

Kapitel 10 DYNAMISK MODEL

Hans Jørgen Henriksen
Hydrologisk afdeling, GEUS

Nøglebegreber: Rodzonemodul, umættet zone, overfladisk afstrømning, vandløbsafstrømning, kobling, integreret modellering, transient grundvandsmodel, nettonedbør og overflade modelstruktur, Daisy GIS, MIKE SHE, MODHMS

ABSTRACT: Dynamiske 3D grundvandsmodeller kræver i forhold til stationære modeller indbygning af overflademoduler og der findes forskellige eksempler og ambitionsniveauer for transiente grundvands-overflademodeller, med forskellige valg af overflade modelstruktur og kobling mellem grundvand og overfladevand. I kapitlet præsenteres en oversigt over fire hovedtyper (type 1-4). To af disse typer (type 1: transient grundvandsmodel og type 3: distribueret grundvands-overfladevandsmodel) beskrives nærmere med henblik på modellering af input til grundvandsmodellen. Den største fordel ved den dynamiske model er muligheden for en bedre kalibrering og validering af modellen med udnyttelsen af vandbalancedata (pejletidsserier og afstrømningsdata). Kapitlet afsluttes med forslag til hvornår der kan anvendes stationær model og dynamisk model i forbindelse med forskellige modelsimuleringer.

10.1 INDLEDNING

Opdraget til nærværende kapitel kan kort beskrives som følger: ”*Foruden guidelines i hvorledes dynamisk simulering skal foretages, skal kapitlet beskrive værdien af dynamisk simulering i forhold til stationær simulering, og give anbefalinger for hvornår der bør anvendes dynamisk frem for stationær model. Ligeledes skal der fokuseres på anbefalinger for den tidlige diskretisering for forskellige modelopgaver*” (referat fra møde i følgegruppen for videregående grundvandsmodelkursus).

Vi har mulighed for at fodre den dynamiske model med daglig nedbør, temperatur og potentiel fordampning og tilmed undersøge hvor godt modellen beskriver f.eks. kontinuerlige eller månedlige pejlinger og f.eks. daglige vandføringer. Noget sådant kan vi ikke gøre med en stationær model. Det betyder at værdien af den dynamiske model primært er knyttet til den bedre mulighed for udnyttelse af alle de data der foreligger for systemet uden processering af f.eks. midlede værdier.

Centralt i den forbindelse er muligheden for at validere modellen f.eks. ved split-sample test, hvor perioden opdeles i en kalibrerings- og en valideringsperiode, og det således kan dokumenteres hvilken troværdighed den kalibrerede model har. Det er ikke i tilnærmelsesvis samme grad muligt at validere en stationær model, ja mange forskere og praktikere vil nok mene, at det kan være ret tvivlsomt om en stationær model overhovedet vil kunne valideres. Så værdien af en dynamisk model er for det første en mulighed for validering. At vi så tit vælger at lave nogle stationære simuleringer (fordi det er en tilstrækkelig god tilnærmelse) af f.eks. grundvandsdannelse eller indvindingsoplande (partikelbaner) baseret på en stationær version (af den kvalitetssikrede og validerede dynamiske model) er en anden sag.

10.2 KATEGORISERING AF MODELTYPER

Guidelines i dynamisk simulering omhandler her grundvands-overfladevandsmodellering. Udgangspunktet kan være alt lige fra: (0) en stationær grundvandsmodel, (1) en transient grundvandsmodel med simple randbetingelser på overfladen (fx månedlig input af grundvandsdannelse,

dræn / river randbetingelser), (2) en dynamisk, distribueret model for overfladevandssystemet med en forenklet beskrivelse af grundvandssystemet (lineært reservoir), (3) en dynamisk 3D model af grundvandssystemet, med en forenklet beskrivelse af overfladevandssystemet (forsimpleret modelstruktur f.eks. rodzonemodul, og jf. MODFLOW stream randbetingelse eller løs kobling af Daisy/MIKE SHE) samt endelig (4) en fuldt koblet og fysisk baseret rumligt distribueret overfladevands-grundvandsmodel, se tabel 10.1.

Tabel 10.1 Hovedtyper på grundvands-overfladevandsmodeller

Hovedtype	Overflade	Grundvand	Kobling
Type 0 Stationær grundvandsmodel	grundvandsdannelse + drain/river/lake	MODFLOW eller MIKE SHE (3D)	Akvifer-river exchange
Type 1 Transient grundvandsmodel, uden overfladekomponent	Grundvandsdannelse + drain/river/lake	MODFLOW eller MIKE SHE (3D)	Akvifer-river exchange
Type 2 Distribueret overfladevandsmodel uden 3D grundvand	NAM/MIKE 11, MIKE SHE	Simpelt lineært magasin	'Lumped' kobling af overflade-grundvand
Type 3 Distribueret overfladevandsmodul incl. 3D grundvand	Daisy, DK rodzone, MIKE SHE/MIKE 11	MIKE SHE eller MODFLOW (3D)	Forskellige grader af koblinger UZ,OC,SZ
Type 4 Overflade-grundvand incl. fuld koblet 3D umættet-mættet	MODHMS og med 2D overland flow	MODFLOW framework	Ligningssystem for UZ-SZ løses samlet

En transient version af den rene grundvandsmodel (type 1) vil primært være relevant i situationer hvor der i forvejen er opstillet en stationær model, og hvor en nærmere validering af denne model er ønskelig. Et væsentligt argument for den dynamiske model er nemlig at man herved får meget bedre mulighed for at vurdere modellens gyldighedsområde, idet det bliver muligt at inddrage årstidsvariationer i input og output i vandbalancen til valideringstests. Der er begrænsede muligheder for at validere en ren stationær model. Herudover er der med en transient grundvandsmodel mulighed for at vurdere tidlige variationer i f.eks. baseflow til vandløb og søer og tidlig udvikling i trykniveau efter ændringer i f.eks. oppumpning. Det kan i visse situationer være relevant for vurdering af klimatiske ændringer eller betydning af årstidsvarierende oppumpninger (f.eks. vanding) på grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande. Vi kommer ind på denne forenkledede modeltype sidst i kapitlet.

Fokus for Håndbog i grundvandsmodellering er ikke forenklinger af grundvandssystemet. Derfor vil type 2 ikke blive beskrevet i nærværende kapitel. Betydning af forskellige modelstrukturvalg for model type 2 kan findes i f.eks. Butts et al. (2004) og Ajami et al. (2004).

Type 3 modellen som består af en flerlagsmodel for grundvandssystemet og en forenklet beskrivelse af overfladevandskomponenterne (f.eks. overfladisk afstrømning, dræn, vandløbsafstrømning, fordampning og nedsivning fra rodzonen), og ikke fuldt koblede processer er ret udbredt i Danmark. Jeg regner alt lige fra DK-modellen til modeller baseret på Daisy, MIKE SHE og MIKE 11 eller specielle versioner af MODFLOW med tilhørende overfladekomponenter som hørende til denne kategori. Ofte er umættet zone ikke medtaget eller blot medtaget meget forenklet. Denne modeltype består typisk af forskellige 'moduler', som er stykket sammen til et integreret modelsystem, og koblingen (eller manglen på sammen) udgør ofte et centralt problem.

Type 4 modellen, som består af en fysisk baseret, rumligt distribueret model med en 3D beskrivelse af såvel umættet zone og mættet zone, koblet med overfladisk strømning (inkl. vandløb), er fortsat under udvikling og afprøvning (Panday and Huyakorn, 2004). Styrken ved dette koncept frem for f.eks. MIKE SHE er primært på det numeriske felt idet ligningerne for umættet zone-mættet zone løses samlet, det vil sige at koblingen mellem UZ og SZ er løst relativt raffineret. Svagheden er, at systemet indtil videre er under udvikling og afprøvning og at der fortsat er begrænsede interface muligheder. En anden svaghed er store CPU tider og fin diskretisering (i x, y, z og tid), hvilket gør metoden mest egnet til lokale problemer. Type 4 vil ikke blive nærmere beskrevet her.

Opstilling af en dynamisk model (type 1 eller 3) åbner på den ene side for nogen processer og parametre, der skal indbygges i modellen, f.eks. drænkonstant, magasinental osv. Dernæst vil den

numeriske løsninger kræve nogle overvejelser vedr. den tidlige diskretisering og initialbetingelser. Der vil også være nogle nye problemstillinger omkring kalibrering og validering. Og endelig er der grund til at overveje, hvordan modellen skal afgrænses i forhold til ferskvandskredsløbet (valg af type 1 eller 3).

Spørgsmålet om input til modellen er her ret afgørende. Skal modellen arbejde ud fra input bestående af nedbør, temperatur og potentiel fordampning? Eller skal der blot benyttes input i form af nettonedbør f.eks. på ugebasis? Skal modellen simulere vandføring og evt. vandstand i overfladevandssystemer, inkl. overfladisk afstrømning, drænastrømning og vandløbsafstrømning, ja så skal vi som minimum have fat i type 3 eller 4. Hvordan disse ting afgrænses og hvilke valg der træffes i praksis hænger primært sammen med formålet med opgaven, det valgte kompleksitetsniveau (basic, intermediær eller comprehensive), kvaliteten af datagrundlaget osv. Her kan type 1 være en attraktiv løsning på et lidt lavere ambitionsniveau f.eks. intermediær model, hvorimod type 3 er nødvendig på det høje ambitionsniveau.

Til bestemmelse af nettonedbøren kan anvendes forskellige metoder f.eks. følgende hovedtyper på overfladekomponent konfigurationer:

- A - MIKE SHE UZ og fordampning (integreret løsning inkl. UZ)
- B - Simple boksmodel for rodzonen (f.eks. DK rodzonemodul, output fra rodzonen routes til SZ eller overlandflow i MIKE SHE)
- C - Daisy GIS (dekoblet løsning men inkl. UZ og dræn)

Type A modellen med fuld integrering af rodzonen, umættet zone, og hvor grundvandsdannelsen beregnes samtidig med, og under indflydelse af grundvandsspejlets beliggenhed, er uden diskussion den mest sofistikerede og mest korrekte løsning på grund af den fulde kobling. MIKE SHE modellen består af en række moduler, der hver især udgør en hydrologisk proces, som alle er koblede, f.eks. ET modulet som beregner fordampningen ud fra oplysninger om potentiel fordampning, vegetation og vandindhold i umættet zone; OC-modulet, som beregner den overfladiske afstrømning; MIKE 11 modulet, som indeholder en vandløbsbeskrivelse; UZ modulet, som beregner forholdene i den umættede grundvandszone; og selve SZ modulet, som beregner strømmingen i mættet zone (i 3D). MIKE SHE har to alternative beregningsmoduler for umættede zone. En "simple" og "Richards ligning". Richards ligning tager hensyn til kapillære kræfter, hvilket betyder, at vand kan stige op og fordampe under tørre perioder. Den "simple" løsning benytter ren gravitationsstrømning. Modellen er ikke udviklet så den kan håndtere f.eks. udvaskning af kvælstof.

Type B modellen er den som anvendes i DK-modellen. Ved hjælp af et relativt simpelt rodzonemodul foretages på daglig basis en beregning af vandindhold i rodzone, fordampning og nedsivning fra rodzonen (inkl. snesmeltning). Outputtet fordeles på baggrund af GIS temaer for befæstede arealer, terrænhældning og lerindhold mellem vand, der ledes til overfladen (overland flow OC) og vand der ledes til grundvandet (SZ) ved hjælp af en såkaldt partitioneringskoefficient på grid-basis (dummy-koefficient), se Henriksen og Sonnenborg (2003) og Plauborg et al. (2002). Modellen opererer med en opdeling i 6 typer: skov, vådområde, landbrug på sand over og under 50 meter, landbrug på ler over og under 50 meter, samt for Jylland desuden 4 typer der beskriver kunstvandede landbrugsafgrøder. Modellen kan ikke håndtere udvaskning af kvælstof. Modellen ser bort fra forsinkelse i umættet zone, men partitioneringen mellem SZ og OC udgør en praktisk effektiv løsning på stor skala.

Type C modellen Daisy er en jord-vegetations-atmosfære-model udviklet til at simulere vandbalance, varmebalance, stofbalance og afgrødeproduktion i jordbrug styret med forskellige managementstrategier. Daisy er en 1D model udviklet og valideret på punkt- og markskala på den Kgl. Veterinær og Landbohøjskole (KVL). DHI har udviklet Daisy GIS, der kombinerer en række zonerede kort, der findes i et givent område. Ved at tilknytte parametre til de zonerede områder, kan der foretages Daisy-beregninger. Modellen kan eksempelvis anvendes til simulering af perkolations til grundvandet. Mængden af nedsivende vand lige over grundvandsspejl eller lige over et eventuelt drænniveau betegnes nettonedbør. Kortgrundlaget og dermed de data der inddrages i Daisy-beregningerne, dækker over jordtyper, arealanvendelse, klima og dræn/grundvandsforhold (Storstrøms amt, 2003). Daisy er ikke koblet til grundvandsmodellen og nedre randbetingelser

fastlægges typisk i kategorier efter middel eller stationære trykniveauer fra tidligere (iterationer) / afviklinger af grundvandsmodelkørsler. Det vil sige at modellens resultater dermed vil afhænge meget af hvordan randbetingelsen (dybden til grundvandsspejlet) specificeres. Der er fortsat en række uløste problemer vedr. den manglende kobling af MIKE SHE og Daisy, som giver problemer med at simulere dynamikken korrekt (f.eks. efterårsafstrømninger). Konceptet er endnu ikke fuldt ud modnet til rutinemæssig anvendelse ved integreret modellering. Dette har specielt vist sig ved standard parametrisering af Daisy på lerede oplande, hvor der er en på oplandsskala hurtig respons ved kraftige nedbørshændelser, som ikke simuleres (fuldt ud) med Daisy. Der er i øvrigt ikke indbygget egentlig 'bypass' rutine i Daisy, i lighed med de 'lumped' rutiner der findes både i MIKE SHE rodzonemodulet og i DK-modellens rodzonemodul.

I litteraturen findes eksempler på tilsvarende overvejelser omkring nødvendighed af at inkorporere den vigtige partitioneringsproblematik for afstrømningsgenerering og grundvandsdannelse (Liang and Xie, 2003) grundet 'rumlig sub grid heterogenitet' i fordeling af nedbør og jordbundsforhold. Mange af de nuværende integrerede modeller tager ikke direkte hensyn til 'sub grid heterogenitetens betydning' på infiltration og grundvandsdannelse. I den gamle version af MIKE SHE UZ var der en mulighed for en 'lumped løsning' med 'bypass flow'. I Daisy er der ikke i øjeblikket tilsvarende mulighed. Der hersker derfor lidt uklarhed om hvordan dette problem i praksis løses, men det er væsentligt specielt når der modelleres på vandområdedistriktniveau, altså større skala at tage behørigt hensyn til betydningen af sådanne processer indenfor de 'store modelgrids'.

På den anden side udgør muligheden for stofmodellering, f.eks. kvælstofudvaskning, nogle anvendelsesmuligheder som type A og B ikke kan dække. Ved valg af Daisy vil det normalt ikke være muligt at beskrive afstrømningen (R^2 værdier) med samme nøjagtighed som type A og B. Der foreligger standardværdier for opsætningen af Daisy (KVL et al., 2003).

Der er en risiko for at flere koblinger, et stort antal UZ søjler, meget detaljerede beregningslag, detaljerede MIKE 11 opsætninger osv. kan resultere i en type 3 model, der er mindre gennemskuelig og i realiteten må siges at være overparameteriseret. Arbejdet med den konceptuelle model kan i så fald risikere at drukne i detaljerigdom og fragmenterede tekniske problemer. Derfor er der en reel udfordring i, at balancere og foretage en kritisk afvejning af, hvad der er optimalt, og så foretage et modelvalg, der både giver optimale betingelser for kalibrering og validering af modellen, og samtidig indeholder så meget procesviden og detaljerigdom, som muligt. Det vil sige at valg af modelstruktur (processer, strukturering af overflademodellen osv.) er centrale forudsætninger i forbindelse med den konceptuelle model og den efterfølgende opsætning og kalibrering/validering.

10.3 INPUTDATA TIL BEREGNING AF GRUNDVANDSDANNELSE

Klimadata

Opgaven er her at vælge enten at basere beregningerne på stationer og f.eks. arealdistribuering jf. Thiesen polygoner eller basere beregningerne på griddata (nedbør f.eks. 10 km, fordampning og temperatur f.eks. 20 km eller nedbør og fordampning f.eks. 40 km jf. DK-model). Dette valg afhænger primært af modelskala og anvendelse af modellen. Det er dog vigtigt at følgende anbefalinger bliver fulgt:

- Inddeling i klimazoner kan baseres på Thiesen polygoner (ud fra faktiske nedbørs- og klimamålestationer) eller på griddata (10 x 10, 20 x 20 og 40 x 40 km) afhængigt af formål for opgaven. Der er fordele og ulemper ved begge dele. Hvis der anvendes input fra 40 x 40 km grid bør man nok, som det er sket med DK-modellen, indbygge en distribuering indenfor det enkelte grid ud fra en højdemodel (hhv. < 50 m og > 50 m i DK model sammenhæng). Grundlag for griddata kan findes på DMI's hjemmeside hvor disse findes rapporteret (www.dmi.dk).
- Anvendelse af retningslinier beskrevet i Plauborg et al. (2002), der beskriver (1) hvordan nedbør bør korrigeres for vind- og befugtelsestab, (2) hvordan potentiel referencefordampning (for kortklippet græs) kan korrigeres til potentiel fordampning for forskellige afgrøder, skov og vådområder og (3) at Makkink fordampning bør anvendes i stedet for modificeret Penman.

- Der pågår fortsat en udvikling af specielt nedbørskorrekationen og spørgsmål vedr. korrektion af fast og flydende nedbør i vinterperioden er endnu ikke dokumenteret fuldt ud. Derfor vil man risikere at overvurdere nedbøren såfremt man benytter standardkorrektionsfaktorer 1961-90 (Allerup et al., 1998), og ikke tager hensyn til temperaturen. Der er i dag ca. 150 klimastationer, og der arbejdes fortsat på en bedre arealdistribuering af et sæt dynamiske nedbørskorrekationer hos DMI. Resultater af dette arbejde bør indarbejdes i modellerne så snart de foreligger.
- DK-modellen vil ofte kunne udgøre en brugbar referenceramme for modeller på mindre skala (Henriksen og Sonnenborg, 2003). Fordelen ved at spejle input til modelopstillinger baseret på type A eller type C i DK-modellens nettonedbør er, at sidstnævnte er 'kalibreret' på baggrund af modelleringen i DK model regi af ferskvandets kredsløb ved sammenholdelse med trykniveau i grundvand og afstrømning til vandløb. Herved er der fastlagt et sæt korrektionsværdier, som nettonedbøren er multipliceret med. Når der foretages modellering for et mindre opland, kan randbetingelser og evt. manglende mulighed for kalibrering og validering af dynamisk model derfor svække vurderingen af nettonedbørsinputtet baseret på Daisy. Selvom den lokale model arbejder med en finere skala, vil det ofte være muligt at sammenholde aggregerede tal med tilsvarende tal fra DK-modellen.

Det anbefales stærkt at foretage en sammenligning af beregnet nettonedbør med en vurdering af forskellige afstrømningskomponenter på deloplandsbasis ved sammenligning af beregnet perkolation med summen af målt afstrømning i vandløb, oppumpning, og grundvandsudstrømning på tværs af topografiske deloplande mm. Såfremt modellen efter endt kalibrering og validering fortsat viser sig at give systematiske misforhold mellem simuleret og målt afstrømning, selv om vandbalancen i øvrigt ser pålidelig ud og de anvendte parameterverdier er indenfor rimeligt realistiske grænser, ja så er den sidste udvej naturligvis at 'justere' inputdata, så modellen producerer et rimeligt vandbalancefit (f.eks. Fbal værdier for vandløbsmålestationer).

På en måde er det befriende og samtidig bekræftende i forhold til brug af modeller, at vandbalancen ikke altid går op, uanset bestræbelserne på at finde passende anbefalinger til nedbørskorrektion eller brug af fordampningsdata (jf. Plauborg et al., 2002). Hvis det derfor, på trods af at anbefalinger har været fulgt til punkt og prikke (brug af håndtal for nedbørskorrektion på landsplan for 1961-90, brug af Makkink fordampning og brug af vegetationsafhængige afgrødekoefficienter for landbrugsafgrøder på ca. 1,1 og værdier for skov og vådområder på ca. 1,2), fortsat viser sig at være en fejl på vandbalancen f.eks. udtrykt ved at modellen simulerer 10 % for meget afstrømning (eller mere), så anbefales det som en sidste udvej at multiplicere nettonedbøren med en korrektionsfaktor (f.eks. 0,9 hvis der simuleres 10 % for meget), men så i øvrigt at rapportere dette misforhold, så problemet kan kommunikeres videre til beslutningstagerne og ansvarlige myndigheder. Der er et helt klart behov for videnopbygning, forskning og overvågning af vandbalancen, og der er et fortsat behov for fokus på konsistens af de forskellige inddata, der indgår i vandbalancen. Derfor må vi fortsat leve med alvorlige fejl i vandbalancen, men det er således legitimt at justere inputtet blot der foreligger en rimelig troværdig hydrologisk model, der kan bidrage til at understøtte brugen af denne nødløsning. Historiske variationer i nedbør og fordampning og resultater fra DK-model kan findes i Ferskvandets Kredsløb (www.vandmodel.dk), se Henriksen og Sonnenborg (2003).

I den nyere litteratur findes der eksempler på test af, hvordan nedbørsdata baseret på 'next generation radar network' (NEXRAD, 4x4 km) har betydning for kalibrering og validering af den hydrologiske model (Butts et al., 2004; Ajami et al., 2004; Guo et al., 2004). Resultaterne er dog ikke entydige, men tyder foreløbig på at det ikke uden videre giver bedre performance (valideringstests) med mere forfinet modelstruktur, hvorimod kalibreringsresultatet ser ud til at blive forbedret specielt for afstrømningen fra oplandet. Det kunne tyde på det forømtalte problem med overparameterisering, således at flere detaljer i overflade modelstrukturen bør afvejes i forhold til den praktiske mulighed for kalibrering og validering af modellen (det vil sige grundlaget i form af kvalificerede observationsdata).

Ajami et al. (2004) sammenlignede resultater af en 'lumped' model og en 'semi distribueret' overfladevandsmodel (type 2) og fandt at introduktionen af mere overflade modelkompleksitet

(NEXRAD radarnedbør, routningsskema og distribuering) gav større usikkerhed på modellen. Slutbudskabet var følgende: *Use of semi-distributed models is preferred because it can provide information about flow condition at interior points of a basin. However, the resulting improvement in simulation capability at the outlet, compared to the lumped model is not yet significant to justify adoption of semi-distributed model.* Konklusionen er derfor, at der er behov for flere tests af radar-baserede nedbørsdata før sådanne evt. vil kunne forbedre nedbørsinputtet til hydrologiske modeller. I Danmark, hvor der er et stort antal målestationer og griddata fra DMI, kan data herfra anbefales. Ovenstående erfaringer fra type 2 modeller er ikke fuldt ud tilstrækkelige til nogen konklusion, fordi det er velkendt at interaktionen mellem grundvand og overfladevand har stor betydning for generering af afstrømning og dynamik i vandløbsafstrømning.

Jordtyper

Datagrundlaget for jordtyper og fordeling af disse er:

- Teksturdata fra DJF teksturdatabase
- Jordartskort 1:200.000 eller 1:25.000 afhængigt af modelskala
- 'Danske jordbundsprofiler', Sundberg, P.S. (1999)
- Jordbunden i landskabet, Granat (2000)

Der arbejdes normalt med 3 horisonter i hver jordtype: en overjord (A horisont), en underjord (B horisont) og udgangsmaterialet (C horisont). Der skal foretages en gruppering i et antal jordtyper for hver horisont, som samlet giver et begrænset antal søjler.

Arealanvendelse

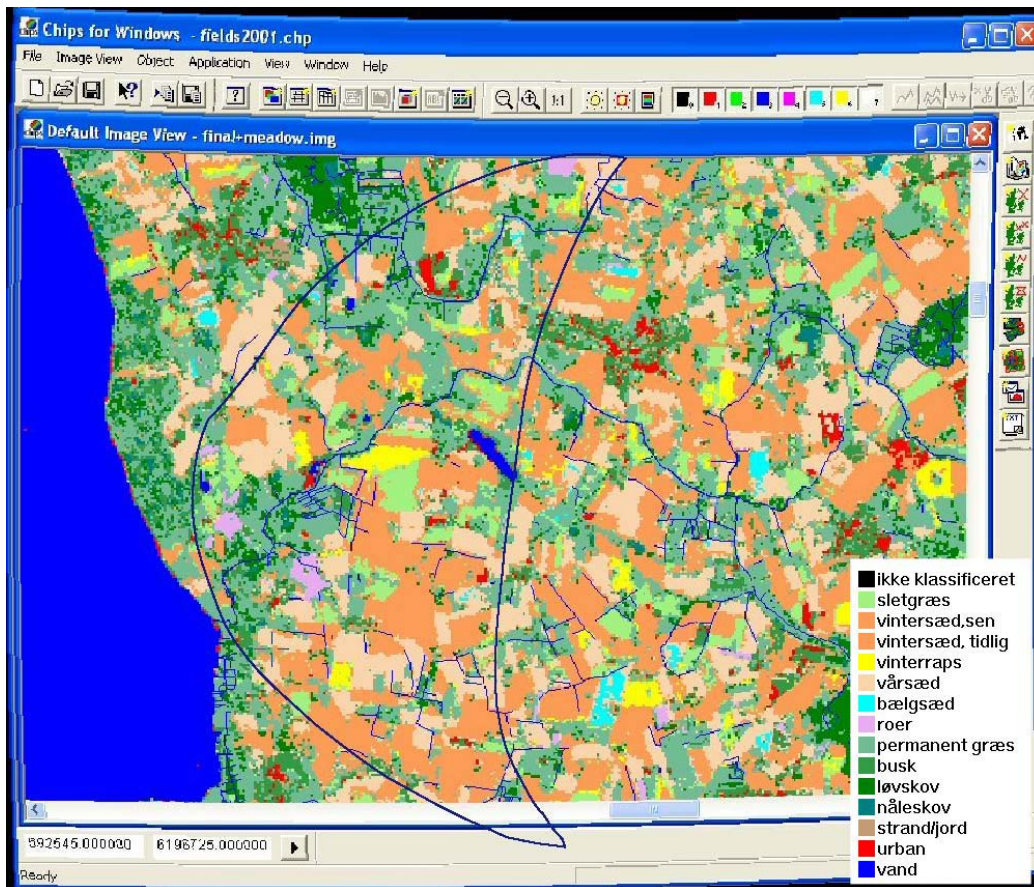
Datagrundlaget for arealanvendelse og fordeling af vegetationer og afgrøder kan f.eks. være:

- Blokkort (med GLR udtræk)
- AIS kort
- Satellitdata (se nedenfor)

Anvendelse af remote sensing data

Satellitbilleder kan indgå til modellering af vandbalancen. Der er en årlig variation i anvendelsen af arealer, som kan kortlægges ved hjælp af satellitdata, og indgå i opsætning af en vandbalancemodel, f.eks. til en løbende justering af input til modelberegninger (Bøgh et al., 2003). Når solens stråler rammer jordoverfladen vil en del af strålingen reflekteres. Denne del registreres af satellitbaserede sensorer der måler mængden af reflekteret stråling i separate spektrale intervaller, f.eks. måles ofte i blå, grønne, røde og nær-infrarøde spektrale kanaler. Da den spektrale refleksion er forskellig for forskellige overfladetyper, kan disse data bruges til kortlægning af arealanvendelsen på jordoverfladen. En god klassificering kræver 3-4 skyfrie observationer gennem vækstsæsonen. En sidegevinst ved at anvende jordobservationer til arealanvendelseskortlægning (se figur 10.1) er, at man kan bruge de samme observationer til at bestemme vigtige agro-hydrologiske parametre, som f.eks. bladarealindeks (LAI). Planterne har en karakteristisk stor refleksion af nær-infrarød stråling og en lille refleksion af rødt lys, der er fotosyntetisk aktiv stråling. Disse egenskaber udnyttes til beregning af en såkaldt vegetationsindeks, som er eksponentielt relateret til bladarealindekset (Bøgh et al., 2003).

Remote sensing billeder af vegetationsindex /LAI muliggør ved en kombination med modellen et yderligere (uafhængigt) input, som kan indgå til identifikation af usikkerheder på modellen og simuleringer af vandløbspåvirkninger / samspil med ånære områder som følge af vandindvinding.



Figur 10.1 Eksempler på anvendelse af remote sensing data. Tolkning af arealanvendelse for 2001 ud fra Landsat TM 30m. Kilde: Eva Bøgh, RUC. Havelse kildeplads's opland er vist samt et vandløbstema fra AIS.

Til bestemmelse af f.eks. oversvømmede områder, fordampning, vegetationsdække og arealanvendelse er data fra satellitterne ASTER (15 m grid), Landsat TM og Landsat 7 (30 m grid) samt fra EOS/MODIS (250, 500 og 1000 m grid) mest interessante. Landsat satellitterne passerer DK hver uge, mens EOS/MODIS har daglige passager. Vi kan forvente at få ca. 3 – 5 skyfri Landsat scener om året (prisen er ca. 5-7000 kr.) og 1-3 ASTER scener (pris ca. 500 kr.). Skyfri MODIS data kan leveres hver 14. dag (gratis). Landsat data fås 20-30 år tilbage i tiden (til reduceret pris) mens ASTER og MODIS data er tilgængelige for de sidste 4-5 år.

I forbindelse med et jordobservationsprojekt (Dansk forskningsprojekt) har Daisy GIS modellen været anvendt til en detaljeret beregning af den aktuelle fordampning fra jord og planter på time basis (van der Keur et al., 2001). Transpirationen beregnes ved Penman-Montieth metoden, hvorimod jordfordampningen beregnes som en funktion af potentiel jordfordampning og jordhydrauliske parametre på basis af Richards ligning. Bladarealindekset er en vigtig faktor for beregning af fordampningen, fordi det udtrykker det overfladeareal, hvorigennem transpirationen foregår. Kendskabet hertil er specielt vigtigt, når vegetationen ikke dækker jorden fuldstændigt, da fordampningen fra jord og planter kan være meget forskellig (Bøgh et al., 2003).

Information om landbrugsarealanvendelsen muliggør således simulering af en række temaer, som er værdifulde for en bedre dokumenteret hydrologisk overflademodel f.eks. vegetationsudvikling (LAI), afgrødeproduktion (høstudbytte som også kan indgå i validering af Daisy). De foreløbige resultater viser en tendens til at fordampningen stiger, og at model nøjagtigheden forbedres, når satellitdata anvendes til justering af modelberegningerne (i stedet for brug af Daisy GIS standard opsætning), og det kan måske være en medvirkende forklaring til, at der ofte er problemer med 'for meget vand' i de Daisy GIS opsætninger, der har været lavet forskellige steder i landet. En alternativ hypotese til problemet med nedbørskorrektion (specielt fast nedbør i perioder uden frost), kunne derfor være, at fordampningen ikke i tilstrækkeligt omfang beskrives korrekt ved brug af standard parametre til Daisy, eller fordi de områder, hvorfra der reelt foregår potentiel fordampning året rundt, ikke er medtaget i tilstrækkeligt omfang i modelopsætningen.

Randbetingelser til rodzone / umættet zone model

Hvis man anvender MIKE SHE (type 3A eller type 3B) er der en kobling mellem rodzonomodulet og grundvandsmodellen, således at det ikke er nødvendigt at specificere egentlige randbetingelser.

For at bestemme randbetingelser for Daisy søjler (type 3C) kræves imidlertid kendskab til potentiale for det øverste grundvand. Ofte må man basere disse parametre på skøn. Der vil så fremkomme et antal randbetingelsestyper med hhv. fri dræning, dræn, og forskellige dybder til grundvandsspejlet, hvis man kører Daisy GIS.

Data for nettonedbør, jordtype, arealanvendelse og randbetingelser klassificeres og kombineres indbyrdes til at give et antal unikke kombinationer, som der f.eks. foretages Daisy beregninger af (type C). Studier med Daisy GIS har vist, at dybden, hvorfra resultater udtrækkes og overføres til grundvandsmodellen, bør vælges med omhu, se boks 1.

Boks 10.1 Eksempel Lollandsmodel (Storstrøms amt, 2003).

Nettonedbøren, perkolationen til grundvandszonen lige over grundvandsspejl eller dræn niveau, blev beregnet for området Lolland i årene 1980 til 2001. Der blev foretaget beregninger i polygoner specificeret ud fra AIS data, som i landbrugsarealer var blevet opdelt efter blokkort. Informationer om vegetationer per arealanvendelsespolygon var blevet kombinerede med data for klima, jordtyper og drænforhold. Tilsammen blev der fundet 1040 kombinationer, som blev kombineret til yderligere at give resultater for hver af de 23.308 polygoner.

På markerne blev holdt et simpelt sædskifte, med den samme afgrøde år for år. Beregningen af vandstrømningen var mindre følsom overfor afgrøderotationer, blot den rette fordeling af afgrøder for et område var korrekt, hvilket blev opnået ved at anvende GLR (Generelle LandbrugsRegister) data for år 1998. Jordprofiler blev opdelt i fire typer – leret, sandet, marint sand og humus. Datagrundlaget til parameterisering af jordtyperne var GEUSs jordartskort 1:200.000 og DJFs tekstur-data. Ved anvendelse af 3 horisonter var det endvidere ikke muligt at kalibrere parametrene i de enkelte jordsøjler uden jordfugtighedsmålinger, lysimetermålinger eller anden måling af den umættede zone. Til randbetingelser blev anvendt dræn på lerede landbrugsjorde og i øvrigt dybden til grundvandsspejlet. Et etableret potentialekort var noget usikkert, og der var derfor behov for kontrol og justering af dybder, når grundvandsmodellen forelå.

I forbindelse med kalibreringen af grundvandsmodellen og vandbalancen blev der foretaget en genberegning af Daisy nettonedbøren der omfattede følgende tiltag:

- Randbetingelsen for det marine sand i oplandet til Kramnitse pumpestation på Sydlolland blev hævet fra 100 cm til 75 cm dybde, ud fra et argument om at terrænkoten i området stort set er beliggende under havniveau, og at potentialet ligger over terrænen i området.
- I de sandjorde, hvor sand var indført på jordartskortets morænelersområder på baggrund af tekstur data i A-horisonten blev randen ændret til 100 cm.
- I søjler med leret jord og fast rand reduceredes den maksimalt tilladelige dybde til randen fra 125 cm til 100 cm.
- I områder hvor potentialekort viste tryk over terrænen blev der indført en nedre trykrand.
- Randen til kolonner karakteriseret som "vandhuller" blev justeret til 35 cm.

Ud af de i alt 23.308 polygoner var der herefter kun 581 polygoner, hvor den nedre rand var fastholdt dybere end 175 cm, heraf 90 % på sandede jorde. En følsomhedsanalyse med vinterhvede på sandjord, viste i øvrigt at betydningen af nedre rand dybere end 175 cm var relativt ubetydelig, nemlig 3 mm pr år. For at mindske antallet af Daisy søjler, og dermed beregningstiden, ændredes randen for disse søjler til 175 cm.

Sigtet med fordampningsberegningerne er at få vandbalancen til at stemme, og derfor er det vigtigt, at al fordampningen via rødder foregår over udtræksdybden, hvilket svarer til, at vandet trækkes ud under max. tilladte roddebyde i Daisy (max rooting depth). Omvendt bør man ikke blot vælge at trække resultaterne ud i bunden af de specificerede søjler (typisk 3 meters dybde), hvis randbetingelserne i form af dræn eller fast grundvandspejl ligger tættere på overfladen. Herved begås en fejl i timingen for overførelse af vand til grundvandsmodellen. Udtræksdybderne bør vælges uafhængig af anvendte randbetingelser.

Konceptet er, at Daisy anvendes til fordampningsberegningerne, og grundvandvandringsmodellen beregner alle vandstrømninger, også drænastrømningen. Drænen i Daisy skal således blot opfattes som en af mange typer randbetingelser. Det skal bemærkes, at koblingen mellem Daisy og grundvandszonen er envejs, hvilket betyder, at f.eks. ændringer i grundvandsspejlets beliggenhed ikke umiddelbart påvirker resultaterne fra Daisy (Storstrøms amt, 2003).

Boks 10.2 Eksempel Norddjursland (Århus amt, 2002).

På basis af i alt 2 klimazoner, 4 jordtyper, 6 arealanvendelser + 2 skovtyper i 2 klimazoner og 2 søområder (i alt 54 kombinationer), blev der foretaget beregninger af nettonedbøren i modelområdet ved Daisy modellen. For hver af de 54 kombinationer (roddebyde, jordtype, klima, nedbør) blev nedsivning, fordampning, vandingsmængde og drænastrømning beregnet. Den arealvægtede infiltration i modelområdet blev beregnet til 287 mm. Især kombinationen af grov- og lerblandet sand med landbrug i klimazone 2 vægtede meget med 20 % arealet. I forhold til tidligere undersøgelser af infiltrationen i området var den nye nedsivningsmængde ca. 10 % lavere end tidligere vurderet.

Boks 10.3 Eksempel Tude å (Vestsjællands amt, 2003).

Nettonedbøren blev bestemt i MIKE SHE af beregningsmodulerne for umættet zone og fordampning. Dette krævede definition af jordbundskarakteristik, drænforhold og arealanvendelse (vegetation) samt input i form af meteorologiske data. De meteorologiske data, der blev anvendt, bestod af daglige værdier for nedbør, temperatur og potentiel fordampning. Værdierne blev angivet som døgnmiddel og blev defineret for perioden 1988-2000. Nedbørsdata blev hentet fra 11 nedbørsstationer, som var jævnt fordelt i modelområdet. I modellen fordeltes nedbøren arealmæssigt ved Thiessen polygoner. Data var korrigerede for vindeffekt og wettingtab med landsdækkende standardværdier. Daglige værdier for temperatur og potentiel fordampning forelå fra 20 km grid og dels fra en klimastation (Flakkebjerg). I modellen blev data fordelt efter 5 klimagrid, som lå inden for området. For årene 1988 og 1989 (hvor klimagrid ikke forelå), anvendtes stationen ved Flakkebjerg. De indhentede data for potentiel fordampning bestemt ved Makkink metoden som en referencefordampning, blev korrigeret afhængigt af arealanvendelsen.

Der blev defineret en overordnet arealanvendelse, som blev opdelt på fire typer: landbrug – overvejende korn, skov, vådområder og byområder. For hver af disse typer blev der defineret en vegetation, som indgik i beregningen af den aktuelle fordampning. Vandtransporten i den umættede zone blev bestemt af de hydrauliske parametre i den øverste del af jordprofilen. Modelområdet var opdelt ved at kombinere jordtype-/bonitetskort, der beskriver de øverste ca. 0,2 m af jordprofilen, med jordartskortene, der beskriver jordlagene fra under muldlaget til 1 m's dybde samt med kort over dybden til den kalkfrie zone.

Ved at kombinere disse kort fremkom en række jordprofiler, som blev tilknyttet hydrauliske parametre i form af retentionskurver og funktioner for den umættede hydrauliske ledningsevne. De hydrauliske parametre blev fastlagt vha. målte værdier for retention og hydraulisk ledningsevne for danske jorde.

Det viste sig i øvrigt at anvendelsen af den simple UZ løsning gav væsentlig forskellig (større) nettonedbør i forhold til den fulde Richards' ligning (forskul ca. 50 mm/år), hvis man blot benyttede samme parameterværdier.

10.4 INTEGRERET MODELLERING

Integreret modellering omfatter flere domæner f.eks. rodzonen/umættet zone, grundvand og overfladevandssystemet, inkl. en rimelig kobling mellem de tre domæner. Der kan være behov for endnu flere domæner koblet på f.eks. økologiske modeller eller socioøkonomiske vurderinger. Kravene til sådanne dynamiske modeller der som minimum giver mulighed for modellering af hele ferskvandskredsløbet er følgende (Middlemis, 2004):

- 3D grundvandsstrømning med eller uden umættet zone, men med en detaljeret beskrivelse af 2-vejs udveksling mellem grundvand og overfladevand, fordampning, drænaftstrømning, grundvandsdannelse, indvindinger etc.
- 1D åben kanalstrømning og to-vejs udveksling med grundvand og umættet zone, helst med dynamisk vandstand-areal-volumen-lækage for vandløb, magasiner og vådområder, og specifik repræsentation af vandløb/vådområder geometri, modellering af kontinuerlig nedbørafstrømnings processer, dynamisk model og hydrauliske strukturer mm.
- detaljeret og præcis vandbalance analyse
- veldokumenteret validering af koden, og rimelig opsætnings- og kørselstider
- grafisk brugerinterface for præ- og postprocessing, helst med et godt GIS interface

Reviews af forskellige modelkoder (CDM, 2001; SFVMD, 2002) har vist at MIKE SHE systemet bedømt ud fra ovenstående kriterier i dag anses for det mest omfattende softwaresystem for fysisk baseret, rumligt distribueret, integreret modellering, med excellence i databehandling og visualisering, og en række praktiske efterprøvninger i forbindelse med integrerede modelstudier. MIKE SHE følges af MODHMS, der er MODFLOW baseret, men med begrænsninger i beskrivelsen af nedbørafstrømning (f.eks. på daglig basis) og med begrænsninger i beskrivelsen af overfladevandskomponenter på catchmentskala.

Integrerede modeller vil typisk befinde sig indenfor kategorien 'akvifer simulering' (hi fi) eller 'comprehensive modelling' og typisk svare til type 3 modeller jf. introduktionen i dette kapitel.

Første delen af dette afsnit vil derfor kigge lidt nærmere på guidelines i detaljeret og præcis vandbalance analyse som forudsætter tidlig og rumlig distribuering af nettonedbøren. Valget af inputtet til modellen (nettonedbør f.eks. på døgn eller månedsbasis) er formentlig det væsentligste problem der er knyttet til dynamisk modellering.

Der vil blive kigget lidt nærmere på håndtering af overfladeafstrømning, dræn og kanalstrømning ligesom betydning af kobling (eller manglende kobling) vil blive beskrevet. Afslutningsvist ser vi på spørgsmålet om, hvornår det er vigtigt at bruge dynamiske modeller frem for en stationær model.

Opsplitning af nettonedbør mellem grundvand og overfladevand

Modellering af vandkredsløbet på oplandsniveau og generering af overfladeafstrømning forudsætter en rimelig partitionering af nedbøren, det vil sige den del der routes direkte til det øverste grundvand (SZ) og den del der routes til overfladisk afstrømning (OC). Specielt i forbindelse med modeltype 3B og 3C, hvor nettonedbøren beregnes separat, er det nødvendigt at tage nogle forholdsregler i denne sammenhæng. I DK modellen er problemet løst i form af den såkaldte dummy-koefficient, der er baseret på en GIS analyse på 1x1 km gridniveau af:

- Befæstede arealer (-> ca. 1/3 af nettonedbøren routes til OC for befæstede arealer, f.eks. byområder og veje)
- Terrænhældning indenfor griddet (større terrænhældning -> mere vand til OC)
- Områder med lerjord i mere end 70 % af griddet (-> 10 % af nettonedbør routes til OC)

Et af argumenterne for at løse partitioneringsproblemet på denne tilnærmede måde i DK modellen har været at modellen arbejder på stor skala, hvor en række processer på mindre skala således ikke indgår i modellen. Der findes enkelte eksempler på tilsvarende tilpasninger med MIKE SHE modellen og DK-modellens rodzonemodul også på mindre skala, hvor en eller flere af ovenstående tiltag har været taget i brug (typisk som minimum befæstede arealer).

Overland flow

Overfladisk afstrømning er en vigtig komponent i det hydrologiske kredsløb, for styringen af vandstrømningen til og fra overfladen, til vandløb mm. Nærmere beskrivelser af håndteringen af denne 2-D flowkomponent kan findes i MIKE SHE eller i MODHMS manualen. Se hjemmesider fra kodeudviklere: www.dhi.dk og www.modhms.com.

En væsentlig styrke ved MIKE SHE/MIKE 11 konceptet (type 3A-C) i forhold til konfigurationer baseret på Daisy-MODFLOW (type 1) er håndteringen af overfladisk afstrømning. Dynamiske grundvandsmodeller af type 1 vil derfor normalt ikke kunne beskrive afstrømningen lige så godt som type 3A-B modeller, der inkluderer overfladisk afstrømning.

Hvis ikke overfladisk afstrømning håndteres i modellen, bør man reducere nettonedbøren med en tilsvarende del, f.eks. på basis af en nærmere analyse af tidsserier for afstrømningen, hvor den mest overfladenære afstrømning i så fald skal elimineres fra inputtet til grundvandsdannelse.

Samtidig vil det være nødvendigt at benytte enten månedsværdier eller uge værdier for den 'reducerede nettonedbør' i MODFLOW, da det ikke er fordelagtigt at benytte daglige værdier (der benyttes stress perioder).

Dræn og vandløb

Der findes forskellige løsninger på håndtering af vandløb i MIKE SHE (vandløb er beliggende i kanter af grid) og MODFLOW (vandløb håndteres 'blokcentreret'), og valget i opstilling af den dynamiske grundvandsmodel (type 1) består derfor i at vælge, hvordan randbetingelser skal håndteres ved brug af henholdsvis drain eller river (stream package er også en oplagt mulighed, idet denne package holder styr på vandbalancen i vandløb, så der ikke genereres udsivning i tørlagte vandløb). I type 3 konfigurationer baseret på MIKE SHE foregår de fleste valg i MIKE 11 opsætningen, hvor de enkelte delstrækninger kan forsynes med forskellige antagelser vedr. udveksling mellem grundvand og vandløb (direkte kontakt, vertikalt tryktab, eller kombination af vertikalt og horisontalt tryktab).

Dræn kan uden problemer medtages i alle grid i MIKE SHE, hvorimod MODFLOW ikke uden problemer kan forsynes med dræn i alle grid (f.eks. problem ved GMS). Der kan ikke gives nogen endegyldige guidelines for, hvordan man mest fornuftigt sætter dræn op i den hydrologiske model (type 1 eller 3), men man bør som minimum benytte forskellige parameteriseringer for områder uden dræn, med dræn osv. Problemet er dog at finde lettilgængelige og egnede kvalificerede data til en sådan parameterisering. Det kan derfor anbefales at foretage en apriori definition af forskellige typer dræning, så man senere i processen kan forsøge at kalibrere parametre for disse (f.eks. tidskonstant og dybde til dræn i MIKE SHE terminologi).

Det vil også være nødvendigt at tage stilling til om drænafstrømning routes til nærmeste vandløb eller ud af modellen (til randen).

Den nyere litteratur viser, at forøget modelstruktur ikke nødvendigvis giver forbedret performance for f.eks. simuleret vandløbsafstrømning (Butts et al., 2004). Fuld dynamisk routning giver således ikke nødvendigvis bedre performance end forsimplet 'Muskinggum-Cunge routning'.

Se i øvrigt kapitel 7, fastlæggelse af randbetingelser samt anbefalinger for repræsentation af randbetingelser i USGS (2004).

10.5 OVERVEJELSER OM VALG AF STATIONÆR OG/ELLER DYNAMISK MODEL

Indledningsvist skal det slås fast, at det ofte er fordelagtigt at arbejde med både en stationær og en dynamisk model. Herved kan man udnytte, at den stationære model er god til automatisk kalibrering, en teknik som er hensigtsmæssig, fordi modellen så selv justerer de frie parametre, så man får et mere objektive bud på de optimale parametre til grundvandskomponenten (Sonnenborg et al., 2003). Samtidig giver den stationære model relevant feedback på randbetingelser og evt. fejl i opsætningen, idet den regner på en ligevægtssituation og ikke er afhængig af startbetingelser eller effekter af magasinering, der påvirker en dynamisk model (Henriksen og Nyegaard, 2003).

Det er nødvendigt at foretage dynamiske simuleringer for at kunne validere modellen i forhold til afstrømninger og vandbalancer. Derfor er en dynamisk model nødvendig, hvis der skal foretages

en split sample validering, eller hvis tidsserier skal indgå i valideringen. Der er også visse parametre f.eks. tidskonstanter (dræn), magasintal (frit og artesiske), der kun kan kalibreres med den dynamiske model, eller ved skiftende stationære og dynamiske kalibreringskørsler. Med den stationære model kan hydrauliske ledningsevner som regel fastlægges rimeligt sikkert. For en model med f.eks. DK-modellens størrelse med knap 100.000 beregningskasser i grundvandsdelen i hver delmodel, og med beregninger for både grundvand og overfladevand tager det typisk 6-10 timer for 20 års simulering med en dynamisk model. Stationære kørsler tager til sammenligning kun 15-30 min., og da man ikke styrer de parameterværdier, modellen regner sig frem til, så giver automatisk kalibrering her vigtige informationer om, hvorvidt de estimerede parametre er realistiske og beliggende indenfor et forud fastlagt niveau. Endnu et argument for at have noget stationært 'kørende'.

Vurderingen af konceptuel model, randbetingelser og vandbalance forudsætter som illustreret ovenfor en nærmere analyse af grundvands-overfladevands interaktionen. Denne interaktion udgør ofte en ret kritisk komponent i vandbalancen, og udgør formentlig den største kilde til usikkerhed på en ren grundvandsmodel, uanset om denne så i øvrigt er stationær eller dynamisk.

Normalt antages det, at simulering af umættet zone systemet ikke er kritisk. Nedsivning eller lækage fra overfladevand til grundvand antages som en tilnærmelse at ske øjeblikkeligt uden forsinkelse (storage i umættet zone). Rodzonen skal dog helst beskrives ret udførligt, fordi denne zone er styrende for såvel overfladenær afstrømning, som fordampning og nedsivning til grundvandet, og dermed styrende for den samlede vandbalance.

Når man anvender rene grundvandsmodeller (type 1) er man nødt til at foretage forenklinger af beskrivelsen af udveksling mellem grundvand og overfladevand og til det formål antager man enten fastholdt tryk, flux eller trykniveauafhængig flow randbetingelse, så strømmingen ved skillefladen mellem grundvand og overfladevand simpelt kan beregnes som en funktion af de relative trykniveaugradienter for et givent tidspunkt, og en konduktans gennem skillefladen, som i såfald bliver en kalibreringsparameter.

I tabel 10.2 er foretaget en sammenstillet anbefaling til valg af stationær model (type 0), transient grundvandsmodel f.eks. Daisy/MODFLOW (type 1) eller integreret model MIKE SHE/MIKE 11 (type 3A), rodzone boksmodel fx DK model rodzone /MIKE SHE/MIKE 11 (type 3B) eller DAISY/MIKE SHE/MIKE 11 (type 3C).

Følgende kræver dynamisk model:

- Ikke stationære problemstillinger (f.eks. effekt af vandindvinding)
- Sæsonmæssige variationer
- Ekstreme hændelser (oversvømmelse og minimumsafstrømning)
- Grundvand-overfladevands interaktion

Tabel 10.2 Valg af stationær contra dynamisk model, modificeret ud fra USGS (2004), idet brug af 'superposition' indikerer at modellen kun beskriver ændringer som følge af påvirkninger, 'valideret og usikkerhedsvurderet model' angiver at grundvandsmodellen er godt kalibreret og altså beskriver de absolutte størrelser (flow, vandstand osv.) med en kendt nøjagtighed (eller unøjagtighed). Ved basal forståelse af grundvandssystemet anbefales 'basic model' ellers 'comprehensive'

Problemtype	Begrundelse for Modelstudie	Model approach	Valg af modeltype: - Stationær (type 0) - Transient grundvand (type 1) - Integreret model (type 3A, 3B eller 3C)
Basal forståelse af grundvandssystemet	Undersøgelse af hydrologiske processer	- basic model - superposition - partikelbane simulering	type 0 og/eller type 1
	Bestemmelse af monitoringsbehov	- basic model - valideret og usikkerhedsvurderet model - superposition - partikelbane simulering	type 0 og type 1
	Foreløbig model til vurdering af nuværende forståelse (vurdering af konceptuel hydrogeologisk model)	- basic model - valideret og usikkerhedsvurderet model - superposition - partikelbane simulering	type 0 og type 1
Estimering af grundvandsmagasin forhold	Analyse af pumpeforsøg og andre akvifer-tests	- valideret og usikkerhedsvurderet model - superposition	type 1 eller type 3A/3B afhængig af om vandløbspåvirkning indgår
	Bestemmelse af parameterværdier	- valideret og usikkerhedsvurderet model	type 0 og type 1 eller type 3A/3B/3C
Forståelse af historikken (the past)	Forståelse af historiske udnyttelse af grundvandet	- valideret og usikkerhedsvurderet model	type 0 og type 1 eller type 3A/3B (sidstnævnte anbefales!)
	Fastlæggelse af 'upåvirkede forhold'	- valideret og usikkerhedsvurderet model	vand: type 3A/3B nitrat: type 3C
Forståelse af det nuværende system	Bestemmelse af effekten af vandindvinding på overfladevandssystemer	- valideret og usikkerhedsvurderet model - superposition - partikelbane simulering	type 3A eller 3B
	Bestemmelse af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande (sårbarhedsvurdering)	- valideret og usikkerhedsvurderet model - partikelbane simulering - stoftransport simulering	type 0 og type 1 eller type 3 afhængigt af dynamik i grundvandssystem og klima / vandindvinding
	Bestemmelse af ansvarlige parter til en given grundvandspåvirkning	- valideret og usikkerhedsvurderet model - partikelbane simulering - stoftransport simulering	vand: type 3A eller 3B nitrat: type 3C
Forudsigelse af fremtidige forhold (the future)	Forvaltning af vandressourcen	- valideret og usikkerhedsvurderet model - superposition - partikelbane simulering - stoftransport simulering	vand : type 3A eller 3B nitrat: type 3C

10.6 INITIALBETINGELSER OG TIDSSKRIDT

En numerisk løsning af grundvandsstrømning beregner, hvorledes trykniveaufordelingen i det numeriske net ændrer sig fra ét tidsskridt til det næste tidsskridt som funktion af den initiale situation og eventuelle randbetingelser. Beregningsresultaterne fra dette tidsskridt anvendes dernæst som udgangspunkt for beregningerne af det følgende tidsskridt. Det er således muligt at beregne, hvordan systemet opfører sig, hvis udgangspunktet er kendt. For at påbegynde denne kæde af beregningstrin er det nødvendigt at specificere initiale betingelser, såkaldte startværdier. Det er vigtigt at skelne mellem randbetingelser og startværdier. Startværdier angiver initialværdier for de beregningsceller, hvor trykniveauet skal beregnes. Randbetingelserne angiver den stedlige og tidslige variation i trykniveauet, hvor trykniveauet forudsættes kendt.

Ved beregning af en stationær løsning vil startværdierne ikke spille ind på det endelige resultat, dog vil mellemregningerne blive hurtigere, hvis startværdierne fastsættes, så de tilnærmelsesvis ligner den endelige løsning. I værste fald kan specificering af helt forkerte startværdier føre til konvergensproblemer for den stationære løsning, hvorved beregningsresultaterne mister deres værdi.

Ved ikke-stationære beregninger har startværdierne meget indflydelse, specielt på vandbalancen. Startværdierne angiver trykniveauet og dermed vandindholdet for modellen. Hvis startværdierne repræsenterer resultatet af en tør sommer eller en periode med meget indvinding, vil trykniveauet være lavt, og modellen vil ikke indeholde så meget vand. Efter en periode vil dette udjævne sig, idet startværdierne vil få mindre og mindre indflydelse, og beregningsresultatet vil være mere og mere afhængigt af de givne randbetingelser. Længden af denne periode kan kun bestemmes ved at prøve med forskellige startværdier. Efterfølgende kontrolleres det, i hvor lang en periode der kan registreres ændringer i resultatet mellem to beregninger udført med forskellige startværdier.

Metoder til fastlæggelse af initialbetingelser

Principielt kan der anvendes to metoder til fastsættelse af startværdier for trykniveauet. Enten kan man indlægge interpolerede feltdata, eller man kan lade modellen beregne startværdier. Hvis man anvender feltdata, vil startværdierne ikke være i balance med det hydrologiske system, modellen udgør. Modellen vil anvende de første tidsskridt til at svinge sig ind, således at der tages hensyn til fordeling af hydraulisk ledningsevne, randbetingelser osv. I denne startperiode vil resultaterne ikke være gyldige. Den interpolering, der anvendes for at indlægge spredte feltdata i beregningsnettet, tager jo ikke hensyn til variationer i hydraulisk ledningsevne og randbetingelserne.

Metoder til indkøring af model

For at sikre gode startværdier er det en fordel at lade modellen dynamisk arbejde sig frem til startværdierne. Dette gøres ved at lade simuleringen starte før den periode, der ønskes analyseret. Denne indkøringsperiode kan lede til to principielt forskellige startsituationer for analyseperioden ved enten at lade randbetingelserne være konstante i tiden eller indbygge en periodisk variation.

Hvis randbetingelserne holdes konstante i tiden i indkøringsperioden, vil indkøringsperioden resultere i, at startgrundlaget for den egentlige beregning er en stationær situation, så at sige i ligevægt med randbetingelserne.

Hvis der forekommer periodiske variationer i randbetingelserne, kan det være en fordel at indbygge dette i indkøringsperioden. Dette vil resultere i startværdier for analyseperioden, der er dynamiske og dermed danner et bedre grundlag for beregningen af analyseperioden.

Der kan ikke gives præcise anbefalinger om, hvor lang tid en indkøringsperiode skal vare. Det er vigtigt at både trykniveauerne og afstrømningerne er kommet på plads. Der er dog angivet vejledende værdier i nedenstående tabel 10.3.

Tabel 10.3 Vejledende værdier for længde af opvarmningsperiode

Modeltype	Elasticitet og kapacitet*	Opvarmningsperiode
Grundvand, artesisk magasin	1 mm/m	1-2 måneder
Grundvand, frit magasin	10-300 mm/m	6-24 måneder
Integreret hydrologisk model	-	1-4 år for flow og 10-20 år for trykniveau (ved opstart fra stationær model og trykniveau evt. lidt kortere)

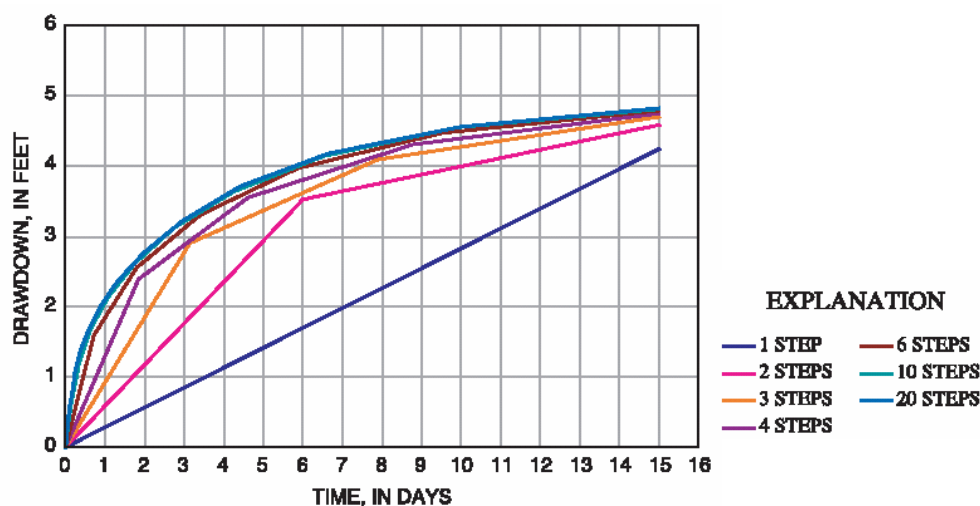
*angivelse af den ”magasinering”, der er i systemet (1 mm pr m trykniveau ændring) før modellen ændres fra startværdierne til værdier, der er i hydraulisk balance med randbetingelserne. Det er en noget arbitrær størrelse og vil variere fra model til model samt internt i hver enkelt model.

Bestemmelse af startværdiernes indflydelse i den konkrete modelopsætning

Startværdiernes indflydelse kan kvantificeres ved beregninger udført for den specifikke model med varierende startværdier. Generelt kan man optegne en teoretisk kurve for betydningen af randbetingelser i forhold til startværdier. I den første periode af simuleringen vil startværdierne være mest afgørende. Efterhånden som beregningen skrider frem, vil randbetingelserne langsomt overtage for til sidst at være helt afgørende. Denne situation svarer til den stationære beregning, hvor startværdierne ikke har indflydelse på resultatet. Hvis betydningen ønskes kvantificeret, må dette gøres gennem beregninger gennemført med forskellige startværdier.

Tidlig diskretisering

En passende tidlig diskretisering af den dynamiske grundvandsmodel (type 1 eller 3) er nødvendig såfremt de numeriske beregninger skal have en rimelig nøjagtighed (USGS, 2004). I figur 10.2 er vist betydningen af valg af antal tidsskridt for simulering af afsenkning af grundvandet efter start af en vandindvinding.



Figur 10.2 Simuleret afsenkning (drawdown) mod tid i dage for forskellige antal tidsskridt. Bemærk at tidsskridtet i eksemplet forøges med 50 % i hvert step.

Brug af 6 eller flere tidsskridt giver en acceptabel simulering af det 15 dage lange afsænkingsforløb. Ofte vil tidsskridt på f.eks. daglig basis være et fornuftigt valg for grundvandsdelen. Overfladevandsdelen (f.eks. MIKE 11) vil ofte skulle køres med meget finere tidsskridt.

10.7 REFERENCER

Ajami, N.K., Gupta, H., Wagener, T. and Soroosh, S. (2004) Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system.

Allerup, P., Madsen, H. og Vejen, F. (1998) Standardværdier (1961-90) af nedbørskorrekationer. Teknisk rapport 98-10. Danmarks Meteorologiske Institut.

Anderson, M.P. and W.W. Woessner (1992): Applied Groundwater Modelling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.

Butts, M.B., Payne, J.T., Kristensen, M. and Madsen, H. (2004) An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. Journal of Hydrology 298, 242-266.

Bøgh, E., Butts, M., Hansen, S. og Søgaard, H. (2003) Satellitbilleder til modellering af vandbalance. Vand & Jord, 10. årgang nr. 2, maj 2003. p. 72-76.

Camp Dresser McKee Inc. (2001) Evaluation of integrated surface and groundwater modeling tools. February 2001.

Granat, H. (2000) Jordbunden i Landskabet. Skov og Naturstyrelsen, Miljøministeriet.

Guo, J., Liang, X. and Leung, L.R. (2004) Impacts of different precipitation data sources on water budgets. Journal of Hydrology 298, 311-334.

Henriksen, H.J. og Sonnenborg, A. (2003) Ferskvandets Kredsløb. NOVA 2003 temarapport. GEUS, DJF, DMU og DMI.

Henriksen, H.J., Trolborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C. and Madsen, B. (2003) Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. Journal of Hydrology (280) 52-71.

Henriksen, H.J. og Nyegaard, P. (2003) Den konceptuelle vandmodel – ferskvandets kredsløb (1). Geologisk Nyt 5/03.

KVL, DHI, Watertech, Danmarks Jordbrugsforskning og Dansk Landbrugsrådgivning (2003) Standardopstillinger til Daisy modellen. Vejledning og baggrund.

Liang, X. and Xie, Z. (2003) Important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater. Global and planetary change 38, 101-114.

Middlemis, H. (2004) Benchmarking best practice for groundwater flow modelling. The Winston Churchill Memorial Trust of Australia. 13. December 2004.

Panday, S. and Huyakorn, P.S. (2004) A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. Advances in Water Resources 27, 361-382.

Plauborg, F., Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Blicher-Mathiasen, G. og Kern-Hansen, C. (2002) Vandbalance på mark- og oplandsskala. Notat udarbejdet af DJF, GEUS, DMU, DMI. DJF rapport 70. Markbrug.

Refsgaard, J.C. and Henriksen, H.J. (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in water resources*. (27) 71-82.

Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Harrar, W.G., Scholten, H. and Kassahun, A. (2004) Quality assurance in model based water management –review of existing practice and outline of new approaches. *Environmental Modelling & Software* (in press).

Sonnenborg, T.O., Christensen, B.S.B., Nyegaard, P., Henriksen, H.J. and Refsgaard, J.C. (2003) Transient modeling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration. *Journal of Hydrology* 273, 188-204.

Storstrøms Amt (2003) Regional strømningsmodel for Lolland – Hydrogeologisk model. DHI, Institut for vand og miljø.

Sundberg, P.S. (red) I. Callesen, M.H. Greve og K. Raulund-Rasmussen (1999): Danske jordbundsprofiler. DJF, Foulum.

USGS (2004) Guidelines for evaluating ground-water flow models. Scientific Investigation Report 2004-5038. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. By Thomas E. Reilly and Arlen W. Harbaugh. Reston, Virginia.

van der Keur, P., Hansen, S., Schelde, K., and Thomsen, A. (2001) Modification of Daisy SVAT model for potential use of remotely sensed data. *Agricultural and Forest Meteorology* 106, 215-231.

Vestsjællands amt (2003) Indsatsområde Tude å. Fase 2: Detalkortlægning. Numerisk strømningsmodel. Sammenfattende rapport. Februar 2003.

Århus amt (2002) Grundvandsmodel for Norddjursland. Modelopstilling. December 2002. WaterTech a/s.