

NOTAT

ADMINISTRATIVE VALG TIL HYDROLOGISK MODELLERING OG BEREGNING AF INDVINDINGSOPLANDE OG GRUNDVANDSDANNENDE PARTIKLER

Indhold

1. Introduktion	3
2. Valg af hydrologisk model	3
3. Modelopsætning og kalibrering	4
3.1 Horisontal diskretisering	4
3.2 Vertikal diskretisering	4
3.3 Modelrand	4
3.4 Kalibrering og validering	5
3.5 Effektiv porøsitet og magasintykkelse	6
3.6 Ekstern reviews	7
4. Simuleringsscenarier	8
5. Resultater til anvendelse i grundvandskortlægningen	8
5.1 Grundvandsdannelse	8
5.2 Magasinspecifikke potentialekort	10
5.3 Indvindingsoplande	10
5.3.1 Oplande til en kildeplads	10
5.4 Partikelbanesimulering	11
5.4.1 Simulering i MODFLOW	11
5.4.2 Simulering i MikeSHE	12
5.5 Stokastisk analyse.....	Fejl! Bogmærke er ikke defineret.
5.5.1 Optegning af administrative indvindingsoplande	13

5.6	Grundvandsdannende opland.....	16
5.6.1	"Bruttooplande" ved påvirkninger fra afværgepumpning	Fejl!
	Bogmærke er ikke defineret.	
5.7	Afrapportering	17
6.	Referencer	17
Bilag 1	Forskel mellem magasinspecifik grundvandsdannelse og vandudveksling mellem modellag	19

UDKAST

1. Introduktion

I dette notat fremlægges de administrative valg, der foretages ved opstilling af hydrologiske modeller og beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande i forbindelse med statens afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. Formålet med notatet er at have en præcis beskrivelse af udførelsen af hydrologiske modelleringsopgaver, og sikre at modelleringsarbejdet udføres på et ensartet grundlag i forhold til Miljøstyrelsens retningslinjer.

Notatet skal ses som et supplerende dokument til Geo-Vejledning XX (og titlen på GV) /1/, som beskriver de danske retningslinjer for bedste praksis indenfor hydrologisk modellering. Geo-Vejledning XX indeholder en gennemgang af de tekniske overvejelser, der skal foretages gennem hele modelleringsprocessen, fra modelopsætning til håndtering af resultater. Geo-Vejledning XX er en ren fagligt baseret vejledning, som gælder for modelleringsarbejde generelt. Derimod indeholder indeværende notat retningslinjer for fagligt funderede administrative beslutninger, specifikt rettet mod hydrologiske modelleringsopgaver indenfor statens afgiftsfinansierede grundvandskortlægning.

Nærværende notat er udarbejdet i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning i perioden 2016 – 2020, og er en videreudvikling af et tidligere notat fra Naturstyrelsen: "Præcisering af anbefalinger i Geo-Vejledning 2 mht. afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande" /2/. I nærværende notat håndteres de beslutninger, der skal foretages med hensyn til valg af modelværktøj, modelopsætning og kalibrering, hvilke scenarier der skal simuleres, beregning af grundvandsdannelse, beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, samt hvordan usikkerheder skal præsenteres i afrapportering.

2. Valg af hydrologisk model

Valget af modelkode til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande kan ikke foretages ensartet for hele landet; valget er afhængig af den hydrostratigrafiske model for området, datadækning (inklusive pejledata, vandløbsmålinger og indvindingsdata) og ressourcer til modelleringsarbejdet. Kapitel 4.7.1 i Geo-Vejledning XX /1/ har omfattende beskrivelse af de forskellige modeltyper samt overvejelser med hensyn til valg af modeltype og kode i forhold til modelleringsformål og ambitionsniveau er præsenteret i.

Indenfor grundvandskortlægningens regi, skal der opstilles en detaljeret numerisk grundvandsmodel. For at opstille en detaljeret numerisk grundvandsmodel skal der foreligge en hydrostratigrafisk model, klimadata samt data omkring indvinding, grundvandsstand (synkronpejlinger, pejletidsserier) og data for vandføring i vandløb, samt vandløbenes beliggenhed og et udvalg af vandløbsprofiler.

Hvis der foreligger en numerisk model fra et andet projekt, kan det vurderes, om denne model kan genbruges, kan opdateres og anvendes til formålet eller der skal opstilles en helt ny model. Anvendeligheden af tidligere opstillede modeller skal vurderes med hensyn til kvaliteten af kalibrering og validering af modellen i forhold til det nye formål og i forhold til fokusområde for beregningerne. Vurderingen af brugbarheden af tidligere opstillede modeller er beskrevet i Geo-Vejledning XX /1/.

Hvorvidt en eksisterende detaljeret numerisk model umiddelbart er anvendelig til beregning af nye oplande afhænger af placeringen af indvindingen i forhold til rand (se også afsnit 3.3), om den hydrostratigrafiske model, der ligger til grund for grundvandsmodellen vurderes passende for den konkrete lokalitet, om modellen har en passende horisontal og vertikal diskretisering til opgaven (se også afsnit 3.1) og om modellen er tilfredsstillende kalibreret i området (se også afsnit 3.4).

Geo-Vejledning 3 /8/ danner grundlag for opstillingen af de fleste hydrostratigrafiske modeller i den statslige kortlægning. Ved lagmodeller opstillet i henhold til Geo-Vejledning 3 kan lagene implementeres i de numeriske modelkoder til grundvandsmodelleringen på flere måder. Håndteringsmulighederne for geologiske lag er forskellige i GMS MODFLOW og i MIKE SHE. Generelt er de geologiske lagmodeller blevet anvendt ved, at de hydrostratigrafiske lag definerer beregningslagene i grundvandsmodellen. Dette har en fordel ved udtræk af data, idet for eksempel potentialet eller grundvandsdannelsen dermed kan udtrækkes for de enkelte magasiner.

3. Modelopsætning og kalibrering

3.1 Horisontal diskretisering

Valget af den horisontale diskretisering bør afstemmes med formålet af beregningen. Ved beregning af indvindingsoplande er en diskretisering på 100 x 100 m generelt tilfredsstillende. En grovere diskretisering af beregningscellerne vil kunne bidrage til betydelige fejl i de beregnede oplande, især for mindre indvindingsoplande. Derfor skal alle numeriske grundvandsmodeller til beregning af indvindingsoplande opstilles med en diskretisering på 100 x 100 m eller finere. Hvis det simulerede indvindingsopland forventes til at være mindre end 5 ha (dvs. mindre end 5 modelceller á 100 x 100 m) kan modellen opstilles med en finere diskretisering end 100 x 100 m, så oplandet er dækket af flere celler. Det vil gøre beregning af indvindingsoplandet mere præcis.

3.2 Vertikal diskretisering

I lagmodellerne anvendes de hydrostratigrafiske lag generelt som numeriske modellag. Det betyder at den vertikale diskretisering kan variere fra mindre end 1 meter (afhængigt af den valgte minimumstykkelser for beregningslagene i modellen) op til over 100 meter. Store variationer i lagtykkelsen af modellag over korte afstande er ikke optimalt, da dette kan give numerisk ustabilitet. Desuden giver det også en stor usikkerhed på oplande til borerer som er filtersat f.eks. i de øverste 20 meter af et lag på 60 meter. I sådan tilfælde anbefales det at lave en underinddeling af meget tykke magasinlag til to eller flere modellag.

3.3 Modelrand

Det er vigtigt, at ved udarbejdelsen af modelområdet udbredelse, skal der vurderes om modelranden er placeret langt nok fra de indvindingsboringer, der skal beregnes oplande for, således at oplandene ikke påvirkes af de valgte randbetingelser. Dermed er det nødvendigt at vurdere, om randen er placeret fornuftig med hensyn til de forventede oplandes udstrækning allerede i modelopsætningsfasen. Yderligere bør der også forgå en kvalitetssikring af de endeligt beregnede indvindingsoplande, for at sikre at der ikke ses randeffekter i op-

landenes udstrækning. I tilfælde, hvor oplande er tydeligt påvirket af modelranden, er oplandene ikke beregnet korrekt. Derfor skal det overvejes at udvide modellen eller opstille en ny model for de påvirkede oplande.

3.4 Kalibrering og validering

Det er vigtigt at en model er kalibreret og valideret for den konkrete lokalitet og med det rette formål for øje. Alle modeller bør både kalibreres og valideres. Dette kan være lidt vanskeligt i områder, hvor der ikke er tilstrækkelig data, og her kan det være nødvendigt at acceptere at modellen kun kalibreres.

Datakrav til og målsætning for kalibrering og validering af hydrologiske modeller er præsenteret i Geo-Vejledning XX /1/. Der kan dog ikke sættes et bestemt målsætningskrav for kalibrering og validering af en hydrologisk model, som gælder for hele landet. Der er stor forskel på de geologiske strukturer, den geologiske usikkerhed og på det tilgængelige datagrundlag, hvilket kan påvirke det niveau, modellen kan kalibreres og valideres til. Det skal tilstræbes at opnå den bedst mulige kalibrering indenfor de data der er til rådighed og indenfor den tidsramme, der er til rådighed. Hvis en kalibrering og/eller validering ikke kan opnås på såkaldt detailniveau i Geo-Vejledning XX /1/, skal der redegøres for, hvorfor det ikke kan opnås og hvad det betyder for simuleringerne fra modellen. Opnås screeningsniveau, skal kvaliteten af modellen vurderes, i forhold til om den kan anvendes til formålet.

I tilfælde, hvor flere målsætningsparametre ikke kan opnås, skal målsætninger for trykniveauerne prioriteres, når modellens formål er at beskrive indvindings- og grundvandsdannende oplande. Dette giver det bedst bud på retning af grundvandsstrømning og dermed den bedste beregning af indvindingsopland. Derefter prioriteres vandbalancen for vandløb (Fbal) og så eventuelt sommervandføring.

Ud over en kalibrering og validering af modellen med hensyn til de kvantitative statistiske målsætningsparametrene, skal der foretages en kvalitativ vurdering af modellen:

- De estimerede modelparametre skal have realistiske værdier.
- Desuden skal områdets hydrogeologiske karakteristika reproduceres af modellen. F.eks. skal modellen være i stand til at simulere korrekte strømningsretninger, beliggenhed af grundvandsskel og retninger af gradienter over dybden. Dette vurderes ved at sammenligne de beregnede potentialer med optegnede potentialekort for de pågældende magasiner. Dette er for at sikre, at forløbet og den rumlige fordeling af det beregnede potentiale passer med det observerede, og dermed at den observerede grundvandsstrømningsretninger er genskabt med modellen.
- Den rumlige fordeling af fejl/residualer skal vurderes, for at identificere områderne, hvor modellen ikke simulerer potentialet korrekt.. Det skal sikres, at residualerne er fordelt fornuftigt arealmæssigt, således at der ikke konsekvent f.eks. simuleres for høje eller for lave potentialer i et område.
- For modellerne der skal kalibreres og valideres dynamisk skal der laves en vurdering af den tidlige fordeling af grundvandsstande (pejlinger) og vandføring, for at se om ændringer i både potentiale og vandføring kan genskabes i simuleringen.

- Endelig skal der kontrolleres at modellen har en realistisk vandbalance.

Hvis ovennævnte kvalitative krav ikke er opfyldt, er modellen ikke kalibreret tilfredsstillende.

Afrapportering af kalibrering og validering af modellen i modelrapporten skal omfatte: Metoden brugt til kalibrering og validering, de valgte statistiske nøjagtighedskrav for kalibrering og validering af modellen (samt begrundelse for valgte nøjagtighedskrav), kalibrerings- og valideringsresultater, kvalitativ vurdering i forhold til potentialekort og rumlig fordeling af residualer, samt en kort sammenfatning for kalibreringen og valideringen med beskrivelse af, hvor modellen er kalibreret godt, for hvilke områder modellen er kalibreret mindre godt, og en beskrivelse af den kalibrerede models gyldighedsområder.

3.5 Effektiv porøsitet og magasintykkelse

Effektiv porøsitet er defineret som procenten af porevolumen hvor vand og andre væsker kan bevæge sig igennem en bjergart eller et magasin /1/. Effektiv porøsitet er, som regel, mindre end total porøsitet fordi der ofte kan opstå porer i magasinet, som er helt isoleret fra de andre porer og den generelle advective strømning i et grundvandsmagasin. Der er en del debat om, hvor meget mindre effektiv porøsitet er end total porøsitet, eftersom det er en parameter, der er svær at måle. I sidste ende ligger effektiv porøsitet mellem specifik ydelse* og total porøsitet. En undersøgelse foretaget af USGS /2/, hvor der var brugt tracer til at beregne effektiv porøsitet, viser netop, at for transport af vand i ukonsoliderede sedimenter (som kvartære aflejringer i Danmark), er effektiv porøsitet meget tæt på total porøsitet. På basis af denne konklusion antager MST, at effektiv porøsitet for transport af vand i de Danske grundvandsmagasiner er næsten det samme som total porøsitet.

Tabel 1 er en sammenlægnings af tal fra tre forskellige lærebøger /1/, /3/, og /4/. I dobbeltporøse magasiner, som opsprækket kalk, er effektiv porøsitet en blanding af den primære (matrixen) og den sekundær (sprækker) porøsitet /5/. I danske kalk aflejringer (specifik bryozokalk og skrivekridt) er hydrologisk ledningsevne i sprækkerne 103 til 104 gange højere end i matrixen /6/. I dette tilfælde vil strømning primært foregå i sprækkerne, og derfor vil effektiv porøsitet være tæt på sekundær porøsitet /5/. En undersøgelse af et opsprækket kalkmagasin i England har vist at mellem 60% og 80% af vandtransporten forgår i sprækkerne /7/. Som udgangspunkt i modellering anbefaler MST at der bruges en værdi for effektiv porøsitet, der ligger midt i spændet for effektiv porøsitet. I dobbeltporøse magasiner anbefales en effektiv porøsitet, der ligger tæt på den sekundære porøsitet i magasinet.

De værdier der anvendes for effektiv porøsitet i en grundvandsstrømningsmodel kan have en stor betydning for de beregnede transporttider fra overfladen/vandspejl og til en indvindingsboring. Generelt siges, at jo større effektiv porøsitet der er brugt i modellen, jo længere bliver transporttiderne gennem grundvandsmagasinet. Dette er især af betydning, når man afgrænser indvindings- og grundvandsdannende oplande efter en bestemt grundvandsalder (dvs. administrative oplande).

Afgrænsning af et administrativt opland, f.eks. et 200 års indvindingsopland, er ikke uproblematisk. Beregnet transporttid i en given model er bl.a. påvirket af den effektive porøsitet

og tykkelse af den vandførende del af et magasin, der anvendes i modelkørslen. Både den effektive porøsitet og tykkelsen af magasinets vandførende del (især i tilfælde af opsprækkede magasiner - kalk) er ofte svær at bestemme, og repræsenterer en usikkerhed forbundet med beregningen af transporttid i en hydrologisk model.

Scenarietkørsler med forskellige værdier for effektiv porøsitet har vist, at nogle oplande kan være væsentligt påvirket af størrelsen af den angivne effektive porøsitet /2/ og nogle oplande bliver ikke påvirket overhovedet. En diskussion af brug af effektiv porøsitet i grundvandsmodeller er præsenteret i afsnit 4.7.c i Geo-Vejledning XX /1/. For at gøre beregninger af transporttid, og dermed afgrænsning af administrative oplande (se afsnit 5.5), ensartet for alle indvindingsboringer/kildepladser, skal der bruges de anbefalede effektive porøsitet i Tabel 1, med mindre, at der er en vel funderede begrundelse for at afvige fra den anbefalede effektive porøsitet.

Tabel 1. Værdier for effektiv porøsitet i Danske bjergarter. Anbefalet effektiv porøsitet bruges for beregning af transporttid i afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Tabel er fra /2/.

Geologisk lag	Specifik Ydelse (%)	Effektiv Porøsitet (%)	Anbefalet Effektiv Porøsitet (%)
Ler	1 – 18	30 – 60	40
Moræneler	5 – 30	10 – 30	25
Silt (morænesilt)	5 – 20	35 – 50	40
Sand	10 – 30	25 – 40	30
Grus	15 – 30	20 – 35	27
Sand og grus (usortet)	10 – 30	15 – 35	25
Kalk - primære (matrix)	0,5 – 5	5 – 30	20
Kalk – sekundære (sprækker)	0,1 - 5	0,1 - 5	--
Opsprækket Kalk (dobbeltporøse)	0,1 – 5	0,1 - 15	5
Sandsten	5 – 15	5 - 30	15

Det kan være svært at bestemme omfanget af den opsprækkede zone af et kalkmagasin, og dermed magasintykkelsen af opsprækkede magasiner. Der kan desuden være store rumlige variationer i tykkelsen af den opsprækkede zone over selv korte afstande. Flowlogs samt MRS kan bruges til at undersøge tykkelsen af det vandførende lag i et opsprækket magasin. Så vidt der er datagrundlag for det, bør flowlogs, MRS og filterlængde inddrages i overvejelser af tykkelsen af det vandførende lag, som bruges i en grundvandsmodel.

3.6 Ekstern reviews

Der findes ikke to modelleringsopgaver som er ens dels med hensyn til geologi, klima, arealanvendelse og dels tilgængelighed af data. Desuden skal der tages hensyn til opgavens formål, ønsker til nøjagtighed, økonomiske ressourcer, interessenter mv.

I forbindelse med selve modelleringsarbejdet skal der træffes en masse små og store beslutninger og af hvilke data der skal inddrages, hvordan data tolkes, hvilke numeriske værktøjer der benyttes til modelopstilling, kalibrering, validering osv. Det er derfor vigtigt at der udføres eksternt reviews af disse valg som led i løbende kvalitetssikringen af modellen.

Der er beskrevet mere om eksternt review i Geovejledning XX 2017 kap 4.7.4.

4. Simuleringsscenarier

Indvindings- og grundvandsdannende oplande, der bruges i forbindelse med statens grundvandskortlægning, optegnes ud fra ét scenarie: Vandværkernes tilladte indvinding. Det er vigtigt, at man bruger de gældende indvindingstilladelser, fordi det er den indvindingsmængde, vandværkerne maksimalt har lov til at indvinde i et givent år. Andre typer modelscenarier kan bruges til at belyse ændringer i oplandene eller vandbalance som følge af ændringer i f.eks. infiltration, indvinding eller klima.

Der kan opstå situationer, hvor der er store afvigelser mellem aktuel indvinding og tilladelsesindvinding for øvrige typer indvindinger (det vil sige for indvindere, som ikke er almene vandforsyninger). Dette kan især være problematisk i forhold til markvanding og afværgeindvinding, hvor den aktuelle indvinding kan være blot en brøkdel af den tilladte. Store afvigelser mellem aktuel og tilladt indvinding på sådanne indvindere kan medføre en forkeert strømningsmodel, og dermed en større usikkerhed på de beregnede oplande. Derfor anbefales det, at den aktuelle indvinding for øvrige indvindere gennemgås. Afviger den aktuelle indvinding over de sidste 5 år markant fra den tilladte indvinding, anvendes den aktuelle indvindingsmængde for disse indvindere, også i tilladelsesscenariet. Indvindingen i tilladelsesscenariet vil således være den tilladte indvinding med undtagelse af øvrige indvindere med stor afvigelse mellem aktuel og tilladt indvinding - for disse anvendes aktuel indvinding (f.eks. gennemsnit af de seneste 5 års indvinding).

Ved en stationærmodel anvendes gennemsnittet af de sidste 5 års aktuelle indvindingsmængder. MST beregner kun indvindingsoplände for gældende indvindingstilladelser. Kommunen skal/kan (?) levere de gældende indvindingstilladelser som dokumentation for tilladelserne og rette dem i Jupiter.

5. Resultater til anvendelse i grundvandskortlægningen

5.1 Grundvandsdannelse

Grundvandsdannelse defineres som det vand, der strømmer fra den umættede zone til vandspejlet og strømmer videre ned gennem den/de mættede zoner /5/. Når der er tale om grundvandsdannelse til et bestemt magasin, er det vandet der strømmer fra overfladen til vandspejlet og videre ned i den mættede zone, indtil vandet strømmer ned til toppen af det pågældende magasin. Strømning af vandet fra den umættede zone til dybere magasiner vil primært foregå vertikalt gennem de mere vandstandsende lag (f.eks. moræneler), men vil også have en horisontal komponent gennem grundvandsmagasiner (f.eks. sand, grus, kalk).

Grundvandsdannelse er en vigtig parameter ved afgrænsning af nitratfølsomme indvindingsområder (NFI). Grundvandsdannelse kan beregnes på flere måder. Grundvandsdannelsen beregnes i tre dimensioner ved hjælp af partikelbanesimuleringer. Her følges partikler fra terræn eller øverste vandspejl og til de når et specifikt magasin.

Noter fra snak med Rambøll:

Det skal bemærkes at, den grundvandsdannelse som anvendes til afgrænsning af NFI, som første prioritet er grundvandsdannelsen beregnet fra terræn/vandspejlet til indvindingsmagasinet /6/. Hvis det ikke er muligt at beregne grundvandsdannelse fra terræn/vandspejlet til indvindingsmagasinet, bruges den beregnede terrænnær grundvandsdannelse, dvs. udtrukket ved top af de øvre modellag, mellem modellens lag 1 og modellens lag 2, hvis det er en MIKE SHE-model. I GMS er det muligt at beregne grundvandsdannelsen på to måder. Ved et frit magasin tages nettonedbøren/infiltrationen/grundvandsdannelsen ledt i øverst aktiv celle og her fratrækkes drænmængden. Herved fås et kvalificeret bud på den terrænnære grundvandsdannelse. Ved et spændt magasin vurderes den terrænnære grundvandsdannelse ved at se på vandudvekslingen mellem lerlaget over det øvre magasin til det øvre magasin.

Når den magasinspecifikke grundvandsdannelse beregnes med partikelbanesimuleringer i en hydrologisk model, er det en måde at repræsentere det vand, der strømmer fra terræn eller det øverste vandspejl til et bestemt magasin. Vandets strømning bestemmes ved at følge partikler, der placeres på terrænoverfladen eller ved øverste vandspejl, og som derefter strømmer ned til magasinet under simulering. Dermed fås en repræsentation af grundvandsdannelsen til et magasin fra partiklernes oprindelse på overfladen eller vandspejlet.

Den hydrologiske models evne til at beregne grundvandsdannelsen skal vurderes inden der udtrækkes data.

Magasinspecifik grundvandsdannelse skal ikke forveksles med vandudveksling mellem magasinet og den overliggende modellag, som er et resultat, der kan udtrækkes direkte fra modellerne og som ofte er vist i eksisterende rapporter fra den national grundvandskortlægning som grundvandsdannelse til magasin. Det er misvisende at betragte disse resultatudtræk som grundvandsdannelsen til magasin fra terræn, idet grundvandet, der infiltrerer ved ét punkt i magasinet sjældent er infiltreret på terræn ret lodret over dette punkt. På resultatudtræk, der viser vandudvekslingen mellem magasin og det overliggende modellag, kan der være områder, hvor der ses en positiv vandudveksling mellem et dybere grundvandsmagasin og dets overliggende modellag på samme lokalitet, hvor der ved terræn er opadrettet grundvandsstrømning (og dermed ingen positiv grundvandsdannelse). I Bilag 1 er givet en kort beskrivelse af forskellen mellem den magasinspecifikke grundvandsdannelse og vandudveksling mellem magasin og den overliggende modellag.

For hydrologiske modelleringsopgaver indenfor den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning, skal der, som minimum, beregnes grundvandsdannelse for tilladelsesscenariet. Terrænnær grundvandsdannelse skal i alle tilfælde beregnes og præsenteres. Hvis magasinspe-

cifik grundvandsdannelse kan beregnes vha. partikelbanesimuleringer, skal grundvandsdannelse fra terræn til hvert indvindingsmagasin beregnes og præsenteres. Det anbefales desuden, at vandudveksling mellem modellagene eller grundvandsmagasiner, præsenteres, men det skal fremgå tydeligt af modelrapporten, at der er tale om vandudveksling mellem lagene og ikke en direkte vertikal grundvandsdannelse fra terræn til magasinet.

Afrapportering af grundvandsdannelse i rapporter for hydrologiske modeller, skal som minimum inkludere:

- En beskrivelse af og kort over terrænnær grundvandsdannelse (f.eks. vandudveksling ved grundvandsspejlet). Kortet skal vise både positiv grundvandsdannelse (nedadrettet vertikal gradient) og negativ grundvandsdannelse (opadrettet vertikal gradient) og disse skal være tematiseret i forhold til mængden af grundvand der dannes/strømmer af.
- En beskrivelse af og kort over grundvandsdannelse fra terræn/vandspejl til hvert indvindingsmagasin, hvis magasinspecifikke grundvandsdannelse kan beregnes. Kortet kan være tematiseret i forhold til mængden af grundvandsdannelse, hvis det kan beregnes.

5.2 Magasinspecifikke potentialekort

Indvindingerne i modellen foregår ofte fra flere forskellige grundvandsmagasiner og der bør udtrækkes magasinspecifikke potentialekort for modellens grundvandsmagasiner. Udtrækene bør være i form af 1 m (og evt. 5 m) ækvivalent konturlinjer og grid.

5.3 Indvindingsoplande

Lovgivning vedr. afgrænsning og udpegning af IOL til hvert anlæg

Indvindingsopland indenfor OSD og udenfor OSD – samme krav?

Et indvindingsopland til en boring er det volumen, hvorfra der strømmer grundvand til en given indvindingsboring. Voluminet kan omfatte dele af et eller flere geologiske/hydrostratigrafiske lag, både lerlag, sandlag eller kalk. Udstrækningen af dette volumen projiceres op på terræn og udgør det fuldt udviklede indvindingsopland,. En detaljeret beskrivelse af et indvindingsopland er præsenteret i Geo-Vejledning XX, afsnit 4.7.c /1/.

I nærværende notat bruges begrebet "fuldt udviklet indvindingsopland" og "administrativt indvindingsopland". Et *fuldt udviklet indvindingsopland* er defineret som et modelberegnet opland, hvor simulationstiden har været lang nok til, at oplandet ikke vil blive større, selv hvis man simulerer over en endnu længere periode. Et *administrativt indvindingsopland* er en delmængde af et fuldt udviklet indvindingsopland, hvor oplandet afgrænses ud fra en specificeret simuleret transporttid til indvindingsboringen, og tilføjes en valgt sikkerhedsbuffer omkring indvindingsboringer og omkring det beregnede opland, for at kompensere for mulige usikkerheder.

5.3.1 Oplande til en kildeplads

Indvindingsoplande er per definition boringsspecifikke, men ifølge Geo-Vejledning 2 /3/ opregnes oplande til én specifik kildeplads som en foreningsmængde af oplandene til de individuelle boringer på kildepladsen. Det skyldes, at boringer på en kildeplads ofte ligger så tæt på hinanden at oplandet til de individuelle boringer overlapper hinanden.

Der gøres dog opmærksom på, at hvis der indvindes fra to eller flere magasiner, skal der optegnes et opland for kildepladsen i forhold til hvert individuelt magasin, med mindre der er hydraulisk kontakt mellem magasinerne i hele oplandets udstrækning. Dette skal gøres, da der kan være forskellige strømningsretninger i hvert magasin, som påvirker udformning og beliggenhed af oplandet, og det vil således være forkert at slå foreningsmængden af oplandene til borer filteret i forskellige magasiner, sammen til ét samlet opland. I indvindingsoplande udenfor OSD afgrænses sårbarhed, og dermed NFI, i forhold til det magasin, der indvindes fra /6/. Da de reducerede lertykkelser over et magasin vil være forskellige fra magasin til magasin, vil der også afgrænses forskellig sårbarhed afhængigt af, hvilket magasin, man ser på i et område. Derfor er det vigtigt, at der kan skelnes mellem oplandene, så man har forskellige opland for hvert magasin, som sårbarheden skal afgrænses efter. Hvis to borer på en kildeplads for eksempel indvinder fra henholdsvis Sand 2 og Sand 3, skal der optegnes et særskilt opland for boringen, der indvinder fra Sand 2, og et særskilt opland for boringen, der indvinder fra Sand 3. Dermed afgrænses sårbarheden ift. Sand 2 i oplandet til boringen, der er filteret i Sand 2, og tilsvarende afgrænses sårbarheden ift. Sand 3 i oplandet til boringen, der er filteret i Sand 3. I områder, hvor oplandene til forskellige magasiner overlapper, afgrænses sårbarheden i forhold til det mest terrænnære (og mest sårbare) af magasinerne.

5.4 Partikelbanesimulering

Afhængig af modelkoden skal der træffes en beslutning om antal partikler og deres startplacering i modellen. Modelkørerne i såvel Mike SHE som i Modflow/GMS er baseret på et finite difference skema. I begge tilfælde anvendes derfor kvadratiske beregningsceller. Partikelbaner simuleres på et gennemsnitligt hastighedsfelt. For at simulere grundvandsstrømningen helt tæt på indvindingsboringen korrekt, skal cellerne ideelt set være meget små. Da der normalt opstilles modeller, hvor cellerne har en kantlængde på 100 m, vil det være svært, hvis ikke umuligt, at simulere den boringsnære sænkningstragt man observerer i virkeligheden.

5.4.1 Simulering i MODFLOW

I MODFLOW simuleres indvinding ved hjælp af well-celler. De partikler der har koden for well-cellen kan udtrækkes som volumen af indvindingsoplandet over tid. Beregning af opland med MODPATH foretages typisk med backward tracking. Man får fornuftige resultater ved at generere startpartiklerne, så de er tilfældigt fordelt indenfor en afstand af $\frac{1}{2}$ cellebredde fra indvindingsboringerne i de beregningslag, der indvindes fra i modellen. Hvis

indvindingsboringen geografisk er lokaliseret lige i centrum af en kvadratisk beregningscelle, svarer det til, at startpartiklerne placeres tilfældigt i en cylinder, der tangerer siderne og bunden af beregningscellen.

I de tilfælde, hvor indvindingsboringen geografisk er lokaliseret tæt på hjørnet af well-cellen, er det relevant at benytte en afstand, der er større end $\frac{1}{2}$ cellebredde fra indvindingsboringen ved placering af startpartiklerne, for at cylinderen kan dække et tilstrækkeligt volumen af well-cellen. For kvadratiske well-celler kan man f.eks. vælge en afstand på kvadratrods 2 gange cellebredden eller en hel cellebredde.

Man bør benytte så mange partikler som muligt ved bestemmelse af oplande med MODPATH og antallet af partikler sættes ved det antal der giver maksimal udbredelse af oplandet. Oplandene bliver bedre bestemt jo flere partikler man anvender, men der er også en begrænsning på, hvor mange partikler man i praksis kan håndtere, ikke mindst når det handler om efter-processering af resultaterne i et GIS-miljø. I praksis er det ikke effektivt at generere partikler og køre MODPATH via GIS brugerfladen (eller andre brugerflader til MODFLOW/MODPATH i det hele taget). Dette skyldes dels brugerfladernes begrænsninger på placeringen af partikler samt på antallet af partikler. Det er derfor muligt at generere partikler og køre MODPATH uafhængigt af brugerfladen til MODFLOW/MODPATH.

5.4.2 Simulering i MikeSHE

Beskrivelse mangler af følgende i Mike She:

- Random placering af partikler i modelceller (ring evt., hvis I gerne vil diskutere dette.. ;) KRB og jeg plejede vist at bruge random – Britt brugte uniform, Annette brugte ?? Jeg vil ikke mene, at det har så stor betydning om man vælger uniform eller random, hvis man bruger nok partikler. Det er kun hvis der er meget få partikler i en beregningscelle..)
- GDO: Indplacering af 25-50 partikler i alle modelceller i modellens to øverste beregningslag.
- IO: Indplacering af 10 partikler i alle celler i alle beregningslag

I MikeSHE beregnes indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande vha. forward partikelbanesimulering. Når indvindingsoplande beregnes, placeres 10 startpartikler per ha uniformt i alle beregningslag. Ensartet/uniform fast defineret partikelfordeling sikrer reproducerbare oplande. De partikler, der registreres i den modelcelle, som en boring indvinder fra, danner grundlag for afgrænsning af indvindingsoplandet. Om muligt, skal lagene underopdeles, sådan at lagenes tykkelse ikke overstiger den vandførende tykkelse, så der ikke beregnes på hele laget, selvom strømmingen kun sker i den øverste eller nederste del. Dette er især med hensyn til opsprækkede kalkmagasiner.

Ved beregning af grundvandsdannende oplande er det ofte et ønske at kunne benytte partikelbaneberegningerne til at estimere fordeling af grundvandsdannelsen til den aktuelle kildeplads. Grundvandsdannelsen kan estimeres på baggrund af tætheden af partiklernes startposition i det øverste lag i modellen. Men for at få et korrekt billede af grundvandsdannelsens størrelse og aldersfordelingen på kildepladsen er det imidlertid nødvendigt, at antallet af partikler som starter i modellens øverste lag er proportionalt med infiltrationens stør-

relse. Hvis formålet udelukkende er at afgrænse de grund-vandsdannende områder så kan der derimod benyttes et fast antal partikler i modellens øverste lag. Hvis man indlægger partikler i MIKE SHE via en fast "koncentration" på nedbøren, så anbefales det, at påføre partikler løbende over en 10-20 årig periode eller over hele simuleringsperiode. Herved tages højde for alle de dynamiske udsving, og der sikres et retvisende billede af, hvor mange partikler der bliver fanget i dræn i og hvor mange der infiltrerer til dybere lag. Når partikler tilføjes med nødbøren skal der ikke samtidig sættes et "initial" antal partikler for hver celle i det øverste beregningslag. Man kan dog sagtens beregne grundvandsdannede oplande og indvindingsoplande i samme kørsel ved at sætte et fast antal partikler på alle de øvrige lag i modellen (som beskrevet ovenfor). Hvis man ikke kobler partiklerne til nedbør er det anbefalet at der, evt. lægges flere partikler i lag 1 og lag 2. Antallet af partikler er bestemt af, hvor mange partiklerne modellen kan håndtere m.h.t. til beregningstiden. Men grunden til, at der kan placeres flere partikler per ha i de øverste lag er, at en stor del af partiklerne kan forsvinde til dræn, vandløb, modelrand og umættet zone. Om man placerer flere partikler i lag 1 og 2 skal vurderes individuelt. Den endelige beslutning om det valgte antal partikler og deres fordeling skal angives. Modellen skal være opvarmet (for eksempel, en 5-års opvarmingsperiode) før modellen beregner på partiklerne. Det anbefales, at partiklerne i de øverste lag tildeles modellen, enten 4 gange i løbet af det første simulerings år, eller efter en periode, hvor der er simuleret et lavt grundvandspejl i modellen, for eksempel sommer eller tidligt efterår. Denne indplacering er vigtigt, da det sikrer, at partiklerne, der skal simulere grundvandsdannelse til den primære magasin, når grundvandsmagasinerne. Hvis partiklerne indplaceres på tidspunkter med en høj grundvandsstand (som det ofte er tilfælde omkring årsskifte), er der en risiko for, at partiklerne forsvinder ude i dræn, og ikke når ned til grundvandet.

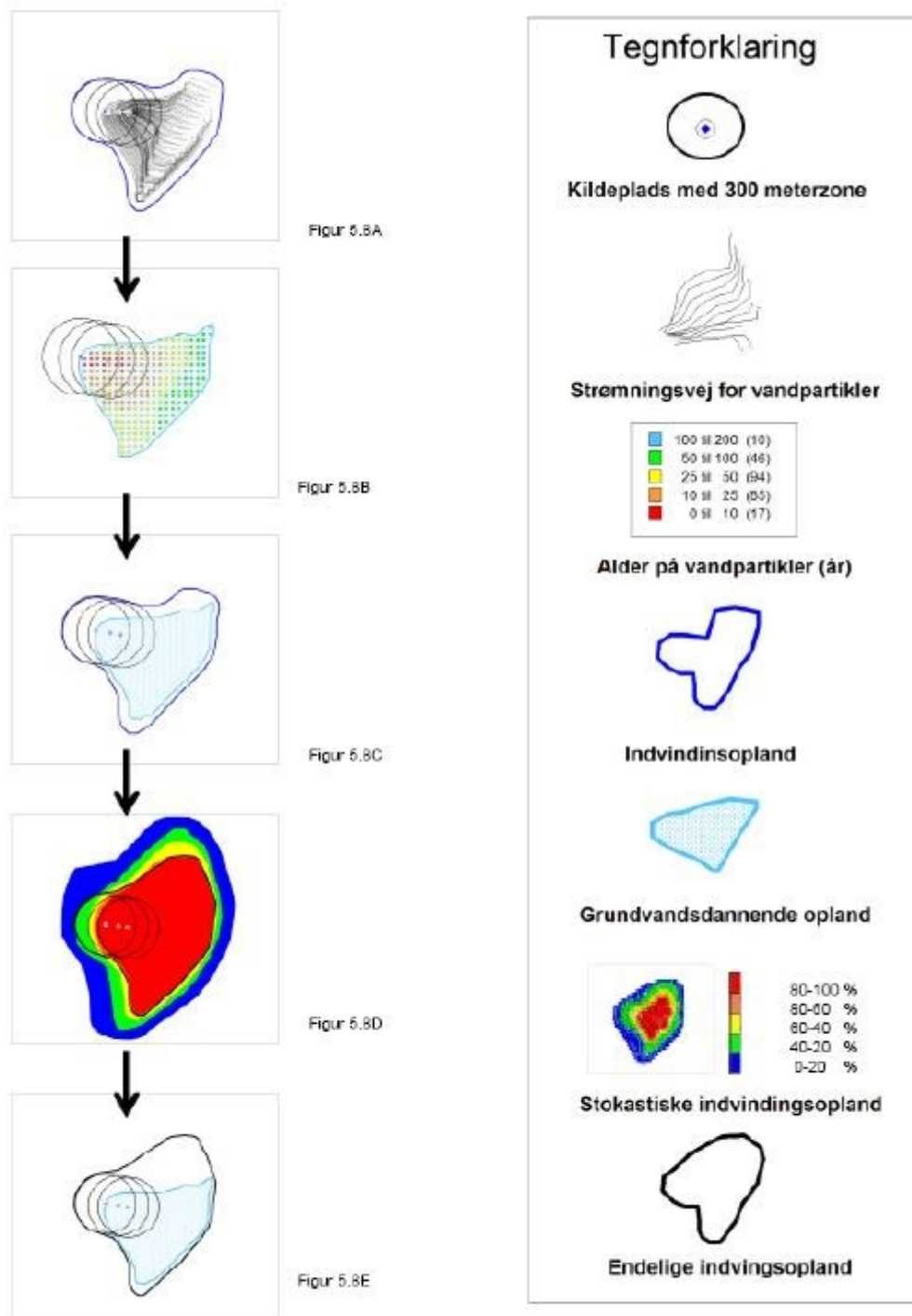
5.5 Optegning af administrative indvindingsoplande

Det administrative indvindingsopland skal optegnes ud fra resultaterne af tilladelsesscenariet fra den kalibrerede model. Det administrative opland skal afgrænses ved 200 års simuleret transporttid. Hvis der er afvigelse mellem det stokastiske opland og referenceoplandet, skal det stokastiske opland også inkluderes i det administrative opland. Det vil sige, de modelceller der indgår i oplandet i mere end eller lig med 80 % af de stokastiske kørsler skal indgå i det administrative opland sammen med oplandet beregnet ved referencekørslen – begge afgrænset ved 200 års simuleret transporttid. Oplandet beregnet ved referencekørslen skal dog altid rummes, så det betyder, at, at resultaterne fra de stokastiske oplandsberegninger kun kan gøre det administrative opland større, ikke mindre. Der skal medtages en buffer på 300 m omkring alle aktive indvindingsboringer, når et administrativt indvindingsopland optegnes.

I Geo-Vejledning 2 /3/ anbefales en sikkerhedsmargin omkring de numeriske beregnede administrative indvindingsoplande, der svarer til størrelsen af modeldiskretiseringen. Det vil sige, med en cellediskretisering på 100 x 100 m vil der således skulle lægges en usikkerhedsmargin på 100 m rundt om hele det beregnede indvindings opland. Usikkerhedsmargin kan placeres enten fra midten af de celler, hvor der er partikler der når indvindingsboringer, eller fra grænsen af selve partiklernes placering på overflade.

Der foretages endeligt en udglatning af det beregnede opland.

UDKAST



Figur 5.8 A-E skitserer en anbefalet arbejdsgang i, hvordan man beregner og fastlægger henholdsvis sit indvindingsopland (referenceopland) og det grundvandsdannende opland (referenceopland).

FIGUREN SKAL RETTES

5.6 Grundvandsdannende opland

Et grundvandsdannende opland til en boring eller en gruppe af boringer på en kildeplads defineres som det areal på jordoverfladen, hvor vand infiltrerer ned til grundvandsspejlet og efterfølgende strømmer videre til det filter der indvindes fra, og pumpes ud af det pågældende magasin /7/. Det grundvandsdannende opland er per definition en del af det fuldt udviklede indvindingsopland. Når det afrapporteres, bør det grundvandsdannende opland derfor ses indeholdt i det fuldt udviklet indvindingsopland.

Metoderne til beregning af grundvandsdannende oplande er gennemgået i Geo-Vejledning XX /1/. Som regel, beregnes de grundvandsdannede oplande enten med forward eller backward partikeltracking.

I afrapporteringen skal de fuldt udviklede grundvandsdannende oplande repræsenteres ved simpel afbildning af partiklernes placering på terræn, der hvor de infiltrerer. Det betyder, at der ikke skal optegnes en polygon omkring partiklerne for det grundvandsdannende opland. De fuldt udviklede grundvandsdannende oplande skal præsenteres. Partiklerne skal tematiseres efter beregnet transporttid. Dette er vigtigt for at indikere, hvor længe vandet er om at nå fra terræn/det øvre vandspejl til en indvindingsboring. Selvom der kan være usikkerheder på beregnede transporttider, kan de relative transporttider (områder med længere transporttid, områder med kortere transporttid) være troværdige. Det anbefales, at grundvandsdannende oplande præsenteres som en del af vandværksbeskrivelserne i afrapporteringen af grundvandskortlægningen.

5.7 Indvindingsoplande iht. jordforureningsloven ved påvirkning fra afværgepumpning.

Prioritering af den offentlige oprydningssindsats er regionernes ansvar. Regionerne prioriterer deres offentlige oprydningssindsats i forhold til drikkevandsressourcen inden for indvindingsoplande til almene vandværker og OSD. En foranstaltning for at undgå forurening af drikkevandsressourcen kan være etablering af afværgeforanstaltninger. Når regionen etablerer en afværgepumpning der påvirker et indvindingsopland til et alment vandværk, som en del af den offentlige oprydningssindsats, indgår den i den hydrologiske model. Ved en modelkørsel danner afværgboringen sit eget indvindingsopland, hvorved boringen ikke længere vil være indeholdt i vandværkets indvindingsopland. For at undgå at regionerne ikke har hjemmel til at opretholde afværgepumpningen, når den efter en modelkørsel ligger uden for vandværkets indvindingsopland, vil der fremover afgrænses indvindingsoplande iht. jordforureningsloven. Indvindingsoplande iht. jordforureningsloven optegnes som fællesmængden af indvindingsoplandet hhv. påvirket og ikke påvirket af afværgepumpninger. Der skal derved laves en modelkørsel, hvor afværgepumpningerne er slukket og en modelkørsel, hvor afværgepumpningerne er tændte. Indvindingsoplandene benævnes "indvindingsoplande iht. jordforureningsloven" i det de udelukkende anvendes i forbindelse med jordforureningsloven og de tilhørende bekendtgørelser. Oplandene udstilles på Danmarks Arealinformation, Danmarks Miljøportal.

Indvindingsoplande iht. jordforureningsloven er kun aktuelle for indvindingsoplande, der ligger uden for OSD. Det er kun relativt permanente afværgeboringer, der medtages og ikke private afværgepumpninger, der kan slukkes for fra dag til dag, fx vandværker med mindre

kortvarige afværgepumpninger, som er en del af indvindingstilladelsen. Der skelnes ikke mellem ejerskab.

5.8 Scenarier

Scenarierne udarbejdes efter at modellen er stillet op og kallibreret.

Reference opland (kørsel med tilladelse)

Afværge scenarie

Stokastisk (kan opgave)

Klima/nettonedbør (f.eks. +/- 25 %)

Indvindingstilladelse (f.eks. +/- 25 %)

Porøsitet (min/max)

Alternativ geologi i mindre områder

5.9 Afrapportering

Afrapportering af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande i rapporten for den hydrologisk model skal inkludere et kort der viser:

- Fuldt udviklede indvindingsoplande, repræsenteret ved partikelplaceringer eller partikelbaner. Kortet skal være tematiseret efter transporttid. Fuldt udviklet oplande behøver ikke at afgrænses med en polygon.Scenarier
- Administrative indvindingsoplande, optegnet som polygoner.
- Geologiske profilsnit med partikler/partikelbaner

Gisfiler der skal afleveres:

- Partikelbaner/transporttider – fra 0 til fuldt udviklet opland.
- 200 års kørsel med cellestørrelse buffer (oftest 100 m)
- Boringer (aktive, medtaget i oplandsberegningen)
- Administrative indvindingsoplande
- Endpoints/partikler til grundvandsdannende opland.

6. Referencer

- /1/ GEUS, 2016. Geo-Vejledning nr. 2017/1 – Hydrologisk geovejledning. God praksis i hydrologisk modellering.
- /2/ Naturstyrelsen, 2014. Notat: Præcisering af anbefalinger i Geo-Vejledning 2 mht. afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Oktober 2014.
- /3/ GEUS, 2008. Geo-Vejledning 2, Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende opland (Del 1). November 2008.
- /4/ GEUS, 2010. Geo-Vejledning 7, God praksis i hydrologisk modellering. ISBN web: 978-87-7871-281-3.
- /5/ Freeze, R. og Cherry, J., 1979. Groundwater. Prentice-Hall International, London. ISBN 0-13-365312-9.
- /6/ Notat fra Naturstyrelsen, 2014. "Nitratsårbarhed og afgrænsning af NFI og IO".
- /7/ Sonnenborg, T.O. og Henriksen, H.J., 2005. Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS, 2005.

/8/ GEUS, 2008. Geo-Vejledning 3, Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. ISBN web: 978-87-7871-228-8.

UDKAST

Bilag 1 – Forskel mellem magasinspecifik grundvandsdannelse og vandudveksling mellem modellag

Dette bilag indeholder en kort beskrivelse af forskellen mellem modelberegnet magasinspecifik grundvandsdannelse og vandudveksling mellem et bestemt grundvandsmagasin og et overliggende modellag (dvs. grundvandsdannelsen ved top af et magasinmodellag). Desuden forklares årsagen til, at det er vigtigt at kende forskel på betydningen af de to betegnelser.

Beregninger af grundvandsdannelse bruges direkte ved afgrænsning af nitratfølsomme indvindingsområder (NFI). Arealer på overfladen, hvor der ikke sker grundvandsdannelse til indvindingsmagasinet, afgrænses ikke som NFI. For at identificere de områder, hvor indsats bør implementeres for at beskytte grundvandet, er det derfor vigtigt at beregne hvor grundvandsdannelsen fra terræn/øverste vandspejl til indvindingsmagasinet sker.

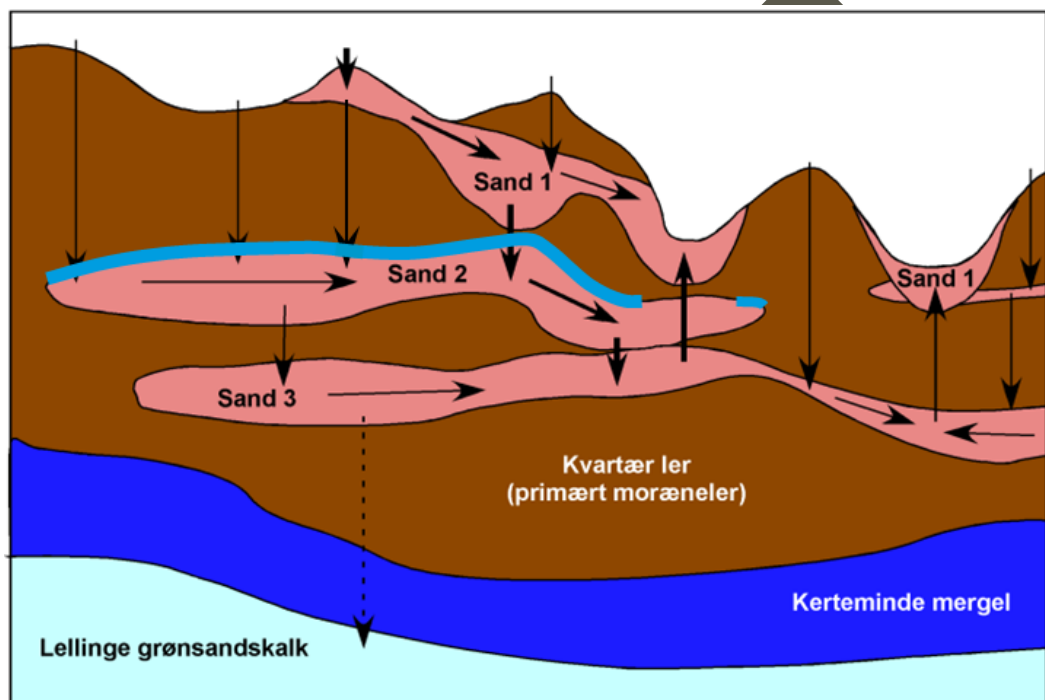
I afrapportering af modelresultater præsenteres ofte et kort over vandudveksling mellem hvert grundvandsmagasin og det overliggende lag. Dette er ofte præsenteret som "grundvandsdannelse til magasin" i modelrapporter, men kortene viser faktisk hvor meget vand der udveksles mellem magasinet og det overliggende lag. Grundvandet strømmer både vertikalt og horisontalt mellem lagene i undergrunden, og dette resulterer i en 3D strømning. Dermed kan der være stor geografisk forskel mellem hvor grundvandet dannes ved terræn/øverste grundvandsspejl og hvor vandet strømmer ned i magasinet fra de overliggende lag.

Når magasinets sårbarhed overfor forureninger fra terrænet, inklusive afgrænsning af NFI, vurderes, er det vigtigt at belyse, hvor vandet, der når magasinet, blev dannet ved terræn/øverste grundvandsspejl og hvilken vej det strømmer igennem jordlagene indtil det når indvindingsmagasinet.

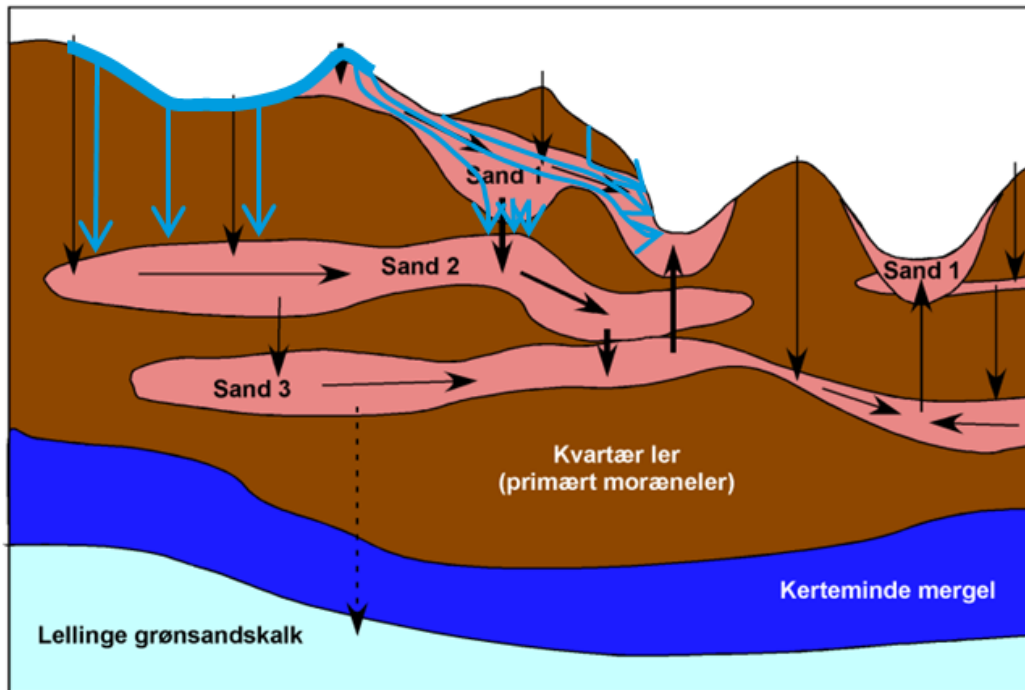
I figur 1 og 2 er vist principskitser, der illustrerer forskellen mellem grundvandsdannelsen fra terræn til magasin, og vandudveksling mellem et grundvandsmagasin og et overliggende modellag (grundvandsdannelsen ved top af magasin). I figur 1 viser de sorte pile vandets generelle strømning mellem lagene i modellen. Hvor pilene er nedadrettede strømmer vandet ind i magasinet fra det overliggende lag, og hvor pilene er opadrettede, strømmer vand ud af magasinets top. Den tykke lyseblå streg i figur 1 viser områder hvor der strømmer vand til top af Sand 2-magasinet fra overliggende lerlag. På figur 2 er der tilføjet blå pile på principskitser, som viser vandets strømningsvej fra terræn. Her kan man se, at ikke alt vand, der dannes til Sand 1-magasinet, strømmer videre til Sand 2-magasinet, idet noget ender med at strømme ud på terræn igen. Den tykke lyseblå streg på terrænoverfladen viser det område hvor grundvandsdannelsen ved terræn ender i Sand 2-magasinet. Når man sammenligner figur 2 med figur 1 ses det, at der er markant forskel på beliggenheden af det område, hvor der sker strømning til Sand 2-magasinet fra det overliggende lerlag (grundvandsdannelse ved top af magasin) (figur 1), og det område, hvor der sker grundvandsdannelse fra terrænet til Sand 2 (figur 2).

Figur 3 viser et eksempel på et område, hvor ved terræner opadrettet gradient på netop sammen sted, hvor der er ved top af et magasin i Roskilde Kortlægningsområde sker til-

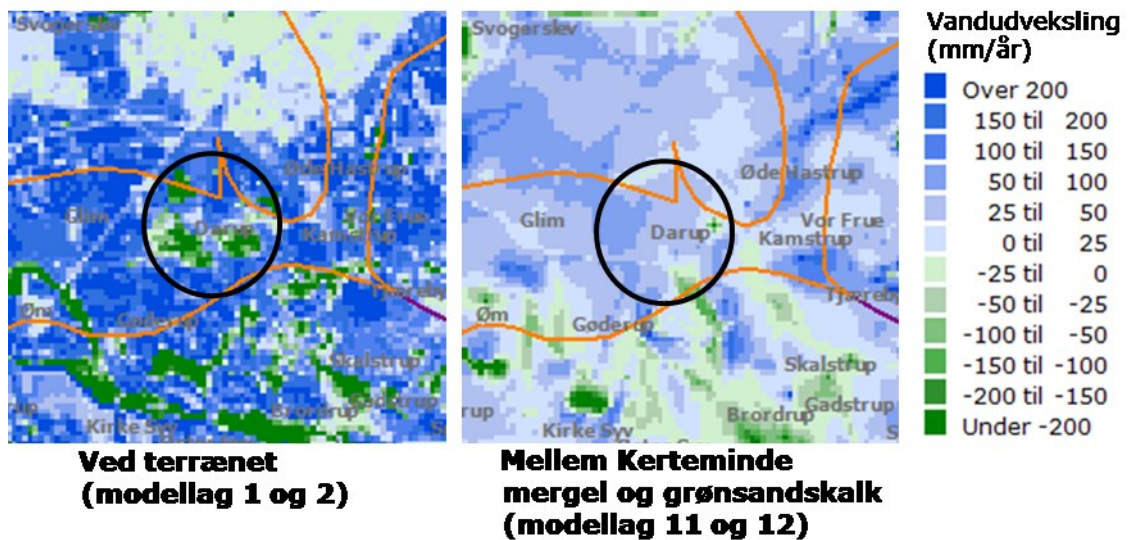
strømning (nedadrettet grundvandsdannelse). Det venstre kort viser vandudvekslingen mellem modellag 1 og 2 (som i princippet er grundvandsdannelsen ved terræn), og det højre kort viser vandudvekslingen mellem modellag 11 og 12 (kalkmagasinet og det overliggende lerlag). I området omkring Darup, som er markeret med en sort cirkel, kan man se tre områder, hvor der er opadrettet gradient ved terræn (grøn farve), netop i et område, hvor der er ved top af magasin sker tilstrømning til indvindingsmagasinet fra det overliggende lerlag. Hvis korttemaet med vandudveksling mellem lag 11 og 12 var brugt som kort over grundvandsdannelse ved afgrænsning af NFI, ville der være en risiko for, at man vil afgrænse NFI i et område, hvor der reelt er opadrettet gradient ved terræn, og dermed ikke kan ske infiltration af vand og forurenende stoffer ved terræn.



Figur 1. Principskitse af vandudveksling mellem lagene i en hydrologisk model (grundvandsdannelse ved top af magasin). De sorte pile viser de relative vertikale gradientforhold. De tykke lyseblå streger viser områder, hvor der er positiv (nedadrettet) vandudveksling mellem Sand 2 og det overliggende lag (moræneler).



Figur 2. Strømningsvej gennem lagene, beregnet ved partikelbanesimulering med en grundvandsmodel. De blå pile viser strømningsbaner fra terrænet til Sand 2 magasinet eller afstrømning til overfladen. Den tykke lyseblå streg ved terrænet viser det område, hvor der sker grundvandsdannelse fra terrænet til Sand 2-magasinet.



Figur 3. Grundvandsdannelse/vandudveksling ved terrænet (venstre) og mellem Kerteminde mergel og grønsandskalk (højre) i et område i den sydlige del af Roskilde Kortlægningsområde. Til venstre er det således vandudveksling mellem modellag 1 og modellag 2, og til højre vandudvekslingen mellem modellag 11 og modellag 12. Blå farver viser nedadrettet vandudveksling og grønne farver viser opadrettet vandudveksling. Området omkring Darup er markeret med en sort cirkel – jf. teksten for forklaring. Beregninger er fra Lejre Vest, Osted og Roskilde hydrologiske model.