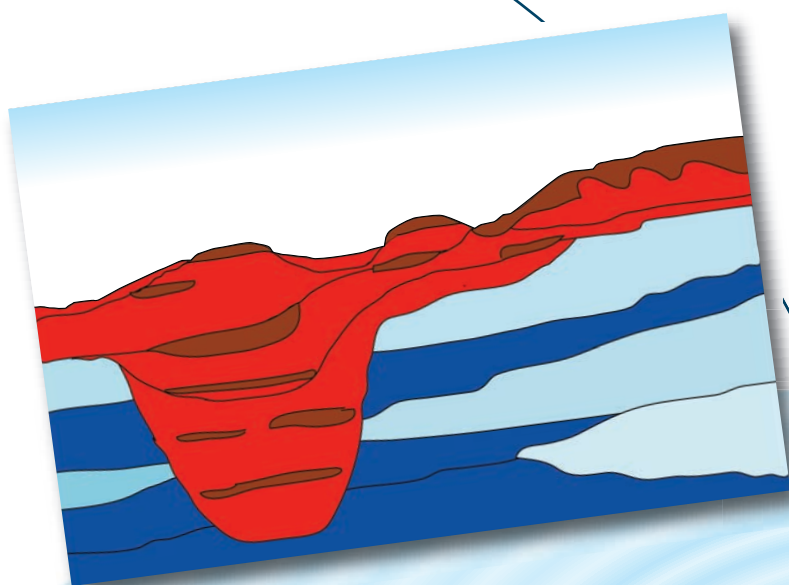


Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

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

G E O - V E J L E D N I N G 3



Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

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

Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering

Geo-Vejledning 3

Særudgivelse

Omslag: Henrik Klinge

Repro: GEUS

Oplag: 200

Juli 2008

ISBN Tryk: 978-87-7871-227-1

Web: 978-87-7871-228-8

Vejledningen kan hentes på nettet : www.geus.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 By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Forord

I april 2007 vedtog Styregruppen for Grundvandskortlægning at nedsætte en projektgruppe, der skulle udarbejde en geo-vejledning for opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. Geo-vejledningen skulle være en videreudvikling af det statusnotat, der forelå i juni 2006, "Anbefalinger til geologisk modelopstilling i forbindelse med grundvandsmodellering".

Projektgruppen bestod af:

Christina Hansen, Miljøcenter Nykøbing F.
Anker Lajer Højberg, GEUS
Birthe Eg Jordt, Orbicon
Flemming Jørgensen, GEUS
Knud Erik Strøbyberg Klint, GEUS
Margrethe Kristensen, GEUS (Projektleder)
Niels Richardt, Rambøll
Peter Sandersen, Grontmij | Carl Bro

Projektgruppen blev sammensat, så den samlet set havde den faglige indsigt og de kompetencer, der var nødvendig for at udarbejde geo-vejledningen.

Arbejdet i projektgruppen har bestået i at beskrive:

- De overvejelser, der skal gøres i forbindelse med opstilling af geologiske modeller
- En vejledende arbejdsgang i forbindelse med opstilling af geologiske modeller
- De delelementer, der er vigtige i opstilling af geologiske modeller

Der er modtaget hjælp til udarbejdelse af enkelte afsnit i geo-vejledningen fra John Vendelbo Frandsen fra Orbicon samt Birgitte Hansen og Claus Ditlefsen fra GEUS.

Projektet er finansieret af Statens Miljøcentre og af GEUS. Eksterne projektdeltagere – dvs. udenfor GEUS – har haft et fast antal timer til rådighed. Timer ud over disse har deltagerne selv finansieret. På baggrund af bidrag fra hele projektgruppen har GEUS stået for redaktionen af kapitel 3. Kapitel 1 og 2 er udarbejdet af GEUS i samarbejde med projektgruppen.

I forbindelse med projektet blev der nedsat en faglig følgegruppe bestående af repræsentanter med erfaring inden for opstilling af geologiske modeller.

Følgegruppen bestod af:

Jens Bruun-Petersen, Miljøcenter Ribe
Helle Clausen, NIRAS
John Vendelbo Frandsen, Orbicon
Morten Ejning Jørgensen, Alectia
Jan Kürstein, Miljøcenter Roskilde
Gunnar Larsen, Miljøcenter Odense
Arne Lauridsen, Grontmij | Carl Bro
Susanne Markussen, Miljøcenter Ribe

Stig Marstal, GEO
Susie Mielby, GEUS
Anne Mette Nielsen, GEUS
Kirstine Skov Nielsen, Miljøcenter Ålborg
Ole Frits Nielsen, COWI
Thomas Nyholm, Miljøcenter Århus
Tom Pallesen, Alectia
Peter Alfred Petersen, COWI
Stine Rasmussen, Miljøcenter Århus
Tine Sværdborg, NIRAS
Jette Sørensen, Rambøll
Anders Lindblad Vendelboe, Miljøcenter Aalborg

Følgegruppen deltog i en workshop omkring geo-vejledningen i projektets opstartsfase, og under projektgennemførelsen blev der sendt statusnotater til styregruppen og følgegruppen. I den afsluttende fase blev geo-vejledningen sendt i høring hos følgegruppen, der så fik mulighed for at kommentere på vejledningen. Styregruppen for grundvandskortlægning har godkendt den endelige geo-vejledning.

Stor tak til projektgruppens deltagere, der har bidraget i større omfang end det har været muligt at yde økonomisk dækning for. Endvidere tak til styregruppen, følgegruppen og øvrige bidragsydere.

Projektgruppen anbefaler, at geo-vejledningen løbende revideres efterhånden som nye erfaringer indhentes og nye behov opstår.

Indholdsfortegnelse

1.	Problemformulering og udarbejdelse af projektbeskrivelse	9
1.1	De indledende overvejelser før modelopstillingen	9
1.2	Problemformulering	10
1.3	Projektbeskrivelsen.....	13
2.	Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling	17
2.1	De tre modeltrin	17
2.2	Geologisk forståelsesmodel.....	20
2.3	Rumlig geologisk model.....	23
2.4	Hydrostratigrafisk model	38
2.5	Referenceliste	45
3.	Værktøjskasse	47
3.1	Seismik.....	47
3.2	TEM.....	50
3.3	PACES og PACEP.....	54
3.4	MEP og DC-data.....	58
3.5	Geofysiske borehulslogs.....	62
3.6	Andre geofysiske data	68
3.7	Boredata.....	71
3.8	Stratigrafiske data	77
3.9	Hydrologiske data	81
3.10	Kemiske data (grundvands- og sedimentkemi)	86
3.11	Eksisterende tolkninger.....	91
3.12	Topografiske data	94
3.13	Jordarts- og jordbundsdata	96
3.14	Informationer fra blotninger	99
3.15	Lagmodel.....	102
3.16	Pixelmodel.....	104
3.17	Sammenstilling med andre geologiske modeller	106
3.18	Modelafgrænsning	108
3.19	Prioritering og visualisering af data.....	110
3.20	Interpolation af data	112
3.21	Profilnetværk og projektionsafstande	115
3.22	Profiloptegning	119
3.23	Papirtolkning.....	121
3.24	Digital tolkning.....	123
3.25	Punkttolkning.....	124
3.26	Profiltolkning.....	129
3.27	Horisontaltolkning.....	131
3.28	Afgrænsning af lag og lagflader	133
3.29	Gridmodellering.....	135
3.30	3D-visualisering og -tolkning.....	137
3.31	Indarbejdelse af landskabsanalyse i den geologiske model	139

3.32	Modellering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer.....	141
3.33	Modellering og implementering af istektonik	144
3.34	Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model	147
3.35	Dokumentation	151
3.36	Usikkerhedsvurderinger	155
3.37	Kvalitetssikring af tolkninger	159
3.38	Interpolation af tolkede flader og lag.....	161
3.39	Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel.....	163
3.40	Det digitale slutprodukt.....	167
3.41	Eksport af modeller til modeldatabasen.....	169
3.42	Afreportering	171

Indledning

Formålet med denne geo-vejledning er at højne kvaliteten af de geologiske modeller, der opstilles som et led i grundvandskortlægningen. Erfaringer fra grundvandsmodellering har givet en erkendelse af, at en manglende eller fejlagtig forståelse af geologien udgør en stor usikkerhedsfaktor. Derfor er det vigtigt, at der rettes større fokus mod, at opbygningen af geologiske modeller så vidt muligt standardiseres. En standardisering af geologisk modellering er dog vanskelig, da der skal tages hensyn til en lang række forskellige faktorer, og da der er betydeligt behov for forskning og udvikling på området. Denne vejledning skal ses som et første skridt på vejen mod en mere standardiseret måde at opstille geologiske modeller på i Danmark.

Geologiske modeller har gennem årene været udført på mange forskellige måder, med forskelligt formål, med forskellige redskaber og med forskelligt output. Mulighederne for sammenligning, evaluering, kvalitetskontrol og opdatering af modellerne har derfor været vanskelige. Afledt af dette har der også været et ønske om, at opstillingen af geologiske modeller så vidt muligt standardiseres.

I denne geo-vejledning er der fokuseret på geologiske modeller til anvendelse i forbindelse med grundvandsmodeller. Målet med vejledningen er bl.a. at sikre, at de geologiske modeller er opbygget efter nogle ensartede arbejdsrutiner/-procedurer, så andre kan vurdere kvaliteten af det endelige produkt. Formålet med geo-vejledningen er desuden at beskrive, hvordan en fyldestgørende dokumentation kan sikres. Ved at bruge fremgangsmåden i geo-vejledningen, vil det blive lettere for andre at arbejde videre med, eller at opdatere geologiske modeller.

Vejledningen indeholder også en uddybende gennemgang af fremgangsmåder og opnåede erfaringer med geologisk modelarbejde. Således kan geo-vejledningen også bruges som guide til det praktiske arbejde med modellerne.

Vejledningens målgruppe er modelopstillere såvel som rekvirenter af modeller. Den har ikke til sigte at anbefale en eventuel rollefordeling i forhold til hvem, der fungerer som rekvirent og modelopstiller. Rekvirent og modelopstiller kan således være fra samme organisation. Endvidere er vejledningen søgt holdt uafhængig af software-produkter.

Terminologi

Hidtil har der ikke været anvendt en ensartet terminologi i forbindelse med arbejdet med de geologiske modeller, hvilket f.eks. har betydet, at samme modeltyper ofte beskrives ved flere forskellige termer. For at sikre en ensartet terminologi er det vedtaget, at nedenstående benævnelser anvendes fremover i forbindelse med geologisk modelopstilling.

Geologiske modeller

"Geologiske modeller" er et bredt dækkende udtryk der omfatter "Den geologiske forståelsesmodel", "Den rumlige geologiske model" og "Den hydrostratigrafiske model".

Den geologiske forståelsesmodel

"Den geologiske forståelsesmodel" bygger på eksisterende beskrivelser og tolkninger og viser overordnet geologien i et område. Modellen opstilles bl.a. på baggrund af tidligere tolkede nøgleboringer, hydrogeologiske rapporter, specialer, generel litteratur m.v. Den geologiske forståelsesmodel består hovedsageligt af beskrivelser, principskitser og en overordnet stratigrafi og dannelsesmodel for området. Den geologiske forståelsesmodel har til hensigt at give et overblik over geologien, som den fremgår af eksisterende materiale til hjælp for opstillingen af den rumlige geologiske model.

Den rumlige geologiske model

Den rumlige geologiske model er baseret på den geologiske forståelsesmodel samt en detaljeret og integreret geologisk tolkning af alle tilgængelige data; primært boredata og geofysiske data. Modelarbejdet indebærer en rumlig opbygning af tolkede geologiske enheder. Til forskel fra den geologiske forståelsesmodel anbefales det, at den rumlige geologiske model bliver opstillet digitalt, dog 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 opstilles kun i områder, der kan tolkes med en rimelig sikkerhed og er således ikke nødvendigvis kontinuert i rummet. Modellen udgør en status for kendskabet til geologien i det aktuelle område.

Den hydrostratigrafiske model

Den hydrostratigrafiske model er baseret på tolkningerne i den rumlige geologiske model. Den viser jordens hydrauliske egenskaber og inddeler jorden i hydrostratigrafiske enheder. De hydrostratigrafiske enheder er karakteriseret ved at have ensartede hydrauliske egenskaber. Denne model er altid digital og er tolket i hele modelrummet. Modellen udgør grundlaget for grundvandsmodelleringen.

Opbygningen af geo-vejledningen

Vejledningen omfatter følgende hovedkapitler:

1. Problemformulering og udarbejdelse af projektbeskrivelse

Dette kapitel beskriver den indledende fase med problemformulering og projektbeskrivelse, hvor væsentlige overvejelser og problemstillinger inden modelopstillingen gennemgås.

2. Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling

Dette kapitel beskriver arbejdsgangen ved den geologiske modellering; hvordan og i hvilken rækkefølge modelarbejdet gribes an.

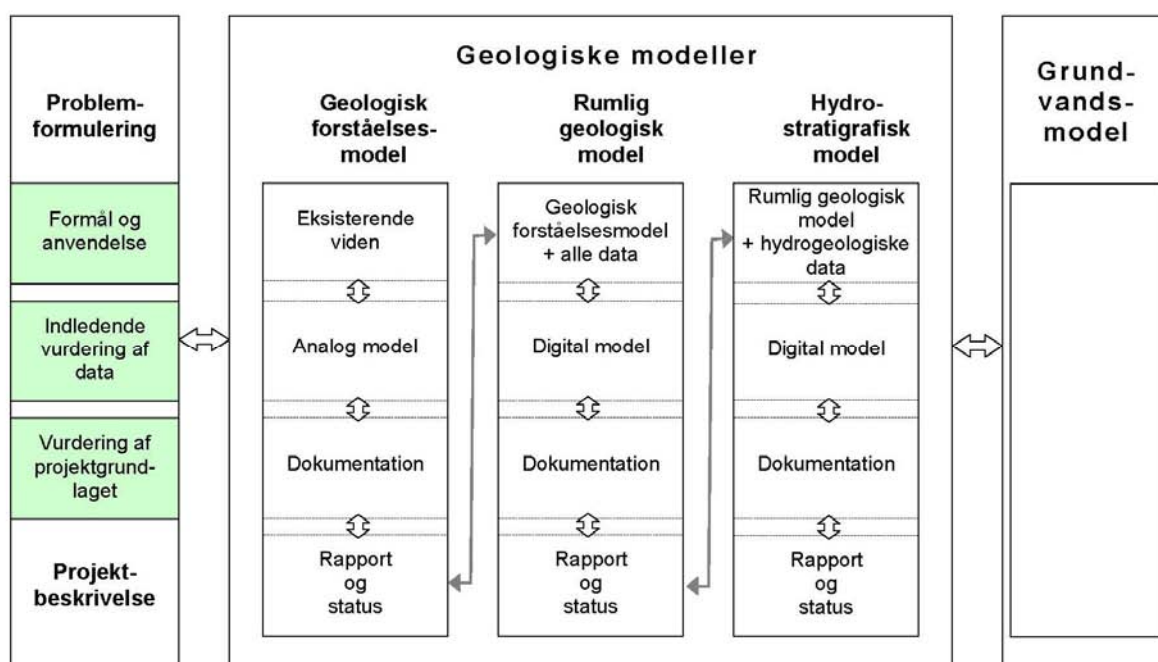
3. Værktøjskasse

En "værktøjskasse" med emneopdelte, detaljerede beskrivelser af data, metoder og erfaringer. Der er tale om uddybende beskrivelser af emner vedr. forberedelse og håndtering af datatyper, modeltyper og konstruktion af modelskelet, samt tolkning og modelleringsteknik. Kapitlet kan bruges som opslag i forbindelse med anvendelse af Kapitel 1 og 2.

1. Problemformulering og udarbejdelse af projektbeskrivelse

1.1 De indledende overvejelser før modelopstillingen

Ved de indledende overvejelser før modelopstillingen er det vigtigt at lave en gennemarbejdet problemformulering, så der eksisterer et godt overblik over projektgrundlaget, før der laves en projektbeskrivelse. Problemformuleringen udarbejdes inden opstillingen af de geologiske modeller (se Figur 1).

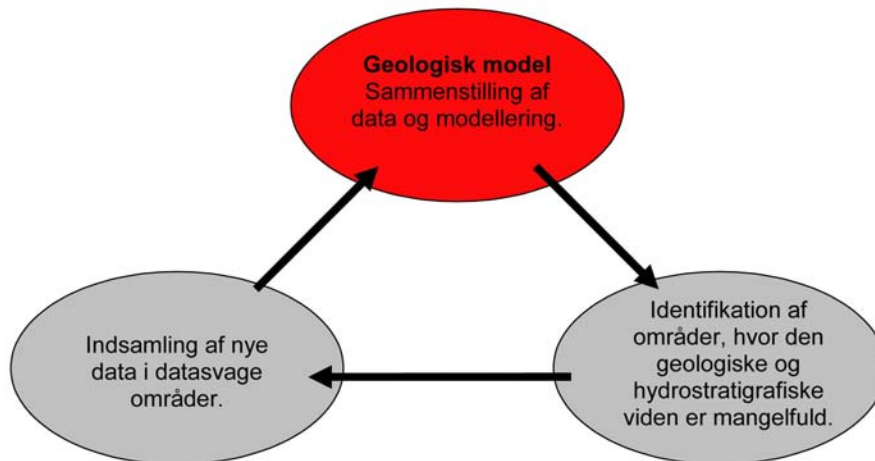


Figur 1 Diagram, der viser placeringen af problemformulering og projektbeskrivelse i forhold til opstilling af de enkelte modeltyper.

1.1.1 Den iterative proces

Ved de indledende overvejelser skal der helt overordnet tages stilling til, i hvilket omfang arbejdsgangen skal forløbe i en iterativ proces eller i et sæt af rammer, der på forhånd er fastlagt. Den mest optimale måde at gribe modelopstillingen an på varierer i forhold til flere forskellige faktorer. Er der god tid til rådighed kan modelopstillingen med fordel foregå i en iterativ proces, hvor data gradvist indsamles. Således kan der f.eks. startes med en geologisk forståelsesmodel, inden der kortlægges. Andre gange skal der opstilles en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model, før der kan dannes et fuldstændigt overblik over de datasvage områder, hvor der skal indsamles nye data. Denne proces kan for store projektområders vedkommende køre i flere omgange (se Figur 2). Hvis modellerne er veldokumenterede, kan de løbende opdateres og forbedres. Den rumlige geologiske model er i princippet en tolknings- og vidensdatabase, der til enhver tid indeholder det geologiske

kendskab til et projektområde. Fra "databasen" vil der kunne hentes den seneste og dermed bedste rumlige geologiske model. Ved opstilling af den hydrostratigrafiske model anvendes de hydrologiske data samt grundvands- og sedimentkemiske data, derfor kan der opstå datasvage områder, som ikke var synlige under opstilling af den rumlige geologiske model.



Figur 2 Iterativ proces, hvor data gradvist indsamles og de geologiske modeller løbende opdateres. Ved opstilling af de geologiske modeller bliver datasvage områder synlige og det kan være nødvendigt at indsamle flere data.

1.2 Problemformulering

Ved at lave en gennemarbejdet problemformulering mindskes risikoen for, at der kommer tidskrævende overraskelser undervejs i modelopstillingen.

Formålet med at lave en problemformulering er:

- At definere formål med den geologiske modellering, herunder hvilke nøjagtighedskrav der stilles
- At klarlægge, om der er særlige krav til modellen og måden denne opgave skal løses på.
- At klarlægge modelområdet omtrentlige størrelse
- At vurdere om datagrundlaget er tilstrækkeligt, eller som en del af projektet kan blive det
- At kunne udarbejde en veldefineret projektbeskrivelse

Et godt overblik over opgavens omfang og en efterfølgende indarbejdelse af dette i projektbeskrivelsen er med til at sikre, at opgaven indeholder realistiske tidsplaner og budgetter.

Tidsplaner og budgetter vil afhænge af modelområdets størrelse, men også den ønskede detaljeringsgrad. Der er f.eks. stor forskel på at opstille en regional ressourcemodel frem for en detaljeret oplandsmodel for en enkelt kildeplads.

1.2.1 Formål og anvendelse af den geologiske model

I problemformuleringen skal der tages stilling til, hvad modellen skal bruges til i det konkrete tilfælde 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 det tilgængelige datamateriale. Ved vurderingen af det eksisterende datagrundlag, er det derfor vigtigt, at kravene til den færdige model allerede er defineret.

Det er bl.a. vigtigt at beslutte, om der alene skal laves en rumlig geologisk model til brug ved vurdering af geologiske forhold, eller om der også skal laves en hydrostratigrafisk model til brug i en efterfølgende grundvandsmodel.

Formålet med geologisk modellering og en evt. efterfølgende grundvandsmodellering kan være forskellig. Herunder er listet nogle eksempler:

- Bibringelse af en forståelse af de geologiske forhold
- Vurdering af sårbarhedsforhold
- Vurdering af ressourceforhold
- Identifikation af nye grundvandsmagasiner
- Justering af OSD og andre arealudpegninger
- Bidrage med hydrogeologiske rammer for arbejdet med vandplaner (f.eks. interaktion mellem overfladevand og grundvand).
- Beregning af indvindingsoplande og grundvanddannende oplande til kildepladser
- Vurdering af kildepladseres bæredygtighed og magasinernes udnyttelsesgrad
- Vurdering af konsekvenser for grundvandsressourcen ved forskellig indvindingsstrategi for nuværende eller nye kildepladser

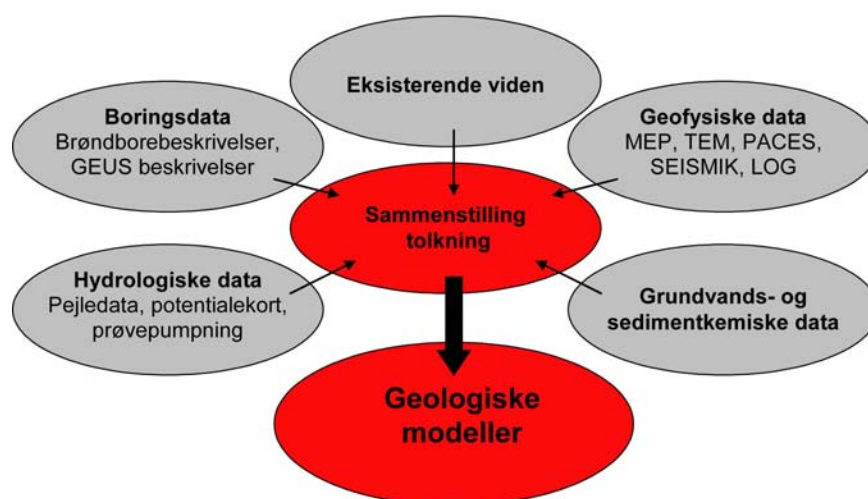
Hvis der efterfølgende skal laves en grundvandsmodel anbefales det, at der er løbende kontakt til grundvandsmodelløren, startende allerede under problemformuleringen.

1.2.2 Indledende vurdering af data

Datagrundlaget har afgørende betydning for løsningen af opgaven. Det er derfor vigtigt på dette tidspunkt at vurdere om datagrundlaget er tilstrækkeligt til løsning af den specificerede opgave.

Formålet med en indledende vurdering af data er:

1. At sikre, at data er af en type, der er tilgængelig og kan anvendes i modelopstillingen
2. At sikre, at der er indhentet et tilstrækkeligt datagrundlag til en modelopstilling
3. At skabe et indledende overblik over datakvaliteten og kvalitetssikringen af data



Figur 3 Alle indsamlede data skal sammenstilles med eksisterende viden i de geologiske modeller. Dette kræver stor indsigt i forskellige datatyper.

Ad. 1: Det er vigtigt, at der indledningsvist skabes et overblik over hvilke datatyper, der er til rådighed (boringer, geofysik, kemi, pejlinger m.v.) (se Figur 3). Der bør laves indledende 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. 2: Der bør laves en indledende vurdering af datatilstrækkelighed. 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. 3: Ved gennemgang af data bør det vurderes, om der er foretaget en kvalitetssikring i forbindelse med indhentning og lagring af data. Det undersøges desuden, om der er foretaget usikkerhedsvurderinger af data. Boringer kan f.eks. være lavet til forskellige formål, hvor formålet ikke nødvendigvis har været at beskrive hele lagserien. Derfor kan beskrivelserne være mangelfulde eller fejlagtige. Denne kvalitetssikring kan kun på dette tidspunkt udføres på en oversigtlig måde. En nærmere og detaljeret vurdering af data foretages under modelopstillingen.

Der laves en oversigt over tilgængelige data (type, kilde, alder, format mv.). Vurderingen af de eksisterende data skrives ind i problemformuleringen, da det er vigtigt når projektgrundlaget skal vurderes.

1.2.3 Samlet vurdering af projektgrundlaget

Problemformuleringen bør afsluttes med en samlet vurdering af projektgrundlaget. Det er her, det eksisterende datagrundlag holdes op imod formålet og den ønskede anvendelse af modellen, samt de krav der stilles til modelopstillingen. Hvis formål og anvendelse er i overensstemmelse med datagrundlaget, vurderes projektgrundlaget at være i orden - dvs. at det indledningsvist vurderes muligt at opstille en geologisk model, der matcher formålet. Hvis projektgrundlaget er dækkende, kan projektbeskrivelsen udarbejdes. Hvis den indledende vurdering af data antyder, at f.eks. datadæknin-

gen er mangelfuld, skal formålet redefineres, eller der skal indsamles supplerende data inden modelopgaven sættes i gang. Alternativt iværksættes et projekt hvor data gradvist indsamles i en iterativ proces som beskrevet ovenfor.

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. Det er vigtigt, at projektbeskrivelsen bliver specificeret så nøjagtigt som muligt på dette tidspunkt i forløbet.

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 er modstridende og ikke kommer til at virke som en hindring for projektgennemførelsen.

1.3.1 Kravspecifikation

Kravspecifikationen for modellen skal som nævnt hænge sammen med formålet og den ønskede anvendelse af modellerne. I kravspecifikationen vil der ofte blive stillet krav til:

- Hvordan forskellige data anvendes
- Hvordan data bliver forberedt
- Hvordan modellerne skal konstrueres
- Hvordan tolkningen skal foregå
- Hvordan arbejdet skal dokumenteres og kvalitetssikres
- Hvordan modellen afrapporteres

Kravspecifikationerne kan samles i et bilag, hvis kravene er mange og detaljerede.

Minimumskrav til modelopstilling vil variere meget i forhold til flere forskellige faktorer, bl.a. formålet med modellen, og derfor vil der ikke være opstillet minimumskrav til modelopstillingen i denne vejledning. I stedet beskrives en række emner, som den pågældende person, der skriver projektbeskrivelsen, bør forholde sig til.

1.3.2 Arbejdsgangen

Der skal tages stilling til, om modellen ønskes opstillet i henhold til den i denne vejledning anbefalede arbejdsgang, samt hvilke dele der skal resultere i en digital model. Den anbefalede arbejdsgang ses i Kap. 2. Hvis modellen ikke ønskes opstillet i henhold til den anbefalede arbejdsgang, bør dette valg begrundes i projektbeskrivelsen.

1.3.3 Datatyperne - herunder forberedelse og håndtering

Ved geologisk modellering anvendes mange forskellige typer af data, som hver især indeholder usikkerheder og fejlkilder. Hvis data ikke allerede er kvalitetssikrede og lever op til de tekniske krav, som normalt stilles til data anvendt i hydrogeologiske undersøgelser, bør kvalitetssikring af relevante data indgå som en del af modelopstillingen. Det ønskede omfang af denne kvalitetssikring bør fremgå af projektbeskrivelsen.

Projektbeskrivelsen bør indeholde:

- Overordnede vurderinger af datas anvendelighed ved modelopstillingen
- Overordnede vurderinger af datatilstrækkelighed
- Overordnede kvalitetsvurderinger af de enkelte datatyper, der skal anvendes ved modelopstillingen

Se Kap. 3 for en beskrivelse af datatyper.

1.3.4 Modeltyper og konstruktion af modelskelet

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

- Modeltypen, der ønskes opstillet (lagmodel eller pixelmodel)
- Evt. sammenstilling med tidligere/andre modeller
- Prioritering af datasæt
- Interpolation af data (bl.a. interpolationsrutine, celledørrelse, søgeradius, konturering)
- Profilnetværk (udlægning, afstand, orientering m.m.)
- Projektionsafstand til profiler for forskellige typer af data og fladetolkningspunkter (bufferzone)
- Profiloptyegning (bl.a. overhøjning, layout, datavisualisering)
- Modelvisualisering (skal modellen visualiseres eller konstrueres i 3D?)

Det kan dog være vanskeligt i detaljer at redegøre for nogle af disse punkter forud for en grundig datagennemgang og områdeafgrænsning. Der kan læses mere om modeltyper og konstruktion af modelskelet i Kap. 3.

1.3.5 Tolkningen

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

- Evt. supplerende papirtolkning til den digitale tolkning
- Afgrænsning af lag/lagflader
- Tolkningensmetoden (profil-, flade-, grid-, 3D-tolkning eller en kombination)
- Anvendelse af forskellige typer af tolkningspunkter

- Interpolation af tolkninger (bl.a. interpolationsrutine, celledørrelse, søgeradius, konturering)
- Håndtering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer
- Håndtering af glacialtektonik/inhomogeniteter
- Samarbejde med grundvandskemiker
- Samarbejde med grundvandsmodellør

Der kan læses mere om tolkning i Kap. 3.

1.3.6 Usikkerhedsvurderinger

I projektbeskrivelsen beskrives også ønsker vedr. usikkerhedsvurderinger. Der kan læses mere om usikkerhedsvurderinger i Kap. 3.

1.3.7 Dokumentationsniveau

Dokumentation er en beskrivelse af fremdriften og forløbet samt af beslutninger og antagelser, der er foretaget under projektet. 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. Dokumentationen fortages primært i tekst, som gemmes i eksterne dokumenter eller indarbejdes i den digitale model.

Dokumentation er bl.a.:

- Beskrivelser af tolkninger og tolkningsgrundlag
- Beskrivelser af beslutninger taget i forbindelse med tolkninger
- Beskrivelse af det udførte arbejde – arbejdsgangen
- Usikkerhedsvurderinger
- Elektronisk logbog
- Statusnotater
- Rapport

Der skal desuden laves en udførlig dokumentation for projektførelsen, dette kan bl.a. ske i form af mødereferater, telefonnotater eller e-mailudveksling. For at sikre, at alle parter har den samme opfattelse af omfang og krav til opgaveløsningen, skal beslutninger dokumenteres. En dokumentation af, hvornår de enkelte delopgaver er afsluttet, sikrer også en tæt og kontinuerlig information om projektets fremdrift.

1.3.8 Kvalitetssikringsplan

Der skal tages stilling til, om kvalitetssikring af både data og tolkninger skal foregå efter en bestemt kvalitetssikringsplan, som så kan beskrives i projektbeskrivelsen. Kvalitetssikring kan foregå på mange niveauer og på forskellige tidspunkter i forløbet med modelopstillingen, og derfor er det vigtigt at beskrive hvor, hvornår, og hvordan kvalitetssikringen skal foregå.

Der bør især laves en plan for kvalitetssikring af:

- De enkelte datasæt og data
- Konstruktionen af modelskelettet
- Tolkningerne
- Visualiseringen og afrapporteringen
- Dokumentation

En kvalitetssikringsplan skal være tidsmæssigt og økonomisk realistisk, da den involverer andre end modelopstilleren. Der kan læses mere om kvalitetssikring i Kap. 3.

1.3.9 Afrapportering

Projektbeskrivelsen bør også indeholde de forventninger, der stilles til afrapporteringen. Der kan læses mere om afrapportering i Kap. 3.

1.3.10 Statusnotat og -møder

Det kan anbefales, at der foretages status flere gange under projektforløbet for at sikre, at der er fælles forståelse og enighed om fremdrift og delresultater.

I projektbeskrivelsen bør det beskrives:

- Hvordan og på hvilket niveau status skal foregå
- Hvornår i modelleringsprocessen der skal afholdes statusmøder

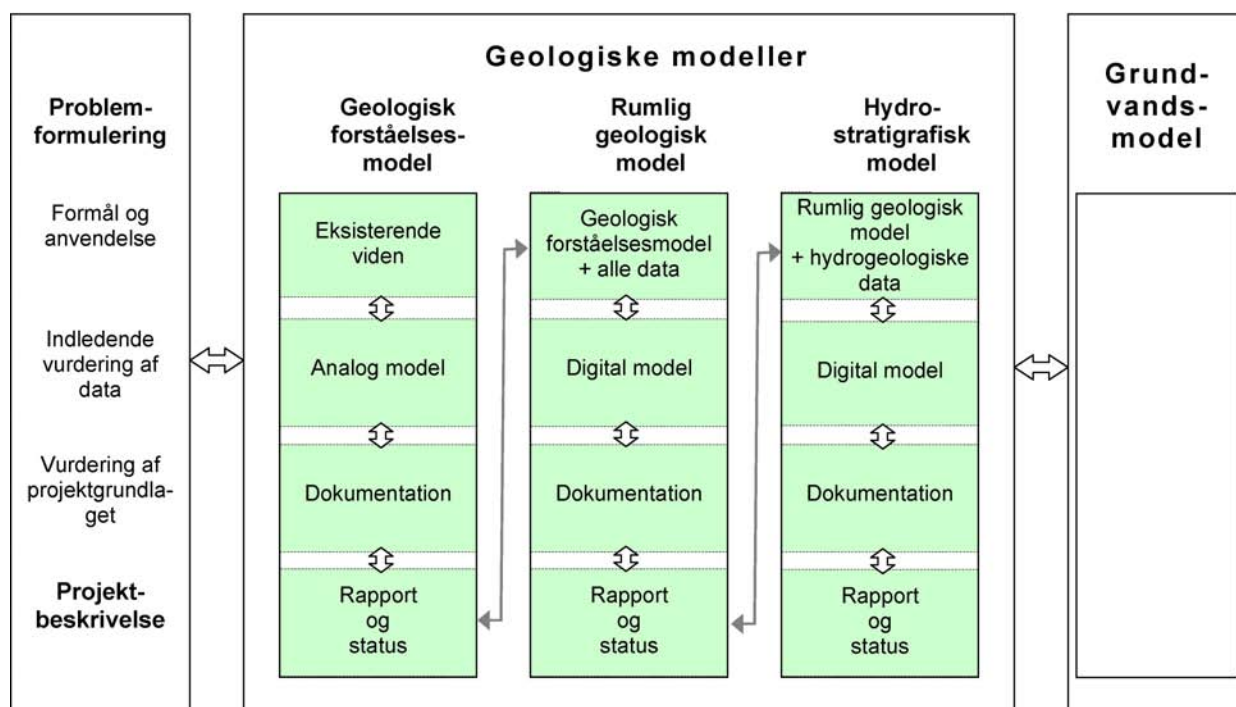
2. Arbejdsgang ved geologisk modelopstilling

2.1 De tre modeltrin

Når problemformulering og projektbeskrivelse for modelopstillingen er klar, kan selve modelopstillingen påbegynde. Da modellerne, der skal opstilles, bl.a. i omfang, type og modelleringsproces vil være tæt forbundne med problemformuleringen og projektbeskrivelsen, er det af stor vigtighed, at disse studeres nøje inden modelopstillingen påbegyndes. Dette er selvfølgelig særligt nødvendigt, hvis personen, der skal udarbejde modellerne, ikke har været med til det indledende arbejde.

Det er hensigtsmæssigt at udføre modelleringen trinvist, hvor der gradvist opbygges tre forskellige typer af modeller, som er grundlæggende forskellige i koncept og konstruktion (se Figur 4). De tre modeltyper er:

1. Den geologiske forståelsesmodel
2. Den rumlige geologiske model
3. Den hydrostratigrafiske model



Figur 4 Flowdiagram, der viser arbejdsgangen gennem de tre typer af geologiske modeller. Usikkerhedsvurderinger og kvalitetssikring bør foregå løbende gennem alle 3 modeller.

Inddelingen og definitionen af disse modeltyper har til formål at overskueliggøre modelleringsprocessen og at vejlede modelopstilleren igennem denne. Der har desuden længe været behov for fælles rammer for udarbejdelsen af geologiske modeller, og for hvordan modellerne kan vurderes og

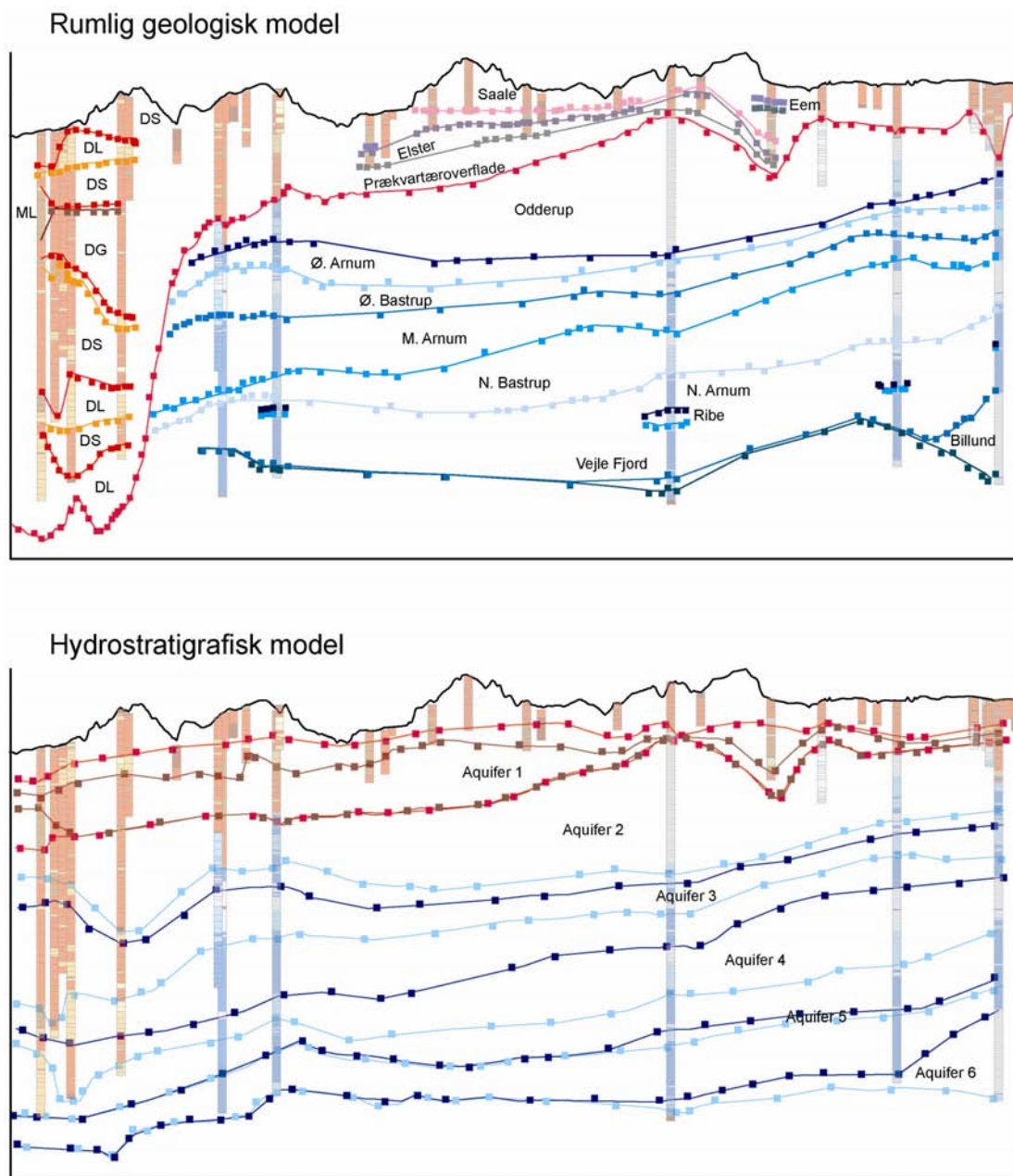
sammenlignes indbyrdes. Der er behov for en højere grad af ensartethed og for kunne "at tale samme sprog". Geologiske modeller kan være meget forskellige og kan defineres på forskellige måder, men med ovennævnte inddeling er det forsøgt at rumme de fleste geologiske modeltyper.

De tre modeltyper kan i praksis udføres alene uden at de forudgående eller efterfølgende modeltyper opstilles. Men principielt bør de ikke stå alene, da de efterfølgende modeller er afhængige af de forudgående. Det vil normalt være en fordel at opstille alle tre modeller, hvis f.eks. slutproduktet skal danne basis for efterfølgende grundvandsmodellering. Der er således et optimalt flow gennem alle tre modeller med start i den geologiske forståelsesmodel og slut ved den hydrostratigrafiske model. Der kan være situationer, hvor der kun er behov for opstilling af den geologiske forståelsesmodel eller den rumlige geologiske model, og her kan de efterfølgende modeltyper uden videre udelades. Der kan desuden også opstå situationer, hvor det skønnes overflødigt at opstille de forudgående modeltyper før f.eks. opstillingen af den hydrostratigrafiske model. Dette kan være af tidsmæssige eller økonomiske årsager, men kan kun sjældent begrundes fagligt, da der i så fald vil blive gået på kompromis med en lang række centrale elementer i opstillingsprocessen og dokumentationen.

De tre modeltrin er opbygget således, at der ved de to første modeltrin arbejdes med geologiske strukturer, lag og laggrænser, herunder dannelsesprocesser og -miljøer. Ved det 3. modeltrin – den hydrostratigrafiske model – modelleres derimod enheder ud fra hydrogeologiske karakteristika, og dette gøres bl.a. på baggrund af de modellerede geologiske forhold ved de to første modeltrin.

Den geologiske forståelsesmodel opstilles alene på baggrund af tidligere tolkninger og beskrivelser. Denne model er normalt ikke rumlig digitaliseret, men beskrives i tekst, figurer og principskitser. Den rumlige geologiske model tager udgangspunkt i forståelsesmodellen, og har til sigte at beskrive den rumlige udbredelse af jordlagene. Først heri indarbejdes modellørens egne tolkninger – både af ældre og nyindsamlede data, og især på baggrund af en sammenstilling af alle data.

Der er et meget grundlæggende skel mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Den rumlige geologiske model er principielt en model over undergrundens fysiske opbygning, men også en model der beskriver dannelseshistorie og -processer. I modellen udføres der kun tolkninger i de områder, hvor geologien er kendt, og hvor tolkninger af denne synes tilstrækkeligt objektive (se Figur 5). I områder, hvor geologien ikke kan tolkes tilstrækkeligt sikkert (set i forhold til formålet med modellen), udføres der som udgangspunkt ikke tolkninger – alternativt, hvis der er behov for tolkninger alligevel, bør de markeres tydeligt i modellen som værende tentative. På denne måde danner den rumlige geologiske model grundlag for opstilling af andre, mere anvendelsesorienterede, modeltyper - f.eks. den hydrostratigrafiske model, hvor der foretages en tolkning af hele modelområdet. Ny geologisk viden, der evt. kommer til efter modelopstillingen, bør altid indlægges i den rumlige geologiske model, således at datagrundlaget for den hydrostratigrafiske model bringes i orden inden denne opdateres. Den rumlige geologiske model er en model, der principielt gradvist udbygges, og hvis den løbende opdateres, vil den derfor altid udgøre det mest aktuelle billede af områdets geologiske opbygning.



Figur 5 Eksempel på forskellen mellem en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model. Den rumlige geologiske model er f.eks. ikke tolket, hvor geologien ikke kan gengives med rimelig sikkerhed. Den hydrostratigrafiske model er tolket i hele modelrummet.

2.1.1 Iterativ proces

Under udarbejdelsen af de geologiske modeller, skal der helt overordnet tænkes i iterative processer. De geologiske modeller bør under hele arbejdsprocessen gøres til genstand for revurderinger, således at de arbejdshypoteser, der er opstillet i starten kan tages op til genovervejelse og holdes op mod de nye tolkninger og modelresultater. Den iterative proces fortsætter endvidere, når den hydrostratigrafiske model er overført til strømningsmodellen, da det undervejs i kalibreringen og valideringen af denne kan vise sig, at det er nødvendigt at justere de geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger.

Opstillingen af de tre modeller kan med fordel ske som en løbende proces gennem hele kortlægningsprojektet af f.eks. et indsatsområde. Således kan der begyndes med først at opstille den geologiske forståelsesmodel og den rumlige geologiske model. Herved opnås et grundlag for vurdering af, hvilke data der er behov for i kortlægningen, og i hvilke områder data skal indsamles. Efter indsamlingen udbygges den rumlige geologiske model, og denne iterative proces kan fortsætte indtil den geologiske model har et omfang, der vurderes som tilstrækkeligt til at opfylde formålet; f.eks. at kunne lave troværdige numeriske strømningsberegninger. Denne iterative proces bør endvidere på et tidspunkt gribe ind i den hydrostratigrafiske model og grundvandsmodellen, da resultater herfra kan give vigtige oplysninger om de geologiske sammenhænge, som herefter også skal indbygges i den rumlige geologiske model. Ulemperne ved at gennemføre sit kortlægningsprojekt på denne iterative måde er primært, at det på forhånd er svært at overskue og svært at planlægge. Det bliver derved vanskeligt at udarbejde en præcis projektbeskrivelse og at udarbejde et samlet udbudsmateriale til eventuel udlicitering af hele modelarbejdet. En anden ulempe er, at forløbet vil strække sig over længere tid, end hvis det hele beskrives i en samlet projektbeskrivelse. Fordelene vil være, at unødvendige data ikke indsamles, og at det kan sikres, at modellerne opnår den datadækning, der er behov for. Desuden er der større plads til fleksibilitet undervejs.

Omfanget af den iterative proces på tværs af modellerne og med indsamling af nye data vil i praksis i høj grad være styret af projektets økonomi og tidsramme.

2.2 Geologisk forståelsesmodel

Den geologiske forståelsesmodel er en overordnet model, der giver det indledende og overordnede geologiske/stratigrafiske overblik. Dermed får modelopstilleren allerede inden opstillingen af den rumlige geologiske model en forståelse af de geologiske forhold samt et indblik i den geologiske dannelseshistorie for området.

Den geologiske forståelsesmodel udarbejdes på baggrund af eksisterende viden, tolkninger og beskrivelser. Der bør i udgangspunktet ikke inddrages eller udarbejdes egne tolkninger i modellen, men alene inddrages tolkninger og beskrivelser fra eksisterende publikationer og kortmateriale. Det er dog i praksis vanskeligt ikke i et vist omfang at inddrage egne vurderinger og tolkninger, og under særlige forhold kan der også være et egentligt behov for dette. I så fald er det vigtigt at egne vurderinger og tolkninger adskilles tydeligt fra de allerede eksisterende tolkninger.

Modellen er ikke en digitaliseret rumlig model med tolkningspunkter, flader og lag, men derimod en redegørelse for de overordnede geologiske forhold, som de tidligere er blevet tolket. Redegørelsen vil normalt bestå af både tekst, figurer og principskitser.

Formålet med at opstille den geologiske forståelsesmodel er følgende:

- At skabe et overblik over de geologiske forhold, således at den rumlige geologiske model efterfølgende kan opbygges på den mest hensigtsmæssige måde
- At modellør og opgavestiller kan opnå en fælles forståelse for de geologiske forhold og den efterfølgende modellering
- At påpege problemstillinger som f.eks. begrænset baggrundsviden og særlige geologiske forhold, der kan have betydning for arbejdsgangen og slutproduktet

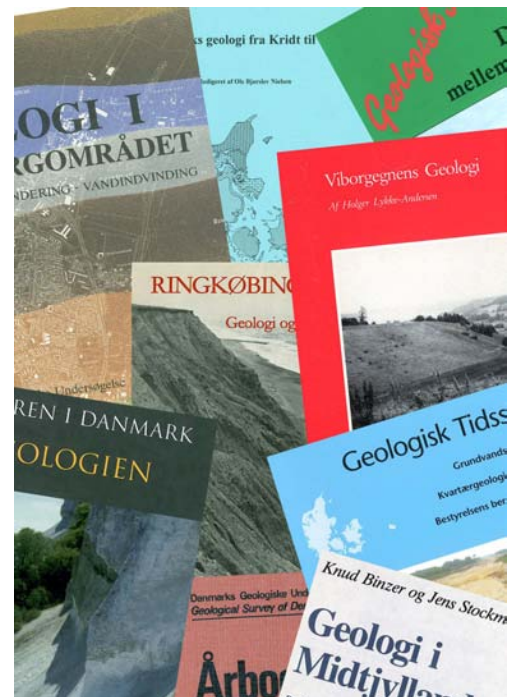
- At opstille arbejdshypoteser for den geologiske opbygning og historiske udvikling af området
- At få udarbejdet en litteraturliste over den eksisterende geologiske forståelse af modelområdet

Den geologiske forståelsesmodel kan eventuelt allerede være udarbejdet i forbindelse med en "kortlægning af eksisterende data - trin 1", men det er ikke sikkert, at modellen præcist dækker det område, der er specificeret i projektbeskrivelsen. Der kan derfor blive tale om at beskære en eksisterende Trin 1-model eller at kombinere flere Trin 1-modeller. Desuden kan der være udført nye tolkninger i området baseret på nyindsamlede data. Af disse årsager skal eventuelle eksisterende geologiske forståelsesmodeller muligvis revideres.

2.2.1 Eksisterende geologisk viden og fortolkninger

Som nævnt er en geologisk forståelsesmodel en opsamling og beskrivelse af den eksisterende geologiske viden og forståelse af modelområdet. Dette materiale er beskrevet i kap. 3.11 "Eksisterende tolkninger" og kan bestå af:

- Litteratur (artikler, lærebøger, generelle tekster med relevans for områdets geologi/hydrogeologi mv. (se Figur 6))
- Rapporter (undersøgelser af lokale/regionale forhold, ældre modeller mv.)
- Kortmateriale (tolkede geomorfologiske kort, landskabsanalyser, jordartskort, basisdatakort, potentialekort, prækvartærkort, paleogeografiske kort, kort over begravede dale, kort over dybe forkastninger, kort over israndslinier mv.)



Figur 6 Eksisterende litteratur

2.2.2 Modelarbejdet

Modelarbejdet består i først at indsamle alt eksisterende og relevant materiale. Dette kan gøres fra en række forskellige kilder (se kap. 3.11 "Eksisterende tolkninger"). Herefter skal materialet 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 skal redegøres for de forskellige tidligere opfattelser, men det er også vigtigt så vidt muligt at vurdere kvaliteten af tolkningerne. Der kan være uoverensstemmelser mellem forskellige tolkninger. Nyere data kan f.eks. frembringe nye tolkninger som strider mod ældre. Kvaliteten af tolkningerne kan bl.a. vurderes ved en overordnet sammenligning med basisdatakort, som bl.a. viser GEUS' tolkning af indsendte boreprøver.

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

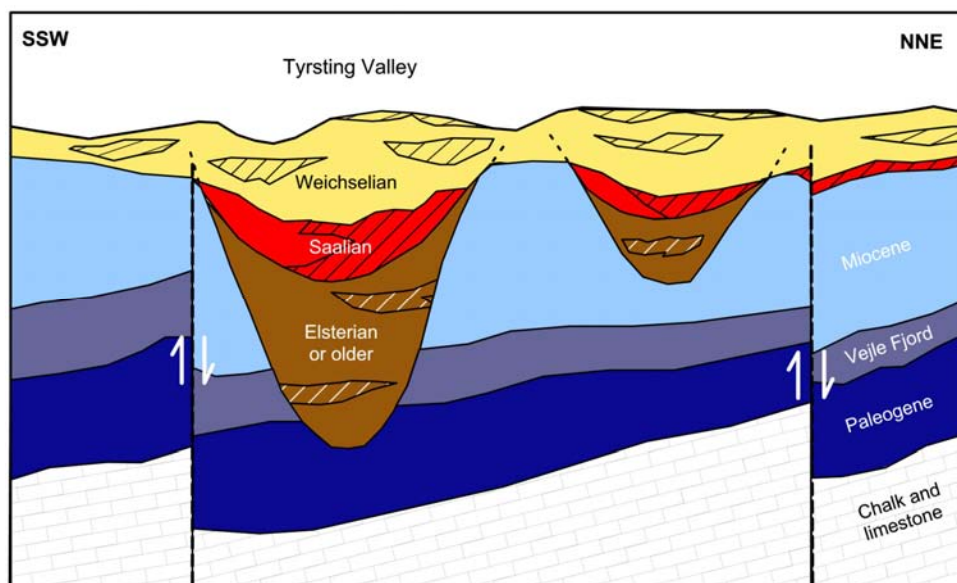
at sammenholde disse tolkninger, kan man øge forståelsen af de geologiske forhold – og dermed allerede påbegynde ens egne geologiske tolkninger for området. I princippet hører egne tolkninger dog først til i den rumlige geologiske model.

Under arbejdet med den geologiske forståelsesmodel skal 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.

På baggrund af gennemgangen udarbejdes et notat eller et resumé, som beskriver de overordnede geologiske forhold i tekst og viser den overordnede geologi på kort- og profilskitser (se Figur 7). Resumeet kan også indeholde sammenfattende kort, som viser flere forskellige af de eksisterende tolkninger sammen (f.eks. begravede dale og israndslinier). Endvidere kan der opstilles en overordnet stratigrafisk lagfølge med en tilhørende, generel beskrivelse af de forventede lag i området.

Der bør således foretages følgende i forbindelse med modelarbejdet:

- Gennemgang af eksisterende tolkninger og opfattelser
- Sammenfatning af geologisk dannelseshistorie
- Udarbejdelse af principskitser over den geologiske opbygning
- En beskrivelse af den overordnede stratigrafi
- Udarbejdelse et sammenfattende notat/resumé



Figur 7 Principskitse, der viser den overordnede geologiske opbygning i et modelområde (fra Jørgensen et al. 2006)

2.2.3 Usikkerhedsvurdering

Usikkerhedsvurderinger bør løbende foretages under arbejdet med den geologiske forståelsesmodel. Det er vigtigt, at de tidligere tolkninger vurderes grundigt, da disse normalt vil være af meget varierende kvalitet. De vurderede usikkerheder både anvendes og beskrives i modelarbejdet. Usik-

kerhedselementer, 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, der er bedre belyst end andre dele?
- Er der konflikter mellem de tidligere tolkninger?
- Er der overensstemmelse mellem geologiske tolkninger af boredata og øvrige eksisterende tolkninger?
- Er der særlige geologiske problemstillinger i området – f.eks. specielt forstyrrede områder eller begravede dale? Og er disse tilstrækkeligt beskrevet?

2.2.4 Kvalitetssikring

Det færdige produkt bør kvalitetssikres. Det bør vurderes om alle relevante tidligere tolkninger er blevet indsamlet og anvendt i arbejdet. Endvidere kan det være givtigt at lade andre vurdere det udførte arbejde (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger"). Dette kan ske internt, hvor en kollega gennemgår og kommenterer arbejdet, eller ved peer review fra eksterne personer. Den egnede metode varierer afhængigt af opgavens type.

2.2.5 Slutprodukt: dokumentation og afrapportering

Afrapporteringen af den geologiske forståelsesmodel bør omfatte en tekst med figurer/kort, stratigrafi og geologiske principskitser. Der vil ikke være digitale modeldata at afrapportere, men selve rapporten afrapporteres på såvel papir som på digitalt format (pdf). 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.

2.2.6 Status

Som afslutning på arbejdet med den geologiske forståelsesmodel kan der foretages en status. Rapportteksten kan anvendes som et statusnotat, som evalueres inden det videre arbejde med den rumlige geologiske model iværksættes. Gennem en forventningsafstemning mellem de involverede parter vurderes det, om der skal foretages justeringer af et eventuelt planlagt videre forløb. Der er på dette tidspunkt 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 derfor skal udsættes. Et andet alternativ kan også være, at forventningerne til modellen skal revideres.

2.3 Rumlig geologisk model

Den rumlige geologiske model er en gengivelse af undergrundens fysiske opbygning, men også en model der beskriver dannelseshistorie og -processer. I udgangspunktet udføres der kun rumlig digi-

tal modellering i områder, hvor dette menes at kunne gøres med en rimelig sikkerhed. I områder, hvor geologien ikke menes at kunne tolkes og modelleres, udelades dette derfor som udgangspunkt – alternativt, hvis der alligevel er behov for tolkninger, bør disse markeres tydeligt i modellen som værende tentative. I nogle tilfælde kan f.eks. den øverste del af lagfølgen være kendt, mens geologien nedenunder ikke kendes. Her vil det således kun være lagflader og lag i den øverste del af lagfølgen, der vil blive modelleret.

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 lithologiske karakteristika, men kan også blive inddelt i forhold til bl.a. dannelsesmæssig oprindelse, herunder dannelsesmiljø og alder. Som udgangspunkt skeles der ikke i denne model til hvilken inddeling af lagserien, der kunne være ønskelig i forhold til slutproduktet. Den rumlige geologiske model opbygges på baggrund af alle tilgængelige data, samt af den dannelsesmæssige forståelse, der byder sig ved en tolkning af data. Derfor er det helt centralt, at byggestenene i den rumlige geologiske model afspejler modelområdets geologi og ikke andre sekundære forhold, såsom hydraulik.

Formålet med den rumlige geologiske model er følgende:

- At udarbejde en rumlig model af jordlagenes fysiske og strukturelle opbygning i et modelområde i den detaljeringsgrad, som i det aktuelle tilfælde er påkrævet, og som datagrundlaget samtidigt kan understøtte
- At modellere lithologiske og stratigrafiske lagflader/lag og andre enheder, der er vigtige for forståelsen af områdets dannelse og opbygning
- At samtolke data; primært geologiske, geomorfologiske, lithologiske, stratigrafiske, hydrologiske og geofysiske data
- At indarbejde dannelsesmiljø og dannelseshistorie i tolkningsprocessen og dermed i modellen
- At skabe et grundlag for videre brug i andre modeltyper; f.eks. den hydrostratigrafiske model
- At skabe en "tolkningsdatabase", hvor udførte geologiske tolkninger kan gemmes og derved genbruges og udbygges ved senere lejligheder
- At sikre en optimal udnyttelse af data inden der evt. arbejdes videre med en hydrostratigrafisk model

2.3.1 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 er blevet beskrevet i projektbeskrivelsen (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 der på tidspunktet for udarbejdelsen af projektbeskrivelsen ikke var en tro på, at disse data kunne bidrage med nyttig information til modelarbejdet. Dette vil normalt medføre ekstra tidsforbrug, som ligger ud over det der oprindeligt var forudsat i projektbeskrivelsen.

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

- Geologiske data
 - Boredata
 - Informationer fra blotninger
 - Jordarts- og jordbundsdata
 - Stratigrafiske data
- Geomorfologiske data
 - Topografiske data
- Hydrologiske data
 - Pejledata
 - Hydraulisk ledningsevne
 - Prøvepumpningsdata
- Kemiske data
 - Grundvandskemi
 - Sedimentkemi
- Geofysiske data
 - Seismik
 - TEM
 - PACES
 - MEP og DC
 - Borehulslogs

Herudover skal eksisterende tolkninger betragtes som en del af datagrundlaget:

- Eksisterende tolkninger
 - Litteratur
 - Geologiske kort
 - Geomorfologiske kort
 - Geologiske modeller
- Den geologiske forståelsesmodel

De forskellige datatyper giver mere eller mindre direkte oplysninger om jordlagenes opbygning. De mest direkte oplysninger fås fra blotninger, hvor jorden kan betragtes umiddelbart. Intakte boreprøver kan også siges at give direkte information om jordlagene. Geofysiske data giver kun 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 i jorden. De geofysiske data kan derfor ikke anvendes direkte i den geologiske modelleringsproces – de skal undergå en geologisk fortolkning først.

Hydrologiske og grundvandskemiske data er også indirekte data. Disse data fortæller noget om, hvordan grundvandet strømmer i jordlagene, og ad denne vej kan man i nogle tilfælde opnå information om jordlagenes opbygning. Men særligt i kombination med øvrige data kan disse data være værdifulde indikatorer på mulige sammenhænge i den rumlige opbygning.

Fokusdybden varierer også 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,

seismiske data og tyngdedata er eksempler på data, der når 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 i Kap. 3. Følgende datatyper er beskrevet:

- Seismik (Kap. 3.1)
- TEM (Kap. 3.2)
- PACES og PACEP (Kap. 3.3)
- MEP og DC (Kap. 3.4)
- Geofysiske borehulslogs (Kap. 3.5)
- Andre geofysiske data (Kap. 3.6)
- Boredata (Kap. 3.7)
- Stratigrafiske boredata (Kap. 3.8)
- Hydrologiske data (Kap. 3.9)
- Kemiske data (Kap. 3.10)
- Eksisterende tolkninger (Kap. 3.11)
- Topografiske data (Kap. 3.12)
- Jordarts- og jordbundsdata (Kap. 3.13)
- Informationer fra blotninger (Kap. 3.14)

2.3.2 Konstruktion af modelskelet

Modeltype

Der skal tidligt i projektforløbet tages stilling til, hvilken modeltype man vil benytte. Oftest benyttes lagmodellen (se kap. 3.15 "Lagmodel"), men i særlige tilfælde kan det være fordelagtigt at benytte en såkaldt pixelmodel (se kap. 3.16 "Pixelmodel"). Valget kan muligvis være taget allerede som en del af problemformuleringen og projektbeskrivelsen (Kap. 1).

Lagmodellen består grundlæggende af lagflader med mellemliggende lagdefinitioner. Lagfladerne er opbygget af vektorforbundne digitale punkter og/eller grids. Lag defineres som de mellemliggende enheder bestående af et sæt punkter, der definerer overfladen af laget, og et andet sæt af punkter der definerer bunden af laget. Eventuelle horisontale variationer i f.eks. lithologi inden for hvert enkelt lag kan i lagmodellen registreres ved hjælp af et geologisk zoneringsstema (se kap. 3.34 "Fra Rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model").

Pixelmodellen er opbygget af regulære pixler eller kasser, der under modelleringsprocessen udfyldes med tolkninger. De enkelte pixler tildeles geologiske tolkninger og bør ikke forveksles med hydrologiske pixelmodeller. Pixelmodellen indeholder derfor ikke egentlige lagflader og disse kan dermed ikke gengives korrekt og med samme præcision som ved lagmodellen. Pixelmodellen kan til gengæld gengive mere komplekse geologiske miljøer.

Sammenstilling med andre modeller

Skal modellen sammenstilles og eventuelt sammenbygges med eksisterende modeller i overlappende områder eller i naboområder, skal der ved valg af modelskelettet tages hensyn til, hvorledes disse tidligere modeller er konstrueret (se kap. 3.17 "Sammenstilling med andre geologiske modeller"). Specielt hvis der er krav om sammenbygning af modellerne, er det vigtigt, at modelskelettet bliver konstrueret, så dette er muligt. 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 en anden model, bør følgende overvejes ved modelkonstruktionen:

- Formålet med modellerne
- Modeltypen
- Modelafgrænsningen
- Datagrundlaget
- Dokumentationsniveauet for den anden model
- Fokusområdet for den anden model

Modelafgrænsning

Inden modellen konstrueres skal der også tages beslutning om modellens præcise udbredelse (se kap. 3.18 "Modelafgrænsning"). Udbredelsen er selvfølgelig delvist foruddefineret af det undersøgelsesområde, der er defineret i problemformuleringen og projektbeskrivelsen (Kap. 1), 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 datasæt

Relevansen af de tilgængelige datasæt skal overvejes og datasættene skal holdes op mod hinanden og prioriteres i visningen (se kap. 3.19 "Prioritering og visualisering af datasæt"). 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. Måden at visualisere data på er også væsentlig at forholde sig til på et tidligt tidspunkt. Det er dog vigtigt undervejs i tolkningsprocessen at kunne iterere sig frem til forbedrede visualiseringer af data.

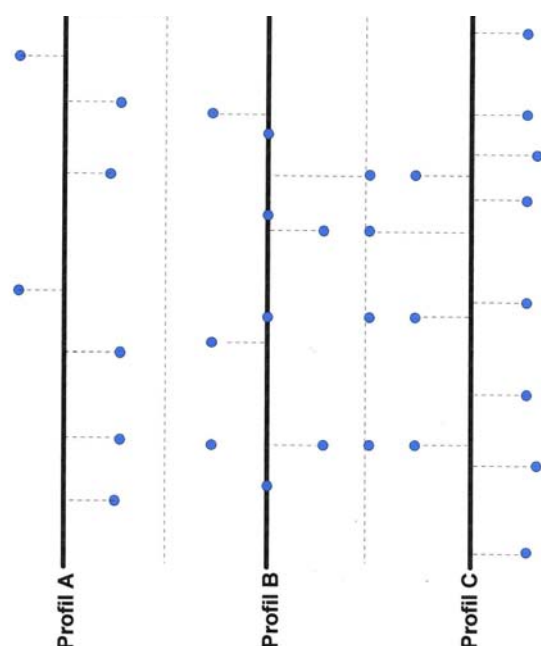
Interpolation af data

For at få et overblik over nogle datatyper, er det fordelagtigt at udføre interpolation (se kap. 3.20 "Interpolation af data"). Dette gøres typisk inden data vises i den geologiske model, men kan også gøres iterativt som en del af tolkningsprocessen. Formålet med at interpolere data er at give et forbedret grundlag for den geologiske tolkning. For at det skal give mening at interpolere data, bør der være en korrelation mellem datapunkterne. Fladedækkende data interpoleres typisk i horisontale snit (f.eks. geofysiske middelmålestandskort) eller til 3D-flader (f.eks. kote for god leder fra TEM). 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.

Profilnetværk og projektionsafstande

Traditionelt bliver de fleste geologiske modeller bygget op omkring et profilnetværk, hvori tolkninger udføres (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande"). På hvert enkelt profil projiceres data vinkelret ind fra fastlagte maksimale projektionsafstande (se Figur 8). 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.



Figur 8 Projektion af datapunkter til profiler.

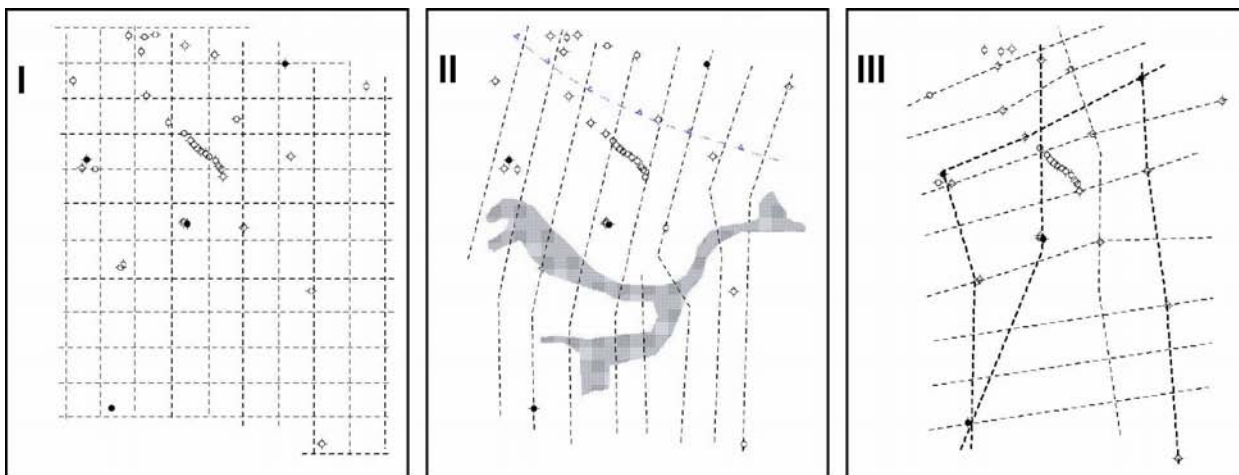
Hvor der er homogen geologi, kan afstanden være stor, men i områder med kompleks geologi, bør der benyttes små projektionsafstande. Er der stor datatæthed kan man indskrænke sin projektionsafstand for at opnå et bedre overblik. Nogle datatyper repræsenterer midlet information over store områder, og en relativt stor projektionsafstand kan derfor tillades for disse data i forhold til data, der kun midler over små områder. Disse forhold er endvidere normalt afhængige af dybden (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande").

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 (se Figur 9). Fordelene ved det irregulære netværk er, at man ved hjælp af knækpunkter kan styre sine profiler efter datapunkterne og dermed søge at minimere projektionsafstandene. Det kan være en fordel at placere profil-

linierne tæt forbi borer og så lade f.eks. TEM-sonderinger blive projiceret ind på linien, da sidstnævnte viser midlet information over et vist jordvolumen.

Desuden er det muligt at skære geologiske strukturer på en optimal måde – f.eks. vinkelret på aflange strukturer, som f.eks. 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 data. Derfor er det allerede i de indledende faser af modelopstillingen fordelagtigt at have et forhåndskendskab til strukturerne art, orientering og mulige udbredelse. Dette vil muligvis fremgå af den geologiske forståelsesmodel. Profilerne skal dog udlægges, så de er nogenlunde retlinede for at opretholde et rumligt overblik over modelrummet. Der bør normalt placeres et antal tværgående profiler til kontrol og korrelation mellem de parallelle linier.

Det regulære netværk kan give et godt og systematisk overblik over området. Herudover sikrer det regulære netværk, at tilgangen til data såvel som geologiske strukturer er så objektiv som mulig. Dette kan være en fordel, hvis man som udgangspunkt ikke har overblik over områdets strukturer, eller hvis man ikke har et detaljeret kendskab til alle data i området.



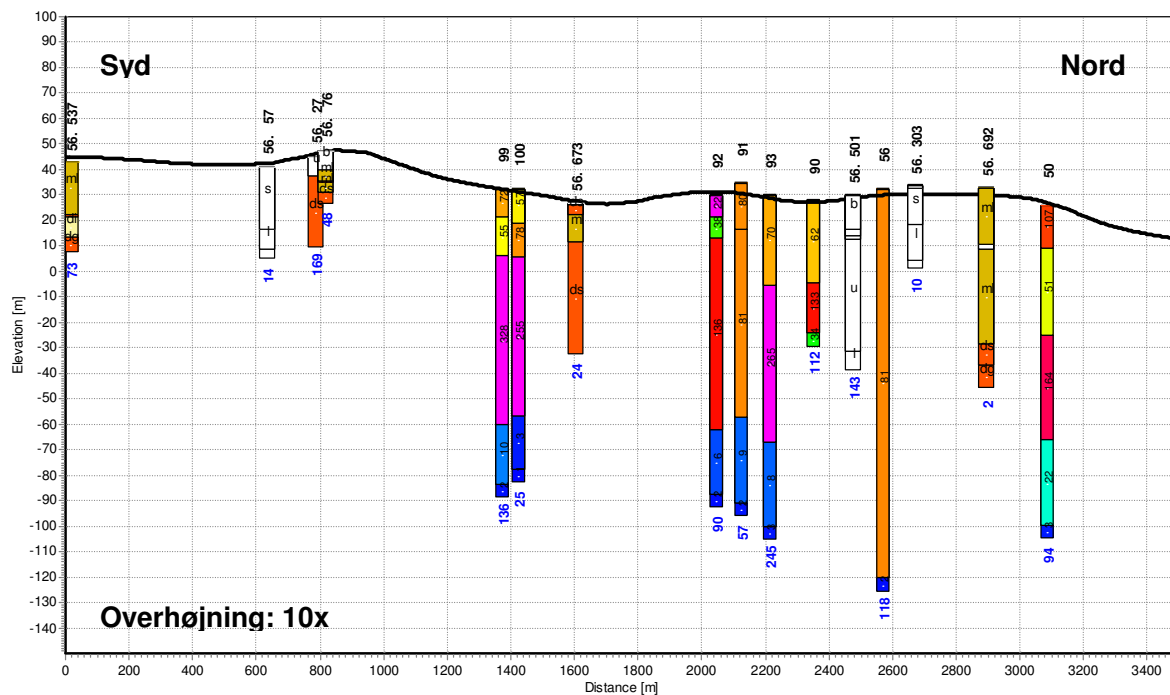
Figur 9 Tre forskellige måder at arbejde med profilnetværk på. I: Regulært netværk. II: Irregulært profilnetværk udlagt i forhold til geologi. III: Irregulært netværk udlagt i forhold til data (Udarbejdet af John Vendelbo Frandsen, Orbicon).

En hensigtsmæssig arbejdsgang er først at udlægge et netværk af profiler, som nogenlunde 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.

Ved 3D-tolkning er der ikke nødvendigvis behov for at arbejde med fast definerede profilinier (se kap. 3.30 "3D-visualisering og -tolkning").

Profiloptegning

Selve profiloptegningen foretages enten inden den geologiske modellering påbegyndes eller undervejs i denne. Sammen med horisontale planer danner profilerne, som ovenfor nævnt, grundlag for de fleste geologiske modeller. Optegningen skal ske under hensyntagen til den påtænkte datavisualisering og dataprioritering, projektionsafstande samt ønsket overhøjning (se kap. 3.22 "Profiloptegning"). Overhøjning anvendes for at bedre overblikket langs profilerne, da lagene typisk vil være meget tynde og strukturer vil være svære at se og modellere uden brug af overhøjning. Ved overhøjning bliver de sande rumlige forhold forvrænget, og bliver denne forvrængning for stor, kan modelløren få vanskeligt ved at identificere de geologiske strukturer i data. Det anbefales derfor at overhøjningen begrænses. Erfaringsmæssigt er overhøjninger på mere end omkring 10 gange vanskelige at håndtere.



Figur 10 Eksempel på klargjort profil med borer og TEM-sonderinger. Projektionsafstande er angivet under data-stolperne. Modstandsværdier og lithologi er angivet med labels.

Visualisering af data

Da de forskellige datatyper er forskelligartede, visualiseres de typisk på forskellige måder i modellen. 2D-data, som seismik og MEP vises på profiler som kontinuerte afbildninger eller som interpolerede vertikale flader. 1D MEP, PACES og SkyTEM vises normalt med tætliggende stolper, mens traditionelle TEM-sonderinger og borer vises som spredtliggende stolper (se Figur 10). Punktdata, såsom kemiske data og hydrologiske data kan med fordel vises som farvetematiserede punkter. Fladedækkende data kan være relevante også at visualisere på horisontalplaner; f.eks. middelmodstandskort. Til visualiseringen anvendes ofte farveskalaer. Der er defineret standarder for flere af disse farveskalaer; bl.a. benyttes DGU-standardfarveskala til visualisering af lithologier og GeoFysikSamarbejdets farveskalaer for henholdsvis elektromagnetiske og geoelektriske data. Visualiseringen af de forskellige datatyper er beskrevet i Kap. 3 under de enkelte kapitler om data.

2.3.3 Rumlig geologisk modellering

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.

Datagrundlaget kan som nævnt bestå af data, der er tolkede og vurderede i tidligere arbejder, men dataene kan også være nyindsamlede. Tolkninger af gamle data er allerede indarbejdet i den geologiske forståelsesmodel, mens tolkninger af nyindsamlede data først indarbejdes i den rumlige geologiske model. Ofte vil det også være relevant at udføre nye eller alternative tolkninger af de gamle data som en del af den rumlige geologiske model. Dette vil typisk ske ved en samtolkning med nye/andre data, hvorved ny indsigt opstår.

Papirtolkning og digital tolkning

Oftest vil der være krav om, at tolkningerne registreres digitalt i en database (se kap. 3.24 "Digital tolkning"). Dette foregår i geologisk tolkningssoftware, som normalt også har faciliteter til visualisering af data. I nogle tilfælde, hvis visualiseringen på computerskærmen ikke giver tilstrækkeligt overblik, kan det være en fordel at udtegne profiler og kort fra det digitale modelskelet. Herpå kan man så skitsere og indtegne sine tolkninger med almindelige skrive-/tegneredskaber (se kap. 3.23 "Papirtolkning"). Det er desuden lettere at skitsere tentative tolkninger og opfattelser af geologien på papir end i det digitale miljø. Efterfølgende kan de konklusive papirtolkninger indscannes og digitaliseres ind i den digitale model.

Formålet med at udarbejde de geologiske modeller digitalt er primært følgende:

- Der opnås mulighed for central lagring af modellerne
- Der opnås gode muligheder for visualisering af modelresultatet
- Modelresultaterne kan udveksles og sammenstilles med andre modeller
- Modellen kan videreudbygges efter endt tolkning
- Skal modellen senere benyttes ved grundvandsmodellering, er det en fordel, at den foreligger på digital form

Punkttolkning

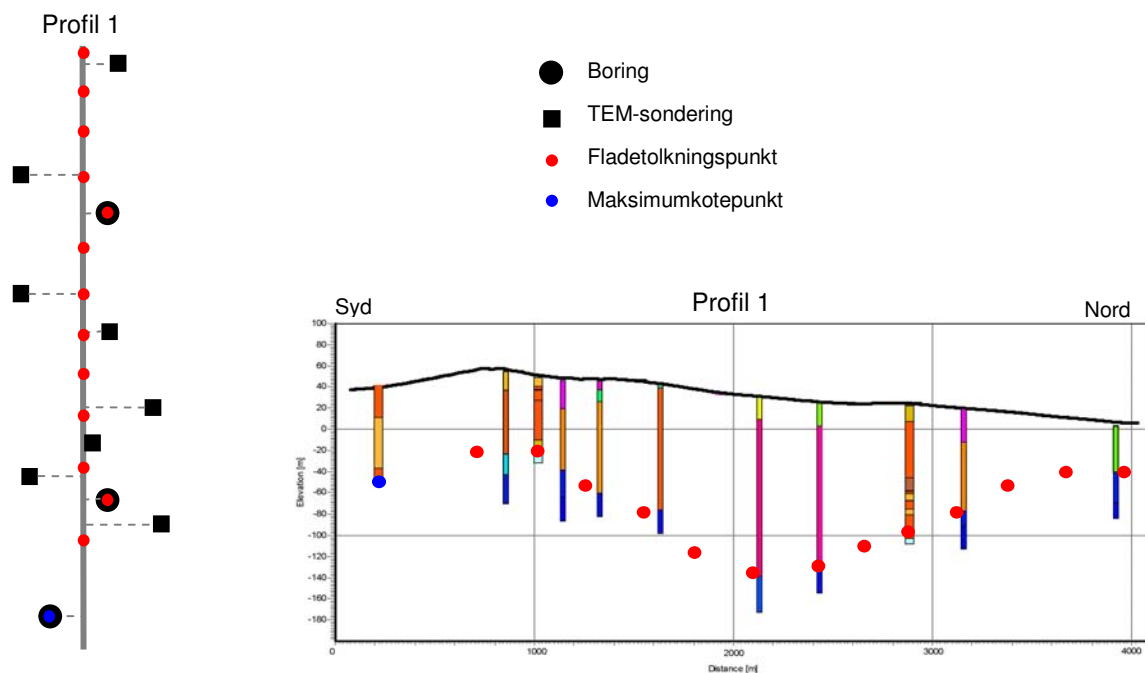
Den rumlige geologiske modellering foregår normalt (for lagmodellens vedkommende) ved hjælp af punkttolkning (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Med punkttolkning menes digitalisering af punkter i modelrummet; i praksis ofte på profiler. Fladetolkningspunkter afsættes i modelrummet i positioner, hvor en given flade tolkes at være til stede. Det vil sige, at der til ethvert fladetolkningspunkt hører en tolkning og en antagelse af tilstedeværelse af f.eks. en bestemt laggrænse i netop det afsatte fladetolkningspunkt. Fladetolkningspunkterne udgør det grundlæggende element i den rumlige geologiske model. Fladetolkningspunkter, der tilsammen definerer en bestemt laggrænse, og som menes at angive et tilstrækkeligt forløb og en fyldestgørende form af laggrænsen, kan interpoleres til en grid-flade, men det er stadig fladetolkningspunkterne, der udgør det grundlæggende element i modellen.

Der er defineret en række forskellige typer af digitale punkter. Disse er beskrevet under kap. 3.25 "Punkttolkning" og vil derfor kun blive kort beskrevet her. De digitale punkter omfatter:

- Fladetolkningspunkter:
 - Snappede fladetolkningspunkter
 - Frie fladetolkningspunkter
 - Støttende fladetolkningspunkter
- Hjælpepunkter:
 - Afgrænsningspunkter
 - Negativpunkter
 - Maksimumkotepunkter
 - Minimumkotepunkter

De digitale punkter er således inddelt i de ovenfor nævnte *fladetolkningspunkter* og *hjælpepunkter*. Fladetolkningspunkter benyttes til at definere og modellere laggrænsers og geologiske strukturers former. De snappede fladetolkningspunkter knyttes ved hjælp af faciliteter i tolkningssoftwaren præcist til datapunkter i modelrummet (se Figur 11). Dette kan være i datapunktets geografiske koordi-

nater og desuden også i en laggrænses kote. Ved profiltolkning skal man være opmærksom på, at de *snappede fladetolkningspunkter* ikke vil blive placeret præcist på profillinien, hvis de data fladetolkningerne tilknyttes, er projiceret ind på denne. De *frie fladetolkningspunkter*, derimod, bliver afsat på profilet eller fladen på de steder man indikerer – uden projektionsafstand. *Støttende fladetolkningspunkter* indeholder en mindre grad af sikkerhed og benyttes typisk som støtte ved interpolation. Støttende fladetolkningspunkter benyttes primært ved opstillingen af den hydrostratigrafiske model, hvor der tolkes i hele modelrummet, og således også i datasvage områder.



Figur 11 Figur der viser brugen af fladetolkningspunkter. Frie fladetolkningspunkter er knyttet til profilet, mens de snappede fladetolkningspunkter er projiceret ud på data - i dette tilfælde borer. Brugen af maksimumkote er også vist. Her ses den tolkede flade ikke i boringen, og den tolkede flade har derfor ved boreringslokaliteten en maksimal kote i boringens bund.

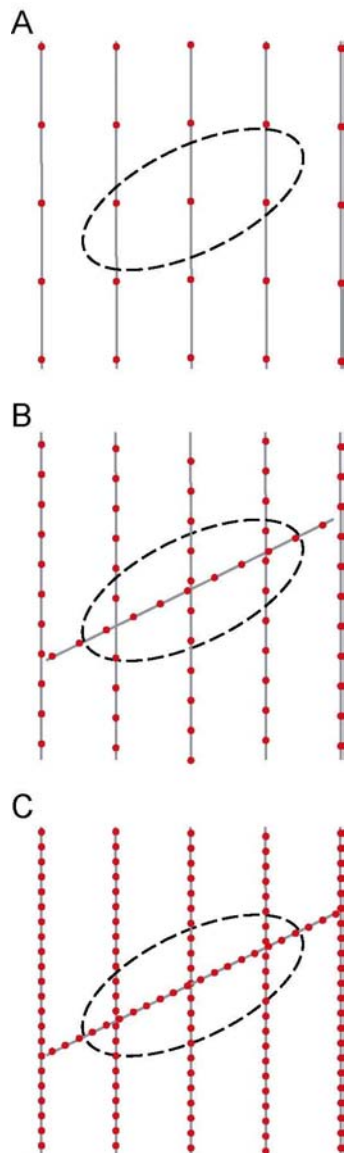
Hjælpepunkterne er ikke punkter, der definerer lagfladernes rumlige former. Disse punkter anvendes alene som en hjælp i modelleringsarbejdet. Dette kan bl.a. være i forbindelse med afgrænsning af lag, angivelse af, hvor en given lagflade *ikke* eksisterer og angivelse af, om en laggrænse ligger dybere eller højere end et bestemt niveau.

Det bør generelt tilstræbes, at gengive de geologiske forhold med anvendelse af så få tolkningspunkter som muligt (se Figur 12). Dog bør det tilstræbes, at der tilknyttes tolkningspunkter til alle relevante data. Optimalt set bør tætheden af punkter som minimum være så stor, at fladen kan gengives tilfredsstillende ved en efterfølgende interpolation (se 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag").

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. Se mere om dette nedenfor under kap. 3.35 "Dokumentation".

Profiltolkning, horisontaltolkning, gridmodellering og 3D-tolkning

Det optimale modelrum at udføre sine tolkninger i er tredimensionelt, da den tolkede geologi også er tredimensionel. Derfor bør modelrummet så vidt muligt visualiseres i tre dimensioner, for at den bedst mulige forståelse af geologien kan uddrages. Dette stiller store tekniske krav til software og computerkraft, men det stiller også krav til brugeren, så længe den tekniske del ikke er fuldt udviklet. På nuværende tidspunkt (medio 2008) er der endnu ikke færdigudviklede programmer, der fuldt ud kan tilbyde geologisk tolkning i et tredimensionelt miljø.



Figur 12: Punkttæthed. Geologisk struktur vist med sort stiplede linie, profiler med grå linier og fladetolkningspunkter med røde punkter. A: For få punkter. B: Passende punkttæthed. C: For mange punkter.

Den digitale modellering foregår derfor stadig mest i programmer, der kun kan håndtere tolkning i to dimensioner. Mest benyttet er som nævnt profiltolkningen, men også horisontaltolkning er benyttet. En kombination af disse to tolkningsmåder giver tilsammen mulighed for tolkning i tre dimensioner – bare ikke samtidigt. Ved horisontaltolkningen er modelrummet drejet 90° i forhold til ved profiltolkningen. Her digitaliseres punkterne på horisontale planer med faste koter eller på interpolerede højdekort over f.eks. laggrænser med valgbare koter (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Foruden de grundlæggende data som databaggrund kan forskellige former for kort eller punkttemaer benyttes ved horisontaltolkningen. Kortene kan vise interpolerede dataværdier i faste koter, eller som nævnt interpolerede højdekort over laggrænser m.v. Horisontaltolkningen kan hjælpe med til at definere afgrænsning af lag, og til at modificere og finjustere lagflader i forhold til den geologiske forståelse. I et tredimensionelt tolkningsmiljø kan gridmodellering også hjælpe til med dette. Her er det muligt at modellere og modificere grids på en væsentlig mere effektiv måde (se kap. 3.29 "Gridmodellering").

Ved profiltolkning skal ikke alene data, men også fladetolkningspunkterne, tildeles projektionsafstande. Dette gøres for at få dem vist på nærtliggende naboprofiler eller krydsende profiler. Projektionsafstandene vælges i forhold til den forventede udbredelse og variabilitet af lagene. Hvis lagfølgen er inhomogen, bør der kun anvendes små projektionsafstande, og i stedet må der udlægges et tættere netværk af profillinier.

Interpolation af tolkede flader og lag

Som en del af tolkningsprocessen kan det være relevant at udtegne gridflader over de med fladetolkningspunkter digitaliserede lagflader. Dette kan gøres ved at udføre interpolation af fladetolkningspunkterne. Til støtte ved interpolationen kan anvendes støttende fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag"). Griddede flader kan forbedre visualiseringen af modellens indhold.

Interpolationen af lagflader er sammen med de ovennævnte tolkningsrutiner en iterativ proces, hvor den interpolerede flade holdes op mod fladetolkningspunkterne såvel som mod grunddata og mod geologens forståelse af området. Hvis der er uoverensstemmelser, foretages justeringer i fladetolkningspunkterne og interpolationen foretages igen, indtil den ønskede form af lagfladen er opnået. Interpolationen kan også foregå ved håndkonturering, hvor tolkeren på baggrund af fladetolkningspunkterne optegner konturer med fastlagte intervaller. Dette kan gøres på papir – en udskrift af fladetolkningspunkterne fra modellen med tilhørende koteværdier. Håndkontureringen kan hjælpe med til at give modelløren en forståelse og et overblik over en lagflades form. Det færdige konturkort kan efterfølgende overføres til den digitale model ved f.eks. at lægge støttende fladetolkningspunkter ind langs konturerne ved hjælp af horisontaltolkning.

Interpolation af tolkede flader og lag er yderligere beskrevet nedenfor under den hydrostratigrafiske model (Kap. 2.4).

Afgrænsning af flader og lag

Da den rumlige geologiske model normalt er opbygget af enheder, der kan have begrænset udbredelse, er det nødvendigt at kunne indarbejde laterale afgrænsninger af lagene og lagfladerne (se kap. 3.28 "Afgrænsning af lag og lagflader"). Der er grundlæggende forskel på, om et lag vurderes som afgrænset/ikke til stede, eller om det blot ikke er tolket. Er det ikke til stede, skal denne oplysning indarbejdes aktivt i modellen ved at markere eller afgrænse udbredelsen. Dette kan gøres ved hjælp af afgrænsningspunkter og negativpunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Afgrænsningen foretages nemmest ved at anvende en kombination af profiltolkning og horisontaltolkning.

I den anden situation, hvor lagets tilstedeværelse er ukendt, skal der ikke nødvendigvis indarbejdes nogen oplysninger i modellen. Dog kan der indlægges maksimum- og minimumkote punkter for angivelse af tolkede maksimale og minimale koter for aktuelle enhed.

Indarbejdelse af landskabsanalyse

Topografiske data kan anvendes i en landskabsanalyse, hvor særligt detaljer i kurvebilledets udformning kan give indirekte, men vigtig information om forhold i såvel de overfladenære som de dybereliggende jordlag. Begravede geologiske strukturer, som forkastninger og dale, kan på denne måde nogle gange afsløres. Ligeledes kan terrænnære ler- eller sandlag ofte afsløres. Landskabsanalysen sammenholdes typisk med boredata eller andre data for at få den optimale udnyttelse. Den udføres ved at inddеле landskabet i topografiske delområder, som f.eks. kan visualiseres i modellens profiler og fladekort. Herudfra indbygges tolkningerne fra landskabsanalysen i modellen. Se i øvrigt kap. 3.31 "Indarbejdelse af landskabsanalyse i den geologiske model".

Modellering af særlige geologiske strukturer og områder

Det kan være forbundet med problemer at få nogle geologiske strukturers former gengivet korrekt i modellen, 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 istektoniske 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 istektonisk forstyrrede områder, hvor en modellering af den nøjagtige geometri af overskydninger og foldede lagpakker normalt vil være umulig (se kap. 3.33 "Modellering og implementering af istektonik"). Ofte bliver disse inhomogene områder ignoreret ved geologisk

modellering, men da inhomogeniteterne har store konsekvenser i forbindelse med flere af de formål, der er med modelopstillingen (f.eks. beregning af grundvandets strømningsmønstre), er det meget vigtigt, at områderne identificeres og registreres, hvis ikke de på rumlig form kan indgå i modellen.

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. Ved profiltolkning vil profilinierne typisk placeres vinkelret på dalenes længderetninger og med en profilafstand, der er tæt nok til at beskrive dalene med fladetolkningspunkter langs profilinierne. Der vil ofte være behov for at afgrænse lagene i dalene, da disse kun findes her. 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. baggrundkort 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.

Forkastninger er et andet eksempel på ofte forekommende geologiske strukturer, som både er væsentlige og vanskelige at modellere. Modellering af både dale og forkastninger er nærmere beskrevet under kap. 3.32 "Modellering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer".

2.3.4 Usikkerhedsvurderinger

De tolkninger den rumlige geologiske model er opbygget af, er alle behæftet med en grad af 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 vigtigt med en dokumentation, visualisering og formidling af disse. Det vil således være geologens opgave at vurdere og dokumentere de usikkerheder, der knytter sig til tolkningerne, samt at foretage en dokumentation, visualisering og formidling af usikkerhederne.

De data, der anvendes i den rumlige geologiske model, besidder alle en objektiv usikkerhed, som nogle gange er kvantificeret og andre gange ikke. Det er modellørens opgave at sammenholde data og, under betragtning af dataenes objektive usikkerheder, udføre en rumlig geologisk tolkning. Tolkningen er subjektiv, og udover datausikkerhederne er den baseret på forhold som bl.a. dannelsesmiljø og -processer. Ved sammenstillingen og samtolkningen af data tilføres udover datausikkerhederne derfor også en tolkningsusikkerhed til den rumlige geologiske model. Således består den rumlige geologiske models samlede usikkerhed af både objektivt målte datausikkerheder, vurderede datausikkerheder, samt af usikkerheder på subjektive geologiske tolkninger og antagelser. Modelløren tager i forbindelse med tolkningen dog alle disse forhold i betragtning og forholder sig til den samlede usikkerhed, når der tages beslutning om en tolkning. Denne usikkerhedsbetragtning er en samlet usikkerhedsbetragtning af den endelige tolkning og bør dokumenteres sammen med denne. En kvantitativ usikkerhedsanalyse af den rumlige geologiske model kan derfor ikke udføres, men de kvantitative datausikkerheder bør dog alligevel indgå som en del af dokumentationen, sammen med den samlede subjektive usikkerhedsbetragtning.

Usikkerheden på rumlige geologiske modeller er en kompliceret opgave at dokumentere, da den som nævnt indebærer både datausikkerhed og den samlede tolkningsusikkerhed. Datausikkerheden kan dog relativt enkelt vises for hvert enkelt datasæt, hvor denne er blevet målt eller analyseret. Men den samlede tolkningsusikkerhed, som bl.a. integrerer datausikkerheden, er vanskeligere at dokumentere og formidle. I kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger" er der dog vist et forslag til metode hvorved dette kan udføres på profilniveau, ligesom afsnittet giver en yderligere beskrivelse af usikkerheder.

I den rumlige geologiske model bør der kun udføres tolkninger i områder, hvor der menes at være et rimeligt objektivt grundlag for dette. Meningen med den rumlige geologiske model er ikke, at der absolut *skal* modelleres i geologisk ukendte områder, men derimod at registrere de tolkninger, der af modelløren vurderes for værende underbyggede i data eller i den dannelsesmæssige forståelse af området til et rimeligt niveau. Den rumlige geologiske model udgør således en status for kendskabet til den geologiske opbygning i modelområdet, som gradvist kan udbygges, når nye data bliver indsamlet, og ny viden kommer til. Da tolkningerne altid er subjektive, og da der er varierende formål med modelopstillinger, er det dog ikke muligt at definere et generelt niveau af sikkerhed, der bør opnås, inden en tolkning/modellering foretages.

2.3.5 Dokumentation

Dokumentation foretages af flere forskellige årsager (se kap. 3.35 "Dokumentation"). Foruden en overordnet dokumentation til brug ved projektstyringen foretages en teknisk dokumentation til brug ved kvalitetssikring eller evt. overdragelse og videreudvikling af modellen. Alene det at benytte modellen – bl.a. i forbindelse med opstilling af en hydrostratigrafisk model – forudsætter, at en omfattende teknisk dokumentation foreligger.

Som beskrevet ovenfor, er usikkerhedsvurderinger et centralt element i den rumlige geologiske modellering, og usikkerhedsvurderingerne indgår derfor også som en central del af dokumentationen. Men foruden usikkerhedsvurderingerne skal der udarbejdes en del anden dokumentation. Dette gælder f.eks. følgende:

- 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
- Beskrivelse af mulige, ikke-gennemførte tolkninger
- Benyttede interpolationsrutiner og indstillinger for disse
- Den forløbne arbejdsgang/arbejdsproces

Detaljeringsgraden af dokumentationen afhænger af formålet. Skal modellen kunne reproducere fuldstændigt, kræves en meget detaljeret dokumentation. Generelt vil der være behov for en relativt stor detaljeringsgrad, da modellerne bør kvalitetssikres og normalt skal benyttes som grundlag for videre arbejder.

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 en digital logbog, hvori de tekniske detaljer noteres gennem hele projektet.

Ovenstående dokumentation kan ses som en grundlæggende dokumentation for det udførte modelarbejde. Modellen skal desuden afrapporteres (se kap. 3.42 "Afrapportering"), hvilket bl.a. kræver en mere formidlende form for dokumentation, hvori der gives et samlet overblik over modelleringsprocessen, det færdige produkt og det opnåede geologiske indblik i modelområdet. Det vil sige et resumé af ovennævnte punkter og usikkerhedsvurderingerne, samt en række uddybende kort, skitser og beskrivelser, der giver et overblik over de rumlige geologiske forhold og den geologiske udvikling af området. Dette bør bl.a. omfatte:

- En opdatering af den stratigrafi for modelområdet, der blev skitseret under arbejdet med den geologiske forståelsesmodel
- En præsentation og beskrivelse af den opstillede model (alle observerede/tolkede lag)
- Beskrivelser af aflejringssmiljøet og dannelsesprocesser
- Beskrivelse af dannelseshistorien
- Udvalgte profilsnit
- Generaliserede profilskitser, der overordnet viser den geologiske opbygning
- Udarbejdelse af kort, der beskriver udvalgte lags karakteristika (tykkelse, udbredelse m.v.)
- Eventuelle geologiske zoneringskort
- Usikkerhedsvurdering af modellen

2.3.6 Kvalitetssikring

Inden den rumlige geologiske model kan betragtes som færdig, bør den være kvalitetssikret. Dette kan evt. foregå løbende undervejs i modelarbejdet, og bør gøres på forskellige niveauer. Her tænkes på følgende:

- Datagrundlaget – de enkelte datasæt (graden af dette kan defineres i projektbeskrivelsen)
- Modelkonstruktionen
- Tolkningerne
- Usikkerhedsvurderingerne
- Dokumentationen
- Rapporten

Kvalitetssikringen bør omfatte alt fra korrekturlæsning og sikring af, at alle bilag f.eks. er med i rapporten, over sikring af anvendte datas anvendelighed og kvalitet, til en vurdering af om tolkningerne er sandsynlige og stemmer med den geologiske dannelseshistorie for modelområdet. Dette kan foregå ved en traditionel intern kvalitetsgennemgang eller evt. ved et eksternt peer review. I begge tilfælde bør det foregå ved, at en person på samme faglige niveau, som den der har opstillet modellen, foretager en kritisk gennemgang af det udførte arbejde, og pointerer eventuelle svagheder eller mulige alternativer, der bør overvejes eller ændres. Den faglige kvalitetssikring kan med fordel foretages løbende i gennem modelopstillingen (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger").

2.3.7 Slutprodukt og afrapportering

Slutproduktet for den rumlige geologiske model består af en rapport og en digital model. Rapportens indhold er beskrevet ovenfor under afsnittet 3.35 "Dokumentation" og i 3.42 "Afrapportering" (Kap. 3). Foruden dette skal rapporten også indeholde et indledende kapitel om formål med og forudsætningerne for at opstille modellen. Der skal altid udarbejdes eksemplarer på pdf-format, men der bør også udarbejdes eksemplarer på papir. Den tekniske dokumentation skal som minimum vedlægges rapporten på digital form. Selve den digitale model vedlægges også som bilag i form af relevante filer og databaser. Sammen med den tekniske dokumentation kan dette ske på CD ROM/DVD.

Modeldatabasen bliver i den kommende tid udviklet, således at den på en hensigtsmæssig måde kan indeholde rumlige geologiske modeller. Når denne udvikling er afsluttet, indlæses den færdige rumlige geologiske model i Modeldatabasen.

2.3.8 Status

I forbindelse med afrapporteringen foretages en status mellem de i projektet involverede parter. 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 en hydrostratigrafisk 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.

2.4 Hydrostratigrafisk model

Den rumlige geologiske model er baseret på geologiske data og information, og har til formål at opnå en rumlig gengivelse af de geologiske enheder og deres strukturelle opbygning. I modsætning hertil fokuseres der i den hydrostratigrafiske model på at beskrive enheder ud fra hydrauliske egenskaber. Formålet med den hydrostratigrafiske model er således at opnå en rumlig gengivelse af hydrostratigrafiske enheder, hvor en hydrostratigrafisk enhed er karakteriseret ved at have ensartede hydrauliske egenskaber. Ofte skelnes der kun mellem aquiferer og aquitarder i den hydrostratigrafiske model, men specielt i forbindelse med detailundersøgelser kan der være behov for en yderligere detaljering, så der eksempelvis differentieres mellem sand og grus inden for et aquifer.

Der er et markant skel mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Den rumlige geologiske model er principielt en model over den grundlæggende geologiske opbygning, og behøver ikke nødvendigvis at være opstillet i hele modelrummet, men kan begrænses til de områder, hvor geologien med rimelig sikkerhed kan modelleres. Den rumlige geologiske model danner grundlag for opstilling af den hydrostratigrafiske model, men da den hydrostratigrafiske model udarbejdes som et input til grundvandsmodellen, er det nødvendigt at denne model er tolket i hele modelrummet.

Da der ikke nødvendigvis er sammenfald med den rumlige geologiske models lag, skal der i princippet opstilles en ny lagserie i den hydrostratigrafiske model. Den rumlige geologiske model vil dog som hovedregel danne udgangspunkt for opstillingen af den hydrostratigrafiske model. Er der udarbejdet en detaljeret rumlig geologisk model, vil den hydrostratigrafiske model normalt indeholde en mere simpel lagserie med færre lag, hvor lag med sammenlignelige hydrauliske egenskaber er slået sammen – uanset geologisk oprindelse. En hydrostratigrafisk enhed kan således indeholde dele 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. I nogle tilfælde kan den hydrostratigrafiske model dog også medføre behov for en yderligere detaljering af den rumlige geologiske model. Dette er aktuelt, hvis den rumlige geologiske model ikke er fyldestgørende, eller hvor der eksempelvis kun er modelleret overordnede kronostratigrafiske enheder, uden at der er skelnet mellem f.eks. sand- og leraflejringer. Her vil det være nødvendigt med en yderligere opdeling af enhederne. Hvis der fra den rumlige geologiske model foreligger et geologisk zoneringsstema (se kap. 3.34 "Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model"), kan dette benyttes ved en underopdeling af de geologiske lag. Modellen bør udarbejdes af samme person, som udarbejder den rumlige geologiske model, men i et samarbejde med grundvandsmodelløren.

I nogle tilfælde udarbejdes den hydrostratigrafiske model uden at der først er blevet udarbejdet en rumlig geologisk model. Dette kan ikke anbefales, da det bl.a. 1) risikeres at de geologiske informationer, der kan udtrækkes af forståelsen af den geologiske dannelseshistorie samt dannelsesprocesser og -miljøer, ikke bliver udnyttet i den hydrostratigrafiske model, og da 2) det bliver svært at udføre en senere opdatering af den hydrostratigrafiske model, hvis den geologiske forståelse af området øges i forbindelse med eksempelvis nyindsamling af data.

2.4.1 Datagrundlag

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

- Hydrologiske data
- Boredata
- Geofysiske data

Ved modelleringen af de hydrostratigrafiske enheders rumlige udbredelse sammenstilles boredata og geofysiske data med de hydrologiske data, der kan give information om hydrauliske sammenhænge. Disse data er primært:

- Pumpedata og pejledata
- Grundvandskemiske data

Datatyperne er beskrevet under 3.9 "Hydrologiske data" og 3.10 "Kemiske data".

2.4.2 Konstruktion af modelskelet

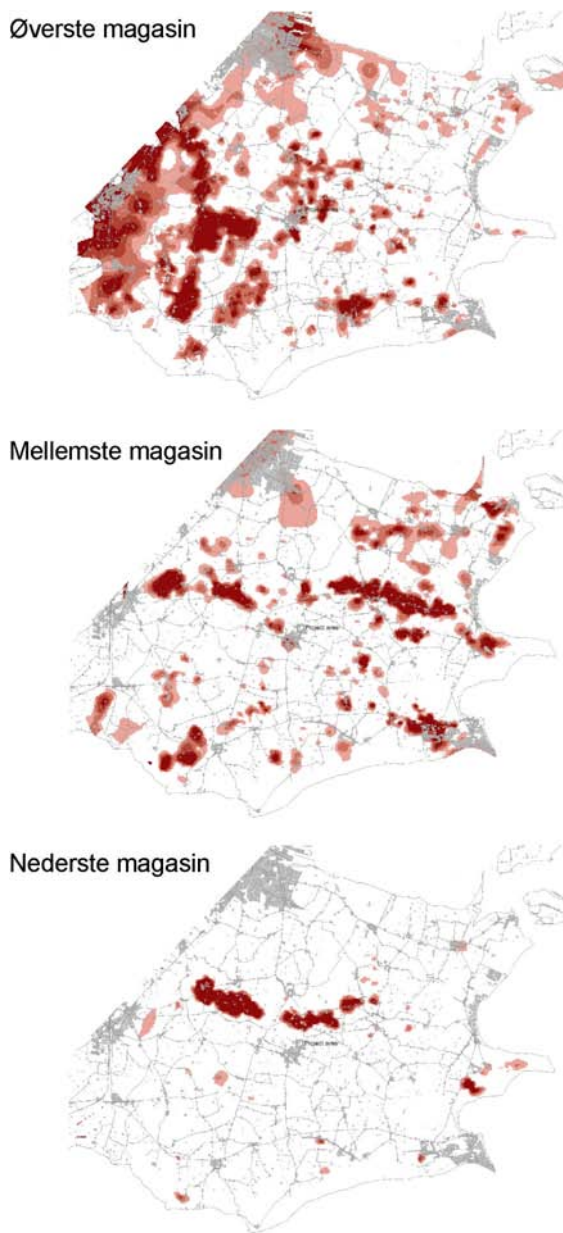
Den hydrostratigrafiske model opstilles bedst i samme tolkningsmiljø som den rumlige geologiske model. Herved kan den rumlige geologiske model direkte benyttes som udgangspunkt. Den hydrostratigrafiske models konstruktion er dermed på forhånd ofte allerede defineret – se ovenfor under beskrivelsen af den rumlige geologiske model.

Der vil dog alligevel være flere ting at forholde sig til, inden modelleringen kan begynde. 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 pixelmodel eller omvendt. Der kan i forhold til grundvandsmodellen i nogle tilfælde være fordele ved at skifte til en pixelmodel (se kap. 3.16 "Pixelmodeller"). Det kan også være relevant at ændre i prioritering og visning af de forskellige datasæt, da det er forskellige

datatyper, der vægtes i de to modeltyper. Muligvis skal der også indlægges nye datasæt i modellen. Endvidere kan det være nødvendigt at udføre interpolationer af yderligere datasæt i forhold til, hvad der blev gjort i forbindelse med den rumlige geologiske modelopstilling.

Normalt vil det eksisterende profilnetværk kunne anvendes, men der kan eventuelt være behov for at udbygge dette netværk, for at få indarbejdet de hydrostratigrafiske enheder i hele modelrummet. Der vil desuden skulle tages stilling til projektionsafstande for eventuelle nye datatyper i modellen.

Det er vigtigt, at der fra starten tages overordnede beslutninger omkring den hydrostratigrafiske model; specielt den nødvendige vertikale detaljering af modellen. Er de hydrostratigrafiske enheder tolket som gennemgående lag i hele modelområdet, vil den vertikale opdeling som hovedregel følge denne lagdeling. Ofte vil der dog være tale om, at nogle hydrostratigrafiske enheder 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 der skal medtages i modellen for en korrekt rumlig repræsentation af disse sandlegemer. 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 (se Figur 13). I nogle områder vil der således kunne



Figur 13 Eksempel på forekomst af spredte magasiner i en hydrostratigrafisk model ved Juelsminde. Modelområdet er ca. 20 × 20 km stort. Orbicon/Vejle Amt.

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 kap. 3.39 "Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel"). Denne nedre grænse er typisk defineret ved et impermeabelt lag dybt i lagserien (se kap. 3.18 "Modelafgrænsning").

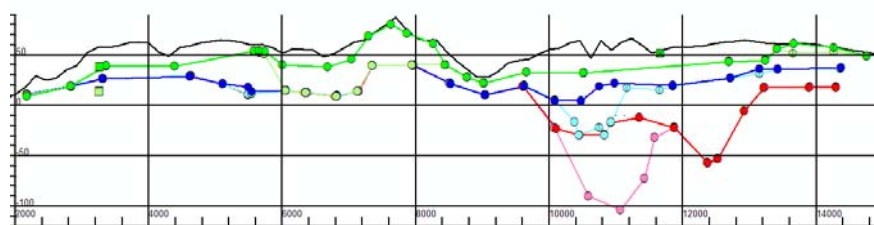
Det er vigtigt, at opstillingen af den hydrostratigrafiske model sker i samarbejde med grundvandsmodelløren og i forhold til de mål, der er beskrevet i projektbeskrivelsen.

2.4.3 Hydrostratigrafisk modellering

Den hydrostratigrafiske modellering foregår ved, som ovenfor nævnt, at der foretages en rumlig afgrænsning af de hydrostratigrafiske enheder. På baggrund af en integreret vurdering og tolkning af datagrundlaget foretages en korrelation af disse strømningsmæssigt sammenhængende enheder.

Selve modelleringen foregår grundlæggende ved anvendelse af samme værktøjer som beskrevet ovenfor under den rumlige geologiske model. Når det drejer sig om lagmodeller (se 3.15 "Lagmodel") benyttes typisk punktdigitalisering til oprettelse af lag (se kap. 3.25 "Punkttolkning", 3.24 "Digital tolkning", 3.26 "Profiltolkning", 3.27 "Horisontaltolkning" m.fl.). Til forskel fra den rumlige geologiske model er en tolkning i hele modelrummet påkrævet, hvorfor det kan være nødvendigt at foretage tolkninger, der ikke altid er velunderbyggede. Som konsekvens heraf, vil usikkerheden på den hydrostratigrafiske model ofte være størst i de områder, hvor den rumlige geologiske model ikke blev tolket, enten på grund af utilstrækkeligt geologisk datagrundlag, eller på grund af tilstedeværelsen af komplekse geologiske forhold.

I praksis arbejdes der i lagmodellen med lagflader i hele modelrummet, som definerer top/bund af de hydrostratigrafiske enheder. I områder, hvor en hydrostratigrafisk enhed ikke findes, kan top og bund af laget slås sammen. Dette er illustreret i Figur 14, hvor top og bund af magasinerne er sammenfaldende, der hvor der ikke er magasiner. En alternativ metode er anvendelsen af hydrostratigrafiske zoneringsstemaer (se kap. 3.34 "Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model"). Her anvendes polygoner/udbredelsesfiler til afgrænsning af den horisontale udbredelse af de legemer, der ønskes indlagt. Udenfor disse polygoner er det den omkringliggende hydrostratigrafiske enhed, der er gældende, og lagtykkelsen udenfor polygonerne er således ikke betydende for repræsentationen af de hydrostratigrafiske enheder. Hvilken metode der anvendes, vil ofte være bestemt af det anvendte tolkningsprogram og de værktøjer der er tilgængelige for den efterfølgende overførelse af



Figur 14 Eksempel på profil med tolkningspunkter, der stedvist viser sammenfaldende lagflader. Pink og rød definerer bund og top af den nederste aquifer, lyseblå og blå definerer bund og top af den mellemste aquifer, mens lysegrøn og grøn definerer bund og top af den øverste aquifer. Tolkningspunkterne er placeret oven i hinanden, hvor aquiferen tolkes til ikke at eksistere.

den hydrostratigrafiske model til grundvandsmodellen. Processen med at korrigere lagfladerne kan foretages maskinelt når lagfladerne er interpolerede til grids. Se nedenfor under kap. 2.4.4 "Interpolation af tolkede flader og lag".

2.4.4 Interpolation af tolkede flader og lag

Hvis den hydrostratigrafiske model er udarbejdet som en lagmodel, skal den udmunde i et sæt gridflader, som tilsammen definerer lagfølgen. Hvis fladerne som udgangspunkt bliver oprettet ved hjælp af tolkningspunkter, skal disse omsættes til grids ved hjælp af interpolation (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag").

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. Grundvandsmodelløren bør inddrages i valg af cellestørrelsen. 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 understøttes af data.

Som interpolationsalgoritme anvendes ofte enten Inverse Distance, som i udgangspunktet er tro mod datapunkterne, eller Kriging, som ud fra en statistisk analyse kan optimere interpolationen, hvis der kan beskrives en bestemt fordeling af datapunkterne (fladetolkningspunkterne). Ved de fleste interpolationsalgoritmer skal der vælges en søgeradius. 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 checkes, at der er overensstemmelse mellem centrale borer og det færdige grid, ligesom det checkes, om der er irregulære former omkring profilkryds og omkring enkelte datapunkter. Det checkes også om profillinierne kommer til udtryk i former som dale eller rygge. Denne kontrol kan med fordel foretages ved hjælp af 3D-visualisering (se kap. 3.30 "3D-visualisering og -tolkning").

Da den hydrostratigrafiske lagmodel normalt 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, findes i forskellige programmer. Funktioner til at tilpasse grids, så disse bliver sammenfaldende eller nært sammenfaldende, er også nyttige.

2.4.5 Usikkerhedsvurderinger

Ligesom der blev udarbejdet usikkerhedsvurderinger for den rumlige geologiske model, skal der udføres usikkerhedsvurderinger for den hydrostratigrafiske model. Baggrunden og proceduren for dette er nøjere beskrevet ovenfor under den rumlige geologiske model. Dette gælder også med hensyn til dokumentation, visualisering og formidling af resultatet.

Da den hydrostratigrafiske model bl.a. bygger på de rumlige geologiske tolkninger og i høj grad anvender disse som datagrundlag, vil usikkerhederne herfra til dels blive viderebragt. Under den hydrostratigrafiske modellering skal usikkerhederne fra den rumlige geologiske model tages i betragtning i lighed med, at usikkerheder på øvrige data og tolkninger vurderes. Nogle tolkninger fra den rumlige geologiske model kan f.eks. findes irrelevante at benytte som grundlag ved den hydrostratigrafiske modellering, og hvis netop disse tolkninger har medført en usikkerhed i den rumlige geolo-

giske model, betyder det således ikke, at usikkerheden nødvendigvis vil blive videreført til den hydrostratigrafiske model.

Da den hydrostratigrafiske model skal tolkes i hele modelrummet, vil det typisk være nødvendigt at foretage en tolkning af de hydrostratigrafiske enheder i områder, hvor der ikke blev foretaget en tolkning af den rumlige geologiske model. I disse områder vil der normalt være store usikkerheder i den hydrostratigrafiske model.

Selvom der i de områder, der dækkes af både den rumlige geologiske model og af den hydrostratigrafiske model, ofte vil være en vis overensstemmelse mellem modeltypernes samlede usikkerheder, bør der altid udarbejdes en selvstændig usikkerhedsvurdering af den hydrostratigrafiske model.

I tilfælde hvor datagrundlaget er tyndt, og hvor der er tvivl om den rumlige sammenhæng af lagene i den hydrostratigrafiske model, kan det være aktuelt at udarbejde alternative hydrostratigrafiske modeller. Usikkerheden kan på denne måde leveres videre til grundvandsmodellen, og usikkerhedens indflydelse på grundvandsmodellens resultater kan derved blive undersøgt.

2.4.6 Dokumentation

Dokumentation foretages, som for den rumlige geologiske models vedkommende, af flere forskellige årsager (se kap. 3.35 "Dokumentation"). Foruden en overordnet dokumentation til brug ved projektstyringen, foretages en teknisk dokumentation til brug ved kvalitetssikring eller evt. overdragelse og videreudvikling af modellen.

Usikkerhedsvurderingerne, som er et centralt element i den hydrostratigrafiske model (se ovenfor), indgår også som en central del af dokumentationen. Foruden usikkerhedsvurderingerne skal der f.eks. udarbejdes følgende:

- Beskrivelse og vurdering af datasæt – begrundelse for anvendelse/eksklusion
- Beskrivelse af valg i forbindelse med modelkonstruktion – eventuelle ændringer fra den rumlige geologiske models konstruktion
- Beskrivelse af den valgte hydrostratigrafiske opbygning
- Beskrivelser af baggrunden for alle antagelser og tolkninger, der er indarbejdet i modellen
- Beskrivelser af anvendt baggrundsviden fra eksisterende tolkninger – primært fra den rumlige geologiske model
- Beskrivelse af baggrunden for valg af eventuelle zoneringsstemaer
- Benyttede interpolationsrutiner og indstillinger for disse
- Den forløbne arbejdsproces

Generelt vil der være behov for en relativ stor detaljeringsgrad af dokumentationen, da modellerne bør kvalitetssikres og normalt skal benyttes i videre arbejder. 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, hvori de tekniske detaljer noteres gennem hele projektet.

Ovenstående dokumentation udgør den grundlæggende dokumentation for det udførte modelarbejde. Modellen skal desuden afrapporteres i en mere formidlende form, hvori der gives et samlet overblik over modelleringsprocessen og dens resultater. Det vil sige et resumé af ovennævnte punkter og usikkerhedsvurderingerne, 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
- Hydrostratigrafiske zoneringsmakort
- Overfladekort og tykkelseskort over de modellerede enheder
- 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

2.4.7 Kvalitetssikring

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

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 hydrogeolog (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger"). Det bør også kontrolleres, at de tolkede flader dækker hele området, og at lagene i øvrigt er udarbejdet, så strømningsmodellen kan opstilles. Og som ovenfor beskrevet under afsnittet om interpolation af tolkede flader og lag, skal der udføres check af fladerne; især om der er overensstemmelse mellem datapunkter og flader, check af profilkryds, og sikring af, at fladerne ikke krydser hinanden. For mange modellers vedkommende er det særligt vigtigt at checke, at der stadig er overensstemmelse mellem boringernes filterkoter og de tolkede aquiferer.

2.4.8 Slutprodukt og afrapportering

Slutproduktet for den hydrostratigrafiske model består på samme måde som den rumlige geologiske model af en rapport og en digital model. Rapportens indhold er beskrevet ovenfor under afsnittet 3.35 "Dokumentation" og i 3.42 "Afrapportering" (Kap. 3). Foruden dette skal rapporten også indeholde et indledende kapitel om formål med, og forudsætningerne for, at opstille modellen. Der skal altid udarbejdes eksemplarer på pdf-format, men der bør også udarbejdes eksemplarer på papir. Den tekniske dokumentation skal som minimum vedlægges rapporten på digital form. Selve den digitale model vedlægges også som bilag i form af relevante filer og databaser. Sammen med den tekniske dokumentation kan dette ske på CD ROM/DVD.

Modellen uploades til Modeldatabasen (se kap. 3.41 "Eksport af modeller til modeldatabasen").

2.4.9 Status

I forbindelse med afrapporteringen foretages en status med deltagelse af de i projektet involverede parter. 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.

2.5 Referenceliste

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.

3. Værktøjskasse

3.1 Seismik

3.1.1 Generel beskrivelse

Den seismiske metode anvendes primært ved olieeftersforskning på større dybder end 500 m. Men i de senere år er den også blevet udbredt i forbindelse med grundvandskortlægning. Til dette brug 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 udlagte geofoner. Lydkilden er enten sprængninger af dynamit eller store vibratorer monteret på køretøjer. Modtagerne – geofoner – udlægges manuelt eller slæbes i en lang række efter et køretøj /1/. Ved grundvandskortlægning optages data i 2D langs profillinier, 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 tilfælde tolkes lithologi i dele af de seismiske profiler.

Den seismiske metode er 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.

3.1.2 Data

De færdigprocesserede data findes typisk i SegY-format og i billedformat. GERDA kan indeholde seismiske data.

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 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 /2/. Eksempelvis kan datakvaliteten blive ringe i områder med en tyk umættet zone bestående af sand eller grus. Desuden har dataprocesseringen stor betydning for de afrapporterede data.

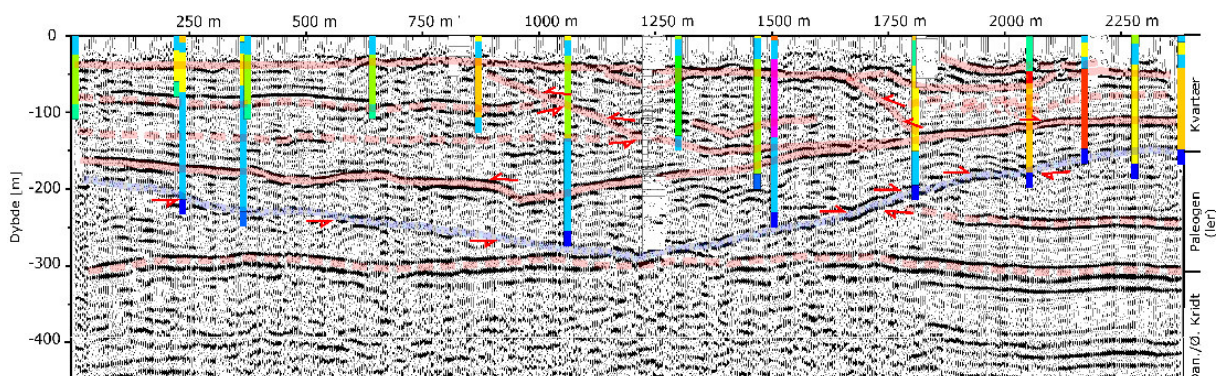
Metoden egner sig ikke til kortlægning af de terrænnære jordlag. Kun i ekstraordinære tilfælde med meget gode opmålingsforhold og med et optimeret måleudstyrssætup, kan det lade sig gøre at få brugbare data på dybder mindre end 20-30 m. Ved dataprocesseringen gennemgår de rå data en lang behandlingsproces, 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 geofysikerne i arbejdet.

3.1.3 Anvendelse i den geologiske model

Med den seismiske metode opnås et detaljeret billede af jordens strukturelle opbygning. Herved fås informationer om varierende typer af laggrænser. For at laggrænserne skal kunne opløses, skal der være kontraster i lagenes lithologiske egenskaber (primært porøsitet). Lagenes strukturelle opbygning kan give informationer om aflejningsmiljøet og dermed også indirekte om lithologiske forhold. Sådanne forhold kan ses f.eks. i forskellige former for laggrænser og i forskellige refleksionsmønstre (se bl.a. /3/). 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 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) i borehullerne, således at forholdene mellem tid og dybde kan præciseres. Endvidere kan TEM-data med fordel anvendes i kombination med seismikken /3/. TEM-data giver vigtige indikationer om både lithologi og dybder.

Seismikken præsenteres normalt med en vertikal tidsskala. Da jordlagenes lithologi og seismiske hastigheder normalt ikke kendes i tilstrækkelig detalje, kan det kun i specielle tilfælde lade sig gøre at konvertere den vertikale skala til en dybdeskala. Nogle af de danske jordartstypers hastigheder er undersøgt i /3/. Typisk er hastighederne 1700-1900 m/s, men for morænelers vedkommende er hastigheden 2000-2300 m/s. Hastighederne for kalk og kridt er endnu højere. For at kunne sammenligne med andre datatyper, er det nødvendigt at konvertere tiden med en 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.



Figur 15 Eksempel på tolket seismisk sektion. Modificeret fra /3/

I de tilgængelige geologiske tolkningsprogrammer er der ikke mulighed for direkte at integrere seismisk dataprocessering. Seismikken behandles og visualiseres p.t. 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 kap. 3.30 "3D visualisering og tolkning").

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. Det anbefales dog at begrænse profilverhøjningen (se kap. 3.22 ”Profilloptegning”).

3.1.4 Opsummering

Fordele ved den seismiske metode:

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

Ulemper ved den seismiske metode:

- Metoden er relativt dyr
- Metoden giver kun få oplysninger om lithologi
- Metoden har begrænsede muligheder for anvendelse i områder med stor umættet zone
- Seismiske data er vanskelige at håndtere i de geologiske tolkningsværktøjer, der anvendes p.t.

3.1.5 Referenceliste

- /1/ 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.
- /2/ Nørmark, E. og Lykke-Andersen, H. 2006: Rapport vedrørende projekt til udredning af den seismiske metodes anvendelighed i grundvandskortlægning. Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- /3/ 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.

3.2 TEM

3.2.1 Generel beskrivelse

TEM-metoden er den mest udbredte metode til kortlægning af grundvandsressourcerne i Danmark. Indtil sidst i 90'erne blev metoden primært benyttet af vandværker og vandforsyninger i deres søgen efter nye egnede kildepladser, men amterne benyttede den også i stigende grad i deres mere generelle vandressourcekortlægninger. Inden for de senere år er anvendelsen af TEM-metoden, bl.a. som et resultat af den nationale grundvandskortlægning, blevet kraftigt intensiveret og foregår nu i store dele af landet. Metoden er desuden gået fra kun at kunne udføres på landjorden som enkeltsonderinger (16 sonderinger/km²), til at blive udført fra luften i mere eller mindre kontinuerte opmålinger (linieafstand 125-250 m) /1/. Dette har også medført en intensiveret anvendelse af metoden.

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 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 højmodstandslag og jordlag tæt under terræn er vanskelige at opløse, og at evnen til at opløse lagserien aftager med dybden.

GeoFysikSamarbejdet har udarbejdet vejledninger til, hvordan TEM-kortlægninger bør gennemføres /2/, /3/. Der er desuden lavet en vejledning for geologisk tolkning af TEM-data /4/.

3.2.2 Data

Dataprocesseringen har, specielt for 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 modelparameterusikkerheden.

En efterfølgende datamodellering (den geofysiske tolkning) foregår ved inversion og resulterer i en lagmodel bestående af modstande og dybder. Inversionsrutinerne er mange og beskrevet i flere rapporter /5/, /6/ - bl.a. Lateral Constrained Inversion (LCI). 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 subjektivitet tilført under tolkningen /4/. På baggrund af a priori-viden kan der f.eks. være brugt bindinger i tolkningen, og a priori-viden kan være anvendt ved

udvælgelse af modellen. Bindinger i tolkningen kan også introduceres ved hjælp af Mutual Constrained Inversion (MCI). Ofte findes der flere ækvivalente modeller, som er meget forskellige, men som tilpasser data lige godt. I sådanne tilfælde spiller udvælgelsen af modellen en særlig rolle.

En væsentlig ting at være opmærksom på ved vurdering af modellerne er, hvor godt data tilpasser den udvalgte model. Et stort dataresidual indikerer en usikker model, hvorimod et lille residual indikerer en mere sikker model.

Ved den geofysiske tolkning kan der som nævnt, f.eks. ved anvendelse af MCI, være inddraget 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 den 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 de mere traditionelle fålagsmodeller bør der udføres mangelagsmodeller som standard. Mangelagsmodeller giver supplerende geologiske informationer som fålagsmodellerne ikke giver. Disse forhold er beskrevet i /7/.

Til behandling af TEM-data benyttes programpakken Workbench udviklet ved Århus Universitet. Både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i GERDA-format og alle data gemmes i GERDA-databasen /10/. Herfra kan data downloades og viderebehandles i Workbenchen og i geologiske tolkningsværktøjer.

3.2.3 Anvendelse i den geologiske model

Modstandsværdier og opløsningsevne

Jordens elektriske modstand er afhængig af lerandel, lertype, porevandets ionindhold, mætningsgrad og formationsmodstand. Det er primært sedimentets lerandel, der udgør basis for den geologiske fortolkning af TEM-data, men de øvrige parametre skal også tages i betragtning ved geologisk tolkning. I /4/ gennemgås typiske målte modstande for danske aflejringstyper.

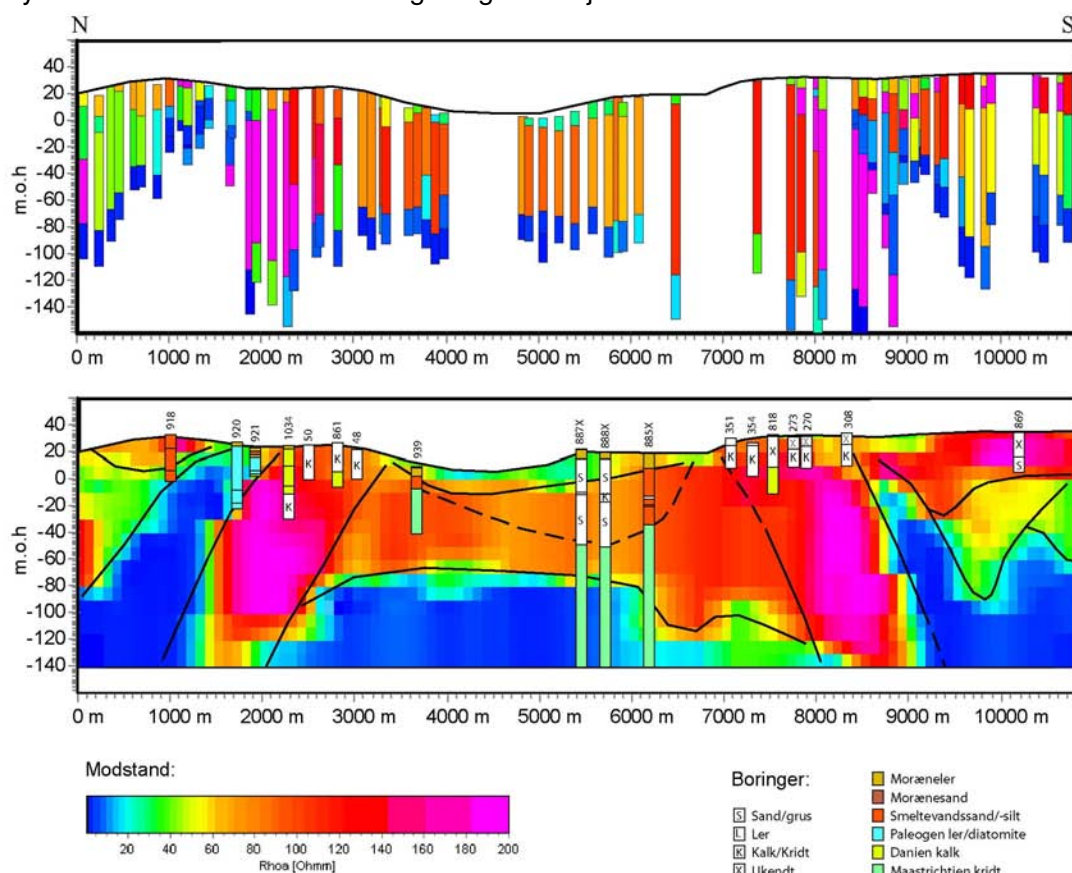
Som tommelfingerregel kan man sige, at et lag kun kan opløses, hvis det er mindst halvt så tykt som dybden til laget. Den vertikale opløsning aftager dermed med dybden. Det kan dog lade sig gøre at opløse væsentligt tyndere lag, hvis de har lave modstande. Foruden den vertikale opløsningsevne tales der også om den horisontale opløsningsevne /4/. Denne aftager også med dybden men er desuden afhængig af antallet af sonderinger udført pr. arealenhed. På grund af begrænsninger i målemetoden har metoden vanskeligt ved at opløse den øverste geologi (10-20 meters dybde).

Datapræsentation og tolkning

TEM-data præsenteres normalt på kort eller profiler. Ved den geologiske modellering anvendes desuden forskellige typer af kortudtræk. Særligt anvendelige kort er koten for den gode leder og

middelmodstandskort. Koden for den gode leder kan udtrækkes på en lang række forskellige måder og bør tilpasses den lokale geologi /4/. Koden 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. Det er tilrådeligt at anvende 10 m koteintervaller – i hvert fald i den øvre del af lagserien.

Ved interpolation af middelmodstande og af koden for den gode leder, kan det anbefales at benytte enten *kriging* eller *inverse distance to a power* (se kap. 3.20 "Interpolation af data"). En søgeradius på 500 m og en cellestørrelse på 100 m kan anbefales som startværdier /4/. På grund af et relativt lille responsrum, bør disse værdier principielt være mindre, når man interpolerer data højt i lagserien. Værdierne bør tilpasses de lokale geologiske forhold, ligesom variogramanalyse med fordel kan benyttes i områder med ensartede geologiske miljøer.



Figur 16: Geologisk profil med TEM-stolper øverst og skæring af middelmodstandsgrids nederst. Profilet gennemskærer lagserien over Mors-saltstrukturen. Modificeret efter /8/.

På profiler kan TEM-data grundlæggende vises som enkeltstående stolper med farver repræsenterende de enkelte lag i modellerne (se Figur 16). Det anbefales, at der ved visningen af sonderingerne knyttes en visualisering af data- og modelusikkerheden. Ved profilotegning kan en projektionsafstand på 250 m anbefales (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande"). Hver TEM-sondering er i princippet en punktmåling, men man skal ved den geologiske fortolkning være opmærksom på at målingen afspejler et stort responsrum i dybden og et mindre i lagseriens øvre dele.

En anden metode til præsentation af data på profiler er ved skæring af middelmodstandsgrids /4/. Herved vises interpolerede værdier langs profilinien og problemet med projektionsafstand fra TEM-

sondering til tolkningsprofil imødekommes herved (se Figur 16). En stak af middelmodstandsgrids kan opfattes som et pseudo-3D grid, men data kan også reelt interpoleres i 3 dimensioner (se også kap. 3.20 "Interpolation af data"), og det bliver herefter muligt i 3D-tolkningsprogrammer at vise vilkårlige både horisontale og vertikale snit gennem griddet (se kap. 3.30 "3D-visualisering og tolkning").

Ved visning af TEM-data på såvel profiler og kort anvendes som udgangspunkt en fast, primær modstandsskala. Modstandsskalaen kan ses/hentes på GeoFysikSamarbejdets hjemmeside /9/. Denne skala er kontinuert med et stort antal intervaller. Ofte kan det dog være en fordel at fremhæve strukturer ved at benytte få intervaller, men her findes ingen standard. Der findes også en standard-koteskala på hjemmesiden, men da denne skala spænder fra -300 m til +100 m, anbefales denne 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 beskrevet ovenfor kan der være fordele ved at udarbejde kort med både diskrete og kontinuerte farveskalaer.

3.2.4 Referenceliste

- /1/ Sørensen, K.I. and Auken, E., 2004: SkyTEM - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*. 35, pp.191-199.
- /2/ GeoFysikSamarbejdet 2002: Vejledning i udførelse af TEM-målinger.
- /3/ GeoFysikSamarbejdet 2007: Vejledning og kravspecifikation for SkyTEM-målinger, processeering og tolkning.
- /4/ GeoFysikSamarbejdet 2003: Anvendelse af TEM-metoden ved geologisk kortlægning.
- /5/ GeoFysikSamarbejdet 2004: Lateralt sambunden tolkning af transiente elektromagnetiske data.
- /6/ GeoFysikSamarbejdet 2007: Guide to processing and inversion of SkyTEM data.
- /7/ GeoFysikSamarbejdet 2007: Mangelagstolkning af TEM data - test og sammenligninger.
- /8/ Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., Auken, E., Lykke-Andersen, H. and Sørensen, K. 2005: Contributions to the geological mapping of Mors, Denmark – a study based on a large-scale TEM survey. *Bull. Geol. Soc. Denm.* Vol. 52, pp. 53-75.
- /9/ www.geofysiksamarbejdet.au.dk
- /10/ <http://gerda.geus.dk>

3.3 PACES og PACEP

3.3.1 Generel beskrivelse



Figur 17: Foto fra testlinie ved Skjød.
Foto: Verner Søndergaard.

PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding) og PACEP (Pulled Array Continuous Electrical Profiling) data omfatter information indsamlet med den slæbegeoelektriske metode, som er 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 ofte i vurdering af grundvandets sårbarhed. Metoden er udviklet på Aarhus Universitet /1/.

Den slæbegeoelektriske metode benytter sig af jævnstrøm (DC-metode), og er ikke i samme grad som de elektromagnetiske metoder følsom overfor kulturelle støjkluder. Metodens styrke er, at der kan indsamles store mængder tætliggende data på kort tid - specielt i det åbne land. Til gengæld kræver udstyret relativt åbne og fremkommelige arealer, hvilket kan være en begrænsning i anvendelsesmulighederne. Data indsamles langs linier 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, hvorfor metoden omtales som PACES. Det skal bemærkes, at PACES også findes i en udgave med kortere afstand mellem elektroderne.

Der foreligger vejledninger fra GeoFysikSamarbejdet som beskriver udførelse af PACES i felten /2/, samt anvendelse af den mest anvendte processerings- og tolkningssoftware og indberetning til GERDA-databasen /3/ og /4/.

3.3.2 Data

Dataindsamlingen foregår ved, at et langt elektrodekabel slæbes henover jorden. Dette kabel er forsynet med to strømelektroder og 11 potentialelektroder. Strømmen udsendes gennem de to strømelektroder, og spændingsforskellen måles over to potentialelektroder. Mens der køres, registrerer systemet spændingsforskellen for hver 1,6 meter og i 8 forskellige målekombinationer. De samhørende værdier for strømstyrke og spænding optages løbende og omsættes til modstandsvær-

dier langs profilinien. Jo større afstand mellem elektroderne, jo større og dybereliggende jordvolumen afspejler målingerne. Man kan ikke præcist angive metodens indtrængningsdybde, da den er stærkt afhængig af de specifikke modstande i jorden. Under danske forhold opnås maksimale indtrængningsdybder på mellem 15 og 30 meter.

Nyere data indsamlet med PACES-metoden er som hovedregel indberettet til GERDA-databasen og kan downloades herfra /5/. 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 specielt ældre 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 middelmotstande og såkaldte isoohmmeter kort (konturerede modstandskort for de enkelte elektrodeafstande).

Til inversionskørsler af de filtrerede PACES-data benyttes i dag programpakken Workbench udviklet ved Århus Universitet. Herfra kan både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i PCGerda-format, og alle data uploades til GERDA-databasen. Modellerne, som er uploadet til GERDA-databasen, kan indlæses som tolkningsgrundlag i geologiske tolkningsprogrammer.

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 ($R_{\rho a}$), 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. Anbefalede filterparametre mm. ved brug af GeoFysikSamarbejdets processeringssoftware fremgår af /2/.

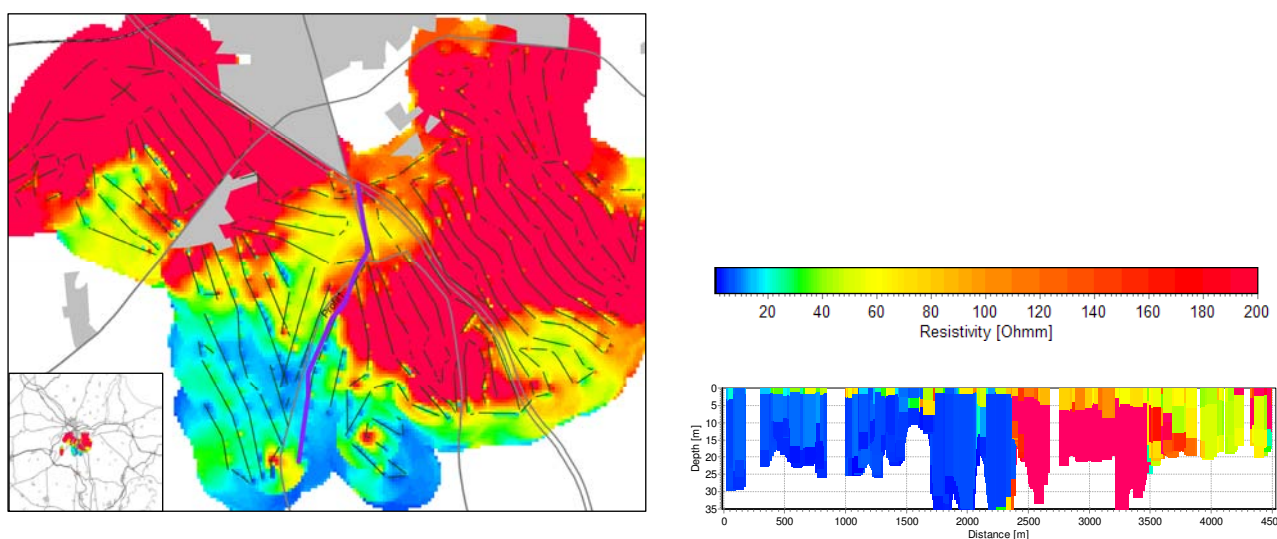
3.3.3 Anvendelsen i den geologiske model

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. Ved LCI (Lateral Constrained Inversion) bindes 1D modellerne sammen indbyrdes med svage bånd. Dette stabiliserer inversionen og giver en vis ensartethed fra den ene model til den næste.

PACES modeller er traditionelt tolket med 3-4 lag. Såkaldt "mangelagstolkning" anvendes i stigende grad og giver et mere nuanceret modstandsbillede af lagserien. Ved fortolkning af de geofysiske resultater er det vigtigt at være opmærksom på, at forskellige modeller ofte vil kunne tilpasse det samme datasæt (ækvivalens). Det er muligt at inddrage boringsinformation (a priori-viden) ved at bruge bindinger i den geofysiske tolkning. Som hovedregel er det dog tilstræbt at udvælge de mest objektive modeller. I forhold til den geologiske fortolkning 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 lerminerale, lertype, vandindhold og porevandets ledningsevne. Rammerne for forskellige sedimenters modstande er meget vide, hvorfor den geologiske fortolkning af modstandsmodeller skal foretages med omtanke. Typiske modstande for danske sedimenter målt med geoelektriske metoder fremgår bl.a. af /6/.

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 18). Om interpolation af geofysiske data – (se kap. 3.20 "Interpolation af data"). Endvidere har GeoFysik-Samarbejdet udarbejdet en modstandsskala specielt beregnet for DC-metoder /7/.



Figur 18: Fladekortet (10 x 7 km) viser middelmodstanden i dybdeintervallet 0-5 m under terræn baseret på Paces-målinger. /8/, /9/.

Profil på middelmodstandskortet ses her som tværsnit (samme farveskala). Hver søjle repræsenterer en tolket 1D-3lags-model for hvert sonderingspunkt, som ligger inden for en søgeafstand af 100m fra profilinien.

I det geologiske tolkningsværktøj kan PACES-modellerne visualiseres på tolkningsprofiler som enkeltstående stave med farve, der repræsenterer modstanden i de enkelte modellag. Der kan f.eks. også indlæses en række koteintervalkort i tolkningsværktøjet. Disse kan med fordel anvendes indirekte i tolkningsarbejdet, idet kort af denne type vil give et overblik – vertikalt såvel som horisontalt – over variationen i den overfladenære geologi.

Den slæbegeoelektriske metode giver relativt detaljeret information om både strukturelle og lithologiske forhold i de øverste jordlag. Ofte er der ikke tydelig korrelation mellem data på de indsamlede målelinier, og det er vanskeligt at opbygge en rumlig geologisk model udelukkende på baggrund heraf. I områder med homogen geologi eller tætliggende målelinier er det dog muligt at anvende data direkte i den rumlige geologiske model. For at undgå store projektionsafstande (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande") med deraf følgende fejltolkninger, bør tolkningsprofilerne

placeres, så de er sammenfaldende med PACES-linier. En anden mulighed er at tolke i et 3D-miljø (se kap. 3.30 "3D-visualisering og tolkning")

3.3.4 Referenceliste

- /1/ Sørensen, K., 1996: Pulled array continuous electrical sounding. First Break, 14, pp. 85-90.
- /2/ GeoFysikSamarbejdet, januar 2005: Vejledning i udførelse af PACES målinger.
- /3/ GeoFysikSamarbejdet, januar 2005: Opsætning i processerings og tolknings software pakken PACES/SIP.
- /4/ GeoFysikSamarbejdet, september 2003: Indberetning af data til GERDA.
- /5/ <http://gerda.geus.dk>
- /6/ Skov- og Naturstyrelsen 1987: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie 5. ISBN 87-503-6531-2
- /7/ <http://www.geofysiksamarbejdet.au.dk>
- /8/ Dansk Geofysik, 1999: Geofysisk kortlægning i området sydvest for Randers. Slæbegeoelektrisk og transient elektromagnetisk kortlægning. Udarbejdet for Randers Kommunale Værker, juli 1999
- /9/ Geologisk Institut, Geofysisk afdeling, Aarhus Universitet, 2003: Tolkning af 3 og 8-kanals slæbegeoelektriske data. Udarbejdet for Århus Amt, august 2003

3.4 MEP og DC-data

3.4.1 Generel beskrivelse

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 potentialelektroder. Den målte spændingsforskel omregnes til en elektrisk modstand. En beskrivelse af metoderne findes bl.a. i /1/. 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), som 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 til detailkortlægning af dæklag over grundvandsmagasiner samt kortlægning af de øvre dele af grundvandsmagasiner. MEP har også fundet anvendelse i forureningsundersøgelser og geotekniske kortlægninger.

MEP, der er en jævnstrømsmetode (DC), er relativ robust overfor menneskeskabte støjkluder. Metoden 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 kap. 3.3 "PACES og PACEP") 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, hvor denne ikke kan anvendes på grund af begrænsninger i tilgængeligheden.

I grundvandssammenhæng er anvendelsen af traditionelle Schlumberger-sonderinger og Wenner-profilering i dag begrænset. Ældre DC-kortlægninger 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 /2/, anvendelse af den mest anvendte processerings- og tolkningssoftware /3/, samt indberetning til GERDA /4/.

3.4.2 Data

MEP-data indsamles ved hjælp af jordspyd, der forbindes via et kabel til et måleinstrument. Måleinstrumentet, i kombination med et computerprogram, muliggør, at der kan måles på forskellige kombinationer af spyd. Traditionelt har der været anvendt Wenner konfigurationer med elektrodeafstande på mellem 5 og 120 meter. Jo større afstand mellem elektroderne, jo større og dybereliggende jordvolumen afspejler målingerne. I dag anvendes i stor udstrækning 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-databasen og kan downloades herfra /5/. Det er muligt at indberette geofysiske MEP-modeller både som 1D- og 2D-tolkninger i det omfang begge tolkningstyper er gennemført (se Figur 19). I de ældste MEP-kortlægninger er tolkningen udelukkende udført som 2D.

Til inversionskørsler af de processerede MEP-data benyttes i dag brugerfladen i CVES-modulet i programpakken Workbench, udviklet på Århus Universitet. Herfra kan både rådata og de geofysiske tolkninger gemmes i GERDA-format og alle data uploades til GERDA. Modeller i GERDA format kan herefter indlæses i geologiske tolkningsprogrammer.

Kvaliteten af rådata afhænger bl.a. af kontakten mellem jordspydene 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 GeoFysik-Samarbejdet anbefaler. Fejlbehæftede datapunkter fjernes også ved dataprocesseringen. En samlet reduktion af datapunkter gennem feltarbejde og processering på max. 10 % anses for acceptabel /2/.

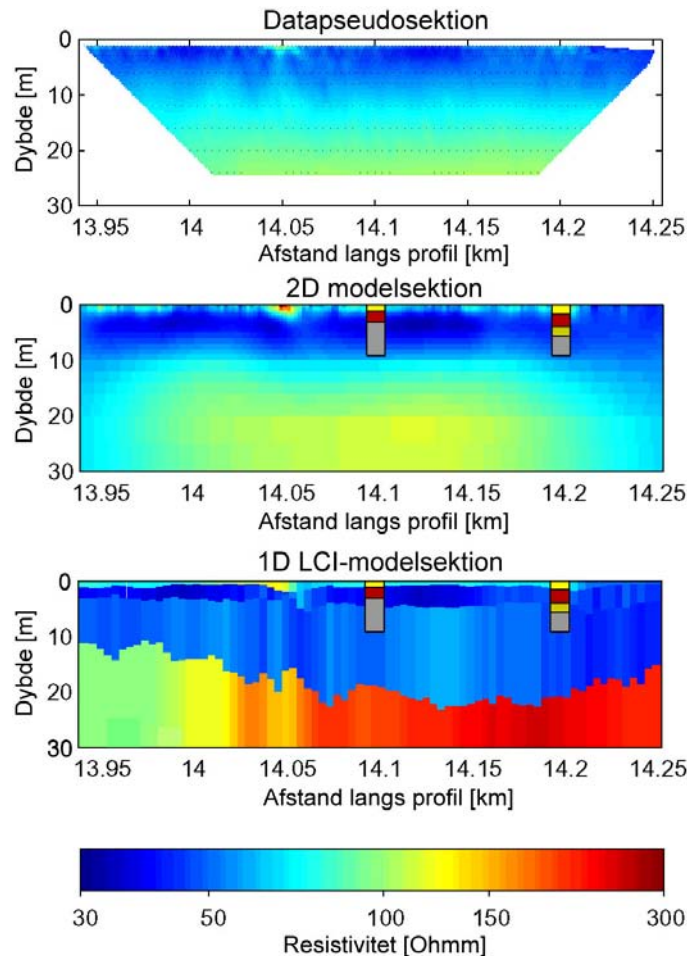
Man kan ikke præcist angive metodens indtrængningsdybde, da den er stærkt afhængig af de specifikke modstande i jorden. Med maksimale spydafstande på 120 meter opnås erfaringsmæssigt indtrængningsdybder på mellem 40 og 60 meter.

3.4.3 Anvendelsen i den geologiske model

Den geofysiske tolkning af et MEP-datasæt kan foretages med forskellige metoder (se Figur 19). I mange tilfælde er der foretaget en 2-dimensional tolkning af hele profilet, hvilket giver en "blød" modstandsmodel /6/. Der foretages ikke opdeling i sonderinger ved denne tolkningstype. Alternativt, eller som supplement, foretages en opsplitting i 1D-sonderinger langs profilet, som herefter inverteres /3/. Inversionen udføres ofte med LCI metoden (se kap. 3.3 "PACES og PACEP").

I geologiske modelværktøjer er det muligt at indlæse modeller fra både 1D- og 2D-tolkningsmetoden. Ved geologisk fortolkning af MEP og anden DC-geoelektrik er det vigtigt at være opmærksom på, at forskellige modeller ofte vil kunne tilpasse det samme datasæt (ækvivalens). Det er muligt at inddrage bóringsinformation (a priori-viden) ved at bruge bindinger i den geofysiske tolkning, men som hovedregel skal det tilstræbes at vælge den mest objektive model. I forhold til den geologiske fortolkning er det vigtigt at være opmærksom på kriterierne for den valgte model, og den usikkerhed der ligger i tolkningen. Tilpasningen af tolkningen kan aflæses af det såkaldte residual for en række modelparametre. Residualet 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 fortolkes, afhænger af andelen af lerminerale, lertype, vandindhold og porevandets ledningsevne. Rammerne for forskellige sedimenter modstande er meget vide, hvorfor den geologiske fortolkning af modstandsmodeller skal foretages med omtanke. Typiske modstande for danske sedimenter målt med geoelektriske metoder fremgår bl.a. af /1/.



Figur 19: Eksempel på MEP-profil, hvor data er vist som datapseudosektion og tolket med henholdsvis 2D tolkning og 1D LCI tolkning. Modificeret efter /7/.

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 de geologiske tolkningsværktøjer 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 der foreligge en række fladekort f.eks. konturerede fladekort med modstande i fokusdybder for de forskellige elektrodeafstande og/eller middelmstande i koteintervaller m.m. Til fladekort af denne type anvendes forskellige kontureringsparametre (se kap. 3.20 "Interpolation af data"). GeoFysikSamarbejdet har udarbejdet en modstandsskala specielt beregnet for DC-metoder.

Der kan desuden være gamle Wenner-profileringsdata og Schlumberger sonderinger. Disse data vil oftest ikke være kotesat. Hvor disse data er indsamlet i forbindelse med råstofkortlægninger, skal man være opmærksom på om disse data ligger i graveområder eller tidligere graveområder, da det jordvolumen, som data repræsenterer så sandsynligvis er gravet bort.

3.4.4 Referenceliste

- /1/ Skov- og Naturstyrelsen 1987. Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie 5. ISBN 87-503-6531-2
- /2/ GeoFysikSamarbejdet, maj 2004: Vejledning og kravspecifikation for MEP-målinger.
- /3/ GeoFysikSamarbejdet, februar 2005: Processering og tolkning af MEP-data målt med gradient-array konfigurationer.
- /4/ GeoFysikSamarbejdet, september 2003: Indberetning af data til GERDA.
- /5/ <http://gerda.geus.dk>
- /6/ Loke, M. H. og Dahlin, T. 2002: A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics Vol. 49, pp. 149-162.
- /7/ 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.

3.5 Geofysiske borehulslogs

3.5.1 Generel beskrivelse

Geofysiske borehulslogs omfatter et meget vidt spænd af geofysiske målinger udført i borehuller. Metoden anvendes til at give information om lithologiske, fysiske og/eller hydrogeologiske egenskaber i den enkelte borings umiddelbare nærhed eller information om boringens tekniske tilstand. Flere logs i et område kan anvendes til at opstille en log-stratigrafi.

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 lithologi 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 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 stål-rør. Til gengæld er borehullet fyldt med formationsvæske, hvorfor der også kan måles på væskens fysiske og kemiske egenskaber, lige som 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.

I Tabel 1 ses en kort gennemgang af egenskaber og anvendelse for en række af de mest almindelige logtyper.

Tabel 1: Forskellige logtypers egenskaber og anvendelse.

Logtype	Egenskaber og anvendelse
Naturlig gamma	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. Benyttes til tolkning af geologi og til opstilling af logstratigrafi.
Naturlig spektral gamma	Kan måles gennem foring af både stål og plastik. 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.
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	Induktionslogs 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 fordel 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 boremudderen. 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. Dette er vigtigt at have oplysninger om 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 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 eventuelle 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 og akustisk televiwer. Danske beskrivelser af en række loggingtyper findes f.eks. i /1/. Mere indgående beskrivelser findes f.eks. i /2/.

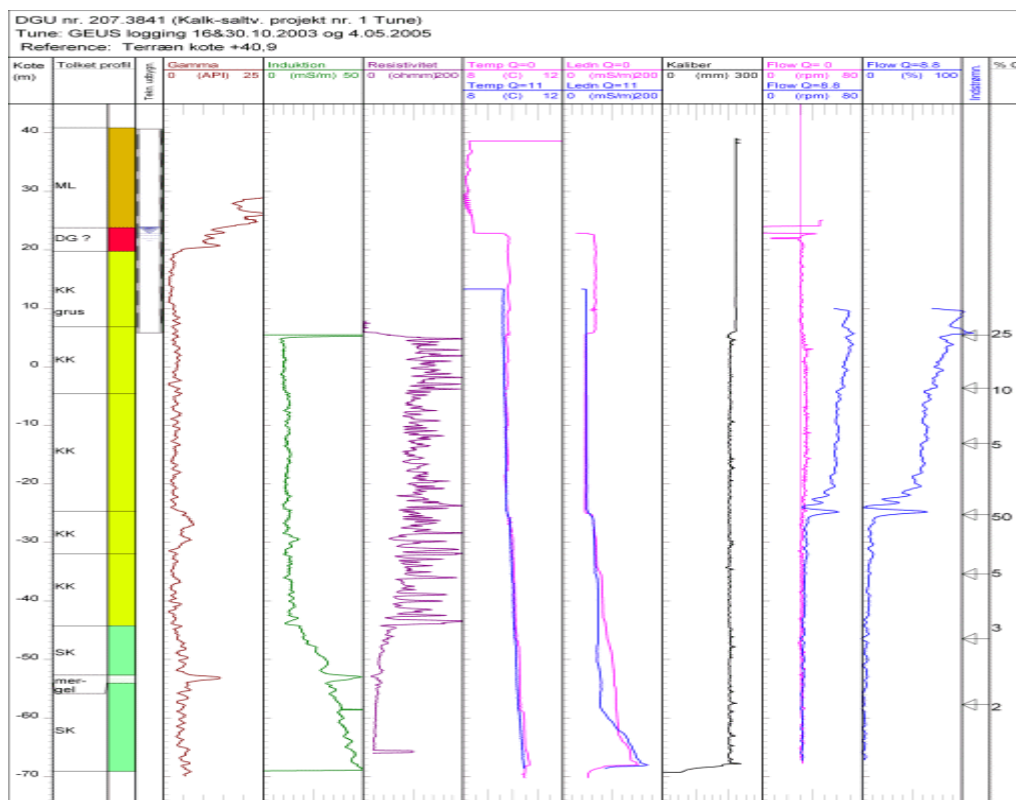
3.5.2 Data

Gerda databasen /3/ kan indholde logdata i formatet LAS. Der kan i nogle områder eksistere ikke-indberettede borehulslogs hos firmaer, myndigheder eller universiteter. Disse data kan enten være digitale (typisk LAS-format) eller analoge.

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 imidlertid vigtigt, at have information omkring, hvordan loggingen er udført. Dette gælder 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.

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 20).



Figur 20 Eksempel på geofysiske borehulslogs (fra /4/).

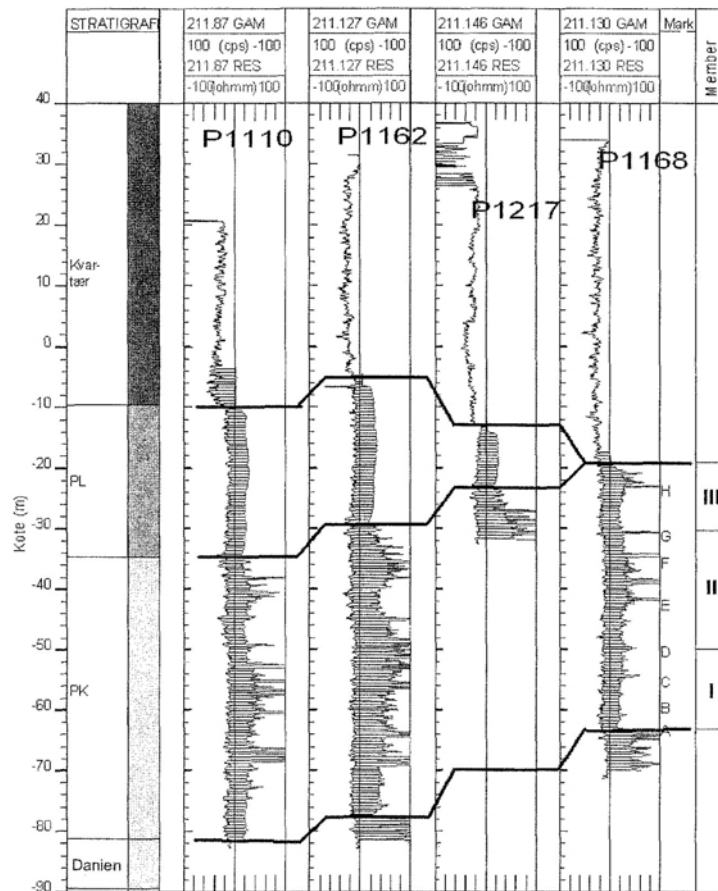
3.5.3 Anvendelsen i den geologiske model

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 logging et værdifuldt supplement til informationen fra jordprøverne, og denne information kan i mange tilfælde være afgørende for forståelsen af lagseriens opbygning. Der er mange oplysninger, der 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 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 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 21 ses et eksempel på en logstratigrafisk tolkning for nogle prækvartære bjergarter, der kun vanskeligt kan modelleres ud fra andre datatyper /5/.



Figur 21 Eksempel på logstratigrafisk tolkning af en prækvartær lagserie (fra /5/).

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

Data kan anvendes i geologiske tolkningsprogrammer på to forskellige måder:

1. Data kan tolkes udenfor det geologiske tolkningsprogram og der kan opstilles en resulterende "pseudoboring" med tolkningsresultatet. 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.
2. De geofysiske borehulsløgs importeres direkte i det geologiske tolkningsprogram.

Der er fordele og ulemper ved begge de ovennævnte fremgangsmåder for tolkning. Det er ikke alle geologiske tolkningsprogrammer, der kan importere og vise de geofysiske borehulsløgs direkte. Hvis der er udført et omfattende loggingprogram, kan det være vanskeligt at overskue de mange borehulsløgs 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.

Uanset om loggingdata kan vises i det konkrete geologiske tolkningsprogram, er det vigtigt at sikre, at informationerne fra logdata rent faktisk anvendes i de geologiske tolkninger – og dette kræver typisk tolkningsarbejde udenfor ”det digitale rum”.

3.5.4 Referenceliste

- /1/ Skov- og Naturstyrelsen, 1987: Geofysik og råstofkortlægning. Skov- og Naturstyrelsen, Miljøministeriet.
- /2/ Rider, M. 1996: The geological interpretation of well logs, 2nd edition. Whittles Publishing.
- /3/ <http://gerda.geus.dk/>
- /4/ <http://www.geus.dk/departments/hydrology/borehulslogging/logging-dk.htm>.
- /5/ Klitten, K. 2003: Log-stratigrafi for Selandien Lellinge Grønsand formationen og Kerteminde Mergel formationen. Geologisk Tidsskrift 2003, hæfte 2, pp. 20-22, København.

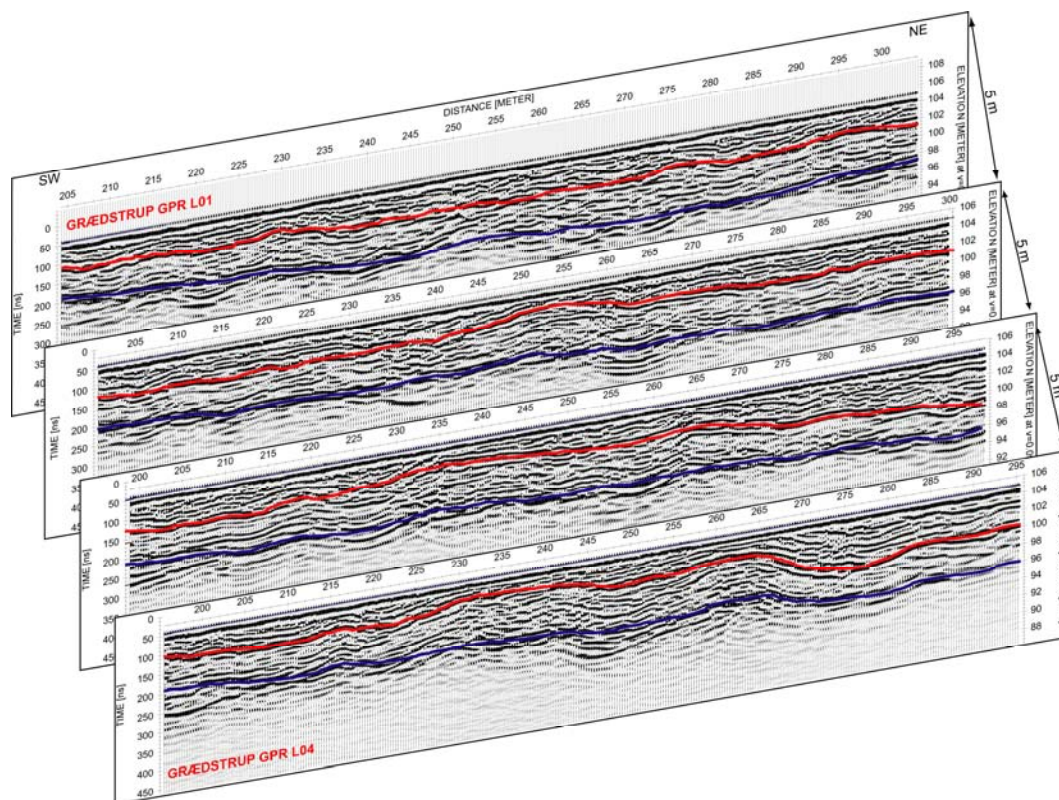
3.6 Andre geofysiske data

3.6.1 Generel beskrivelse

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

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 dielektricitetskonstanten. Under danske forhold er dielektricitetskonstanten primært relateret til vandindhold og i mindre grad porøsitet. Derfor giver såkaldte radargrammer eller georadarprofiler kontinuerte profilsnit af f.eks. sedimentogiske strukturer langs de opmålte linier. Metoden giver et meget detaljeret billede af jordens strukturelle opbygning og heraf kan aflejringsmiljøer ofte tolkes (se Figur 22). Ulempen ved metoden er, at den ikke kan gennemtrænge lerede lag, og at indtrængningsdybden er begrænset. Metoden er nærmere beskrevet i /1/.



Figur 22: Eksempel på georadarprofiler. Her er 4 georadarlinier placeret med en afstand på 5 m. To markante refleksioner er tegnet op på profilerne. Fra /6/.

HEM

Ligesom TEM-metoden er HEM-metoden (Helicopter borne ElectroMagnetic) også en elektromagnetisk metode, men HEM-metoden måler i et frekvensdomænesystem i modsætning til TEM som måler i 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, linieføringer og andre elektriske installationer (100 - 150 meter) skal derfor betragtes som usikre, idet risikoen for kobling til disse kan være til stede. Indtrængningsdybden ses under danske forhold normalt at være mellem 50 og 100 m /2/. 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 /2/. Heri findes en teoretisk gennemgang samt en sammenligning med PACES, MEP og TEM.

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. Mens boringen foregår, transporteres i øvrigt en vis mængde prøvemateriale op til overfladen. Herved kan den overordnede lithologiske lagfølge også registreres. Ellog-metoden er udviklet ved Geofysisk Afdeling, Århus Universitet /3/, /4/.

Gravimetri

Med den gravimetriske metode måles anomalier i jordens tyngdefelt. Metoden har vist sig frugtbar ved især kortlægning af storskala-strukturer som begravede dale og saltstrukturer. En nærmere beskrivelse af metoden og dens resultater kan findes i /5/.

3.6.2 Referenceliste

- /1/ Møller, I., 2006: 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.
- /2/ Christensen, N.B., Møller, I., Rasmussen, T.M., Sørensen, K.I. og Tølbøll, R.J. 2002: En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomænemethoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark. DGU-Rapport 2002/77, GEUS, 240 p.
- /3/ Skov- og Naturstyrelsen 1989: Ellog boring. Kortlægningsserien nr. 8.
- /4/ Sørensen, K., 1989: A method for measurement of the electrical formation resistivity while auger drilling. First break 7, pp. 403-407.
- /5/ 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.

- /6/ Møller I. 2006: 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.

3.7 Boredata

3.7.1 Generel beskrivelse

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

Ud over standardboredata har nogle borer også supplerende stratigrafiske data tilknyttet (se kap. 3.8 "Stratigrafiske data") og/eller geofysiske borehulslogs (se kap. 3.5 "Geofysiske borehulslogs").

Kvaliteten af boredata afhænger blandt andet af boremetoden, /2/. De mest benyttede boremetoder i Danmark er tørborring, direkte skylleboring og omvendt skylleboring (se Figur 23). Tørboringer udføres med snegl og med forskellige sandspande og slagværktøjer. Forede snegleboringer giver mulighed for en ret præcis bestemmelse af laggrænser og giver typisk gode prøver til lithologisk beskrivelse. Prøver udtaget med sandspand er sammenblandede inden for et større prøvetagningsinterval (typisk 1 m) og af varierende kvalitet.



Figur 23: Indretning af boreplads ved skylleboring med lufthæve-metoden. Foto: Tom Martlev Pallesen.

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 lithologisk bestemmelse. I modsætning hertil giver omvendte skylleboringer, der blandt andet inkluderer lufthæveboringer, en bedre bestemmelse af laggrænser samt bedre prøver til lithologisk beskrivelse, fordi prøven løftes op til overfladen inde i borerøret. En mere indgående beskrivelse af boreteknikker og deres indflydelse på prøvekvaliteten findes i /3/.



Figur 24: 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, /3/. Dette kan bl.a. være grundigheden hvormed brøndboreneren har beskevet laggrænser og lag under arbejdet, antallet af prøver der er udtaget til beskrivelse og prøvebeskrivelsernes kvalitet. Desuden afhænger prøvekvaliteten af sedimentets beskaffenhed (typen af de gennemborede lag). Geotekniske borerer er som regel af god kvalitet og velbeskrevne, mens kvaliteten af prøver og prøvebeskrivelse fra vandindvindingsboringer varierer. Nogle boreentreprenører har gennem tiden traditionelt været omhyggelige med borearbejde og

beskrivelser, mens andre har været mindre omhyggelige. Der findes ofte lokale erfaringer med kvaliteten af det, der bliver, og er blevet leveret fra de enkelte boreentreprenører.

I henhold til vandforsyningsloven og råstofloven af 2007 samt bekendtgørelse om udførelse og sløjfning af borerer og brønde på land af 2007, skal alle informationer, data og boreprøver fra grundvandsboringer og råstofboringer indberettes til GEUS. Det er almindeligvis brøndboreneren, som indberetter borererne, men det kan også være konsulentfirmaer og offentlige institutioner. Borejournaler og data tilgår Borearkivet ved GEUS, mens prøver sendes til Boreprøvelaboratoriet på GEUS, /4/.

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 monitoringsboringer, fra råstofboringer samt fra et mindre antal videnskabelige borerer. Beskrivelsesmetoden, der følger /5/ og /6/, er blevet udviklet på GEUS gennem de sidste 30 år. Efter behandling lagres alle informationer i GEUS centrale boringsdatabase Jupiter.

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 brøndboreneren i felten. Lag med geologbedømte prøver har i Jupiter forkortelser bestående af to bogstaver, f.eks. ML (moræneler) og DS (diluvial smeltevandssand). Det første bogstav beskriver en tolket oprindelse af laget (dannelsesmiljø), mens det andet beskriver lithologien. 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 jordartssymbler findes i Jupiter. Lag, hvorfra prøverne ikke er bedømt af geologer, angives med forkortelser bestående af ét bogstav, som kun beskriver lithologien, f.eks. L (ler) og S (sand).

For borerer med geologbedømte prøver har brøndboreneren i de fleste tilfælde indsendt prøver til GEUS, jf ovenstående. Borerer udført i forbindelse med den amtslige og den nationale grundvandskortlægning, vil dog ofte være beskrevet af geologer i felten. Antallet af indsendte prøver varierer mellem 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 anslåede laggrænser. Hvis brøndborenen imidlertid har angivet laggrænser, vil disse oplysninger blive anvendt. Der kan dog være tilfælde, hvor oplysningerne ikke har været tilgængelige, da prøverne blev beskrevet. I de tilfælde vil der blive registreret en tolket laggrænse. Man kan for nogle boringer kontrollere laggrænserne ved at sammenligne med de originale brøndborenerjournaler. Disse kan i de fleste tilfælde downloades ved at opsøge den pågældende boring på Jupiter databasens hjemmeside /1/.

Sammenligning med feltjournalerne kan også i nogle tilfælde vise andre fejl eller uoverensstemmelser i data, så som åbenlyst forkerte lithologiske beskrivelser, som f.eks. kan skyldes ombytning af prøver eller en ikke repræsentativ prøveudtagelse. Det er vigtigt at tage i betragtning, at brøndborenen eller feltgeologen har haft god mulighed for at 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. Brøndboreners borejournal og øvrige feltjournaler udgør derfor ofte et værdifuld supplement til prøveneskrivelser og geologiske tolkninger, der er registreret i Jupiter.

3.7.2 Data

Datatyper

Den typiske kilde til boredata er GEUS' Jupiter-database /1/. Boredata i Jupiter ligger på digital form (Jupiter-format) og kan indlæses direkte i de gængse geologiske tolkningsprogrammer. Jupiter indeholder ud over de digitale data også en række scannede analoge dokumenter, i mange områder blandt andet originale brøndborenerjournaler samt informationer om prøvepumpninger og lignende. Supplerende kilder til originale brøndborenerjournaler er offentlige myndigheder samt brøndborenerfirmaer.

Foruden vandforsyningsboringer findes i Jupiter også mange geotekniske boringer, råstofboringer og miljøtekniske boringer. Der er imidlertid mange af denne slags boringer, der ikke findes i Jupiter. Disse data findes enten i forskellige digitale formater eller på analog form, og datakilderne er typisk geotekniske firmaer, rådgivere, boreentreprenører, Banestyrelsen, råstofmyndigheder og andre myndigheder.

De mest almindelige datatyper er opsummeret i nedenstående Tabel 2:

Tabel 2: Datatyper

Datatype	Dataformat	Bemærkninger
Boringer i Jupiter	JupiterXL	På MS Access og andre database-formater.
Originale brøndborenerjournaler	Analoge	Ofte findes scannede borejournaler i Jupiter (pdf-format), og kan tilgås ved at opsøge den pågældende boring på Jupiters 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 oven for beskrevet, af boremetode, sedimentfang, boreentre-prenørens omhyggelighed med borearbejdet, samt tætheden og kvaliteten af de prøver, der er indsendt til GEUS.

Det er oplagt at lave en opdeling af boringer efter kvalitet for at sikre, at de bedste boredata får størst vægt i forbindelse med modelopstillingen. Selvom geologbedømte boringer ikke altid behøver at være af bedre kvalitet end boringer uden geologisk bedømmelse, kunne en minimumsløsning for opdeling af boringer være en opdeling i boringer med og uden geologbedømmelse. En mere detaljeret inddeling kunne være:

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 lithologiske oplysninger

Med tanke på de usikkerheder, der knytter sig til boremetoden, udtagelsen af prøverne, samt til beskrivelse og fortolkning af mindre prøve af varierende kvalitet i laboratoriet, er ovennævnte inddeling ikke ideel. Der kan i stedet inddeles i subjektive klasser, f.eks.

1. sikker
2. middel
3. usikker

Heri kan bl.a. boremetode og kvalitet af original brøndborerjournal også indgå i vurderingen. Den sidstnævnte inddeling er mere tidskrævende, men giver til gengæld et mere retvisende billede af datakvaliteten. Under alle omstændigheder bør kriterierne for klasseinddelingen fremgå klart af dokumentationen.

Ud over inddelingen efter datakvalitet, kan det være relevant at udpege boringer, der er nøgleboringer for den geologiske model. Nøgleboringer kan f.eks. være boringer med den bedste kvalitet, centrale indvindingsboringer eller de dybeste boringer.

Kvalitetskontrol

Der kan forekomme andre fejl i boringsoplysningerne i Jupiter. Dette kan være fejl i stamoplysninger (X, Y og Z koordinater), i registrering af filterintervaller, i lagbeskrivelser og som nævnt i registrering af laggrænser:

- Fejl i X og Y koordinater er vanskelige at afsløre. Forkerte stednavne kan indikere fejl.
- Fejl i terrænkoten (Z) kan kontrolleres ved hjælp af en digital højdemodel. En opgørelse fra Storstrøms Amt har vist at terrænkoten på 5-10 % af de undersøgte boringer afveg mere end 2,5 m fra den digitale højdemodel /7/. Fejl i Z kan bl.a. skyldes fejl eller usikkerhed i X, Y koordinaterne.
- Fejl i registrering af filterintervallerne kan i nogle tilfælde afsløres ved hjælp af brøndborens endelige borejournal, 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 registreret 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 (se kap. 3.35 "Dokumentation").

3.7.3 Anvendelsen i den geologiske model

Visualiseringen af boringer i tolkningsprogrammet sker typisk ved profiloptegning. Det anbefales at benytte GEUS' DGU-standardfarveskala til visualisering af lithologier. I følge DGU-standardfarveskalaen gives der kun farvesignatur til lag med bogstavssymboler – dvs. lag der er geologisk tolkede både mht. dannelsesmiljø og lithologi. Hvis man ønsker at tildele farvesignatur til lag med et bogstavssymboler, skal man altid anvende farver, der afviger fra DGU-standardfarveskalaen, således at det er let at se forskel på hhv. tolkede og ikke tolkede lag.

Den geologiske tolkning af boringer udgør kernen i mange geologiske modelprojekter. Ved tolkningsarbejdet kan der med fordel tages udgangspunkt i de bedst beskrevne boringer og i eventuelle øvrige udpegede nøgleboringer. Hvis der findes boringer med stratigrafiske data (se kap. 3.8 "Stratigrafiske data") eller boringer med geofysisk logstratigrafi (se kap. 3.5 "Geofysiske borehulslogs"), 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 linie- og fladedata, der kan støtte tolkningsarbejdet mellem boringer. 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. I det hele taget vil det i praksis næsten altid være en fordel at få skabt et samlet overblik over alle tilgængelige data på et tidligt tidspunkt, da tolkninger kun sjældent kan baseres på enkelte datasæt.

Under tolkningsarbejdet bør der føres en nøje dokumentation af tolkninger og observationer omkring boringer (og andre data). Eksempler kan være:

1. "Boring A af dårlig kvalitet i konflikt med nærliggende boringer af god kvalitet – kasseres."
2. "Boring A, B og C beliggende inden for 70 m meget forskellige. Alle vurderes pålidelige – istektonik?"
3. "Sandlag 1 mangler i boring A, findes i boring B, C og D. Tolkes som mangelfuld borejournal."

Disse noter kan alternativt laves på profilerne ved papirtolkning (se kap. 3.23 "Papirtolkning"), men en form for nedskrevet log sikrer en enkel dokumentation af valg og tolkninger (se kap. 3.35 "Dokumentation").

3.7.4 Referenceliste

- /1/ GEUS: Jupiter databasen (<http://www.geus.dk/jupiter/index-dk.htm>).
- /2/ Sørensen, E. & Schmidt, H., 2001: Boringer. Miljøstyrelsen.
- /3/ 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 særtryk, p. 108.
- /4/ Gravesen, P, 1993: DGU's Boreprøvelaboratorium. Årsberetning 1992, side 83-85.
- /5/ Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J. 1995: Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse. Dgf-Bulletin 1. Dansk Geoteknisk Forening. Revision
- /6/ Gravesen, P. Larsen, C.L., Bruch, W., Nygaard, E., Klitten, K., Kelstrup, N. & Krüger, N., 2004: Geologi og grundvand. Håndbog og undervisningsmateriale til brøndboreruddannelsen. Miljøstyrelsens serie om boringer på land. Kan "downloades" fra www.blst.dk
- /7/ Storstrøms Amt, 2006: Møn – Fase 1 kortlægning – Hovedrapport. Rambøll.

3.8 Stratigrafiske data

3.8.1 Generel beskrivelse

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

Ved en lithostratigrafisk opstilling defineres lagfølgen ud fra lithologiske 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 borer kan korreleres.

Fingrusanalyser og andre sedimentologiske analyser kan i nogle områder af Danmark benyttes som en slags fingeraftryk for en glacial aflejring /1/, /2/. Metoden 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 glacial hændelsesforløb.

På baggrund af mikropalæontologiske undersøgelser (mikrofossiler) og palynologiske undersøgelser (sporer og pollen) kan lagfølgen inddeles i biozoner. Biozoner med ensartede indhold af fossiler kan identificeres på flere geografiske 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 /3/. 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. 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 /4/.

Ved sekvensstratigrafi inddeles lagfølgen i aflejningssekvenser. En sekvens afgrænses af en nedre og en øvre sekvensgrænse og består af de aflejringer, der er aflejret inden for en havniveau-cyklus. En sekvensgrænse er en lagflade, der fremkommer på det tidspunkt, hvor det relative havniveau var lavest i en havniveau-cyklus. Datagrundlaget for sekvensstratigrafi udgøres af en kombination af seismik, geofysiske logs, lithologi og biostratigrafi.

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 .

3.8.2 Data

En stor del af de stratigrafiske data stammer fra boreprøver. De mest almindelige af disse er opsummeret i Tabel 3.

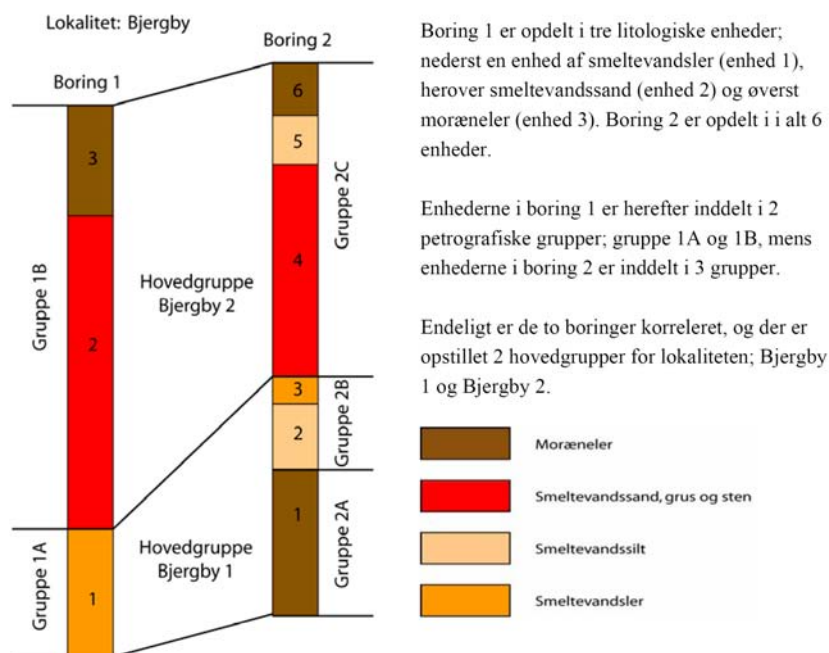
Tabel 3: Almindelige stratigrafiske datatyper stammende fra boreprøver.

Datatype	Dataformat	Bemærkninger
Boringer i Jupiter	JupiterXL	
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.

Boredata, der er indsamlet med henblik på stratigrafisk tolkning vil ofte have en relativt 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 af flere forskellige ting, bl.a. boremetoden, borearbejdet, brøndborerens prøvehåndtering og omhyggelighed, (se kap. 3.7 "Boredata"). For at kunne udføre en optimal prøvebeskrivelse, er det vigtigt at prøvebeskriveren forholder sig til de forhold, der har haft indvirkning på kvaliteten af de prøver, der skal beskrives.

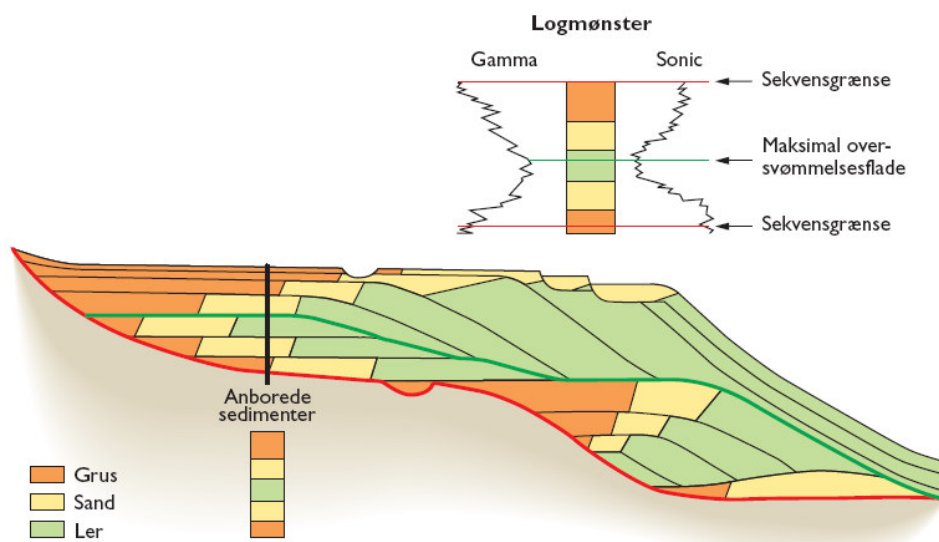
3.8.3 Anvendelsen i den geologiske model

I Figur 25 ses et eksempel på en petrografisk opdeling og korrelation af to boringer fra en fiktiv lokalitet. På baggrund af bl.a. fingrusanalyser inddeles de lithologiske enheder i grupper med samme petrografiske egenskaber. Herefter korreleres til andre boringer og eventuelt daglokaliteter, og der opstilles hovedgrupper for en lokalitet eller et område. 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 lithostratigrafiske enheder.



Figur 25: Eksempel på opdeling og korrelation af to borer ved anvendelse af petrografiske grupper og hovedgrupper. Eksemplet er fra /5/.

I de senere år er der blevet udført sekvensstratigrafiske analyser af de neogene aflejringer i Jylland /6/. Projekter med sekvensstratigrafisk tilgang har været en stor hjælp for opstilling af geologiske modeller for de neogene aflejringer. Ofte vil en sekvens indeholde både sandede og lerede aflejringer, da den kan være opbygget af både fluviale sedimenter, deltasedimenter samt marine sedimenter (se Figur 26), men metoden er en hjælp, fordi den opstillede sekvensstratigrafi beskriver den geologiske dannelseshistorie for området i detalje. Når dannelseshistorien kendes kan de forventede sedimenttyper i området forudsiges og indarbejdes i geologiske model.



Figur 26: viser fordelingen af grus, sand og ler indenfor en sekvens. En tænkt gennemboret lagfølge er angivet ved sort streg. Øverst er vist, hvordan gamma- og soniclogs vil se ud for den gennemborede lagfølge. Placeringen af sekvensgrænser og maksimal oversvømmelsesflade er angivet på loggen med henholdsvis rød og grøn streg. Eksemplet stammer fra /7/.

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

3.8.4 Referenceliste

- /1/ 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.
- /2/ Kronborg, C, Bender, H., Bjerre, R., Friberg, 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.
- /3/ Kristensen, P., Gibbard, P., Knudsen, K.L., Ehlers, J. 2000: Last Interglacial stratigraphy at Rislinge Klint, South Denmark. *Boreas*, Vol. 29, pp 103-116. ISSN 0300-9483.
- /4/ Krathus, T., 2002: Dinoflagellater – et værktøj til biostratigrafisk tolkning. *Geologisk Nyt* 1/02.
- /5/ 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.
- /6/ Rasmussen, E. S. & Dybkjær, K. 2005: Sequence stratigraphy of the Upper Oligocene-Lower Miocene of eastern Jylland, Denmark: role of structural relief and variable sediment supply in controlling sequence development. *Sedimentology* 52, pp 25-63.
- /7/ Dybkjær, K & Rasmussen, E. S. 1998: Sekvensstratigrafi. *Geologisk Nyt fra GEUS* nr. 1/98.

3.9 Hydrologiske data

3.9.1 Generel beskrivelse

En række forskellige typer af hydrologiske data kan bidrage med vigtige informationer til den geologiske model. De hydrologiske data kan fortælle noget om, hvordan grundvandet strømmer i jordlagene, og ad denne vej kan man i nogle tilfælde opnå information om jordlagenes rumlige opbygning. De hydrologiske data kan opfattes som en slags støttedata, som særligt i kombination med øvrige data kan være værdifulde indikatorer på mulige sammenhænge i den rumlige geologiske og hydrostratigrafiske opbygning.

3.9.2 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

Pejledata og potentialekort

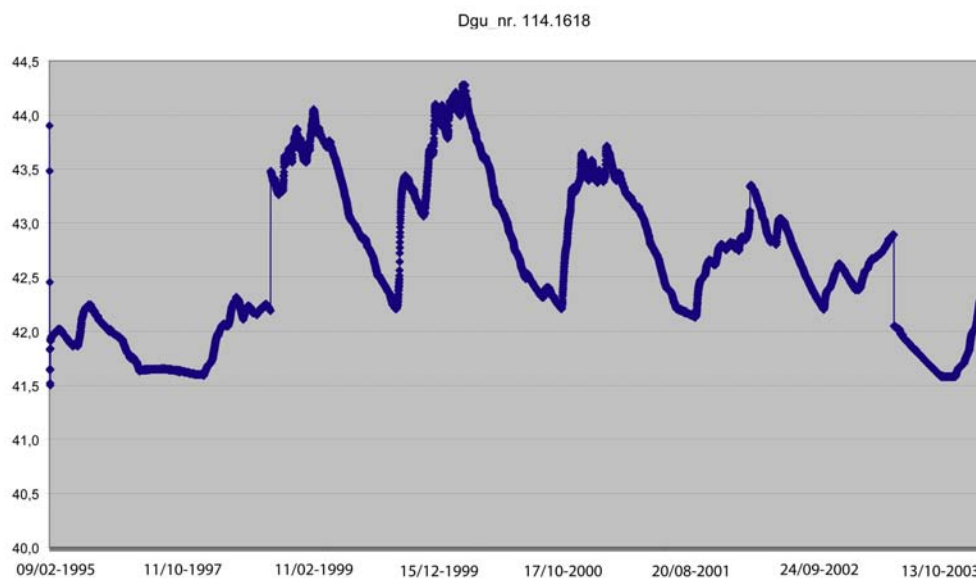
Kilder til pejledata og potentialekort, samt faktorer man bør være opmærksom på ved brugen af disse data, er samlet i Tabel 4.

Tabel 4: Kilder til pejledata og potentialekort.

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

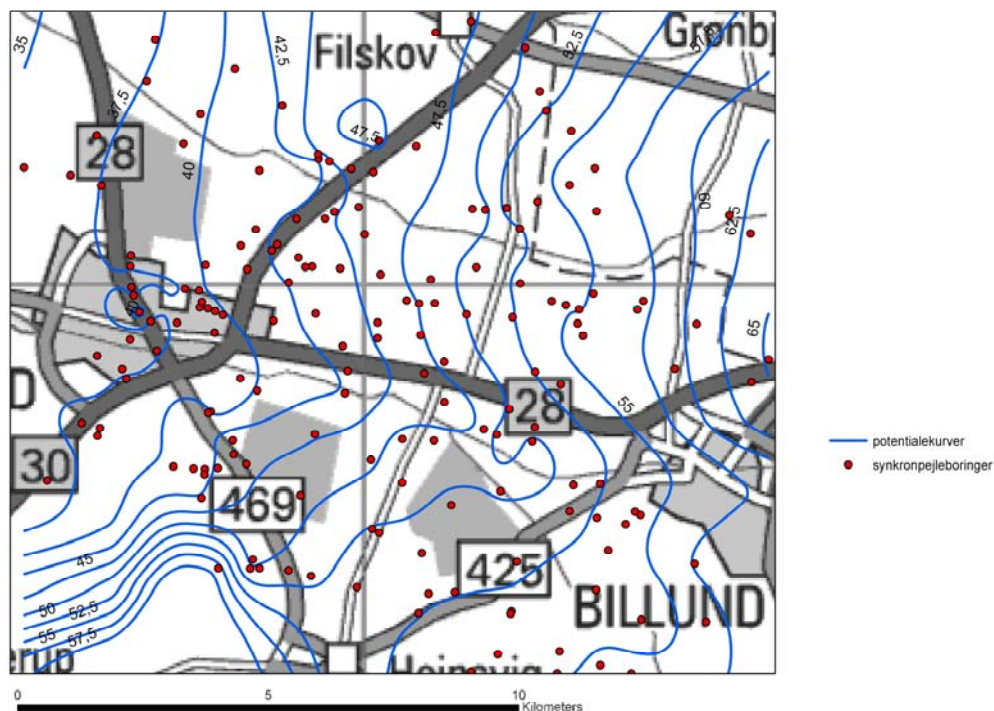
Kilder til potentialekort	Hvad skal man være opmærksom på ved brug af potentialekort?
• Kort fra amter og GEUS • Kort fra vandforsyninger • Aktive potentialekort • Synkronpejlerunder • Udtræk fra grundvandsmodeller	• Repræsenterer kortet ét magasin eller lag eller stammer det fra flere magasiner? • Er 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 27: Eksempel på pejetidsserie fra boring nær Grindsted (eksemplet er modificeret fra /1/).

I Figur 27 ses en pejetidsserie 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.



Figur 28: Potentialekort lavet ud fra synkronpejlinger (eksemplet stammer fra /2/). Baggrundskort fra Kort & Matrikelstyrelsen ©.

Figur 28 viser et potentialekort lavet ud fra synkronpejlinger opmålt i maj 2005 /2/. Pejlingerne er hovedsagelig foretaget i markvandingsboringer før vandingssæsonen starter. Der ses et jævnt faldende potentiale mod nordvest. Dette 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 transmissivitetkort

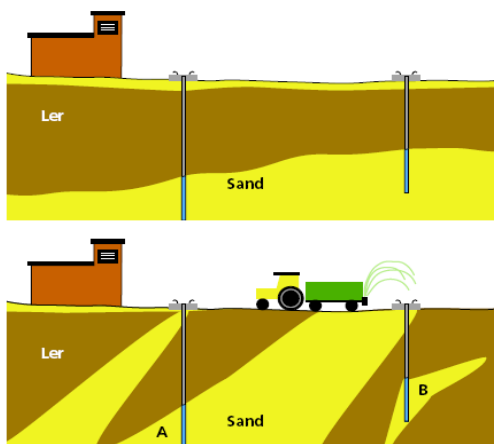
Kilder til prøvepumpningsdata og transmissivitetkort, samt faktorer man bør være opmærksom på ved brugen af disse data er samlet i Tabel 5.

Tabel 5: Kilder til prøvepumpningsdata og transmissivitetkort.

Kilder til prøvepumpnings og renpumpningsdata:	Hvad skal man være opmærksom på ved brug af prøvepumpnings og renpumpningsdata?
• Jupiter • Prøvepumpningsforsøg fra amter, vandforsyninger, miljøcentre 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 lufttrykpåvirkninger, årstidsvariationer og årsvariationer? • Placering og afstand mellem pumpeboring og observationsboringer
Kilder til transmissivitetkort	Hvad skal man være opmærksom på ved brug af transmissivitetkort?
• Kort fra amter og GEUS • Kort fra vandforsyninger • Kort udarbejdet i forbindelse med anlægsprojekter.	• Repræsenterer kortet ét magasin eller er det en blanding af flere magasiner? • Er transmissivitetkortet lavet på baggrund af prøvepumpnings- eller renpumpningsdata.

Renpumpningsdata stammer fra pumpning umiddelbart efter boringens udførelse og adskiller sig fra en prøvepumpning ved at have en kortere varighed. Ofte peyles 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 eventuelt 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 to magasiner.



Figur 29: Eksempel på forskellige tolkningsmuligheder af 2 borer (fra /3/).

Boringsoplysninger kan suppleres med en prøvepumpning for at få et mere præcist billede af grundvandsmagasinet. I Figur 29 ses to eksempler på, hvordan geologien kan tolkes ud fra to borer. Umiddelbart vil man tolke forholdene som de ses på øverste profilsnit med horisontale lag, men en eventuel prøvepumpning i en af borerne vil kunne afsløre om magasinerne er adskilte som vist i nederste profilsnit. Prøvepumpninger kan på den måde give viden om de geologiske forhold mellem borer.

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 /4/. Transmissiviteten er udtryk for den integrerede 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.

Prøvepumpninger i kalkmagasiner er komplicerede at fortolke, da strømning i kalk ofte er præget af sprækkesystemer. Pumpedata fra kalkmagasiner bør derfor anvendes med varsomhed.

3.9.3 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 højne forståelsen af geologiske og hydrostratigrafiske forhold. De hydrologiske data kan give fingerpeg omkring de hydrauliske forhold og indbyrdes sammenhænge mellem borer. 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 /5/. 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 borerne 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 og observationsboringerne.
- Observationsboringer, der ikke påvirkes af pumpningen, indikerer en afgrænset udbredelse af magasinet.
- Observationspejlinger i flere filtre i pumpeboringen giver informationer om de vertikale, bóringsnære hydrauliske sammenhænge.
- Variationer i transmissiviteten er styret af magasinets tykkelse og lithologi. Hvis transmissiviteten er kendt kan tykkelse/lithologi til en vis grad estimeres.

3.9.4 Referenceliste

- /1/ Ribe Amt. 2006: Udtræk af pejletidsserie fra loggerdata i Hymer-databasen.
- /2/ Ribe Amt. 2006: Potentialekort lavet på synkronpejlinger for et område mellem Grindsted og Billund.
- /3/ Amtsrådsforeningen. 2002: Grundvand som drikkevandsressource. Beskrivelse af grundvand, vandindvinding, vandforsyning og grundvandsforurening. Amtsrådsforeningen, pp. 1-38. ISBN 87-7723-275-5.
- /4/ Werner Bai. 1998: Grundvandets strømning. Vandforsyning pp. 137-153. Teknisk Forlag ISBN 87-571-1964-3.
- /5/ Inga Sørensen. 1998: Kortlægning af grundvand. Vandforsyning pp. 155-185. Teknisk Forlag ISBN 87-571-1964-3.

3.10 Kemiske data (grundvands- og sedimentkemi)

3.10.1 Generel beskrivelse

Kemiske data indgår som regel i geologiske modeller som støtdata. De kan ikke bruges direkte til fastsættelse af geologiske laggrænser, men de kemiske data kan give indikationer på udbredelsen og mægtigheden af dæklagene, tilstedeværelsen af huller i dæklaget og på grundvandsgennemstrømningen.

Erfaringen fra den hidtil udførte detailkortlægning viser, at der er et stort potentiale i at udnytte grundvands- og sedimentkemiske data i opstillingen af geologiske modeller. Grundvands- og sedimentkemiske data har dog hidtil været meget usystematisk anvendt. I det følgende vil der ikke blive angivet en præcis procedure for, hvordan kemiske data skal bruges ved opstilling af geologiske modeller, da denne ikke er udviklet endnu. Der vil i stedet blive lagt vægt på eksempler, der viser hvordan kemiske data hidtil succesfuldt er blevet anvendt i opstillingen af geologiske modeller.

3.10.2 Data

I de dybereliggende grundvandsmagasiner er det primært lokale sedimentkemiske forhold og grundvandets strømningsforhold, der er betydende for grundvandets sammensætning.

Grundvandskemiske og sedimentkemiske data gennemgår en kvalitetssikring af både prøvetager, laboratorie og af rekvirent (miljøcenter, kommune, vandværk) inden de stilles til rådighed for udtræk fra Jupiter-databasen. Dog vil der altid kunne være fejl i databasen, som måske først kan opdages, når dataene tolkes f.eks. i forbindelse med opstilling af geologiske modeller.

3.10.3 Anvendelse i den geologiske model

Lerdæklagets udbredelse og nitratfrontens beliggenhed

Jordlagenes evne til at fjerne nitrat afhænger af indholdet af reducerende stoffer som 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, nitratfrie jordlag kaldes nitratfronten. Nitratfronten bevæger sig langsomt nedad efterhånden som de reducerende stoffer, der kan fjerne nitrat, opbruges i jordlagene. Beliggenheden af nitratfronten er afhængig af lerdæklagstykkelsen, heterogeniteten i de overfaldenære lag, indholdet af nitrat-reducerende stoffer samt nitratbelastningen.

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 lerlagets udbredelse i de øverste jordlag. Forudsætningen for at kunne bruge kemiske data i den sammenhæng er, at der eksisterer en omvendt sammenhæng mellem nedtrængningsdybden af nitrat i grundvandet og tykkelsen af beskyttende lerdæklag. Hvis denne omvendte sammenhæng eksisterer

farver henføres til den oxiderende zone. Jordlag med "grå", "gråbrune", "olivengrå", "sorte" eller lignende farver tolkes som tilhørende den reducerende zone.

Ionbytningsgraden

Ionbytning i grundvandet kan bruges aktivt i modelopstillingen, og udbredelsen af disse kan være vigtige parametre at anvende ved opstilling af en efterfølgende grundvandsmodel. 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, når natriumkoncentrationen falder i det gradvis mere ferske porevand. 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 steder, 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.

Forvittringsgraden

Forvittringsgraden beregnes som summen af Ca og Mg divideret med hydrogencarbonat (målt i ladningsækvivalenter) /3/. Forvittringsgraden belyser i princippet, i hvilket omfang andre syrer end kulsyre er neutraliseret ved opløsning af kalk. Forvittringsgraden påvirkes af mange processer, herunder pyritoxidation, hvor der dannes svovlsyre. Tilsvarende vil tilførsel af kalksalpeter i landbruget (calciumnitrat) øge forvittringsgraden. Ligeledes kan atmosfærisk deposition af kvælstof, i form af ammoniak fra landbrugsaktiviteter eller svovlsyre fra forbrændningsprocesser, medvirke til en høj forvittringsgrad af jordlagene.

En lav forvittringsgrad (≤ 1) kan skyldes sulfatreduktion, hvor organisk stof omdannes til hydrogencarbonat. En lav forvittringsgrad kan også skyldes ionbytning, hvor grundvandets indhold af calciumioner falder, da de adsorberes til sedimentet og hermed bytter plads med natrium-ioner. En høj forvittringsgrad ($> 1,2$) 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 forvittringsgrad kan også indikere en kraftig indvinding, der betinger forceret omsætning af pyrit under kraftig syredannelse.

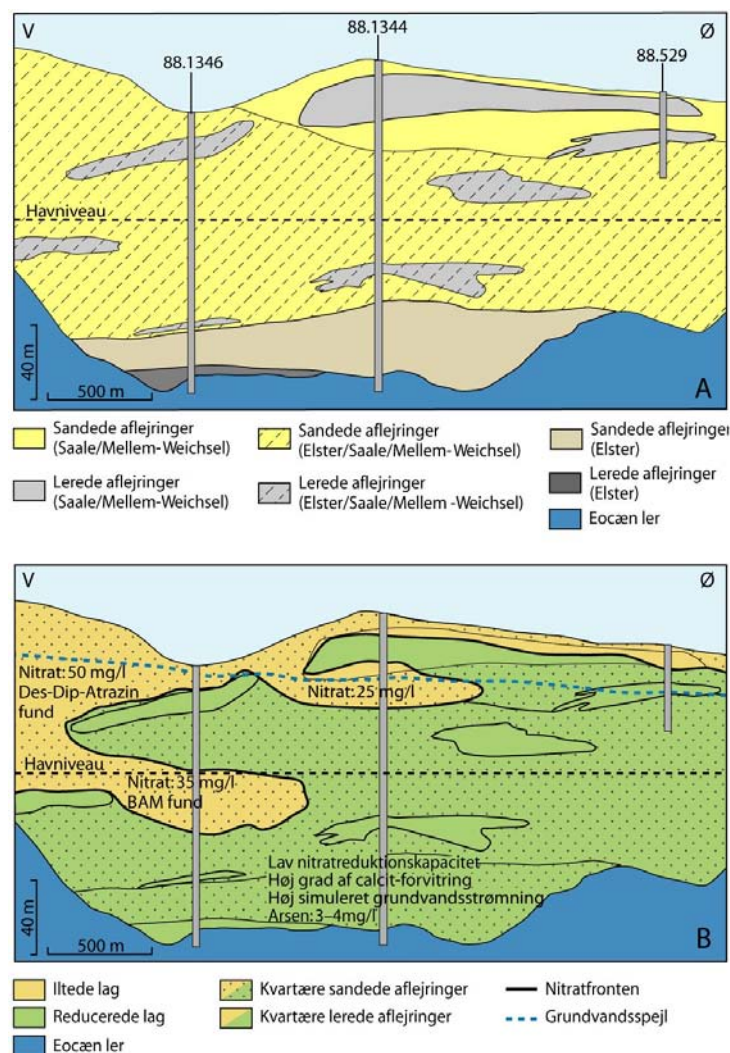
Kalkmætningen

Kalkmætningen eller mætningsindexet angiver grundvandets mætningstilstand i forhold til kalk i sedimentet. Er kalkmætningen positiv er grundvandet overmættet i forhold til kalk i sedimentet.

Eksempel på anvendelse af kemiske data

Ved at kombinere grundvands- og sedimentkemiske data (grundvandskemi, sedimentkemi, farvebeskrivelser, kalkindhold fra SESAM undersøgelserne), med geologiske og geofysiske oplysninger kan dataene supplere hinanden i tolkningen af laggrænserne /5/. Et eksempel på en sådan sammentolkning kan ses i Figur 31, hvor et ca. 4 km langt geokemisk og geologisk profilsnit gennemskærer en begravet dal syd for Århus. De kemiske data er her brugt til at verificere den geologiske model for

området, og lerlaget er tolket som usammenhængende, da nitratfronten optræder under et lerlag. Dvs. at der er søgt at sammenstille både de kemiske og de geologiske informationer.



Figur 31: Øverst geologisk profilsnit gennem en begravet dal syd for Århus. Nederst vand- og geokemisk profilsnit gennem samme begravede dal. Eksemplet stammer fra /5/.

3.10.4 Usikkerheder

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, da der sjældent er udtaget vandprøver fra alle borer i et område.

Med hensyn til farvebeskrivelserne fra borer, har disse data ofte samme tæthed som de geologiske data, som stammer fra borningsoplysninger. Kvaliteten af farvebeskrivelserne kan være svingende. Dette kan skyldes, at formålet med borerne og beskrivelserne har været forskellig fra boring til boring og det faktum, 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 vigtigt at være opmærksom på, at nitratfrontens 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 nitratfronten på grund af øget omsætning af pyrit /2/.

3.10.5 Referenceliste

- /1/ Sønderjyllands Amt. 2005: Kortlægningsrapport. Grundvandskemiske forhold. Udført af NIRAS.
- /2/ 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.
- /3/ Vejledning fra Miljøstyrelsen. 2000: Zonering Detalkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen. Nr. 3. ISBN 87-7944-133-5.
- /4/ Århus Amt. 2006: Redegørelser for grundvandsressourcerne i Århus Syd-området. Udført af: Signe Weng Grønhøj, Birgitte Hansen, Ole Dyrso Jensen, Birthe Eg Jordt, Stine Rasmussen og Richard Thomsen, 285 pp.
- /5/ 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 978-87-7871-213-4.

3.11 Eksisterende tolkninger

3.11.1 Generel beskrivelse

En geologisk model opbygges sjældent helt fra bunden. Typisk foreligger der en række ældre tolkninger, som kan anvendes som udgangspunkt for tolkningerne i den geologiske model. Der kan være store variationer i alder og i kvalitet af de eksisterende tolkninger, men som regel vil der være mulighed at bygge videre på noget af det allerede udførte arbejde. Det er vigtigt, at man indsamler og sorterer det eksisterende materiale og vurderer, hvad der kan anvendes i det videre arbejde. Det er vigtigt, at tidligere fremsatte teorier og arbejdshypoteser af- eller bekræftes, før de anvendes i den geologiske model.

3.11.2 Data

De eksisterende tolkninger findes i forskellige former og med varierende relevans for det aktuelle modelområde. Nogle arbejder dækker hele landet i stor skala, mens andre kun omhandler ganske små områder, men måske i stor detalje. Nogle eksisterende tolkninger findes på kort – andre på skrift – og generelt er der gode muligheder for køb via institutioner, boghandlere eller for lån på landets biblioteker.

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 og Dansk Geologisk Forening (DGF) har en stor faglig værdi og rækker helt tilbage til 1890. Herudover findes der geologiske afhandlinger og lærebøger, hvoraf /1/ specielt kan fremhæves. Specialer, som ikke er offentliggjorte, kan oftest skaffes til låns fra de respektive læresteder. Bogserien "Geologisk Set" fra Geografforlaget beskriver områder af national geologisk interesse, og disse bøger giver kortfattede, men værdifulde beskrivelser af geologi og landskab ved de mange lokaliteter. Herudover indeholder bøgerne gode litteraturlister. Desuden kan der findes videnskabelige artikler i forskellige internationale tidsskrifter.

Ældre geologiske modeller

Geologiske modeller er gennem årene opstillet flere steder i Danmark. Der kan være tale om modeller opstillet i forbindelse med grundvands-, råstof-, forurenings-, olieefterforskningsundersøgelser samt i geotekniske sammenhænge. 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. 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 kunne anvendes. 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 oftest opstillet af de tidligere amter, de statslige miljøcentre, DGU/GEUS og landets rådgivere.

De tidligere amter samt GEUS har i løbet af seneste år udviklet modeldatabasen, hvor det er meningen at færdige geologiske modeller skal ligge i fremtiden (se kap. 3.41 "Eksport af model til model-databasen"). Dette vil blive en vigtig kilde til download af eksisterende geologiske modeller.

Ældre hydrogeologiske undersøgelser

I grundvandssammenhænge kan der være udført hydrogeologiske undersøgelser, hvor der ikke nødvendigvis er opstillet en geologisk model, men hvor der er blevet 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 bedagede data kan være vigtige. Disse undersøgelser er typisk begrænsede rent geografisk og relaterer sig til et specifikt område. Undersøgelserne er typisk udført af kommuner, de tidligere amter, de statslige miljøcentre, DGU/GEUS og rådgivere. Se i øvrigt kap. 3.17 "Sammenstilling med andre geologiske modeller". Rapporterne vil ofte kunne hentes fra GEUS' rapportdatabase.

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 /2/ giver en overordnet tolkning af landskabsformerne, hvor der fokuseres på den geologiske tolkning af landskabet med udpegning af tunneldale, israndsbakker og smeltevandssletter m.v. Til nogle af disse landskabskort hører detaljeret litteratur. Af anden litteratur kan nævnes DGU's kortbladsanalyser, to gamle udgivelser af S. A. Andersen og V. Milthers (/3/ og /4/), og en ny af J. Krüger /5/, 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.

Regionale og landsdækkende geologiske tolkninger

Gennem årene er der udarbejdet en række kort med geologiske tolkninger, som 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).
- Kort over prækvarterets beskaffenhed, f.eks. /7/.
- Prækvarteroverfladens højdeforhold: Publicerede kort over den prækvarter overflade enten for Danmark som helhed /6/ eller for afgrænsede områder, f.eks. /8/.
- Kalkoverfladen: Kalkoverfladens morfologi er publiceret for Danmark i /9/, og herudover findes kort fra GEUS /10/, som også omfatter Nordsøområdet.
- Jordartskort: Jordartskort, som viser jordarterne i den øverste meter, er publiceret af GEUS, f.eks. /11/. Se kap. 3.13 "Jordarts- og jordbundsdata" for en videre beskrivelse.

Strukturer

Begravede dale på landjorden er kortlagt af de jysk-fynske amters grundvandssamarbejde, og resultaterne kan ses og downloades på /12/. For hver kortlagt lokalitet findes en geologisk beskrivelse af de begravede dale og de jordarter, som dalene er eroderet ned i.

Dybe forkastninger i den danske undergrund er f.eks. vist i /13/ og /14/.

3.11.3 Anvendelsen i den geologiske model

De eksisterende tolkninger af geologien vil normalt være baseret på tidligere indsamlet datamateriale. Selvom der ofte vil være nyindsamlede data til rådighed ved en konkret modelleringsopgave, er der hovedtræk, som ikke ændres nævneværdigt, og det er netop hovedtrækkene, som er værdifulde at få overblikket over i de indledende faser af modelopstillingen. De eksisterende tolkninger har typisk en større geografisk udbredelse end det aktuelle modelområde, og tolkningerne giver derfor ofte et nyttigt overblik over geologien i de tilstødende områder. Men det er vigtigt, at man altid forholder sig kritisk til de gamle tolkninger før man anvender dem som et led i modelopstillingen.

3.11.4 Referenceliste

- /1/ Sand-Jensen, K. & Larsen G. (ed.) 2006: Naturen i Danmark – Geologien; Bind 2. 552 sider, Gyldendal
- /2/ Smed, P. 1981: Landskabskort over Danmark. Geografforlaget.
- /3/ Andersen, S. A. 1933: Det danske landskabs historie. Levin & Munksgaard, København.
- /4/ Milthers, V. 1948: Det danske Istidslandskabs Terrænformer og deres Opstaaen. DGU III. rk. Nr. 28.
- /5/ 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*
- /6/ Binzer, K. & Stockmarr, J. 1994: Prækvartæroverfladens højdeforhold. Geologisk kort over Danmark, Kortserie nr. 44. København 1994.
- /7/ Håkansson, E. & Pedersen, S. S. 1992: Geologisk kort over den danske undergrund, Varv 1992.
- /8/ DGU. 1986: Prækvartæroverfladens højdeforhold. Kortblade 1216, 1316, del af 1215 Himmerland.
- /9/ Ter-Borch, N. 1987: Kalkoverfladens struktur. Skov- og Naturstyrelsen og DONG.
- /10/ 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.
- /11/ Hermansen B. og Jakobsen P.R. 2000: Danmarks Digitale jordartskort 1:25.000 version 2.0, Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelse, rap. nr 81.
- /12/ www.begravede-dale.dk
- /13/ Vejbæk & Britze. 1994: Top pre-Zechstein. DGU kortserie, nr. 45.
- /14/ Vejbæk. 1997: Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. Geologisk Tidsskrift, hft. 4, pp. 1-31.

3.12 Topografiske data

3.12.1 Generel beskrivelse

Ved topografiske data forstås i denne forbindelse data, der beskriver terrænets højdeforhold. Topografiske data har stor betydning i de geologiske tolkninger, da landskaberne afspejler geologiske hændelser og egenskaber ved jordlagene. 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 konturering af digitale højdedata.

3.12.2 Data

De topografiske data udgøres af:

- **Topografiske kort:** Topografiske kort udarbejdet af Kort & Matrikelstyrelsen (KMS) /1/ i forskellige målestokke:
- **Ældre topografiske kort:** Målebordsblade findes i målestok 1:20.000 og atlasblade i målestok 1:40.000. Kortene kan rekvireres hos KMS i scannet udgave. Kortene er opmålt og ajourført i perioden 1842 – 1940. Kortene har en stor detailrigdom og er specielt gode til detallostudier af højdekurvemønstre. 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.
- **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 højdedata:** Hidtil har højdedata kunnet fås som 25 og 50 m grids, som er baseret på de topografiske korts højdekurver. De digitale data giver derfor ikke mere detaljeret information end de topografiske kort. Men dataene giver mulighed for visualisering af de topografiske forhold på nye og varierede måder, og dette kan i mange tilfælde føre til ny indsigt, på grund af øget overblik. Nye data med væsentlig bedre opløsning er opmålt ved hjælp af laserscanning og kan rekvireres hos COWI.
- **Tolkede kort:** Af tolkede landskabskort er f.eks. Per Smeds landskabskort /1/ meget anvendt. Kortene er dog ikke alene lavet på baggrund af de topografiske forhold, men også jor-

dartsoplysninger m.m. For en nærmere beskrivelse af tolkede kort se kap. 3.11 "Eksisterende tolkninger".

3.12.3 Anvendelsen i den geologiske model

Topografiske data kan anvendes på flere måder i den geologiske model:

- Topografiske kort kan anvendes i den topografiske analyse, som ofte udarbejdes i forbindelse med en geologisk model (se kap. 3.31 "Indarbejdelse af landskabsanalyse i den geologiske model"). De meget detaljerede kort gør det muligt at udtrække information omkring dræningsforhold, tilstedeværelse af vådområder og vandløb, trends i kurvebilledet, den overfladenære geologi etc.
- Den digitale højdemodel kan anvendes i den digitale geologiske model. Højdedata-griddet importeres og udgør terrænoverfladen i modellen. Herudover kan den digitale højdemodel interpoleres og kontureres, så der opnås et terrænkort med farver og konturer, som bestemmes af brugeren.
- Tolkede landskabskort kan anvendes som støtte for de videre tolkninger af topografi og landskabsformer og der kan sammenstilles med jordartskort og andre GIS-temaer.

3.12.4 Referenceliste

/1/ www.kms.dk (Kort- og Matrikelstyrelsen)

/2/ Smed, P. 1979-82: Landskabskort over Danmark. Geografforlaget

3.13 Jordarts- og jordbundsdata

3.13.1 Generel beskrivelse

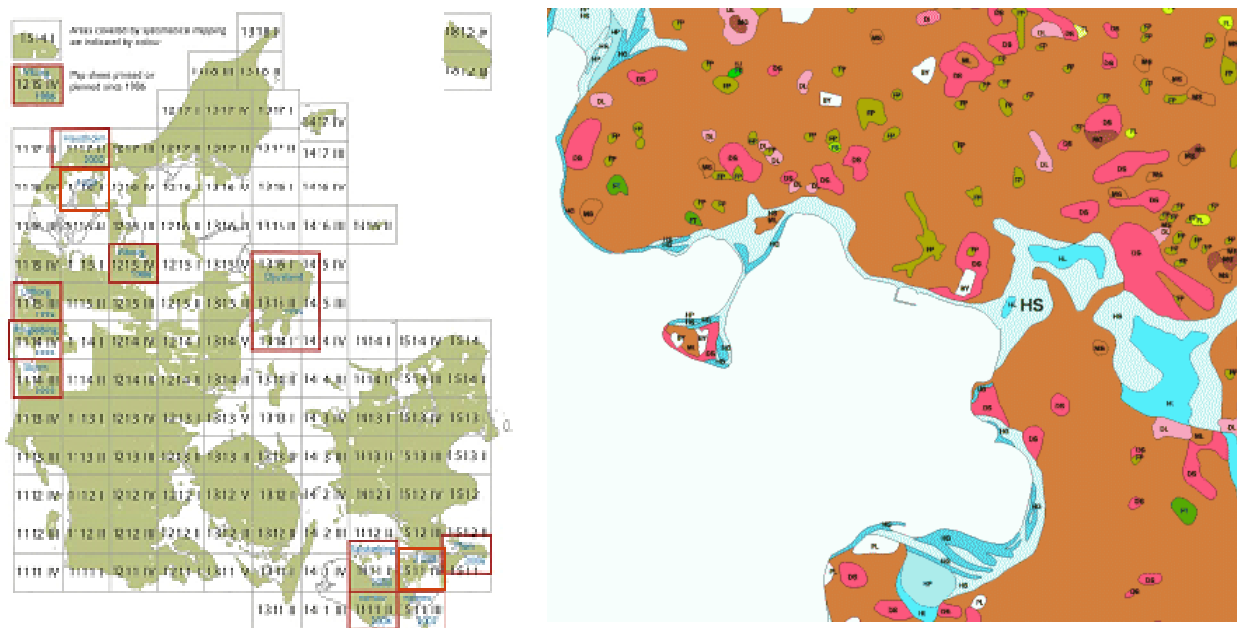
Jordarts- og jordbundsdata omfatter oplysninger om de helt overfladenære lag i Danmark /1/, /2/.

3.13.2 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 /3/. Kortet er endnu ikke fuldstændigt, men dækker ca. 84 % af Danmarks areal (se Figur 32). Jordarterne er opdelt i 67 forskellige kvartære samt 16 prækvartære jordarter. GEUS' officielle jordartsklassifikation og farvekode er benyttet.

Alle institutioner i Miljøministeriet og Klima- og Energiministeriet har brugsret til kortet. Øvrige kan erhverve brugsret til kortet ved køb eller anden aftale med GEUS.



Figur 32: Oversigt over områder der er kortlagt (grønne områder) samt udsnit af jordartskort 1:25.000.

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 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.

3.13.3 Jordbundskort

Simplificerede jordbundsdata findes i DJF's database og omfatter en simpel opdeling efter teksturen i pløjelaget /1/. Pløjelagets tekstur er inddelt i 8 farvekoder, se Tabel 7. Grænsedragning (for de otte farvekoder) er sket i samarbejde med landbrugets konsulenttjeneste samt Hedeselskabet på baggrund af 40.000 prøver udtaget i pløjelaget.

Tabel 7: Jordtyper opdelt efter tekstur i pløjelaget.

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					

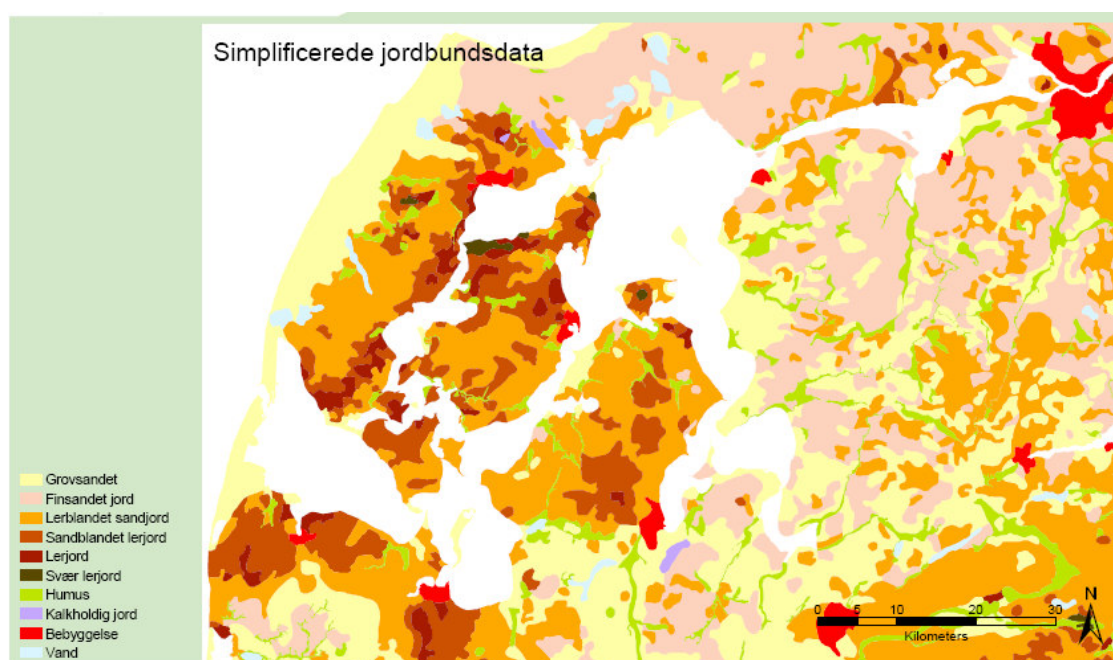
Resultaterne fra Den landsomfattende Jordklassificering er publiceret dels i form af et landsdækkede digitalt kort i 1:750.000 (se Figur 33) og dels i form af basisdata-kort i 1:50.000.

3.13.4 Anvendelse i den geologiske model.

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. morænelersområder i områder med variende lerindhold.

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



Figur 33: Eksempel på jordbundskort 1: 750.000 (eksemplet stammer fra /1/).

3.13.5 Referenceliste

- /1/ <http://www.djfgeodata.dk>
- /2/ <http://www.geus.dk/departments/quaternary-marine-geol/map-cd-rom/beskrivelse.pdf>
- /3/ Jakobsen P.R. og Hermansen B. 2007: Danmarks Digitale jordartskort 1:25.000 version 3.0 Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelse rap. nr 81.

3.14 Informationer fra blotninger

3.14.1 Generel beskrivelse

Informationer fra blotninger omfatter data indsamlet direkte i felten ved opmåling og inspektion af blottede profiler på typisk kystklinter, i råstofgrave eller udgravninger foretaget i forbindelse med anlægsopgaver og forureningsundersøgelser. I kap 3.11 "Eksisterende tolkninger" findes en beskrivelse af tidligere tolkninger udført i eller i nærheden af et modelområde, mens det følgende mere fokuserer på de konkrete informationer, der kan eller er blevet indsamlet fra blotninger i eller i nærheden af modelområdet. Informationerne kan være både målinger og data, og fungerer som datagrundlag ved modelleringen.

Fra observationer af blottede aflejringer kan man, i modsætning til boredata, få meget værdifulde oplysninger om bl.a. strukturer, laggrænser og deformationer.

3.14.2 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 (specialer 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 hos regionerne. Endelig findes meget detaljerede beskrivelser af blotninger i videnskabelige artikler.

Data indsamlet fra blotninger omfatter bl.a. lithologiske, palæontologiske, kemiske og strukturelle data. Disse data benyttes typisk til at tolke og klassificere jordlagenes dannelseshistorie og stratigrafiske placering.

3.14.3 Undersøgelsesmetoder

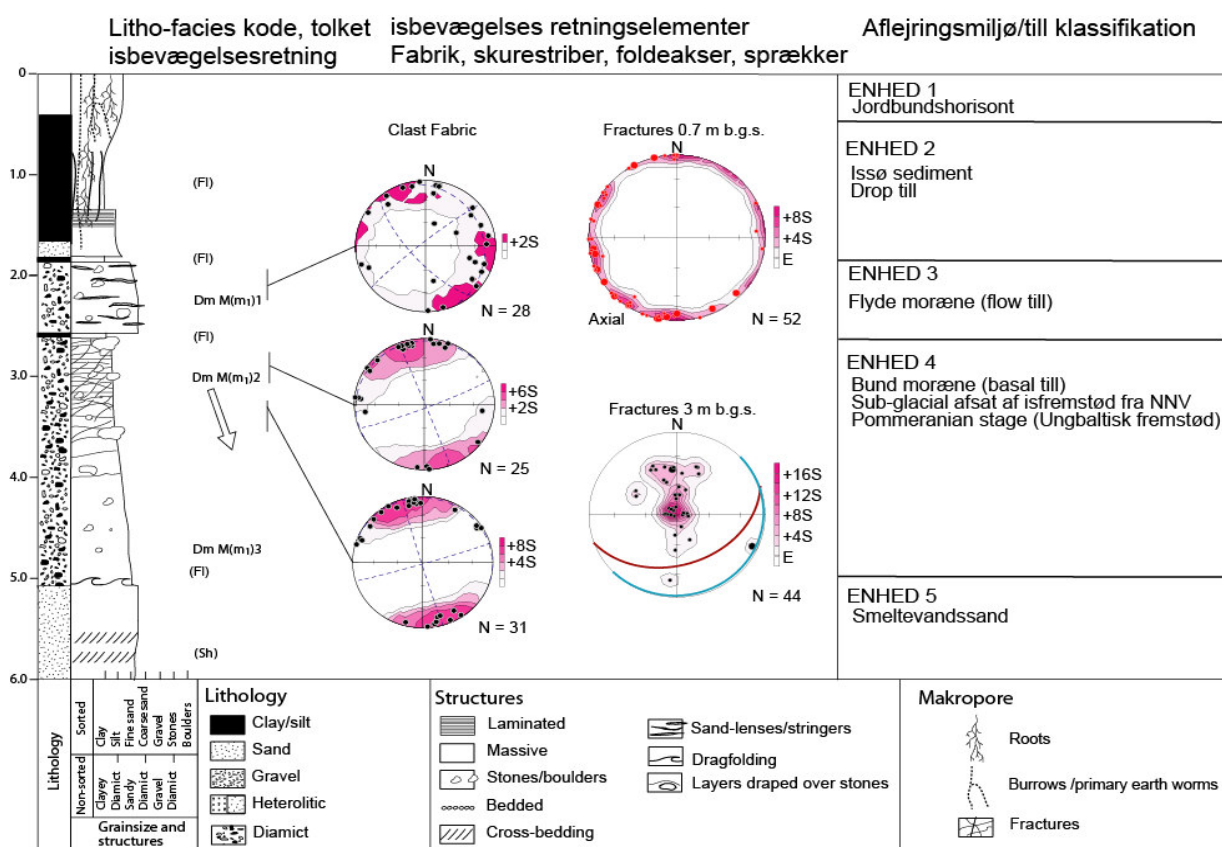
Undersøgelser af blotninger omfatter traditionel bjergartsbeskrivelse og tolkning af aflejringsmiljø /1/, og i glacielle aflejringer yderligere undersøgelser af bl.a. isbevægelsesindikatorer /2/, som f.eks. folder, forkastninger, sprækker /3/, skurestriber /4/ samt klast-fabric /5/. Disse data kan benyttes 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 /6/. Se også kap. 3.8 "Stratigrafiske data".

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 Luminiscens) anvendes på hen-

holdtvis organisk materiale og fluviale/æoliske aflejringer /8/. Marine sedimenter analyseres ud fra deres indhold af mikrofossiler, hvorimod pollenanalyse kan benyttes på søaflejringer.

3.14.4 Dataformat

De indsamlede data præsenteres dels systematisk i lithologiske logs (se Figur 34) og dels på profilskitser af blotningerne. Den lithologiske log /6/ tillader sammenligning af alle indsamlede data og danner baggrund for tolkning af aflejringsmiljø, for klassifikation af lithologiske enheder og for opstilling af en stratigrafi. Indsamlede data fra blotninger i flere forbundne profiler kan præsenteres som 3D blokdiagrammer, der giver den optimale visualisering af områdets geologi.



Figur 34: Eksempel på lithologisk log opmålt i udgravning på forurennet grund. Lithofacies kode efter /7/.

3.14.5 Anvendelsen 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, lithologiske, strukturelle og dannelsesmæssige forhold. Prækvartære og interglaciale aflejringer kan korreleres på baggrund af aldersdateringer samt bio- og lithostratigrafiske egenskaber. Stratigrafiske korrelationer kan i den geologiske model give grundlæggende oplysninger, som kan bidrage væsentligt til samtolkningen af de øvrige data i modellen.

3.14.6 Referenceliste

- /1/ 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.
- /2/ 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.
- /3/ Klint, KES., Abildtrup, CA., Gravesen, P., Jakobsen, PR., Vosgerau, H. 2001: Sprækkers oprindelse og udbredelse i moræner i Danmark. Vand og Jord 8, 3, pp.111-119.
- /4/ 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.
- /5/ 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.
- /6/ Kronborg, C., Bender, H., Bjerre, R., Friborg, R., Jacobsen, H.O., Kristiansen, L., Rasmussen, P., Sørensen, P.R. and Larsen, G., 1990: Glacial stratigraphy of East and Central Jutland. Boreas, 19, pp. 273-287.
- /7/ Krüger, J., Kjær K.H., 1999: A data chart for field description and genetic interpretation of glacial diamict and associated sediments - with examples from Greenland, Iceland and Denmark. Boreas, 28, pp. 386-402.
- /8/ 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.

3.15 Lagmodel

3.15.1 Generel beskrivelse

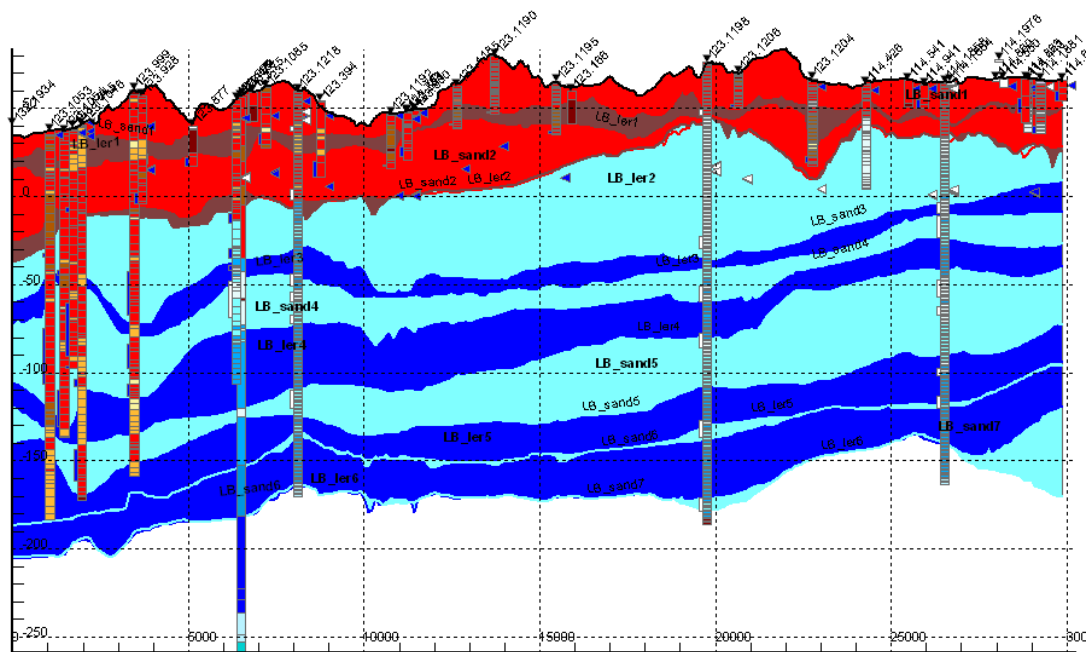
En lagmodel består i princippet af lagflader, som for hver enkelt lags vedkommende defineres af et sæt af vektorforbundne punkter i rummet. Disse punkter kan digitaliseres/tolkes ved hjælp af punkt-tolkning (se kap. 3.25 "Punkttolkning") og indarbejdes digitalt i modellen (se kap. 3.24 "Digital tolkning") ved hjælp af profiltolkning (se kap. 3.26 "Profiltolkning") og horisontaltolkning (se kap. 3.27 "horisontaltolkning").

Lagfladerne kan også tolkes ved hjælp af gridtolkning (se kap. 3.29 "Gridmodellering"), og ved denne proces indlægges der ikke fladetolkningspunkter i modellen. Fladetolkningspunkterne er dog vigtige at have i sin model, da disse udgør selve grundlaget i modellen. Ofte udføres der en interpolation af fladetolkningspunkterne og lagmodellen kan derfor, foruden de grundlæggende fladetolkningspunkter og eventuelle tolkede grids, også indeholde interpolerede gridflader.

På grundlag af de skabte flader defineres mellemrummene mellem fladerne som lag. Både lagene og lagfladerne tilknyttes diverse information om f.eks. tolkninger, beslutninger, datagrundlag og usikkerhed.

Lagmodellen står i kontrast til pixelmodellen (se kap. 3.16 "Pixelmodel"), hvor modelrummet deles op i pixels. Tolkningen i pixelmodellen består i at give hver enkelt pixel en eller flere geologiske/hydro-stratigrafiske karakteristika. I pixelmodellen er der ikke defineret lagflader ved hjælp af vektorforbundne punkter eller gridflader. Såvel rumlige geologiske modeller som hydrostratigrafiske modeller opstilles oftest som lagmodeller. Der kan godt opstilles en lagmodel, der efterfølgende konverteres til en pixelmodel.

Lagmodellen skal ikke nødvendigvis bestå af gennemgående lagflader/lag. I udgangspunktet tolkes der i den rumlige geologiske model kun lagflader/lag, når der er kendskab til disse, mens der i den hydrostratigrafiske model tolkes i hele modelrummet. Lag og lagflader kan afgrænses lateralt (se kap. 3.28 "Afgrænsning af lag og lagflader").



Figur 35: Eksempel på en hydrostratigrafisk lagmodel fra modelområde omkring Billund.

3.15.2 Fordele og ulemper

Fordele ved lagmodellen i forhold til pixelmodellen:

- Der er bedre mulighed for at placere laggrænser præcist
- Lagene kan få nøjagtige tykkelser
- En lagmodel er lettere at beskrive og dokumentere
- Der kan interpoleres/udtegnes lagflader fra modellen

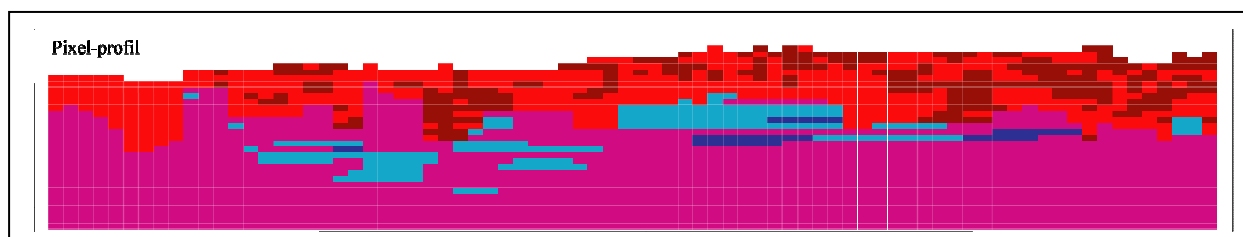
Ulemper ved lagmodellen i forhold til pixelmodellen:

- Det er vanskeligt digitalt at indarbejde komplekse og detaljerede strukturer i en lagmodel
- Langsommelig proces

3.16 Pixelmodel

3.16.1 Generel beskrivelse

Pixel-tolkning er et alternativ til lagmodeltolkning (se kap. 3.15 "Lagmodel"). Konceptet bag pixel-tolkning er, at modelområdet opdeles i pixler (kasser). Oftest har pixlerne en kvadratisk og uniform afgrænsning i det horisontale plan, f.eks. 1 x 1 km, 250 x 250 m eller 100 x 100 m, mens den vertikale diskretisering kan variere med dybden. Den færdige rumlige geologiske model eller hydrostratigrafiske model vil således bestå af et stort antal pixler, hvor hver pixel bør være tilskrevet tolkninger i form af f.eks. geologi, hydrauliske egenskaber, usikkerheder m.m. Et eksempel på en pixelmodel er illustreret i Figur 36.



Figur 36: Et profilsnit gennem en rumlig geologisk pixelmodel – i dette tilfælde tolket gennem hele modelrummet.

3.16.2 Fremgangsmåde

I en pixelmodel sker tolkningen ofte i horisontale intervaller, hvor antallet af intervaller er afhængig af den vertikale diskretisering. Tolkningen foretages ved at tilskrive tolkningsparametre for de enkelte pixler. Dette kan enten ske ved horisontaltolkning, på profiler, eller i et 3D-miljø. På nuværende tidspunkt (medio 2008) findes dog kun begrænsede funktionaliteter for pixeltolkning i de mest anvendte programmer. Til forskel fra lagmodellen, hvor der tolkes fladetolkningspunkter for en laggrænse (se kap. 3.25 "Punkttolkning"), foretages den tredimensionelle afgrænsning af de geologiske eller hydrostratigrafiske enheder således direkte i pixeltolkningen.

En væsentlig fordel ved pixeltolkningen er, at det er let at foretage tolkning af ikke-sammenhængende lag. I kraftigt geologisk forstyrrede områder kan hver enkel pixel principielt karakteriseres ved en unik geologisk enhed, uafhængig af de omkringliggende pixler, hvorved det er muligt at opløse en stor grad af geologisk heterogenitet.

Anvendelsen af uniforme pixelgrids har den ulempe, at det kan være svært at opnå en præcis afgrænsning af de geologiske/hydrostratigrafiske lag 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. Dimensionerne af pixlerne skal derfor vælges med omhu, med baggrund i modellens formål og den forventede heterogenitet i området. Tilsvarende forhold gør sig gældende med hensyn til den horisontale opløsning, hvor f.eks. smalle begravede

dalstrukturer ikke vil kunne fremgå i en pixelmodel med grov horisontal opløsning. Problemet med opløsningen kan i nogen grad imødegås ved anvendelsen af variable pixelgrids, f.eks. anvendes ofte en finere vertikal opløsning i den øverste del, hvor der oftest er mest geologisk information tilgængelig.

Der findes eksempler på, at der er benyttet en anden fremgangsmetode for opstillingen af pixelmodeller end den der er skitseret ovenfor. F.eks. er der ved opstilling af hydrostratigrafiske modeller bestemt en hydraulisk ledningsevne for de bjergarter der er gennemboret i modelområdet. For hver pixel, hvori der findes en eller flere borer med geologisk beskrivelse, er der beregnet en "effektiv" hydraulisk ledningsevne baseret på de geologiske enheder indenfor den pågældende pixel. Er der eksempelvis beregnet 70% ler, 20% sand og 10% grus indenfor en pixel, er der foretaget en vægtet midling af de hydrauliske ledningsevner for disse enheder. Denne fremgangsmetode kan ses som automatiseret metode til konstruktion af en hydrostratigrafisk model direkte, uden en indledende forståelsesmodel og rumlig geologisk model. Dette er imidlertid en problematisk metode, da geologiske strukturer med stor indflydelse på de hydrauliske karakteristika risikerer at blive overset ved en simpel beregning og interpolation af hydrauliske ledningsevner. Der bliver så at sige ikke udført en geologisk tolkning, og de synteses og observationer der fremkommer gennem den geologiske tolkning bliver ikke udnyttet.

3.16.3 Fordele og Ulemper

Fordele ved pixeltolkning i forhold til lagtolkning er:

- Det er lettere at indbygge komplekse og detaljerede strukturer i modellen
- Det er let at lave hurtige, overordnede modeller, som f.eks. kan danne grundlag for ressourceberegninger i stor skala

Blandt ulemperne hører:

- Den valgte pixelstørrelse sætter en grænse for, hvor præcist en geologisk eller hydrostratigrafisk enhed kan afgrænses. Jo mindre pixels der anvendes, jo bedre bliver opløsningen, men af praktiske/tekniske grunde kan der være en øvre grænse for, hvor fint et pixelgrid, der kan anvendes.
- Tolkningerne er vanskelige at dokumentere
- Der kan ikke vises/udskrives kort over lagflader og enheder
- Der findes p.t. ingen specialiserede tolkningsværktøjer indenfor dette felt

3.16.4 Usikkerheder

En særlig usikkerhed ved pixelmodeller er præcisionen, hvormed den rumlige struktur af de definerede enheder kan beskrives. Dette forhold afhænger delvist af den valgte pixelstørrelse, der således bør vælges med omhu.

3.17 Sammenstilling med andre geologiske modeller

3.17.1 Generel beskrivelse

I mange tilfælde findes der ældre geologiske modeller, som helt eller delvist dækker det aktuelle modelområde. Dermed er der mulighed for, at de ældre modeller kan bidrage til opstillingen af den nye geologiske model. Dette kræver dog stor varsomhed, da de forskellige ældre modeller sjældent er opstillet på den samme måde som det er planlagt for den nye model. Derfor er det vigtigt nøje at gennemgå de ældre modeller og sikre, at de dele der genanvendes, er udarbejdet på en måde, der matcher den nye model.

Ældre geologiske modeller kan findes på såvel papirform som på digital form. For papir-modellernes vedkommende er det typisk et antal profilsnit med påtegnede tolkninger samt udvalgte fladekort. For de digitale modeller vil det ofte være filer med fladetolkningspunkter genereret langs profiler eller på flader (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.15 "Lagmodel") – ofte ledsaget af interpolerede og konturerede versioner af de tolkede lagflader. Der kan ligeledes være tale om digitale pixelmodeller, hvor hver enkelt pixel indeholder en tolkning. Ældre geologiske modeller kan være alt lige fra beskrivelser af den geologiske opbygning på tekstform, over papirprofiler med rene geologiske tolkninger til digitale repræsentationer af flader i en lagmodel bestående af grundvandsmagasiner og mellem-liggende lerlag. Hertil kommer, at detaljeringsgraden kan være meget varierende.

De ældre modeller vil være ledsaget af skriftlig dokumentation af varierende detaljeringsgrad, men i nogle tilfælde findes der ingen eller kun sparsom dokumentation til materialet. I sådanne tilfælde vil modellen være næsten uanvendelig til sammenstilling med nye modeller. Selv en nyere og måske meget detaljeret model kan være umulig at genanvende, hvis ikke den er tilstrækkeligt dokumenteret. Andre væsentlige faktorer for, hvorvidt ældre modeller kan sammenstilles med nye modeller, er måden, hvorpå modellen er opbygget, og om modellen findes på et anvendeligt format.

3.17.2 Fremgangsmåde

For at kunne vurdere muligheden for at genbruge de eksisterende digitale geologiske modeller helt eller delvist, er det vigtigt bl.a. at gennemgå:

- Formålet med modellerne
- Modeltype
- Geografisk udbredelse
- Anvendte data
- Detaljeringsgrad
- Lagserie; antal og type af lag
- Usikkerhedsdokumentation

På baggrund heraf kan det afgøres, hvilke dele af modellerne, der kan genbruges i det videre arbejde. I tilfælde af flere overlappende modeller kan der på baggrund af gennemgangen foretages en prioritering, så der kun sker genanvendelse af den model, der bedst matcher den nye model.

Hvis der foreligger geologiske modeller, som blot består af beskrivelser sammen med enkelte figurer og skitser, kan disse indgå ved opstilling af den geologiske forståelsesmodel. Består modellen af papirprofiler (se kap. 3.23 "Papirtolkning") kan profilerne scannes og indlægges som et baggrundsbillede i det geologiske tolkningsprogram, og således fungere som støtte for de nye tolkninger i den geologiske model. Tilsvarende kan eventuelle fladekort scannes og indlægges som kortbaggrund (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning").

Ved digitale modeller vil det være fladetolkningspunkterne, der tages med fra de gamle modeller over i de nye. Fladetolkningspunkterne udgør grundlaget for evt. senere interpolerede flader. Er dokumentationen god for den ældre model, vil bl.a. tolkningsgrundlag, anvendte grunddata og usikkerheder være beskrevet for fladetolkningspunkterne. Med hensyn til anvendelse af interpolerede lagflader, bør der udvises varsomhed, med mindre de grundlæggende fladetolkningspunkter følger med sammen med detaljeret information om, hvordan fladerne er genereret. Fladerne repræsenterer interpolationer af tolkninger (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag"), hvor hverken de grunddata der indgår i tolkningen, de tolkede fladetolkningspunkter eller historikken for fladernes udarbejdelse nødvendigvis vil fremgå. Hvis fladerne alene hentes ind i den nye geologiske model uden selve dette grundlag for deres udarbejdelse, er de ubrugelige eller i bedste fald blot vejledende.

Ved geologiske modeller, som grænser op til hinanden uden overlap, kan der være store vanskeligheder med at få modellagene til at passe sammen, da usikkerheden på modellen ofte er størst i randen, hvor fokus normalt ikke har ligget. Har man kun interpolerede lagflader, vil det typisk være svært at få lagfladerne til at mødes, og derfor vil justeringer normalt være påkrævet. Anvendes de interpolerede lagflader blot som vejledning eller støtte for efterfølgende nye tolkninger, kan ovenstående problemstillinger imødekommes.

3.18 Modelafgrænsning

3.18.1 Generel beskrivelse

Modelafgrænsningen (modelranden) definerer afgrænsningen mellem det område, der skønnes nødvendigt at have med i modellen for løsning af den konkrete opgave, og de tilstødende områder, der ikke forventes at have indflydelse på løsningen.

3.18.2 Formål

Før modelopstillingen påbegyndes, skal der foretages en rumlig afgrænsning inden for hvilken de relevante data skal indsamles og den geologiske model (og den efterfølgende strømningsmodel) skal opstilles. Afgrænsningen foretages på baggrund af formålet med den konkrete opgave og områdets hydrologiske og geologiske karakteristika. Oftest vil det være nødvendigt at definere en modelafgrænsning, der er væsentlig større end det primære fokusområde for den pågældende opgave. Den geologiske tolkning tæt på modelranden vil typisk være behæftet med en væsentlig usikkerhed, da der ikke altid er indsamlet geologiske data uden for modelområdet. Foretages der derfor en afgrænsning meget tæt på det primære fokusområde, er der stor risiko for, at denne vil være fejlagtig, hvilket i høj grad vil have indflydelse på løsningen af opgaven. Skal der alene opstilles en geologisk model, kan det i mange tilfælde være tilstrækkeligt at foretage en afgrænsning ved at lægge en buffer rundt om fokusområdet.

Er formålet imidlertid opstilling af en grundvandsmodel, er det vigtigt, at der foretages en detaljeret analyse af de hydrologiske og hydrogeologiske forhold i området, da den hydrologiske interaktion mellem modellen og det omgivende miljø skal beskrives vha. modelranden og de anvendte randbetingelser. Så vidt muligt bør grundvandssystemets naturlige hydrologiske grænser derfor honoreres i forbindelse med afgrænsning af modelområdet (overordnede grundvandskel, udbredelse af magasiner, topografiske oplande, betydning af vandløbssystemer, vandindvinding m.m.). I praksis kan det dog være nødvendigt at begrænse eller trunkere modelområdets størrelse, således at der er behov for at specificere randbetingelser, der ikke er sammenfaldende med naturlige hydrologiske grænser i det givne system. Vigtige overvejelser i den anledning er, at området skal være så tilpas stort, at de valgte randbetingelser ikke får uønsket stor indflydelse på beregningsresultaterne.

De tre vigtigste randbetingelser, der anvendes i forbindelse med grundvandsmodellering, er listet i Tabel 8, hvor anvendelse og begrænsninger ligeledes er beskrevet kort. Denne tabel kan tjene som ledetråd i forbindelse med afgrænsningen af området, men den endelige afgrænsning bør diskuteres mellem geolog og grundvandsmodellør.

Tabel 8: Oversigt over typiske randbetingelser for grundvandsmodellering

Randbetingelse	Typisk anvendelse	Kommentar
Fastholdt tryk (First type eller Dirichlet rand)	Hvor grundvandspotentialet kan antages at være konstant, f.eks: vandløb (med konstant vanddybde), søer, hav, grundvandsskel, permanente grundvandssænkninger	God rand, let at benytte. Kan dog give stor vandfluks ind/ud af modellen, bør derfor kun anvendes hvor antagelsen om et konstant potentiale er rimelig
Specificeret flow (Second Type eller Neumann rand)	Hvor fluksen ind/ud over randen er kendt, f.eks: Grundvandsdannelse/nettonedbør, impermeable rande herunder grundvandsskel.	God ved impermeable rande, for øvrige vertikale rande kan det være svært at estimere en fluks, som samtidig ofte vil variere over den simulerede periode
Trykafhængig flux (Third type, eller Cauchy rand)	Hvor fluksen afhænger af den aktuelle gradient i potentialet, f.eks: vandløb med varierende vanddybde, dræn, tilstødende aquiferer der ikke er eksplicit præsenteret i modellen samt kildespring	God som intern rand, hvor potentiale/vandstand i vandløb beregnes. Mindre velegnet som ydre rand, da det kræver kendskab til potentialet udenfor modelområdet.

Som hovedregel bør effekten af de anvendte randbetingelser i en grundvandsmodel testes. Viser det sig, at randbetingelserne dominerer grundvandssimuleringer i en ikke acceptabel grad, kan det være nødvendigt at justere disse, evt. ved at flytte randen længere væk fra fokusområdet.

3.18.3 Usikkerheder

I forbindelse med den geologiske modellering vil placeringen af modelafgrænsningen typisk have mindre betydning for usikkerheden på den geologiske model. Omvendt vil valg af rand og randbetingelser have en væsentlig indflydelse på grundvandsmodelleringen, hvor simuleringsresultaterne kan være helt styret af de valgte randbetingelser, se /1/ for en nærmere diskussion heraf.

3.18.4 Referenceliste

- /1/ Brun, A. 2005: Kapitel 19, Metoder til usikkerhedsvurdering. I: Sonnenborg, T. O. & Henriksen, H. J. (eds.) 2005: Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2005/80 http://vandmodel.dk/handbog_gr-model_2005.htm

3.19 Prioritering og visualisering af data

3.19.1 Generel beskrivelse

Under selve arbejdet med at opstille den geologiske model, er der ofte behov for en prioritering 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 informationerne, uden at der skal prioriteres mellem hvordan og hvornår forskellige datasæt skal være aktive/synlige.

Der skal endvidere prioriteres eller sorteres mellem data inden for de enkelte datasæt. Denne sortering er beskrevet under bl.a. kap. 3.7 "Boredata".

3.19.2 Formål og fremgangsmåde

Dataprioritering

Dataprioriteringen afhænger af datasættets anvendelighed i den aktuelle situation samt af datatypen.

I en tolkningssituation skal der, alt efter anvendeligheden, 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. 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 også nedprioriteres i forhold til data af god kvalitet og med en god dækning.

Datavisualisering

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 TEM-sonderinger i udgangspunktet blot er stolper, som ikke dækker hele det vertikale plan. Seismikken "fylder" derfor mere i modellen end TEM-datasættet, 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 kan f.eks. vises ovenpå et seismisk profil ved at gøre farverne transparente, således at man kan se sort-hvid seismik nedenunder.

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.

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

3.20 Interpolation af data

3.20.1 Generel beskrivelse

For at skabe et overblik over data, kan det være fordelagtigt at udføre *interpolation*. 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. Griddet kan f.eks. farvelægges i forhold til de beregnede værdier og en valgt farveskala. Et grid kan også *kontureres*. Ved en konturering optegnes en række udvalgte konturlinier gennem griddet, og efterfølgende kan det fremkomne konturkort 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).

Langt størstedelen af den interpolation der foretages, sker i to dimensioner. Men med moderne software og stor computerkraft kan det også lade sig gøre at interpolere nogle typer af 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 jordvolumen 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 er dette geofysiske data, men det kan også være f.eks. grundvandspotentiale, udtræk af boredatabaser m.m. Der findes i /1/ en beskrivelse af, hvordan TEM-data kan interpoleres. De overordnede betragtninger heri kan også overføres til en række andre datatyper.

3.20.2 Interpolationsrutiner og procedurer

Der findes en lang række forskellige interpolationsrutiner, og inden for hver rutine er der en række indstillinger. Disse giver ofte meget forskellige resultater, og det er i en tolkningssituation nødvendigt at vide, hvordan interpolerede kort er udarbejdet. Der findes ingen generelle retningslinier for, hvordan interpolation bedst foretages, fordi procedurerne ideelt set afhænger af parametre som lokale geologiske forhold, datatæthed, måledybde, og ikke mindst formålet hvortil kort fremstilles.

Den hyppigst anvendte interpolationsrutine ved fremstilling af fladekort på baggrund af geofysiske data er *kriging*. Ved interpolation med Kriging anvendes *variogrammer*, som bestemmer, hvorledes datapunkternes værdier skal vægtes som funktion af afstand og retning. Ofte anvendes et lineært variogram som standard, men i princippet bør der ved kriging anvendes tilpassede variogrammer, som mere præcist tilpasser netop det datasæt, der skal griddes. Tilpassede anisotrope variogrammer kan f.eks. benyttes, når geologiske strukturer i bestemte retninger er fremtrædende. Et problem

med anvendelse af tilpassede variogrammer er dog, at der i et modelområde/kortlægningsområde normalt findes flere forskellige geologiske opbygninger og dermed geografisk varierende datafordelinger. Herved risikerer man f.eks. at generalisere troværdige detaljer væk i nogle områder og fremhæve ikke-eksisterende trends i andre områder. En anden udbredt og meget anvendelig interpolationsrutine til geofysiske data er *Inverse Distance*. Heri anvendes ikke variogrammer.

Som ovenfor nævnt findes der en række forskellige indstillingsmuligheder ved interpolation. Bl.a. har valget af *cellestørrelse* og *søgeradius* betydning. Disse størrelser bør bl.a. varieres i forhold til den undersøgte geologi. Ved stor søgeradius medtages informationer fra mange datapunkter, mens der ved en lille søgeradius kun medtages informationer fra få datapunkter. Den store søgeradius midler værdierne ud, og ekstremiteter dæmpes, mens en lille søgeradius i højere grad fremhæver ekstreme værdier. Også valget af *cellestørrelse* har indflydelse på det færdige resultat. Ved en lille *cellestørrelse* er der mulighed for at fremhæve uregelmæssigheder i data, mens en stor *cellestørrelse* vil udjævne uregelmæssigheder.

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

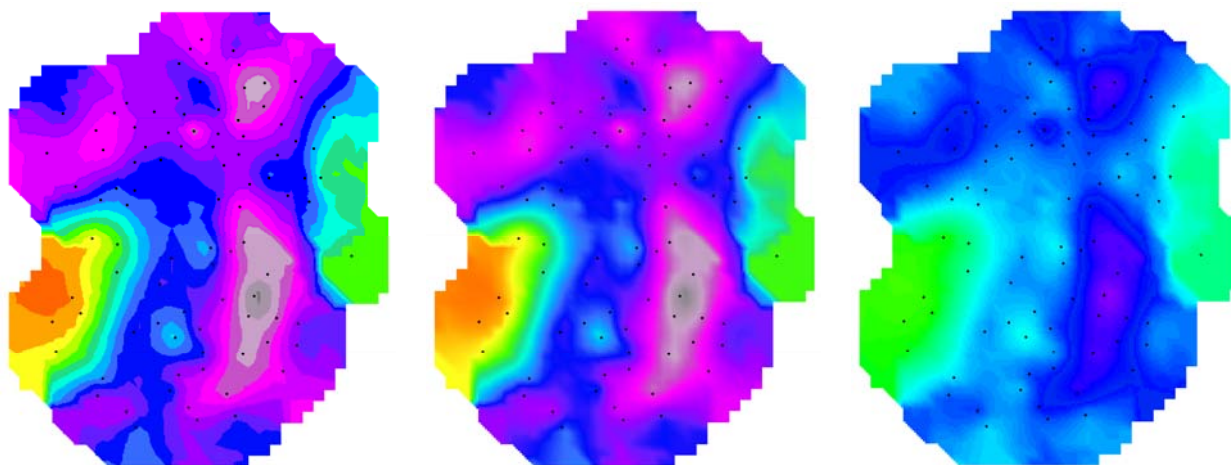
Er formålet med interpolationen at fremhæve store strukturer, vælges f.eks. store søgeradier og *cellestørrelser*, mens det modsatte gælder, hvis man gerne vil fremhæve små strukturer. Spørgsmålet er selvfølgelig altid, om der er korrelation mellem datapunkterne, og hvor langt man kan tillade sig at interpolere. I inhomogene områder er der ofte ringe eller ingen korrelation mellem f.eks. PACES-målinger med indbyrdes afstande på 250 m (mellem målelinier). Her bør man således vælge mindre søgeradier, 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 (se kap. 3.2 "TEM").

3.20.3 Iterativ arbejdsgang

Datainterpolation bør i udgangspunktet 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 gradvist målrettes de geologiske forhold og den geologiske forståelse af det aktuelle område. Typisk kan man ved finpudsning og målretning af interpolationsproceduren gradvist opnå bedre og bedre indblik i den geologiske opbygning.

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. Ofte bliver griddet kontureret med relativt få intervaller, og intervallerne bliver farvelagt. Fordelen ved at arbejde med diskrete farveskalaer er, at eventuelle trends og forskelle fremhæves og bliver lettere at overskue (se Figur 37). Ulempen er, at detaljer bliver mindre synlige, hvis deres værdier befinder sig langt fra konturliniernes værdier.

Valg og tilpasning af farveskala er ligeledes af stor betydning for den geologiske tolkning og bør også fastlægges ved en iterativ proces (se Figur 37).



Figur 37 Eksempel på forskellig visualisering af samme grid. Til venstre er griddet kontureret med diskret farveskala af 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 kontinuert farveskala med et smalt farvespektrum.

3.20.4 Usikkerheder

Der bør knyttes stor opmærksomhed til, hvordan ethvert interpoleret datasæt er fremkommet, hvis det benyttes ved geologisk tolkning og modelopstilling. Hvis ikke modelløren har en viden om konstruktionen 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 dårligt valgte 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.

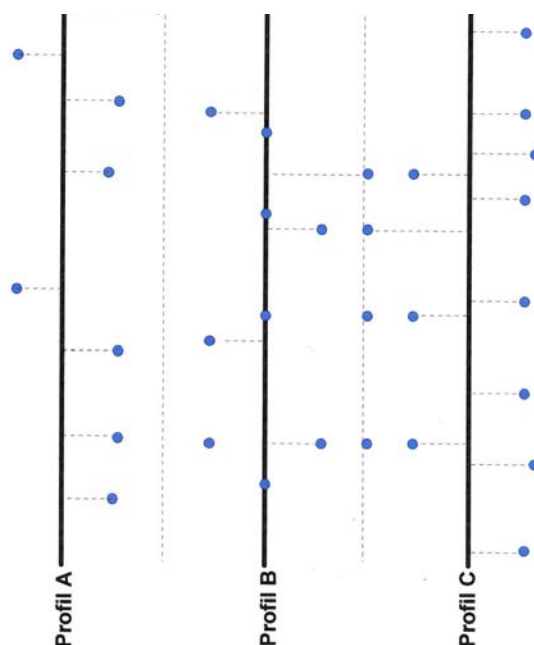
3.20.5 Referenceliste

/1/ GeoFysikSamarbejdet 2003: Anvendelse af TEM-metoden ved geologisk kortlægning.

3.21 Profilnetværk og projektionsafstande

3.21.1 Generel beskrivelse

Tilgangen til opstilling af en geologisk model kan variere fra situation til situation. I de fleste tilfælde bygges modellen dog op omkring et profilnetværk, som på passende måde dækker modelområdet. Profilerne danner udgangspunkt for en optegning/digitalisering af de laggrænser og lag som skal definere modellen. Ofte arbejdes med et regulært net af linier evt. suppleret med mere irregulære linieføringer. Andre gange arbejdes udelukkende med irregulære netværk af profiler. Det mest hensigtsmæssige profilnet for en given model er imidlertid ikke defineret på forhånd, idet profilernes



Figur 38 Projektion af datapunkter til profiler.

antal og geografiske indplacering er en afvejning af flere forhold så som modellens detaljeringsgrad, antal og type af borer, geofysiske data og forekomst af geologiske strukturer.

Data vil normalt blive projiceret vinkelret ind på det geologiske profil og det enkelte datapunkt vil derfor ikke vises og indgå i tolkningerne på det korrekte geografiske sted, se Figur 38. Afhængig af den valgte projektionsafstand (også kaldet "bufferafstand"), 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 den projektionsfejl, der opstår, herved minimeres. Men af praktiske grunde kan det være vanskeligt helt at undgå projektion af data. Hvis det ikke er muligt at undgå store projektionsafstande, er det vigtigt, at problemstillingen beskrives og at det vurderes, hvilke konsekvenser det har for de geologiske tolkninger.

3.21.2 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 profilinier placeret på tværs af vigtige strukturer og gennem dybe velbeskrevne borer. Dernæst kan der dannes et profilnet, der dækker hele modelområdet. Profilnettet skal placeres hensigtsmæssigt, idet der skal foretages en korrelation af data og tolkede flader, dels langs de enkelte profiler og dels mellem profilerne indbyrdes (dvs. i alle 3 dimensioner). Profilnettet kan opbygges fra starten af modelarbejdet, men kan også opbygges undervejs. Normalt vil man indledningsvist optegne et dækkende netværk af profiler, hvori man så vil udføre de grundlæggende tolkninger. Herefter kan der så udlægges supplerende profilinier, som

tilfredsstiller nye synsvinkler og opfattelser af data og modelområde opnået under den indledende modelopstilling. Endvidere kan der være behov for at udtegne profilinier alene ud fra et behov for få digitaliseret yderligere fladetolkningspunkter, således at den flade der arbejdes bliver tilstrækkeligt rumligt modelleret (se kap. 3.24 "Digital tolkning" og kap. 3.25 "Punkttolkning").

Det vil normalt være fordelagtigt at placere profilinier langs geofysiske undersøgelsesprofiler. Dette kan f.eks. være langs seismiske linier, MEP-linier eller SkyTEM-linier. Dette gøres for at undgå projektionsafstandene, således at det er de korrekte geometriske forhold af dataene der bliver visualiseret på profilet, og så det lettere bliver muligt at placere sine fladetolkningspunkter i de rigtige rumlige positioner.

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

Projektionsafstand i forhold til geologi:

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

Projektionsafstand i forhold til data-tæthed:

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.

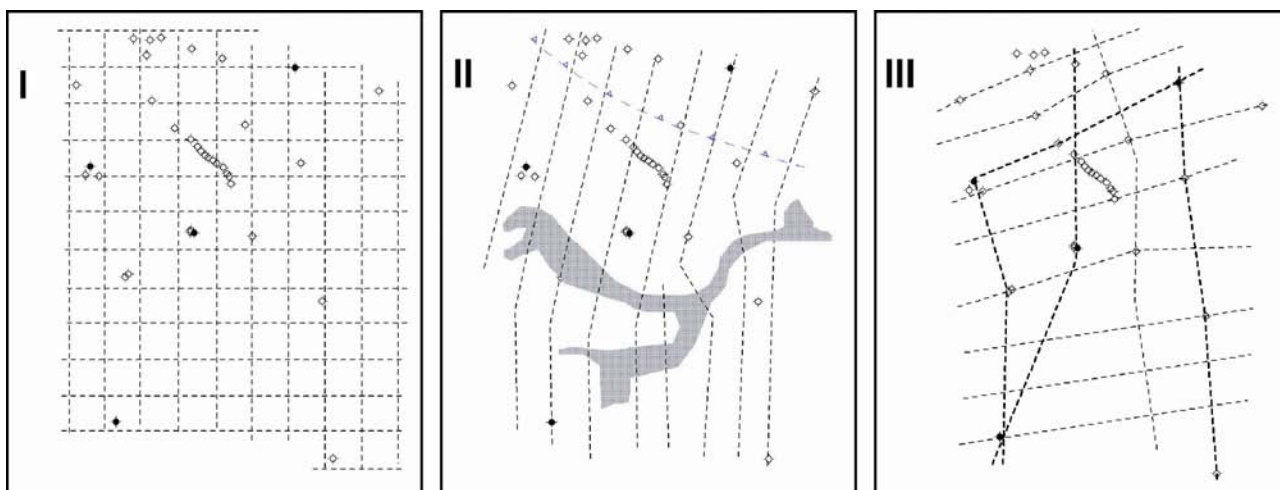
Projektionsafstand i forhold til datatype:

Projektionsafstanden anbefales som udgangspunkt at være individuelt fastlagt for hvert enkelt datasæt – afhængig af fokusdybden. Jo mindre fokusdybden for datasættet er, desto mindre bør projektionsafstanden være. Hvis man f.eks. sammenligner TEM og PACES (se kap. 3.2 "TEM" og kap. 3.3 "PACES") vil TEM primært fokusere på store dybder med midlinger over store jordvolumener, mens det modsatte gælder for PACES. Derfor kan man 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. Herved vises de interpolerede værdier på profiliniernes position (se kap. 3.2 "TEM").

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, men 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 projiceres ind på mindst ét profil. På den måde sikrer man, at alle vigtige data faktisk kommer med i modeltolkningerne. 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.

3.21.3 Netværkstyper

Når der udlægges 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 39). Det irregulære profilnetværk vil typisk give profiler med knæk, og projektionsafstanden kan være lille. 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.



Figur 39 Netværkstyper. I: Regulært netværk. II: Irregulært netværk udlagt i forhold til geologi. III: Irregulært netværk udlagt i forhold til data (udarbejdet af John Vendelbo Frandsen, Orbicon).

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

Regulært profilnetværk

Når der arbejdes med regulære profilnetværk betyder det normalt, at der må accepteres relativt store projektionsafstande. Der skal for hver enkelt datatype vælges projektionsafstande, som er fælles for alle profiler i modelområdet, og som søger at imødekomme ønsket om på den ene side at undgå for store projektionsafstande for at bibeholde geologisk korrelation mellem datapunkt og profilinie, og på den anden side for at opnå tilstrækkeligt med data på profilerne, således at geologien langs disse kan visualiseres tilstrækkeligt til, at der kan opnås en geologisk forståelse.

Fordelen ved at anvende det regulære profilnetværk med fastlagte projektionsafstande 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 med en sortering af data på profilerne. Afhængig af projektionsafstanden, kan der stedvist fås så mange data ind på profilet, at disse plottes oven i hinanden.

Irregulært profilnetværk

I det irregulære netværk lader man profilernes placering styre af, hvor data er placeret, 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 profillinier, bør linierne have et nogenlunde retlinet forløb gennem modelområdet, da muligheden for at opnå et overblik over de geologiske forhold langs de enkelte profiler ellers vil gå tabt. Det er normalt ikke muligt at lade profilerne gå direkte gennem alle datapunkter, og derfor må der foretages en prioritering mellem hvilke data der er vigtigst at minimere projektionsafstanden til. Det kan eksempelvis vælges, at profilerne går fra boring til boring, hvorved de geofysiske data nødvendigvis må projiceres ind på profilerne.

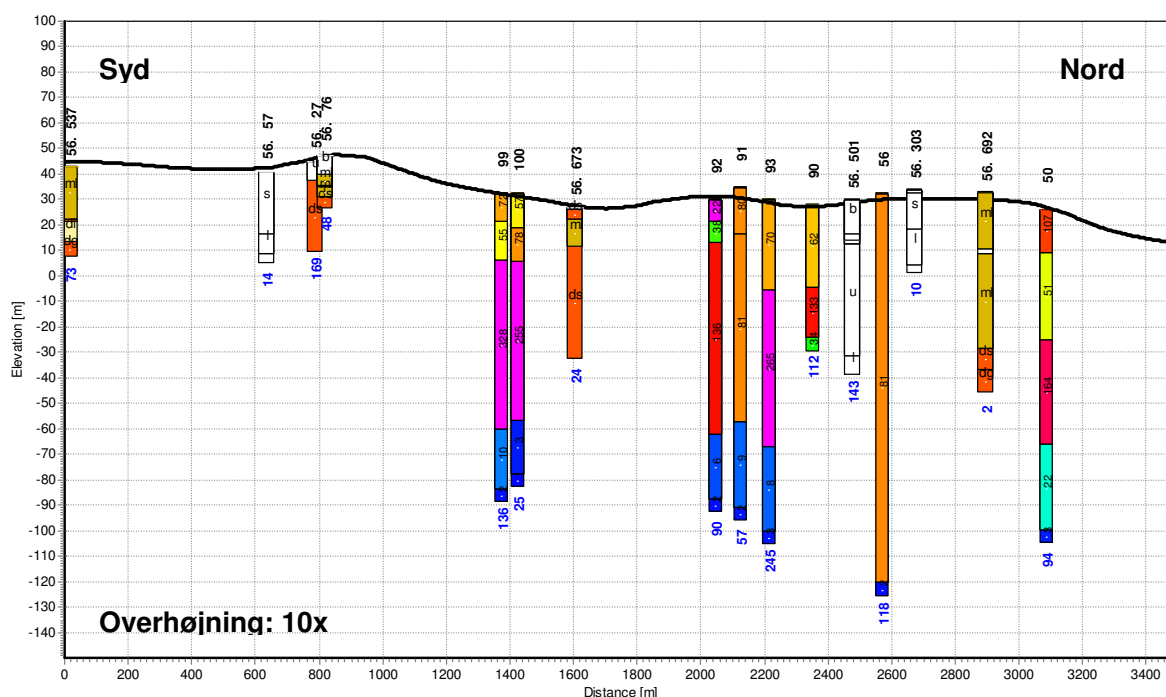
3.21.4 Usikkerheder

Ved projektion af data ind på profilet vil der, hvis der ikke i tolkningen tages højde for det, påføres en usikkerhed på tolkningen. Dels giver projektionen et forvrænget billede af geologien netop langs profillinien, som jo er den der skal modelleres, og dels kan fladetolkningspunkterne blive placeret forkert i forhold til de betragtede data. Ved anvendelse af digitale tolkningsværktøjer kan tolkningspunkterne snappes til datapunktet uanset afstand fra profilet, hvorved sidstnævnte usikkerhed kan minimeres (se kap. 3.25 "Punkttolkning").

3.22 Profiloptyegning

3.22.1 Generel beskrivelse

Som grundlag for den geologiske tolkning bliver modelområdet traditionelt synliggjort i horisontale og vertikale planer. På disse planer vises de data, der danner basis for tolkningerne. De vertikale planer kaldes "profiler", (se Figur 40) og det er her man normalt tilknytter sine fladetolkningspunkter (se bl.a. kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.26 "Profiltolkning"). Ved tolkning i et 3D-miljø spiller profilerne en mindre betydningsfuld rolle, da man her ikke er bundet til de vertikale og horisontale planer (se kap.3.30 "3D-visualisering og tolkning").



Figur 40 Eksempel på optegnet profil med borer og TEM-sonderinger. Projektionsafstande er angivet under data-stolperne. Modstandsværdier og lithologi er angivet med labels.

Der skal tages stilling til en række forskellige ting ved profiloptyegning. Bl.a. datavisualisering (se kap. 3.19 "Prioritering og visualisering af data"), projektionsafstande (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande"), profilplacering (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande") samt overhøjning.

Overhøjning

For at kunne overskue et modelområde på et profil, er man normalt nødsaget til at optegne profilet med vertikal overhøjning. Dette forvrænger virkeligheden kraftigt og geologiske strukturer får unaturlige former. Det vil sige, at man ved tolkning skal have en imaginær forståelse af, hvordan strukturerne ser ud i data, og man skal kunne forme tolkede strukturer med den benyttede overhøjning. Dette

betyder, at man altid skal forsøge at begrænse overhøjningen mest muligt. Overhøjninger på mere end omkring 10× er vanskelige at håndtere, hvis man stadig vil kunne genkende geologiske strukturer i sine data.

Datavisualisering

De forskellige datatyper skal visualiseres forskelligt på profilerne. Typisk vil sonderinger og boringer bedst kunne vises som farvelagte stolper opdelt i lag. For boringers vedkommende benyttes GEUS' officielle jordartsfarvekode og ved geofysiske sonderinger benyttes Geofysiksamarbejdets standardsskala i udgangspunktet /1/. Resultater fra borehulslogs vises typisk med smalle lodrette grafer. Punktdata, som f.eks. vandkemi kan vises ved hjælp af farvetematiserede punkter eller evt. som "møllehjul". Kontinuerte data, som f.eks. seismik dækker hele det vertikale plan, men man kan evt. lave nogle af disse datatyper transparente, hvis der forefindes flere forskellige kontinuerede datasæt, som dækker hinanden. Seismiske profiler kan evt. tages ind på profilet som billedfiler, og det samme kan eksisterende tolkninger, som f.eks. scannede håndtolkede profiler. Fladekort, som f.eks. potentialekort eller prækvartæroverfladen kan vises som streger på profilerne ved hjælp af grids. Desuden kan lag eller data i koteintervaller/horisontale snit vises ved hjælp af farvetematiserede lag (se evt. kap. 3.2 "TEM") eller farvetematiserede streger. Jordartskortet kan vises som en 1 m tyk farvetematiseret streg langs terrænoverfladen.

Layout

Layoutet på profilet bør indeholde:

- læsbare aksekskalaer med meterangivelser
- legender for benyttede skalaer
- projektionsafstande for boringer og sonderinger
- terrænoverfladen på baggrund af et 25 m grid
- eksakte værdier på tematiserede data
- navne på datapunkter
- verdenshjørner
- angivelse af overhøjning
- skæring af andre profiler
- Et lille kort der viser profilets beliggenhed

Der bør i tolkningsprogrammet være mulighed for, i løbet af tolkningsprocessen, at fravælge og tilvælge både enkelte data samt hele datasæt. Dette er nødvendigt for at kunne for at øge overskueligheden. Det bør 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 forskellige tolkningspunkter, usikkerhedsvurderinger og anden dokumentation (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger").

3.22.2 Referenceliste

/1/ www.geofysiksamarbejdet.au.dk

3.23 Papirtolkning

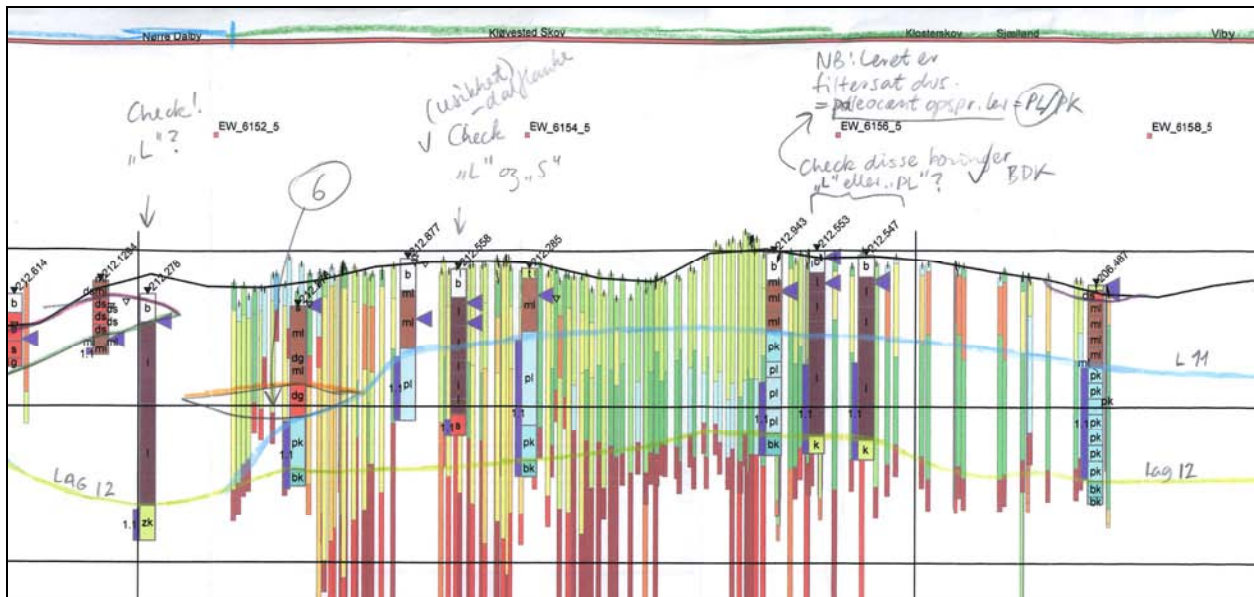
3.23.1 Generel beskrivelse

Software til opstilling af geologiske modeller gør det i dag muligt at foretage stort set alle dele af arbejdet digitalt (se kap. 3.24 "Digital tolkning"). Men ved geologiske modeller med mange profiler kan det dog ofte vise sig at være vanskeligt at overskue modellen i det digitale rum alene. Derfor kan der være fordele ved at foretage de geologiske tolkninger på papirudskrifter, da overskueligheden kan øges, og da tentative tolkninger kan tegnes ind med løs hånd inden overførsel til den digitale version. Hvis der kun arbejdes digitalt og man f.eks. kommer i den situation, at opfattelsen af den geologiske opbygning ændres undervejs i tolkningsprocessen, kan det i nogle tilfælde medføre en tidskrævende digital redigering. I andre tilfælde kan det være vanskeligt at styre fremdriften i de geologiske tolkninger i det digitale rum, da foreløbige tolkninger, noter og henvisninger til andre profiler kan være svære at håndtere digitalt. Alle disse ting afhænger naturligvis af anvendeligheden af de digitale tolkningsprogrammer. Man må derfor påregne, at fordelene ved papirtolkning mindskes gradvist efterhånden som de digitale programmer forbedres.

3.23.2 Formål og praktisk udførelse

Anvendelse af papirtolkning har bl.a. til formål at øge overskueligheden for geologen, men den kan samtidig også øge overskueligheden for de øvrige personer, som er inddraget i arbejdet. Hvis arbejdsprocessen involverer statusmøder, hvor den geologiske tolkning skal evalueres og diskuteres i en projekt- eller følgegruppe, så kan papirversioner af profiler og kort med på tegnede tolkninger i mange tilfælde være lettere at overskue end digitale tolkninger på en skærm. Herudover giver papirversionen – som kan kaldes "den analoge model" – muligheden for at dele arbejdet op, således at én geolog kan udføre den analoge model og en anden geolog kan stå for at overføre denne til en digital version. Denne proces åbner op for, at hele modelarbejdet ikke nødvendigvis skal udføres af en og samme person, og at der kan indlægges kvalitetssikrings-milepæle undervejs i modelopstillingen.

Rent praktisk kan den analoge model udarbejdes, når data er indlagt i det digitale tolkningsværktøj og de geologiske profiler er defineret. De geologiske profiler – med data og uden tolkninger - kan herefter printes ud med samme målestok og overhøjning (se kap. 3.22 "Profiloptegning"). Herefter kan geologen påbegynde tolkningsarbejdet på papirprofilerne. Der vælges farvekoder for laggrænser og eventuelt liniestil for forskellige sikkerhedsniveauer på tolkninger. Der kan tegnes skitser, som ikke nødvendigvis er en del af de tolkede laggrænser. Endvidere kan der udtegnes fladekort med data, hvorpå skitser og tolkninger også kan optegnes (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Når alle profiler er tolkede og alle profilskæringspunkter er kontrolleret, kan tolkningerne kvalitetssikres og herefter overføres til en digital version (se kap. 3.24 "Digital tolkning", kap. 3.25 "Punkttolkning", kap. 3.26 "Profiltolkning" og kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). De påtegninger, som geologen har foretaget på profilerne (se Figur 41) og kort, afrapporteres skriftligt for hvert profil (se kap. 3.35 "Dokumentation"). Det vil også være gavnligt, hvis alle de håndtolkede papirprofiler scannes og gemmes digitalt sammen med de tilsvarende profiler i den digitale model.



3.24 Digital tolkning

3.24.1 Generel beskrivelse

Digital tolkning står i modsætning til den traditionelle analoge tolkning (se kap. 3.23 "Papirtolkning"). Ved digital tolkning forstås tolkning på computer. Dette sker i geologisk tolkningssoftware, hvor det er muligt at definere tolkningspunkter i rummet. Tolkningspunkterne defineres således i 3 dimensioner med et sæt geografiske koordinater (x, y) og en kote (z) (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Dette kan enten gøres ved at definere punkter på vertikale planer (se kap. 3.26 "Profiltolkning") og i horisontale planer (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Punkterne kan ved tolkningen tilknyttes værdier, tekst, usikkerheder, m.v. Den digitale tolkningsprocedure foregår i princippet på samme måde som den traditionelle papirtolkning (se kap. 3.23 "Papirtolkning"), dvs. med optegning af profiler og kort. Den digitale udvikling muliggør dog allerede direkte tolkning i 3D-miljøer, hvilket skaber nye rammer og procedurer for geologisk tolkning (se kap. 3.30 "3D-visualisering og -tolkning").

Der defineres indledningsvist, bl.a. på basis af den geologiske forståelsesmodel, en række lag og lagflader, som tolkeren ønsker at modellere. Disse lag kan også defineres hen ad vejen, når den geologiske forståelse af modelområdet gradvist øges. Lagene og laggrænserne tolkes ved hjælp af punkttolkning eller i særlige tilfælde ved gridtolkning (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.29 "Gridmodellering") og kan være gennemgående eller begrænsede i udbredelse. Lagene og laggrænserne tilknyttes information om f.eks. usikkerhed og lithologi. De tolkede digitale punkter lagres i en tolkningsdatabase. Når tolkeren vurderer, at punkterne korrelerer og danner grundlag for interpolation, kan der dannes et grid (se kap. 3.38 "Interpolation og konturering af tolkede flader og lag") og lagfladen kan visualiseres og valideres på både profiler og kort. Inspektion og validering af de dannede lagflader foregår nemmest i et 3D-visualiseringsprogram.

Den digitale tolkning kan udføres direkte på grundlag af digitale data, eller der kan tages udgangspunkt i en foregående papirtolkning. I sidstnævnte tilfælde får den digitale tolkning mere karakter af en digitalisering af papirtolkningen.

3.24.2 Formål

Formålet med den digitale tolkning er ligesom for papirtolkninger, at tolke relevante data med henblik på at opstille en rumlig geologisk model og/eller en hydrostratigrafisk model.

3.24.3 Usikkerheder og dokumentation

Som en del af den digitale tolkning skal der laves usikkerhedsvurderinger og grundig dokumentation med beskrivelser af overvejelser, valg/fravalg, antagelser, osv. (se kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger" og kap. 3.35 "Dokumentation"). Der kan med fordel laves en tolknings-logbog.

3.25 Punkttolkning

3.25.1 Formål og generel beskrivelse

Punkttolkning er et grundlæggende element i den geologiske modellering. Med punkttolkning menes digitalisering eller afsætning af tolkede punkter i rummet. Disse punkter benævnes fladetolkningspunkter og anvendes normalt til at angive beliggenhed af geologiske og hydrostratigrafiske laggrænser. Ved placering af ethvert fladetolkningspunkt hører en tolkning og en antagelse af tilstedeværelsen af en laggrænse i netop det valgte sted i modelrummet. Fladetolkningspunkterne er den geologiske models grundlag, og punkterne kan interpoleres til lagflader (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede lagflader"). Hovedparten af arbejdet med punkttolkning foregår ved tolkning på vertikale profiler (se kap. 3.26 "Profiltolkning"), men der kan også laves punkttolkning i kortplanet (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning") og i egentlige 3D tolkningsmiljøer (se kap. 3.30 "3D-visualisering og tolkning").

3.25.2 Terminologi og definitioner

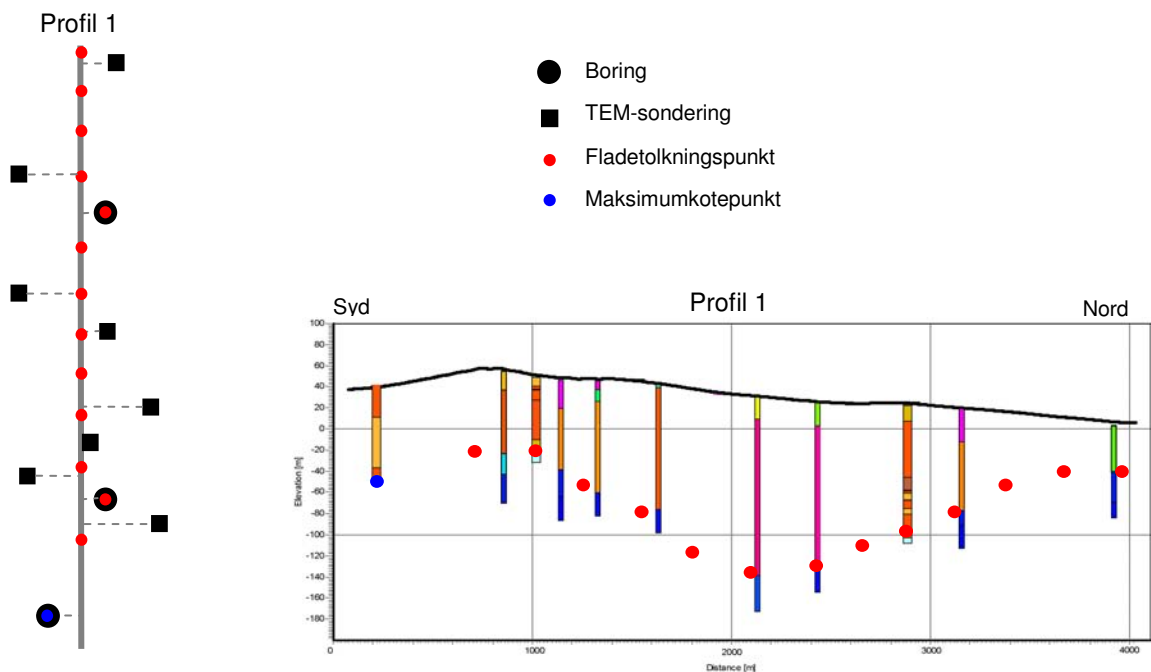
Der findes flere forskellige typer af digitale tolkningspunkter og disse kan inddeles i fladetolkningspunkter og hjælpepunkter:

- **Fladetolkningspunkter:**
 - **Snappede fladetolkningspunkter:** Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet. Et snappede fladetolkningspunkt 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 fladetolkningspunkter:** Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet. Et frit fladetolkningspunkt har i modsætning til det snappede fladetolkningspunkt ingen præcis tilknytning til datapunkter men tilknyttes et vertikalt profilsnit eller et horisontalt kortsnit.
 - **Støttende fladetolkningspunkter:** Definerer en tolket position af en flade eller lag i rummet. Et støttende fladetolkningspunkt er et frit fladetolkningspunkt, der alene benyttes, hvis man i en senere fase ved interpolation ønsker at omdanne sin punkt-sværm til grids. Støttende fladetolkningspunkter anbringes på steder, hvor man ønsker at styre sit grid på en forudbestemt måde.
- **Hjælp punkter:**
 - **Afgrænsningspunkter:** Afgrænsningspunkter definerer den laterale udbredelse af en laggrænse eller et lag.
 - **Negativpunkter:** Negativpunkter er en særlig type hjælpepunkter, der anvendes ved afgrænsningsproceduren.
 - **Maksimumkote punkter:** Et maksimumkote punkt definerer, at den tolkede laggrænse ligger dybere end punktet. Med andre ord vil det sige at den tolkede laggrænse ikke er 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.

Fladetolkningspunkter benyttes alle til at definere og modellere laggrænsers former. Det er disse punkter, der indgår ved en eventuel interpolation af lagfladen/laggrænsen. De snappede fladetolkningspunkter vil normalt have den største grad af sikkerhed, idet de knytter sig til definerede datapunkter i modelrummet. De støttende fladetolkningspunkter vil have den mindste grad af sikkerhed, da de, efter at selve tolkningen med de snappede og frie fladetolkningspunkter er blevet færdiggjort, alene anvendes ved udformningen af 3D-grids. De benyttes primært ved opstillingen af hydrostratigrafiske modeller, hvor der tolkes i hele modelrummet, og således også i datasvage og usikre områder. Afsætningen af støttende fladetolkningspunkter kan dog også foregå i en iterativ proces som en mere integreret del af tolkningsarbejdet.

Hjælpepunkterne er ikke punkter, der definerer lagfladernes rumlige former. Disse punkter anvendes som en hjælp i modelleringsarbejdet. I Figur 42 ses brugen af nogle af de digitale punkter.



Figur 42 Figur der viser brugen af fladetolkningspunkter. Frie fladetolkningspunkter er knyttet til profilet, mens de snappende fladetolkningspunkter er projiceret ud på data - i dette tilfælde borer. Brugen af maksimumkotepunkter er også vist. Her ses den tolkede flade ikke i boringen, og den tolkede flade har derfor ved borningslokaliteten en maksimal kote i boringens bund.

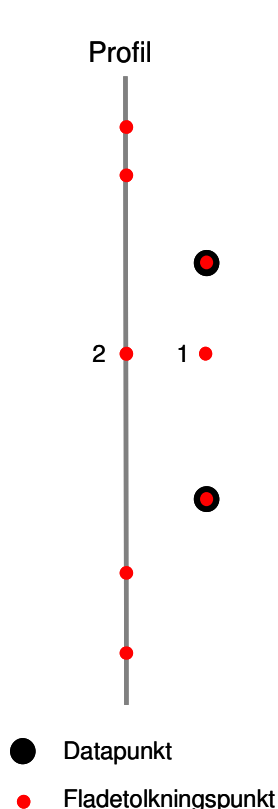
3.25.3 Fremgangsmåde

Snappede fladetolkningspunkter

Snappede fladetolkningspunkter afsættes normalt på profilniveau. I nogle tolkningssoftware-produkter kan man vælge at binde/snappe sine tolkningspunkter til data, der er vist på profilet. Dette foregår ved, at det afsatte punkt fra profilsnittet projiceres ud til datapunktet, hvis dette ikke befinder

sig netop på profilinien. Data vil normalt være borer eller geofysiske sonderinger, og ved snapningen kan der vælges en laggrænse i datasøjlen, således at tolkningspunktet bliver knyttet til et eksakt punkt i rummet. Data kan også være seismiske profiler, hvor snapningen skal ske til tolkede laggrænser heri.

Fordelen ved at snappe sine fladetolkningspunkter til data er selvfølgelig, at de bliver mere præcist anbragt i modelrummet. Man skal dog her huske, at profilet visualiserer geologien i det valgte profil-snit med data projiceret ind fra valgte projektionsafstande (se kap. 3.21 "Profilnetværk og Projektionsafstande") fra begge sider af profilet, og at det der ses således er et gennemsnit af geologien inden for bufferzonerne i 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 geologien langs profilinien. Denne problemstilling stiger naturligvis med øget profilafstand og store dataprojektionsafstande. Baseres tolkningen af en given laggrænse primært på interpolerede data langs profilinien, eksempelvis 3D-datagrids (se kap. 3.20 "Interpolation af data") eller koteinter-valgrids af elektriske modstande (se kap. 3.2 "TEM"), der jo visualiserer geologien umiddelbart ved profilinien, bør der ikke anvendes snappede fladetolkningspunkterne.3.2



Figur 43 Placering af frie fladetolkningspunkter ved profiltolkning. Enten placeres punktet mellem de to nærmeste tolkningspunkter (1) eller på profilet (2).

Frie fladetolkningspunkter

Frie fladetolkningspunkter har ingen specifik datatilknytning, og kan enten digitaliseres i vertikale profiler (se kap. 3.26 "Profiltolkning") eller i kortplan (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Ved tolkning i profiler placeres punkterne, så lagfladen får et forløb, der stemmer overens med geologens forventninger.

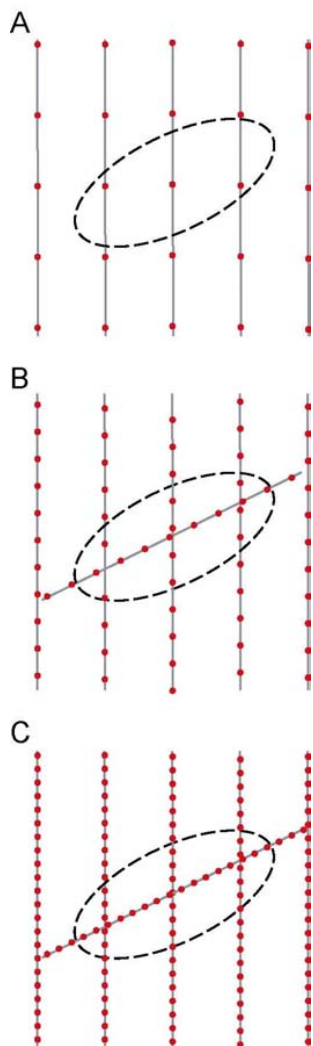
Ved modellering med frie fladetolkningspunkter i profiltolkning skal man være opmærksom på, hvordan det benyttede tolkningsprogram placerer tolkningspunkterne. Z-koordinaten vil være den Z-koordinat, der hører til det punkt på profilet, hvor man klikker, men med hensyn til den geografiske placering findes der imidlertid to forskellige løsninger. (se Figur 43). Ved den ene løsning placeres fladetolkningspunkterne på en ret linie mellem de to nærmeste datapunkter. I den anden løsning placeres fladetolkningspunktet på det sted hvor der klikkes. Begge dele har såvel fordele som ulemper, men hvis man er opmærksom på, hvilken metode tolkningsprogrammet benytter, er det muligt at tage højde for ulemperne.

De frie fladetolkningspunkter 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 i udgangspunktet, at antallet af tolkningspunkter langs den tolkede laggrænse tilpasses den opløselighed af geologien, som data muliggør – det vil sige detaljeringsgraden af tolkningen (se Figur 44). På profilet skal de rette linier mellem hvert tolkningspunkt kunne afbilde laggrænsen, så den gengiver den opnåede forståelse/tolkning af laggrænsens forløb. Det er ikke nødvendigt at afsætte yderligere punkter. Ved efterfølgende interpolation kan det være nødvendigt at indplacere yderligere tolkningspunkter, men disse punkter er at betragte som "støttende fladetolkningspunkter" (se nedenfor).

Støttende fladetolkningspunkter

Støttende fladetolkningspunkter anvendes med henblik på at sikre, at eventuelle interpolationer af de tolkede lagflader i højere grad er i overensstemmelse med geologens forståelse af områdets geologiske opbygning, end hvis der kun interpoleres på basis af de snappede og frie fladepunkter (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader"). Hvis der f.eks. på grund af svag datadækning er for

stor afstand mellem profillinierne i forhold til de geologiske strukturer i modelområdet, vil strukturerne i første omgang ikke kunne blive tilstrækkeligt rumligt beskrevet af fladetolkningspunkterne. Således er det ikke muligt ved interpolation automatisk at få udformet en gridflade, der på korrekt vis gengiver de forekommende geologiske strukturer, og det vil være nødvendigt at tilføje yderligere fladetolkningspunkter i form af støttende fladetolkningspunkter. Disse punkter kan f.eks. placeres langs nyoptegnede profillinier i områder, hvor gridet ikke opfører sig som forventet, men de kan også tilføjes til modellen ved hjælp af horisontaltolkning (se kap.3.27 "Horisontaltolkning").



Figur 44 Punkttæthed. Geologisk struktur vist med sort stiplede linie, profiler med grå linier og fladetolkningspunkter med røde punkter. A: For få punkter. B: Passende punkttæthed. C: For mange punkter.

Afgrænsningspunkter

Afgrænsningspunkter placeres langs den ydre grænse af en given modelenhed (stratigrafisk enhed eller hydrostratigrafisk enhed). Det kan være en lagflade eller et lag, som tolkes at have en begrænset udbredelse, og denne tolkning kan indarbejdes i modellen ved hjælp af afgrænsningspunkter langs den tolkede 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 (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Punkterne danner et polygon, som kan anvendes når grids skal begrænses i udbredelse ved afskæring. Punkterne kan også anvendes i anden forbindelse; f.eks. ved optegning af forkastningsforløb (se kap. 3.32 "Modellering af forkastninger, begravede dale og andre strukturer").

Negativpunkter

En særlig type punkter er "negativpunkter", som er hjælpepunkter til afgrænsning af flader. Punkterne placeres f.eks. på borer, hvor eksistensen af et givent lag eller laggrænse kan udelukkes. Anvendelsen af negativpunkter er nærmere beskrevet i kap. 3.28 "Afgrænsning af flader og lag".

Maksimumkotepunkter

Maksimumkotepunkter afsættes på steder, hvor en laggrænse forventes at være til stede, men hvor den ligger dybere end data giver information om (se Figur 42). Maksimumkotepunktet angiver derfor en maksimal kote (minimumsdybde) til overgrænsen af den tolkede laggrænse. Sådanne punkter

anvendes f.eks. hvis en begravet dal skal opløses i modellen, men hvor dalens bund og sider kun indirekte træder frem i data. På baggrund af maksimumkotepunkterne samt fladetolkningspunkterne kan der udtegnes et maksimumkotekort, som vil kunne afsløre forløbet af dalen, men ikke den præcise dybde – kun minimumsdybden. Maksimumkotepunkterne kan med fordel 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. borer, der starter med en brønd i borebeskrivelsen). Minimumkotepunkter angiver en minimal kote (maksimal dybde) for undergrænsen af en terrænnær laggrænse eller enhed, der ikke ses i datapunktet, men som ud fra data kan udelukkes at befinde sig under det pågældende niveau.

3.25.4 Usikkerheder og dokumentation

Fladetolkningspunkterne udgør kernen og grundlaget i den rumlige geologiske model. De tolkninger der er udført, er repræsenteret ved hjælp af tolkningspunkterne. Skal modellen opdateres, rettes eller udbygges, er det fladetolkningspunkterne, der tages udgangspunkt i. Principielt ligger der antagelser og vurderinger bag ethvert fladetolkningspunkt, og uden en beskrivelse af disse er tolkningen uanvendelig for andre. Det vil sige, at alle fladetolkningspunkter på en eller anden måde skal 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 de 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 vil det være, hvis man kan få disse beskrivelser indarbejdet digitalt i modellen. Man kan evt. tilknytte kommentarer for hver gang man afslutter en digitaliseringsproces og har afsat en række fladetolkningspunkter. Der skal være mulighed for at vælge hvilken usikkerhed der skal tilknyttes de enkelte afsatte fladetolkningspunkter. Se i øvrigt kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger" og kap. 3.35 "Dokumentation").

3.25.5 Fordele og ulemper

I forhold til gridmodellering (se kap. 3.29 "Gridmodellering") er fordelene især, at de tolkede lagflader kan defineres i en række punkter. Lagfladerne bygges dermed op fra bunden, og det er ved hjælp af de enkelte fladetolkningspunkter langt lettere at dokumentere det udførte arbejde – og dermed at forstå det færdige resultat. Fladetolkningspunkterne kan gradvist stykkes sammen til en flade, efterhånden som den rumlige forståelse opnås. Ulemperne i forhold til gridtolkning er, at det er en noget langsommere proces.

3.26 Profiltolkning

3.26.1 Generel beskrivelse

Profiltolkning står i modsætning til horisontaltolkning, gridtolkning og egentlig 3 D-tolkning (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning", kap. 3.29 "Gridmodellering" og kap. 3.30 "3D-visualisering og tolkning"). Profiltolkning kan med fordel anvendes sammen med horisontaltolkning således, at der opnås en form for pseudo-3D-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 (se kap. 3.21 "Profilnetværk og projektionsafstande"), 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 fladetolkningspunkter, der placeres langs linierne (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Selve profilotegningsproceduren er gennemgået i kap. 3.22 "Profilotegning".

Ved profiltolkning digitaliseres de tolkede punkter ind på profilet. Punkterne består af forskellige typer af fladetolkningspunkter og hjælpepunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Fladetolkningspunkterne repræsenterer lagflader eller egentlige lag, hvis lagfladerne definerer såvel top som bund af laget. Lagfladerne og lagene kan være lateralt afgrænsede (se kap. 3.28 "Afgrænsning af lag og lagflader").

3.26.2 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 den laterale sammenhæng mellem de forskellige forekommende datatyper og tolkninger.

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

For at kunne overskue et modelområde på et profil, er man normalt nødsaget til optegne profilet med vertikal overhøjning. Dette forvrænger virkeligheden kraftigt 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 forme tolkede strukturer med den benyttede overhøjning. Dette betyder, at man altid skal forsøge at begrænse overhøjningen mest muligt. Overhøjninger på mere end omkring 10 × er vanskelige at håndtere, hvis man stadig vil kunne genkende geologiske strukturer i sine data.

På profilet kan data visualiseres på en lang række forskellige måder. Dette er beskrevet under kap. 3.22 "Profiloptyegning" og under beskrivelsen af de enkelte data.

3.27 Horisontaltolkning

3.27.1 Generel beskrivelse

Korttemaer og fladedata udgør det datagrundlag, som horisontaltolkningen bygger på. Horisontaltolkning vil meget sjældent kunne stå alene, men vil normalt fungere som et supplement til profiltolkningen (se kap. 3.26 "Profiltolkning"). Horisontaltolkning kan i princippet udføres på to forskellige måder.

På den ene måde digitaliseres fladetolkningspunkterne og eventuelle hjælpepunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") direkte på det viste horisontale snit, hvorved ethvert afsat punkt tilknyttes det pågældende snits kote som Z-koordinat. I disse snit kan man placere korttemaer og eventuelle fladedata, der afspejler forskellige geologiske forhold. 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 konturlinier for en given lagflade. Denne proces kan hjælpe til udformningen af lagfladerne.

Det vil typisk være frie fladetolkningspunkter, der digitaliseres ved horisontaltolkningen, men også støttende fladetolkningspunkter kan med fordel digitaliseres her (se kap. 3.25 "Punkttolkning").

3.27.2 Formål og fremgangsmåde

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 (se kap. 3.30 "3D-visualisering og tolkning").

Når der digitaliseres punkter med valgbar kote vil horisontaltolkningen i de fleste tilfælde tage udgangspunkt i både fladetolkningspunkter og hjælpepunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") fra profiltolkninger, hvor boredata, geofysiske data m.v. er blevet tolket i et netværk af profiler (se kap. 3.26 "Profiltolkning"). Tolkningspunkterne for den laggrænse, der ønskes modelleret, afbildes i kortplan med signatur for punkttype og label for kote. Hvert afsat punkt skal have tilknyttet en koteangivelse, da dette ikke sker automatisk her. Dette kan evt. gøres ved at der vælges en kote, som de følgende afsatte punkter afsættes i. Fladedata og korttemaer udgør normalt datagrundlaget. Ved tolkninger af de øvre dele af lagpakken kan det ofte være relevant at inddrage jordartskort, topografi og landskabslementer.

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

Ved tolkning i foruddefinerede horisontalsnit afsættes fladetolkningspunkter langs laggrænsernes skæring med det horisontale snit. Baggrundsdata vil her typisk være interpolerede geofysiske kort (f.eks. middelmotstandskort) eller punktdata (f.eks. borer). I princippet foregår der her præcis det samme som ved profiltolkningen, blot er modelrummet drejet 90°.

Ved tolkning af laggrænsers og lags maksimale udbredelse (se kap. 3.28 "Afgrensning af lagflader og lag"), kan negativpunkter og afgrænsningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") med fordel anvendes i horisontaltolkningen.

3.27.3 Fordele og ulemper

Fordele:

I forhold til profiltolkning uden supplerende horisontaltolkning får modelløren ved kombineret profiltolkning og horisontaltolkning et bedre 3-D overblik over modellen. Det er lettere at tolke afgrænsninger af lag, og det er lettere at modificere lagfladerne og indbygge geologisk forståelse i tolkningen. F.eks. kan en begravet dal lettere modelleres ved hjælp af horisontaltolkning, mens det er sværere at modellere den korrekt ved profiltolkning alene. Kombineret med profiler giver fladerne fra horisontaltolkningen også en god visualisering af modellen.

Ulemper:

De gængse tolkningsprogrammer understøtter pt. ikke horisontaltolkning fuldt ud. Horisontaltolkningen kan derfor kun udføres gennem besværlige procedurer, hvori der indgår en del manuelle processer. Horisontaltolkning forventes imidlertid implementeret i tolkningsprogrammer fremover.

3.28 Afgrænsning af lag og lagflader

3.28.1 Generel beskrivelse

Lagene og laggrænserne i en rumlig geologisk model vil typisk have laterale afgrænsninger. Den geologiske model er normalt opbygget af geologiske enheder, der kun findes udbredt inden for dele af modelområdet, og det er derfor nødvendigt at kunne indarbejde laterale afgrænsninger, der afgrænser de områder, hvor en given enhed findes, fra områder, hvor enheden ikke findes. Afgrænsningen er vigtig at udføre, da det i modellen ellers kan fremstå som om lagets eller lagfladens fortsættelse er uvis og dermed utolket. Afgrænsningen af lag og laggrænser kan foretages med afgrænsningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") både i profiltolkningen (se kap. 3.26 "Profiltolkning") og ved horisontaltolkning (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning").

3.28.2 Formål og fremgangsmåde

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

Arbejdet med at modellere afgrænsninger mellem stratigrafiske enheder er beskrevet i en række andre datablade (3.24 "Digitaltolkning", 3.25 "Punkttolkning", 3.26 "Profiltolkning", 3.27 "Horisontaltolkning", 3.38 "Interpolation af tolkede lag og lagflader", 3.29 "Gridmodellering" m.fl.). Her beskrives kort arbejdet med den laterale afgrænsning af enhederne.

Den laterale afgrænsning af lag og lagflader foretages lettest ved en kombination af profiltolkning og horisontaltolkning (se kap. 3.25 "Profiltolkning" og kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). 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 borer og på geofysiske data. Ved linie- eller fladedækkende geofysik er det i gunstige tilfælde muligt at tolke lagets laterale afgrænsning meget præcist. Fladetolkningspunkterne fra profiltolkningen samt negativpunkter afbildes nu i horisontalplan sammen med eventuelle støttende korttemaer (se datablad 3.27 "Horisontaltolkning"). Det er nu muligt med afgrænsningspunkter at digitalisere afgrænsningen af laget/lagfladen mellem områder med fladetolkningspunkter (hvor laget findes) fra områder med negativpunkter (hvor laget ikke findes). Outputet er en selvstændig datafil, der beskriver et polygon rundt om en bestemt geologisk enhed.

3.28.3 Usikkerhedsvurdering

Sikkerheden på afgrænsningen afhænger af mængden og fordelingen af data. Hvis afgrænsningen primært er baseret på fladetolkningspunkter, kan sikkerheden på afgrænsningen visualiseres ved hjælp af kort med afgrænsningen og de tilhørende negativpunkter, samt angivne usikkerheder på fladetolkningspunkter. Hvis afgrænsningen desuden bygger på fladetemaer som f.eks. kort samt evt. geologisk forståelse, som ikke har været anvendt i tolkningen af fladetolkningspunkterne, giver det

ovenfor beskrevne kort ikke en fyldestgørende beskrivelse af usikkerheden på afgrænsningen og må suppleres af en selvstændig usikkerhedsbeskrivelse/-vurdering.

3.28.4 Fordele og ulemper

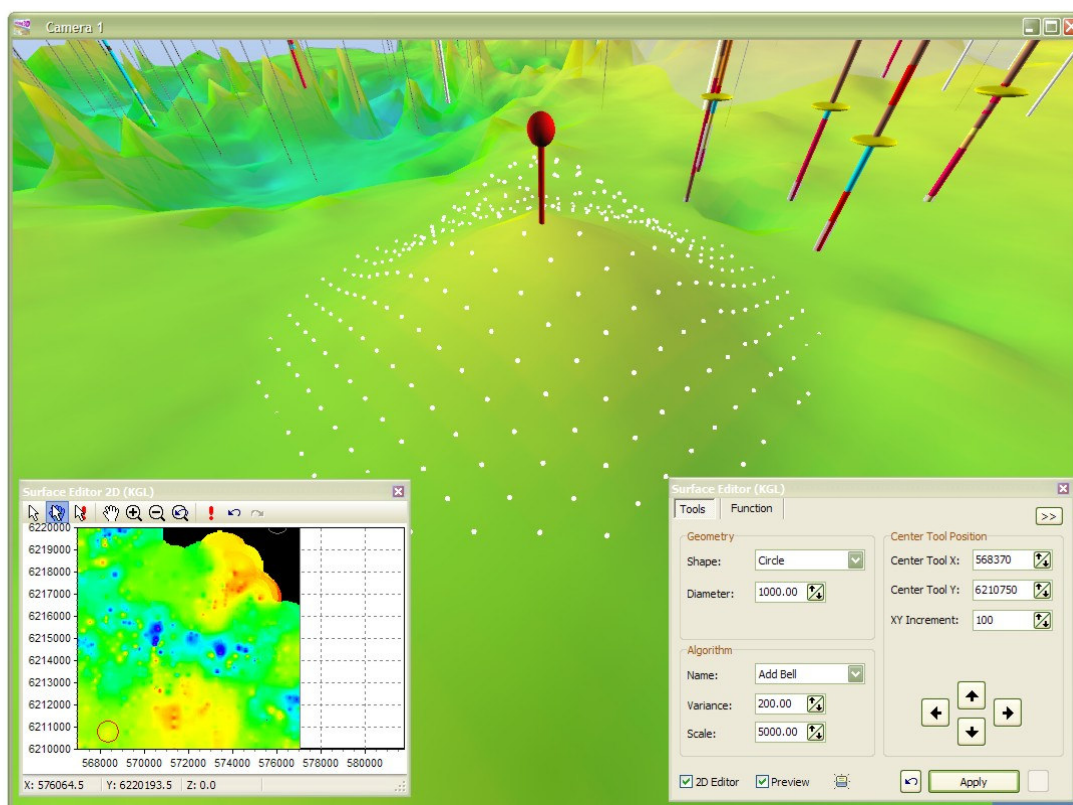
En af fordelene er, at man ved interpolation af fladen kan skære denne og kun interpolere der, hvor laget forventes at være. En anden fordel er, at afgrænsningen kan hjælpe ved opstillingen af den hydrostratigrafiske model.

3.29 Gridmodellering

3.29.1 Generel beskrivelse

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 mest traditionelle måde er ved punkttolkning (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.24 "Digital tolkning") på profiler (se kap. 3.26 "Profiltolkning") og/eller på kort (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Punkterne fra punkttolkningen kan ved interpolation omdannes til gridflader.

En anden tilgang til at få skabt den geologiske models lagflader på er ved gridmodellering. Ved denne proces formes griddet direkte i tolkningsmiljøet (se Figur 45), dvs. at man interaktivt modellerer en form ud fra et givent udgangspunkt. Et eksempel på dette kan være, at man skal have modelleret bunden af en begravet dal. I dette tilfælde kan det evt. være en fordel at tage udgangspunkt i et horisontalt grid, som dækker den begravede dal. Griddet kan så gradvist omformes i det digitale tolkningsmiljø, indtil det har den form som den geologiske tolkning og forståelse tilsiger. En sådan gridmodellering foretages i et 3D tolknings-miljø.



Figur 45: Eksempel på gridmodellering (udarbejdet af I-GIS).

Gridmodellering kan som ovenfor beskrevet anvendes alene uden brug af en indledende punkttolkning, men en anden fremgangsmåde kan være at kombinere gridmodellering med punkttolkning.

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. Dette kan f.eks. være anvendeligt ved en efterfølgende validering af de tolkede gridflader (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger/validering").

Gridmodellering kræver avanceret tolkningssoftware og ikke alle programmer understøtter denne procedure.

3.29.2 Formål

Formålet er at få dannet de bedst mulige grids på en hurtig måde. Ved gridmodellering kan man undgå den tidskrævende proces med punkttolkning og interpolation. Laggrænserne kan meget præcist gives de ønskede former.

3.29.3 Fordele og ulemper

Fordelene ved gridtolkning er følgende:

- Godt overblik over de geologiske former under selve tolkningsprocessen.
- Tidsbesparende proces.
- Laggrænser kan modelleres præcist.
- Tilretning og finpudsning af former er let at gennemføre, bl.a. i forbindelse med validering af lag.

Ulemperne ved gridtolkning er følgende:

- Der skabes ikke et punktgrundlag til griddet, og det er derfor vanskeligt at dokumentere de tolkninger, der ligger til grund for griddet.
- Ikke alle tolkningsprogrammer understøtter gridtolkning.

3.29.4 Usikkerheder

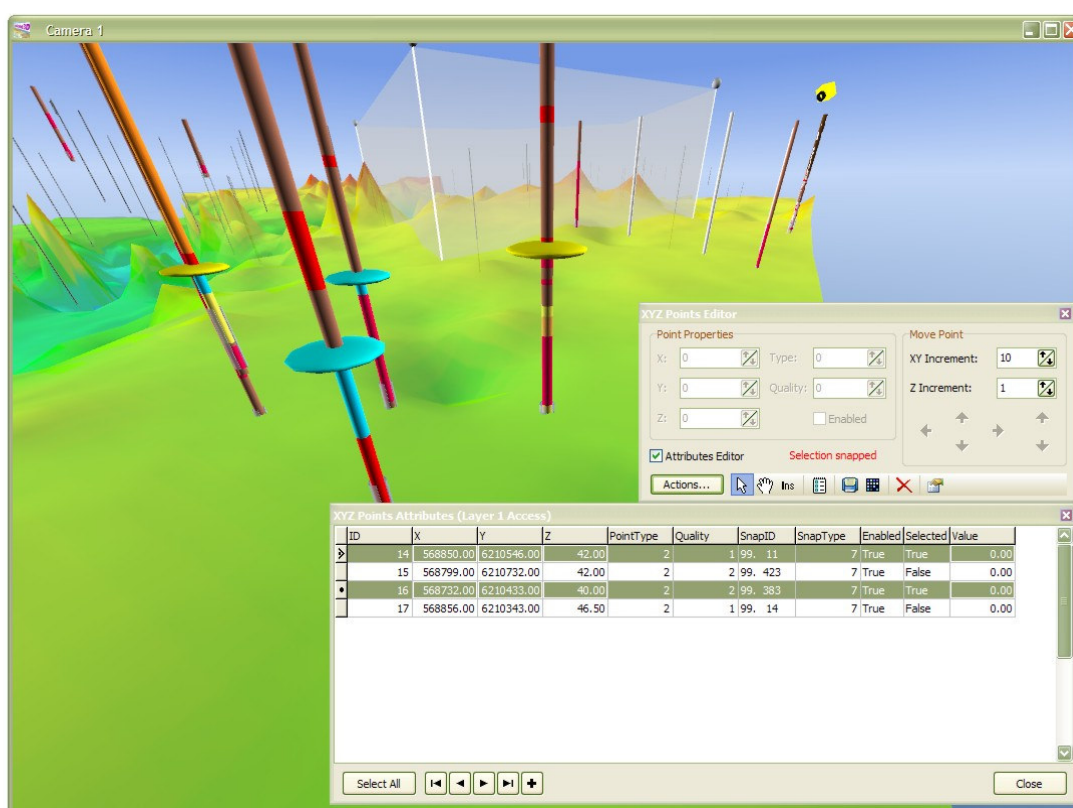
Det skal sikres, at griddet formes overalt, således at der ikke efterlades ikke-tolkede områder i det udlagte grid. Det er således vigtigt at bevare overblikket over, hvor griddet er tolket (modelleret), og hvor det ikke er tolket. Områder uden tolkninger bør skæres ud eller på anden måde tilføres oplysninger, der viser hvor griddet ikke er tolket (modelleret) og hvor den pågældende lagflade eventuelt ikke eksisterer.

Som ovenfor beskrevet er den væsentligste svaghed ved metoden, at tolkningsarbejdet meget vanskeligt lader sig dokumentere. Derfor er det særlig vigtigt, at de modellerede grids følges af grundig dokumentation og kvalitetssikring samt detaljerede usikkerhedsvurderinger.

3.30 3D-visualisering og -tolkning

3.30.1 Generel beskrivelse

3D-visualisering og -tolkning foregår digitalt på computer. Ved 3D-visualisering perspektiveres modelrummet i tre dimensioner, således at brugeren via computerskærmen opfatter sig selv placeret i selve modelrummet (se Figur 46). Data, profilinier, lagflader, tolkningspunkter og alt andet med tilknyttede X-, Y- og Z-koordinater placeres visuelt både i X-, Y-planet og i Z-planet. Brugeren opnår derved reelle opfattelser af både proportioner og beliggenhed af de visualiserede elementer i modelrummet.



Figur 46: Eksempel på digitalisering af fladetolkningspunkter i et 3D-tolkningsmiljø (udarbejdet af I-GIS).

3D-visualiseringen giver mulighed for et forbedret overblik over både data, tolkninger og geologiske strukturer, og faciliterer dermed bl.a. strukturgenkendelse og andre centrale forhold i den geologiske tolkningsproces. 3D-visualiseringen anvendes i dag især ved inspektion og validering af de lagflader (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger/validering"), der er dannet ved hjælp af traditionel punkt-tolkning med efterfølgende interpolation til grids. I 3D-miljøet er det let overskueligt om f.eks. lagflader krydser hinanden, eller om f.eks. punktdata eller liniedata passer med de dannede lagflader.

Der findes allerede programmer på det danske marked, der kan *visualisere* både data og modeller i 3 dimensioner. 3D-visualiseringsmulighederne åbner nye muligheder i forbindelse med tolkningsar-

bejdet, og det er åbenlyst en fordel at udnytte disse muligheder. Men der er p.t. kun ringe understøttelse af mulighederne i de programmer, der i Danmark typisk benyttes i arbejdet med tolkning af hydrogeologiske data. 3D-tolkning praktiseres i vidt omfang allerede i olieindustrien, men udviklingen indenfor grundvandsområdet i Danmark lader vente på sig – muligvis fordi det kræver tilvænning at arbejde i 3D, og fordi den traditionelle arbejdsgang ved geologisk modellering i vidt omfang skal ændres.

Som beskrevet i kap. 3.29 "Gridmodellering" kan tolkning og modellering af grids udføres i et 3D-miljø. Men også punkttolkning (se kap. 3.25 "Punkttolkning") kan foretages heri, hvis man f.eks. placerer 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. Gardinet kan så gradvist skubbes gennem modelrummet, mens tolkningspunkterne afsættes. Gardinet eller profilet kan visualiseres på samme måde som ved traditionel profiltolkning, hvor data inden for prædefinerede projektiionsafstande bliver trukket ind.

I takt med udviklingen på computer- og softwareområdet vil 3D-tolkning vinde mere indpas som værktøj ved geologisk modelopstilling i Danmark.

3.30.2 Formål

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

3.30.3 Fordele og ulemper

Fordelene ved 3D-visualisering og –tolkning er følgende:

- 3D-visualiseringen forøger overblikket over de rumlige forhold i modelrummet, og dette medfører bedre indsigt i de anvendte data og udarbejdede modeller.
- Der kan udføres gridmodellering
- Udførte tolkninger kan effektivt kvalitetssikres.
- Mulighed for anvendelse af 3D-interpolation af data (se kap. 3.20 "Interpolation af data").

Ulemperne ved 3D-visualisering og –tolkning er følgende:

- Det kræver tilvænning at arbejde med.
- Tolkningssoftware er ikke endnu tilpasset danske forhold fuldt ud.

3.31 Indarbejdelse af landskabsanalyse i den geologiske model

3.31.1 Generel beskrivelse

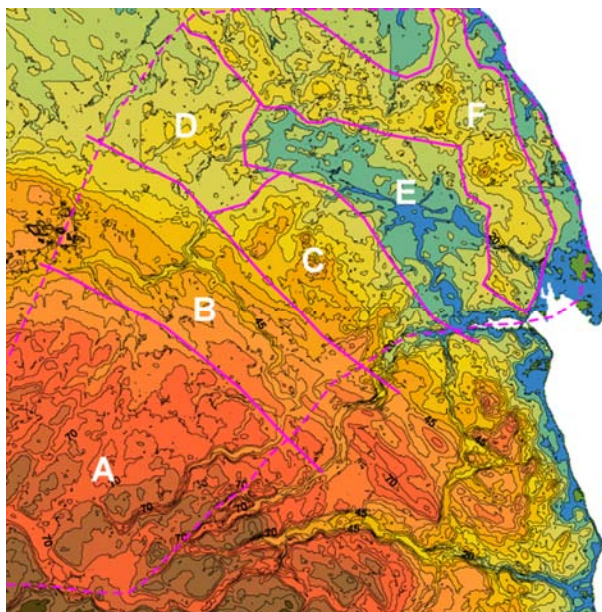
En landskabsanalyse bygger på topografiske data (se kap. 3.12 "Topografiske data") og kan bidrage med vigtige informationer til den geologiske model. Landskabsformerne er et produkt af de geologiske hændelser, der danner de geologiske legemer, og af erosionens efterfølgende påvirkning. Landskaberne kan 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.

3.31.2 Fremgangsmåde

Ved landskabsanalysen kan der f.eks. være udpeget og afgrænset:

- Geologiske legemer, så som smeltevandssletter, israndsbakker, issøbakker og terrassedannelser
- Landskabselementer dannet ved erosion, så som tunneldale, ådale og kystskrænter
- Delområder med ensartede højdekurvemønstre (se Figur 47)
- Tilstedeværelse af søer, åer og andre vådområder



Figur 47 Inddeling i topografiske delområder på baggrund af forskelle i kurvebillede. Fra /1/.

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

Ligeledes kan det være nyttigt at overføre udarbejdede topografiske delområders afgrænsninger (se Figur 47) til de geologiske profiler. Forskellene i kurvebilledets udformning kan pege på, at den geologiske opbygning inden for området 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 inden for 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 terrænuformningen 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.

Iagttagelser af tilstedeværelsen 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. Man kan stå i den situation, at mængden af boredata og geofysiske data i et område er meget begrænset, men her kan den topografiske analyse i mange tilfælde bidrage med information om, hvorvidt den overfladenære lagserie overvejende er sandet eller leret.

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.

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.

3.31.3 Usikkerheder

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.

3.31.4 Referenceliste

- /1/ Watertech 2004: Geologisk model og konceptuel hydrogeologisk model for Nyborg indsatsområde. Udarbejdet for Fyns Amt, juni 2004.

3.32 Modellering af begravede dale, forkastninger og andre strukturer

3.32.1 Generel beskrivelse

I alle modeller er der en nedre grænse for, hvor store geologiske strukturer skal være, før det er nødvendigt at modellere dem. Dette afhænger af, hvad modellen skal bruges til. Der er også altid en nedre grænse for, hvor detaljeret det kan lade sig gøre at tolke strukturenes rumlige former og udbredelse, og der skal som udgangspunkt ikke være konflikt imellem, hvad der er behov for at få modelleret, og hvad der kan lade sig gøre.

Selvom om strukturenes rumlige former forstås og kendes af modelløren, kan det ofte være forbundet med problemer at få formerne gengivet korrekt i modellen. Dette gælder, hvis strukturerne har en begrænset størrelse, er diffuse eller har en irregulær form. Sådanne strukturer kan f.eks. være begravede dale, forkastninger, saltstrukturer og istektoniske 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 kap. 3.33 "Modellering og implementering af istektonik").

3.32.2 Fremgangsmåde

I modelleringsprocessen kan der umiddelbart peges på to tidspunkter, hvor det er vigtigt at forholde sig til problemstillingerne omkring de geologiske strukturer: 1) ved modelopsætningen og 2) når den geologiske struktur skal modelleres i rummet. I det følgende beskrives eksempler på, hvordan disse problemstillinger kan håndteres.

1) Modelopsætning

Allerede i de indledende faser af modelopstillingen er det fordelagtigt at have et godt forhåndskendskab til strukturenes art, orientering og mulige udbredelse. Der kan herved tages højde for strukturenes tilstedeværelse ved opsætningen af modellen, og det vil derfor 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 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.

2) Modellering af den geologiske struktur i rummet

Størrelsesmæssigt kan der opstå det problem, at strukturen er så lille, at formen kun vanskeligt kan gengives rumligt, uden at der skal indlægges et stort antal fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Dette kræver ved profiltolkning (se kap. 3.26 "Profiltolkning") et stort antal profiler og resulterer i en langsom proces. Det bør altid tilstræbes at gengive strukturen bedst muligt med

anvendelse af så få tolkningspunkter som muligt. Antallet af punkter bør som minimum have en størrelse så en autointerpolation (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag") kan gengive fladen tilstrækkeligt. En måde at "skyde genvej" til modellering af komplekse eller små strukturer kan være at anvende gridmodellering (se kap. 3.29 "Gridmodellering"). Interpolerede flader, der ikke gengiver de forventede strukturer korrekt, 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

Begravede dale er et eksempel på geologiske strukturer, som kan være svære at modellere. Dalene er komplekst opbygget med mange interne lagflader og forekommer i flere krydsende generationer (se f.eks. /1/). Endvidere kan mange af dem være så smalle, at de er vanskelige at modellere. Dalene indeholder typisk meget afgrænsede geologiske og hydrologiske enheder, og 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 informationerne fra borerne med geofysiske data.

Hvis der arbejdes med profiltolkning, bør profilerne placeres vinkelret på dalenes længdeakser med passende mellemrum. Det kan overvejes også at placere et eller flere profiler på langs af dalene, men her skal man være opmærksom på projektionsafstandene for såvel data som for fladetolkningspunkter afsat på andre profiler. Projektionsafstandene skal på de parallelt beliggende profiler typisk være væsentligt mindre end for de tværgående profiler, da geologien varierer væsentligt mere på tværs end på langs. Til hjælp for digitaliseringen af de begravede dale på profiler, kan det overvejes at placere fladetolkningspunkter langs dalskuldre og langs dalbunden i tilfælde af V-formede dale og i hver side ved fladbundede eller U-formede dale. Ligeledes kan der med fordel anvendes maksimumkotepunkter, negativpunkter og afgrænsningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning" og kap. 3.28 "Afgrænsning af lag og lagflader").

For at undgå et stort antal profiler ved profiltolkning af begravede dale, kan dalene ofte med fordel modelleres ved horisontaltolkning (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Dette kan ske ved at have f.eks. middelmodstandskort som baggrund når der arbejdes med foruddefinerede horisontalsnit, og f.eks. koten for god leder når der arbejdes med valgbar kote (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). En anden måde at angribe modelleringen af dalene på, er ved at anvende maksimumkotepunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Disse anvendes ofte i mangel af fladedækkende data (f.eks. TEM, se kap. 3.2 "TEM") eller hvor data ikke når ned til dalenes bund.

På grund af dalenes komplekse natur kan modellering i 3D-miljø også være en fordel (se kap. 3.30 "3D Visualisering og tolkning"). Heri kan der som beskrevet ovenfor også foretages gridmodellering.

Forkastninger

Da forkastninger forskyder lagfølgen i et vertikalt eller næsten vertikalt plan, er det forbundet med store problemer at gengive disse i rumlige modeller. Undertiden kan forskydningen være så stor, at et lag bliver usammenhængende på tværs af forkastningsplanet. Ved forekomster af forkastninger udviser laggrænserne på korte afstande meget store variationer, og hvis disse variationer skal modelleres, kræves et stort antal fladetolkningspunkter for at laggrænsen i rummet kan blive gengivet tilfredsstillende ved automatisk interpolation.

Problemet med at modellere forkastninger kan som udgangspunkt håndteres ved at indlægge et stort antal fladetolkningspunkter for hver laggrænse langs forkastningsplanet. Som minimum skal der for hvert profilsnit på tværs af forkastningsplanet placeres 2 fladetolkningspunkter – et hvor laggrænsen møder forkastningsplanet, og et hvor det forlader forkastningsplanet. Evt. kan der lægges flere punkter langs planet også. Det kan være en fordel at digitalisere forkastningens forløb ind ved hjælp af horisontaltolkning først, så dens beliggenhed angives på profilerne. Dette kan f.eks. gøres ved hjælp af afgrænsningspunkter, som ikke tilskrives koter (se kap. 3.25 "Punkttolkning").

Andre strukturer

Behandling af glacialtektoniske forstyrrelser i lagserien er beskrevet i kap. 3.33 "Modellering og implementering af istektonik". Normalt er disse strukturer for små til dels at kunne opløses i data, men også for små til at det er relevant at modellere dem rumligt. Større glacialtektoniske strukturer er i nogle tilfælde mulige at opløse i data og vil være relevante at indarbejde rumligt i den geologiske model.

3.32.3 Usikkerheder

Det er af stor betydning at få indarbejdet geologiske strukturer som begravede dale i både den rumlige geologiske model og i den hydrostratigrafiske model, da disse vil kunne påvirke grundvandsstrømningen kraftigt /2/.

Hvis ikke modellens opsætning optimeres i forhold til de geologiske strukturer, der forekommer i modelområdet, kan strukturerne risikere at blive overset eller ikke få tildelt så megen opmærksomhed, som de burde. Det er derfor vigtigt at have en god forståelse af områdets geologi, inden der tages beslutninger om, hvordan modellens grundkonstruktion skal være.

3.32.4 Referenceliste

- /1/ Sandersen, P. og Jørgensen, F. 2006: Kortlægning af begravede dale i Jylland og på Fyn. Opdatering 2005-2006. Udarbejdet for de jysk-fynske amters grundvandssamarbejde, december 2006.
- /2/ 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., Harder, E. and Nygaard, E. (Eds), Calibration and Reliability in Groundwater modelling: Credibility of Modelling. IAHS Publication 320. pp. 337-344.

3.33 Modellering og implementering af istektonik

3.33.1 Generel beskrivelse

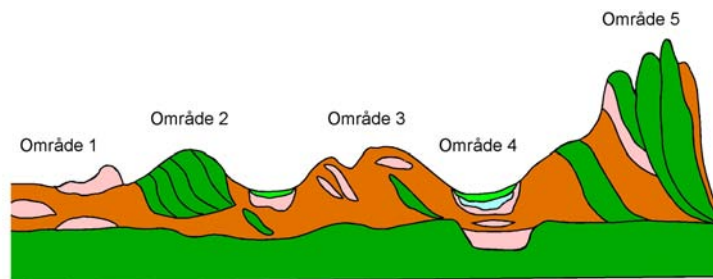
Istektoniske forstyrrelser, der bryder ellers regulære lag i stykker, repræsenterer et af de største usikkerhedselementer i forbindelse med modellering af den kvartære lagserie. Samtidig har forstyrrelserne med deres mulighed for hydrauliske kortslutninger potentielt meget stor betydning for grundvandsdannelse og grundvandsstrømning. På trods af dette bliver istektoniske forstyrrelser ignoreret i mange geologiske og hydrogeologiske modeller, eller det bliver blot konstateret, at der er forstyrrelser i området. Dette er med tanke på forstyrrelsernes potentielle hydrauliske betydning meget uheldigt.

3.33.2 Fremgangsmåde

At modellere den nøjagtige geometri af de enkelte strukturelle elementer i istektonisk forstyrrede 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 enkelte tilfælde vil det på geofysiske data være muligt at se opskudte flager, og det vil da være muligt at modellere flagerens geometri direkte på basis af disse data. I endnu sjældnere tilfælde vil det på baggrund af gode boredata være muligt at foretage en grov modellering af opskudte flager. I langt de fleste tilfælde må man i stedet anvende en løsning, hvor man blot kortlægger og beskriver de istektoniske forstyrrelser. Kortlægningen kan bl.a. bestå af en beskrivelse af overordnede hydrauliske egenskaber i istektonisk forstyrrede lag. Denne kortlægning og beskrivelse følger typisk fra den rumlige geologiske modellering over den hydrostratigrafiske model til den numeriske grundvandsmodel i form af en zonerings af de forstyrrede områder.

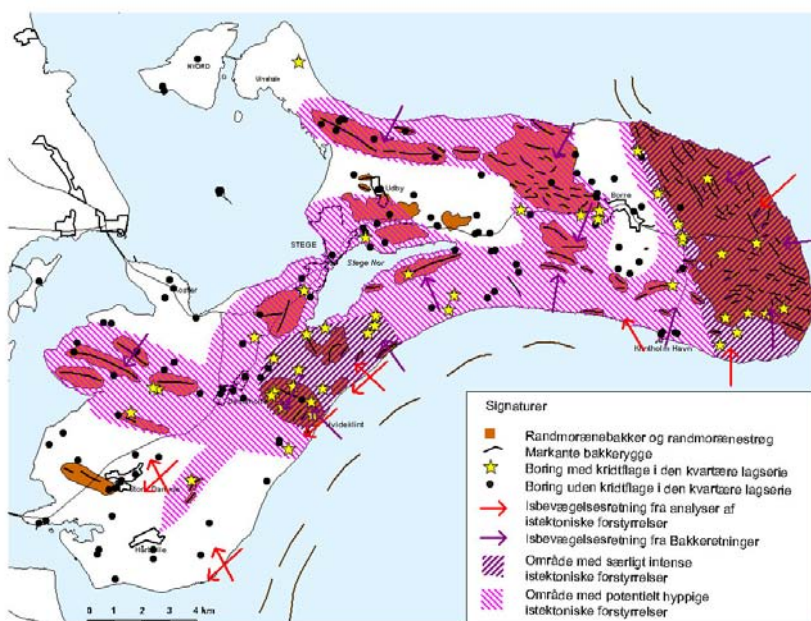
Fremgangsmåden ved en typisk kortlægning af istektoniske forstyrrelser er:

- Kortlægning af istektoniske forstyrrelser i kystklinter og råstofgrave - oftest baseret på eksisterende geologisk litteratur. Findes typisk i DGU/GEUS-publikationer, DGF-publikationer, kvartærgeologiske specialer m.v. Der kan eventuelt udføres supplerende feltstudier, hvis der findes egnede lokaliteter.
- Sammenstilling af isbevægelsesretninger og israndspositioner, samt kortlægning af landskabselementer, der erfaringsmæssigt ofte er associeret med hyppige istektoniske forstyrrelser – typisk randmoræner og overskredne randmoræner. Baseres normalt på eksisterende litteratur og kort, men kan suppleres af tolkninger fra en landskabsanalyse (se kap. 3.31 "Indarbejdelse af landskabsanalyse i den geologiske model"). Giver et første fingerpeg om mulige zoner med hyppige istektoniske forstyrrelser (se Figur 48).



Figur 48: Principskitse for geologien på Møn. Brun: Kwartær ler, Rød: Kwartær sand, Grøn: Skrivekridt. Efter /1/.

- Kortlægning af tegn på istektoniske forstyrrelser i borer og geofysiske data. I borer er flager af formodede prækvartære bjergarter i den kvartære lagserie tegn på forstyrrelser, mens tæt ved hinanden liggende borer med store afvigelser i lagserien også kan indikere istektoniske forstyrrelser. I sidstnævnte tilfælde dog kun hvis boredata er pålidelige (se kap. 3.7 "Boredata"). I de geofysiske data ses de istektoniske forstyrrelser i gunstige tilfælde – dog kun i stor skala. Kortlægningen af tegn på istektoniske forstyrrelser i borer og geofysiske data foretages oftest i forbindelse med profiltolkning under arbejdet med den rumlige geologiske model (se kap. 3.26 "Profiltolkning"). Om muligt modelleres top og bund for de istektoniske forstyrrelser. Ellers markeres datapunktet blot som et punkt med forstyrrelser, evt. med en kommentar om forstyrrelsernes karakter, formodede dybde m.v.
- Sammenstilling af alle de ovennævnte tolkninger og data. Denne sammenstilling foretages lettest ved horisontaltolkning (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning"). Der kan f.eks. ved hjælp af afgrænsningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") inddeles i zoner med forskellig hyppighed af forstyrrelser (se Figur 49). Inddelingen afhænger af datagrundlaget, samt af de geologiske forhold i det aktuelle område. Hvis datagrundlaget er tilstrækkelig godt, kan den horisontale kortlægning udbygges med en rumlig modellering, hvor der ud over hyppighed og intensitet også tolkes, hvilke lag i den geologiske lagsøjle, der er forstyrrede.



Figur 49: Zonering af istektoniske forstyrrelser på Møn. Der er også risiko for at finde istektoniske forstyrrelser 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 zonerer vertikalt. Efter /1/.

- Visualisering af kortlægningen kan f.eks. ske ved en skravering, der lægges hen over de geologiske modellag.
- Zoneringen bæres med fra den rumlige geologiske model til den hydrostratigrafiske model. Analyse af hydrologiske data i forbindelse med tolkningen af den hydrostratigrafiske model kan i nogle tilfælde give ekstra indikationer på udstrækning af istektoniske forstyrrelser – åbenlyse lækager, afsnøring af magasiner m.v.
- Ved overgangen mellem geologisk modellering og grundvandsmodellering, tolker geolog og hydrogeolog den hydrauliske betydning af de istektoniske forstyrrelser og implementerer sammen forstyrrelserne i grundvandsmodellen, f.eks. ved parameterisering af de hydrauliske egenskaber i de istektonisk forstyrrede zoner. Den hydrauliske betydning af forstyrrelserne afhænger af lithologi, vandspejl m.m., så det er vigtigt at geologen inddrages aktivt i dette arbejde.

3.33.3 Fordele og ulemper

Fordele:

Fordelen ved at inkludere istektoniske forstyrrelser i den geologiske modellering er, at modellerne bliver mere retvisende i forhold til den geologiske virkelighed og dermed danner et bedre grundlag for efterfølgende grundvandsmodellering.

Ulemper:

Ingen ulemper.

3.33.4 Referenceliste

- /1/ Richardt, N. 2008: Koncept for håndtering af istektoniske forstyrrelser i geologiske og hydrogeologiske modeller. ATV Møde, Vintermøde om Jord- og Grundvandsforurening. Vingsted-centret 4. - 5. marts 2008.

3.34 Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model

3.34.1 Generel beskrivelse

Der er et meget grundlæggende skel mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Den rumlige geologiske model er principielt en model over undergrundens fysiske opbygning, men også en model der beskriver dannelseshistorie og -processer. I modellen udføres der kun tolkninger i de områder, hvor geologien er kendt og hvor tolkninger af denne synes tilstrækkeligt objektive. I modsætning hertil fokuseres der i den hydrostratigrafiske model på at beskrive enheder ud fra hydrauliske egenskaber. Formålet med den hydrostratigrafiske model er således at opnå en rumlig gengivelse af hydrostratigrafiske enheder, hvor en hydrostratigrafisk enhed er karakteriseret ved at have ensartede hydrauliske egenskaber. I den hydrostratigrafiske model foretages der tolkninger af hele modelrummet.

Ved tolkning af den hydrostratigrafiske model sammenstilles den rumlige geologiske model med hydrologiske og kemiske data. Modellen vil ofte blive en forsimplet udgave af den rumlige geologiske model, da den hydrostratigrafiske model normalt kun indeholder grundvandsmagasiner og mellem-liggende lag (aquiferer og aquitarder). Samtidig indeholder den hydrostratigrafiske model i højere grad tolkninger af hydrologiske datatyper.

Det er vigtigt, at der tidligt i forløbet tages beslutning om, hvilke informationer der skal videregives til grundvandsmodelløren og på hvilken form. Derfor er dialogen mellem geolog og grundvandsmodellør vigtig. Generelt er dialogen vigtig under opstilling af den hydrostratigrafiske model, da der evt. også skal indhentes information fra personer med indsigt i bl.a. grundvandskemiske data. Det anbefales, at samme person opstiller både den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model.

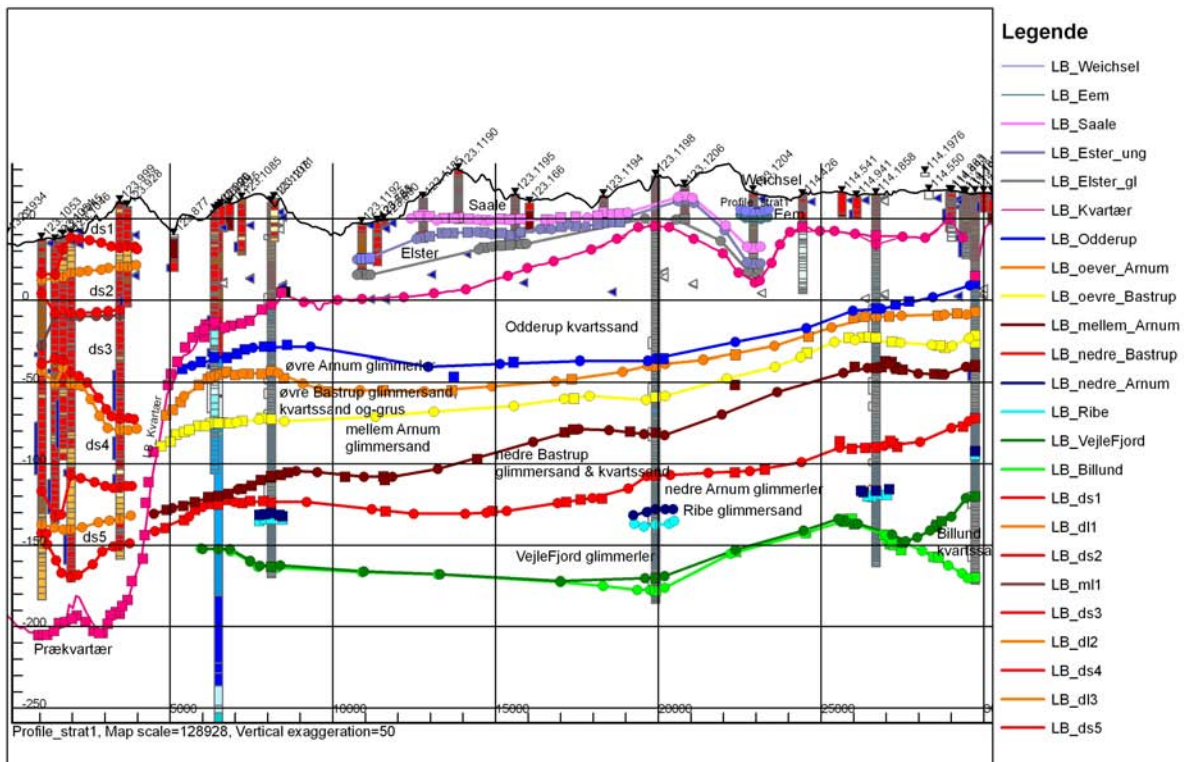
3.34.2 Formål og fremgangsmåde

Formålet med at opstille en hydrostratigrafisk model er at lave en model, der repræsenterer de hydrostratigrafiske enheder. Foruden de hydrologiske og vandkemiske data udgør den rumlige geologiske model i princippet datagrundlaget for den hydrostratigrafiske model, og den rumlige geologiske model bør derfor altid udarbejdes inden opstillingen af den hydrostratigrafiske model.

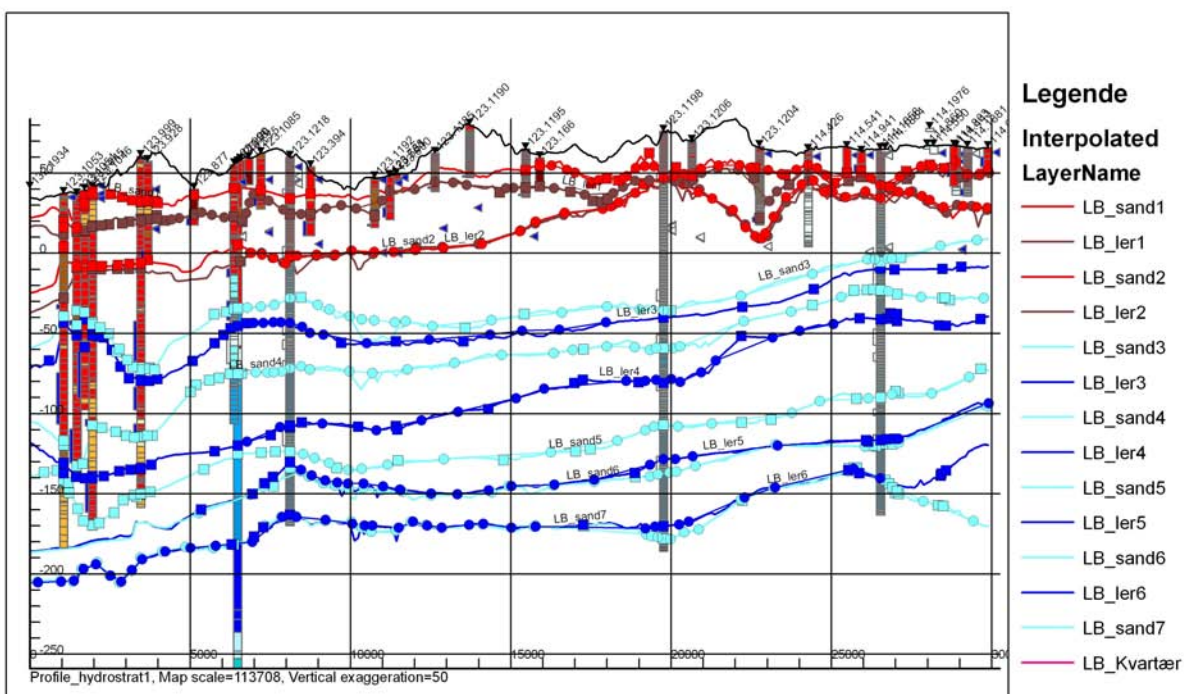
Når en rumlig geologisk model er udarbejdet og en hydrostratigrafisk model efterfølgende skal opstilles, vil det ofte være nødvendigt at forsimple strukturerne og mindske antallet af lag. I Figur 50 og Figur 51 ses samme profilsnit gennem henholdsvis en rumlig geologisk model og en hydrostratigrafisk model. Den rumlige geologiske model kan indeholde flere forskellige elementer:

- Grænser mellem geologiske tidsafsnit (f.eks. grænsen mellem Kvartær og Tertiær, eller mellem Weichsel og Eem).
- Lithologiske grænser (f.eks. bunden af et diluvialt lerlag).

- Grænser mellem geologiske formationer (f.eks. grænsen mellem Arnum og Odderup formationerne).
- Glacialstratigrafiske grænser (f.eks. mellem to till-aflejringer).



Figur 50 Rumlig geologisk model med geologiske laggrænser.

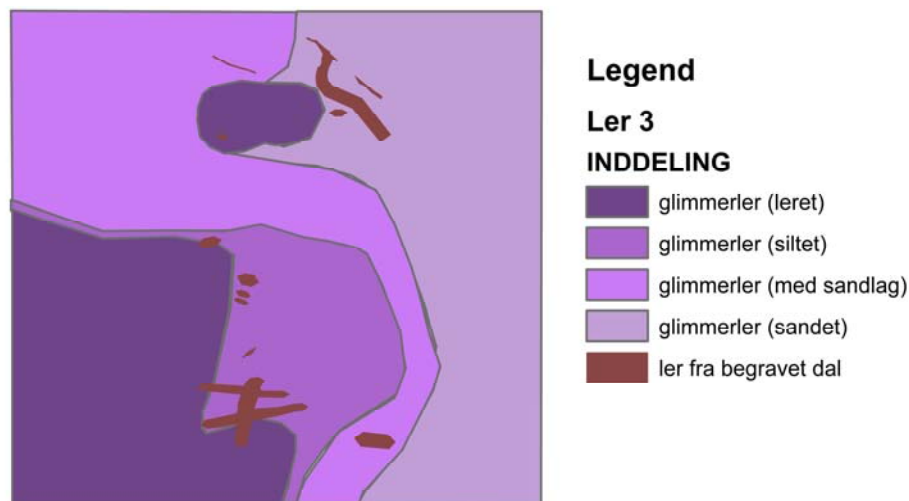


Figur 51 Hydrostratigrafisk model med de hydrostratigrafiske enheder f.eks. magasiner og mellemliggende lag.

Geologiske og hydrostratigrafiske zoneringsstemaer

Geologiske zoneringsstemaer kan bruges som en støtte ved overgangen fra den rumlige geologiske model til den hydrostratigrafiske model. Det kan især være nødvendigt med geologiske zoneringsstemaer, hvis den rumlige geologiske model primært indeholder lag, som ikke defineres ud fra lithologi. Hvis der som i Figur 50 er anvendt laggrænser som f.eks. definerer grænsen mellem Weichsel (LB_Weichsel) og Eem (LB_Eem), er der i den rumlige geologiske model ikke nødvendigvis skelnet mellem smeltevandssand og moræner fra Weichsel. For at en rumlig geologisk model kan anvendes som grundlag for den hydrostratigrafiske model, skal de stratigrafiske lag enten underopdeles i lithologiske lag eller der skal udarbejdes et geologisk zoneringsstema, der f.eks. viser den horisontale kornstørrelsesfordeling.

Hydrostratigrafiske zoneringsstemaer kan benyttes som støtte under processen fra den hydrostratigrafiske model til grundvandsmodellen. I Figur 52 ses et eksempel på et hydrostratigrafisk zoneringsstema.



Figur 52 Hydrostratigrafisk zoneringsstema over udbredelsen af lertyper i et hydrostratigrafisk lag (denne er knyttet til ler3 fra Figur 51).

Hydrostratigrafiske zoneringsstemakort tilknyttet et hydrostratigrafisk lag, kan f.eks. være:

- Den horisontale udbredelse af sedimenttyper (f.eks. dl, ml eller ds, dg, ms, mg), der typisk er adskilt i den rumlige geologiske model, men som indgår sammen i et hydrostratigrafisk lerlag eller sandlag.
- Prøvepumpningsdata, der har haft betydning for tolkningen af de hydrostratigrafiske lag, kan videregives som et zoneringsstema med T-værdier.
- Pejledata kan videregives som et zoneringsstema over de magasinspecifikke potentialeforhold.

Der kan også f.eks. udarbejdes zoneringsstemaer over grundvandets salinitet, hvis det er et problem der skal tages højde for i en efterfølgende grundvandsmodel.

3.34.3 Usikkerheder

Da den rumlige geologiske model danner grundlag for den hydrostratigrafiske model, vil usikkerheder fra den rumlige geologiske model overføres til den hydrostratigrafiske model (se kap. 3.36 "Usikkerhedsvurdering"). Men derudover opstår der usikkerheder i tolkningen af de hydrostratigrafiske lag, og da den hydrostratigrafiske model tolkes i hele modelrummet, upåagtet at datagrundlaget er svagt og geologien kompleks, bliver disse usikkerheder ofte betydelige. Der er desuden ofte en betragtelig usikkerhed på de hydrologiske og grundvandskemiske data, som benyttes ved den hydrostratigrafiske modelopstilling (se kap. 3.9 "Hydrologiske data" og kap. 3.10 "Kemiske data"). Da de hydrologiske og grundvandskemiske data ofte er begrænsede i mængde og detaljer, er de ofte svære at udbrede som zoneringsstema for hele modelområdet.

3.35 Dokumentation

3.35.1 Generel beskrivelse

Enhver model, der skal anvendes som baggrund for videre beslutningsprocesser, har kun ringe værdi, hvis der ikke foreligger en udførlig dokumentation af det udførte arbejde, herunder hvilke tolkninger og antagelser, der ligger til grund for arbejdet. Under såvel den geologiske og hydrostratigrafiske tolkning som den efterfølgende opstilling og kalibrering af grundvandsmodellen, er det nødvendigt at udføre en række tolkninger og antagelser, og der vil således være en høj grad af subjektivitet bygget ind i den færdige grundvandsmodel. For at kunne vurdere denne subjektivitet, og ikke mindst betydningerne heraf, er det særdeles vigtigt med dokumentation. Ligeledes er kvaliteten af dokumentationen afgørende, hvis en modelopgave skal overdrages til en anden modellør, eller hvis modellen på et senere tidspunkt skal danne grundlag for en revideret model.

Der er desuden behov for dokumentation til brug undervejs i modelopstillingen. Dette gælder især ved overgangen mellem den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model (se kap. 3.34 "Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model"), men også ved overgangen fra den geologiske forståelsesmodel til den rumlige geologiske model.

Dokumentation i forbindelse med geologisk modellering bør foregå på flere forskellige planer, og der stilles således forskellige krav mht. detaljeringen af dokumentationen.

3.35.1.1 Dokumentation for projektstyring.

I et projektførløb kræves der naturligvis en del administrativ dokumentation. Særligt i forhold, hvor modelopstillingen er købt hos rådgiver. Den administrative dokumentation vil ikke blive beskrevet nærmere her.

3.35.1.2 Dokumentation til kvalitetssikring

Denne dokumentation skal give andre mulighed for at vurdere og kvalitetssikre det udførte arbejde, herunder vurdere rimeligheden i de tolkninger og antagelser, der er foretaget. Kvalitetssikring 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. Mens der i nogen grad kan opstilles retningslinier og procedure for en kvalitetssikring af data, er det langt vanskeligere at opstille stringente retningslinier for kvalitetssikring af de opgaver, der har en mere subjektiv karakter, f.eks. geologiske tolkninger og tilgrundliggende antagelser (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger"). Reviews anvendes ofte som element til denne kvalitetssikring, dvs. en person på samme faglige niveau, som den der har opstillet modellen, foretager en kritisk gennemgang af det udførte arbejde, og pointerer eventuelle svagheder eller mulige alternativer, der bør overvejes. En sådan kvalitetssikring stiller væsentlige krav til dokumentationen. Her vil det som regel være nødvendigt at medtage delresultater, f.eks. plots, der har været anvendt til analyse af en given problemstilling, men som ikke illustrerer den endelig tolkede model.

3.35.1.3 Dokumentation for overdragelse/videreudvikling

I dette tilfælde skal dokumentationen gøre det muligt at tredje person kan overtage modelarbejdet, eller at modellen kan anvendes som grundlag for en senere revurdering eller videreudvikling. Principielt 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 i detalje. Typisk omfatter denne form for dokumentation også digitale filer.

3.35.2 Fremgangsmåde

Som udgangspunkt bør en model altid dokumenteres så den kan overtages af tredje person, eller så det gøres muligt at genoptage modellen på et senere tidspunkt for en opdatering. Ved én samlet dokumentation i form af en modelrapport, vil denne hurtigt få et uoverskueligt omfang og vil ikke være læsevenlig. Dokumentationen bør derfor opdeles i en egentlig modelrapport samt en teknisk dokumentation.

Den tekniske detaljeringsgrad af modelrapporten vil afhænge af det specifikke formål med rapporten. Skal denne eksempelvis danne baggrund for et detaljeret review, vil kravet til detaljeringen således være større, end hvis rapporten alene skal formidle de overordnede formål for opgaven samt de endelige resultater.

I forbindelse med en usikkerhedsanalyse (se kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger"), er en detaljeret dokumentation ligeledes påkrævet. Usikkerhedskilderne i såvel den geologiske model som grundvandsmodellen er talrige, og en dokumentation, der eksempelvis påpeger usikre elementer eller svagheder i modellen, er en betingelse for at kunne samle op på samtlige af disse kilder og foretage en samlet usikkerhedsvurdering af opgaven.

Under kap. 3.42 "Afrapportering" er indhold og minimumskrav for afrapporteringen diskuteret, og nedenfor fokuseres derfor på den tekniske dokumentation.

Teknisk dokumentation

Enhver modelopstilling er unik pga. eksempelvis formål, modelstruktur, tilgængelige data, projektførløb, modelopstillersens foretrukne arbejdsproces og en række andre forhold. 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 reproducere.

I forbindelse med den geologiske forståelsesmodel vil det primært være dokumentation i form af udførlig tekst og figurer eller tegninger, der vil være behov for. Under den rumlige modelopstilling vil det i praksis primært være en beskrivelse af de udførte geologiske tolkninger. Dvs. detaljerede beskrivelser af f.eks. korrelationer af laggrænser, benyttelse af basisviden, anvendte data, anvendte usikkerhedsvurderinger af data og usikkerhedsvurdering af den udførte tolkning (se kap. 3.36 "Usikkerhedsvurdering"). Dette skal som udgangspunkt registreres for hver enkelt tolkning, men i praksis

er dette en uoverkommelig opgave. Problemet kan dog normalt løses ved, at man, i stedet for at dokumentere for hvert eneste digitaliserede fladetolkningspunkt, kan udarbejde en beskrivelse for en samling af fladetolkningspunkter – f.eks. på profilniveau eller på fladeniveau.

For den hydrostratigrafiske models vedkommende forekommer der en større grad af deciderede antagelser med en endnu større grad af usikkerhed end ved de rumlige geologiske tolkninger, og det er således her mindst lige så vigtigt, at der foretages grundig dokumentation af det udførte arbejde. Der gennemføres desuden normalt her også ofte automatiske interpolationer af flader (se kap. 3.38 "Interpolation af tolkede flader og lag"), og i den forbindelse er det også vigtigt med grundig dokumentation af f.eks. gridningsprocedurer, settings m.m.

For en modelopstiller er et review en værdifuld proces, hvor det er muligt at få en fagligt baseret dialog om de antagelser og tolkninger, modellen er baseret på, hvilke problemer der evt. er opstået, hvilke svagheder der er i modellen, og hvad der i givet fald kræves for at rette op på disse svagheder eller belyse konsekvenserne heraf. Denne dialog vil 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.

For at kunne foretage en tilstrækkelig detaljeret dokumentation for en videre anvendelse af modellen, er det vigtigt at dokumentationen foretages løbende. Forsøger man at frembringe denne dokumentation til slut i projektet, vil en stor del af detaljerne 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 relevant 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 igen, og de betydende tolkninger og antagelser eller eventuelle problemstillinger indsættes i rapporten. Ofte føres en logbog på et stykke papir. Til trods for, at denne dokumentation kan være udførlig og fuld tilstrækkelig, anbefales det, at logbogen føres digitalt, således at dokumentationen kan lagres på databaser.

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, man skal blot erindre, 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. Inden for grundvandsmodellering er der stor fokus på nødvendigheden af en detaljeret dokumentation, så der kan gennemføres en kvalitetssikring eller en rekonstruktion af en model, se f.eks. /1/ - /4/. Modelling Support Toolbox- MoST /3/ er et software, som løbende tillader en detaljeret dokumentation af de enkelte tolkninger, samt generering af rapporter, der opstiller de indtastede informationer på en læsbar form. MoST giver således mulighed for en meget detaljeret dokumentation af det udførte arbejde, herunder tekniske detaljer, som generelt ikke er relevante i en modelrapport, men som kan være betydende for en senere videreudvikling af modellen. MoST er primært fokuseret på hydrologisk modellering inden for forskellige fysiske domæner, og har kun i mindre grad fokus på den geologiske modellering som grundlag for en grundvandsmodel. Der vil dog blive arbejdet på også at målrette det mod geologisk modellering.

3.35.3 Fordele og ulemper

En detaljeret dokumentation er ikke alene en fordel, men en forudsætning for, at det udførte arbejde kan vurderes eller videreføres. En detaljeret dokumentation bør således være et krav ved enhver modelopstilling.

Ulempen ved en detaljeret dokumentation er først og fremmest, at det kræver en ekstra arbejdsbyrde under modelopstillingen. Denne tid vil dog som regel være godt givet ud. Skal modellen senere videreudvikles vil den ekstra tid anvendt på dokumentationen i første omgang tjenes ind ved en mindre arbejdsindsats under opdateringen. Endvidere kan en mangelfuld dokumentation medføre, at modellen ikke er gennemskuelig og det risikeres, at modellen derfor vurderes utroværdig, og slet ikke anvendes som oprindeligt tiltænkt.

3.35.4 Referenceliste

- /1/ Sonnenborg, T. O. & Henriksen, H. J. (eds.) 2005: Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2005/80. http://vandmodel.dk/handbog_gr-model_2005.htm
- /2/ Refsgaard, J. C. and Henriksen, H. J., 2004: Modelling guidelines—terminology and guiding principles, *Advances in Water Resources* 27, pp. 71–82.
- /3/ Scholten, H., Kassahun, A., Refsgaard, J. C., Kargas, T., Gavardinas, C., Beulens, A. J. M., 2007: A methodology to support multidisciplinary model-based water management, *Environmental Modelling & Software* 22, pp. 743-759.
- /4/ Middlemis, H., 2000: Murray-Darling Basin Commission. Groundwater Flow Modelling Guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. South Perth. Western Australia. Project no. 125.

3.36 Usikkerhedsvurderinger

3.36.1 Generel beskrivelse

Når en geologisk model opstilles, anvendes en lang række forskelligartede data, som hver har deres egen usikkerhed. Ved sammenstillingen og samtolkningen af disse data tilføres der udover data-usikkerhederne også en tolkningsusikkerhed. En geologisk models samlede usikkerhed beskrives som en blanding af objektive målte datausikkerheder, vurderede datausikkerheder, samt af usikkerheder på subjektive geologiske tolkninger og antagelser. Når den færdige model efterfølgende anvendes i den videre proces, vil modellens usikkerheder bringes med videre og påvirke usikkerheden på det videre arbejde. En estimering af usikkerheden på geologiske og hydrostratigrafiske modeller er en kompliceret opgave, som indebærer en samlet vurdering af såvel datausikkerhed som tolkningsusikkerhed.

3.36.2 Formål

Da den geologiske model som regel efterfølges af vurderinger og beregninger, som tager afsæt i den geologiske models ramme, er det vigtigt med en videreformidling af de usikkerheder, som er påhæftet modellen. Det vil således være geologens opgave at søge at identificere, vurdere og dokumentere de forskellige typer af usikkerheder og endelig foretage en visualisering af resultatet. I de senere år er der beskrevet strategier for usikkerhedsvurderinger af såvel data som struktur for modeller anvendt i miljø- og vandressourcesammenhæng (se f.eks. /1/, /2/). I /3/ er der beskrevet en metode til beregning af usikkerhed på baggrund af datatæthed og geologisk heterogenitet og i /4/ er der beskrevet en metode til kvalitativ usikkerhedsvurdering af geologiske modeller.

3.36.3 Kvantitativ eller kvalitativ usikkerhedsvurdering?

Det er nogle gange 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 introduceret tolkningsusikkerheder.

Når modellen opstilles med tolkede lag og laggrænser, introduceres en endnu højere grad af subjektivitet. Denne subjektivitet kan ofte være så stor, at betydningen af usikkerheden på den samlede model langt overskygger betydningen af usikkerheden på de grundlæggende datasæt /4/. Det betyder, at man ikke blot kan kvantificere usikkerheden på en model ved at sammenstykke de enkelte målte/beregnedes datausikkerheder, da den subjektive andel er dominerende. Komplexiteten kommer også til udtryk, hvis det under den geologiske tolkning viser sig, at de forskellige data understøt-

ter hinanden. I sådanne tilfælde kan den samlede modelusikkerhed blive mindre end den samlede datausikkerhed alene /4/.

Geologens subjektive tolkninger af data er således afgørende for, hvordan laggrænserne optegnes. En kvantitativ usikkerhedsvurdering af den geologiske model som helhed kan ikke udføres, og derfor synes en blanding af kvantitative og kvalitative vurderinger at være den bedste måde at videreføre den geologiske models usikkerheder.

3.36.4 Dokumentation og visualisering af usikkerheder på den geologiske model

En væsentlig del af dokumentationen af geologiske modeller (se kap. 3.35 "Dokumentation") er dokumentationen af tolkningsusikkerheden. I bund og grund er det usikkerhederne, der er bestemmende for validiteten og brugbarheden af modellen. Usikkerheden indgår derfor som en central del af beskrivelserne i dokumentationen, men et overblik over usikkerhederne kan også gives ved hjælp af visualisering på kort.

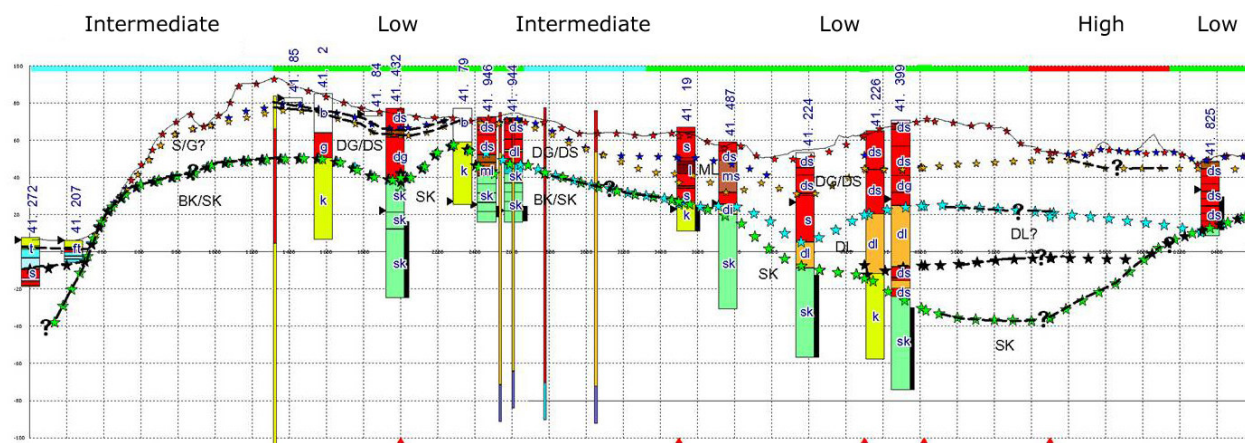
Usikkerhederne på den geologiske model kan visualiseres ved at kombinere forskellige temaer:

Datatæthed

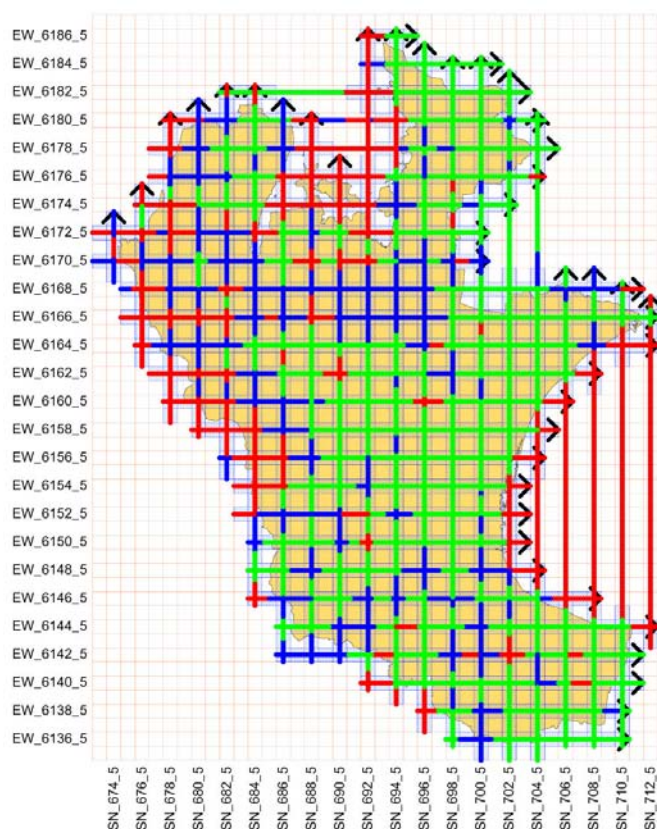
Den geografiske tæthed af data har en indflydelse på usikkerheden af den geologiske model, og vil derfor også være god at illustrere på oversigtskort. Det er dog vigtigt at huske på, at der ikke er en direkte sammenhæng mellem datafordeling og modelusikkerhed, da geologien kan veksle mellem komplicerede og ukomplicerede forhold, og da data indenfor modelområdet ikke nødvendigvis afspejler geologien lige godt.

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 usikkerhedsvurdering 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 lithologiske enheder indgå i ratingen. Usikkerheder på forskellige datatyper er beskrevet i Kap. 3.



Figur 53 Kvalitativ usikkerhedsvurdering langs profil i en rumlig geologisk model. Øverst på profilet er den kvalitative usikkerhedsvurdering for den samlede geologiske tolkning indtegnet som en bjælke med 3 farvetoner. Eksemplet er fra /5/.



Figur 54 Kvalitativ usikkerhedsvurdering af en regional hydrostratigrafisk model for Roskilde Amt. Usikkerhedsinterval-lerne på ovenstående figur er: grøn = lille usikkerhed, blå = mellem usikkerhed, rød = stor usikkerhed). Eksemplet er fra /6/.

Usikkerhed på de geologiske tolkninger

I /4/ 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 kan overskygge usikkerhederne ved de enkelte datasæt. Metoden anvendes på profilbaserede geologiske modeller, hvor geologen foretager en kvalitativ usikkerhedsvurdering langs de enkelte profiler. Dette resulterer i visualiseringer af usikkerheden langs profilerne (Figur 53) såvel som i fladen (Figur 54). Usikkerhedsvurderingerne kan udføres for den samlede tolkning eller for enkelte lag, lagflader eller udvalgte dele af lagserien alt efter fokus.

Det skal understreges, at usikkerhedsvurderingerne knyttes til den konkrete geologiske model. Usikkerhedsvurderinger for forskellige geologiske modeller kan derfor ikke

umiddelbart sammenlignes, selv om vurderingerne er udført efter de samme retningslinier. En metode, der vil kunne bruges for alle modeller, vil kræve en udvikling af et relativt stramt koncept med en præcis vejledning for gennemførelsen. En sådan metode er ikke udviklet på nuværende tidspunkt.

3.36.5 Referenceliste

- /1/ Refsgaard, J. C., Sluijs, J. P. van der, Brown, J. & Keur, P. van der, 2006: A framework for dealing with uncertainty due to model structure error. *Advances in Water Resources*, Volume 29, Issue 11, November 2006, pp. 1586-159.
- /2/ Nilsson, B., Højbjerg, A. L., Refsgaard, J. C. & Troldborg, L., 2006: Uncertainty in geological and hydrological data. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* pp. 3, 2675-2706.
- /3/ Terkelsen, M. Pratt, A. & Fog, C., 2003: Model til beregning af usikkerhed på digitale tredimensionelle geologiske modeller ud fra geologisk heterogenitet og datatæthed. *ATV Vintermøde*, marts 2003, pp. 471-480.
- /4/ 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.
- /5/ Watertech 2006: Geologisk model for Skørping-området. Udarbejdet for Nordjyllands Amt, juni 2006.
- /6/ Watertech 2006: Opstilling af regional hydrostratigrafisk model for Roskilde Amt. Delrapport 2: Opstilling af hydrostratigrafisk model. Udarbejdet for Roskilde Amt, december 2006.

3.37 Kvalitetssikring af tolkninger

3.37.1 Generel beskrivelse

Under arbejdet med geologisk modelopstilling skal der undervejs i de tre modeller, geologisk forståelsesmodel, rumlig geologisk model og hydrostratigrafisk model, foretages en kvalitetssikring af de tolkninger, der er udført. Geologiske tolkninger er ofte subjektive og vil til en vis grad afhænge af øjet, der ser. Kvalitetssikring af den type af tolkninger udføres derfor erfaringsmæssigt bedst ved et såkaldt review. Review af geologiske modeller kan bestå i, at en anden geolog er med til at gennemgå modellen, stiller spørgsmål og diskuterer tolkningsresultatet. Omfanget af denne form for kvalitetssikring vil variere fra projekt til projekt og afhænge af opgavens omfang og formål. Det vil inden for hver af de tre modeller være forskelligt, hvad reviewet skal omfatte. Herunder er redegjort for et eksempel på kvalitetssikring af rumlig geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger i forbindelse med modelopstilling under den nationale grundvandskortlægning.

3.37.1.1 Geologisk forståelsesmodel

En kvalitetssikring af den geologiske forståelsesmodel omfatter en gennemgang af udarbejdet tekst samt en gennemgang af 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 at være tilstrækkeligt for den geologiske forståelsesmodel.

3.37.1.2 Rumlig geologisk model

Ved review 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 skal vurderes om, og i hvilket omfang, den opstillede rumlige model adskiller sig fra den geologiske forståelsesmodel. Afvigelser skal være forklaret. Review af den rumlige geologiske model udføres ideelt set af en erfaren geolog med detaljeret kendskab til områdets geologiske opbygning og viden om geologiske processer samt geologisk modellering. I forbindelse med opstillingen af den rumlige geologiske model kan det være en fordel med flere reviews undervejs i forløbet.

3.37.1.3 Hydrostratigrafisk model

Ved tolkningen af den hydrostratigrafiske model inddrages der typisk flere datatyper i tolkningen som f.eks. pejledata, vandkemiske data m.m., der kan støtte inddelingen i hydrostratigrafiske enheder. Den hydrostratigrafiske model skal holdes op mod den rumlige geologiske model, og forskellene skal diskuteres og forklares. Et review af den hydrostratigrafiske model kan med fordel udføres som en diskussion mellem en erfaren geolog og erfaren hydrogeolog. De tolkede flader kan visualiseres i 3D og eventuel modstrid i forhold til den geologiske model bør diskuteres. Endelige skal 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.

3.37.2 Formål

Formålet med at gennemføre kvalitetssikring af de rumlige geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger undervejs i projektføreløbet er at sikre gennemtænkte og robuste rumlige geologiske og hydrostratigrafiske tolkninger.

3.37.3 Fordele og ulemper

Fordelen ved at kvalitetskontrollere tolkninger undervejs i modelopstillingen er, dels at sikre at tolkningerne bliver diskuteret med en fagperson, dels at fejltagte tolkninger kan rettes i tide og ikke først, når modellen er endelig færdigopstillet.

En ulempe ved at gennemføre den skitserede kvalitetsikring kan være, at det er mere tids- og resourcekrævende, end hvis den f.eks. alene gennemføres efter modelopstillingen. Det kan desuden være vanskeligt umiddelbart at finde en reviewer, som har den tilstrækkelige indsigt i det aktuelle geografiske område.

3.37.4 Usikkerheder

Et væsentligt usikkerhedsmoment ved denne form for kvalitetssikring er erfaringen hos den geolog/hydrogeolog, der udfører kvalitetssikringen. Det gælder dels både personens kendskab til det område, der opstilles model for, og personens kendskab til selve arbejdsgangen ved geologisk og hydrostratigrafisk modelopstilling.

3.38 Interpolation af tolkede flader og lag

3.38.1 Formål og generel beskrivelse

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 udtegne interpolerede flader som en del af tolkningsprocessen, men også for at visualisere indholdet af modellen. For den hydrostratigrafiske models vedkommende er det endelige produkt en digital hydrostratigrafisk model bestående af interpolerede gridflader, der kan benyttes i en grundvandsmodel.

Grundlaget for interpolation af en flade er en punktsværm af fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"), der stammer fra tolkningen af de geologiske data. Emner, der må overvejes i forbindelse med tolkning og interpolation, er:

- Anvendelse af støttende fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning")
- Brug af håndkonturering
- Valg af cellestørrelse og søgeradius
- Valg af interpolationsalgoritme
- Udførelse af interpolationen
- Kontrol af de interpolerede flader (grids)

3.38.2 Fremgangsmåde

Anvendelse af støttende fladetolkningspunkter

Ved interpolation af de digitaliserede fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"), kan den interpolerede flade i nogle tilfælde være i uoverensstemmelse med de forestillinger, geologen har gjort sig i forbindelse med tolkningsarbejdet. Det skyldes, at fladetolkningspunkterne ligger for spredt til, at en interpolation fanger de strukturer, geologen har forsøgt at modellere. En løsning på dette problem kan være at supplere punkterne med yderligere snappede og frie fladetolkningspunkter, eller at anvende støttende fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). Støttende fladetolkningspunkter kan anvendes i datasvage områder, hvor tolkningspunktsværmen skal udbygges, for at de ønskede geologiske strukturer skal blive fremhævet i det interpolerede grid. Dette kan evt. gøres ved at udtegne nye profiler eller ved horisontaltolkning (se kap. 3.27 "Horisontaltolkning" og kap. 3.25 "Punkttolkning"). Operationen vil normalt kræve en iterativ proces, hvor fladen interpoleres og sammenlignes med data og geologisk forståelse. Herefter tilføjes eller justeres yderligere fladetolkningspunkter, fladen interpoleres, osv., indtil den interpolerede flade stemmer overens med geologens forventninger.

Valg af gridcellestørrelse

Ved automatisk interpolation dannes et grid, der normalt består af et valgbart antal kvadratiske celler. Valget af gridcellestørrelsen for de interpolerede flader i den hydrostratigrafiske model kan ses

som et kompromis mellem detaljeringsgrad (små celler) og modellens håndterbarhed (store celler). I praksis laves interpolationerne i mange digitale hydrostratigrafiske modeller med en cellestørrelse på 50 eller 100 meter, og for hydrostratigrafiske modeller kan der evt. med fordel tages højde for den cellestørrelse, grundvandsmodellen er valgt at blive opbygget med. Her bør grundvandsmodelløren inddrages i valg af cellestørrelsen.

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.

Valg af interpolationsalgoritme og søgeradius

Interpolationen af lagflader kan udføres med en række forskellige interpolationsalgoritmer. En nærmere gennemgang af alle mulighederne ligger uden for denne vejlednings rammer, men der må tages stilling til, om der ønskes en interpolationsalgoritme, der er meget tro over for datapunkterne (her fladetolkningspunkterne), eller en algoritme, der giver et mere udglattet billede, der i højere grad ligner traditionelle håndkontureringer. Ønskes en datatro interpolation kan man f.eks. benytte en simpel IDW algoritme (Inverse Distance Weighted algoritme). Til mere bløde interpolationer, der stadig er relativt tro over for data, benyttes ofte kriging. Hvis der benyttes kriging, bør der tages beslutning om evt. benyttelse af en foregående variansanalyse (variogram), 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 evt. søgeradius naturligvis fremgå tydeligt af modeldokumentationen.

Ved de fleste interpolationsalgoritmer skal der vælges en søgeradius. Valget af en sådan afhænger igen af parametre som afstanden mellem datapunkterne (fladetolkningspunkterne), ønsker om udglatning, samt den valgte cellestørrelse.

Praktisk udførelse af interpolationen

Ideelt set bør interpolationen af lagflader ske i det geologiske tolkningsprogram. De mest benyttede tolkningsprogrammer har imidlertid kun et begrænset udvalg af interpolationsalgoritmer, så det kan være aktuelt at eksportere fladetolkningspunkterne til et decideret interpolationsprogram og udføre interpolationen der. De beregnede flader (grids) må derefter indlæses i det geologiske tolkningsprogram til kontrol og videre bearbejdning. Denne vekslen mellem programmer er naturligvis tidskrævende og giver endvidere mulighed for at lave fejl i datahåndteringen. I nogle programmer kan de beregnede grids eftermodelleres ved hjælp af gridmodellering, hvor griddet formes interaktivt i tolkningsmiljøet (se kap. 3.29 "Gridmodellering").

Kontrol af de interpolerede flader (grids)

Som ovenfor beskrevet er interpolationen af lagflader oftest en iterativ proces, hvor den interpolerede flade holdes op mod fladetolkningspunkterne såvel som grunddata og mod geologens forståelse af området. Hvis der her er uoverensstemmelser, foretages der justeringer i fladetolkningspunkterne – primært eventuelle støttende fladetolkningspunkter – og interpolationen foretages igen indtil den ønskede overensstemmelse er opnået. Efterfølgende bør de interpolerede flader sammen med den resterende digitale model kvalitetssikres af en anden erfaren geolog (se kap. 3.37 "Kvalitetssikring af tolkninger").

3.39 Fra hydrostratigrafisk model til grundvandsmodel

3.39.1 Generel beskrivelse

Slutproduktet i opstilling af den hydrostratigrafiske model er en rumlig model på digital form, hvor der er tolket i hele modelrummet. 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 modellør til sikring af, at den geologiske forståelse og de identificerede hydrogeologiske karakteristika bedst muligt bliver repræsenteret i grundvandsmodellen.

3.39.2 Formål

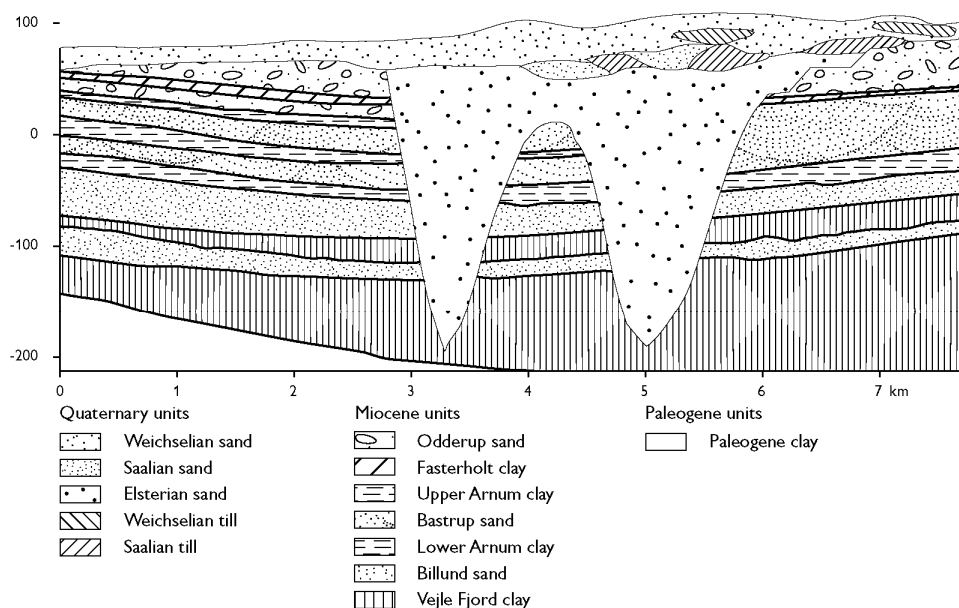
Opstillingen af den numeriske grundvandsmodel inkluderer en række opgaver, hvoraf en del er af modelteknisk karakter og i nogen grad afhænger af det valgte modelsystem. For en diskussion af disse forhold henvises til eksisterende vejledninger for grundvandsmodellering, f.eks. /1/, /2/, /3/ og /4/. Af særlig relevans for samspillet mellem geolog og modellør under opstillingen af en grundvandsmodel er:

- Valg af rumlig diskretisering (beregningsgrid i grundvandsmodellen)
- Fastsættelse af randbetingelser
- Bestemmelse af initiale værdier for de hydrauliske ledningsevner samt realistiske variationsintervaller for disse.

Valget af den rumlige diskretisering er som regel en afvejning mellem den ønskede detaljeringsgrad for modellen og den ekstra beregningstid, som et større antal beregningspunkter medfører. Her vil det endelige valg i høj grad afhænge af den pågældende opgave og kravene hertil, samt den detaljering, hvormed den geologiske model er opstillet. For modelopgaver med fokus på ressourcevurderinger og vandbalancer på større skala, vil den optimale diskretisering være en, der lige netop er i stand til at opløse informationen i den geologiske model. Anvendes en grovere diskretisering, vil den geologiske information ikke udnyttes fuldt ud, modsat vil en finere diskretisering ikke resultere i en mere korrekt simulering. Disse forhold er også i stor udstrækning gældende for partikelbanesimuleringer. Er der større fokus på de faktiske strømningsveje, dvs. størrelser og retninger af gradienterne, som f.eks. er vigtige omkring sænkningstragter fra indvindinger, vil en finere numerisk diskretisering give en mere korrekt beskrivelse. Ligeledes vil det ofte være påkrævet at anvende en finere diskretisering for f.eks. stoftransportsimuleringer, da der ellers ofte kan opstå numeriske problemer.

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 55), hvor der stilles særlige

krav til den numeriske diskretisering for, at der kan opnås en korrekt vandudveksling mellem sedimenterne i dalen og de omkringliggende sedimenter.



Figur 55 Profilsnit gennem et område med dale der gennemskærer homogene tertiære lag. Her stilles særlige krav til den numeriske diskretisering. Fra [6].

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 [7]. 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.

Modelrandene i en grundvandsmodel bør i videst muligt omfang forsøgt placeret, så der er sammenfald med naturlige hydrologiske grænser. Ofte anvendes havet, søer, vandløb og grundvandskel som rande, men det er også muligt at placere modelrandene ud fra geologiske betragtninger. Hvor en meget permeabel geologisk enhed støder op til en lavpermeabel enhed. Ved f.eks. en lavpermeabel ler, vil det ofte være rimeligt at antage, at der ikke sker nogen strømning henover grænsen (no-flow rand). Som hovedregel anvendes en no-flow rand i bunden af modellen. Her skal placeringen vurderes på baggrund af de hydrogeologiske forhold og forventede grundvandsstrømninger. I specielle tilfælde vil en forkastning ligeledes kunne udgøre en randbetingelse. I praksis er det ikke altid muligt at placere randbetingelserne optimalt, og i sådanne forhold er det meget vigtigt, at geologen viderebringer informationer til modelløren, der kan have betydning for vurderingen af vandudvekslingen henover randen. En begravet dal vil eksempelvis kunne bortlede store vandmængder fra området, hvilket ikke nødvendigvis er observerbart ud fra de tilgængelige pejlinger. Placering af en no-flow rand her vil selvsagt være fejlagtig, og kan have stor effekt på simuleringerne.

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 overparameterisering. Indføres der mange "frie" parametre i modellen, kan man populært sagt få modellen til at passe hvad som helst, men dens prediktive evne vil være meget tvivlsom /5/. Det er derfor vigtigt, at geologen deltager i den endelige parameterisering af 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 de hydrogeologiske egenskaber (se kap. 3.34 "Fra rumlig geologisk model til hydrostratigrafisk model"). 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.

3.39.3 Usikkerheder

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, hvorpå geologens kvalitative vurderinger af usikkerheden kan omsættes til kvantitative størrelser, hvis effekt kan undersøges vha. modellen. For at nå dette mål er der stadig behov for udvikling af procedurer og metoder. I kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger" er der dog givet et forslag til, hvordan en usikkerhedsanalyse kan gennemføres. Der er ingen tvivl om, at hvis man ønsker at vurdere usikkerheden stammende fra de subjektive 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 udfører en grundig dokumentation (se kap. 3.35 "Dokumentation").

3.39.4 Referenceliste

- /1/ Sonnenborg, T. O. & Henriksen, H. J. (eds.) 2005: Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2005/80 http://vandmodel.dk/handbog_gr-model_2005.htm
- /2/ Scholten, H., Kassahun, A., Refsgaard, J. C., Kargas, T., Gavardinas, C. & Beulens, A. J. M. 2007: A methodology to support multidisciplinary model-based water management. Environmental Modelling & Software.
- /3/ Modelling Support toolbox (MoST). http://harmoniqua.wau.nl/tools/login_download.html
- /4/ Middlemis, H., 2000: Murray-Darling Basin Commission. Groundwater Flow Modelling Guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. South Perth. Western Australia. Project no. 125.
- /5/ 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

- /6/ 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 juni 2008, pp 659-674.
- /7/ Nielsen, T. S., 2007: Udveksling mellem grundvand og overfladevand – eksempel fra Harrestrup å. Kandidatafhandling. Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.

3.40 Det digitale slutprodukt

Rumlige geologiske modeller og hydrostratigrafiske modeller består grundlæggende af laggrænser og lag. Laggrænserne er normalt defineret af fladetolkningspunkter. Lagene er defineret som rummet mellem laggrænserne.

Mens de hydrostratigrafiske modeller er tolket i hele modelrummet, indeholder rumlige geologiske modeller både lag og lagflader, der kun optræder lokalt i modelrummet. Dette kan både være fordi lagets fysiske udbredelse er begrænset eller fordi lagets udbredelse ikke kendes. Laggrænserne i den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model er grundlæggende defineret af fladetolkningspunkter (se kap. 3.25 "Punkttolkning") med tilhørende dokumentation og usikkerhedsvurderinger (se kap. 3.35 "Dokumentation" og kap. 3.36 "Usikkerhedsvurderinger"). I nogle tilfælde kan det dog være en fordel direkte at forme laggrænserne ved hjælp af gridmodellering (se kap. 3.29 "Gridmodellering"). Her er der dog særlige krav til udførlig dokumentation.

De digitale tolkningspunkter består af forskellige typer (se kap. 3.25 "Punkttolkning"). F.eks. skelnes der mellem frie fladetolkningspunkter, som ikke er snappede til data og snappede fladetolkningspunkter, som er placeret præcist i f.eks. borer.

Det digitale produkt består af:

- Laggrænser beskrevet ved
 - Fladetolkningspunkter af forskellig art
 - Grids
 - Udbredelse
 - Beskrivelse
 - Usikkerhed
- Lag beskrevet ved
 - Øvre og nedre laggrænse
 - Udbredelse
 - Beskrivelse
 - Usikkerhed
- Dokumentation af tolkninger/vurderinger og arbejdsgang knyttet til
 - Data
 - Tolkningspunkter
 - Grids
 - Profiler
 - Laggrænser
 - Lagflader
 - Områder
 - Hele modellen
- Usikkerhedsanalyse
- Beskrivelser af geologisk forståelsesmodel
- Beskrivelser af baggrund for modellen

Desuden består det digitale slutprodukt af modelfiler fra det benyttede software, således at modelerne kan genåbnes og viderebearbejdes.

3.41 Eksport af modeller til modeldatabasen

3.41.1 Generel beskrivelse

GEUS har i samarbejde med de nu nedlagte amter etableret en database-facilitet til lagring af geologiske modeller kaldet "modeldatabasen".

Formålet med modeldatabasen er:

- At sikre at modeller, der bliver opstillet i forbindelse med bl.a. grundvandskortlægningen, lagres i en national database.
- At skabe et samlet overblik og en let adgang til alle rumlige geologiske og hydrostratigrafiske modeller, der er blevet opstillet og indberettet.
- At skabe en brugervenlig facilitet, som sikrer lagringen af alle modeller, nye så vel som ældre modeller.
- At sikre, at modellerne er ensartede og tilstrækkeligt dokumenterede.
- At sikre genanvendelse og vidensdeling omkring de modeller der er opstillet.

Modeldatabasen kan tilgås fra Internet: /1/

Databasen har grundlæggende en struktur, der muliggør lagring af grids, punkter og profiler med tilhørende attributter. Færdige modeller kan indlæse på et prædefineret eksportformat (PC-modelformatet), idet det er hensigten, at de anvendte modelleringsprogrammer kan eksportere til dette format. P.t. kan MikeGeoModel generere dette udvekslingsformat under forudsætning af, at al modellering inklusive gridning er foretaget med programmet.

Modeldatabasen udvikles løbende. Senest er det muliggjort at at skelne mellem geologiske og hydrostratigrafiske modeller samt for de geologiske modeller at indlæse punkter og grids, der ikke dækker hele modelrummet, og som ikke nødvendigvis indgår i et specifikt lag. Endvidere er det muliggjort at uploade dokumenter og andre eksterne filer, som er tilknyttet den enkelte model. Endvidere arbejdes der på nogle digitale hjælpeprogrammer, som kan benyttes til at opbygge en PC-model til indlæsning ud fra løsrevne model data (grids og punkter). Hjælpeprogrammerne udvikles for at imødekomme et ønske om også at kunne indlæse "gamle" modeller. I den videre udvikling vil der blive arbejdet frem mod at modeldatabasen så vidt muligt kan håndtere hele det digitale slutprodukt, som det er skitseret i kap. 3.40.

3.41.2 Fremgangsmåde ved eksport af modeller

Indlæsning af en model i modeldatabasen foregår i tre trin:

1. Generering af en lokal eksport database i det såkaldte PCModel-format.
2. Upload af PCModellen til modeldatabasen hos GEUS
3. 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. Dokumentation af formatet findes på hjemmesiden /1/

Upload af en PCModel

For at kunne benytte modeldatabasen og uploade modeller, skal man være registreret 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 uploadede model, og brugeren modtager en mail fra databasen, der giver brugeren ret til at dokumentere modelopbygningen.

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. Brugers e-mail-adresse, 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.

3.41.3 Modeller lagret i modeldatabasen

Når en model er tilstrækkeligt dokumenteret i modeldatabasen, vil den kunne ses af alle modeldatabasens 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 "model-browser", 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 på PCModel-formatet.

3.41.4 Referenceliste

/1/ www.geus.dk/modeldb

3.42 Afrapportering

3.42.1 Generel beskrivelse

Når arbejdet med den geologiske modelopstilling er afsluttet, skal der afleveres en modelrapport sammen med den digitale model (Se afsnit 3.40 om "Det digitale slutprodukt"). Modelrapporten skal sammen med en beskrivelse af de geologiske og hydrostratigrafiske forhold og den tekniske dokumentation (Se kap. 3.35 "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 projektforsløbet sker en forventningsafstemning med hensyn til rapportens indhold og omfang. Modelrapporten afleveres ofte dels som en rapport i papirformat dels som en digital udgave i PDF-format.

3.42.2 Formål

Modelrapporten skal udarbejdes, så den sammen med den tekniske dokumentation 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 andre skal kunne arbejde videre med den opstillede model.

3.42.3 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.

Tekstdel

I rapportens tekstdel skal der redegøres for det arbejde, der er udført inden for hvert af de tre trin i modelopstillingen, den indledende geologiske forståelsesmodel, den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model, ligesom resultaterne 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. I rapporten skal der også redegøres for de betragtninger omkring usikkerheder og kvalitet, der er gjort undervejs. Resultatet af den statusgennemgang, der er foretaget efter hvert af trinnene i modelarbejdet skal beskrives, herunder om modellen forventes at kunne opfylde de krav, der indledningsvist er stillet.

Disposition – inklusive stikord

I det følgende er der givet et forslag til en disposition på kapitelniveau for en modelrapport. Til hvert kapitel er givet en række stikord, som kan indgå i rapportteksten.

Rapporttitel og titelblad	Dækkende titel for rapportens indhold. Derudover bl.a. • Forfatternes navne, • Navn på den der har godkendt rapporten • Måned og år • Osv
---------------------------	---

Indholdsfortegnelse	Indholdsfortegnelse inkl. bilagsoversigt og appendiks oversigt
Kapitel 1 Resumé	Resumé af indholdet i rapporten, herunder delkonklusioner og konklusion
Kapitel 2 Indledning	Indledning hvor baggrunden for det udførte arbejde beskrives. Indledningen kan med fordel indeholde en kort præsentation af de enkelte kapitlers indhold.
Kapitel 3 Datagrundlag	Præsentation af datagrundlaget. •Hvor stammer de forskellige datatyper fra •hvordan de er leveret •Manglende data og årsag •osv.
Kapitel 4 Problemformulering	I dette kapitel redegøres der bl.a. for •Modelområde •Modeltype •Fokusområder •Formål •Detaljeringsgrad •Særlige problemstillinger •osv.
Kapitel 5 Teknisk tilgang	En overordnet beskrivelse af arbejdsgangen ved løsning af opgaven, kapitlet kan bl.a. indeholde: •Anvendt software, type og version •Tolkningsmetoder •Kvalitetssikring •Profiludlægning, -optegning og -bufferzone •Gridalgoritmer og gridparametre •Koordinatsystem •osv.
Kapitel 6 Indledende geologisk forståelses model	I dette kapitel beskrives den en indledende og overordnede geologiske og strukturelle opbygning, som forventes at kunne findes i området. Kapitlet kan bl.a. indeholde •Datagrundlag •Geologien i området •Vurdering af formålsopfyldelse •Usikkerhedsvurderinger •osv
Kapitel 7 Rumlige geologisk model	Den rumlige geologiske model for området beskrives, herunder redegøres for den geologiske dannelseshistorie og dannelsesprocesser. I dette kapitel berøres bl.a. •Lagserien •Dannelseshistorie og dannelsesprocesser •De geologiske tolkninger •Lagenes udbredelse •Usikkerhedsvurderinger •Modelopsætning •Fravalgte og tilvalgte data •Profilantal og digitalisering af modellen •Evt. tolkningsprocedure •osv.
Kapitel 8 Hydrostratigrafisk model	Den hydrostratigrafiske model beskrives og eventuelle forsimplinger i forhold til den rumlige geologiske model. I kapitlet redegøres bl.a. for

	•Fravalgte og tilvalgte data •Antal lag i modellen •Anvendelsen af kemiske data, potentiale m.m. •Tolkningsprocedure •Modelopsætning •Digitale flader •Usikkerhedsvurderinger •Osv
Kapitel 9 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, skal disse beskrives.
Kapitel 10 Konklusioner og anbefalinger	Konklusionerne fra modelarbejdet samles, der kan eventuelt laves og eventuelle anbefalinger til videre arbejde eller forbedringer af datagrundlag og model angives.
Kapitel 11 Referencer	Angivelse af referencer
Appendiks og Bilag	Disse samles bagest i rapporten

Bilagsdel

Normalt indeholder en modelrapport en del bilag i form af forskellige kort og som regel også geologiske profilsnit. Inden rapporten endelig udarbejdes og afleveres, anbefales det at afklare, hvilke profiler, kort og korttemaer der forventes vedlagt rapporten. Det skal også afklares, hvad der skal fremgå af de enkelte bilag, ligesom det afklares, om det er relevant at udarbejde papirudgaver af samtlige tolkede geologiske profilsnit. Som minimum skal profilerne i form af billedfiler/PDF være indeholdt i det digitale slutprodukt modelprojektet (Se kap. 3.40 "Det digitale slutprodukt").

Herunder ses en liste over typiske bilag i en rapport over geologiske modelopstilling. Hvilke bilag det er relevant at vedlægge rapporten vil variere fra projekt til projekt og afhænge af projektets formål, områdets geologiske opbygning, de data der er til rådighed m.m.

Bilagsliste

- Arbejdslog og anden teknisk dokumentation
- Jordartskort,
- Prækvartærkort
- Per Smeds kort
- Skitser
- Temakort (nitrat, redoxfront el.lign)
- Tolkede profiler evt. type profiler
- Isopachkort
- Fladekort over tolkede laggrænser
- Eventuelle zoneringsmakort
- Usikkerhedskort
- Potentialekort
- Osv

3.42.4 Afrapportering af digitale data

Hele det afrapporterede materiale skal også foreligge digitalt. Dette materiale kan bl.a. bestå af tekstfiler, billedfiler og grafiske filer. Lagflader bør foreligge enkeltvist på tekst/tabelform. Desuden skal modelfiler fra de benyttede softwareprodukter afleveres, således at modellerne kan genåbnes og viderebearbejdes (se kap. 3.40 "Det digitale slutprodukt").

Afrapportering af modelprojektet bør også omfatte up-load til modeldatabasen af den del af projektet, som databasen kan modtage (se kap. 3.41 "Eksport af modeller til modeldatabasen").

3.42.5 Rapport database

Den endelige rapport skal desuden lægges i GEUS' rapportdatabase.

Andre Geo-vejledninger

Geo-vejledning 1 Jordprøver fra grundvandsboringer

Geo-vejledning 2 Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande



GEO-VEJLEDNING 3 **OPSTILLING AF GEOLOGISKE MODELLER TIL GRUNDVANDSMODELLERING**

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen og miljøcentrene faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen.

Disse vejledninger udgives i en serie kaldet Geo-Vejledninger, og skal blandt andet tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver som miljøcentrene foretager.

Formålet med denne Geo-Vejledning er at højne kvaliteten af de geologiske modeller, der opstilles som et led i grundvandskortlægningen.

Målet er bl.a. at sikre, at de geologiske modeller er opbygget efter nogle ensartede arbejdsrutiner/-procedurer, så andre kan vurdere kvaliteten af det endelige produkt.

Ved at bruge fremgangsmåden i Geo-Vejledningen, vil det blive lettere for andre at arbejde videre med, eller at opdatere geologiske modeller.

Geo-Vejledningen indeholder 3 hovedkapitler:

Kapitel 1 beskriver den indledende fase med problemformulering og projektbeskrivelse.

Kapitel 2 beskriver arbejdsgangen ved den geologiske modellering; hvordan og i hvilken rækkefølge modelarbejdet gribes an.

Kapitel 3 er en emneopdelt "værktøjskasse", der kan bruges som opslag i forbindelse med anvendelse af kapitel 1 og 2.