M.H., Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics 49, 149–162. doi:10.1016/S0926-9851(01)00106-9.

Maurya, P.K., Balbarini, N., Møller, I., Rønde, V., Christiansen, A.V., Bjerg, P.L., Fiandaca, G., 2018. Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization. Geophysical Journal International ggy018, https://doi.org/-10.1093/gji/ggy018.

Mielby, S., Laursen, G., Linderberg, J., Sandersen, P. & Jeppesen, J., 2015: Udvikling af en 3D geologisk/hydrogeologisk model som basis for det urbane vandkredsløb. Udarbejdet i VTU-projektet. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS, København.

Miljøstyrelsen. 2000: Zonering Detailkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen. Nr. 3. Vejledning fra Miljøstyrelsen. ISBN 87-7944-133-5.

Milthers, V. 1948: Det danske Istidslandskabs Terrænformer og deres Opstaaen. DGU III. rk. Nr. 28.

Møller, I., 2006[1]: Ground penetrating radar. In: Kirsch et al. (Ed), Groundwater in buried valleys – a challenge for geosciences, Leibnitz Institute for Applied Geosciences, Hannover, pp. 99-105.

Møller I. 2006[2]: Ground penetrating radar survey in the northern part of the Tyrsting pilot area, the Burval project. Data report. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2006/56. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet, 77 pp.

Møller, I., Maurya, P.K., Fiandaca, G., Balbarini, N., Rønde, V. K., Kallesøe, A.J., Klint, K.E.S., Christiansen, A.V., Bjerg, P.L., 2017. Detailed 3D Geological Modelling at a Contaminated Stream Using Geophysical, Geological and Chemical Data - A Challenge, in: 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience, 3-7 September 2017, Malmö, Sweden. p. 4 pp.

Møller, I., Søndergaard, V.H., Jørgensen, F., Auken, E., Christiansen, A.V., 2009. Integrated management and utilization of hydrogeophysical data on a national scale. Near Surface Geophysics 7, 647–659. doi:10.3997/1873-0604.2009031

Møller, I., Sørensen, K.I., Auken, E., 2006. Geoelectrical methods, in: Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences. pp. 193–209. doi:10.1016/0926-9851(93)90004-I

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

Naturstyrelsen/Orbicon 2014: Redegørelse for Tønder, Løgumkloster m.fl. Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning 2014. 4. udgave marts 2014. ISBN nr. 978-87-7091-599-1

Nielsen, T. S., 2007: Udveksling mellem grundvand og overfladevand – eksempel fra Harrestrup å. Kandidatafhandling. Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.
Nielsen, M.R., Chalikakis, K., Petersen, K., Vindum, J., 2007. MRS - oplagt kortlægningsmulighed i Danmark. Geol. Nyt 3, 10–13.

NIRAS 2015: Geologisk, hydro-geokemisk og hydrologisk model for Aktivitetsområde Padborg-Gråsten. Rapport TRIN 2 – Grundvandskortlægning. Udarbejdet for Naturstyrelsen, april 2015.

Nørmark E. & Lykke-Andersen H. 2009: Vejledning til kravspecifikationerne for reflektionsseismiske data optaget i forbindelse med hydrogeologiske undersøgelser. Geologisk Institut, Aarhus Universitet, september 2009.

Nørmark, E. og Lykke-Andersen, H. 2006: Rapport vedrørende projekt til udredning af den seismiske metodes anvendelighed i grundvandskortlægning. Geologisk Institut, Aarhus Universitet.

Olsson, P.-I., Fiandaca, G., Larsen, J.J., Dahlin, T., Auken, E., 2016. Doubling the spectrum of time-domain induced polarization by harmonic de-noising, drift correction, spike removal, tapered gating and data uncertainty estimation. Geophysical Journal International 207, 774–784. doi:10.1093/gji/ggw260.

Orbicon, 2015: Grundvandskortlægning - Trin 2. AVERNAKØ, LYØ, BJØRNØ OG HELNÆS. Udarbejdet for Naturstyrelsen, april 2015.

Orbicon, 2014: Sydøstfyn - Geologisk og hydrostratigrafisk model. Udarbejdet for Naturstyrelsen, August 2014.

Orbicon, 2013: Modeller Gribskov og Fredensborg. Geologisk og hydrostratigrafisk model. Udarbejdet for Naturstyrelsen Nykøbing, november 2011. 90 sider ekskl. bilag. Rapport-id: 90431.

Pallesen, T. M. & Jensen, N.-P., 2015: Udvikling af en 3D geologisk/hydrogeologisk model som basis for det urbane vandkredsløb. Delrapport 5 - Interaktiv modellering af antropogene lag. Udarbejdet i VTU-projektet. GEUS Særudgivelse, september 2015.

Pedersen, S.A.S. 2012: Glaciodynamic sequence stratigraphy. Geological Society, London, Special Publications vol. 368, s. 29-51.

Pedersen S.A.S, Hermansen, B., Nathan, C. & Tougaard, L., 2011: Digitalt kort over Danmarks jordarter 1:200.000, Version 2: Geologisk kort over de overfladenære jordarter i Danmark, GEUS Rapport 2011 / 19.

Poulsen, L.H., Christensen, N.B., 1999. Hydrogeophysical mapping with the transient electromagnetic sounding method. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 3, 201–220.

Rambøll, 2015: Langeland kortlægningsområde, Trin 2, Geologisk og hydrostratigrafisk model, hydrologisk model samt grundvandskemisk kortlægning. Udarbejdet for Naturstyrelsen Odense, maj 2015. 266 SIDER. Rapport-id: 91527.

Rambøll, 2013: SSV og hydrostratigrafisk model for kortlægningsområde Solbjerg-Fillerup. Rapport udarbejdet for Miljøministeriet, Naturstyrelsen Århus, januar 2013.

Rambøll, 2012: Endelig hovedrapport for afrapportering af opstilling af en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model for Odense Vest kortlægningsområde. Rapport udført for Naturstyrelsen Odense, marts 2012

Rambøll 2011: Hydrostratigrafisk model for Beder-Østerby området. Udført for Århus Kommune. Notat af d. 22. marts 2011.

Rambøll, 2005: PACES-kortlægning omkring Vonsild. Udført for Vejle Amt.

Rasmussen, E. S., Dybkjær, K. & Piasecki 2010: Lithostratigraphy of the Upper Oligocene – Miocene succession of Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 22/2010. (Kan downloades fra www.geus.dk).

Refsgaard, J. C., 2005: Kapitel 15, Validering. I: Sonnenborg, T. O. & Henriksen, H. J. (eds.) (2005): Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2005/80. Http://vandmodel.dk/handbog_gr-model_2005.htm.

Ribe Amt. 2006[1]: Udtræk af pejletidsserie fra loggerdata i Hymer-databasen.

Ribe Amt, 2006[2]: Potentialekort lavet på synkronpejlinger for et område mellem Grindsted og Billund.

Richardt, N. 2008: Koncept for håndtering af istektoniske forstyrrelser i geologiske og hydrogeologiske modeller. ATV Møde, Vintermøde om Jord- og Grundvandsforurening. Vingstedcentret 4. - 5. marts 2008.

Rider, M. 1996: The geological interpretation of well logs, 2nd edition. Whittles Publishing.

Rügge, K., Bay, H., Chrintz, T., Brüsch, W. & Rosenberg, P., 2005: GEUS Pesticider i dansk grundvand: GRUMO- og Boringskontroldata. Miljøprojekt Nr. 1033 2005. Miljøministeriet – Miljøstyrelsen.

Sandersen, P., 2013: Geologisk model for Svendborg by: Opdatering og viderebearbejdelse af eksisterende model. Rapport, maj 2013. Udarbejdet for, og i samarbejde med Region Syddanmark. GEUS. (Rapport-ID: 90425, Rapportdatabasen).

Sandersen, P. B. E., 2008: Uncertainty assessment of geological models – a qualitative approach. In: Refsgaard, J. C. et al. (eds.) 2008: Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: Credibility of Modelling. Proceedings og ModelCARE 2007 Conference. IAHS Publ. 320, 2008, pp. 345-349.

Sandersen, P.B.E & Kallesøe, A. 2017: Odense Vest - 3D geologisk/hydrostratigrafisk detailmodellering. Partnerskabssamarbejde mellem Region Syddanmark, Odense Kommune, VandCenter Syd og GEUS, ”Fælles grundvand – fælles ansvar”. GEUS rapport nr. 2017/25.

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F., 2016: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2010-2015, Bind 1 og 2., 736 sider. GEUS Særudgivelse, ISBN 978-87-7871-451-0/452-7. (Kan downloades på www.begravededale.dk).

Sandersen, P.B.E. & Jørgensen, F., 2015. Neotectonic deformation of a Late Weichselian outwash plain by deglaciation-induced fault reactivation of a deep-seated graben structure. Boreas 44 (2), 413–431.

Sandersen, P., Kristensen, M. & Mielby, S., 2015: Udvikling af en 3D geologisk/hydrogeologisk model som basis for det urbane vandkredsløb. Delrapport 4 - 3D geologisk/hydrostratigrafisk modellering i Odense. Udarbejdet i VTU-projektet. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS, København

Sandersen, P. & Sørensen, J., 2010: Opdatering af eksisterende modeller – Hvordan gør vi det bedst muligt? ATV Møde, Vintermøde om Jord- og Grundvandsforurening. Vingstedcentret, marts 2010, 11 sider.

Sandersen, P.B.E., Jørgensen, F., Larsen, N.K., Westergaard, J.H. & Auken, E., 2009: Rapid tunnel-valley formation beneath the receding Late Weichselian ice sheet in Vendsyssel, Denmark. Boreas, Vol. 38, pp. 834–851. 10.1111/j.1502-3885.2009.00105.x. ISSN 0300-9483.

Sand-Jensen, K. & Larsen G. (ed.) 2006: Naturen i Danmark – Geologien; Bind 2. 552 sider, Gyldendal

Schamper, C, Jørgensen, F., Auken, E. and Effersø, F. 2014: Assessment of near-surface mapping capabilities by airborne transient electromagnetic data – An extensive comparison to conventional borehole data. Geophysics. Vol. 79, 4, B187-B199. DOI: 10.1190/geo2013-0256.1.

Seifert, D., Sonnenborg, T. O., Scharling, P. & Hinsby, K., 2007: Use of Alternative Conceptual Models to Assess the Impact of a Buried Valley on Groundwater Vulnerability, Hydrogeology Journal Vol. 16 June 2008, pp 659-674.

Schou, A., 1949: Atlas over Danmark: I – Landskabsformerne. Nielsen, N. (Red.). Udgivet af Det Kongelige danske geografiske selskab. København 1949.

Skov- og Naturstyrelsen 1989: Ellog boring. Kortlægningsserien nr. 8.

Skov- og Naturstyrelsen 1987: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie 5. ISBN 87-503-6531-2

Slater, L.D., Lesmes, D., 2002. IP interpretation in environmental investigations. GEOPHYSICS 67, 77–88. doi:10.1190/1.1451353.

Smed, P. 1981: Landskabskort over Danmark. Geografforlaget.

Smed, P. 1962: Studier over den fynske øgruppes glaciale landskabsformer. Medd. fra Dansk Geol. Forening. København. Bd. 15 [1962].

Storstrøms Amt, 2006: Møn – Fase 1 kortlægning – Hovedrapport. Rambøll.

Sønderjyllands Amt. 2005: Kortlægningsrapport. Grundvandskemiske forhold. Udført af NIRAS.

Sørensen, K., 1996: Pulled array continuous electrical sounding. First Break, 14, pp. 85-90.

Sørensen, K., 1989: A method for measurement of the electrical formation resistivity while auger drilling. First break 7, pp. 403-407.

Sørensen, E. & Schmidt, H., 2001: Boringer. Miljøstyrelsen.

Sørensen, I & Nielsen, J.O., 2014: Kortlægning af grundvand. I: Vandforsyning, Nyt Teknisk Forlag, 784 sider, ISBN 978-87-571-2799-7.

Sørensen, J. & Andersen, T.R. 2016: Notat vedrørende fingrusanalyser på boringer ved Odense. Notat, VIA University College, 23. december 2016.

Sørensen, J., Kronborg, C., Nielsen, O.B. og Krohn, C., 2005: Århus Amt, Århus Syd. Petrografisk og mineralogisk korrelation af 15 undersøgelsesboringer fra begravede dalsystemer i Århus Syd. Afdelingen for Sediment-Geologi, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.

Sørensen, K.I. and Auken, E., 2004: SkyTEM - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. Exploration Geophysics. 35, pp.191-199.

Ter-Borch, N. 1991: Geologisk kort over Danmark. Kalkoverfladens struktur, 1:500.000. DGU Kortserie Nr. 7, København 1991.

Thomsen, S. & Gabriel, G. 2006: Gravimetry. In: Kirsch et al. (Ed), Groundwater in buried valleys – a challenge for geosciences, Leibnitz Institute for Applied Geosciences, Hannover, pp. 51-64.

Troldborg, L., Jensen, K.H.; Engesgaard, P., Refsgaard, J.C. & Hinsby, K., 2008: Using Environmental Tracers in Modeling Flow in a Complex Shallow Aquifer System. Journal of Hydrologic Engineering, Nov. 2008/1037. DOI: 10.1061/ASCE1084-0699.

Vangkilde-Pedersen, T., 2010: Kravspecifikation for udførelse af geofysisk borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. November 2010, Version 1.0. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, 21 sider.

Vangkilde-Pedersen, T., Skjellerup, P., Ringgaard, J. and Jensen, J.F., 2003: Pulled array seismic (PAS) - a new method for shallow reflection seismic data acquisition. 65th EAGE Conference & Exhibition. Stavanger, Norway.

Vejbæk, O.V., 1997: Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. Geologisk Tidsskrift, hft. 4, pp. 1-31.

Vejbæk, O. V., Bidstrup, T., Britze, P., Erlström, M., Rasmussen, E. S. & Sivhed, U. 2007: Chalk depth structure maps, Central to Eastern North Sea, Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 13, 2007.

Vejbæk, O.V. & Britze, P.. 1994: Top pre-Zechstein. DGU kortserie, nr. 45.

Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E., Sørensen, K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. Geophysics 73, F105–F113. doi:10.1190/1.2895521

Vignoli, G., Sapia, V., Menghini, A., Viezzoli, A. 2017: Examples of Improved Inversion of Different Airborne Electromagnetic Datasets Via Sharp Regularization DOI: 10.2113/JEEG22.1.51. JEEG, 22, 1.

Vignoli, G., G. Fiandaca, A. V. Christiansen, C. Kirkegaard, and E. Auken 2015: Sharp spatially constrained inversion with applications to transient electromagnetic data, Geophysical Prospecting, 63, 1, 243-255.

Watertech 2004: Geologisk model og konceptuel hydrogeologisk model for Nyborg indsatsområde. Udarbejdet for Fyns Amt, juni 2004.

Weissmann GS, Carle SF & Fogg GE (1999) Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics Water Resources Research, 35(6), 1761–1770.

Århus Amt. 2006: Redegørelser for grundvandsressourcerne i Århus Syd-området. Udført af: Signe Weng Grønhøj, Birgitte Hansen, Ole Dyrsø Jensen, Birthe Eg Jordt, Stine Rasmussen og Richard Thomsen, 285 pp.

Energi-,
Forsynings- og
Klimaministeriet

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Ministeriet for Energi-, Forsyning- og Klima.

ISBN 978 87 7871 496 1
WEB ISBN 978 87 7871 497 8

Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

GEO-VEJLEDNING 2018/1

Faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen udarbejdes af GEUS i samarbejde med Miljøstyrelsen, Miljø- og Fødevareministeriet. Disse vejledninger udgives i en serie kaldet Geo-vejledninger.

"Geo-vejledning nr. 2018/1: Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering" er en opdatering og en viderebearbejdning af den første "Geo-vejledning 3", der udkom i 2008 som en ud af i alt ni Geo-vejledninger. Baggrunden for revisionen er dels ny forskningsmæssig viden dels opsamling af erfaringer siden den første udgave. I Geo-vejledning 2018/1 er der fokuseret på geologiske modeller til anvendelse i forbindelse med grundvandsmodeller.

Det primære formål med Geo-vejledningen er at udgøre et fagligt fundament for opstilling af geologiske modeller i forbindelse med grundvandskortlægning og opridse en række anbefalinger til såvel modelleringsproces som til dokumentation og afrapportering af den endelige model. Sekundært er formålet, at Geo-vejledningen skal kunne udgøre en ramme ved opstilling af geologiske modeller i andre sammenhænge.

De Nationale Geologiske Undersøgelser
for Danmark og Grønland (GEUS)
Geological Survey of Denmark and Greenland

Øster Voldgade 10
1350 København K
Danmark

Telefon 38 14 20 00
Fax 38 14 20 50
E-post geus@geus.dk
Hjemmeside www.geus.dk