

# 7. RESULTATER FRA DEN NATIONALE VAND-RESSOURCE MODEL (DK-MODEL)

*Hans Jørgen Henriksen og Lars Trolborg, GEUS*

<b>7. RESULTATER FRA DEN NATIONALE VANDRESSOURCE MODEL (DK-MODEL)</b>	<b>2</b>
7.1 Metodik for konstruktion af national vandressourcemodel .....	3
7.1.1 Udfordringer ved opstilling af storskala model for hele landet .....	3
7.1.2 Konceptuel model .....	4
7.1.3 Modelkode .....	6
7.1.4 Modelopstilling og parameterfastsættelse .....	7
7.1.5 Fastlæggelse af nøjagtighedskriterier .....	8
7.1.6 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Sjælland .....	12
7.1.7 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Jylland .....	13
7.2 Beskrivelse af kalibrerings- og valideringsresultat .....	14
7.2.1 Sammenligning af DK-model med Suså model .....	16
7.2.2 Validering i forhold til ældre data for Hovedstadsregionen .....	17
7.3 Vandrådets metodik og resultater .....	19
7.4 Ny metodik til vurdering af udnyttelig vandressource .....	21
7.4.1 Disponering af den udnyttelige grundvandsressourcen mellem drikkevand, akvatiske miljø, erhverv-/industri mm. ....	21
7.4.2 Definition af udnyttelig grundvandsressource .....	23
7.4.3 Skala for opgørelsen .....	24
7.4.4 Metodik for opgørelsen af udnyttelig ressource i relation til vandløbspåvirkning	25
7.4.5 Metodik for opgørelsen af udnyttelig ressource i relation til afsækning af trykniveau .....	27
7.4.6 Simuleringskørsler .....	28
7.5 Eksempler på ressourcevurdering for udvalgte scenarier .....	30
7.6 Identifikation og beskrivelse af udvalgte indikatorer for kredsløb og ressource .....	38
7.7 Referencer .....	39

## 7.1 Metodik for konstruktion af national vandressourcemodel

Der er konstrueret en integreret grundvands / overfladevandsmodel for hele landet dækkende 43.000 km<sup>2</sup>. Modellen er baseret på et 1 km<sup>2</sup> beregningsnet, hvor nettonedbøren er beregnet med et simpelt rodzonemodul, grundvandsstrømningen er beregnet med en relativ detaljeret 3D grundvandskomponent, som beskriver grundvandsdannelse og trykniveau i forskellige geologiske lag og en vandløbskomponent, som router afstrømning i vandløb og beskriver udveksling mellem grundvand og vandløb. Modellen er baseret på MIKE SHE systemet med udnyttelse af omfattende databaser for geologi, jordart, topografi, vandløbssystem, klima og hydrologi. Baggrund og formål med modelarbejdet fremgår af kapitel 3.

### 7.1.2 Udfordringer ved opstilling af storskala model for hele landet

En storskala modellering med dynamisk simulering af vandløbsafstrømning for oplande ca. 50.000 km<sup>2</sup> er tidligere blevet udført i forskellige studier (Refsgaard, 2001). Disse studier inkluderede imidlertid ikke simulering af grundvandssystemet i en detaljeringsgrad som benyttet i DK-model. Baseflow blev i disse studier håndteret ved "lineære reservoirer".

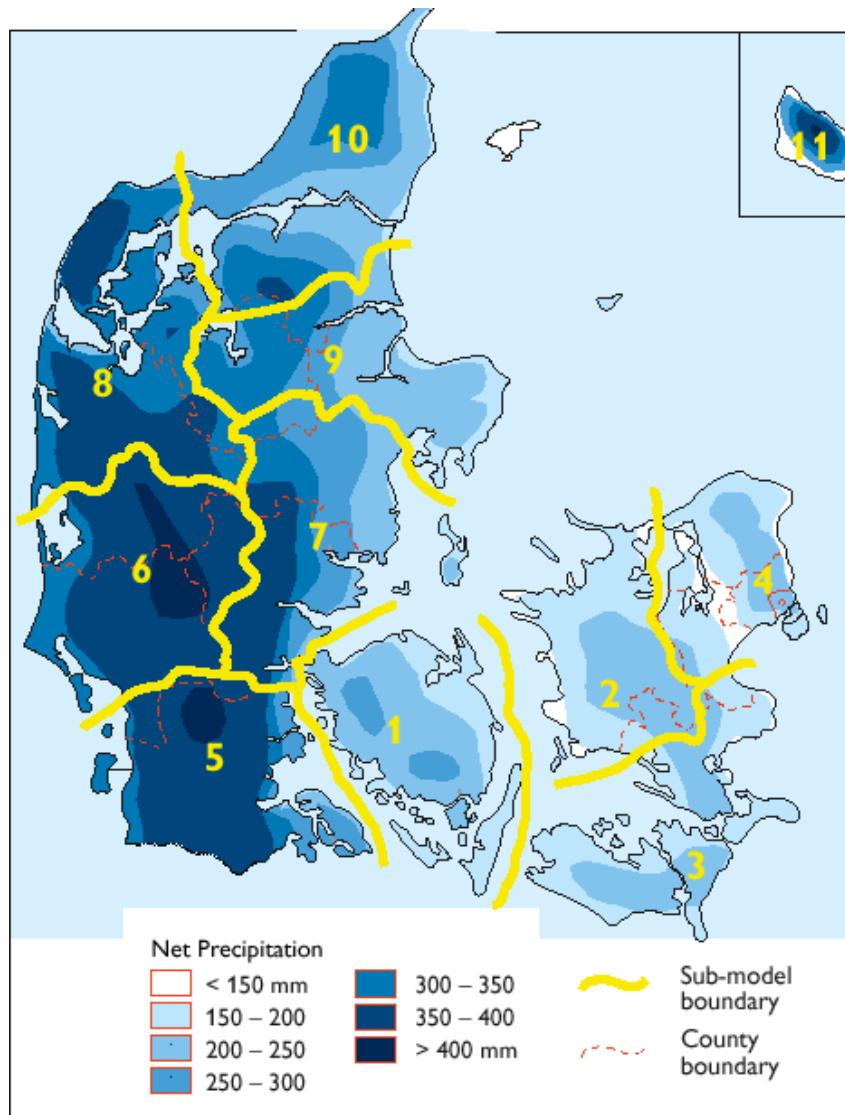
Grundvandsmodellering af hydraulisk tryk og strømning for store oplande er blevet udført af forskellige forskere (D'Agnese et al., 1999; South Florida Management District, 1997; de Lange, 1996). Disse modeller var dog alle baseret på antagelse om stationaritet og inkluderede ikke overfladevands processer.

Dynamisk og integreret grundvands/overfladevands modellering er tidligere blevet udført, men kun for mindre områder (Refsgaard et al., 1998). Der er derfor nogen særlige videnskabelig og modeltekniske udfordringer ved gennemførelse af et projekt som DK-modellen:

- En rumlig distribueret fysisk baseret model som indeholder en integreret beskrivelse af både overfladevand og grundvand kræver en stor mængde data for at opnå troværdige simuleringer. Opstilling af en sådan model forudsætter derfor en konsekvent metodik for fastsættelse af parameterværdier ud fra feltdata i eksisterende databaser.
- Det er på forhånd ikke helt klart hvilken metodik der skal anvendes til kalibrering af en sådan model. Invers modellering har haft udbredt anvendelse både indenfor dynamisk overfladevandsmodellering og stationær grundvandsmodellering (Gupta et al., 1998; Madsen, 2000). For en integreret, storskala model som DK-modellen, har invers modellering ikke tidligere været benyttet og det er ikke helt afklaret, hvorvidt denne metodik er fordelagtig i denne kontekst.
- En model af denne type simulerer basalt set de vigtigste processer af det hydrologiske kredsløbs landfase. Det giver imidlertid ikke nogen garanti for at modellen også giver en pålidelig og nøjagtig simulering af alle processer i kredsløbet. Og selv, såfremt modellen ser ud til at kunne simulere aggregerede processer korrekt, f.eks. afstrømning fra oplandet eller trykniveau i givne punkter, så er der ikke hermed noget bevis for at de underliggende processer bliver simuleret med den samme nøjagtighed. Det er derfor helt afgørende nødvendigt at fastlægge og anvende systematiske valideringstests, så modellens troværdighed og begrænsninger for modellen kan dokumenteres.

## 7.1.2 Konceptuel model

Danmark blev i den hydrologiske modellering opdelt på 11 områder (se figur 7.1).



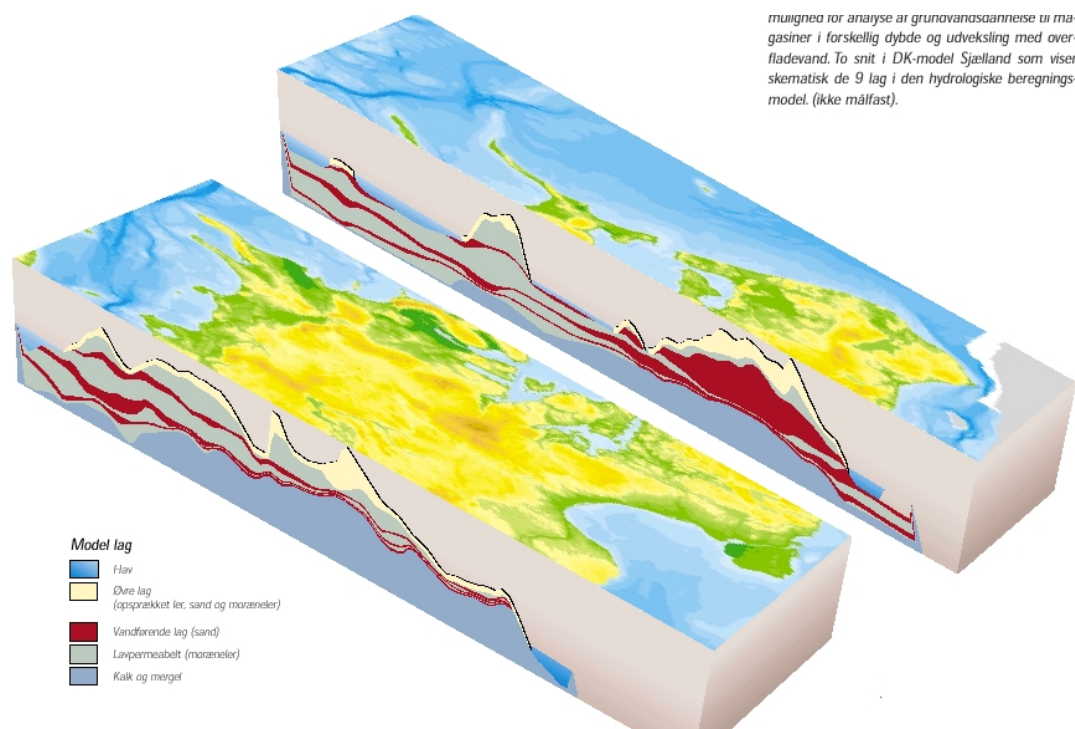
Figur 7.1 Opdeling af DK-model på 11 delmodeller (baggrund skal ændres i endelig version!)

Opdelingen på de 11 deloplande er dels begrundet af ønsket om at have afviklingstider af passende størrelse men også baseret på hensynet til randbetingelser. På Sjælland er afgrænsningen valgt så den falder sammen med overordnede grundvandskel. Modellen for Sjælland er dog samlet i en database, så det er relativt nemt at opstille en tværgående model. Eksempelvis er der opstillet en model for et område svarende til Suså modellen, som går på tværs af Nord, Vest og Syd modellen. For Jylland har det ikke været muligt helt at undgå implementering af gradientrandbetingelser, idet der er store forskelle mellem grund-

vandsoplade og topografiske oplande. Det betyder at der arbejdes med "komplementære" gradientrandbetingelser mellem model 6 og 7 (strømning mod øst), model 8 og 7 og også model 8 og 9. Hvor dette er tilfældet, har det været nødvendigt at "estimere" en fornuftig gradientrandbetingelse. Modellen for Jylland er dog ligesom modellen for Sjælland samlet i en database så det er relativt let at opstille tværgående modeller, hvis der er behov for dette.

Det fremgår at Sjælland dækkes af submodel 2, 3 og 4. Grundlaget for opdeling på de 11 delområder og opstilling af hydrogeologisk model er nærmere beskrevet i af kapitel 6.

I figur 7.2 er den geologiske model for Sjælland illustreret (Henriksen, 2001).



Figur 7.2 Principskitse af DK-model for Sjælland (Henriksen, 2001)

Lad os beskrive et eksempel på overgangen fra geologisk model til hydrologisk model for Sjælland, der har et areal på 7330 km<sup>2</sup>. Sjælland udgør et lavlandsområde karakteriseret med en glacialmorfologisk topografi. Den overfladenære geologi består af kvartære aflejringer ovenpå tertiære kalk og mergel aflejringer. Den kvartære lagserie består af terrestriske glaciære sedimenter med en tykkelse på fra få meter til 150 m (Pedersen, 1989) hvori mod de prækvartære aflejringer underegenerelt består af Danien kalk i den østlige og nordlige del og paleocænt mergel og ler i den vestlige del af Sjælland (Sjørring, 1983; Surlyk, 1980). Den danske geologi er kompleks, primært som følge af glacialtektoniske forstyrrelser (Pedersen, 2000), og der er derfor lagt stor vægt på en god beskrivelse af den geologiske model i tre dimensioner.

Opstillingen af de geologiske modeller er nærmere beskrevet i kapitel 6. Den geologiske model for Sjælland består af 11 lag, vekslende mellem sand, moræneler og kalk aflejringer.

De øverste 3 geologiske lag bestående af opsprækket ler, lokale sand- og morænelerslag er slået sammen til et øvre beregningslag (se figur 7.2). Baseret på feltundersøgelser (Nilsen et al., 1997; Harrar et al., 2002; Fredericia, 1990 og 1991) er det vurderet, at de øverste 1-5 m under terrænoverfladen bestående af moræneler, som følge af opsprækning har væsentlig højere hydrauliske ledningsevner i forhold til de dybere sekvenser af moræneler. Den relative permeable opsprækkede moræneler er repræsenteret i modellen ved introduktionen af et lag med ensformig tykkelse (3.5 m) for hele Sjælland.

Til simulering af grundvandsprocesserne på stor skala, blev det besluttet at inkludere følgende hydrologiske processer i modellen:

- Sne akkumulering og –smeltning for at medtage forsinkelsen i daglig nedbør som følge af sne
- Overfladisk afstrømning
- Umættet zone processer inkluderer evapotranspiration. Det vigtigste krav til denne beskrivelse er at nettonedbøren (nedbør minus evapotranspiration) opgøres korrekt på sæsonmæssig og årlig basis
- Grundvandstrømningsprocesser inklusiv grundvandets trykniveau, strømning mellem forskellige lag og udveksling mellem grundvand og vandløb. Da en væsentlig del af landet er drænet er der inkluderet en drænkomponeent for det øvre frie magasin
- Vandløbsafstrømning og vandstand. Vandløbssystemer blev fastlagt ud fra digitaliserede vandløbspunkter. Et antal typeprofiler blev benyttet baseret på målt medianminimumsafstrømning og oplandsarealer. Det var ikke muligt at repræsentere samtlige mindre tilløb i modellen. Disse arealer drænes i stedet af drænvandskomponentet.

### 7.1.3 Modelkode

Til simulering af grundvandssystemet incl. grundvands/overfladevands interaktion er MIKE SHE systemet valg (Abbott et al., 1986a,b; Refsgaard og Storm, 1995). MIKE SHE er en deterministisk, fuldt distribueret og integreret hydrologisk model, som kan beskrive de vigtigste strømningsprocesser for landfasen af det hydrologiske kredsløb. I flere modelreviews er det på det seneste vurderet, at MIKE SHE er det bedste værktøj til beskrivelse af grundvands/overfladevands relaterede problemstillinger (se f.eks. Kaiser-Hill Compagny, 2001).

Som en aktivitet i forbindelse med konstruktionen af DK-modellen blev der udviklet en fuld stationær løser, baseret på en PCG algoritme, hvilket har givet mulighed for anvendelse af en standardiseret automatisk kalibreringsprocedurer, baseret på UCODE.

For at spare beregningstid og reducere datakrav, blev det besluttet at se bort fra den komplekse umættede zone komponent af MIKE SHE, som er baseret på Richard's ligning. I stedet blev der udviklet et simpelt rodzonemodul til beregning af daglige værdier af snesmelting og nettonedbør. Resultater fra dette rodzonemodul er blevet sammenlignet med resultater fra en mere avanceret fysisk baseret model, Daisy (Hansen et al., 1991), for to forskellige jordtyper. Denne sammenligning viste en relativ god overensstemmelse i både årlig og månedlig vandbalance og grundvandsdannelse (Christensen, 2000). Rodzonemodulet har ligeledes været testet for lerjord i forhold til Als modellen, ARMv3 (Jeppesen, 2001), som er en "boksmodel", der har en del lighedspunkter med DK-modellens rodzonemodul. Her viste en sammenligning, at de to modeller gav stort set identiske nedsivninger

for lerjord (< 1 %'s afvigelse på årsbasis). I den samme undersøgelse blev ARMv3 sammenlignet med Evacrop. Denne sammenligning viste at Evacrop på årsbasis simulerede ca. 3 % mere nedsivning end ARMv3. DK-modellen giver dermed lidt mindre nedsivning i forhold til Evacrop for Als lerjorden. En lidt nærmere beskrivelse af rodzonemodulet findes i (Plauborg et al., 2002).

MIKE SHE udviklingen i forbindelse med DK-modellen er nærmere beskrevet på DK-modellens hjemmeside på [www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk) (se under MIKE SHE udvikling).

#### 7.1.4 Modelopstilling og parameterfastsættelse

Valget af en maskevidde på 1 km var baseret på et slags kompromis. Brugen af et 1 km net er en grov approximation men må betragtes som rimelig i relation til formålet med modellen. For en 10 års simuleringsperiode med daglige beregninger tager en kørsel 4-6 timer på en 866 Mhz Pentium III pc. Den valgte gridstørrelse på 1 km gør det imidlertid nødvendigt at simplificere en række forhold som er vigtige for grundvandsdannelsen og genereringen af afstrømning såsom topografi og geologisk heterogenitet, drænsystem og vandløb (Henriksen et al., 1998; Dahl et al., 1998).

I princippet kan rumligt distribuerede modeller regne på parameterverdier for hvert grid element eller beregningsknudepunkt. I praksis, på grund af heterogenitet i parameterverdier, forskelle mellem observationsskala og model grid skala, og eksperimentelle begrænsninger, så er specifikationen af parameterverdier vanskelig (Rosso, 1994). Derfor, blev det som et vejledende princip besluttet at konstruere en model som bestod af så få frie parametre som muligt. Dvs., der blev så vidt muligt antaget ensformige parameterverdier over hele modelområdet for de geologiske lag bestående af moræneler og sand så vel som for de fleste overfladekomponent parametre.

De hydrauliske parametre kan underinddeles i 3 grupper:

- parametre der styrer fordelingen af nedbør mellem evapotranspiration, grundvandsdannelse og overfladisk afstrømning fra bl.a. befæstede arealer (rodzone modul)
- parametre der styrer grundvandsstrømning, drænastrømning og udveksling mellem grundvand og vandløb (mættet zone model), og
- parametre der styrer overfladisk afstrømning og kanalstrømning (overland og kanalstrømningsmodel)

Startverdier og bedste estimater på hydrauliske parameterverdier og range er baseret på tidligere feltarbejde og modellering (Refsgaard og Stang, 1981; Christensen, 1994; Henriksen et al., 1997) og litteratur (Morris og Johnson, 1967; Carlsson og Gustafson, 1984; Domenico og Schwartz, 1998). Startverdier og forventet range for Sjælland fremgår af tabel 7.1. For kalkmagasinet under de kvartære aflejringer blev målte værdier af transmissiviteten udtrykket fra GEUS's Jupiter database anvendt a-priori til at interpolere en rumlig fordeling af den hydrauliske ledningsevne.

## 7.1.5 Fastlæggelse af nøjagtighedskriterier

Det valgte kalibreringsmål for trykniveau og afstrømning er vist i tabel 7.2 og figur 7.3. Observeret trykniveau fra GEUS's boringsdatabase fra 1970-96 blev anvendt. Dvs. der blev anvendt trykniveaudata fra 4439 borer (en observation pr. boring), med filtre fordelt over 9 beregningslag, som blev anvendt som et mål for den observerede "stationære" trykniveau. Daglig afstrømning fra 28 vandføringsstationer for perioden 1988-96 blev anvendt til kalibrerings- og validerings tests.

<b>Saturated zone component (SZ)</b>		Value (Range)	
<i>Drainage time constant</i>		$2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ( $1 \times 10^{-6}$ – $1 \times 10^{-8}$ )	
<i>Hydraulic conductivity</i>		Horizontal	Vertical
Layer 1 (fractured till)	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-6}$ – $1 \times 10^{-4}$ )	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-8}$ – $1 \times 10^{-6}$ )	
Layers 2, 4, 6, 8 and 10 (till and clay)	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-10}$ – $1 \times 10^{-6}$ )	$1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-11}$ – $1 \times 10^{-7}$ )	
Layers 3, 5, 7 and 9 (meltwater sand and gravel)	$1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-6}$ – $1 \times 10^{-2}$ )	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-7}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	
Layer 11 (chalk and limestone)	distributed ( $1 \times 10^{-7}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	distributed ( $\times 0.1$ ) ( $1 \times 10^{-8}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	
Impermeable bottom	$1 \times 10^{-20} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-20} \text{ m/s}$	
Sand lenses in clay	$1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-7}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ( $1 \times 10^{-8}$ – $1 \times 10^{-4}$ )	
Glaciotectonic lenses in clay	$2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	
Glaciotectonic lenses in sand	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	
<i>Storage parameters</i>		Specific yield	Storage coefficient
Layer 1 (fractured till)	0.25 m/m (0.05–0.20)	0.0001 m <sup>-1</sup> ( $1 \times 10^{-4}$ – $1 \times 10^{-2}$ )	
Layers 2, 4, 6, 8 and 10 (till and clay)	0.25 m/m (0.01–0.18)	0.0001 m <sup>-1</sup> ( $1 \times 10^{-4}$ – $1 \times 10^{-2}$ )	
Layers 3, 5, 7 and 9 (meltwater sand and gravel)	0.25 m/m (0.10–0.35)	0.0001 m <sup>-1</sup> ( $1 \times 10^{-5}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	
Layer 11 (chalk and limestone)	0.25 m/m (0.01–0.35)	0.0001 m <sup>-1</sup> ( $1 \times 10^{-6}$ – $1 \times 10^{-3}$ )	
<i>Aquifer — river exchange</i>			
River bottom leachage coefficient	$1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ( $1 \times 10^{-10}$ – $1 \times 10^{-6}$ )		
Exchange flow type	type 3 (only vertical exchange)		
<b>Overland component (OC)</b>			
Surface Manning (M)	3 (1–5)		
Detention storage	0.01 (0–0.05)		
Channel Manning (M)	20 (10–35)		

Tabel 7.1 Estimerede startparametre og variationsramme for Sjælland

## DK-model Sjælland

Calculation layer	Hydrostratigraphic unit	Number of initial head targets from PC Jupiter	Number of head targets selected for calibration	Weighted by layer (% af 4439)
1 (geolayer 1+2+3)	Fractured till and shallow sand aquifer	163	106	2.4
2 (geolayer 4)	Clayey till	113	113	2.5
3 (geolayer 5)	Upper regional sand aquifer	379	376	8.5
4 (geolayer 6)	Clayey till	317	304	6.8
5 (geolayer 7)	Middle regional sand aquifer	319	318	7.2
6 (geolayer 8)	Clayey till	171	170	3.8
7 (geolayer 9)	Lower regional sand aquifer	147	142	3.2
8 (geolayer 10)	Clayey till	89	89	2.0
9 (geolayer 11)	Chalk and limestone aquifer	6898	2821	63.6
Total number of head targets		8596	4439	100.0

*Tabel 7.2 Fordeling af udvalgte trykniveau observationer på beregningslag / hydrostratigrafiske enheder i den konceptuelle model*

Performance kriterier blev udvalgt med så de afspejler formålene med modelleringen, som er simulering af udnyttelig ressource, der afhænger af påvirkninger af trykniveau og vandløbsafstrømning ved et antal lokaliteter. De fire kalibreringskriterier var:

(1) Et mål for afvigelse mellem simuleret og observeret trykniveau:

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_j^N ((H_{s,j} - H_{o,j})^2)} \quad , \quad \in [0; \infty[$$

(2) Et mål for modellens evne til at simulere gennemsnitlig afstrømning for en bestemt vandføringsstation:

$$F_{Bal} = 100 \frac{\overline{Q_o} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_o}} \quad , \quad (\%)$$

(3) Et mål for evnen til at simulere variation i afstrømningshydrografen for en bestemt vandføringsstation (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$R^2 = \frac{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2 - \sum_i (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} = 1 - \frac{\sum_i (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} \quad , \quad \in ]-\infty; 1]$$

(4) Et mål for evnen til at simulere minimumsafstrømningsforhold ved en bestemt vandføringsstation (Wood, 1974):

$$FL = \sum_i \left[ \frac{(Q_{o,i} - Q_{s,i}) \overline{Q_o}}{Q_{o,i}^2} \right]^2 \quad ,$$

hvor

$H_{s,j}$ :	simuleret trykniveau for boring j (m)
$H_{o,j}$ :	observeret trykniveau for boring j (m)
$Q_{s,i}$ :	simuleret daglig vandføring for dag i (l/s)
$Q_{o,i}$ :	observeret daglig vandføring for dag i (l/s)
$\overline{Q}_o$ :	gennemsnitlig observeret afstrømning i test perioden (l/s)
$\overline{Q}_s$ :	gennemsnitlig simuleret afstrømning i test perioden (l/s)

Minimumsafstrømnings indikatoren FL er meget følsom overfor observeret afstrømning tæt på nul og forudsætter omhyggelig udvælgelse af vandføringsstationer til kalibrering og validering. For at minimere støj bliver FL normaliseret i forhold til en valgt referencekørsel:

$$FL_{normalised} = \frac{FL}{FL_{reference-run}}$$

Modellens nøjagtighed i kalibrerings og valideringskørsler blev vurderet svarende til det angivne nøjagtighedskriterium i tabel 7.3. Det skal bemærkes, at kriteriet ikke er af typen ja/nej, men at performance vurderes i fem kategorier fra udmærket (excellent) til meget dårlig (very poor). Rationalet bag de specificerede tal i tabel 7.3 er som følger:

RMS værdien for trykniveau skal sammenlignes med usikkerheden på observeret trykniveau. Kilderne til usikkerhed og den opgjorte værdi er fastlagt som følger (Sonnenborg, 2001):

- målefejl: 0.1 m
- fejl på målepunktskoten: for mange boringer er kotefastsættelsen sket på basis af topografiske kort: 1.5 m
- skalafejl idet boringen er tilfældigt placeret indenfor et 1 km<sup>2</sup> modelgrid. Denne fejl kan vurderes som en typisk hydraulisk gradient multipliceret med halvdelen af gridstørrelsen: 1.5 m
- skalafejl som svarer til heterogenitet indenfor et modelgrid. Ifølge Gelhar (1996) kan denne fejl vurderes som autokorrelationslængden skalaen for log K (logaritmen for hydraulisk ledningsevne) multipliceret med standardafvigelsen af log K og den gennemsnitlige hydrauliske gradient: 2.1 m
- fejl som skyldes ikke stationaritet. Observationer stammer fra forskellige årstider. Fejlen kan estimeres som halvdelen af den typiske årlige fluktuation: 0.5 m
- andre effekter som følge af vertikal skalafejl og variationer i topografi: 0.5 m

Dette kan opgøres til en samlet fejl på 3.1 m, og svarer dermed til en RMS værdi på 6.2 m ved en 95 %'s konfidensgrænse. Sammenlignet med tabel 7.3 svarer dette til den midterste performance kategori (god).



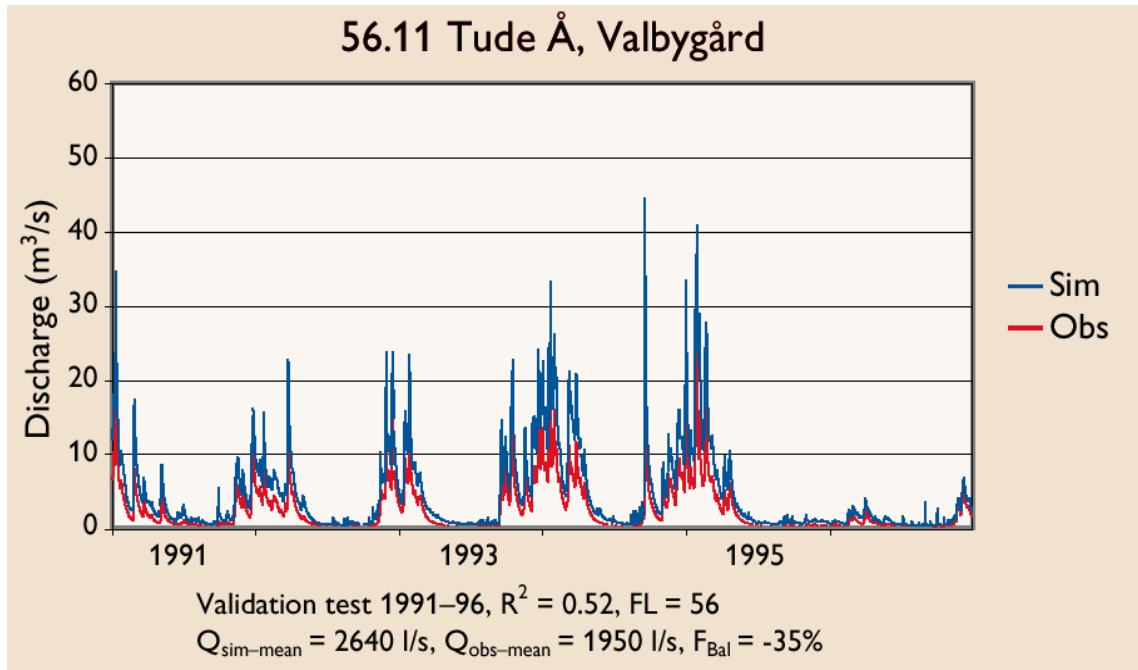
Figur 7.3 Udvalgte 28 vandføringstationer på Sjælland

Tabel 7.3 Opstillede performance kriterium for Sjællands modellen

Model performance	Excellent (5 points)	Very good (4 points)	Good (3 points)	Poor (2 points)	Very Poor (1 points)
RMS	< 4	4–6	6–8	8–10	> 10
R <sup>2</sup>	> 0.90	0.80–0.90	0.60–0.80	0.20–0.60	< 0.20
F <sub>bal</sub>	< 5%	5–10%	10–20%	20–40%	> 40%
Aggregated score:	> 4.5	3.5–4.5	2.5–3.5	1.5–2.5	< 1.5

Erfaringer med R<sup>2</sup> værdier for nedbør-afstrømningsmodeller (Nielsen og Hansen, 1973; Refsgaard, 1997) og for internationale vandløb (Harlen, 1991; Lidén, 2000 og Andersen et al., 2001) foreslår R<sup>2</sup> værdier mellem 0.50 og 0.95.

F<sub>bal</sub> for vandbalancen skal være så tæt på nul som muligt. Performance klasserne i tabel 7.3 er identiske med dem i Andersen et al. (2001).



Figur 7.4 Eksempel på beregning af performance indikatorer for Tude å (valideringstest)

Der findes ikke nogen specifikke værdier for FL-værdien for minimumsafstrømning, men denne værdi skal være så lille som mulig.

RMS værdier beregnes for hver af de 9 beregningslag, hvorimod  $R^2$  værdien og  $F_{\text{bal}}$  beregnes for hver af de 28 vandføringsstationer (aritmetisk middel), se eksempel i figur 7.4.

### 7.1.6 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Sjælland

Der blev som en start foretaget en sensitivitetsanalyse som viste hvilke parametre modellen var mest følsom overfor (Henriksen et al., 1997 og 1998):

- hydraulisk ledningsevne for kalk magasinet
- horisontal ledningsevne for sand
- vertikal ledningsevne for moræneler
- specifik magasintal
- dræntidskonstant, og
- lækagefaktor for udveksling mellem grundvand og vandløb

Kalibreringen blev for Sjælland indledningsvist baseret på en "trial-and-error" procedure baseret på dynamiske kørsler for at fastlægge de frie parametre. Kalibreringsperioden blev valgt som 1988-90.

Kalibreringen blev udført parallelt for to af de 3 delmodeller for Sjælland (nr. 2 og 3). I første omgang blev modellen for Nordsjælland (nr. 4) ikke kalibreret. De optimale parametre afveg kun i begrænset grad mellem to kalibrerede modeller for Vest- og Sydsjælland (Henrik-

sen et al., 1998). Der blev derfor valgt et sæt parametre som dækkede alle tre delmodeller for Sjælland (Model 1998).

I 2001 blev der gennemført en invers modellering med en stationær model for Nordsjælland. Der blev anvendt trykniveau observationer som kalibreringsmål (RMS). Dette blev gennemført ved at koble MIKE SHE og UCODE. Tre parametre blev optimeret ved den inverse modellering, nemlig hydraulisk ledningsevne for opsprækket moræneler, moræneler og sand. Endelig blev parameterverdier for frit magasintal, overflademagasiner og dræntidskonstanten fastlagt ved hjælp af dynamisk simulering for perioden 1988-90, med afstrømningsdata som kalibreringsmål. De optimerede parameterverdier blev efterfølgende overført til modellerne for Vest- og Sydjælland (Model 2001a).

Da der blev påvist en alvorlig vandbalancefejl i Model 2001a, som var baseret på nye klimadata fra DMI's 40x40 km net (baseret på nye nedbørskorrekationer baseret på håndtal for 1961-90 og modificeret Penman fordampning; Model 1998 var baseret på DJF's klimagrid), blev der foretaget en korrektion af nettonedbøren fra rodzonemodellen med en faktor 0.71 (Nord), 0.77 (Vest) og 0.75 (Syd) i inputtet til det øverste lag i grundvandsmodellen.

Korrektionsfaktorerne blev fastlagt på basis af resultater fra de større vandløbsoplande for perioden 1991-96. Herefter blev der gennemført en invers modellering af de 3 parametre der også blev optimeret i Model 2001a, hvorefter modellen blev kørt dynamisk for de 3 delområder (Model 2001b). Kalibreringsmetodik for Jyllandsmodellen er nærmere beskrevet i Sonnenborg (2000).

Model valideringen for Model 1998 bestod af følgende metodik:

- en ordinær split-sample test på anden periode (1991-96) end anvendt til kalibrering (1988-90)
- simulering for Nordsjælland for perioden 1991-96 med samme parametre som bestemt for de to andre delmodeller. Denne valideringstest kan klassificeres som en proxy-basin test (Klemes, 1986), og angiver modellens evne til simulering for andre dele af landet uden egentlig kalibrering

For Model 2001a, hvor simuleringerne blev gentaget med et modificeret nettonedbørs input (nye data fra DMI), blev en noget tilsvarende metodik taget i anvendelse:

- en ordinær split-sample test på en anden periode (1991-96) for Nordsjælland
- en proxy-basin test for Vest- og Sydsjælland for 1991-96 med de samme parametre, som blev fastlagt ved kalibreringen for Nordsjælland

For model 2001b blev der anvendt samme testmetodik som for Model 2001a.

### **7.1.7 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Jylland**

(mangler)

## 7.2 Beskrivelse af kalibrerings- og valideringsresultat

I tabel 7.4 er resultaterne af valideringstest i forhold til målt afstrømning sammenfattet.

Sub-model	Gauging station	1998 R <sup>2</sup>	2001b R <sup>2</sup>	FL <sup>2001b</sup> / FL <sup>1998</sup>	2001b F <sub>Bal</sub> (%)
S-Sjælland	57.37	0.52	0.54	1.2	-45
	59.01	0.72	0.76	1.7	+11
	59.05	0.61	-0.54	33 x 10 <sup>3</sup>	-70
	60.04	0.76	0.85	0.4	-14
	60.03	0.80	0.72	12	+29
	60.05	0.64	-0.39	2.0	-56
	61.03	-0.30	0.62	1.6	-27
	62.04	0.55	0.69	0.08	-2
W-Sjælland	51.07	0.51	0.90	0.9	+6
	55.01	0.64	0.91	3.0	-4
	55.06	0.81	0.90	0.87	-10
	56.09	0.75	0.88	29	-7
	56.10	0.13	0.62	2.0 x 10 <sup>6</sup>	-43
	56.11	0.59	0.88	0.54	-2
	57.01	0.79	0.71	0.15	-26
	57.04	0.74	0.94	0.49	-4
	57.12	0.80	0.93	0.45	+4
	57.21	0.67	0.90	2.7	+3
	57.46	0.71	0.86	2.1	-11
	57.49	0.81	0.83	0.24	-5
N-Sjælland	48.04	-0.23	-0.68	0.75	-20
	50.05	-0.01	-0.71	1.4	-7
	51.10	0.61	0.72	0.73	-9
	52.08	0.23	0.79	0.26	+4
	52.14	-1.6	0.31	0.95	-29
	52.17	0.58	0.89	1.1	-5
	53.05	0.74	0.78	0.56	-9
	58.08	0.27	0.49	1.1	+28
Median:		0.62	0.77	1.0	-7%
Mean:		0.46	0.71	–	-10%

Tabel 7.4 Resultater af valideringstest for Model 1998 og Model 2001b

Resultatet af valideringen er i tabel 7.5 sammenfattet med performance indikatorer.

		RMS	R <sup>2</sup>	F <sub>Bal</sub>
W-Zealand	1998	★★	★★★	-
	2001a	★★	★★	★★
	2001b	★★	★★★★★	★★★★★
N-Zealand	1998	★★★★	★★	-
	2001a	★★★★	★★	★
	2001b	★★★★	★★★	★★★
S-Zealand	1998	★★★	★★★	-
	2001a	★★★	★★	★★
	2001b	★★★	★★★	★★
All-Zealand	1998	★★★	★★★	-
	2001a	★★★	★★	★★
	2001b	★★★	★★★★	★★★

Tabel 7.5 Resultat af validering for Sjælland

Den aggregerede score vist i tabel 7.5 giver et letforståeligt overblik af modellens performance, i forhold til de 3 forskellige modelversion og de 3 benyttede kriterier. Model 2001b har på alle måder en performance som er bedre eller lige så god som de to andre modelversioner.

I tabel 7.6 er vist de kalibrerede parameterværdier.

Geological layer	Horizontal hydraulic conductivity [m/s]		Vertical hydraulic conductivity [m/s]		Specific yield		Storage coefficient
	1998	2001b	1998	2001b	1998	2001b	1998/2001b
Layer 1 (Fractured clayey till)	$1 \times 10^{-5}$ m/s	$1.45 \times 10^{-5}$ m/s	$1 \times 10^{-7}$ m/s	$1.45 \times 10^{-7}$ m/s	0.25	0.06	0.0001
Layers 2, 4, 6, 8 and 10 (Clayey till)	$1 \times 10^{-7}$ m/s	$1.9 \times 10^{-8}$ m/s	$1 \times 10^{-9}$ m/s	$1.9 \times 10^{-9}$ m/s	0.25	0.06	0.0001
Layers 3, 5, 7 and 9 (Sand)	$1 \times 10^{-4}$ m/s	$1.35 \times 10^{-4}$ m/s	$1 \times 10^{-5}$ m/s	$1.35 \times 10^{-5}$ m/s	0.25	0.26	0.0001
Layer 11 (Chalk and limestone)	Distributed	Distributed	Distributed	Distributed	0.25	0.25	0.0001
<b>Governing parameters for surface water flow</b>							
					1998		2001b
Surface Manning (M) roughness					2		2
Surface detention storage					0.02		0.01
Drainage time constant					$8 \times 10^{-7}$		$7 \times 10^{-8}$

Tabel 7.6 Kalibrerede parametre for Model 1998 og Model 2001b

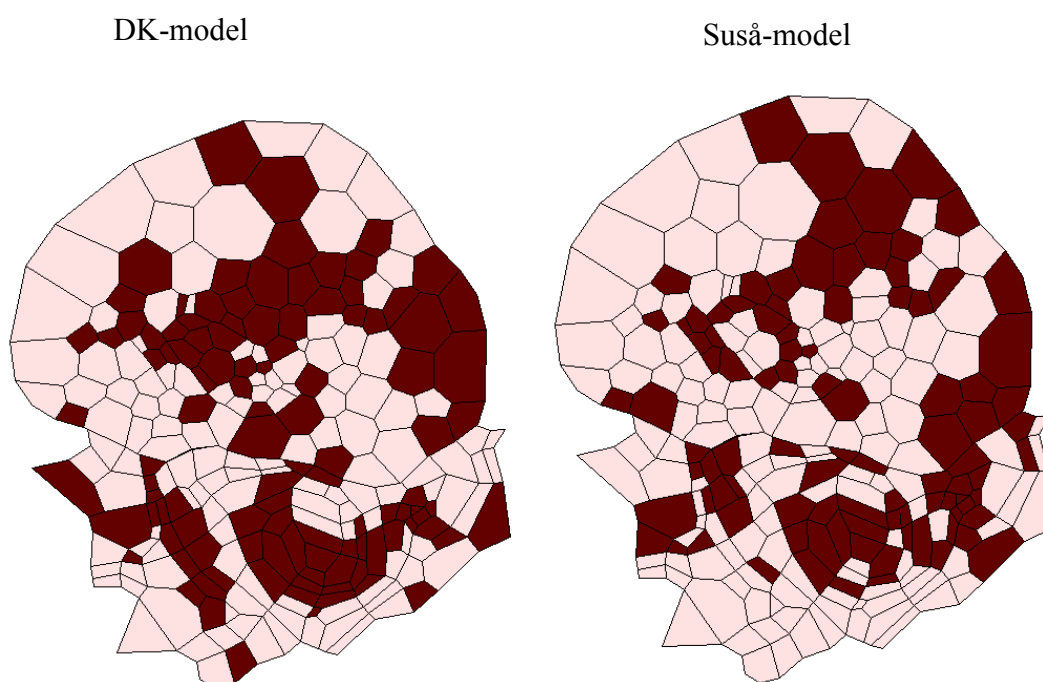
## 7.2.1 Sammenligning af DK-model med Suså model

DK-modellen for Sjælland er desuden søgt valideret ved sammenligning med Suså model.

Principperne bag Suså model er nærmere beskrevet i Refsgaard og Stang (1981).

Suså modellen er en distribueret dynamisk hydrologisk model som for grundvandsdelens vedkommende er horisontalt diskretiseret i et polygonnet med 112 polygoner (Nord) med varierende "maskevidde", og som vertikalt er opdelt på et øvre sekundært (frit) magasin, over et nedre primært magasin (i kalken, artesisk). De to magasiner er adskilte af et lav-permeabelt morænelerslag. Det totale modelområde for Suså Nord er ca. 1100 km<sup>2</sup>.

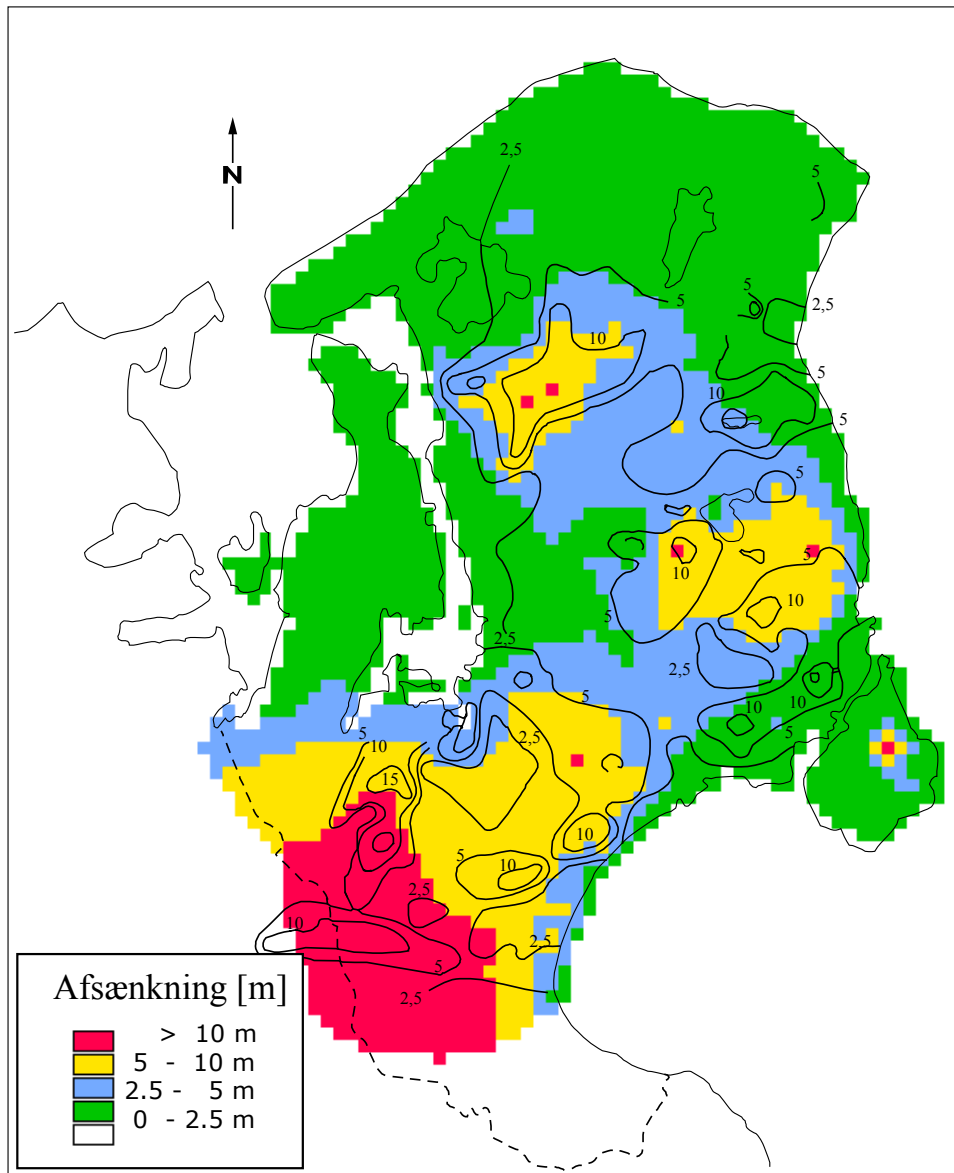
Kun for det primære magasin er der mulighed for simulering af horisontal strømning mellem polygonerne. Det øvre sekundære magasin har vandspejl et par meter under terræn, og styrer vandudvekslingen mod vandløb, dræn mv. Det øvre sekundære magasin er yderligere distribueret indenfor hver polygon ud fra topografi og består i alt af 448 elementer (altså en underinddeling med 4 elementer indenfor hver polygon. Udvekslingen mellem det øvre sekundære magasin og det nedre primære magasin er bestemt af trykniveauforskelle og lækagekoefficienter på subpolygonniveau (448 elementer / "Hypsografisk kurve"), dvs. baseret på det frie vandspejlsniveau (fastlagt ud fra en "lumped beskrivelse" på subpolygonniveau) og "middelvandspejlet" fra det primære magasin (defineret ud fra de 112 polygoner).



Figur 7.5 Områder med stor (mørk) og lille (lys) grundvandsdannelse (øverst DK-model nederst Suså model). DK-model giver en grundvandsdannelse =46 mm/år til beregningslag 3, Suså model = 51 mm/år til det primære magasin (Henriksen, 2002).

## 7.2.2 Validering i forhold til ældre data for Hovedstadsregionen

Endelig er modellen søgt valideret ved en kørsel uden oppumpning og sammenligning af simuleret afsænkning i nuværende situation, baseret på pejledata fra før indvindingen for alvor slog igennem i Nordsjælland (se nedenstående figur 7.6). Der blev simuleret afsænkninger som ud fra en visuel bedømmelse var i god overensstemmelse med "observationer" (Krüger, 1981-figur 3.8 p. 21).



Figur 7.6 Simuleret afsænkning med DK-model vist med farveskala i forhold til trykniveau uden oppumpning fra starten af 1900-tallet (Krüger, 1981-figur 3.8 p. 21).

Der er foretaget en sammenligning af simuleret minimumsvandføring i Havelse å uden oppumpning og sammenligning med afstrømningstal fra før Havelse, Attemose og Strø's etablering i midten af 50'erne. Såvel den %-vise påvirkning af baseflow og den absolutte

simulering af minimumsafstrømning i Havelse år "ramte" indenfor max. ca. 10 % afvigelse mellem DK-model og observationsdata (Hedeselskabet, 1982; Hedeselskabet, 1978) fra Havelse å. Denne afvigelse er lille i forhold til usikkerheden på minimumsafstrømningen bedømt ud fra ca. 10 årige afstrømningsmålinger.

### 7.3 Vandrådetets metodik og resultater

Vandrådet tog i sin opgørelse (Miljøstyrelsen, 1992) udgangspunkt i nettonedbøren, som en størrelse der er bestemmende for den udnyttelige ressource. I princippet er nettonedbøren, fratrukket den del der føres direkte til vandløb, tilgængelig for grundvandsindvindingen. I praksis vil jordlagenes geologiske og kemiske forhold imidlertid begrænse de tekniske indvindingsmuligheder. Endelig vil politisk bestemte hensyn til vandføringen i recipienterne sætte grænser for omfanget af indvindingen.

Vandrådet baserede således sit estimat på at nettonedbøren er bestemmende for vandressourcens absolutte størrelse, mens de hydrogeologiske forhold bestemmer, hvor stor en del af nettonedbøren det er muligt at indvinde fra grundvandsressourcen. Eksempelvis vil der kunne indvindes en meget større vandmængde fra et gruslag end fra et lerlag, selvom lagene som udgangspunkt indeholder den samme mængde vand. Dette skyldes lerets store evne til at holde på vandet. De jordlag, der er interessante ud fra et vandindvindings-synspunkt, må således have en god evne til at lede vandet.

Vandrådet baserede derfor sin opgørelse på en antagelse om, at en bestemt del af nettonedbøren (indvindingsprocenten) er tilgængelig for vandindvindingen. Indvindingsprocenten blev i praksis fastlagt på baggrund af de hydrogeologiske forhold (Miljøstyrelsen, 1992).

Vandrådetets opgørelse var ikke baseret på korrigerede nedbørstal, idet det på basis af en sammenligning af afstrømningen for større oplande blev vurderet, at der var en tilsvarende fejl på fastlæggelsen af aktuell fordampning, som opvejede den systematiske fejl på nedbøren (Miljøstyrelsen, 1995).

Den anvendte opgørelsesmetode var forbundet med betydelig usikkerhed, idet tallene blev fastsat under forudsætning af normal recipientbeskyttelse, og derfor ikke tog hensyn til forskellige recipientmålsætninger i et givent område (Miljøstyrelsen, 1995).

På baggrund af geologisk betingede indvindingsprocenter og nettonedbør samt data for nuværende indvinding og medianminimumsafstrømning skønnet på kommunebasis blev der udarbejdet følgende kortbilag (Miljøstyrelsen, 1989):

- årlig nettonedbør (1931-60, mm),
- medianminimumskort (l/skm<sup>2</sup>)
- indvindingsprocent på kommunebasis (% af nettonedbør)
- grundvandsressource på kommunebasis (indvindingsmulighed, mm)
- grundvandsindvinding på kommunebasis (1985, mm)
- restressource på kommunebasis (mill. m<sup>3</sup> pr. år)
- udnyttelsesgrad på kommunebasis (indvinding i % af grundvandsressource)

I forbindelse med Vandrådetets arbejde blev der foretaget simple skøn over påvirkningsgraden (af vandløbenes medianminimumsvandføring). For vandforsyningsindvindinger blev det antaget, at påvirkningen af minimumsvandføringen udgjorde ca. 10 % af samlet påvirk-

ning (samlet påvirkning = påvirkning af medianminimumsvandføring + påvirkning af underjordisk afstrømning + induceret infiltration). Begrundelsen var, at en stor del af oppumpningen returneres til vandløb (i form af spildevand) eller evt. vil kunne reduceres ved kompensationspumpning. Der blev anvendt en tilladelig påvirkning på 20 % af medianminimum (ved ressourcevurderingen for overfladevand), Miljøstyrelsen (1995).

Den samlede nettonedbør i Danmark blev af Vandrådet opgjort til ca. 12 mia. m<sup>3</sup> i et normalår. En del af denne vandmængde finder vej til grundvandet, men da kun en del af grundvandsressourcen kan udnyttes til vandindvinding, uden at recipienternes vandføring eller vandstanden i vådområderne reduceres uacceptabelt, kan den udnyttelige grundvandsressource anslås til ca. 1.8 mia. m<sup>3</sup>/år. Det er således et i sidste instans politisk bestemt hensyn til recipienterne, der er bestemmende for den udnyttelige grundvandsresources størrelse, konkluderede Vandrådet (Miljøstyrelsen, 1992).

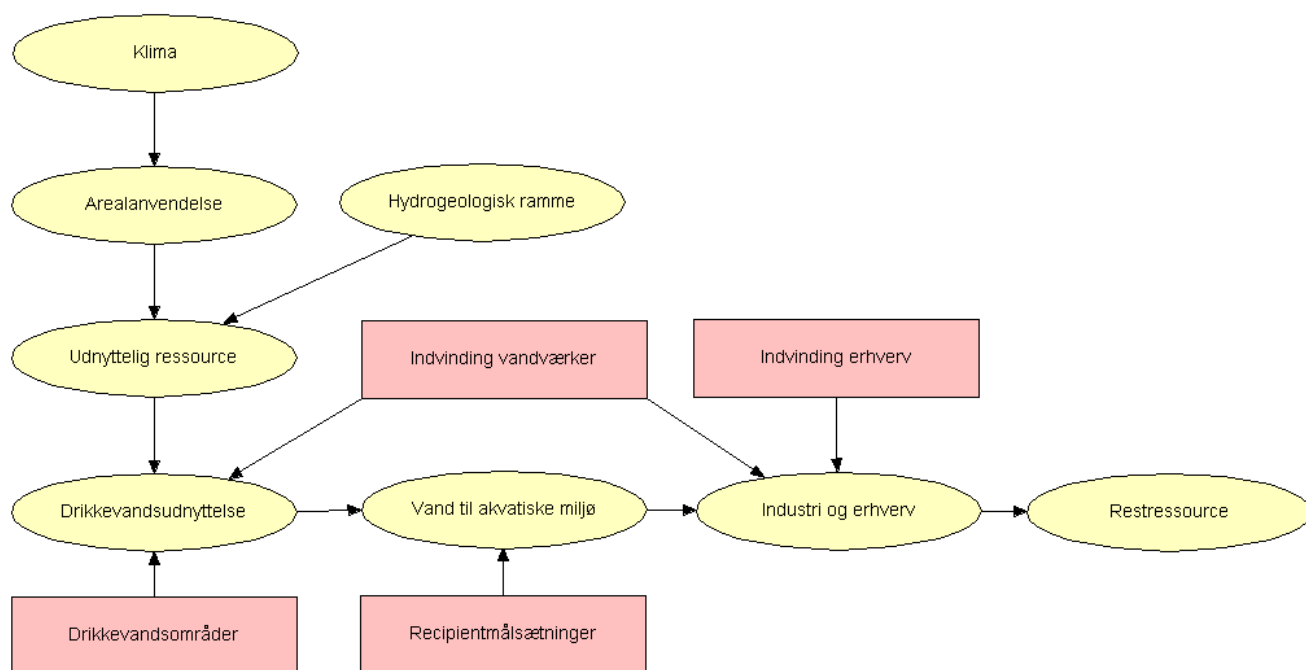
Vandrådet foretog ikke fradrag i ressourcen som følge af forurening (f.eks. miljøfremmede stoffer), og inddrog heller ikke klimavariationer.

Vandrådets opgørelse var således baseret på en empirisk og stærkt forenklet vandbalance metodik på kommunebasis. Metoden gav ikke mulighed for at vurdere betydning af usikkerheder på de estimerede tal og udnyttede ikke eksplicit de betydelige nationale databaser om geologi, jordartsforhold, arealanvendelse, klima og hydrologi.

## 7.4 Ny metodik til vurdering af udnyttelig vandressource

### 7.4.1 Disponering af den udnyttelige grundvandsressourcen mellem drikkevand, akvatiske miljø, erhverv-/industri mm.

De klimatiske variationer i nedbør og fordampning, samt ændringer i arealanvendelse, afvandingsforhold, urbanisering mv. er betydende for grundvandsdannelsen og afstrømningen i vandløb. Derudover har den hydrogeologiske ramme en betydning for hvor store vandmængder der nedsiver til de magasiner hvorfra der kan foretages vandindvinding. Den udnyttelige grundvandsressource afhænger derfor både af de klimatiske forhold, arealanvendelse og de naturgivne forhold, dvs. den hydrogeologiske ramme (forekomst af grundvandsmagasiner og regionale strømningsveje, grundvandsdannelsens størrelse osv.). Se principskitse herfor i figur 7.7.



Figur 7.7 Den udnyttelige ressource og rækkefølge for prioritering af forskellige anvendelser af grundvand

I praksis administreres vandressourcen og tilladelse til vandindvinding i dag således at vand til drikkevandforbrug har højeste prioritet, herefter følger hensynet til det akvatiske miljø hvorimod indvinding til industri og erhverv kun kan ske i et omfang, som recipientmålsætninger tillader. I praksis vil det sige, at man mange steder administrerer markvandings-tilladelserne ud fra hvor stor en ressource der er tilbage, efter at hensyn til drikkevandsfor-syning og restvandføringen i vandløb er tilgodeset.

Indvinding til vandværker omfatter i et væsentligt omfang også en forsyning af industri og erhverv, idet kun ca. 1/3 af forsyningen af disse kategorier sker fra egne indvindingsboringer, resten hentes fra vandværker (derfor de to pile i figur 7.7).

Den udnyttelige ressource i figur 7.7 afhænger af arealanvendelsen, både med hensyn til kvantitet og kvalitet (grundvandsforurening).

I praksis anvender man i dag i en del amter (Thomsen, 2002) en metodik hvor man først vurderer grundvandsdannelsen på grundlag af målinger af vandløbenes mindste vandføringer (medianminimum) ud fra den antagelse, at vandføringen i disse minimumssituationer alene består af tilstrømmet grundvand. Beregningerne korrigeres for tilledning af spildevand og indvinding af grundvand i oplandet. Herved kan indvindingsstilladelser til vandværker, markvanding og andre anlæg opgøres og sammenholdes med ressourcens størrelse (=grundvandsdannelsen). På grund af udsvingene i grundvandsdannelse anbefaler Miljøstyrelsen, at amterne til vandressourceopgørelsen klimakorrigerer med en faktor 0.7 (Miljøstyrelsen, 1995). Det er væsentligt at slå fast, at det er nødvendigt at disponere over en del af grundvandsressourcen til opretholdelse af vandføringen i vandløb og tilstrømningen til søer og vådområder.

Hvis man foretager en sådan opgørelse over disponeringen af vandressourcen alene for områder med særlige drikkevandsinteresser f.eks. gennemført i Århus amt (Thomsen, 2002), viser det sig at en centralisering af vandindvindingen til områderne med særlige drikkevandsinteresser vil få væsentlige følger for vandføringen i vandløb og tilstrømningen til søer og vådområder og dermed for natur- og vandkvaliteten. Herudfra kan det måske konkluderes, at såfremt de vigtigste områder i natur- og vandkvalitetsplanerne skal oprettholdes i fremtiden, skal to forhold være opfyldt:

- Indvindingen skal være decentral, også uden for områderne med særlige drikkevandsinteresser, for at den ikke bliver så koncentreret, at områder påvirkes uacceptabelt
- Områderne med særlige drikkevandsinteresser skal være relativt store for at sikre, at grundvandsdannelsen i områderne kan holde trit med vandbehovet til vandforsyning, mark- og gartnerivanding, vandløb, søer og vådområder.

Det er derfor væsentligt at inddrage såvel drikkevandsområderne som recipientmålsætningerne som et grundlag i vurderingen af udnyttelig vandressource og disponering af ressourcen på forskellige forbrugskategorier (drikkevand, akvatiske miljø, erhversvanding, industri mv.).

I nærværende opgørelse er der foretaget opgørelser af samlede vandindvindingsmulighed under hensyn til forskellige scenarier for:

- Nettonedbør (her er anvendt en variationsramme svarende til perioden 1991-2000, som havde både meget tørre år og meget våde år, jf. kapitel 5). I alt er derfor foretaget vurderinger med en nettonedbør svarende til hvert års nettonedbør plus middelværdier, i alt 11 scenarier.
- Vandindvinding (her er foretaget vurderinger baseret på en skalering af 2000 oppumpningen i følgende kategorier: 0 %, 50 %, 80 %, 100 %, 120 % og 150 %, i alt 6 scenarier)

## 7.4.2 Definition af udnyttelig grundvandsressource

Vurdering af *udnyttelig grundvandsressource* ("safe yield") er den vandmængde, der med bibeholdelse af en god vandkvalitet og opretholdelse af recipient hensyn, maksimalt kan indvindes fra et grundvandsmagasin, og som gendannes naturligt uden uønskede følger som f.eks. (Miljøstyrelsen, 1995):

- Fortsat afsenkning af grundvandsmagasinet
- Kvalitetsforringelser i magasinet som følge af overudnyttelse (sulfat, nikkel mv.)
- Ind- og opsivning af saltvand
- U hensigtsmæssig påvirkning af eksisterende vandindvindinger (afsenkning)
- Uacceptabel reduktion af vandløbenes minimumsvandføring (indvinding) reducerer minimumsvandføring under kravværdi til f.eks. restvandføring, eller påvirkningsgraden overstiger det acceptable for den givne recipientmålsætning
- Uønsket påvirkning af vådområder (tørlægning)

Matematiske modeller understøttet af feltdata kan spille en afgørende rolle for opgørelse af den fremtidige opførsel af et grundvandssystem, i forhold til forskellige påvirkninger Das-Gupta og Onta (1997), og med henblik på identifikation af en "bæredygtig" udnyttelse og forvaltning af vandressourcen.

Begrebet udnyttelig grundvandsressource ("safe yield") har visse mangler og begrebet "bæredygtig udnyttelse" er en idé som anvendes i udbredt omfang, men som måske ikke er særligt godt forstået i det hele taget. Generelt er det sådan, at en bæredygtig udnyttelighed af et magasin skal være betragteligt mindre end grundvandsdannelsen, hvis der skal være en tilstrækkelig vandmængde til rådighed til understøttelse af både kvantitative og kvalitative forhold for vandløb, kilder, vådområder, og grundvandsafhængige økosystemer (Sophocleous, 2000). For at sikre bæredygtighed er det derfor afgørende nødvendigt, at begrænsninger i udnyttelsen etableres på basis af hydrologiske principper vedr. vandbalancen. Hydrologiske modeller vil kunne bidrage til at tilvejebringe sådanne relationer mellem udnyttelsesgrad og påvirkninger af trykniveau og afstrømning.

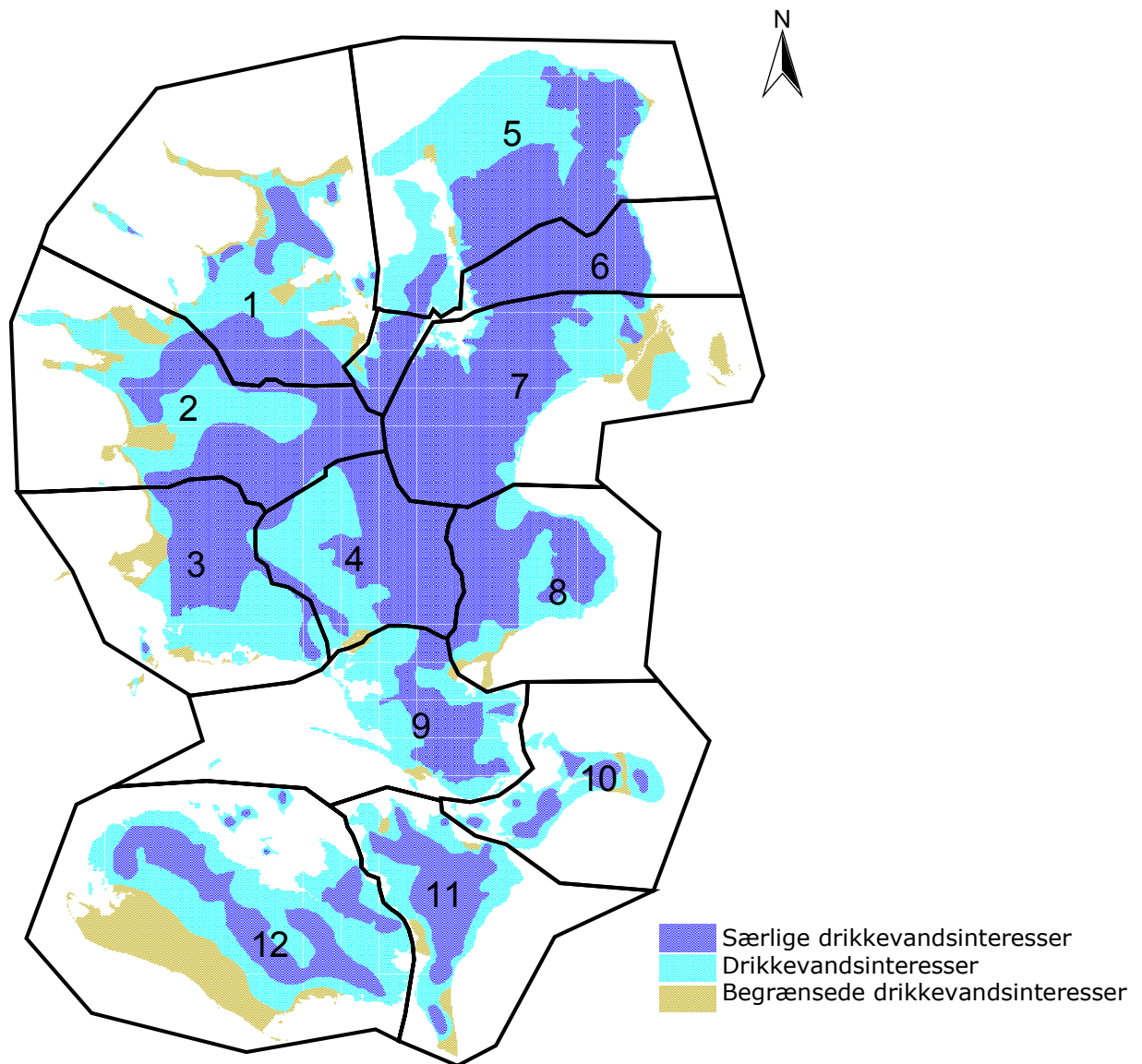
På baggrund af DK-modellen er det muligt at vurdere såvel ferskvandskredsløbets nuværende tilstand (grundvandsdannelse, trykniveau og afstrømning) og ændringer i denne tilstand som følge af vandindvinding og nettonedbør (betydning af klima og arealanvendelse). Modellen kan beskrive såvel den tidlige som den rumlige variation i disse forhold, og dermed give mulighed for vurdering af dels vandbalancen opgjort på forskellige kategorier af drikkevandsområder eller forskellige recipientmålsætninger for enkelte strækninger.

DK-modellen er en landsdækkende model som skal give et overblik over den nuværende ressourceudnyttelse på en ensartet måde. Som referencekørsel er valgt en situation med nuværende klima (1991-2000) uden oppumpning. Begrænsningerne i ressourcen som skal inddrages udgøres dermed af:

- afsenkning af trykniveau (m i forhold til referencekørslen)
- maksimal påvirkning af vandløb og vådområder (% i forhold til referencekørslen)
- fradrag i ressource som følge af forurening (%-vis reduktion af indvindingsmuligheden i forhold til referencekørslen, efter at krav til afsenkning og vandløbspåvirkning er honorerede)

### 7.4.3 Skala for opgørelsen

Opgørelsen med DK-modellen baseres dels på de 11 delområder og dels på en underinddeling af delområder i vandbalanceområder jf. Henriksen et al. (1998), hvor de 3 delmodeller som dækker Sjælland eksempelvis er opdelt på i alt 9 vandbalance oplande. Nordsjælland er således opdelt på 3 delmodeller (se figur 7.8).



Figur 7.8 Eksempel på opdeling af de 3 delmodeller for Sjælland på i alt 12 vandbalance oplande til brug for ressourceopgørelsen med DK-model.

#### 7.4.4 Metodik for opgørelsen af udnyttelig ressource i relation til vandløbspåvirkning

Der er anvendt følgende kriterier for vurdering af acceptabel vandføringsreduktion i forhold til målsætninger (Miljøstyrelsen vejledning i recipientkvalitetsplanlægning, 19xx). Indvinding af grundvand til andre formål end forsyning med drikkevand, må ikke være større end at grundvandets kvalitet og kvantitet kan bevares på langt sigt, og at opfyldelsen af kvalitetsmålsætningerne for vandløbene ikke hindres. Den maksimale påvirkning af vandløbene fastsættes herefter jf. tabel 7.7.

Målsætning	Målsætningskategori	Acceptabel påvirkning af minimumsflow (max. reduktion i % af vandføring uden pumpning)
Naturvidenskabelige interesseområder	A	5 %
Gyde- og opvækstområde for laksefisk	B1	10 %
Laksefiskevand	B2	15 %
Karpefiskevand	B3	25 %
Afledning af vand, påvirkning af spildevand, vandindvinding og okkerbelastning	C-F	50 %

*Tabel 7.7 Målsætninger for vandløb og acceptable reduktioner af minimumsvandføringen*

Amterne forvalter administrationen af vandindvindingstilladelser i relation til vandløbspåvirkning meget forskelligt. En del amter benytter en metodik jf. ovenstående, mens andre amter har fastlagt en minimumsvandføring som de kræver overholdt (f.eks. visse amter på Sjælland). Der er et meget stort behov for videnopbygning med hensyn til fastlæggelse af en bedre og mere ensartet metode, som også er relevant med hensyn til opnåelsen af givne økologiske målsætninger (i forhold til det akvatiske miljø / fisk).

Den metodik vi forestiller os bør honorere følgende krav:

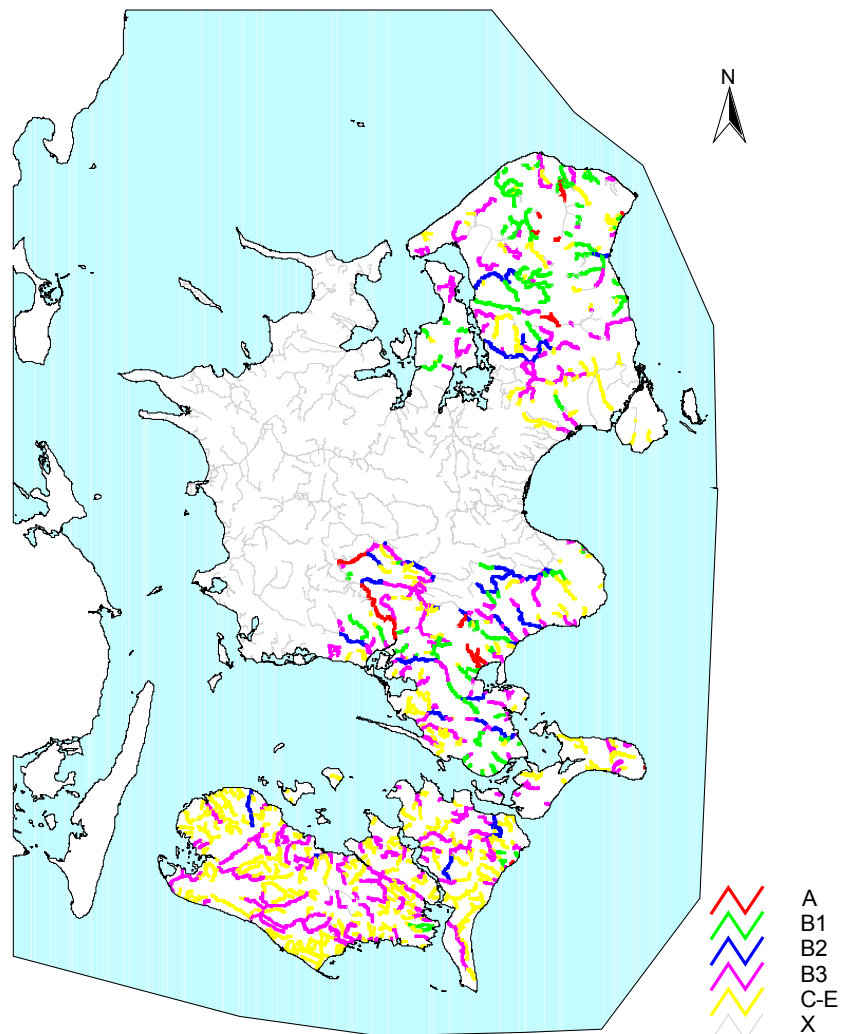
- reference situationen bør være en situation uden oppumpning
- metoden bør baseret på en maksimal %-vis påvirkning af reference situationen
- det er reduktionen i grundvandsafstrømning opgjort i forhold til delstrækninger (med forskellig målsætning), og ikke reduktionen af det samlede områdeintegrerede flow (f.eks. ved en vandføringsstation), der bør være den centrale størrelse
- der bør af hensyn til DK-modellens skala introduceres en tærskel for hvor lille et område der kan analyseres på, såfremt resultaterne skal have mening (for at undgå tilfældigheder når der analyseres på oplande som er mindre end 25-50 km<sup>2</sup>)

Der foreslås derfor følgende metodik:

- situationen uden oppumpning og med klima svarende til 1991-2000 udgør ref. Kørslen
- tallene i tabel 7.7 anvendes til at vurdere begrænsninger i udnyttelig ressource

- strækninger grupperes jf. tabel 7.7 og resultater opgøres dels for 11 delmodelområder og for områder med "særlige drikkevandsinteresser" indenfor disse
- det forudsættes at en given målsætningskategori mindst udgør 5 % af det samlede opland, før en evt. begrænsning indregnes (eksempelvis udgør områder med naturvidenskabelige interesser (A) typisk en mindre del af det samlede opland, hvis kun et par % af oplandet udgøres af sådanne strækninger vil det typisk svare til et område som er mindre end 100 km<sup>2</sup>, og påvirkninger vil derfor være forbundet med store usikkerheder, i stedet flyttes fokus på målsætningskategori (B1), idet denne typisk er repræsenteret i mere udbredt omfang

I skrivende stund er det muligt at trække målsætninger ud fra AIS systemet (der mangler dog fortsat data fra nogle amter (f.eks. Roskilde og Vestsjælland). Hvis ikke der kan trækkes data ud fra AIS for samtlige amter så er der her en barriere for at gennemføre metoden beskrevet ovenfor. Alternativt er det nødvendigt at indhente data direkte fra amterne til opgørelsen. I figur 7.9 er vist et eksempel på udtræk fra AIS for Sjælland.



Figur 7.9 Klassificering af vandløbsmålsætninger på Sjælland (data fra AIS)

Det var ikke muligt med Vandrådetets simplificerede metode at regne på påvirkningen af strækninger med forskellige målsætningskategorier. Med DK-modellen er det relativt uproblematisk at foretage udtræk af påvirkninger af delstrækninger og efterfølgende gruppere disse resultater enten indenfor OSD områder eller at opgøre den akkumulerede påvirkning for konkrete vandløbsoplande, med en vifte af forskellige krav til delstrækninger.

Det er imidlertid ikke hensigten med DK-modellen at skulle optimere vandindvindingen men derimod at give et overblik over den udnyttelige grundvandsressource, på lidt større skala.

#### **7.4.5 Metodik for opgørelsen af udnyttelig ressource i relation til afsænkning af trykniveau**

En vurdering af maksimal afsænkning af trykniveau og begrænsning i ressource som følge af påvirkning af øvrige indvindere, introduktion af vandkvalitetsproblemer (f.eks. nikkel, sulfat, saltvand) eller forøget sårbarhed som følge af meget stor induceret grundvandsdannelse vil typisk kræve en mere konkret vurdering, som også vil kræve en analyse på mindre skala (f.eks. for en enkelt kildeplads og indvindingsboringeres filtersætning).

Den acceptable afsænkning vil måske afhænge af en definition af konkrete problemområder, f.eks. at trykniveauet afsænkes under toppen af nogen problematiske aflejringer (f.eks. kalk) eller at der i områder med punktforurening ikke sker yderligere påvirkning af strømningsforholdene med risiko for at forureningen trækkes ned i de primære magasiner.

Problemstillingen har været drøftet med fagfolk i Københavns og Frederiksborg amt, uden at det har været muligt at pege på et "generelt" anvendeligt kriterium.

Ved en stor afsænkning af trykniveauet er der alt andet lige større risiko for at der trækkes noget forurennet overfladenært grundvand ned i de dybere magasiner, end hvis trykniveauet ikke er afsænket. Kvantificering af udnyttelsesgraden i forhold til afsænkning giver dog ikke mening, hvis ikke at en given afsænkning medfører reelle problemer for grundvandsressourcen.

Der er betydelig afsænkning både i Sønderø området og i København-Roskilde-Køge området, visse steder op til 10 m. Det er imidlertid ikke nødvendigvis et problem at bibeholde en god vandkvalitet, hvilket dokumenteres af overvågningsdata. Sønderø området har generelt en god vandkvalitet i forhold til Køge bugt området, med samme afsænkning. Problemstillingen kræver derfor en mere detaljeret tilgang.

Det foreslås derfor at udnyttelig grundvandsressource ikke blot vurderes isoleret i forhold til afsænkning, men at andre faktorer (f.eks. forureningsgrad af grundvandet) inddrages i sådanne analyser.

I forbindelse med DK-model har vi derfor valgt at analysere afsænkningen af grundvandet i forhold til en situation uden pumpning (med 1991-2000 klima) angivet i meter. Ud fra belysning af denne størrelse for de enkelte 11 delområder, illustreres påvirkningens omfang i

forhold til dels det øvre regionale grundvandsmagasin (beregningsslag 3 for Sjælland) og det dybe regionale grundvandsmagasin (beregningsslag 9 for Sjælland). Samtidig får man et billede af om det er de øvre eller de dybere magasiner der i dag med den nuværende indvindingsstrategi er mest påvirkede.

#### 7.4.6 Simuleringskørsler

DK-modellen er en dynamisk model som i princippet kan laves til såvel transiente som stationære simuleringskørsler. Til kalibrering og validering af modellen er dynamiske kørsler nødvendige (bl.a. split sample tests). Dynamiske kørsler er imidlertid tidskrævende og forudsætter desuden fastlæggelse af initialbetingelser, som slet ikke er uden problemer, idet initialperiodens længde vil være meget betragtelig, hvis f.eks. trykniveau skal indstilles på en ny situation, ved en væsentlig ændring af f.eks. klima eller oppumpning.

I forbindelse med bæredygtig grundvandsressource er det desuden langtidspåvirkningen af grundvandssystemet som har betydning, og ikke den påvirkning vi vil se f.eks. i perioden 1991-2000.

Det er derfor valgt at fokusere på følgende spørgsmål:

1. I hvilket omfang kan stationære simulering bruges til en fyldestgørende beskrivelse af udnyttelig grundvandsressource i forhold til grundvandsdannelse, trykniveau og påvirkning af minimumsafstrømning?
2. Hvilke typer transiente kørsler er der behov for og hvad skal de belyse?

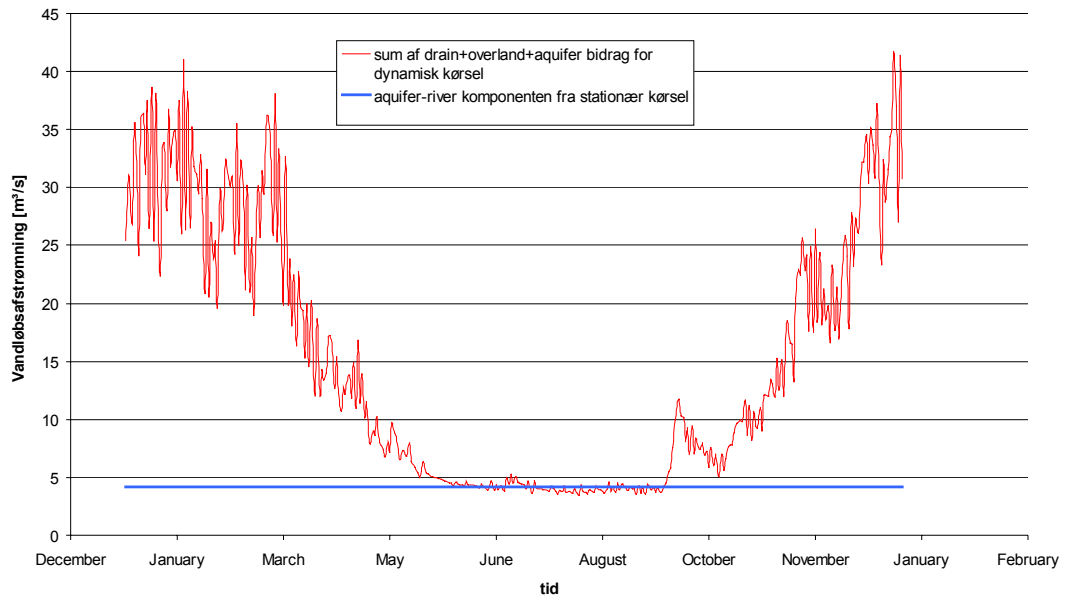
For at besvare spørgsmål 1 er der lavet en række stationære kørsler med DK-modellen på baggrund af forskellige kombinationer nettonedbør og oppumpning. Det er samtidigt foretaget en test i forhold til en dynamisk kørsel med midlede daglige nettonedbørsværdier ud fra perioden 1991-2000, at den stationære model med samme midlede nettonedbør giver "samme" resultat som den dynamiske model, baseret på midlede daglige nettonedbørsværdier.

Det er blevet vist, at en stationær version giver samme resultat som en dynamisk version for følgende størrelser:

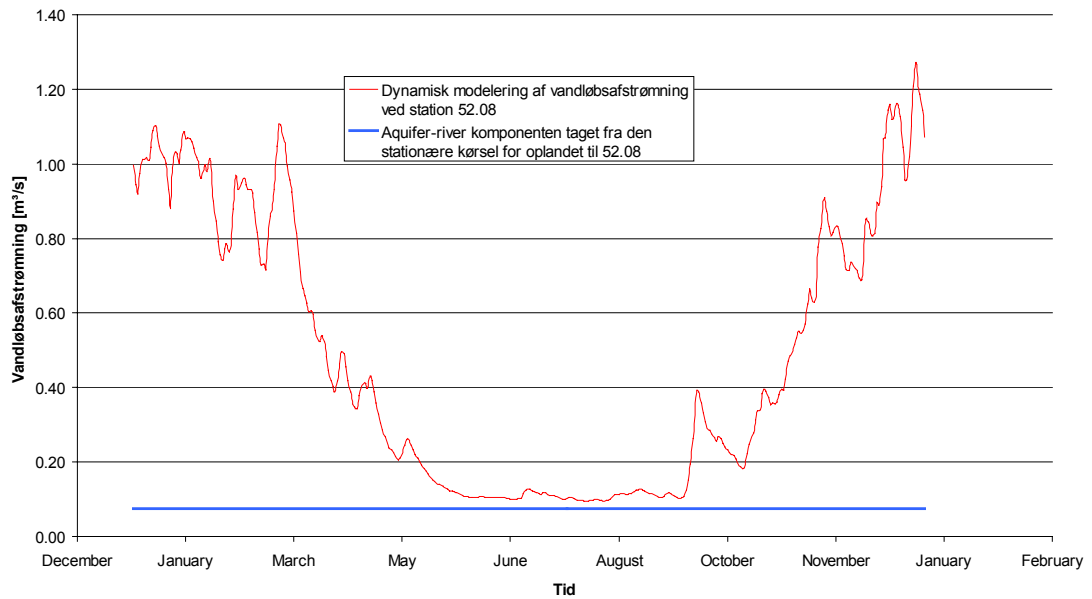
- simuleret grundvandsdannelse til beregningsslag 3 og 9
- simuleret trykniveau til beregningsslag 3 og 9

Der er et problem omkring sammenligning af en stationær og en dynamisk model med hensyn til vandløbsafstrømning. Den stationære model giver imidlertid mulighed for udtræk af grundvandsafstrømningen til vandløb, og denne størrelses brugbarhed som en ref. minimumsafstrømning er derfor blevet analyseret. I figur 7.10 er vist resultatet af en sammenligning af denne størrelse for hele Nordsjælland med den simulerede afstrømningshydrograf for Havelse å (52.07 Strø) og for hele oplandet til Sjælland nord, med den tilsvarende dynamiske model (med samme nettonedbørs- og oppumpningsgrundlag). Det vurderes at den stationære model kan simulere grundvandsafstrømningen til vandløb, så størrelsen akvifer-river kan anvendes som brugbar referencestørrelse for påvirkning af minimumsafstrømningen (i det følgende betegnet Ref. minimumsafstrømning).

### sjn-afstrømning i vandløb



### sjn-havelse å

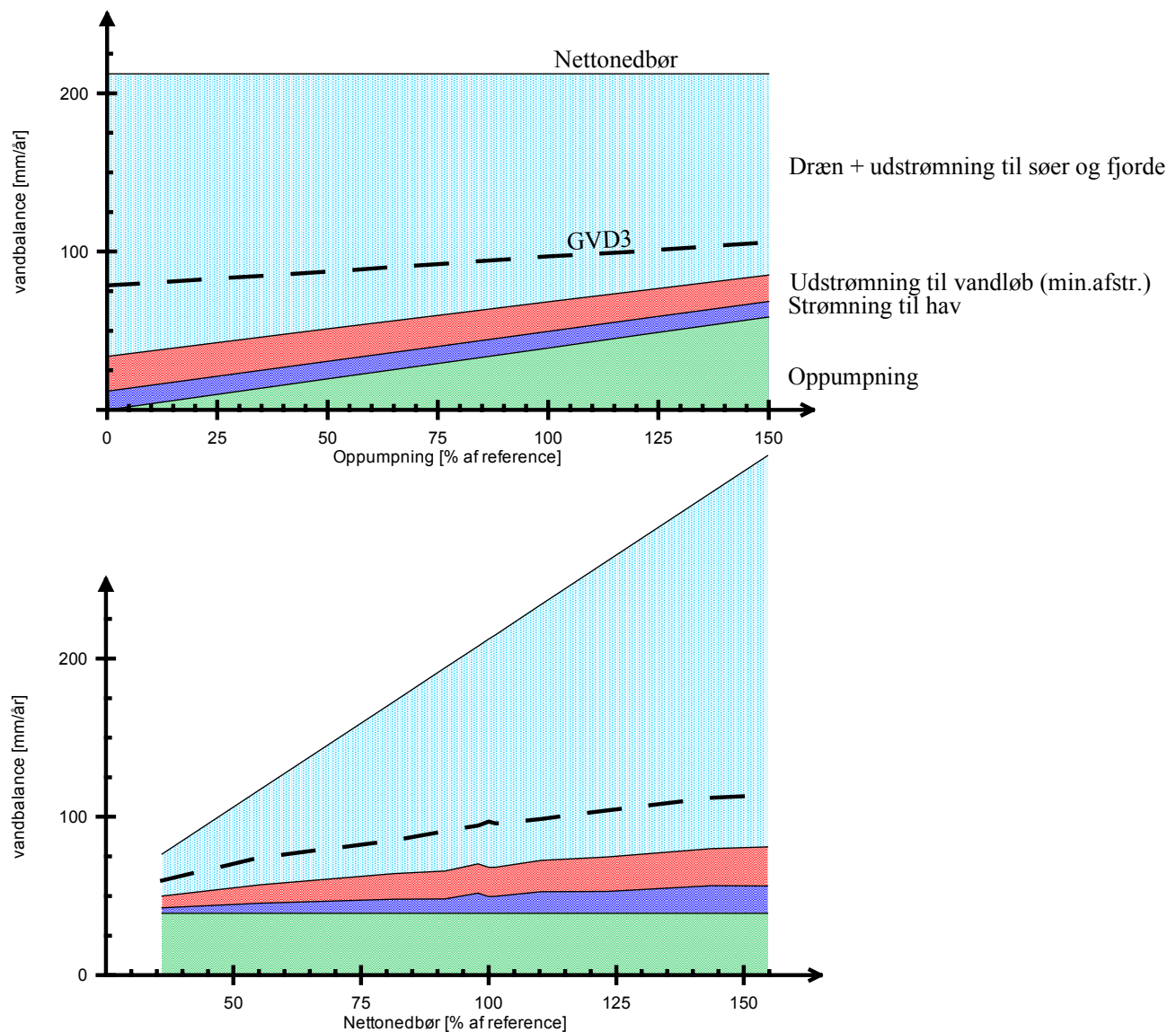


Figur 7.10 Sammenligning af resultatet af en stationær modelsimulering (blå streg) af grundvandsafstrømning til vandløb (akvifer-river) i forhold til simuleret daglig vandføring (rød kurve) med en dynamisk model (nederst Havelse å – øverst hele oplandet til Nord-sjælland).

## 7.5 Eksempler på ressourcevurdering for udvalgte scenarier

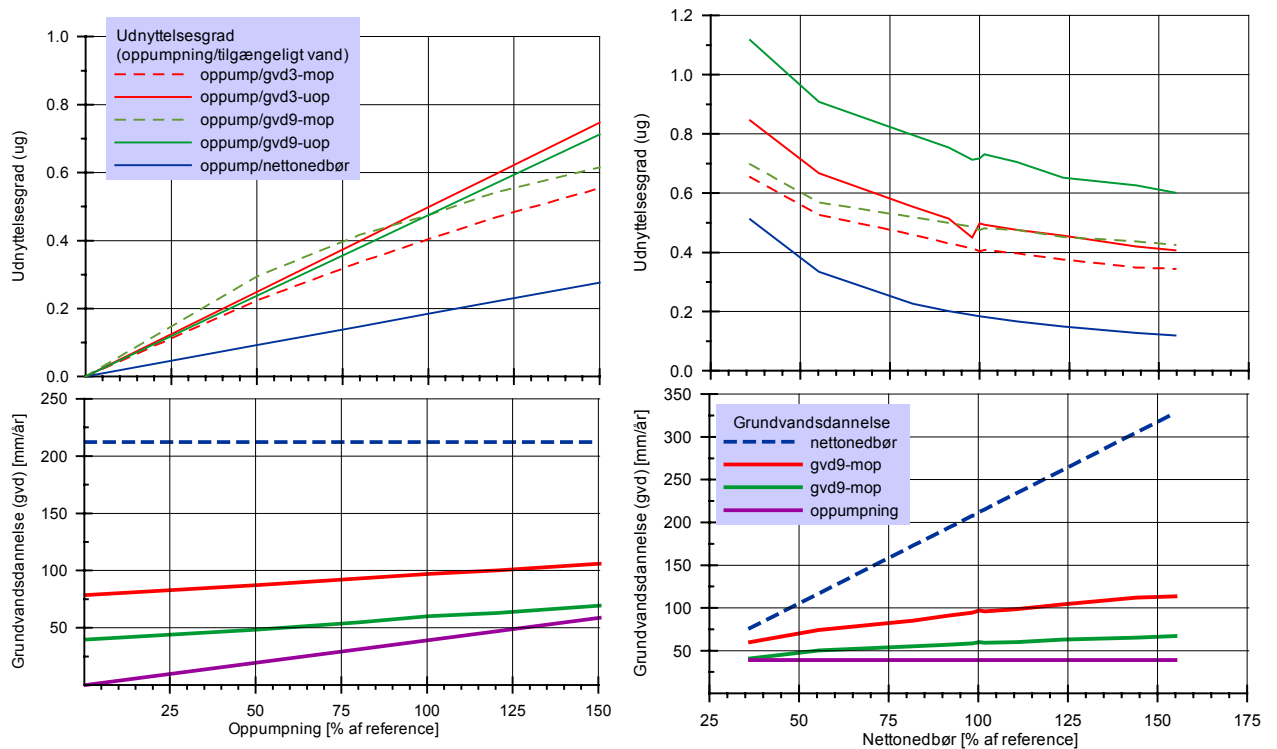
I det følgende præsenteres beregninger med Sjælland nord modellen (delopland 4 i DK-regi). Der er som tidligere nævnt foretaget beregninger med oppumpning = 0, 50, 80, 100, 120 og 150 % af den nuværende oppumpning (svarende til år 2000 oppumpningen).

Desuden er der foretaget beregninger for en nettonedbør for hvert år i perioden 1991-2000 (i alt 10 forskellige nettonedbørsværdier), samt en 11. værdi der svarer til gennemsnitsværdien for perioden. I figur 7.11 er vandbalancen's afhængighed af dels nettonedbør, dels oppumpning illustreret for Sjælland nord.



Figur 7.11 Vandbalancen for Sjælland nord (delområde 4). Figuren viser en akkumulering af oppumpning, grundvandsafstrømning til randen, ref. minimumsafstrømning og overfladenær afstrømning incl. dræn i mm/år. Øverst afhængighed af oppumpning, nederst afhængighed af nettonedbør.

Resultaterne kan også illustreres ved en udnyttelses-% (ug). Her er det valgt at vise nogen forskellige udnyttelses-%'er, angivet i forhold til nettonedbør og grundvandsdannelse (figur 7.12)



Figur 7.12 Udnyttelsesgrad angivet i forhold til nettonedbør (højre) og oppumpning (venstre).

Det skal bemærkes at den nettonedbør der omtales i det følgende ikke er den totale nettonedbør, men kun den del (ca. 85 %) som tilgår grundvandssystemet. Den resterende del afstrømmer direkte til overfladevandet bl.a. fra befæstede arealer og omtales ikke i det følgende, og er heller ikke til rådighed som en del af den udnyttelige grundvandsressource.

Nettonedbøren i område 4 Sjælland nord udgør i alt ca. 250 mm/år (1991-2000), men kun 85 % svarende til ca. 213 mm/år omtales i det følgende.

Det fremgår af figur 7.11 (øverst) at der ved en forøgelse af oppumpningen i forhold til referencekørslen uden oppumpning, sker en reduktion i såvel afstrømningen til randen (til havet), ref. minimumsafstrømningen til vandløb og den overfladenære afstrømningskomponent incl. drænastrømning. Nettonedbøren er her konstant.

Figur 7.11 (nederst) viser at der ved en oppumpning svarende til den nuværende (100%) og ændret nettonedbør, sker en forøgelse af samtlige afstrømningskomponenter med stigende nettonedbør. Pumpningen er her konstant.

Figur 7.12 viser (øverste to figurer) at grundvandsdannelsen stiger med stigende nettonedbør såvel til det øvre regionale magasin (beregningsslag 3) og til kalken (beregningsslag 9). Udnyttelsesgraden angivet i forhold til nettonedbøren er 0.19 for nuværende klima (1991-

2000) og nuværende oppumpning (år 2000), hvorimod en udnyttelsesgrad opgjort i forhold til grundvandsdannelsen er væsentlig større (0.4 vurderet i forhold til den aktuelle grundvandsdannelse til lag 3 med oppumpning og ca. 0.5 såfremt udnyttelsesgraden gøres op i forhold til upåvirkede grundvandsdannelse, altså uden pumpning til lag 3). De nederste to figurer viser dels af grundvandsdannelsen stiger noget ved forøget oppumpning (induceret grundvandsdannelse) og at også udnyttelsesgraden er meget afhængig af nettonedbørens størrelse.

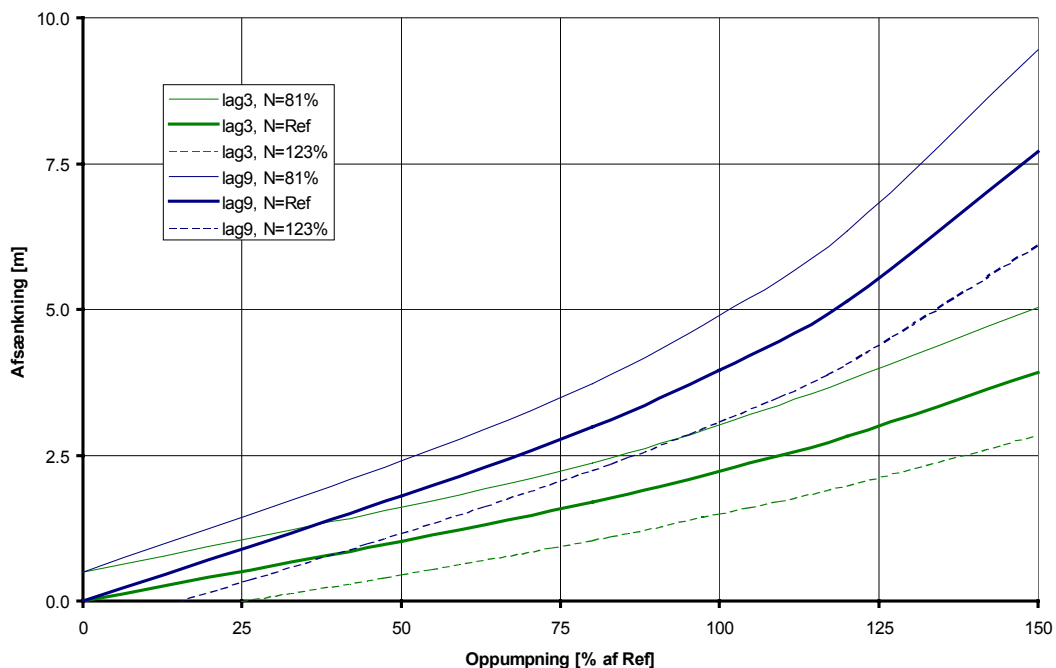
Det vurderes at en udnyttelsesgrad vurderet i forhold til enten den upåvirkede grundvandsdannelse til det øvre regionale magasin (lag 3), eller i forhold til den aktuelle grundvandsdannelse med pumpning til lag 3 kunne være brugbare indikatorer:

$$\text{Indikator 1 (GDV}_{3 \text{ uop}}) : \quad \text{PUMP}_{\text{total}} \text{ (mm)} / \text{GVD}_{3 \text{ uop}} \text{ (mm)} < 0.35$$

$$\text{Indikator 2 (GDV}_{3 \text{ mop}}) : \quad \text{PUMP}_{\text{total}} \text{ (mm)} / \text{GVD}_{3 \text{ mop}} \text{ (mm)} < 0.30$$

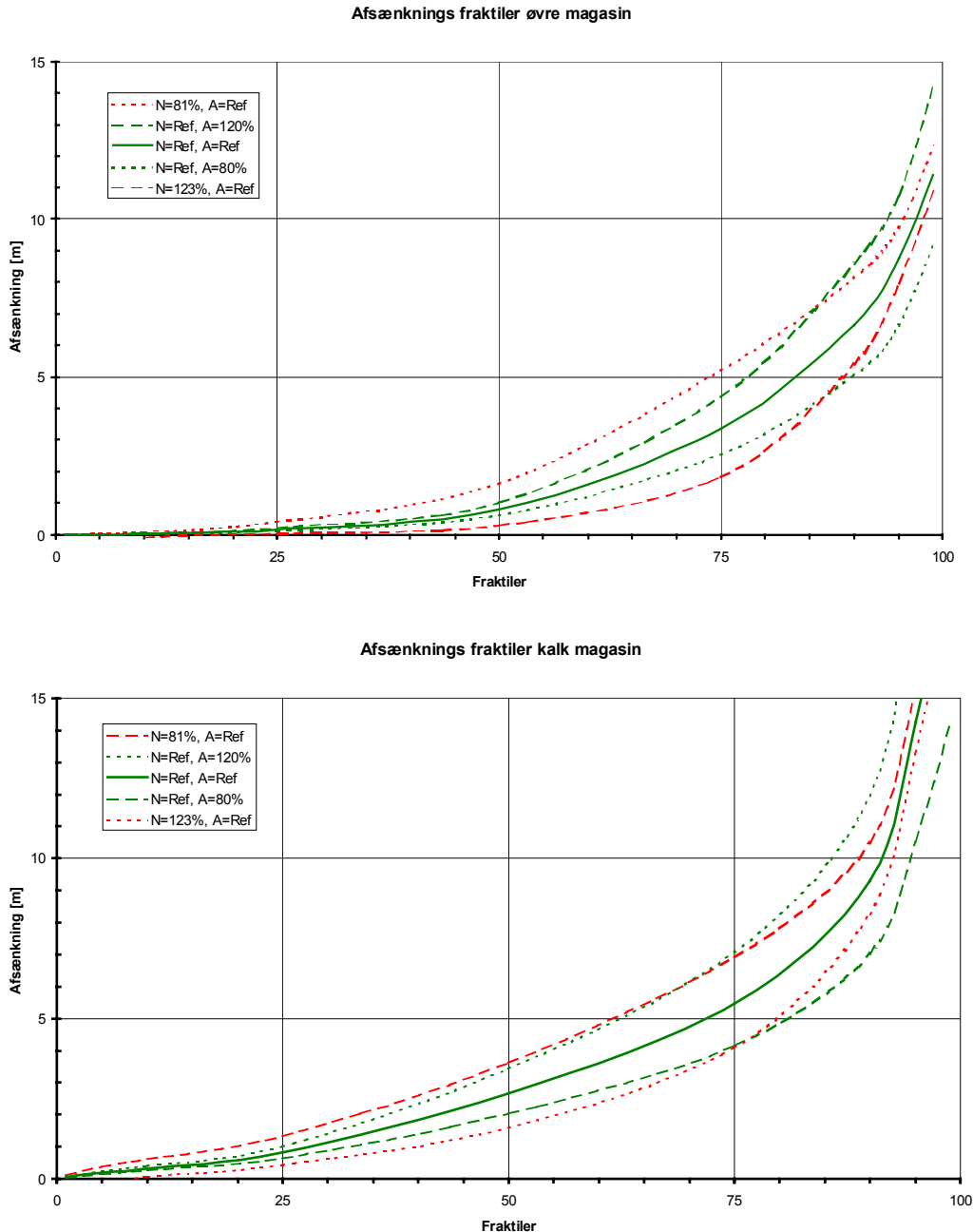
Aflæses den udnyttelige grundvandsressource for denne indikator ud fra figur 7.12 når man frem til at kun 70 % kan pumpes ved brug af indikator 1 og 75 % af nuværende indvinding kan pumpes ved brug af indikator 2.

Afsækning som følge af ændret oppumpning



Figur 7.13 Simuleret afsækning (m i forhold til referencekørslen uden oppumpning og med klima svarende til 1991-2000) som følge af ændret oppumpning for beregningslag 3 (øvre regionale sandlag) og beregningslag 9 (kalk)

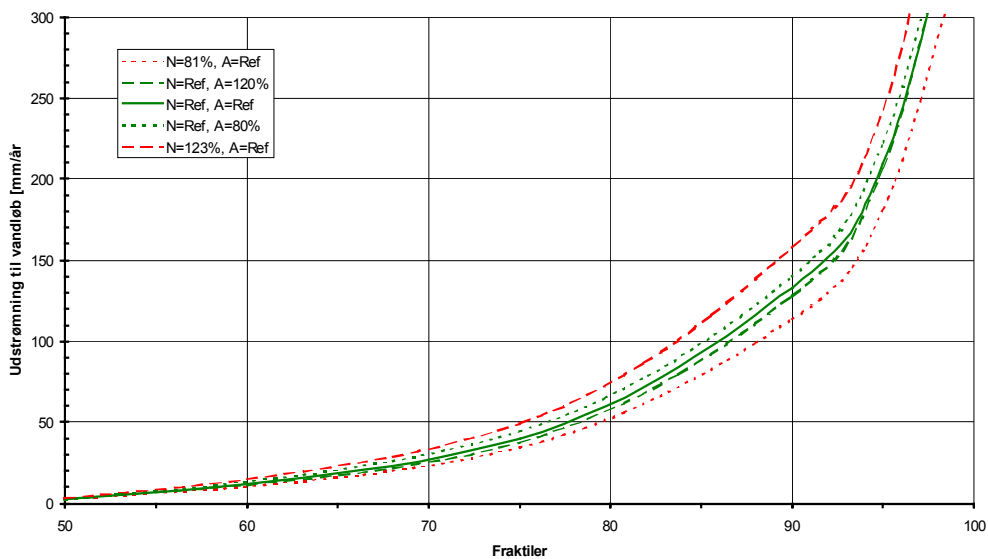
I figur 7.13 er vist simuleret afsækning som funktion af ændret oppumpning. Der er udvalgt 3 kurver med en nettonedbør svarende til 81 % af ref. perioden (1995), 123 % af ref. perioden (1993) og ref. perioden (1991-2000). Den nuværende oppumpning (100%) giver altså en afsækning i beregningslag 3 på godt 2 m og knap 3 m for kalken (i gennemsnit for modelområde Sjælland nord). Fordelingen indenfor modelområdet fremgår af figur 7.14 med fraktilværdier.



Figur 7.14 Afsækningsfraktiler (rumlig variation Sjælland nord) ved forskellige kombinationer af oppumpning (80, 100 og 120 %) og nettonedbør (81, 100 og 123 %).

Påvirkningen af ref. minimumsafstrømningen er vist som funktion af oppumpning i figur 7.15.

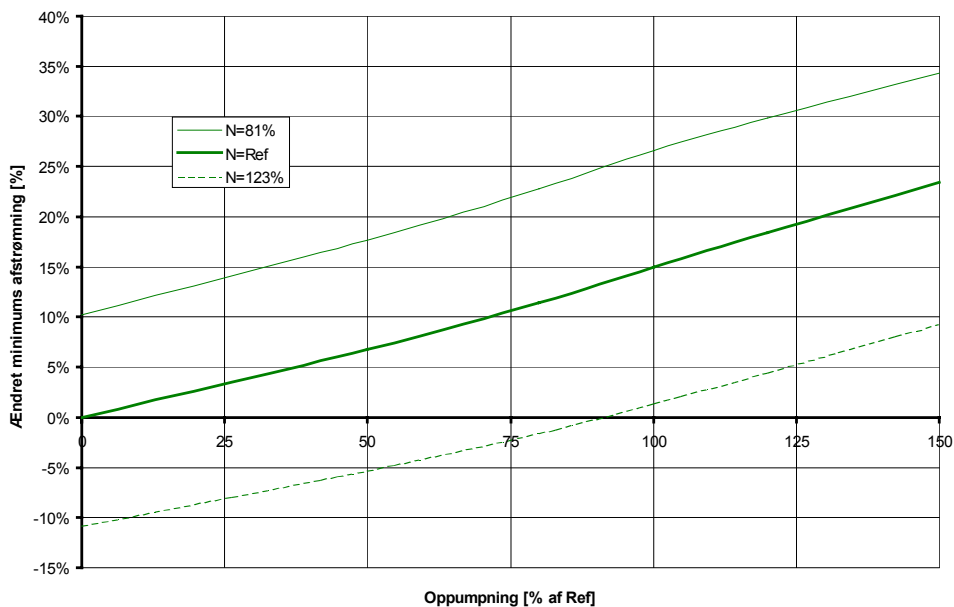
### Minimumsbidrag til vandløb



Figur 7.15 Rumlig variation minimumsafstrømning for Sjælland nord angivet i mm/år (fraktilværdier) for 3 forskellige oppumpninger (80, 100 og 120%) og nettonedbørsværdier (81, 100 og 123 %).

I figur 7.16 er vist den beregnede påvirkning i % i forhold til referencekørselens minimumsafstrømning (kørsel med nuværende klima 1991-2000 men uden oppumpning).

### Relative minimumsafstrømninger som følge af ændret oppumpning



Figur 7.16 Ændring af minimumsafstrømning i % af "upåvirkede" ved 3 forskellige nettonedbørsværdier (81, 100 og 123 %) og som funktion af oppumpning (angivet i % af 2000).

Det fremgår af figur 7.16 at den nuværende oppumpning giver anledning til en reduktion af ref. minimumsafstrømningen på 15 % (ved 1991-2000 klima og 2000 oppumpning), hvori-mod påvirkningsgraden er over 25 % for et tørt år (81 % af nettonedbøren).

En brugbar indikator kunne her være et krav om maksimal 10 % svarende til gyde- og opvækstområder for ørreder. Bruges dette krav fås en udnyttelig ressource for Sjælland nord på 70-75 % af nuværende pumpning.

I tabel 7.8 er resultaterne for Sjælland nord sommeret, opgjort på de 3 deloplade (vps5 nordlige del af Nordsjælland, vps6 Sønderøområdet og vps7 København-Roskilde-Køge området).

Pump		Grundvandsdannelse [mm/år]			% vis ændring af gvd		
		vps5	vps6	vps7	vps5	vps6	vps7
gvd_øvre	0%	106	102	39			
	50%	108	110	55	2%	8%	41%
	80%	111	115	65	5%	13%	64%
	ref	112	118	71	6%	15%	81%
	120%	114	121	76	8%	18%	93%
	150%	116	125	87	10%	22%	121%
gvd_kalk	0%	39	59	32			
	50%	44	67	45	11%	15%	42%
	80%	47	74	54	18%	27%	71%
	ref	49	79	63	24%	34%	100%
	120%	51	83	66	30%	41%	109%
	150%	55	89	76	40%	53%	139%
Areal [km <sup>2</sup> ]		1195	484	1112	42%	17%	39%
Oppumpning [mm/år]		23	55	51	25%	24%	51%
Netto nedbør [mm/år]		235	199	194			

Tabel 7.8 Opgørelse af grundvandsdannelse for Sjælland nord opdelt på 3 deloplade indenfor DK-model Nord. Areal, oppumpning og nettonedbør er desuden opgjort

Det fremgår af tabel 7.8 at påvirkningen af ref. minimumsafstrømning er størst for vps7 (81 % ved nuværende oppumpning), vps6 har en værdi på 15 % og vps5 blot 6 %. Fejl: Overskriften "Minimumsafstrømning (mm/år)" er "Grundvandsdannelse (mm/år)".

I tabel 7.9 er angivet minimumsafstrømning og beregnet påvirkning af minimumsafstrømning ved forskellige scenarier for oppumpning (% af reference) fordelt på recipientmålsætninger for Sjælland Nord.

SjN	Minimumsafstrømning [mm/år]						Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km)	Nedbør mm/år pr	Min.afstr % af sjn
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af sjn				
Pump (% af ref)	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af sjn				
Vandløbskrav A	24	22	21	20	18	17	8%	14%	20%	26%	31%	2%	236	2%
B1	28	26	25	25	24	22	6%	10%	13%	16%	22%	15%	227	20%
B2	24	23	23	23	22	22	2%	3%	4%	6%	9%	3%	224	3%
B3	27	25	24	23	22	21	6%	10%	13%	17%	22%	17%	221	21%
C-E	6	5	5	5	4	4	10%	16%	21%	25%	34%	14%	208	4%
X	23	21	20	19	18	17	8%	13%	17%	20%	24%	49%	204	50%

Tabel 7.9 Påvirkning af ref. minimumsafstrømning i forhold til recipientmålsætninger som følge af vandindvinding

Den gennemsnitlige reference minimumsafstrømning opdelt på målsætningskategorier A, B1, B2, B3, C-E og X (områder uden målsætning) er omkring 23-27 mm/år, med undtagelse af C-E vandløb som kun har en afstrømning omkring 6 mm/år. Afstrømningen falder som følge af indvinding.

Strækninger indenfor Sjælland Nord med recipientmålsætning A udgør kun 2 % (svarende til ca. 50 km<sup>2</sup>). Disse strækninger bidrager kun med 2 % af det samlede ref. minimumsflow. DK-modellen viser at disse strækninger bliver relativt stærkt påvirkede, svarende til 20 % ved den nuværende indvinding (2000). Den acceptable påvirkning er 5 % for disse strækninger. Da strækningerne imidlertid udgør mindre end 5 % af det samlede område, og da metoden har en indbygget tærskelværdi, skal fokus imidlertid flyttes til næste målsætningskategori B1 Gyde- og opvækstområde for laksefisk.

Her er den tilladelige påvirkningsgrad 10 %. Resultaterne i tabel 7.9 viser at en oppumpning på 80 % af den nuværende netop bevirker at dette krav kan opfyldes. Strækninger med B1 målsætning udgør 15 % af det samlede areal (altså over tærskelværdien på 5 %). Flowet udgør samtidig hele 20 % af den samlede ref. Minimumsafstrømning, så disse strækninger er vigtige, og sætter altså en grænse for vandindvindingen i Sjælland nord på 80 % af nuværende.

Næste kategori som opfylder tærskelkravet er B3 målsatte vandløb (karpefiskevand). Kravet til disse er en max. påvirkning på 25 %. Der er ingen problemer med honorere dette krav, selv med en oppumpning på 150 % af den nuværende. Karpefiskevands målsætningen gælder for 23 % af Sjælland Nord's strækninger med minimumsafstrømning svarende til 21 % af flowet.

I tabel 7.10 er de tilsvarende beregninger gennemført, blot med den yderligere antagelse at analysen er gennemført indenfor områder med særlige drikkevandsinteresser, som udgør ca. 85 % af det samlede opland til Sjælland Nord.

drikint_1 Pump (% af ref)	Minimums afstrømning [mm/år]					Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km) % af drikint_1	Nedbør mm/år pr	Min.afstr % af drikint_1	
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%					
<b>Vandløbskrav A</b>	38	35	32	30	28	26	8%	14%	20%	26%	31%	2%	229	3%
<b>B1</b>	32	29	28	26	25	22	8%	13%	17%	21%	30%	14%	221	17%
<b>B2</b>	26	25	25	24	24	23	2%	3%	4%	6%	9%	4%	226	4%
<b>B3</b>	24	21	19	18	16	14	10%	18%	24%	31%	41%	15%	210	13%
<b>C-E</b>	9	8	7	7	6	5	11%	18%	23%	28%	38%	13%	213	4%
<b>X</b>	29	27	25	24	23	21	8%	14%	19%	23%	27%	52%	208	58%

Tabel 7.10 Påvirkning af ref. minimumsafstrømning indenfor områder med særlige drikkevandsinteresser som følge af vandindvinding for Sjælland Nord.

Resultaterne for målsætningskategori B1 Gyde- og opvækstområde for laksefisk viser her en påvirkning på 8 % ved 50 % oppumpning og 13 % ved 80 % oppumpning. Det vil sige at såfremt kravet til recipientmålsætning på ca. 10 % af min. vandføring skal opfyldes, så vil det kræve at indvindingen reduceres til ca. 65 % af den nuværende.

I tabel 7.11 er tallene gjort op for de 3 kategorier af drikkevandsområder (områder med særlige drikkevandsinteresser, områder med drikkevandsinteresser og områder med begrænsede drikkevandsinteresser).

sjn	Minimums afstrømning [mm/år]					Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km)	Oppumpning	Min.afstr	Nedbør	
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af sjn					% af sjn
Pump (% af ref)	26	24	22	21	20	18	8%	14%	19%	23%	30%	63%	85%	72%	212
sjn-drikint-1	16	16	16	16	16	15	2%	3%	3%	4%	5%	34%	15%	28%	216
sjn-drikint-2	1	1	1	1	1	1	0%	1%	1%	1%	1%	3%	0%	0%	181

Tabel 7.11 Vandløbspåvirkning opgjort på drikkevandsområder for Sjælland Nord

Det fremgår af tabel 7.11 at områder med begrænsede drikkevandsinteresser heller ikke spiller nogen større rolle for recipientmålsætningerne. I områder med drikkevandsinteresser er påvirkningen af minimumsafstrømningen kun ca. 5 % selv ved en øget oppumpning til 150 % af den nuværende. Der er derfor en restressource som i øjeblikket ikke udnyttes i disse områder, og som til dels vil kunne kompensere for problemerne med at få nedbragt vandløbspåvirkningen i områder med særlige drikkevandsinteresser. Hele 85 % af minimumsafstrømningen sker i øvrigt til vandløb beliggende indenfor områder med særlige drikkevandsinteresser.

En forøget beskyttelsesindsats indenfor områder med særlige drikkevandsinteresser, med en bedre sikring af grundvandskvaliteten, vil derfor kunne "gå hånd i hånd" med en gevinst også for overfladevandet og habitatkvaliteten. Det vil imidlertid kræve en yderligere reduktion i vandindvindingen, så vandløbspåvirkningen bringes nærmere målsætningerne, eller også skal målsætningerne revideres, så de stemmer bedre overens med de faktiske forhold i Sjælland Nord området (f.eks. ændring af målsætninger fra B1 Gyde- og opvækstområde til B3 Karpeskekevand).

Som allerede indikeret i tabel 7.8, så er der en skæv fordeling i vandindvindingen for Sjælland Nord, idet vps5 (nordlige del af Frederiksborg amt) har relativt lave værdier for indikator (1) og indikator (2), hvorimod vps 6 (Søndersødal) og 7 (Kbh.-Roskilde-Køge) har relativt høje værdier. Nedenfor i tabel 7.12 er vist en opgørelse af vandløbspåvirkninger på disse delområder.

vps 5	Minimums afstrømning [mm/år]					Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km)	Min.afstr	Nedbør	
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af vps_5				% af vps_5
Pump (% af ref)	25	25	25	24	24	24	2%	3%	4%	4%	5%	4%	4%	243
Vandløbskrav A	29	28	27	26	25	24	5%	9%	11%	13%	16%	29%	37%	233
B1	33	32	32	32	32	31	1%	2%	2%	3%	4%	3%	5%	240
B2	30	29	29	28	28	28	3%	4%	5%	6%	8%	25%	34%	235
B3	10	9	8	8	7	7	10%	16%	20%	25%	33%	15%	6%	240
C-E	13	13	12	12	12	11	5%	8%	10%	12%	16%	23%	14%	230
X														
vps 6	Minimums afstrømning [mm/år]					Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km)	Min.afstr	Nedbør	
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af vps_6				% af vps_6
Pump (% af ref)	22	16	12	8	3	0	26%	45%	63%	84%	98%	4%	1%	218
Vandløbskrav A	26	24	22	20	17	11	9%	18%	24%	34%	57%	12%	10%	201
B1	13	12	12	12	11	10	4%	7%	10%	14%	22%	7%	3%	204
B2	29	26	23	20	17	13	13%	23%	31%	41%	56%	21%	18%	198
B3	3	3	2	2	2	1	16%	26%	34%	42%	62%	12%	1%	183
C-E	44	41	38	37	36	34	7%	13%	17%	19%	22%	44%	67%	200
X														
vps 7	Minimums afstrømning [mm/år]					Min.afstr.ændring [% af non]					Areal (km/km)	Min.afstr	Nedbør	
	0%	50%	80% ref	120%	150%	50%	80% ref	120%	150%	% af vps_7				% af vps_7
Pump (% af ref)	21	20	19	17	16	13	7%	13%	18%	25%	41%	1%	1%	168
Vandløbskrav A	11	10	9	8	7	6	12%	21%	29%	37%	48%	7%	4%	197
B1	3	2	2	2	2	2	7%	13%	17%	19%	25%	15%	2%	182
B3	21	19	18	17	17	15	8%	14%	18%	22%	27%	77%	92%	197
C-E														
X														

Tabel 7.12 Vurdering af vandløbspåvirkninger for underområder (vps5, 6 og 7).

## 7.6 Identifikation og beskrivelse af udvalgte indikatorer for kredsløb og ressource

I tabel 7.13 er illustreret 4 udvalgte indikatorer som vurderes egnede til at give et bud på udnyttelig grundvandsressource:

- Indikator (1) – Vurdering af udnyttelig ressource antaget som 35 % af grundvandsdannelse til det øvre regionale magasin (beregningsslag 3) uden oppumpning
- Indikator (2) – Vurdering af udnyttelig ressource antaget som 30 % af grundvandsdannelse til det øvre regionale magasin (beregningsslag 3) med oppumpning
- Indikator (3) – Vurdering af udnyttelig ressource antaget som den ressourceudnyttelse der netop giver en 10 %'s påvirkning af ref. minimumsafstrømning
- Indikator (4) – Vurdering af udnyttelig ressource antaget som den ressourceudnyttelse der bevirker at kravværdier til målsætninger A, B1, B2, B3 osv. netop er overholdte

<b>UDNYTTTELIG RESSOURCE % af nuværende indvinding</b>	<b>Indikator (1) (GVD<sub>3 UOP</sub>)</b>	<b>Indikator (2) (GVD<sub>3 MOP</sub>)</b>	<b>Indikator (3) (MIN. flow)</b>	<b>Indikator (4) (MIN. flow<sub>REC</sub>)</b>
<b>Område</b>	<b>Udnyttelig ressource i % af år 2000 indvinding</b>	<b>Udnyttelig ressource i % af år 2000 indvinding</b>	<b>Udnyttelig ressource i % af 2000 indvinding</b>	<b>Udnyttelig ressource i % af 2000 indvinding</b>
<b>VPS5 Nordl.FBA</b>	160 % (jf. tabel 7.8)	150 % (jf. tabel 7.8)	-	90 % (jf. tabel 7.12)
<b>VPS6 Sønder sø</b>	65 % (jf. tabel 7.8)	60 % (jf. tabel 7.8)	-	55 % (jf. tabel 7.12)
<b>VPS7 Kbh-Køge</b>	27 % (jf. tabel 7.8)	28 % (jf. tabel 7.8)	-	90 % usikkert! (jf. tabel 7.12)
<b>Sjælland Nord</b>	<b>70 %</b> (jf. figur 7.12)	<b>75 %</b> (jf. figur 7.12)	<b>72 %</b> (jf. figur 7.16)	<b>80 %</b> (jf. tabel 7.9)
<b>Sjælland Nord (OSD området)</b>	-	-	60 % (jf. tabel 7.11)	65 % (jf. tabel 7.10)
<b>VPS 8 Stevns</b>	190 %	180 %	> 200 %	85 %
<b>VPS 9 Sydlig SJ</b>	120 %	120 %	> 200 %	> 200 %
<b>VPS 10 Møn</b>	> 200 %	> 200 %	> 200 %	> 200 %
<b>VPS 11 Falster</b>	110 %	110 %	> 200 %	> 200 %
<b>VPS 12 Lolland</b>	95 %	100 %	> 200 %	> 200 %
<b>Sjælland Syd</b>	<b>140 %</b>	<b>135 %</b>	<b>&gt; 200 %</b>	<b>&gt; 200 %</b>
<b>Sjælland Syd (OSD området)</b>	95 %	95 %	-	-

Tabel 7.13 Indikatorer for udnyttelig vandressource (% af nuværende oppumpning) for Sjælland Nord området på baggrund af DK-model

## 7.7 Referencer

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physical-Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- d'Agnese, F.A. C.C., Hill, M.C. and Turner, A.K. (1999) Death Valley regional ground-water flow model calibration using optimal parameter estimation methods and geoscientific information systems. *Advances in Water Resources*, 22(8), 777-790.
- Andersen, J.A., Refsgaard, J.C. and Jensen, K.H. (2001) Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247, 200-214.
- Andersen, L.J. (1973) Cyclogram technique for geological mapping of borehole data. *Geological Survey of Denmark, III rk.*, 41, 25 pp.
- Carlsson, L. and Gustafson, G. (1984) Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik (Test pumping as geohydrological investigation method). Byggeforskningsradet, Chalmers Tekniska Högskole, Göteborg. R41. (In Swedish)
- Christensen, S. (1994) Hydrological model for the Tude Å catchment. *Nordic Hydrology*, 25, 145-166.
- Christensen, B.C., Henriksen, H.J. and Nyegaard, P. (2000) Test af DK-modellens rodzonemodul (Test of the root zone module of the DK model). GEUS, Copenhagen. <http://www.vandmodel.dk/rodzonetest.pdf> . (In Danish).
- Dahl, M., Harrar, W.G., Henriksen, H.J. and Knudby, C.J. (1998) Intergrated hydrological modelling of freshwater resources in Denmark – Distribution of aquifer –river exchange parameters. *Gambling with Groundwater – Physical, Chemical, and Biological Aspects of Aquifer-Stream Relations*. Brahana et al. (eds.), 607-616.
- DHI (2000) MIKE SHE Water Movement User Manual. DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.
- Fredericia, J. (1990) Saturated hydraulic conductivity of clayey till and role of fractures. *Nordic Hydrology*, 21, 119-132.
- Fredericia, J. (1991) Fractures in clayey till. Occurrence, genesis and hydrological significance. PhD-thesis. Institute for Geology and Soil Mechanics, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Gelhar, L.W. (1986) Stochastic subsurface hydrology. From theory to applications. *Water Resources Research*, 22(9), 135S-145S.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1998) Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* 34(4), 751-763.
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. and Svendsen, H. (1991) Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy, *Fertilizer Research*, 27, 245-259.
- Harlin, J. (1991) Development of a process oriented calibration scheme for the HBV hydrological model. *Nordic Hydrology*, 22, 15-36.

- Harrar, W.G. (1998) Personal communication.
- Hedeselskabet (1982) Synkronmåling i Havelse å, 1982. Hovedstadsrådet.
- Hedeselskabet (1978) Afstrømningsmålinger i Danmark 1917-70. 10. Beretning. Hedeselskabets Hydrometriske Undersøgelse.
- Henriksen, H.J. (1998) Climate change and available groundwater resources – the National Water Resources Model for Denmark. Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water. Edited by Risto Lemmelä and Nea Helenius. Espoo, Finland, 17-20 August 1998. Vol. 3, 1459-1470.
- Henriksen, H.J. (2001) National Vandressourcemodel. Slutrapport for projektkontrakt 1996-2000 (National Water Resources Model, Final Report). GEUS Report 2001/29, Copenhagen (in Danish). [http://vandmodel.dk/slutrapport\\_2001-29.pdf](http://vandmodel.dk/slutrapport_2001-29.pdf).
- Henriksen, H.J. (2001b) Fra PC-Jupiter til DK-modellen. Geologi Nyt, Nr. 3. 2001
- Henriksen, H.J., Knudby, C., Rasmussen, P. and Nyegaard, P. (1997) National vandressourcemodel. Modelopstilling og kalibrering for Fyn. GEUS rapport 1997/139. (In Danish)
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Knudby, C.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R. and Rasmussen, P. (1998) National Vandressource Model. Sjælland, Lolland, Falster and Møn. GEUS report 1998/109 (in Danish). <http://www.vandmodel.dk>.
- Henriksen H.J. and Stockmarr, J. 1999: Groundwater Resources in Denmark. Modelling and Monitoring. -. IWSA World Water Congress. Technical Paper, Buenos Aires, Argentina, 20 - 26 September 1999. Special Subject No. 9 – Part 1 – Protection of Drinking Water Resources for Quality and Quantity – Groundwater and Surface Water, SS9-4 - SS9-11.
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Nyegaard, P. and Refsgaard, J.C. (2002) Construction of a national hydrological model for Denmark – Exemplified for the isle of Zealand. Review of Danish and international activities, Geological Survey of Denmark and Greenland (in press).
- Hill, M.C. (1998) Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 98-4005, Denver, Colorado, USA.
- Kaiser-Hill Company (2001) Model Code and Scenario Selection Report. Site-Wide Water Balance Rocky Flats Environmental Technology Site. Report 01-RF-00337. Febr. 2001. [http://www.dhisoftware.com/mikeshe/download/rfets\\_2-20-01.pdf](http://www.dhisoftware.com/mikeshe/download/rfets_2-20-01.pdf)
- Klemes, V. (1986) Operational Testing of Hydrological Simulation. Hydr. Sci. J. 31(1), 13-24.
- Liden, R. (2000) Conceptual runoff model for material transport estimations. PhD dissertation. Report No. 1028, Lund Institute of Technology Sweden.
- Krüger, I. (1981) Grundvandsmodel for Hovedstadsregionen. Modelopstilling og kalibrering. København, Maj 1981. Hovedstadsrådet.
- de Lange, W.J. (1996) Groundwater modeling of large domains with analytic elements.
- Madsen, H. (2000) Automated calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. Journal of Hydrology 235(3-4), 276-288.
- Miljøstyrelsen (1992) Danmarks fremtidige vandforsyning. Nr. 1, 1992.
- Miljøstyrelsen (1995) Klassificering af grundvandsressource. Rapport nr. 6. 1995.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. J.Hydrol., 10, 282-290.
- Nielsen, S.A. and Hansen, E. (1973) Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. Nordic Hydrology, 4, 171-190.
- Nilsson, B., R.C. Sidle, K.E. Klint, C.E. Bøgild and K. Broholm (1997) Mass transport and scale-dependent hydraulic test in a heterogenous till and sand aquifer system.
- Pedersen, S.A.S. (1989) Jordartskort over Danmark, 1:200.000. Sjælland, Øer og Bornholm, map 4. Geological survey of Denmark, Copenhagen (Map of surface soil types, with English and German legend).

- Pedersen, S.A.S. (2000) Superimposed deformation in glaciotectonics. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 46, 125-144.
- Poeter, E. and Hill, M.C. (1999) UCODE, A computer code for universal inverse modeling. *Computer in Geosciences*, 25(4), 457-462.
- Refsgaard, J.C. (1997) Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- Refsgaard, J.C. (2001) Discussion of model validation in relation to the regional and global scale. In: Anderson, M.G. and P.D. Bates (Eds.) *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley and Sons, 461-483.
- Refsgaard, J.C. and Stang, O. (1981) An Integrated groundwater/surface water hydrological model. Suså Investigation. Danish Committee for Hydrology, Report H13, 122 pp.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995) MIKE SHE. In: V.P. Singh (Ed) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, 809-846.
- Refsgaard, J.C., Sørensen, H.R., Mucha, I., Rodak, R., Hlavaty, Z., Banský, L., Klucovská, J., Topolska, J., Takáč, J., Kosc, V., Enggrob, H.G., Engesgaard, P., Jensen, J.K., Fiselier, J., Griffioen, J., and Hansen, S. (1998) An integrated model for the Danubian Lowland – Methodology and applications. *Water Resources Management*, 12, 433-465.
- Refsgaard, J.C., Thorsen, M., Jensen, J.B., Kleeschulte, S. and Hansen, S. (1999) Large scale modelling of groundwater contamination from nitrate leaching. *Journal of Hydrology*, 221, 117-140.
- Rosso, R. (1994) An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In Rosso, R., Peano, A., Becchi, I., Bemporad, G.A. (Eds.), *Advances in Distributed Hydrology*. Water Resources Publications, 3-30.
- Sjørring, S. (1983) The glacial history of Denmark. In: Ehlers, J. (ed.) *Glacial deposits in north-west Europe*. A.A. Balkema, Rotterdam, 163-179.
- Sonnenborg, T.O. (2001) Calibration of flow model. In: Henriksen, H.J. (Ed) *Handbook in Hydrological Modelling*. Chapter 10, GEUS Report 2001/56, Copenhagen (In Danish).
- South Florida Management District (1997) Draft Documentation for the South Florida Water Management Model. Hydrological Systems Modeling Department. Water Supply Division, SFWMD, West Palm Beach, Florida: [http://glacier.sfwmd.gov/org/pld/hsm/models/sfwmm/fact\\_sht.htm](http://glacier.sfwmd.gov/org/pld/hsm/models/sfwmm/fact_sht.htm) .
- Surlyk, F. (1980) Denmark. In: Lorenz, C. and Aubouin, J. (eds.) *Geology of the European countries 1-4*, 1: Denmark, Finland, Iceland, Norway, Sweden. International Geological Congress, 26. Paris, July 1980.
- Vandrådet (1992) Danmarks fremtidige vandressource: Rapport fra arbejdsgruppe 1. Ferskvandsressourcens naturlige kvantitet og kvalitet (The future water resource of Denmark: report from working group 1. The natural quantity and quality of the freshwater resource). Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen (in Danish).
- Wood, S.R. (1974) A catchment simulation model developed for urbanizing catchments with particular reference to the use of automatic optimization techniques. In: Proc. Of IFPF Conference on Computer Simulation of Water Resources Systems, Ghent, Belgium, 209-217.