

Kapitel 3 OPSTILLING AF GEOLOGISK MODEL

Peter Gravesen

Kvartærgeologisk afdeling, GEUS

Nøglebegreber: Geologisk variabilitet, sedimentologiske modeller, modeltyper, tilgængelige data, korrelation af lag, heterogenitetsforhold, manuelle og computerfremstillede modeller, skalaforhold.

ABSTRACT: En geologisk model er en idealiseret og simplificeret udgave af de komplekse, naturlige forhold, og modellen fremstilles for at forstå lagenes rumlige opbygning og deres strukturer samt de fysiske og kemiske processer som foregår i dem. Den geologiske model anvendes desuden som grundlag og "skelet" i den hydrogeologiske model, hvor de naturlige forhold yderligere bliver forenklede. En god geologisk model kræver detaljerede data fra daglokaliteter, kortlægning, borer og geofysik. Detaljeringsgraden afhænger selvfølgelig af formålet. Det kan imidlertid ofte være muligt at fremstille en geologisk model i et område ud fra foreliggende data, men kvaliteten på data, datatæthed mv. afgør pålideligheden.

3.1 INDLEDNING

De danske grundvandsmagasiner er helt overvejende opbygget af løse sand-grus aflejringer fra Kvartær, Tertiær, Jura og Kridt tidsafsnittene og kalkbjergarter fra Tertiær og Kridt. På Bornholm findes desuden også magasiner af sandsten, skifre og kalksten fra Palæozoikum og gnejs og granit fra Prækambrium. Forståelse for den geologiske variabilitet og beskrivelse af magasinernes rumlige opbygning er fundamentet for at forstå fysiske og kemiske processer, der foregår, når vandet bevæger sig gennem dæklag til magasinerne og ved vandtransport i selve magasinerne. Den geologiske model er dermed også vigtig ved opstilling og arbejde med hydrogeologiske modeller.

En geologisk model er en idealiseret og simplificeret udgave af de komplekse naturlige forhold, og modellen fremstilles for at forstå sedimenternes og bjergarternes rumlige opbygning og deres strukturer samt de fysiske og kemiske processer, som foregår i dem.

Oplysningerne om sedimenternes og bjergarternes udbredelse, sammensætning og alder baseres især på analyse af boreprøver og deres placering i borer, men også geofysiske logs og overfladegeofysik indgår ved geologisk modellering (Hansen & Gravesen, 1996; Gravesen, 2000). Viden om de enkelte lags mulige udbredelse kan fås ved at opstille geologiske modeller, der er udviklet inden for den sedimentologiske videnskab, især i forbindelse med olie-gas efterforskning suppleret med traditionelle geologiske kortlægningsmetoder (Walker, 1984).

De sedimentologiske modeller bliver helt overvejende etableret på grundlag af daglokaliteter, hvor lagenes vertikale og horisontale udbredelser og variationer kan iagttages. De vigtigste egenskaber er laggrænser, kornstørrelse og sedimentstrukturer. Ud fra disse egenskaber er der blevet beskrevet en række teoretisk mulige modeller, der dog næsten aldrig genfindes komplette i naturen. Eksempler på modeller for løse sand-grus flodaflejringer er den type af flettede flodsystemer, der opbygger de danske hedesletter fra Weichsel tidsafsnittet og for ler-silt aflejringer, den type af søaflejringer som kaldes varv aflejret i et iskontaktmiljø ved Weichsel isen.

De vertikale og horisontale variationer i aflejringerne karakteriseres forudsagt ud fra de sedimentologiske modeller kan anvendes ved stor skala modellering af grundvandsmagasinerne, men i forbindelse med beskrivelse af vandstrømning og forureningstransport i grundvandet er der brug for flere detaljer og præcise rumlige beskrivelser til vurdering af den hydrauliske ledningsevne i lagene. Magasinernes hydrauliske ledningsevne kan variere inden for selv tynde lag for samme slags aflejring.

Under danske forhold kan hele lagseriekomplekset beskrives i forhold til flader og de geologiske enheder under eller over disse flader. Den øvre begrænsende flade er jordoverfladen og en omtale af dens topografi og geomorfologi foretages i afsnit 3.2. En anden flade som også er væsentlig, er prækvartæroverfladen, dvs. fladen der adskiller de kvartære aflejringer fra de ældre aflejringer, og den beskrives i afsnit 3.3. De geologiske enheder som indgår i grundvandsmagasinerne, deres dæklag eller andre begrænsende lag er omtalt i afsnit 3.4. Datatyper er kort beskrevet i afsnit 3.5, mens modeltyper, opstillingen af den geologiske model og dens usikkerheder omtales i afsnittene 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 og 3.10.

De geologiske modeller og metoderne til at etablere dem, som beskrives i dette kapitel kan anvendes uanset hvor stor en datamængde der foreligger ved en konkret undersøgelse, men selvfølgelig vil modellens gyldighed øges, jo flere data der foreligger, og jo større tæthed disse data har.

3.2 JORDOVERFLADENS TOPOGRAFI OG GEOMORFOLOGI

Topografien er landskabets fysiske træk (forhold) som relieffet og konturerne, mens geomorfologi er læren om landskabets fysiske og geologiske former, dets dannelse og de ændringer der sker med dem. Topografien eller terrænforholdene, som foreligger på kort og digitalt, har væsentlig betydning for de hydrogeologiske forhold både ved grundvandsdannelse, nedsivning og strømning i magasinerne til vandløbene eller havet. Ved undersøgelser på f.eks. oplandsstørrelse er disse data helt centrale ved hydrogeologisk modellering. For at bedømme et landskabs opbygning er den geomorfologiske analyse en vigtig indgang, da der kan være sammenhæng mellem indholdet (sedimenterne) og f.eks. bakkernes og fladernes form. Det er helt overvejende de kvartære aflejringer, som vil indgå i analysen, og det kvartærgeologiske jordartskort giver i denne analyse sammensætningen i den øverste meter og dermed en indikation på indhold og dannelse. En opdeling af et område i geomorfologiske enheder kombineret med andre data kan anvendes både ved indledning til en undersøgelse og som et værktøj ved opskalering. Jordoverfladen og overfladen for de geomorfologiske enheder (ofte den samme) skal derfor altid indgå i modelleringen.

3.3 PRÆKVARTÆRETS HØJDEFORHOLD

Overfladen, der afgrænser de kvartære aflejringer fra de ældre prækvartære aflejringer, er en overflade der er skabt ved erosion, bassinindsynkning og fjernelse af materiale. Der er således en stor tidsmæssig forskel i og med, at det yngste tertiære tidssnit, Pliocæn, faktisk kun er truffet i én boring i Danmark helt nede ved grænsen til Tyskland. Pga. af indsinkingen og erosionen er der således en aldersforskel der strækker fra Nedre Kridt til Kvartær i Østdanmark og fra Prækambrium til Kvartær på Bornholm.

Prækvartæroverfladen har derfor været udsat for fysiske og kemiske processer gennem mange millioner år, og må formodes at have en variation i relieffet, der mindst ligner den nuværende danske jordoverflade. Når overfladen er blevet kortlagt ved hjælp af boringsdata (ved konturering), har der været et problem med for stor afstand mellem data. Dette bevirker altid en udglatning i relieffet, som antagelig ikke er korrekt. Geofysiske undersøgelser, især seismiske, elektriske og elektromagnetiske, kan medvirke til at forbedre datagrundlaget

Prækvartæroverfladen og dens jordarter/bjergarter har forskellig betydning i forhold til den geologiske model og de hydrogeologiske forhold. I nogle tilfælde begrænser de prækvartære aflejringer de kvartære, som når f.eks. kvartære sand- og leraflejringer i Århus området findes i dalsystemer i fedt tertiært ler. I andre tilfælde indgår de prækvartære aflejringer i grundvandsmagasinet, som når kvartær sand findes oven på tertiært kvartæssand i Vestjylland.

3.4 SEDIMENT/BJERGARTS ENHEDER

Stratigrafi er læren om de geologiske lags indbyrdes relationer, og hvis ikke andet har påvirket lagene end almindelige aflejningsprocesser, vil de ældste lag ligge nederst og de yngste øverst.

Denne ideelle tilstand er baggrunden for den klassiske geologiske "lagkage"-model, hvor lagene opfattes at ligge regelmæssigt ovenpå hinanden. Denne tilstand gør mulighederne for at korrelere identiske/jævndrende lag fra punkt til punkt relativt let. Dette kan også være rigtigt i situationer, hvor de stratigrafiske enheder er aflejret under ensartede forhold over lange horisontale stræk, som f.eks. langs en kyst. Den ideelle tilstand er desværre langt fra altid tilstede under danske forhold, i alt fald hvor det drejer om de kvartære aflejringer, mens det til en hvis grad kan siges at være rigtigt for kalkaflejringer fra Kridt og Tertiær perioden samt marint kvartssand fra Miocæn. De kvartære aflejringer er præget af uregelmæssige aflejringsforhold og påvirkning af istidens gletschere, som har skabt både aflejringsmæssige og strukturelle heterogeniteter. I værste tilfælde ligger ældre lag ovenpå yngre.

3.5 DATATYPER

De geologiske modeller udarbejdes på grundlag af "hårde data": Direkte feltdata fra daglokaliteter, geologisk kortlægning eller borer og "bløde data": Geofysiske data og geologisk erfaring (og de teoretiske modeller).

De hårde geologiske data er ofte allerede eksisterende data som f.eks. boringsdata fra GEUS boringsdatabase og Borearkiv (Gravesen & Fredericia, 1984). Der findes p.t. ca. 270.000 borer i borearkivet, hvoraf de ca. 215.000 er lagret i databasen. Boringsformål fordeler sig med 53 % vandforsyningsboringer, 22 % geotekniske borer, 12 % råstofboringer, 6 % geofysiske shot holes og 8 % borer i forbindelse med grundvandsovervågning, forureningsundersøgelser og videnskabelige undersøgelser.

De forskellige boringstyper indeholder information, som er relevant ved både manuel og computerbaseret geologisk modellering. Den geologiske information er primært baseret på undersøgelser af boreprøver og oplysninger fra borefirmaet (f.eks. laggrænser). Boreprøverne giver oplysninger om bjergarts/jordartstype, hærtningsgrad, kornstørrelse, farve, bikomponenter, mineralogi, fossilindhold, kalkholdighed, og almindeligvis er dannelsesmiljø og alder også bestemt (Larsen et al., 1995).

Daglokaliteter og geologiske kort udgør en anden "hård" datakilde, hvor især kortene er anvendelige i digital form. Jordartskort, geomorfologiske kort og topografiske kort er, hvor der er tale om præsentation af observerede data, således et vigtigt databidrag. I nogle tilfælde er der dog på disse kort tale om fortolkning, som altid vil kunne diskuteres.

Geofysik har været anvendt ved grundvandsundersøgelser igennem længere tid. Data fra borehulslogs, især gammalogs, resistivitetslogs og induktionlogs, er vigtige hjælpemidler, når detaljer om lagfølgerne skal fastsættes i de enkelte borer. Den usikkerhed, der er ved fastsættelse af laggrænser på basis af de udtagne boreprøver, kan elimineres ved at optage geofysiske logs i borehullet. Derudover kan de geofysiske logs påvise og placere heterogeniteter i lagfølgen (efter fortolkning) og kombineret med boreprøver give gode muligheder for at beskrive en lagfølge med høj præcision.

Det mest problematiske ved opstilling af geologiske modeller i relation til grundvandsmagasinerne er at bestemme beliggenhed af grænser mellem de enkelte enheder og enhedernes præcise udbredelse. Overfladegeofysik kan give informationer til at vurdere og fastsætte forbindelser mellem de større enheder. Seismik, georadar, slæbegeoelektrik og transiente elektromagnetiske målinger er de metoder, der især giver "bløde" data, som efter fortolkning til geologiske lag og strukturer giver bud på den overordnede opbygning af de geologiske forhold. Et eksempel herpå er kortlægning af sandvinduer i et i øvrigt sammenhængende morænelersdække over grundvandsmagasinet.

3.6 MODELTYPER

3.6.1 To- og tre-dimensionelle modeller (traditionelle deterministiske modeller)

To- og tre-dimensionelle modeller viser den rumlige geologiske opbygning i enten et profil eller ved flere profiler, der krydser hinanden (fence-diagrammer). De kan også vises som blokdiagrammer, hvor landskabets geomorfologi er medtaget. Fremstillingsmetoden er traditionelt manuel og velkendt fra den geologiske litteratur. Hvis data (f.eks. borer og geofysiske data) er lagrede i databaser kan der udtegnes profiler og diagrammer ud fra disse data, hvis der er programmer til stede. Tolkningen vil altid kræve, at en geolog går aktivt ind i konstruktionen. Anvendelsen i den matematiske hydrogeologiske model indebærer, at data digitaliseres og indlægges i modellen. Hvis tolkede profiler eller fencediagrammer foreligger digitalt (i eksisterende programmer udarbejdet til formålet) kan de ofte bruges direkte. Metoden, der kan anvendes til udarbejdelsen, er beskrevet i Hansen & Gravesen (1996). Modellerne har den fordel, at der er en klar arbejdsgang, hvor det er let at indarbejde geologisk erfaring, samt at avanceret programmer ikke er en betingelse. Svaghederne er, at det er svært at indarbejde nye data og at det kan være svært at arbejde i tre dimensioner. Desuden udarbejdes der normalt kun en modelmulighed på de foreliggende data, som er afhængig af den tolkende geologs erfaring.

3.6.2 Overflade modeller (konturerede modeller)

Overflade modellen kan være en hurtig metode, hvis de geologiske forhold er rimeligt ukomplicerede. Der kan anvendes mange data, og modellen illustreres med konturerede overfladekort eller lagtykkelseskort. Modellen kan fremstilles manuelt, men det er en stor fordel, hvis data er databaselagrede, da der eksisterer mange muligheder for passende kontureringsprogrammer. Ved metoden skal der defineres hvilke overflader og lag, der skal kortlægges. Derfor startes med at vurdere de generelle geologiske forhold i området eventuelt ved konstruktion af et repræsentativt geologisk profil med terrænoverflade. Det er ligeledes vigtigt at undersøge datakvalitet og opløselighed. Derefter opstilles søgekriterier til databasen for det pågældende område, og sådanne rutiner kan som regelen ikke bruges i andre områder. Kontureringsprogrammer kan sjældent løse problemer med dale og stejle gradienter, så derfor skal geologen følge en udtegnings af modellen op med verifikation af den ud fra geologisk viden og vurdering af inkonsistente data samt manglende centrale data. Fordele ved metoden er, at den er hurtig, hvis data er edb-lagrede og kan relativt let føres over i en matematisk model. Store datamængder kan behandles og nye kan let indføres. Svagheder er, at modellen er relativ simpel, og at den ikke kan tackle forstyrrede, hældende eller foldede lag. Desuden skal de konturerede kort altid justeres ud fra geologisk erfaring, hvilket er særlig påtrængende ved edb-fremstillede modeller. Et eksempel på et værktøj til fremstilling af en overflademodel er den grafiske editor, GeoEditor (Jacobsen & Hansen, 1998).

3.6.3 Geostatistiske modeller (stokastiske modeller)

Ved geostatistiske modeller kan data anvendes på en anderledes måde, bl.a. hvis de kombineres med stokastisk modellering. Udgangspunktet er de samme data, som for de ovenstående modeller, hvor både hårde og bløde data kan indgå. Ved denne form for modellering er det praksis altid at bevare de hårde data (f.eks. boredata) i målepunkter for derefter at kunne fremstille en serie af modeller, som alle honorerer disse hårde data. Et forsøg på en stokastisk modellering ses i Hansen & Gravesen (1996), hvor modelleringen kan sammenholdes med en deterministisk modellering for det samme område. De stokastiske modeller har imidlertid en række problemer angående opskalering, mangel på data og kalibrering. Et problem er også antallet af modeller, som er lige sandsynlige, hvor kun en skal anvendes i den matematiske modellering, ligesom at denne model skal relateres til profiler eller kort. En fordel ved stokastiske modeller er, at de samlet giver et bud på den geologiske variabilitet, hvilket statiske modeller ikke kan.

3.7 KORRELATION AF LAGFØLGEOPLYSNINGER FRA BORINGER

Skalaen og datagrundlaget er centrale kriterier for måden at opstille en geologisk model på. Datamængde og – kvalitet varierer meget i de forskellige dele af landet. I områder, hvor der har været intens boringsaktivitet i forbindelse med etablering af kildepladsområder til vandværker eller ved forskningsprojekter, vil boringstæthed og datakvalitet være væsentlig større end i områder med spredte husholdnings- og markvandingsboringer.

En geologisk model kan selvfølgelig opstilles ud fra både få og mange data. Mange data er nødvendige, når der skal bruges detaljer omkring de væsentlige parametre: Grundvandsmagasinerne og dæklagenes sammensætning og indre strukturer. Herunder data om interne heterogeniteter og deres udbredelse og afgrænsninger, dvs. laggrænser, tektoniske forstyrrelser og andre barrierer. Der vil i de fleste tilfælde i forbindelse med zoneringsen være behov for indsamling af supplerende geologiske data.

Databehovet for en manuelt opstillet geologisk model er stort, men datamængden kan dog også blive så stor at overskueligheden tabes. De fleste computerfremstillede modeller (konturerede modeller, statistiske modeller) vil også have et stort krav til datamængden, men vil altid være endnu mere forsimplede udgaver af de geologiske forhold end de manuelle.

Opstillingen af den geologiske model med udgangspunkt i boringsdata er i al simpeltid et spørgsmål om at korrelere lag af samme alder fra boring til boring. Det er sjældent, at alle lag i en boring er aldersdateret på en måde, så korrelationen kan foregå entydigt. Derfor kommer de etablerede sedimentologiske modeller ind i billedet, som giver forslag til, hvordan de faktiske lag i boringerne kan være dannet og placeret i forhold til hinanden.

Konstruktion af to- og tre-dimensionelle modeller indeholder et væsentlig element af tolkning, som må baseres på kendskab og erfaring fra kendte modeller (Anderson, 1989, 1990; Walker, 1984). Når først den geologiske model er etableret, kan denne anvendes videre til udarbejdelse af en hydrogeologisk tolkningsmodel (se afsnit 4). De geologiske modeller vises ofte som tværprofiler, der sammenstilles i fencediagrammer eller blokdiagrammer eller som flader eller grafik på kortflader.

Uanset den valgte modeltype er korrelationen mellem information fra boreprøvebeskrivelser, tolkning af borehulslogs og information fra daglokalitetsbeskrivelser og sedimentmodeller opstillet ud fra disse, nøglen til at en brugbar model kan udarbejdes.

Korrelation af sammenhængende og jævnaldrende lag foregår lettest, hvis de er aldersbestemte. Dette foregår ud fra dyre- og plantefossiler, som især findes i aflejringer dannet i havet. Eksempler herpå er interglaciale aflejringer fra Eem (Cyprina-lag) og Holstein havene, som har stor udbredelse i Danmark. De marine lag fra Øvre Kridt (skrivekridt) til Øvre Tertiær (Miocæn: Gram, Hodde og Arnum Formationerne) er andre eksempler på aflejringer, der kan aldersdateres ud fra fossiler. Ikke-marine lag fra søer og moser kan dateres på plantefossiler og dermed korreleres, men disse lag har sjældent større horisontal udbredelse. Begge typer aflejringer kan også i nogle tilfælde dateres ud fra målinger på radioaktive isotoper.

Når det drejer sig om istidsaflejringerne, smeltevandsaflejringer og moræneaflejringer, som dominerer de øvre jordlag i Danmark, kan korrelationen være vanskelig på grund af manglen på fossiler. Her må lagene korreleres ud fra deres sammensætning og strukturer, og da vil de sedimentologiske modeller give muligheder med hensyn til bedømmelse af jordartsvariation og de sedimentære og tektoniske strukturers karakter og skala. Daglokaliteterne giver også informationer om de interne heterogeniteter og forbindelsesmuligheder mellem aflejringer, som kan optræde som grundvandsmagasiner.

Ud fra den kombinerede tolkning af dannelsesmiljø for aflejringerne og fastsættelse af laggrænser konstrueres geologiske tværprofiler eller kort over flader, vel vidende at områderne mellem boringerne kun kan tolkes ud fra kvalificerede vurderinger og ekspertise. I områder med tætliggende boringer med den nødvendige dybde og få forskellige lag vil denne geologiske model være tilstrækkelig (f.eks. områder med tyndt kvartært dække på kalkaflejringer). Hvis datatætheden er for ringe vil det være nødvendigt at supplere med flere boringer og/eller overfladegeofysik. Hvilke

metoder der skal anvendes, afhænger f.eks. af forskelle i aflejringstyper, forventninger til strukturelle forhold og skalaforholdene.

3.8 FORBEDRING AF GEOLOGISK MODEL UD FRA OVERFLADEGEOFYSIK

Hvis der skal føjes flere oplysninger på den geologiske model vil de geofysiske metoder bidrage til beskrivelse af storskala heterogeniteterne i magasinerne og de mulige forbindelser mellem flere magasinenheder. Derudover bidrager de geofysiske data til fastsættelse af laggrænserne mellem enhederne i områderne mellem borerne og til vurdering af hovedjordartstypernes fordeling (f.eks. ler, sand, grus)

De geofysiske data skal tolkes og udtegnes på papir eller foreligge digitalt enten som profiler eller som kort. Det er hensigtsmæssigt at udtegne (konstruere) de geofysiske data i profiler med samme beliggenhed og målestok som de geologiske. Hvis udtegningen forgår på kort, vil det være nødvendigt at omsætte disse horisontale data til vertikale profiler, hvis der er tale om en to- eller tre-dimensional model.

Tolkning og omsætning af f.eks. elektriske modstandsværdier til sediment- og bjergartstyper understøtter beskrivelsen af de vigtigste geologiske enheder og fastlæggelsen af deres udbredelse. Dette sker ved sammenligning med kendte modstandsværdier for danske sedimenter og bjergarter. Derefter kan områder med samme sammensætning afgrænses, respekterende de allerede registrerede grænser mellem aflejringerne især fra de "hårde data".

Den endelige geologiske model opstilles derefter ved at samarbejde de geologiske og geofysiske profiler, kort og data, således at alle data anvendes til at konstruere den endelige geologiske model. Det er vigtigt at markere, hvor modellen er baseret på borerne og geofysik, og hvor den alene er konstrueret ud fra en geofysisk tolkning. Det gøres bedst ved at vise borerne beliggenhed og dybde.

De rumlige relationer kan nu vises ved, at flere krydsende profiler sammenstilles som et fence-diagram eller blokdiagram, der viser lagernes udbredelse i tre dimensioner. Arbejdet med at sammenstille disse diagrammer involverer ofte endnu en vurdering af lagernes vertikale og horisontale udbredelse, specielt i de punkter, hvor profilerne krydser hinanden.

3.9 DETALJER I EN GEOLOGISK MODEL

I nogle sammenhænge vil detaljer om de geologiske lag have stor betydning for etablering af f.eks. en beskyttelsesstrategi. Disse detaljer, som typisk indsamles under feltundersøgelser fra daglokaliteter, udgravninger og borerne, findes i sagens natur kun fra et fåtal af områder. Kortlægning af sammenhængende lerdækker over magasinerne anvendes som et vigtigt element i beskyttelsesstrategien overfor grundvandet. Detaljer om heterogeniteterne i leraflejringerne i form af kornstørrelsesfordelinger, sand- og gruslinser og makroporer, som har betydning for vand- og stoftransport ned gennem leraflejringerne til grundvandet, er undersøgt på lokaliteter spredt over landet, og et billede af f.eks. makroporefordelinger og deres betydning inden for de øverste 5-6- meter er ved at danne sig (f.eks. Klint & Gravesen, 1999). Det er påvist, at der sker transport gennem makroporer til grundvandet, men detaljerede undersøgelser angående sprækker, ormehuller og rodhullers hydrauliske betydning og variation mangler stadig. Sprækker i moræneler optræder på alle undersøgte lokaliteter, men i forskellig mængde og opbygning, men disse oplysninger skal ligesom f.eks. kornstørrelsesvariationer underkastes en nærmere gennemgang for at estimere de hydrologiske og hydrauliske parametre, som kan opstilles ud fra dem.

Mulighederne for at regionalisere eller opskalere detailviden fra enkelte lokaliteter skal hæftes op på sammenhæng mellem egenskaber i de sedimentære enheder, deres dannelse og sammenhæng med de geomorfologiske enheder, som strækker længst udenfor den enkelte lokalitet. Når denne sammenhæng er etableret vil det være muligt at medtage langt flere detaljer ved den hydrogeologiske modellering.

3.10 USIKKERHEDER PÅ GEOLOGISK MODEL

Usikkerheder på den geologiske model afhænger af usikkerhederne på data og den senere behandling af dem.

Boringernes alder og de forskellige formål resulterer i forskellig opløsning med hensyn til indsamlingstæthed i boringerne (antal undersøgte prøver) og information fra hver prøve (antal undersøgte parametre). Derudover er afstanden mellem boringernes beliggenhed og deres dybde af betydning ved opstilling af modellerne. Disse forhold, som varierer fra sted til sted, må vurderes i hvert enkelt tilfælde, bl.a. af hensyn til den mængde af yderligere data, der skal indsamles.

De "hårde" boringsdata kan relativt let indarbejdes i modellen på det sted, hvor de er indsamlet (borestedet), men det er vanskeligt at illustrere nøjagtigheden ved deres rumlige fordeling og variabilitet.

Når oplysninger skal bruges ved en videre vurdering af magasinets egenskaber, er tilstedeværelsen af heterogeniteter meget væsentlig. Den præcise rumlige placering af heterogeniteterne kan kun fastlægges, hvis der er en stor datatæthed fra f.eks. boringer, men en tilstrækkelig datatæthed er normalt ikke tilstede.

Etablerede modeller giver derfor nogle overordnede retningslinier for, hvordan forholdene kan være nede i magasinet, men ofte kun på en "regional" skala, som går ud over en mere specifik lokalitet. Problemer med at gå i detaljer er omtalt ovenfor. Foruden de primære heterogeniteter dannet ved lagenes/bjergarternes aflejring eller dannelse, er især tektoniske forstyrrelser af magasinerne en parameter, der forøger den samlede mængde af heterogeniteter i magasinet og som gør dem mere uforudsigelige. Det må altid huskes, at modeller er kun eksakte i de hårde data punkter. Uden for disse er det et spørgsmål om kvalificeret tolkning.

3.11 PRAKTISKE EKSEMPLER PÅ TOLKNING AF HYDROGEOLOGISKE MODELLER

Der er som nævnt ovenfor en række forskellige tolkningsmetoder, der kan benyttes til opstilling af en hydrogeologisk model i 3D. Metoderne kan beskrives ved følgende 5 typer:

1. Digitalisering af profiler og efterfølgende interpolation mellem profiler til modelgrid
2. Tolkning i punkter og efterfølgende interpolation mellem punkter til modelgrid
3. Profil-tolkning i grid jf. DK-model Øerne og efterfølgende interpolation fra geologisk tolkningsskala til numerisk gridskala
4. Slice-tolkning i faste dybdeintervaller af dominerende jordtyper (f.eks. 1 x 1 km i 10 m's dybdeintervaller jf. DK-model Jylland)
5. Tolkning ved hjælp af 3D geologisk tolkningsværktøj f.eks. GeoEditor, som giver mulighed for en bedre struktureret tolkning af boringer/geofysik og evt. støttepunkter og efterfølgende overførsel til modelgrid

Metode 1 og 2 har været anvendt i et begrænset antal eksempler i Danmark. Metode 3 og 4 er nærmere beskrevet på www.vandmodel.dk. For en tolkning ved hjælp af GeoEditoren (metode 5) henvises til: http://www.dhisoftware.com/mikeshe/Description/GIS_Geo_Editor/index.htm.

Profiltolkning har været den hyppigst anvendte metodik gennem en årrække, men metoden har begrænsninger, idet det er noget vanskeligt at opdatere den geologiske model med nye data (fx nye boringer, geofysisk mm.). Slice-tolkning giver en række fordele med hensyn til en lettere opdatering af den geologiske model. En ulempe ved slice-tolkning er at kun den dominerende jordtype/bjergart repræsenteres i hvert grid, hvilket dog i nogen grad modsvarer af fordele med hensyn til det regulære grid, som i øvrigt er lettere at arbejde med i forbindelse med yderligere op- og nedskalering.

3.12 REFERENCER

Anderson, M.P. (1989) Aquifer heterogeneity - A geological perspective. Proceedings Fifth Canadian-American Conference on Hydrology, Calgary, Canada, 1990, 3-21.

Anderson, M.P. (1990) Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. Bulletin Geological Society of America, vol. 101, 501-511.

Gravesen, P. (2000) Geologiske modeller. Appendix A i Vejledning fra Miljøstyrelsen: Detailkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen. Zonering.

Gravesen, P. & Fredericia, J. (1984) ZEUS-geodatabase system. Borearkivet. Danmarks Geologiske Undersøgelser, Ser. D, nr. 3, 259 sider.

Hansen, M. & Gravesen, P. (1996) Geological modelling. In: Abott, M.B. & Refsgaard, J.C. (red.): Distributed Hydrological Models, Chapter 10, 193-214. Kluwer Academic Publishers.

Henriksen, H.J., Harrar, B., Morthorst, J., Nyegaard, P. & Dahl, M. (1995) Nye vandindvindingsmuligheder for Esbjerg kommune. Fase IV-model. DGU Kunderapport nr. 51, 1995.

Jacobsen, T.V. & Hansen, M. (1998) Geological modelling and editing in GIS environment. Proceedings of the Third International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Denmark, 24-26 August 1998: HYDROINFORMATICS'98. Eds.: Vladan, B. & Larsen, L.C., vol. 1. A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 525-530.

Klint, K.E.S. & Gravesen, P. (1999) Fractures and Biopores in Weichselian Clayey Till Aquitards at Flakkebjerg, Denmark. Nordic Hydrology, 30, 4/5, 267-284.

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 1, 135 sider.

Walker, R.G. (1984) Facies Models. Geoscience Canada, Reprint Series 1, 317 sider.