

Kapitel 17 ANVENDELSE AF MODELLEN: VANDBALANCE, GRUNDEVANDSDANNELSE OG INDVINDINGSOPLANDE

Hans Jørgen Henriksen
Hydrologisk afdeling, GEUS

Nøglebegreber: Referencekørsel, udnyttelig grundvandsressource, kumulativ fordelingsfunktion, kvalitetsmæssig og recipientmæssig bæredygtig ressource, management scenarier, grundvandsdannelse, transport- og opholdstider, partikelbanemodel, sensitivitsanalyse, usikkerhedsvurdering, best estimate, Monte Carlo simuleringer

ABSTRACT: Beskrivelse af simuleringer i udbudsmaterialet. Valg af referencekørsel. Demonstration af modellens anvendelighed ved gennemførelse af et begrænset antal simuleringer. Brug af model som prognoseværktøj. Vurdering af den udnyttelige grundvandsressource. Beskrivelse af grundvandsdannelse med kumulativ fordelingsfunktion. Afgrænsning af områder med opadrettede eller nedadrettede gradienter. Vurdering af grundvandsdannelse til øvre og dybe magasiner. Afgrænsning af grundvandsdannende oplande ved 3D partikelbanesimuleringer. Vurdering af transporttider og opholdstider. Metoder til beskrivelse af usikkerheden i forbindelse med simuleringsscenarier.

17.1 INDLEDNING

Det er vigtigt, uanset hvilke typer undersøgelser der skal foretages, at de simuleringer der skal udføres med en grundvandsmodel er relativt udførligt beskrevet i udbudsmaterialet (og i formålet) og at de er afgrænsede i antal, og præcist beskrevne med hensyn til:

1. Definer antal simuleringsscenarier og typen på disse (fx scenarier med forskellige kombinationer af pumpeydelse incl. evt. tidlig variation, påtrykte klimavariationer etc.); det er vigtigt her at specificere hvilke udtræk der skal foretages fra simuleringsscenarierne, fx påvirkning af trykniveau (afsækning), påvirkning af vandføring (minimumsvandføring) og fastlæggelse af relationer mellem grundvandsdannende oplande og enkelte kildepladser.
2. Specificer hvilket hydrologisk datasæt og tidsperiode der skal anvendes (fx en gentagelse eller genanvendelse ("recykling") af kalibrerings- og valideringsperioden eller en udvalgt delperiode). Beskriv at der fx ønskes gennemført simuleringer ud fra ændret nettonedbør, eller at nedbøren skal korrigeres i simuleringerne.
3. Beskriv hvordan følsomhed og usikkerhed skal håndteres og indgå i simuleringerne

Der bør vælges en referencekørsel som de øvrige simuleringer kan relateres til. Denne referencekørsel kan være baseret på enten en situation uden vandindvinding eller en situation med nuværende vandindvinding. Referencekørslen bør omfatte en udvalgt periode, og det kan evt. besluttes at genanvende en udvalgt periode, med henblik på at arbejde på de samme veldefinerede klimatiske betingelser. Krav til en passende opvarmningsperiode (jf. kapitel 9) bør naturligvis honoreres ved dimensionering af beregningsperioder.

Første trin kan være at lave en simulering med modellen for referencekørslen. De øvrige simuleringer kan i så fald sammenlignes med denne. Referencekørslen kan med fordel udvælges så den klimatisk svarer til kalibrerings- og simuleringssperioden, men med en simulering hvor vandindvindingen nulstilles (altså en kørsel uden oppumpning). En anden mulighed er at benytte en referencekørsel med de nuværende oppumpningsforhold. Referencekørslen bør fastlægges så der er enighed om denne mellem modellør, rekvirent og evt. reviewer, før simuleringsscenarierne udarbejdes.

Andet trin består efterfølgende i at køre modellen med nogen få udvalgte scenarier med ændrede oppumpnings-, klima- og arealanvendelsesscenarier, med henblik på i første omgang at præsentere og demonstrere modellens anvendelighed som et værktøj til at beskrive forskellige typer påvirkninger overfor rekvirenten. Kapaciteten kan typisk omfatte simuleringer af:

- Grundvandsressourcevurdering og vandbalanceforhold
- Afgrænsning af områder med opadrettede- eller nedadrettede gradienter
- Grundvandsdannelse til øvre grundvandsmagasiner
- Grundvandsdannelse til dybe magasiner
- Grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande til magasiner og/eller kildepladser/boringer
- Transport- og opholdstider i forskellige grundvandsmiljøer
- Sensitivitets- og usikkerhedsvurdering

Disse simuleringsscenarier skal efterfølgende sammenlignes, dokumenteres og drøftes, før der gennemføres yderligere scenarier. De yderligere simuleringsskørsler bør i øvrigt omfatte mere ekstreme påvirkninger af det hydrologiske system, med hensyn til afgrænsning af en bred vifte af randbetingelser.

Traditionelt har det været mest almindeligt at benytte modeller som prognoseværktøj der beskriver den fremtidige tilstand for et grundvandssystem i form af "absolutte" resultater (fx med kvantificering af bæredygtig udnyttelig grundvandsressource), i stedet for "relative" resultater (med identifikation af fx hvilken fremtidig kildepladsplacering eller fordeling af indvindingen over en række kildepladser, der medfører den mindste "reduktion" i fx vandføringen ved for et udvalgt vandløbssystem). Normalt vil en model kunne simulere påvirkningen af et givent system væsentligt mere præcist med beregning i "relative" størrelse, end den vil i forhold til "absolutte" størrelser. Det er derfor særligt vigtigt at kunne sætte tal på nøjagtigheden og troværdigheden af simuleringresultater ved en numerisk grundvandsmodellering, således at modellens "anvendelighed" i forbindelse med den videre brug (management beslutninger) er klart forstået hos brugeren. Simuleringer af behov for reguleringer af fx udvaskningen af nitrat, eller afværgetiltag overfor punktkilder udgør eksempler på "absolutte" simuleringer, ligesom at vurderinger af grundvandsressourcens størrelse ligeledes tilhører denne kategori.

17.2 GRUNDEVANDSRESSOURCEVURDERING OG VANDBALANCEFORHOLD

Når en model er kalibreret og valideret på baggrund af historiske data typisk af 10 års varighed, er den egnet til simuleringer af grundvandsressourcens størrelse og vandbalanceforhold, på et detaljeret ("high fidelity") niveau.

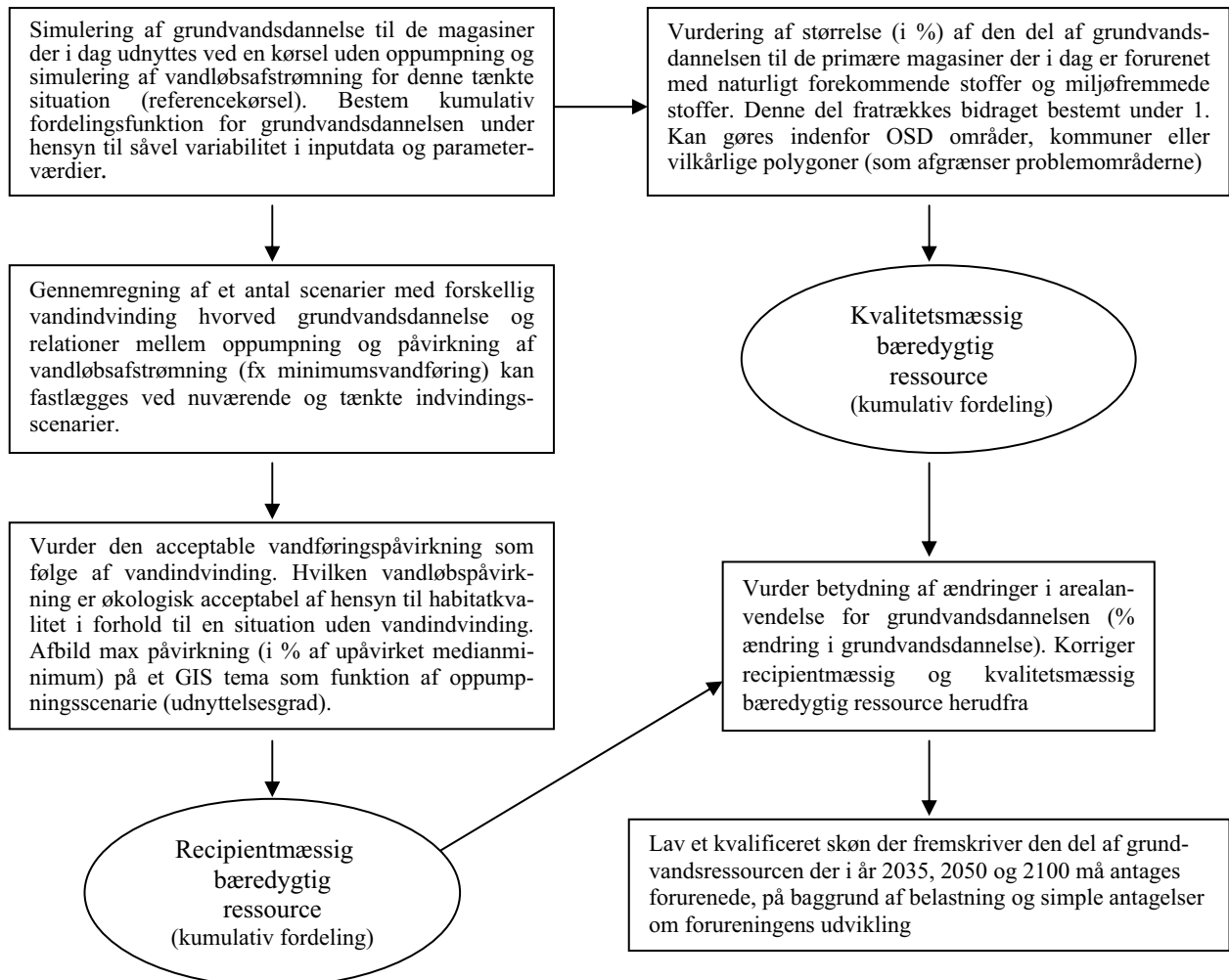
Simuleringer gennemføres ved at køre modellen frem med de tilpassede og kalibrerede parametre, og påtvinge modellen en hydrologisk belastning. Der kan her benyttes inputdata i form af fx nedbør- og fordampningstidsserier, der repræsenterer fremtidige klimaforhold, men det kan også vælges at genanvende en relevant delperiode (Henriksen et al, 1998). Fremtidig ændret udnyttelse af grundvandsressourcen bør så vidt muligt inddrages.

Management scenarier vil som regel bestå af kombinationer af forskellige pumpeydelse, klimaforhold og evt. arealanvendelse, med en fordeling på forskellige eksisterende eller fremtidige kildepladsplaceringer, der opfylder et givent mål. Dette mål kan være at forøge eller optimere den samlede ressource-udnyttelse i et område, at optimere eller reducere påvirkningen fra vandindvinding på følsomme overfladevandsrecipienter eller vådområder, at begrænse risikoen for saltvandsindtrængning eller -optrængning fra saltholdige geologiske lag og at vurdere den nuværende og fremtidige udvikling i vandkvalitet, som følge af naturligt forekommende stoffer og miljøfremmede stoffer i et område, med henblik på fx vurdering af restressourcen af rent vand (eller forurenede ressourcer).

Vurdering af den udnyttelige grundvandsressource under hensyn til vandkvalitet, recipientpåvirkning mm. er en kompliceret og til dels politisk bestemt "øvelse". I forbindelse med "Klassificering af grundvandsressourcen" (Miljøstyrelsen, 1995) foreligger der en metodik til kvantificering af grundvandsmængden, med bestemmelse af maksimalt udnyttelig grundvandsressource og bæredygtig-

rig ressource. Den her anbefalede metode er baseret på en massebalance for grundvandssystemet, hvor input (=grundvandsdannelsen) bestemmes ud fra output (=oppumpning + vandløbsafstrømning + evt. underjordisk afstrømning til fx havet). Kernen i en opgørelse af grundvandsressorens størrelse er dermed en bestemmelse af "grundvandsdannelsen" til de primære magasiner, hvorfra størstedelen af vandindvindingen foretages. Der er imidlertid et problem ved denne metodik, idet der, bortset fra udnyttelse af grundvandsressourcen for frie magasiner fx hedesletteområder, ikke findes en "unik" løsning. Jo større vandindvinding, desto større grundvandsdannelse og dermed en større ressource. Herefter skal der foretages fradrag i forhold til naturlige og miljøfremmede stoffer, men størrelsen af dette fradrag kan være vanskelig at kvantificere, således at metoden rummer en fare for at overvurdere ressorens størrelse i områder med intensiv vandindvinding, uden at tage hensyn til en evt. overudnyttelse af ressourcen, som først viser sig måske mange år efter at systemet er bragt ud af balance.

I forbindelse med DK-modellen (Henriksen et al, 1998) og i synopsis for den afsluttende temarapport om vandets kredsløb er der derfor foreslået en ny metode, hvor der i stedet for den aktuelle grundvandsdannelse tages udgangspunkt i den "naturlige grundvandsdannelse" uden vandindvinding. Denne kan meget let vurderes i områder hvor der foreligger en kalibreret og valideret grundvandsmodel, ved blot at lave en kørsel uden oppumpning. Det giver følgende metodik til vurdering af bæredygtig grundvandsressource:

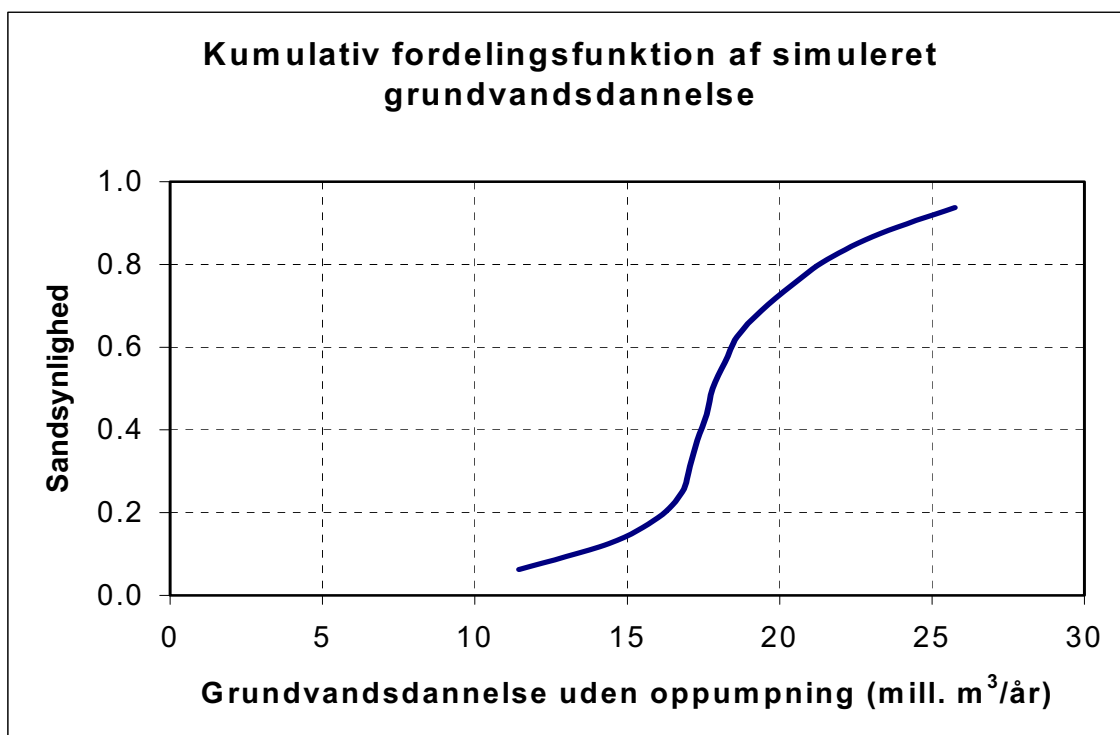


Figur 17.1 Vurdering af udnyttelig grundvandsressource

Numeriske grundvandsmodeller kan bidrage til kvantitative beskrivelser af grundvandsdannelsen, men langtids-gennemsnitsværdier er følsomme i forhold til længden af perioden der midles over og starttidspunktet for simuleringsperioden.

En pragmatisk metode at løse dette problem på kan være at foretage en "tilfældig" udvælgelse af data til simuleringen, på baggrund af historiske data for fx en 20 års periode. Hvis det fx antages at en "treårs-periode (=36 måneder)" er den relevante "kritiske længde på simuleringsperioden", og den første måned i simuleringsperioden er januar, så består metoden i at tilfældigt at generere et tal mellem 1 og 20, og vælge den tilsvarende januar måned fra 20 års perioden. Herefter genereres et tilfældigt tal for februar og der vælges data fra denne måned i 20 års perioden. Dette gentages indtil der foreligger en enkelt randomiseret realisation med en længde på 36 måneder (samt desuden data for en initialperiode fx 1-3 år, afhængigt af følsomhed overfor initialværdier, genereret på tilsvarende vis), hvorefter modellen køres og der foretages udtræk af grundvandsdannelsen for 3-årsperioden (performance indikator).

Herefter genereres en ny realisation for den 3-årige simuleringsperiode (incl. data for initialperioden), og der laves endnu en simuleringskørsel og udtrækkes grundvandsdannelse (performance indikator) for realisation nr. 2. Denne procedure bør gennemføres et stort antal gange (fx 100), så de beregnede performance indikatorer kan rangordnes og tilknyttes sandsynligheder. Herudfra kan der beregnes en kumulativ fordelingsfunktion med henblik på vurdering af grundvandsdannelse med en given sandsynlighed (figur 17.2).



Figur 17.2 Eksempel på kumulativ fordelingsfunktion for grundvandsdannelsen her angivet i mio. m³/år (Middlemis, 2000). Kurven viser at der er ca. 10 % sandsynlighed for at grundvandsdannelsen er mindre end 13 mio. m³/år. Der er 10 % sandsynlighed for at grundvandsdannelsen er større end 24 mio. m³/år.

Den resulterende kumulative fordelingsfunktion, se figur 17.2, giver vandressourceforvalteren mulighed for at kvantificere risikoen for at fastsætte en bestemt værdi for den bæredygtige ressource, ligesom at brugere af modellens resultater får bedre indsigt i grundlaget for vurderingen af grundvandsressourcens størrelse. Metoden vurderes at være et væsentligt fremskridt i forhold til nuværende metodikker baseret på et "deterministisk" estimat af grundvandsdannelsen (Middlemis,

2000; Merrick, 2000). Den kumulative fordelingsfunktion og estimatet på den afledte totale grundvandsdannelse forudsættes opdateret såfremt den numeriske model for et givent område forbedres og evt. udvides til at dække en længere simuleringsperiode. Denne approach kan benyttes for et helt grundvandsmagasin, eller mindre delområder indenfor modelområdet.

Usikkerhed på fx nedbørsinput kan inddrages ved at afbilde kurver svarende til fx +5, +10 og +20 % større nedbør på diagrammet, ligesom at der kunne udarbejdes forskellige kurver svarende til forskellige "konceptuelle modeller" med forskellige parameterkombinationer som kan antages lige sandsynlige.

Hvis den relevante tidshorizont er meget lang (fx mere end 10 år i stedet for de 3 år i eksemplet ovenfor) så kan det overvejes i stedet at lave en stationær simulering. I dette tilfælde skal der genereres gennemsnitsværdier for påvirkningerne af systemet (fx nedbør og vandindvinding) med henblik på multiple kørsler for "tørre", "normale" og "våde" forhold. Disse gennemsnitsværdier udvælges bedst ud fra kumulative fordelingsfunktioner for hver enkelt type påvirkning. De valgte sandsynlighedsmarkører bør aftales på forhånd (fx 20 %, 50 % og 80 %).

17.3 AFGRÆNSNING AF OMRÅDER MED OPADRETTEDE- ELLER NEDADRETTEDE GRADIENTER

Kendskabet til de grundvandsdannende områders beliggenhed er et afgørende forhold ved vurdering af et grundvandsmagasins risiko for at blive forurenede med stoffer, deponeret eller anvendt ved jordoverfladen. I grundvandsdannende områder er der en nedadrettet vandbevægelse, hvorimod der i udstrømningsområder er opadrettet vandbevægelse.

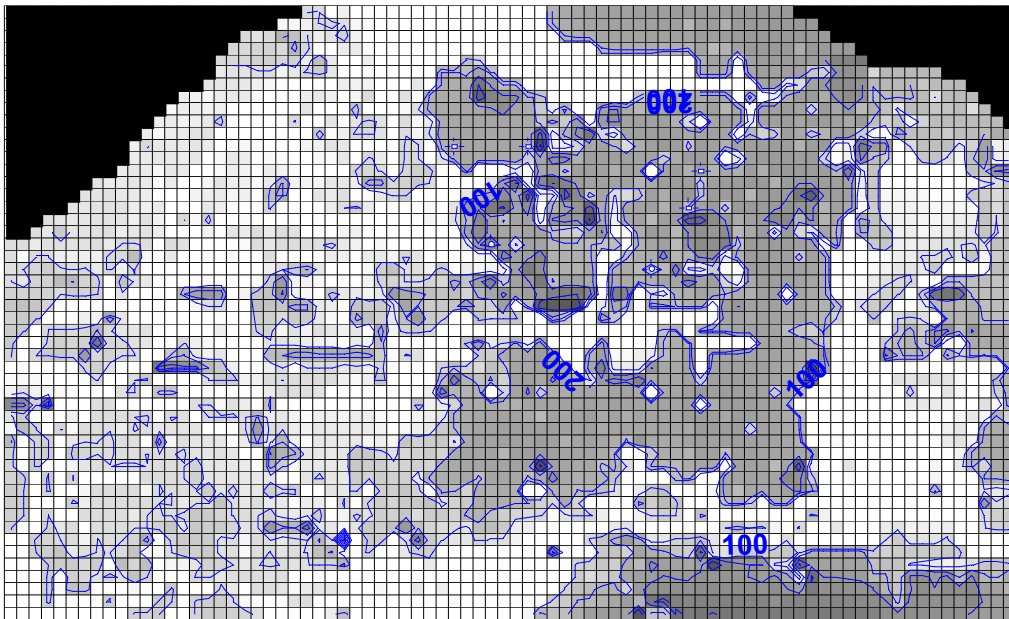
Tredimensionale grundvandsmodeller er i høj grad baseret på netop at beskrive grundvandets strømning i og mellem grundvandsførende lag. Modeloutput vil blandt andet være et arealdistribueret grundvandspotentialer for de enkelte lag. Afhængigt af hvor avanceret den enkelte model er, kan udstrømning til vandløb, vådområder, søer, fjorde og havet beskrives og analyseres.

I forbindelse med Miljøprojekt 553 (Henriksen et al., 2000) er en modelbaseret afgrænsning af områder med opadrettede og nedadrettede områder nærmere belyst for 3 områder (Østfyn, Ejstrupholm og Sneum å oplandet). Det konkluderes ud fra den afprøvning at kortlægning af infiltrations- og udstrømningsområder kan ske rimeligt præcist, såfremt der indsamles forholdsvis detaljerede synkronpejlinger i et stort antal boringer filtersat i både øvre og dybere magasin. Ved brug af en 3D grundvandsmodel vil den samme afgrænsning kunne opnås ved et færre antal pejlinger, ligesom at konsekvenser af ændringer i indvinding, nettonedbør og arealanvendelse for gradientforholdene vil kunne vurderes med en grundvandsmodel.

17.4 GRUNDVANDSDANNELSE TIL ØVRE MAGASINER

Den arealdistribuerede grundvandsdannelse kan ikke kortlægges ved hjælp af simple metoder men forudsætter en grundvandsmodel incl. en god rodzonemodel (Henriksen et al., 2000). I figur 17.3 er vist et eksempel Esbjergmodellen.

Som nævnt i det foregående afsnit kan det anbefales at præsentere resultater jf. principperne i en kumulativ fordelingsfunktion i stedet for "deterministiske" værdier. En mulighed kunne her være udover plottet vist i figur 17.3 også at vise den arealfordelte grundvandsdannelse som svarer til en under-/overskridelsessandsynlighed på 0.1/0.9 for hermed at fastholde en risiko-baseret beskrivelse. Så længe der blot er behov for input til detailkortlægning er dette dog formentlig "at skyde gråspurve med kanoner", hvor man i første omgang vil kunne "klare sig" med at kende fordelingen af grundvandsdannelsen indenfor fx et område med særlige drikkevandsinteresser svarende til $p=0.5$.

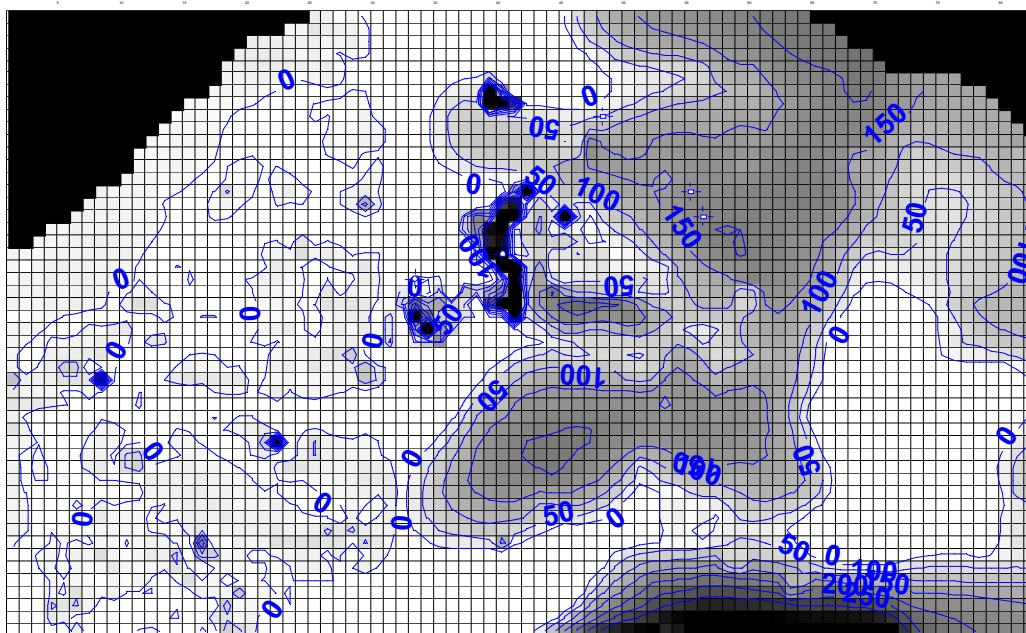


Figur 17.3 Eksempel på simulering af grundvandsdannelse til øvre grundvandsmagasin for Esbjergmodellen (grundvandsdannelse i mm/år). I det mørkegrå område er grundvandsdannelsen i størrelsesordenen 300-500 mm/år. I det hvide områder sker der ingen grundvandsdannelse til de øvre magasiner (udstrømningsområde). Figuren viser resultat for beregningslag nr. 4 svarende til kote -10 m.

17.5 GRUNDVANDSDANNELSE TIL DYBERE MAGASINER

I forhold til beskrivelsen i afsnit 17.4 så er den arealdistribuerede grundvandsdannelse til dybe magasiner langt mere afhængig af forskellige parameterværdier, konceptuel model end af inputværdier. I figur 17.4 er vist et eksempel for Esbjergmodellen der illustrere denne forskel (der er vist grundvandsdannelsen til et niveau der stort set svarer til Ribe Formationen).

I forbindelse med arbejdet med indsatsplaner vil det være en mulighed at anvende Monte Carlo metodik (metode til gennemførelse af stokastiske analyser hvor fx heterogenitetsforhold og usikkerhed på randbetingelser inddrages ved realisationer af parameterværdier på baggrund af et begrænset antal statistiske parametre – ved metoden præsenteres modelresultater som sandsynligheder) sammen med invers modellering til at beskrive såvel rumlige variationer i dyb grundvandsdannelse samt kumulative fordelingsfunktion der beskriver de tidslige variationer fra år til år, som et grundlag for arbejdet med indsatsplaner og design af monitoringssystemer for indsatsområder, se afsnit 17.8.



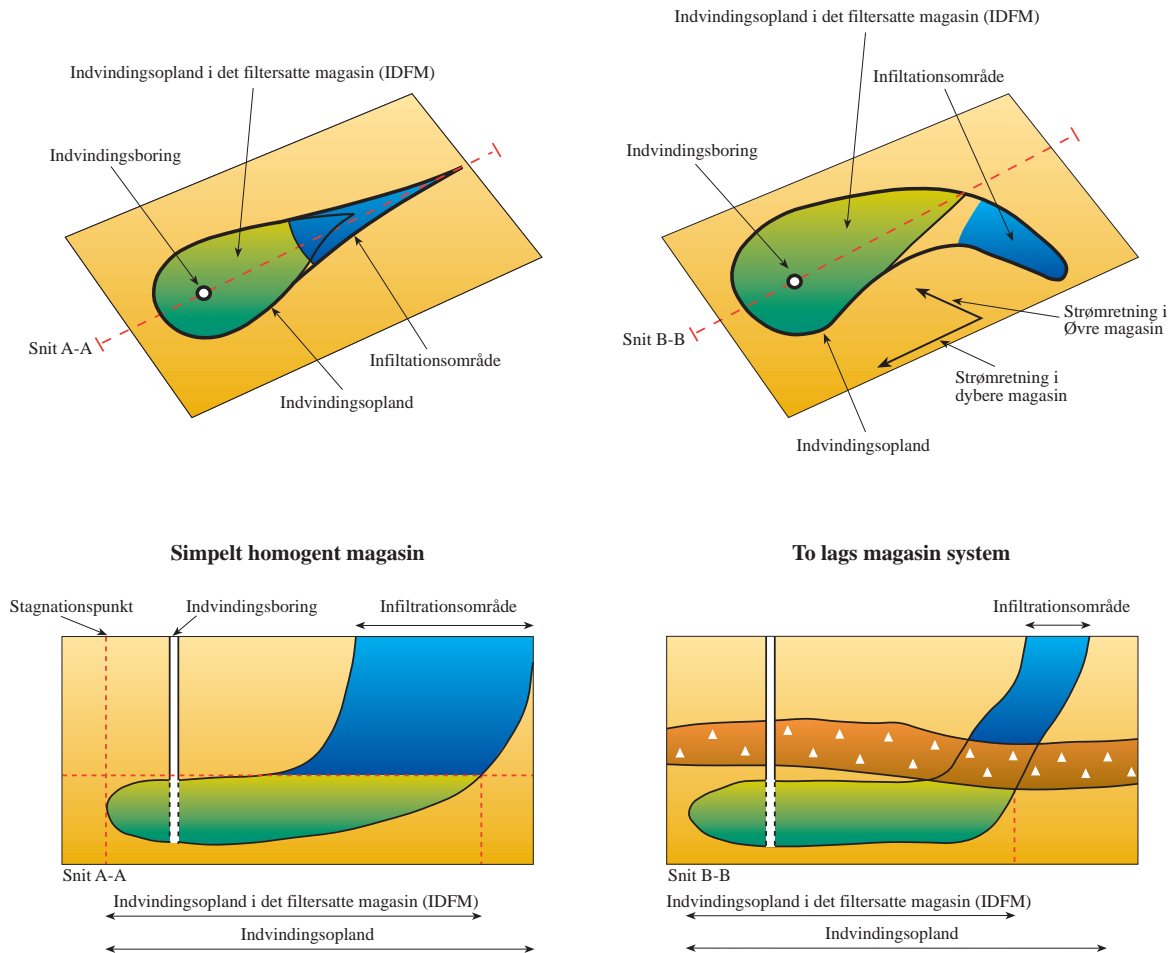
Figur 17.4 Eksempel på simuleret grundvandsdannelse til dybt magasin for Esbjergmodellen. Grundvandsdannelse i mm/år til lag 8 i modellen svarende til Ribe Formationen. I det centrale område er grundvandsdannelsen til Ribeformationen 100-200 mm/år. I et par enkelte områder midt i modelområdet og langs den sydlige rand ses grundvandsdannelser i størrelsesordenen 300-400 mm/år. I den vestlige del er grundvandsdannelsen til lag 8 mere begrænset (0-50 mm/år).

17.6 GRUNDVANDSDANNENDE OPLANDE OG INDVINDINGSOPLANDE TIL MAGASINER OG/ELLER KILDEPLADSER/BORINGER

Med 3D partikelbanemodeller kan der foretages en analyse af indvindingsoplande og infiltrationsområder til de enkelte vandværkers kildepladser samt foretages vurdering af opholdstider (grundvands alder) i forskellige dæklag, grundvandsmagasiner og til kildepladser og indvindingsboringer.

De forskellige modelkoder har noget forskellig funktionalitet (se bl.a. Henriksen et al, 2000 og kapitel 5 for en nærmere beskrivelse), men i de fleste tilfælde er det forholdsvist let at producere de nødvendige simuleringer, forudsat at modellen er kalibreret og valideret. Nogen koder kan tilmed håndtere såvel afvikling af strømningsmodel og partikelbanemodeller "stokastisk".

Partikelbanesimuleringer er en god "illustrator" som er forholdsvist forståeligt for folk der ikke til dagligt arbejder med grundvandsmodeller. Der er imidlertid igen en fare ved at aflevere et "deterministisk" indvindingsopland, og det anbefales at man i stedet foretager en eller anden form for usikkerhedsvurdering, således at betydning af input, parametre, konceptuel model og evt. diskretisering af modellen (skjulte modelfejl som er særligt vigtige i forbindelse med partikelbanesimulering). Visse programmer giver muligheder for forskellige "fangst options" mm (altså mulighed for specifikation af at fx alle partikler der rammer en kasse med oppumpning antages at have i boringer eller en anden antagelse). Præsenter evt. betydning af sådanne valg.



Figur 17.5 Definition af indvindingsopland og infiltrationsområde (Henriksen et al, 2000). Figuren til venstre viser situationen for et vestjysk sandområde uden gennemgående lerlag (boringen er filtersat i et begrænset interval, og indvindingen er i dette tilfælde begrænset). Figuren til højre viser situationen for et tolags magasinssystem.

I forhold til en 3D grundvandsmodel forudsætter partikelbanemodeller at modellag er repræsenteret som "true layers" altså med beskrivelse af fx bund af de enkelte lag i modellen og en egentlig 3D beskrivelse. Det er derfor ikke alle strømningsmodeller der er egnede til umiddelbart at anvendes til efterfølgende partikelbanesimulering, og partikelbanesimuleringer bør derfor formuleres i formålet, således at konceptuel model samt valg af kode kan nærmere overvejes i dette perspektiv, ligesom en fornuftig "robust" diskretisering af modellen skal overvejes, så partiklerne ikke "forsvinder" i evt. interne massebalancefejl. Betydning af antal partikler der "initielt" eller i hvert tidsskridt sendes afsted i modellen i fx det øverste lag bør ligeledes vurderes. Endelig bør beregningsperioden vælges så en væsentlig del af samtlige "startede" partikler er nået frem til en boring, et vandløb, et dræn eller en anden randbetingelse (typisk 500-1000 år).

17.7 TRANSPORTTIDER OG OPHOLDSTIDER I FORSKELLIGE GRUNDVANDSMILJØER

Transporttiden er en væsentlig størrelse i forbindelse med zonerings, ikke fordi den er et godt mål for den generelle naturlige beskyttelse, men fordi det er nødvendigt at kende transporttiden såfremt vandkvalitetsdata eller aldersdateringer skal inddrages i forbindelse med kvalitetssikring af en konceptuel model eller en opstillet grundvandsmodel. Transporttiden har desuden betydning for muligheden for sorption, nedbrydning og dispersion af en given forurening for stoffer, selvom der for mange stoffer mangler viden omkring disse forhold i naturlige grundvandsmagasiner.

Brugen af sådanne metodikker er nærmere illustreret for Svendborg området og Vårby å i et notat om kvælstof og vandmiljøplan 2, download notat fra: www.vandmodel.dk.

17.8 FØLSOMHEDS- OG USIKKERHEDSANALYSE

En følsomhedsanalyse er en analyse af simuleringens resultaters følsomhed overfor ændringer i kalibreringsparametre og andre modelantagelser, fx randbetingelser, hydrauliske parametre og tolkning af geologien. Ved en følsomhedsanalyse analyseres følsomheden overfor den enkelte usikkerhedskilde enkeltvis.

En usikkerhedsanalyse er en systematisk analyse af forskellige usikkerhedskilder (fx klimadata, hydrauliske parametre og geologiske tolkninger) og deres samlede indflydelse på usikkerheden af simuleringens resultater.

Ved grundvandsmodellering bør der som et minimum gennemføres følsomhedsanalyser. Afhængig af opgavens målsætning bør det desuden overvejes at gennemføre mere systematiske usikkerhedsanalyser.

Usikkerhedsvurderinger bør tage udgangspunkt i en vurdering og inddragelse af følgende usikkerhedskilder:

- Usikkerhed på input variable såsom klimadata.
- Usikkerhed på geologisk tolkning, lagfølger mv. (kategoriske datatyper)
- Usikkerhed på hydrauliske parameterverdier i geologiske mv. lag (kontinuerte datatyper)
- Usikkerhed på modellens procesbeskrivelser

I praksis er det endnu ikke muligt at lave usikkerhedsanalyser, som tager hensyn til alle disse forskellige usikkerhedskilder. Såfremt der anvendes invers modellering er det rimeligt nemt at lave usikkerhedsvurderinger, forårsaget af usikkerhed på parameterverdierne (fx Christensen, 1998; Christensen and Cooley, 1999). Med Monte Carlo metodikker kan man derudover indrage usikkerhed på input variable (fx Refsgaard et al., 1998). Derimod findes der endnu ikke eksempler på hvordan usikkerhed på fx geologiske tolkninger og modellens procesbeskrivelser indrages på systematisk vis. Der er dog en mulighed for at opstille forskellige alternative geologiske tolkninger og eller procesbeskrivelser, kalibrere og validere hver af disse og på den måde inddrage denne usikkerhed.

Mangel på velbeskrevne metoder til omfattende usikkerhedsvurderinger bør imidlertid ikke forhindre at simple metoder anvendes. Resultaterne fra de simple metoder skal blot tages med visse forbehold med hensyn til de absolutte talstørrelser.

Usikkerheder på simuleringer afhænger for det første af modellens troværdighed og her er det naturligvis modellens valideringsresultat (kapitel 15) der udgør grundlaget for såvel en kvalitativ vurdering og i øvrigt input til fx konfidensintervaller og fordelingsfunktioner af udvalgte vigtige modelparametre, såfremt det vælges at foretage stokastiske simuleringer ved fx Monte Carlo teknikker med strømningssmodel, partikelbanemodel og evt. stoftransportmodel. Herved kan de usikkerheder der vedrører hydrauliske parameterverdier indgå direkte i simuleringsscenerier (beregne- de modeloutput).

Hvis der også skal sættes usikkerheder på betydningen af geologisk tolkning, lagfølger og modellens procesbeskrivelser, kan man som nævnt vælge at opstille et antal alternative konceptuelle modeller. Hver af disse modeller skal så kalibreres og valideres fx ved hjælp af invers modellering, således at "spændvidden" i kalibrerings- og valideringsresultat for lige "sandsynlige" modeller kan kvantificeres. Herefter kan fx ressourcens størrelse opgøres med hver enkelt konceptuelle model og betydningen heraf kan vurderes.

Usikkerheden på inputvariable kan normalt indgå ved at der gennemføres simuleringer af fx grundvandsdannelsen med inputverdier der svarer til fx 95 % konfidensgrænser for fx nettonedbøren, tal som evt. kan beregnes ved nærmere analyser af inddataværdier (nedbør, fordampning mm.). En anden mulighed er at rangordne output beregnet med forskellige inputverdier, parametre mm. og bestemme udvalgte fraktilværdier (udfra kummulativ fordelingsfunktion af fx beregnede grundvandsdannelser for en årrække eller for forskellige parameterkombinationer).

Håndtering af usikkerhed kan således behandles med en række forskellige metoder (U.S.Army Corps, 1999):

1. "Best estimate" incl. sensitivitsanalyse
2. "Bracketed ranges" (udvalgte end-members)
3. "Systematisk" usikkerhedsanalyse

Metode (1) indebærer en kobling med resultater af en sensitivitsanalyse, med henblik på at benytte en vifte af forskellige akvifer-parametre.

Metode (2) indebærer at der udvælges to eller flere "konceptuelle modeller" eller kalibreringsresultater svarende til forskellige parameterkombinationer. Resultaterne af disse bør "indhylle" det samlede problemkompleks' variabilitet. Indhylningsmetodik giver rekvirenten en bedre forståelse af den overordnede modelperformance, svarende til usikkerhed på parameterværdier.

Metode (3) består i at benytte fx invers modellering og/eller Monte Carlo metodik, til en systematisk analyse af modelresultater. Parameter- og inputværdier skal her gives en variationsramme (sandsynlighedsfordeling) og resultater returneres som en variationsramme (sandsynlighedsfordeling). Beregningstid og analyseniveau ved denne typer metodikker er langt mere omfattende end (1) – (2). Forsat stigende beregningshastigheder på computerhardware og softwareudvikling gør at disse metoder i løbet af de nærmeste år forventes mere udbredte end de er i dag.

Monte Carlo simulering omfatter følgende protokol:

- udvælgelse af vigtige parametre ud fra sensitivitsanalyse eller invers modellering
- statistisk karakterisering af parametre (fx normal-, log-normal-, trekants- eller uniform- fordeling)
- lav en masse kørsler

I beregningerne kaldes hver "sampling" af parameterkombinationer for en realisation. Få hundrede kørsler antages ofte tilstrækkeligt med henblik på vurdering af middel respons. I forbindelse med ekstremværdianalyser kræves et større antal realisationer for nøjagtigt at kvantificere usikkerhederne. Man kan vælge at "post-konditionere" realisationerne, ved at teste hvert enkelt benyttende et eller andet kriterium (fx kalibreringsstatistik, transporttider mv.). Der findes desuden metoder til at reducere antallet af kørsler og bibring samme kvalitet i resultaterne (fx Latin Hypercube Sampling).

Sammenfattende kan det konkluderes at usikkerheder forekommer som følge af vores ikke komplette kendskab til det fysiske system. Monte Carlo metoden giver mulighed for at adressere denne usikkerhed. I praksis "samples" input parametre til modellen efterfulgt af en simuleringskørsel med disse parameterværdier. Resultaterne beregnes og kan anvendes til fx risiko vurdering, cost-benefit analyser mm. Det er nødvendigt at gennemføre et tilstrækkeligt stort antal simuleringer. Resultater præsenteres ofte ved kumulative fordelingsfunktioner (på engelsk cdf plot), komplementær fordelings funktion (1-p, på engelsk ccdf plot), eller sandsynligheds densitets funktion (på engelsk probability density function: pdf plot), se fx Ruskauff (1998).

17.9 REFERENCER

Christensen, S. (1998) Grundvandsmodellens usikkerhed. *Geologisk Nyt*, 2/98, 23-25.

Christensen, S. and Cooley, R.L. (1999) Evaluation of prediction intervals for expressing uncertainties in groundwater flow model predictions, *Water Resources Research*, 35(9), 2627-2639.

Henriksen, H.J., Troldborg, L., Knudby, C.J., Dahl, M., Nygaard, P., Jakobsen, P.R. og Rasmussen, P. (1998) National Vandressource Model. Sjælland, Lolland, Falster og Møn. GEUS rapport 1998/109.

Henriksen, H.J., Rasmussen, P. og Knudby, C. (2000) Afprøvning af zoneringsmetoder. Miljøstyrelsen. Miljøprojekt Nr. 553. <http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2000/87-7944-191-2/html/>

Merrick, N.P. (2000) Probabilistic estimation of aquifer sustainable yield. Compact Disc Proceedings, Xth World Water Congress, Melbourne, March 2000.

Middlemis, H. (2000) Draft groundwater flow modelling guideline. Murray-Darling Basin Commission. July 2000. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Western Australia. Project No. 125.

Miljøstyrelsen (1995) Klassificering af grundvandsressourcen. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 6 1995.

Refsgaard, J.C., Thorsen, M., Jensen, J.B., Hansen, S., Heuvelink, G., Pebesma, E., Kleeschulte, S. and Ramamaekers, D. (1998) Uncertainty in spatial decision support systems – Methodology related to prediction of groundwater pollution. *In: Babovic, V. and Larsen, L.C. (Eds.): Hydroinformatics '98, Proceedings of the third international conference on hydroinformatics, Copenhagen 24-26 August 1998*, Balkema, 1153-1159.

Ruskauff, G.J. (1998) Guide to using stochastic MODFLOW for Monte Carlo simulation (kan downloades fra www.groundwatermodels.com).

U.S. Army Corps of Engineers (1999) Groundwater Hydrology. Engineering and design. Department of the Army. Washington DC. Engineer Manual 1110-2-1421. CECW-EH.