

Klimaændringers betydning for vandkredsløbet i Danmark

Torben O. Sonnenborg, Britt S. B. Christensen, Lieke van Roosmalen & Hans Jørgen Henriksen

Indhold

1 Indledning.....	1
2 Teori	3
2.1 Metode anvendt til kvantificering af klimaændringer	3
2.2 Delta metoden.....	5
2.2.1 Bestemmelse af reference fordampning	6
2.2.2 Bestemmelse af delta-værdier	6
2.3 Hydrologisk model	7
2.4 Beregning af nettonedbør	8
2.4.1 Historiske nedbørs- og fordampningsdata	8
2.4.2 Rodzonemodul.....	9
3 Oplande og modelopstilling	11
4 Resultater for inputværdier.....	15
4.1 Delta-værdier.....	15
4.2 Analyse af fremtidig nedbør.....	19
4.3 Analyse af fremtidig temperatur.....	20
4.4 Analyse af fremtidig reference fordampning.....	22
4.5 Analyse af fremtidig nettonedbør.....	23
4.6 Markvanding.....	25
5 Resultater.....	27
5.1 Grundvandsniveau – Vestjylland	27
5.2 Grundvandsniveau - Sjælland.....	33
5.3 Grundvandsdannelse.....	39
5.4 Vandløbsafstrømning – Vestjylland	41
5.4.1 Naturlig tilstand (ingen grundvandsindvinding)	42
5.4.2 Indvindingspåvirket tilstand	47
5.5 Vandløbsafstrømning – Sjælland	51
5.5.1 Naturlig tilstand (ingen grundvandsindvinding)	52
5.5.2 Indvindingspåvirket tilstand	57
5.6 Vandbalancer.....	61
6 Konklusion	67
7 Referencer.....	73

1 Indledning

Der er indikationer for, at øget emission af drivhusgasser vil medføre markante påvirkninger af det fremtidige klima på jorden (f.eks. Giorgi et al., 2001). Modelberegninger udført af DMI (Danmarks Meteorologiske Institut) viser, at for Danmark vil IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) emissionsscenerierne A2 og B2 (Nakicenovic et al., 2000) resultere i stigninger i årsmiddel temperaturen på mellem 0,7 og 4,6 °C i løbet af det enogtyvende århundrede. I sommerhalvåret kommer der flere episoder med kraftig nedbør og længerevarende perioder med tørke (Christensen & Christensen, 2004). I vinterhalvåret kommer der mere nedbør, der fortrinsvis vil falde som regn. Yderligere viser modelsimuleringerne, at solindstrålingen i august til oktober vil stige, mens den vil falde i de øvrige måneder. Sammenholdt med ændringerne i temperatur og vindhastigheder vil det påvirke størrelsen og den sæsonmæssige variation i potentiel fordampning i fremtiden. Hvordan disse ændringer i både nedbør, temperatur og potentiel fordampning, som er de drivende variable for den landbaserede del af det hydrologiske kredsløb, samlet set vil påvirke grundvandsdannelsen, grundvandsstanden, vandløbsafstrømningen, og vandbalancen er derfor det, denne modelbaserede undersøgelse søger at rette fokus på og illustrere på baggrund af den nationale vandressourcemodel (DK-model) og inddata fra klimamodellerne (A2 og B2 scenarierne).

Der er behov for at tilvejebringe et grundlag, der beskriver, hvordan de forventede fremtidige klimaforandringer vil påvirke det hydrologiske kredsløb. Der er gennemført en del undersøgelser af effekten af klimaændringer på hydrologien generelt (Kriyanova et al., 2005; Christensen et al., 2004; Kleinn et al., 2005; Payne et al., 2004; Shabalova et al., 2003; Vanrheenen et al., 2004), hvor der primært er fokuseret på betydningen af klimaændringer på overfladevandssystemer og ekstreme vandløbsafstrømninger. Der er imidlertid relativt få undersøgelser af effekten på grundvand. Brouyere et al. (2004) fandt i en analyse af klimaændringers effekt på grundvandsressourcerne i et mindre opland i Belgien, at grundvandsstanden falder, mens den sæsonmæssige variation i grundvandsstanden ikke forøges. Loaiciga et al. (2000) undersøgte effekten af klimaændringer for et grundvandssystem i Texas, USA, og konkluderede, at forøgede koncentrationer af drivhusgasser vil resultere i vandressourceproblemer, hvis ikke grundvandsindvindingen i området reduceres.

EEA (2005) vurderer på basis af det nuværende vidensgrundlag, at den årlige tilgængelige vandmængde generelt stiger i Nordeuropa i fremtiden. Da det samtidig forventes, at vandbehovet vil have en faldende tendens, vurderes det, at trykket på vandressourcerne vil falde i Skandinavien, Beneluxlandene og Tyskland. Der er imidlertid stor usikkerhed både på det fremtidige vandbehov og på, hvordan klimaændringerne vil påvirke de enkelte led i vandbalancen. Samtidig vil det have stor betydning for udnyttelsen af vandressourcerne, hvordan den fremtidige nedbør og fordampning fordeler sig over året, da det vil influere på eksempelvis forholdet mellem grundvandsdannelse og overfladisk afstrømning.

Der er endnu ikke publiceret resultater for, hvordan de klimatiske ændringer vil påvirke det hydrologiske system i Danmark, når både grundvand og overfladevand og interaktionen mellem de to domæner tages i betragtning. Ændringer i f.eks. grundvandsdannelsen til dybe magasiner kan have signifikant betydning for den fremtidige bæredygtige udnyttelse af grundvand, fordi den del, der kan indvindes, er proportional med, hvor meget vand der 'gennemstrømmer' de dybe magasiner med en god vandkvalitet. Da grundvandsmagasinerne samtidig udgør den primære kilde til vandløbsafstrømningen i sommerhalvåret, får ændringer i grundvandsdannelse og grundvandsstand afgørende betydning for minimumsvandføringen i vandløb og dermed forsyningen af det akvatiske miljø med rent og koldt grundvand. Interaktionen mellem grundvand og overfladevand afhænger af geologien, og det er derfor vigtigt at belyse betydningen af klimaændringer med en fysisk baseret model, der eksplicit tager hensyn til den

geologiske opbygning af undergrunden. Det samme gælder vurdering af grundvandsspejlets beliggenhed og den fremtidige udvikling i grundvandsdannelse og grundvandsafstrømningens størrelse.

Formålet med nærværende projekt er at undersøge betydningen af det 21. århundredes klimaændringer for kvantiteten (størrelsen) af de komponenter i vandkredsløbet, der fornyr grundvandsforekomsterne og udgør grundlaget for sommerafstrømningen i vandløb. Fokus i undersøgelsen er at kvantificere den fremtidige grundvandsdannelse, beliggenheden af grundvandsspejl og grundvandets trykniveau i dybere magasiner samt vandløbsafstrømning. Både temporære og geografiske variationer over Danmark søges belyst i undersøgelsen.

2 Teori

I det følgende beskrives de metoder, værktøjer og antagelser, der benyttes til kvantificering af klimaændringernes effekt på vandkredsløbet, og dets forskellige delkomponenter (f.eks. grundvandsdannelse og afstrømning).

2.1 Metode anvendt til kvantificering af klimaændringer

Som basis for kvantificering af effekten af klimaændringer på vandkredsløbet benyttes ”den national vandressourcemodel” også kaldet DK-modellen (Henriksen et al., 2003a). Modellen simulerer ferskvandets kredsløb, bl.a. grundvandssystemets og vandløbssystemets respons på specificerede input af bl.a. nedbør, temperatur og potentiel fordampning og er derfor velegnet til at beskrive konsekvensen af fremtidige klimaændringer.

DK-modellen benyttes i denne undersøgelse til beregning af konsekvenser af klimatiske ændringer på grundvandsdannelse, grundvandsniveau og vandløbsafstrømning. Klimaændringer baseres på IPCC’s scenarier for emission af drivhusgasser benævnt A2 og B2, som repræsenterer hhv. et middelhøjt og et middellavt emissionsscenario. Der benyttes resultater fra DMI’s regionale klimamodel HIRHAM (Christensen et al., 1996), som i EU-projektet PRUDENCE blev anvendt til at generere klimadata for forskellige emissionsscenarier. Randbetingelserne til den regionale klimamodel stammer fra den britiske globale atmosfæriske klimamodel HadAM3H, som for det nutidige klima er anvendt med observerede drivhusgaskoncentrationer og havtemperaturer. For fremtidsscenarier er der på baggrund af det valgte emissionsscenario beregnet drivhusgaskoncentrationer, der svarer hertil, mens havtemperaturer er beregnet vha. den britiske atmosfære-havmodel HadCM3. Derefter er HadAM3H anvendt til de globale klimaberegninger, hvorefter nedskaleringen er foretaget vha. HIRHAM.

Der er ikke regnet på emissionsscenariet EU2C, da der pt. ikke foreligger klimamodelresultater fra dette scenarium, som ville kunne anvendes som input til den hydrologiske model. I nærværende projekt benyttes simulerede ændringer i nedbør og temperatur samt klimatologiske variable, der efterfølgende benyttes til beregning af reference fordampning. Disse ændringer er vurderet på baggrund af klimascenario-data, der er tilgængelige for både en kontrolperiode, som dækker 1961-1990 (repræsenterende nuværende klimatiske forhold), og for perioden 2071-2100 (repræsenterende fremtidssituationen). For A2-scenariet foreligger klimamodelresultaterne i et 12-km grid, mens de for B2 foreligger i et 50-km grid. Selv om B2-resultaterne kun er tilgængelige i et grovere net, vurderes de fortsat at være brugbare i relation til DK-modellen, der er baseret på et 40-km klimagrid. Desuden viser van Roosmalen et al. (2006), at der er relativt lille forskel på at anvende værdier fra A2-scenariet i hhv. 12 km og 50 km opløsning til den foreliggende opgave.

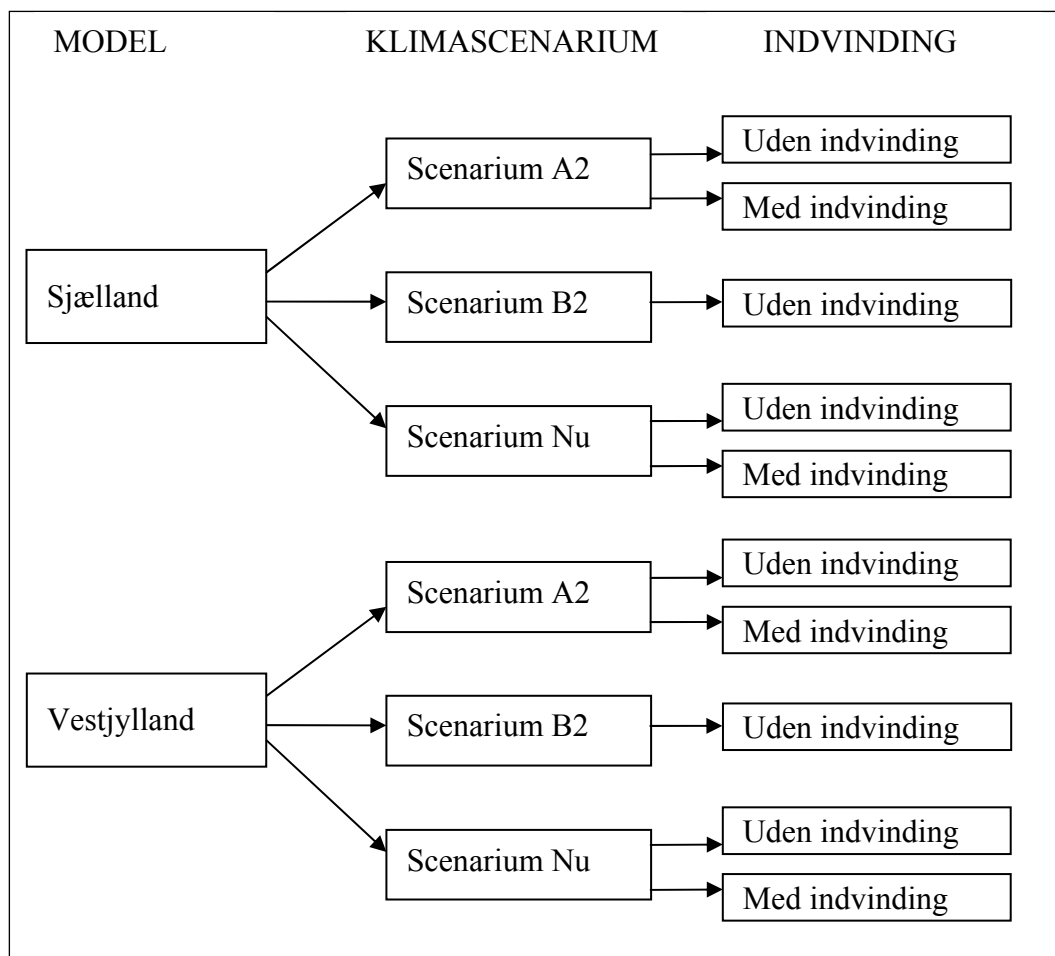
For klimascenarium A2 gennemføres der analyser af klimaændringernes effekt på vandkredsløbet i to situationer:

- (1) ”*Naturlig tilstand*”, hvor der ikke sker grundvandsindvinding, og hvor der ikke foretages kunstig vanding. Situationen uden grundvandsindvinding er en slags idealtilstand, der gennemregnes for at isolere effekten af klimaændringer på det ferske vands kredsløb uden ’menneskeskabte påvirkninger’ (f.eks. ændringer i vandindvinding)
- (2) ”*Indvindingspåvirket tilstand*”, hvor grundvandsindvinding til alm. vandforsyning fastholdes på et niveau svarende til middelindvinding i 1990-erne, og hvor behovet og anvendelsen af kunstig vanding beregnes vha. DK-modellens rodzonemodell og implementeres i beregningerne.

For klimascenarium B2 gennemføres der kun analyser af den ”naturlige tilstand”, dvs. uden vandindvinding og kunstig vanding. Det hydrologiske respons på B2-scenariet forventedes på projektets planlægningsstadiet at ligge mellem nutidsscenariet og A2-scenariet. Derfor blev det vurderet som fyldestgørende at kvantificere effekterne for den naturlige tilstand,

hvorefter effekterne i den indvindingspåvirkede tilstand ville kunne findes ved interpolation mellem de øvrige resultater. Nedenstående figur 1 illustrerer, hvilke scenarier der gennemføres.

Ideelt set burde det være muligt at anvende klimamodellens output for hhv. kontrolperioden og fremtidsscenarierne som input direkte til den hydrologiske model. Meteorologiske variable fra klimamodeller er imidlertid ofte behæftede med systematiske fejl (Graham et al, 2005), som resulterer i, at der f.eks. genereres for meget eller for lidt nedbør for et givent område. Det er derfor nødvendigt enten at skalere klimamodellens output (ved hjælp af den såkaldte 'direkte metode') eller at udnytte klimamodellens resultater for hhv. kontrolperiode og fremtidsscenario til beregning af faktorer, der beskriver 'forskellen' (ændringer i hhv. nedbør, temperatur og fordampning) mellem klimavariabel i de to situationer, f.eks. faktorer der angiver ændringer på månedsbasis. Faktorerne benyttes efterfølgende til at modificere historiske data af observerede klimavariabel (f.eks. nedbør og temperatur). Den mest almindelige af sidstnævnte metoder benævnes 'delta change' eller 'delta metoden' (Hay et al., 2000), der benyttes i nærværende undersøgelse. På baggrund af klimamodellens resultater for kontrolperioden og fremtidsscenarierne (A2 og B2) beregnes det, hvor meget eksempelvis nedbøren ændrer sig på månedsbasis. Herved estimeres en faktor for hver af årets tolv måneder ud fra 30 års simuleringer med klimamodellen og sammenligning med klimamodelsimuleringer for den 30-årige kontrolperiode. Disse faktorer multipliceres efterfølgende med de historisk observerede daglige nedbørsdata for at beregne et så realistisk og konsistent input som muligt til den hydrologiske model.



Figur 1 Illustration af gennemførte klimascenarier og antagelser om grundvandsindvinding. Scenarium Nu betegner nuværende klimaforhold.

Den største ulempe ved anvendelse af *delta metoden* er, at de ekstreme værdier fra fremtidsscenarierne filtreres bort i skaleringsprocessen. Metoden vil f.eks. ikke kunne beskrive effekten af, at sommernedbøren falder som enkelte kraftige regnhændelser frem for mange små hændelser. Desuden antages det implicit, at de simulerede klimavariabler er stationære i både kontrolperioden og fremtidsscenariet, hvilket kan være en rimelig antagelse for kontrolperioden, mens den kan være mere problematisk i fremtidsscenariet, hvor koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren er stigende.

Delta metoden vurderes til gengæld at være robust overfor eventuelle systematiske fejl i klimamodellens prediktioner af den fremtidige dynamik i klimaet. Metoden afhænger eksempelvis ikke af, om klimamodellen beskriver nedbørshyppighed og -intensitet korrekt, da den kun udnytter forskellen mellem kontrolperioden og fremtidsperioden som input. Hvis klimamodellen er i stand til at beskrive den overordnede trend i temperatur-, fordampnings-, og nedbørsudvikling, vil metoden give et pålideligt estimat af de gennemsnitlige effekter på det hydrologiske kredsløb.

Der arbejdes i det følgende med tre forskellige tidsperioder og datasæt. Udover kontrolperioden (1961-90) og fremtidsperioden (2071-2100), hvorfra der foreligger simulerede resultater fra klimamodellen, benyttes der observerede data for nedbør, fordampning og temperatur for perioden 1971-2004 som input til den hydrologiske model. Heraf anvendes de sidste 15 år, 1990-2004, som basis for analysen af ændringer i det hydrologiske system, og denne 15-årige periode betegnes i det efterfølgende som nutidsperioden.

Det antages i de gennemførte analyser, at øvrige effekter af klimaændringer kan negligeres. De vigtigste konsekvenser, som der herved ses bort fra, inkluderer:

- ændringer i havniveau; havniveauet forventes at stige med op til ca. en meter i fremtiden (afhængig af emissionsscenario og anvendt klimamodel)
- ændringer i arealanvendelse, f.eks. forøgelse eller reduktion i vådområder, ændringer i afgrødevalg som følge af ændrede vækstbetingelser
- ændringer i dyrkningspraksis, f.eks. reduktion af vækstsæson/mulighed for forøget antal vækstsæsoner som følge af højere temperaturer

2.2 Delta metoden

I det følgende beskrives metoden ”delta change” kort. I delta metoden beregnes input mht. nedbør, temperatur og fordampning i fremtidssituationen ud fra historiske tidsserier af samme variable, som repræsenterer nutidssituationen. For nedbør fås følgende algoritme til beregning af daglig fremtidig input

$$P_{\Delta}(i, j) = \Delta_P(j)P_{obs}(i, j) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

hvor P_{Δ} er nedbøren for fremtidsscenariet og P_{obs} er den observerede nedbør i den historiske periode (nutidsperioden). (i, j) betegner dag og måned. Δ_P er ændringen i nedbør som simuleret (predikeret) af klimamodellen. Denne værdi beregnes som

$$\Delta_P(j) = \frac{\bar{P}_{fut}(j)}{\bar{P}_{cont}(j)} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (2)$$

hvor $\bar{P}(j)$ er middelværdien af nedbør for måned j over den betragtede periode. Indeks *fut* betegner fremtidsscenariet (2071-2100), mens indeks *cont* betegner kontrolperioden (1961-1990). Delta-værdierne Δ_P beregnes på månedsbasis, og der fremkommer dermed 12 delta-værdier, som anvendes til at skalere det målte nedbørsinput til et fremtidigt nedbørsinput.

På tilsvarende vis beregnes reference evapotranspirationen, ET_0 , for fremtidsscenariet som

$$ET_{0,\Delta}(i, j) = \Delta_{ET}(j)ET_{0,obs}(i, j) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

hvor Δ_{ET} er givet ved

$$\Delta_{ET}(j) = \frac{\overline{ET}_{0,fut}(j)}{\overline{ET}_{0,cont}(j)} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (4)$$

Reference evapotranspirationen for hhv. kontrol og fremtidsscenarierne beregnes vha. Penman-Monteith ligningen beskrevet nedenfor.

For temperatur benyttes følgende beregning

$$T_{\Delta}(i, j) = T_{obs}(i, j) + \Delta_T(j) \quad (5)$$

hvor Δ_T er givet ved

$$\Delta_T(j) = \overline{T}_{fut}(j) - \overline{T}_{cont}(j) \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (6)$$

Klimamodellens kontrol-periode ligger fra 1961 til 1990, mens de observerede nedbørs-værdier er baseret på perioden 1990-2004. Effekten af klimaændringerne findes ved at sammenligne den hydrologiske models respons på de observerede værdier af P_{obs} , T_{obs} og $ET_{0,obs}$ med responset beregnet på baggrund af de ovenstående værdier af P_{Δ} , T_{Δ} og $ET_{0,\Delta}$.

2.2.1 Bestemmelse af reference fordampning

På baggrund af klimavariabler fra klimamodellen (stråling, dugpunktstemperatur, vindhastighed, osv.) er der genereret tidsserier med daglige værdier for reference evapotranspiration for kontrol- og fremtidsscenarier. Reference evapotranspiration beregnes med Penman-Monteith (FAO) ligningen (Allen et al., 1990):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta_e(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta_e + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

hvor:

- ET_0 : referencefordampning [mm dag^{-1}]
- R_n : nettostråling ved overfladen [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- G : jordvarmeffluksen [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- T : daglig gennemsnitlig lufttemperatur i 2 m højde [$^{\circ}\text{C}$]
- u_2 : vindhastighed i 2 m højde [m s^{-1}]
- $e_s - e_a$: mætningsdeficit [kPa]
- Δ_e : hældning på damptrykskurven [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- γ : psykrometernkonstanten [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Nettostråling beregnes ud fra klimamodellens output for indkommende og udgående kortbølget stråling samt indkommende og udgående langbølget stråling. Det antages, at G kan negligeres, da det generelt er en relativ lille størrelse. Daglig gennemsnitstemperatur bliver beregnet som middelværdi af dagens maksimum og minimum temperatur. Mættet damptryk beregnes på basis af daglig gennemsnitstemperatur, og det aktuelle damptryk baseres på daglig dugpunktstemperatur. Hældningen på damptrykskurven beregnes ud fra gennemsnitstemperaturen.

2.2.2 Bestemmelse af delta-værdier

På baggrund af daglige værdier af meteorologiske variable fra klimamodellen beregnes månedlig middel af nedbør, reference fordampning og temperatur for både kontrol- og frem-

tidsperiode for hver af klimamodellens gridceller, som for A2-scenariet foreligger i en opløsning på 12 x 12 km grid, mens der for B2-scenariet benyttes den grovere diskretisering på 50 x 50 km. Vha. ligning (2), (4) og (6) ovenfor bestemmes deltaværdier for hver enkelt grid. Herefter foretages en rumlig midling af delta-værdierne for alle landbaserede grid i Danmark. Delta-værdierne repræsenterer dermed de gennemsnitlige forhold i Danmark.

2.3 Hydrologisk model

Den nationale vandressourcemodel (DK-modellen) er baseret på modelsystemet MIKE SHE (Abbott et al., 1986; Refsgaard and Storm, 1995). MIKE SHE er en deterministisk og fysisk baseret model, som udgør et fuldt distribueret og integreret hydrologisk modelsystem, der er i stand til at beskrive de vigtigste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske system. I forbindelse med DK-modellen anvendes MIKE SHE's beskrivelse af grundvandsstrømning, overfladevandsafstrømning og vandløbsafstrømning, mens der vha. en separat rodzonemodel beregnes nettonedbør baseret på input af nedbør, fordampning og temperatur (Henriksen et al., 2003a; Henriksen et al., 2003b; Sonnenborg et al.; 2003).

Den nationale vandressourcemodel udgør en integreret grundvands/overfladevandsmodel, som dækker hele landet (43.000 km²). Modellen er baseret på et 1 km² beregningsnet. På basis af daglige værdier for nettonedbør fra rodzonemodellen beregnes grundvandsstrømningen med en relativ detaljeret 3D grundvandskomponent, som beskriver grundvandsdannelse og trykniveau i forskellige geologiske lag. Vandløbskomponenten definerer afstrømning i vandløb og beskriver udveksling mellem grundvand og vandløb. Modellen er baseret på omfattende databaser for geologi, jordart, topografi, vandløbssystem, klima og hydrologi.

DK-modellen er kalibreret mod observationsdata for hydraulisk trykniveau og vandløbsafstrømning, og er efterfølgende valideret i en split-sample test mod samme datatyper (se Sonnenborg et al., 2003). Modeldokumentation kan findes i Henriksen et al. (2003b) og Trolborg og Henriksen (2006).

DK-modellen har som primært formål at simulere grundvandsressourcens størrelse, regionale fordeling og tidlige variationer. Modellen vurderes at være et pålideligt værktøj til vurdering af overordnede vandressourceforhold på landsplan, og til vurderinger af den regionale fordeling. Modellen er i stand til at simulere den tidlige udvikling i grundvandsstand og afstrømning i vandløb. Resultaterne har størst gyldighed ved regionale betragtninger og modelskalaen (1x1 km) bevirker eksempelvis, at simuleringer af vandløbsafstrømningen i de enkelte tilløb og mindre vandløb kan være afvigende i forhold til observationer. Imidlertid vil påvirkningen af vandføring som følge af ændringer i vandindvindingen eller nettonedbør kunne simuleres rimeligt pålideligt, når det gælder de større vandløb eller vandløbssystemer. Ændringer i vandbalanceforhold som følge af ændrede klimaforhold (nedbør og fordampning) kan vurderes rimeligt sikkert med modellen.

Modellens prediktive evner er hovedsageligt blevet testet mod observationer af grundvandsstanden i de dybe regionale magasiner samt mod observationer af vandløbsafstrømning. Det kan derfor forventes, at modellen giver en pålidelig beskrivelse af den overordnede vandbalance, trykforholdene i de dybereliggende grundvandsmagasiner, samt vandføringen i vandløb. Der er fokuseret mindre på modellens evne til at reproducere vandstanden i de overfladenære strømmingsystemer (vandløb, det øvre grundvand) og til at reproducere strømningsveje. Modellen inkluderer ikke en integreret beskrivelse af den umættede zone, men benytter en separat rodzone-model, som giver mulighed for en grov differentiering mellem skov, by, ånære områder og åbent land inkl. vandede afgrøder (fortrinsvis i Jylland). Ændringer i arealanvendelsen og konsekvenser repræsenteres derfor kun til en vis grad i modellen, og en bedre beskrivelse vil kunne opnås, hvis modellen blev udbygget til at inkludere en integreret beskrivelse af den umættede zone. Dette ville også gøre det muligt at kvantificere effekten af ændringer i grundvandsspejlets beliggenhed på størrelsen af den aktuelle fordampning (som igen

påvirker grundvandsspejlets beliggenhed). Samlet må det forventes, at der er en vis usikkerhed på modellens evne til at beskrive den absolutte placering af vandspejlet i vandløb og terrænnære grundvandsmagasiner.

Da håndteringen af det klimatiske input er vigtig i forbindelse med vurdering af effekter af fremtidige klimaændringer, gives der i det følgende en detaljeret beskrivelse af rodzonemodellen, hvor beregningen af nettonedbøren foretages. For en beskrivelse af de øvrige moduler i DK-modellen henvises til Henriksen et al. (2003b) og Sonnenborg et al. (2003).

2.4 Beregning af nettonedbør

2.4.1 Historiske nedbørs- og fordampningsdata

Inputdata for nedbør, fordampning og temperatur til den hydrologiske model er baseret på 40 x 40 km klimagrid (Scharling, 1999), som repræsenterer en arealmidlet værdi over et bestemt område. Gridnedbøren justeres for fordampnings- og wetting-tab samt aerodynamiske effekter vha. månedlige korrektionsfaktorer

$$P_{obs} = kP_{meas} \quad (8)$$

hvor P_{obs} er den korrigerede nedbørsværdi og P_{meas} er den målte værdi. k repræsenterer korrektionsfaktoren, hvor der i nærværende sammenhæng benyttes standardværdier svarende til moderat læ, se tabel 1.

Tabel 1 Månedlige nedbørskorrektionsfaktorer, k , for station med moderat læ (Allerup et al., 1998).

Måned	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
k	1.41	1.42	1.35	1.24	1.13	1.11	1.10	1.10	1.11	1.14	1.23	1.37

De høje korrektionsfaktorer i vintermånederne skyldes primært problemer med at måle fast nedbør (sne, slud).

Referencefordampningen beregnes med den modificerede Makkink metode (Aslyng og Hansen, 1982)

$$ET_{0,obs} = 0.7 \frac{\Delta_e}{\Delta_e + \gamma} \frac{R_g}{\lambda} \quad (9)$$

hvor R_g er daglig globalstråling, Δ_e er hældningen på damptrykskurven, γ er psykrometerekonstanten, og λ er vands fordampningsvarme. Potentiel fordampning, ET_p , beregnes ved multiplikation af referencefordampningen med en afgrødespecifik koefficient, K_c ,

$$ET_p = ET_0 \cdot K_c \quad (10)$$

For skovområder benyttes $K_c = 1.1$, mens der for landbrugsarealer og vådområder anvendes $K_c = 1.0$.

For perioden 1971-1989 stammer de klimatiske data fra Dansk Jordbrugsforsknings klimagrid (Plauborg og Olesen, 1991), mens der for perioden 1990-2004 er benyttet data fra Danmark Meteorologiske Institut (Scharling, 2001). Pga. forskelle i klimastationer, der benyttes til beregning af gridværdier, samt forskelle i interpolationsmetode, kan der være forskel på de værdier, som de to institutioner beregner. Det er derfor valgt at basere analysen af klimaændringer udelukkende på data fra perioden 1990-2004. Den forudgående periode 1971-1989 benyttes som opvarmningsperiode, hvor den hydrologiske model kan tilpasse sig ændringer i input, f.eks. forårsaget af ændringer i klimainput.

2.4.2 Rodzonemodul

DK-modellens rodzonemodul opstiller en simpel vandbalance for rodzonen ud fra en empirisk relation mellem aktuel og potentiel fordampning som funktion af vandindholdet i rodzonen (Kinzelbach, 1986). Modulet fordeler nedbøren mellem nedsivning og aktuel fordampning. Den styrende parameter i beregningen udgøres af rodzonekapaciteten, som afhænger af vegetationstype samt jordart.

Der opereres i DK-model sammenhæng med tre forskellige arealanvendelser: Vådområde, skov og åbent land (inkl. landbrugsjord). I vådområder antages, at der sker potentiel fordampning året rundt uanset nedbør. Skovarealerne tildeles en rodzonekapacitet på 150 mm, hvilket resulterer i en forholdsvis høj aktuel fordampning. Åbent land inddeles i områder med sandjord og lerjord. Rodzonekapaciteten for sandjord er sat til 70 mm, mens den for lerjord er på 140 mm. I Jylland, hvor der i forbindelse med landbrugsjorde er et stort vandingsbehov, medregnes markvanding som et ekstra tilskud til nedbøren, og der differentieres her mellem åbent land med og uden kunstig vanding. Arealanvendelsen findes på baggrund af GIS-bearbejdede AIS-data (Areal-informations-systemet, Nielsen et al., 2000), mens jordbundsbeskrivelsen er baseret på jordartskort (Nielsen et al., 2000).

Beregningsproceduren, som foregår på daglig basis, inkluderer en sneroutine, som beskriver snemagasiner og snesmeltning. Snesmeltning håndteres ved en graddagsfaktor metode. Når temperaturen er under 0 °C, bidrager nedbøren til snemagasinet, S_{snow} [L], hvorfra det frigives, når temperaturen overstiger 0 °C. Snesmeltningen, P_s [LT^{-1}], beregnes på følgende måde:

$$P_s = C_{snow} T \quad \text{for } T > 0^\circ C \quad (11a)$$

$$P_s = 0 \quad \text{for } T \leq 0^\circ C \quad (11b)$$

hvor C_{snow} [$LT^{-1}\Phi^{-1}$] er graddagskoefficienten (der anvendes 3 mm sne/dag/°C) og T er den daglige middeltemperatur (°C). Baseret på korrigeret nedbør, P_{obs} , samt vandfrigivelsen fra snemagasinet, P_s , beregnes det totale input P_t [LT^{-1}] til rodzonemodulet ud fra:

$$P_t = P_{obs} + C_{snow} T \quad \text{for } C_{snow} T \Delta t < S_{snow} \quad (12a)$$

$$P_t = P_{obs} + S_{snow} \quad \text{for } C_{snow} T \Delta t \geq S_{snow} \quad (12b)$$

hvor Δt er tidsskridtet, som anvendes i beregningen (daglige beregninger). Med undtagelse af vådområderne baseres nedsivningen fra rodzonen på vandindholdet, som beregnes vha.:

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + (P_t - ET_a - R)\Delta t \quad (13)$$

hvor θ er vandindholdet i rodzonen [L], P_t er det totale vandinput beregnet ved (12), ET_a er den aktuelle evapotranspiration [LT^{-1}], R er perkolationen ud af rodzonen [LT^{-1}], t er tiden [T] og Δt er tidsskridt [T].

Aktuel evapotranspiration ET_a beregnes ud fra (Kinzelbach, 1986):

$$ET_a = ET_p \quad \text{for } \theta(t) > 0.7\theta_{FC} \quad (14a)$$

$$ET_a = ET_p \left[0.188 + 2.0 \frac{\theta(t)}{\theta_{FC}} + 1.2 \left(\frac{\theta(t)}{\theta_{FC}} \right)^2 \right] \quad \text{for } \theta(t) < 0.7\theta_{FC} \quad (14b)$$

hvor ET_p er potentiel fordampning [LT^{-1}] og θ_{FC} er markkapaciteten for rodzonen [L].

Hvis $P_t - ET_a > 0$, beregnes perkolationen R i tidsskridtet Δt ud fra en stykvis lineær funktion afhængig af vandindholdet i rodzonen.

$$R = 0 \quad \text{for } \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t < 0.7\theta_{FC} \quad (15a)$$

$$R = 0.1(P_t - ET_a) \quad \text{for } 0.7\theta_{FC} \leq \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t < \theta_{FC} \quad (15b)$$

$$R = \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t - \theta_{FC} \quad \text{for } \theta(t) + (P_t - ET_a)\Delta t \geq \theta_{FC} \quad (15c)$$

Hvis $P_t - ET_a$ er negativ, genereres der ingen perkolation dvs. $R = 0$.

I vådområder, hvor aktuell fordampning på grund af kapilar stigning antages at være lig potentiel fordampning, findes perkolationen til.:

$$R = P_t - ET_p \quad (16)$$

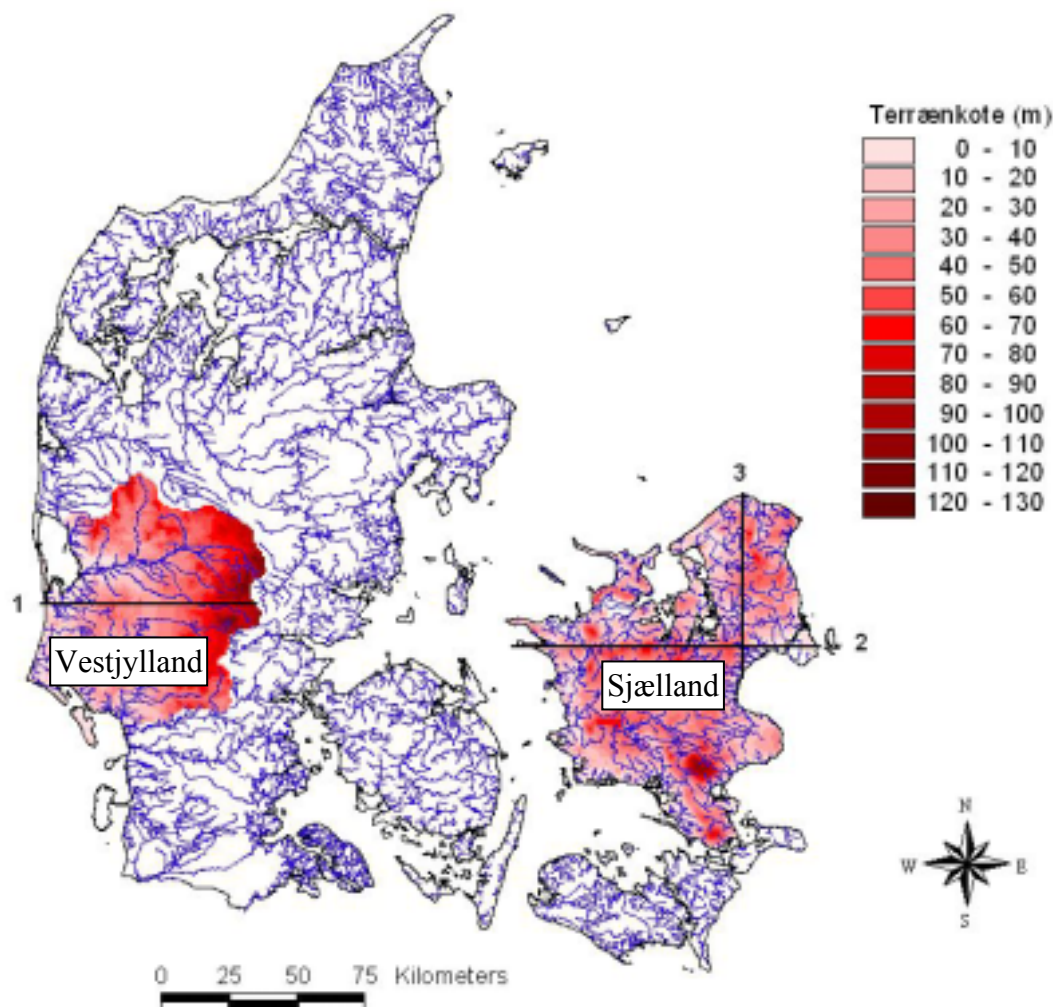
Da potentiel fordampning, ET_p , kan overstige nedbøren P_t for vådområder, er der mulighed for at generere negativ perkolation. Dette implementeres i MIKE SHE ved angivelse af en maksimumsdybde under terrænoverfladen, over hvilken vand antages tilgængelig for evapotranspiration fra vådområder. Hvis grundvandsspejlet ligger under det specificerede niveau, sættes den opadgående strømning lig nul.

Store arealer i Jylland anvendes til landbrug på jorde med et stort vandingsbehov, og det har derfor været vigtigt i DK-model Jylland at kunne medtage markvanding i modellen. Dette er gjort ved at tilføre vand til rodzonemodellen i områder med markvanding, når vandindholdet i rodzonen er mindre end 30% af markkapaciteten. Der tilføres på daglig basis en vandmængde svarende til, at vandindholdet i rodzonen igen kommer op på 30 % af markkapaciteten. Rodzonemodulet genererer kun markvanding i sommermånederne (maj, juni, juli og august), og tager dermed ikke højde for at en evt. yderligere mulig vækstsæson kunne medføre vandingsbehov f.eks. i september som følge af fremtidssceneriet med forøget fordampning i denne periode. Markvandingsrutinen er blevet finjusteret på baggrund af data fra Sønderjyllands Amt, således at de simulerede vandingsmængder samlet set er i overensstemmelse med de årlige indberettede oppumpninger til markvanding (Christensen et al., 2000). Vandet, der tilføres rodzonemodellen, specificeres som oppumpning fra markvandingsboringer i området. Den genererede markvanding resulterer dermed i en øget oppumpning af grundvand. Det meste af den tilførte markvanding fordampes, mens en mindre del re-infiltrerer til grundvandssystemet via en forøgelse af perkolationen R .

Siden DMI opjusterede værdierne for nedbørskorrektionsfaktorer i 1998 (Allerup et al., 1998) har der været problemer med at opnå en god vandbalance i Danmark (se Plauborg et al., 2002 for en diskussion af problemstillingen). Det har derfor været nødvendigt at reducere nettonedbøren, der beregnes med rodzonemodellen, for at opnå en rimelig vandbalance ved vandløbsstationerne. I de aktuelle modelopsætninger anvendes der i Vestjyllandsmodellen en reduktionsfaktor på 0,97, mens der på Sjælland benyttes en distribueret værdi (for hhv. den nordøstlige, den vestlige og den sydlige del af modelområdet) i intervallet 0,78 – 0,85. Det ses, at mens vandbalancen for Vestjylland er tæt på at være opfyldt (reduktionsfaktor tæt på 1), er der væsentlige problemer på Sjælland. De introducerede reduktionsfaktorer er et udtryk for en væsentlig usikkerhed på både nedbør og aktuell fordampning i Danmark. En løsning på vandbalanceproblemerne i Danmark ligger ikke indenfor dette projekts muligheder, men det ville være hensigtsmæssigt, hvis årsagerne til problemet blev kortlagt, for vandbalanceproblemet bidrager betragteligt til usikkerheden på analysen af fremtidige ændringer af netop nedbør, temperatur og fordampning.

3 Oplande og modelopstilling

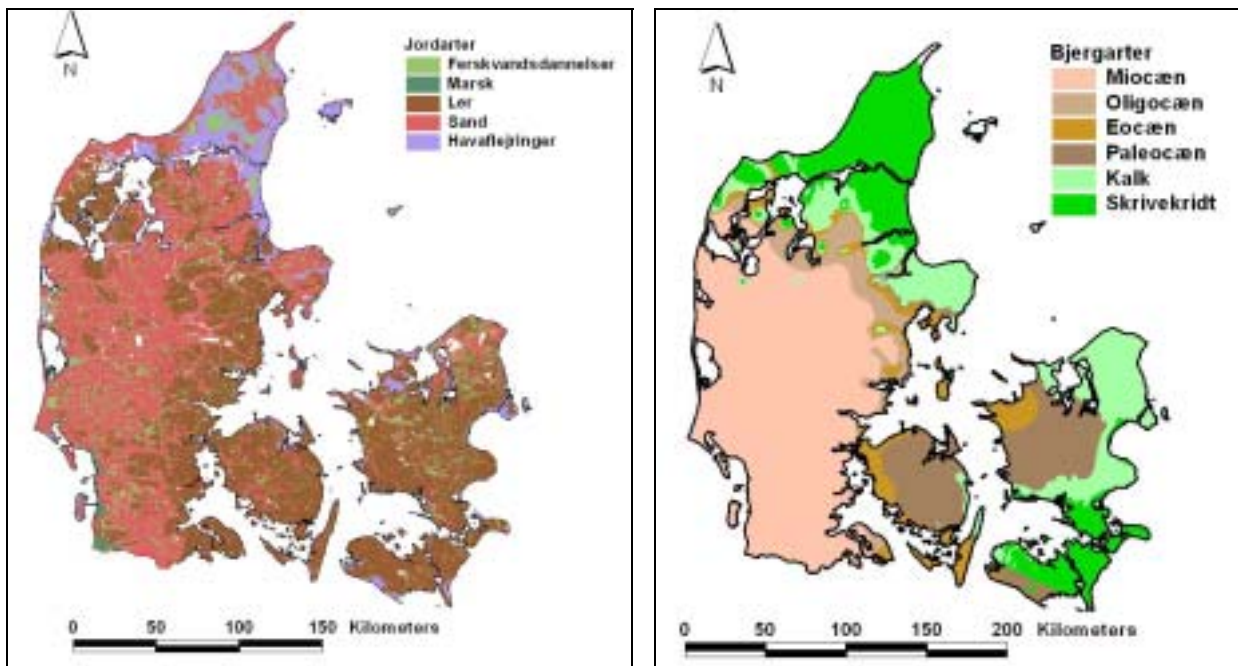
DK-modellen er opdelt i et antal delmodeller, og det er derfor ikke muligt at simulere vandkredsløbet i hele Danmark på en gang. Det er valgt at basere arbejdet på to delmodeller: En model, som dækker den vestlige del af Jylland, og en anden model, som dækker Sjælland, se figur 2. Det forventes hermed, at forskelle i f.eks. geologiske og geografiske forhold belyses i analysen.



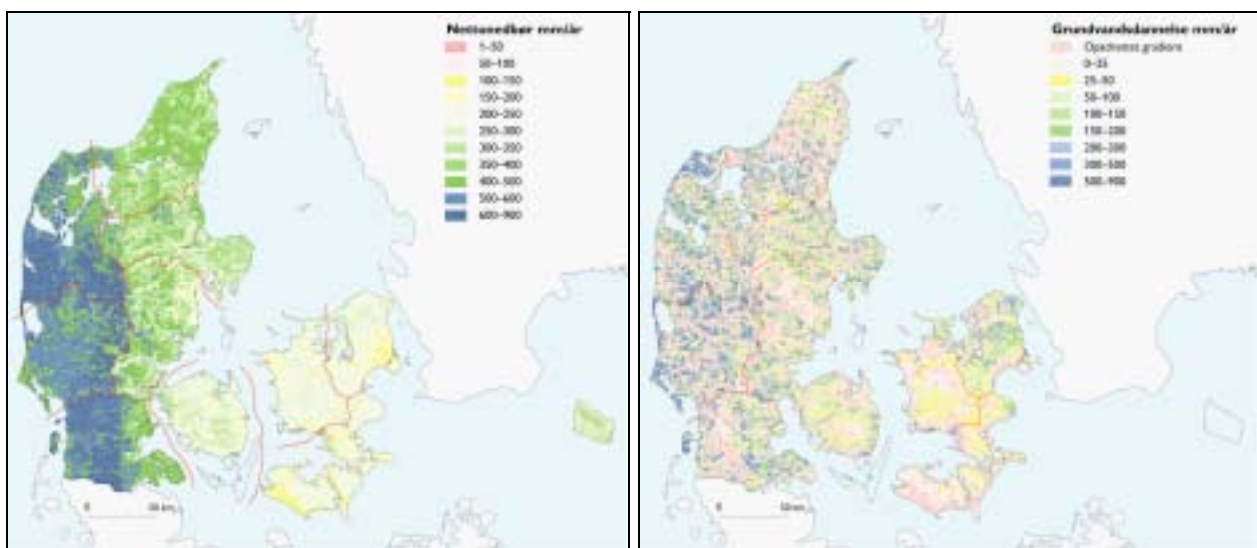
Figur 2 Placering af modelområderne i hhv. Vestjylland og på Sjælland. De nummererede linier angiver placeringen af tværsnit, som præsenteres senere.

Det er valgt at evaluere effekterne af klimaændringer for både et opland i Vestjylland og på Sjælland, da de to områder adskiller sig fra hinanden på flere punkter. Mht. til geologisk opbygning er det Vestjyske område karakteriseret ved forholdsvis højpermeable enheder, bl.a. store regionale sandforekomster, mens Sjælland er karakteriseret ved, at de øverste lag generelt er dannet under sidste istid og derfor præget af moræneaflejringer (se figur 3, 5 og 6).

Desuden er de klimatiske forhold forskellige for de to områder, hvor der i Vestjylland falder betydeligt mere nedbør end på Sjælland, mens den potentielle fordampning er lidt højere på Sjælland. Nettonedbøren i Vestjylland bliver derfor væsentlig højere end på Sjælland, se figur 4. Da de geologiske aflejringer samtidig er mere permeable i Vestjylland, bliver der stor forskel på grundvandsdannelsen i de to områder, se figur 4.



Figur 3 Til venstre ses et simplificeret jordartskort for Danmark, hvor de dominerende jordtyper én meter under jordoverfladen er vist. Til højre er Danmarks prækvartæroverflade, som viser fordelingen af bjergarter under de kvartære aflejringer, vist.



Figur 4 Til venstre ses fordeling af nettonnedbør i Danmark (fra Henriksen et al., 2003b). Til højre ses grundvandsdannelse til dybe grundvandsmagasiner i Danmark (fra Henriksen et al., 2003b).

Endelig adskiller de to områder sig markant fra hinanden mht. markvanding, hvor der i Vestjylland markvandes intensivt, mens dette bidrag er relativt beskedent på Sjælland. For vandløbsafstrømningen betyder forskellene mellem de to områder, at vandløbsafstrømningen i Vestjylland kan karakteriseres som stabil, med relativ lille forskel mellem minimums- og maksimumsvandføring, mens vandføringen i de Sjællandske vandløb er ustabil, med lave minimumsvandføringer og høje maksimumsvandføringer. Forskellene skyldes bl.a., at vandløbene på Sjælland generelt løber gennem lerede jorde, og at der derfor er relativ dårlig kontakt til større grundvandsmagasiner. Nedbøren siver langsomt ned i jorden, og en stor del af kraftige nedbørsmængder vil derfor strømme overfladenært af mod vandløbene uden markant

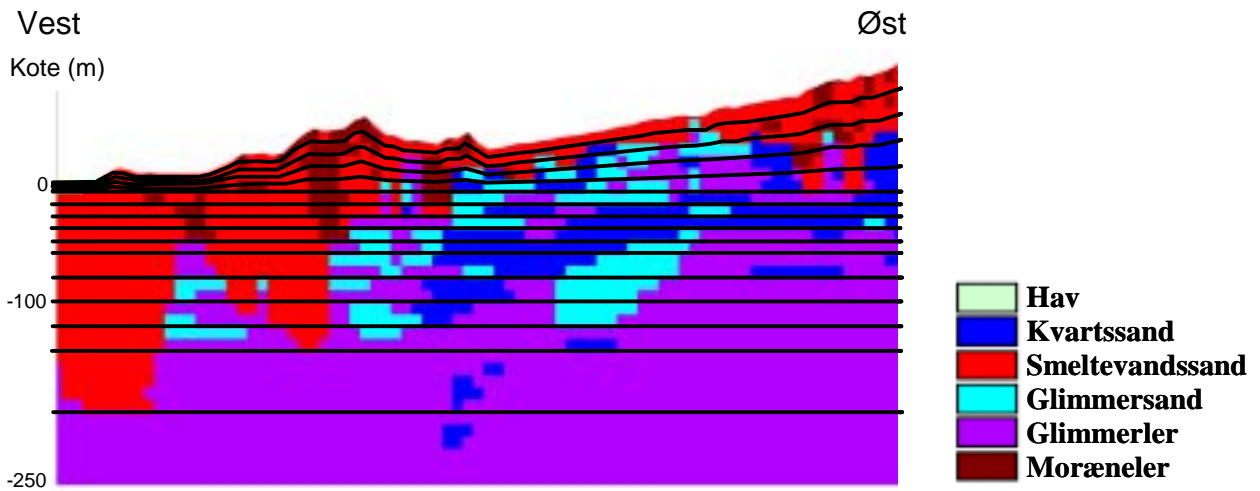
forsinkelse. Omvendt forholder det sig for Vestjylland, hvor de permeable jorde giver mulighed for nedsivning af regnvand med forsinkelse og udjævning af vandløbsafstrømningen til følge.

Modellen i Vestjylland dækker et 5.263 km² stort område, som strækker sig fra den Jyske højderyg i øst til Nordsøen i vest. Området afvandes af Skjern Å systemet (2.378 km²), Varde Å (1.090 km²), og Sneum Å (496 km²). Geologisk er området opbygget af vekslende lag af ler og sand fra Miocæn, der er overlejret af kvartære aflejringer, som udgøres af smeltevandssand og ændre moræneaflejringer (bakkeøer). Den geologiske model, som strækker sig fra kote -250 til terræn er tolket i 10 m tykke lag (se figur 5). Geologien opløses af 16 beregningslag, hvilket resulterer i samlet 84.208 beregningsceller i grundvandsmodellen.

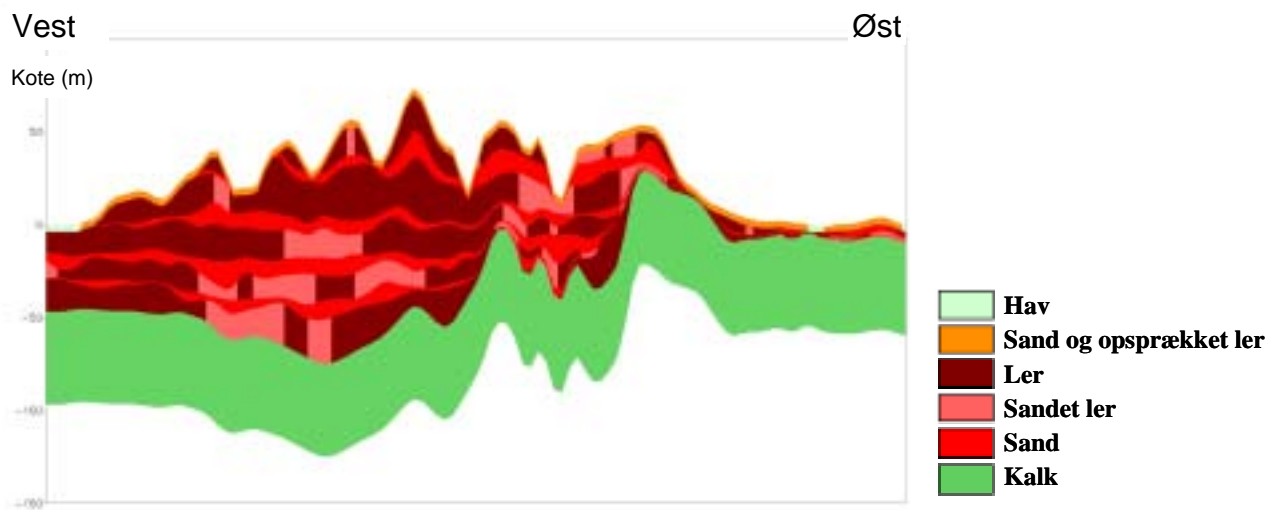
Modellen er kalibreret mod data fra perioden 1991-95 og valideret mod observationer fra 1996-99. I gennemsnit opnås en overensstemmelse mellem simuleret og observeret grundvandspotentialer svarende til en RMS-værdi på 3,8 m, mens der for større vandføringsstationer opnås en R²-værdi på 0,81 og en vandbalancefejl på 5%. Modellen vurderes på denne baggrund at give tilfredsstillende prediktioner af grundvandsniveau og vandløbsafstrømning.

Sjællandsmodellen dækker hele øen Sjælland med et areal på 7.031 km². De største vandløbssystemer udgøres af Suså systemet (820 km²), Tude Å (515 km²) og Åmosen (370 km²). Prækvartærgeologien på Sjælland er domineret af kalk og kridt fra Danien- og Kridttiden samt Grønsandskalk og Kertemindemergel fra Paleocæn (se figur 3). Både kalken, skrivekridtet og grønsandskalken udnyttes intensivt til vandindvinding. De kvartære aflejringer er domineret af moræneaflejringer fra sidste istid. Der er tolket i alt 11 geologiske lag, hvoraf de 10 øverste udgør kvartære lag, mens det nederste udgøres af prækvartære magasiner, se figur 6.

Der er defineret 9 beregningslag (3 relativt tynde geologiske lag i toppen af modellen beskrives i ét beregningslag), hvilket resulterer i samlet 63.279 beregningsceller i grundvandsdelen af modellen. Modellen er i Troldborg & Henriksen (2006) valideret mod trykniveau- og afstrømningsdata fra perioden 1991-96. I gennemsnit opnås en RMS-værdi for hydraulisk trykniveau på 6,8 m, mens der for 26 afstrømningsstationer i gennemsnit findes en R²-værdi på 0,79 og en vandbalancefejl på 2,9%. Pga. den mere komplekse geologiske opbygning på Sjælland sammenlignet med Vestjylland, er det ikke muligt at opnå en lige så god overensstemmelse mellem observeret og simuleret trykniveau. Modellen vurderes på baggrund af valideringsresultatet at give pålidelige prediktioner af fremtidige situationer.



Figur 5 Geologisk tværsnit gennem modellen i Vestjylland (snit 1 på figur 2). De sorte streger angiver placeringen af beregningslag, hvor det øverste lag udgør beregningslag nr. 1.



Figur 6 Geologisk tværsnit gennem Sjællandsmodellen (snit 2 på figur 2). De øverste tre geologiske lag beskrives i ét beregningslag, mens de øvrige geologiske lag beskrives af hver deres beregningslag.

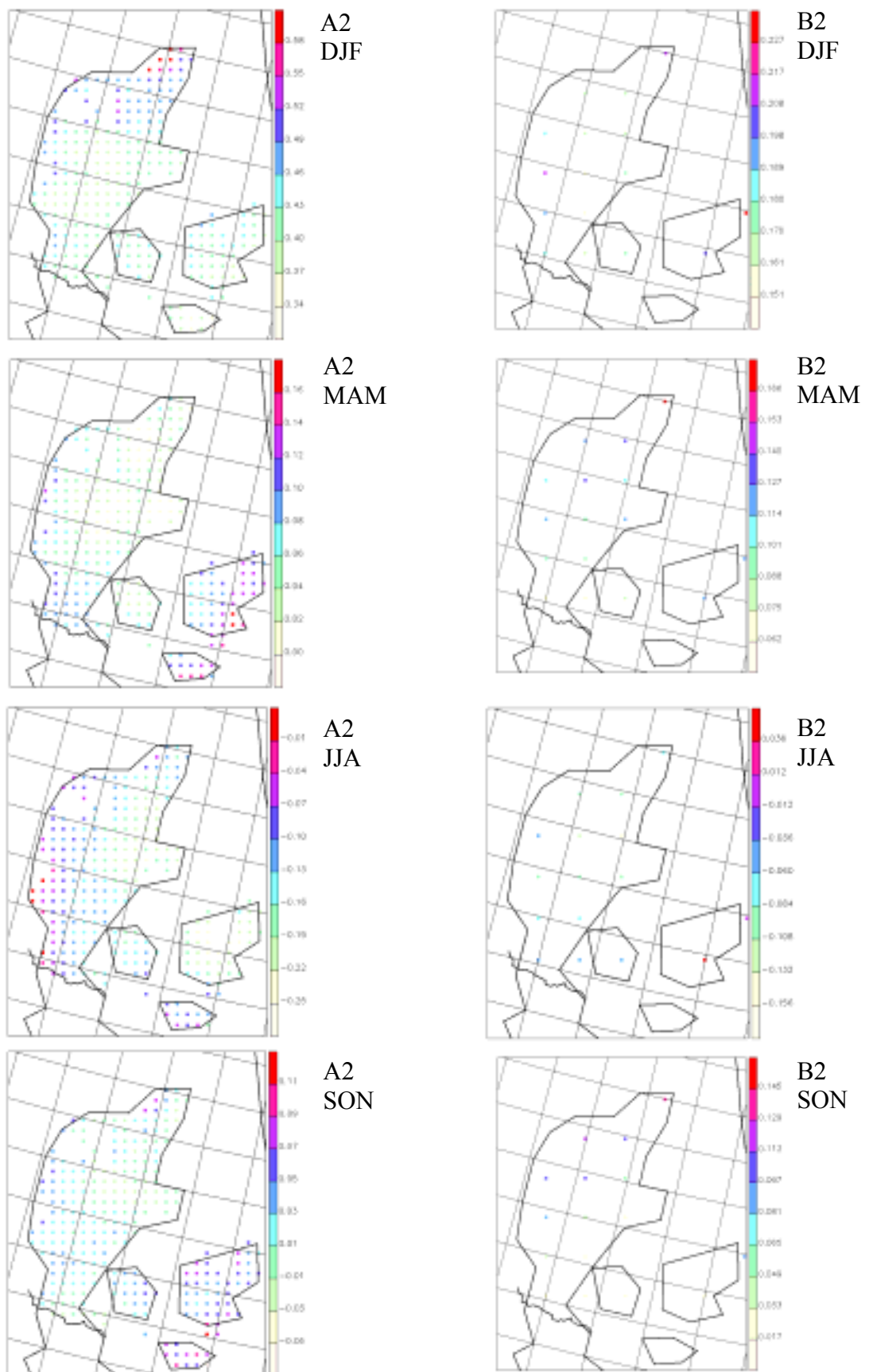
4 Resultater for inputværdier

4.1 Delta-værdier

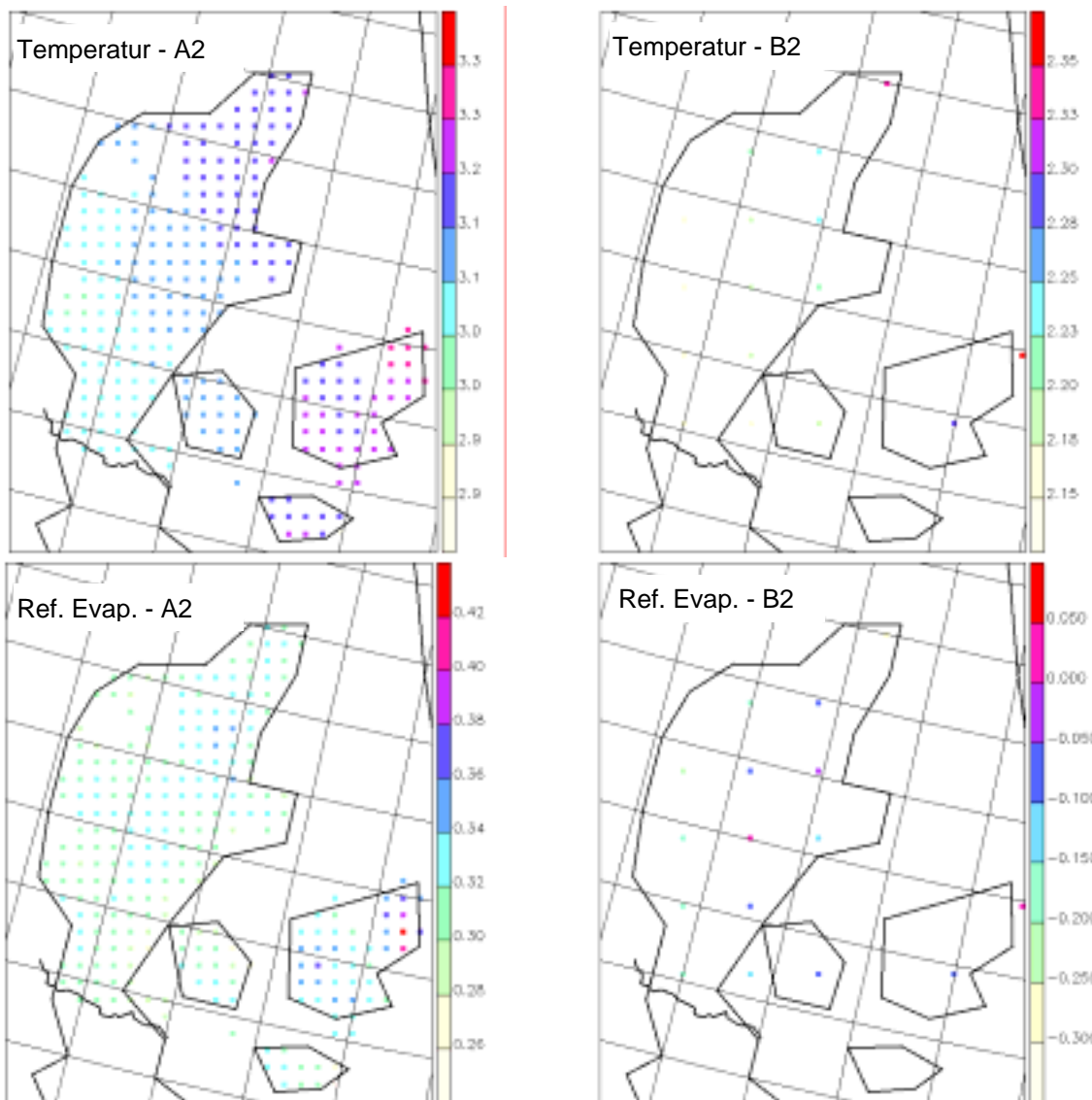
På figur 7 ses den geografiske fordeling af deltaværdierne for nedbør over sæsoner, mens figur 8 illustrerer delta change værdierne for fordampning og temperatur (årlig middel). De illustrerede værdier repræsenterer mht. nedbør og fordampning den relative forskel mellem reference- og fremtidsperioderne, og der skal adderes en værdi på 1,0 for at finde værdier, der svarer til delta change faktorerne givet ved lign. (2) og (4).

For nedbør ses i A2-scenariet en tendens til højere delta change faktorer i den vestlige del af Danmark i forhold til den resterende del af landet i vinter- og sommermånederne. Til gengæld optræder de største nedbørsstigninger på Sjælland om foråret og efteråret. For B2-scenariet er der ikke nogen tydelig tendens til regionale forskelle, hvilke muligvis skyldes klimamodellens grove opløsning af landet. Delta change værdierne for temperatur fordeler sig på samme måde i de to fremtidsscenarier, med de mindste ændringer ved den jyske vestkyst og de største stigninger på Sjælland. Referencefordampningen følger fordelingen for temperatur i A2-scenariet, med højere værdier i Østdanmark end Vestdanmark, mens der i B2-scenariet findes en mere heterogen fordeling, som er betinget af lokale forhold.

De geografiske forskelle på delta change faktorerne viser, at der er visse regionale forskelle i effekten af øgede emissioner af drivhusgasser på ændringerne af klimaet over Danmark. Disse forskelle vil naturligvis også influere på det hydrologiske system, men i nærværende sammenhæng antages det, at geografisk betingede forskelle er relativt ubetydelige i forhold til de gennemsnitlige ændringer for landet. Der benyttes derfor rumligt midlede delta change værdier i dette projekt. Den tidlige variation af de midlede delta change faktorer præsenteres i det følgende.

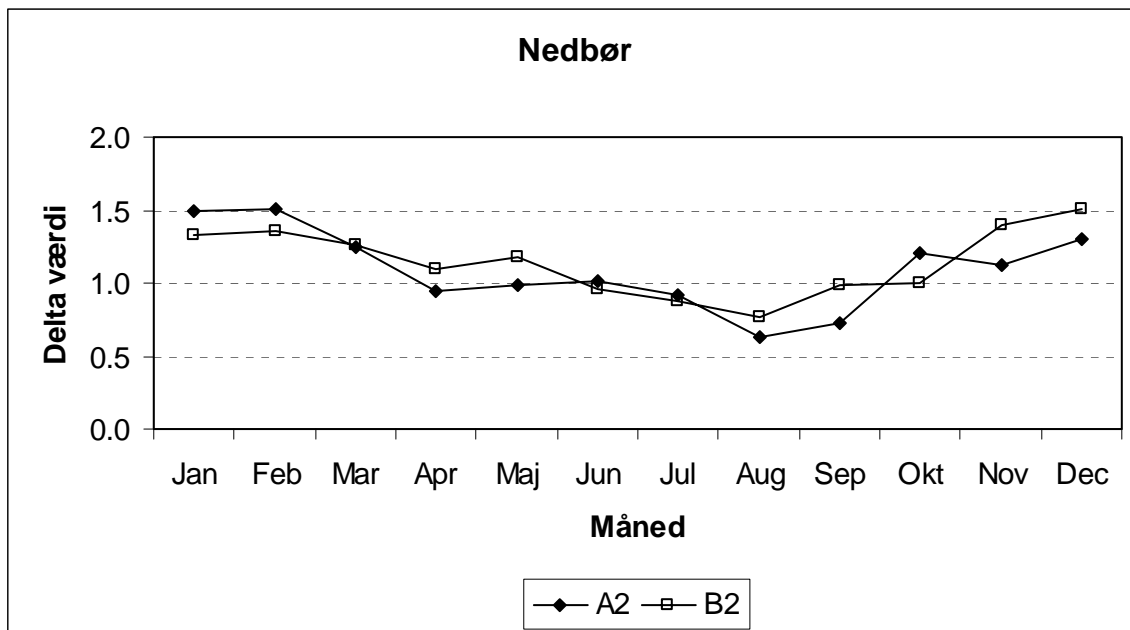


Figur 7 Geografisk fordeling af delta change faktorer for nedbør for hhv. A2 og B2-scenarierne opgjort på sæsonbasis.



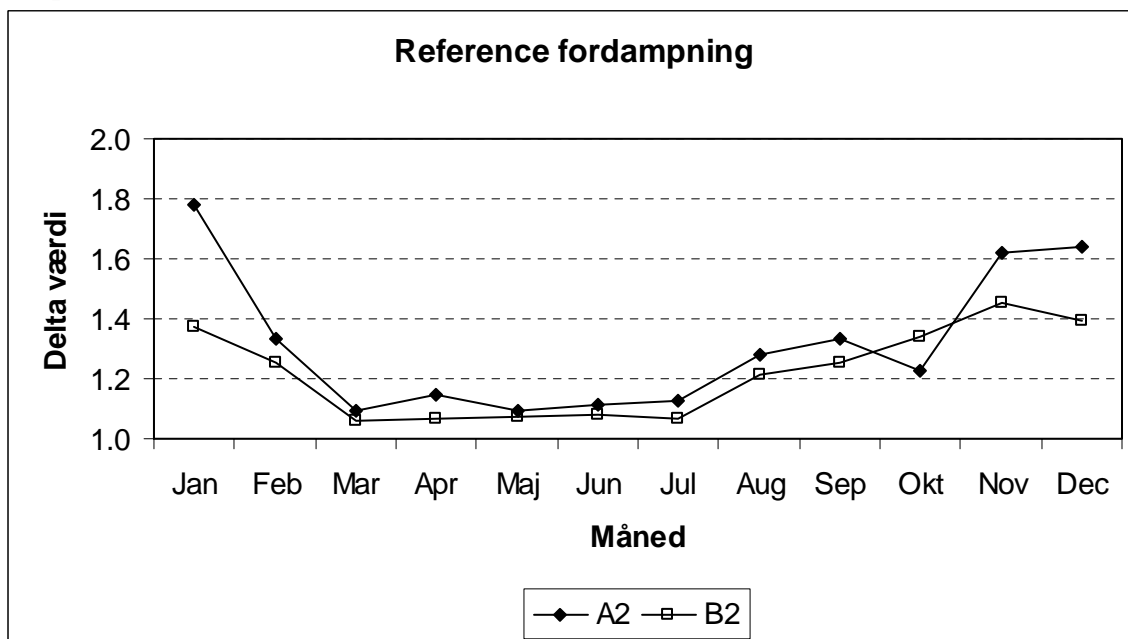
Figur 8 Den geografiske fordeling af delta change faktorer for temperatur og referencefordampning i hhv. A2 og B2-scenariet (årlig middel).

På figur 9 ses delta-værdierne for nedbør over året. De to scenarier adskiller sig ikke væsentligt fra hinanden. For begge scenarier fås deltaværdier større end 1 i vinterhalvåret svarende til, at der falder mere nedbør end i kontrolperioden, mens der i sommerhalvåret predikteres mindre nedbør i fremtidsscenarierne. Der er tale om markante ændringer, idet der i vinterperioden vil falde tæt på 1,5 gange mere nedbør end det nuværende niveau, mens nedbøren specielt i august reduceres signifikant til hhv. 0,63 og 0,77 af den nuværende mængde for scenarium A2 og B2.



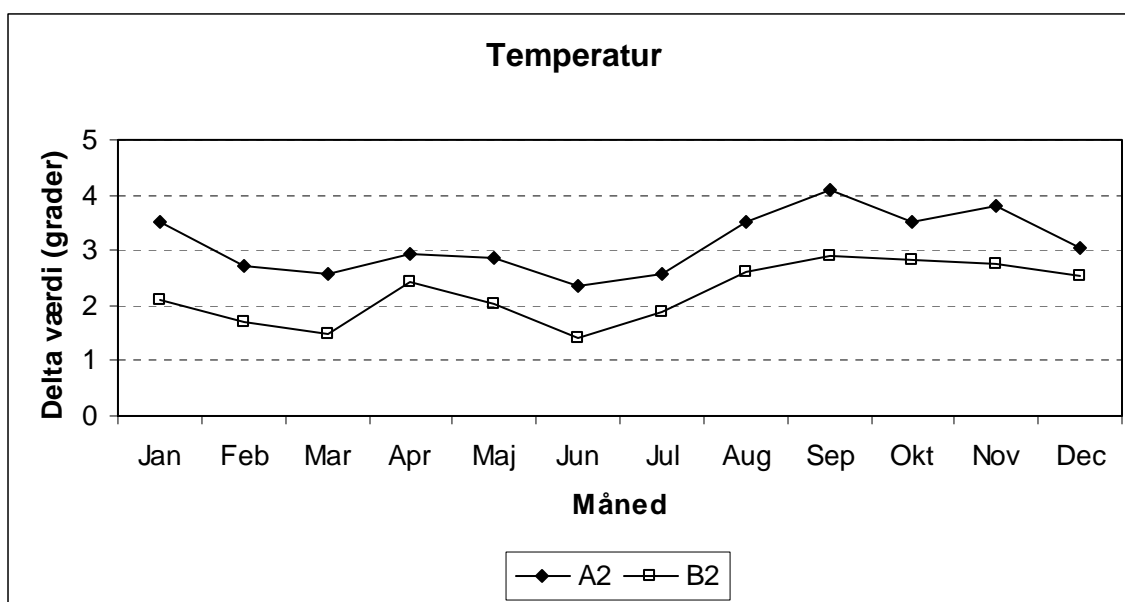
Figur 9 Delta-værdier for nedbør på månedsbasis.

For reference fordamning opnås der i begge scenarier en højere fordamning end i kontrolperioden, se figur 10. Med undtagelse af oktober ligger A2-scenariet højest. Der findes forholdsvis høje deltaværdier i vintermånederne, men da referencefordampningen her er beskeden, vil det have forholdsvis lille indflydelse på den samlede årlige fordamning. Til gengæld vil de relativt høje deltaværdier i august og september få stor indflydelse på den samlede fordamning.



Figur 10 Delta-værdier for reference fordampning på månedsbasis.

Temperaturen stiger i begge scenarier hele året, om end A2-scenariet udviser den største stigning, se figur 11. Der er en tendens til, at de største korrektionsværdier opnås i efterårssæsonen (august til januar), mens der i perioden februar til juli optræder en lidt mindre stigning.



Figur 11 Delta-værdier for temperatur på månedsbasis.

4.2 Analyse af fremtidig nedbør

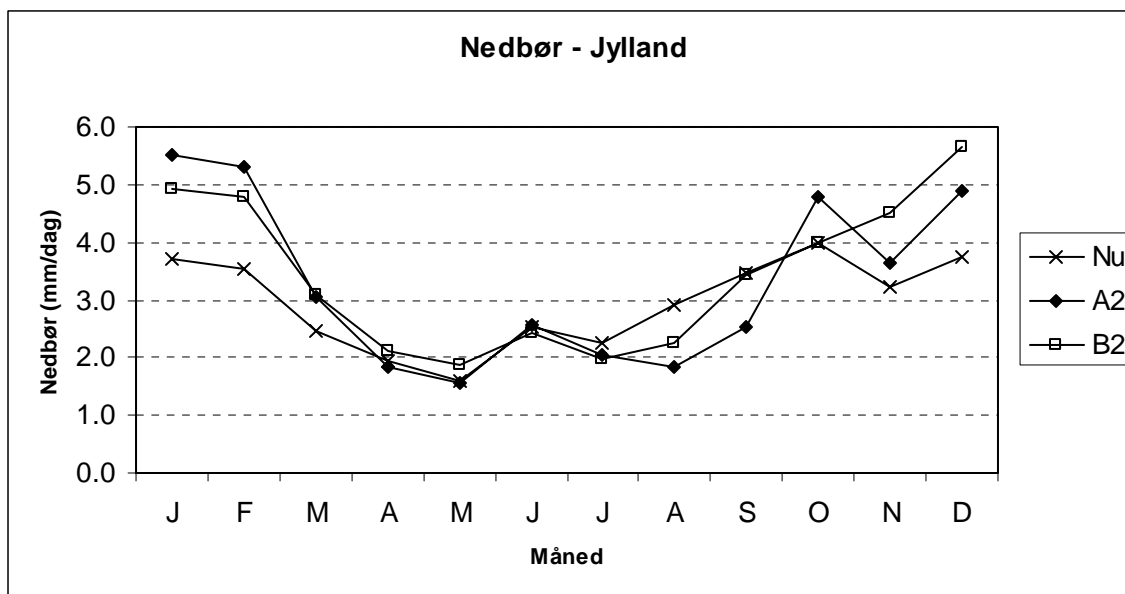
I det følgende præsenteres forskellen mellem nedbør i hhv. nutids-, A2- og B2-scenarierne. For Jylland baseres analysen på observationsværdier fra klimagrid 40010, som dækker en stor del af modelområdet, mens der for Sjælland benyttes data fra klimagrid 40037, som dækker den centrale og sydvestlige del af Sjælland.

Forskellen mellem den nuværende nedbør (1990-2004) og nedbøren for A2- og B2-scenarierne er illustreret i tabel 2 samt figur 12 og 13. For A2-scenariet stiger nedbøren med hhv. 12% og 9% for Jylland og Sjælland, svarende til at den årlige nedbør stiger med 129 mm for Jylland og 71 mm for Sjælland. Pga. forskelle i den månedlige fordeling af nedbør for hhv. Jylland og Sjælland findes der forskellige relative stigninger i den samlede nedbør, til trods for at nedbøren i de to områder korrigeres med samme delta faktorer. I B2-scenariet stiger nedbøren kraftigere end for A2-scenariet. For Jylland opnås en forøgelse på 16% svarende til en stigning i årlig nedbør med 171 mm, mens nedbøren forøges med 14% for Sjælland svarende til en absolut stigning på 110 mm/år.

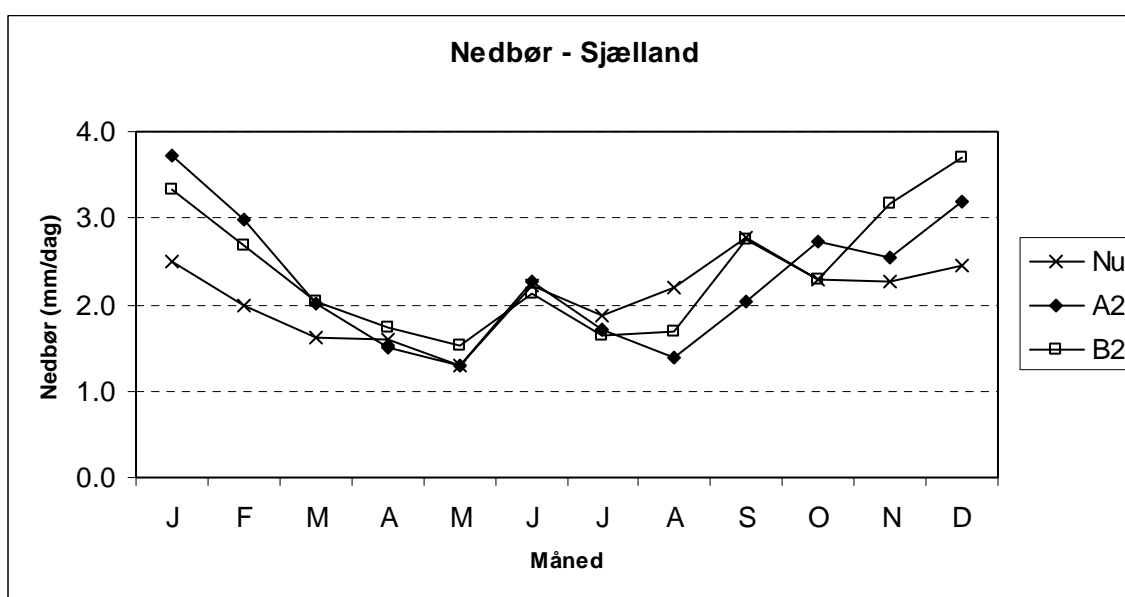
Tabel 2 Middelnedbør (mm/år) for modelområderne i Jylland og Sjælland for nutidsscenarioet samt A2- og B2-scenarierne. I parentes er procent ændring angivet.

Opland	Scenarium		
	Nu	A2	B2
Jylland	1073	1202 (11,9%)	1244 (16,0%)
Sjælland	762	833 (9,1%)	872 (14,4%)

Den sæsonmæssige fordeling af nedbøren for Jylland og Sjælland er vist på figur 12 og 13. Den største absolutte forskel i forhold til nutidsværdierne findes i vintermånederne (december, januar og februar), mens der er relativ lille forskel i den øvrige del af året. Kun i august optræder der markant mindre nedbør i fremtidsscenarioerne.



Figur 12 Månedlige middelværdier af nedbør i Jylland for nutidsscenarioet samt A2- og B2-scenariene.



Figur 13 Månedlige middelværdier af nedbør i Sjælland for nutidsscenarioet samt A2- og B2-scenariene.

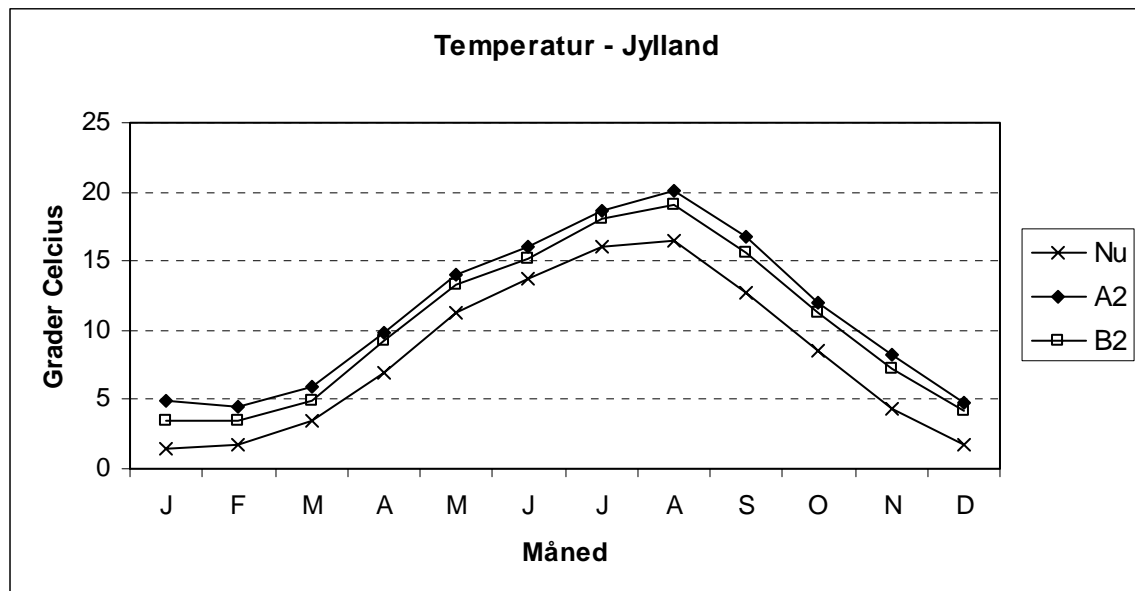
4.3 Analyse af fremtidig temperatur

For de hydrologiske analyser, der gennemføres her, har temperaturen direkte indflydelse på en række forhold, hvoraf de vigtigste er nedbørens tilstandsform (sne, slud, regn); beregning af sneakkumulation og sneafsmeltning, og størrelsen af beregnet referencefordampning. I tabel 3 ses årlig middeltemperatur for hhv. nutids- og fremtidsscenarioerne. For Jylland er analysen baseret på observationsværdier fra klimagrid 40010, mens der for Sjælland benyttes data fra klimagrid 40037. Temperaturen stiger i gennemsnit med 3,2 og 3,1 °C i A2-scenariet (hhv. Vestjylland og Sjælland), mens stigningen er på hhv. 2,3 og 2,2 for B2-scenariet. Grundvands temperaturen er stærkt korreleret med middellufttemperaturen, og det må derfor forventes, at temperaturen af vandet i grundvandsmagasinerne med tiden vil stige tilsvarende.

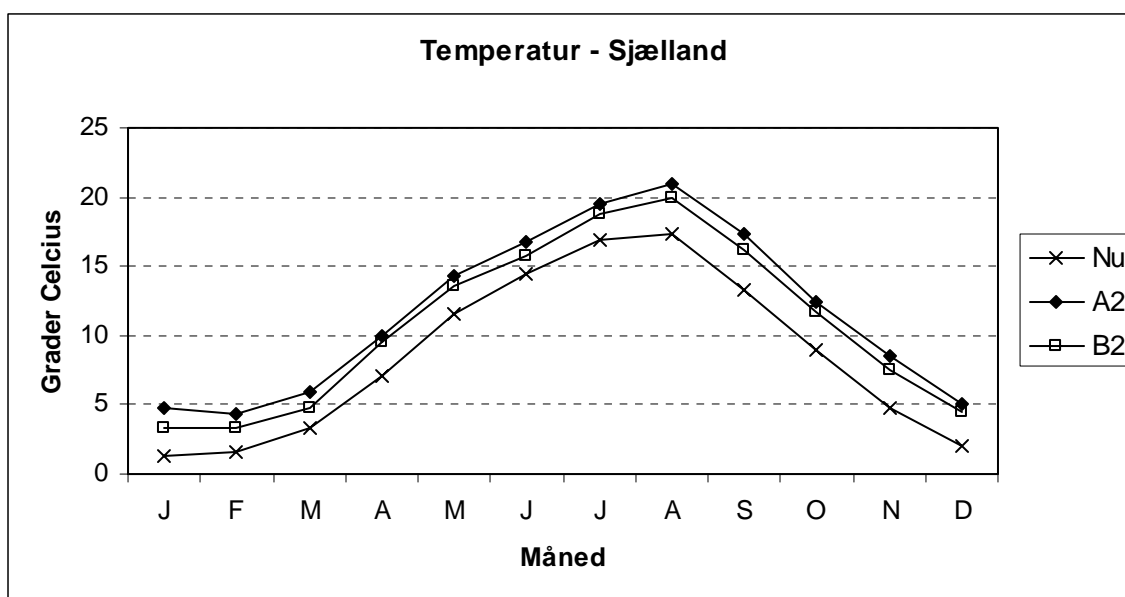
Tabel 3 Middeltemperatur (°C) for modelområderne i Jylland og Sjælland for nutidsscenarioet samt A2- og B2-scenarierne. I parentes er procent ændring angivet.

Opland	Scenarium		
	Nu	A2	B2
Jylland	8,2	11,4 (38%)	10,5 (27%)
Sjælland	8,6	11,7 (37%)	10,8 (26%)

På figur 14 og 15 ses månedlige middeltemperaturer for hhv. Vestjylland og Sjælland. I begge områder stiger gennemsnitstemperaturen om vinteren fra 1-2 °C til hhv. 3-4 °C i B2-scenariet og 4-5 °C i A2-scenariet. De højere gennemsnitlige vintertemperaturer resulterer i betydeligt færre dage med frost, se tabel 4. For Vestjylland reduceres det gennemsnitlige antal dage med middeltemperatur under 0 °C fra 36,5 dage/år i nutidsscenarioet til hhv. 18,0 og 10,9 dage/år i B2- og A2-scenarierne. For Sjælland findes tilsvarende reduktioner i antal dage med frost. Det må forventes, at mængden af nedbør, der falder som sne eller slud, vil blive reduceret tilsvarende.



Figur 14 Månedlige middeltemperaturer for hhv. nutids-, A2- og B2-scenarierne for Vestjylland (klimagrid 40010).



Figur 15 Månedlige middeltemperaturer for hhv. nutids-, A2- og B2-scenarierne for Sjælland (klimagrid 40037).

Tabel 4 Gennemsnitligt antal dage pr. år med temperaturer under 0 °C for perioden 1990-2004 i nutidsscenarioet og de to fremtidsscenarioer.

Opland	Scenarium		
	Nu	A2	B2
Vestjylland	36,5	10,9	18,0
Sjælland	32,9	9,2	15,0

4.4 Analyse af fremtidig reference fordampning

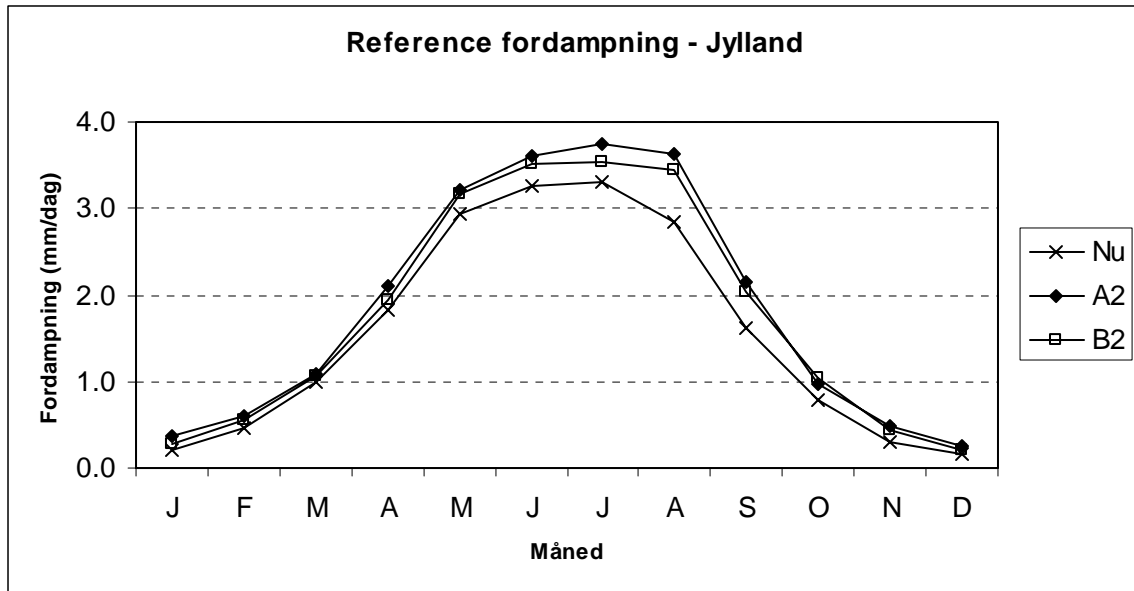
Forskellen mellem den nuværende referencefordampning (1990-2004) og referencefordampningen for A2- og B2-scenarierne er illustreret i tabel 5 samt figur 16 og 17. De beregnede værdier er baseret på klimagrid 40010 og 40037 for hhv. Jylland og Sjælland. For A2-scenariet stiger referencefordampningen med 19% for både Jylland og Sjælland, svarende til at den årlige referencefordampning stiger med 107 mm for Jylland og 114 mm for Sjælland. I B2-scenariet stiger referencefordampningen ikke så kraftigt som i A2-scenariet. For Jylland opnås en forøgelse på 14% svarende til en stigning i årlig referencefordampning på 79 mm, mens referencefordampningen forøges med knap 14% for Sjælland svarende til en absolut stigning på 84 mm/år. A2-scenariet for Sjælland skiller sig ud fra de andre scenarier ved, at referencefordampningen stiger mere end nedbøren (absolutte værdier).

Tabel 5 Middel referencefordampning (mm/år) for modelområderne i Jylland og Sjælland for nutidsscenarioet samt A2- og B2-scenarierne. I parentes er procent ændring angivet.

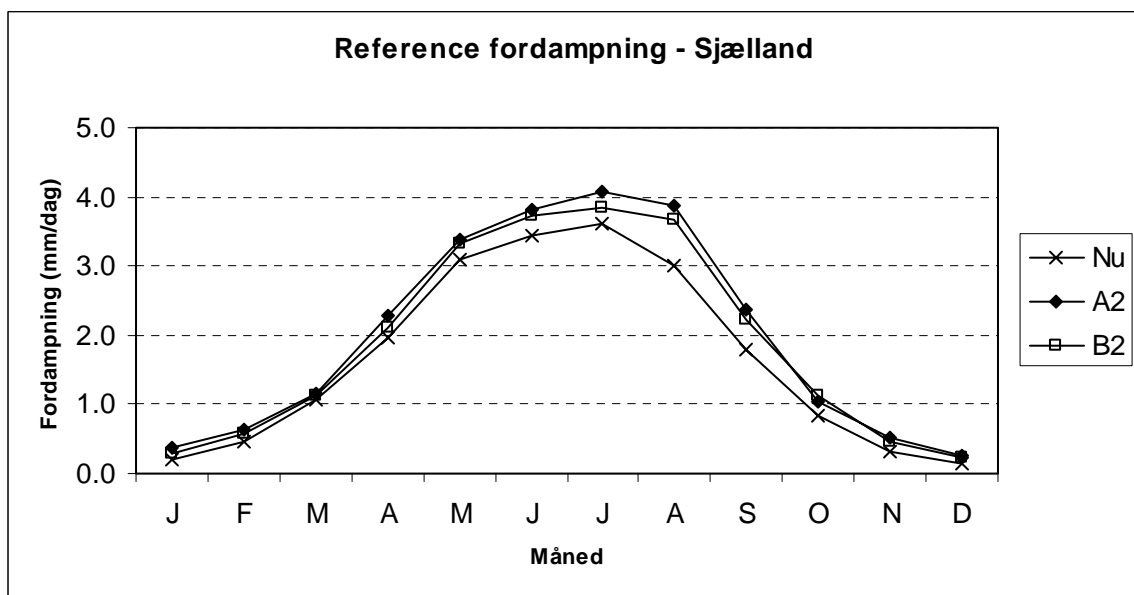
Opland	Scenarium		
	Nu	A2	B2
Jylland	570	677 (19,2%)	649 (14,1%)
Sjælland	611	725 (19,2%)	695 (13,8%)

Den sæsonmæssige fordeling af referencefordampningen for Jylland og Sjælland er vist på figur 16 og 17. Referencefordampningen for både A2- og B2-scenarierne ligger konsekvent

over nutidsscenariet. Den største absolutte forskel i forhold til nutidsværdierne findes i månederne maj – oktober, mens der pga. den ringe fordampning i vinterhalvåret er relativ lille forskel i månederne november - april. Specielt i august måned er forskellen mellem den nutidige og fremtidige referencefordampning markant.



Figur 16 Månedlige middelværdier af referencefordampning i Jylland for nutidsscenariet samt A2- og B2-scenarierne.



Figur 17 Månedlige middelværdier af referencefordampning på Sjælland for nutidsscenariet samt A2- og B2-scenarierne.

4.5 Analyse af fremtidig nettonedbør

På baggrund af resultater fra rodzonemodellen er nettonedbøren i nutidssituationen sammenlignet med resultater fra A2- og B2-scenarierne. De præsenterede værdier er arealvægtede og repræsenterer dermed gennemsnit for hhv. Vestjylland og Sjælland. Analyserne er gennemført på resultater fra perioden 1990-2004.

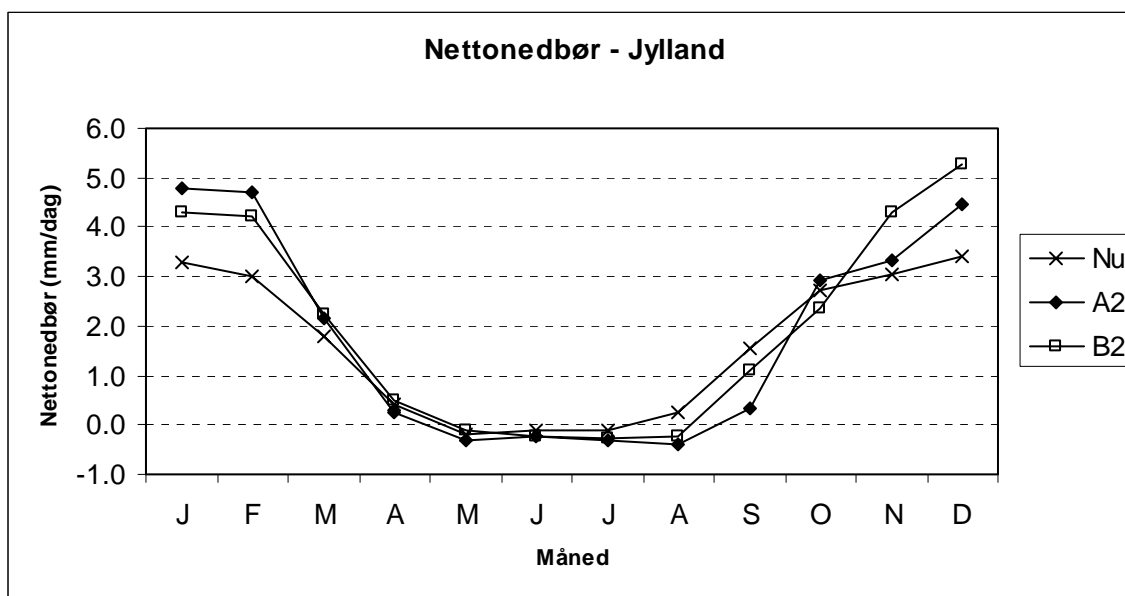
I tabel 6 ses middelværdier af nettonedbøren for de to modelområder.

Tabel 6 Middel nettonedbør (mm/år) for modelområderne i Jylland og Sjælland for nutids-scenariet samt A2- og B2-scenarierne. I parentes er procent ændring angivet.

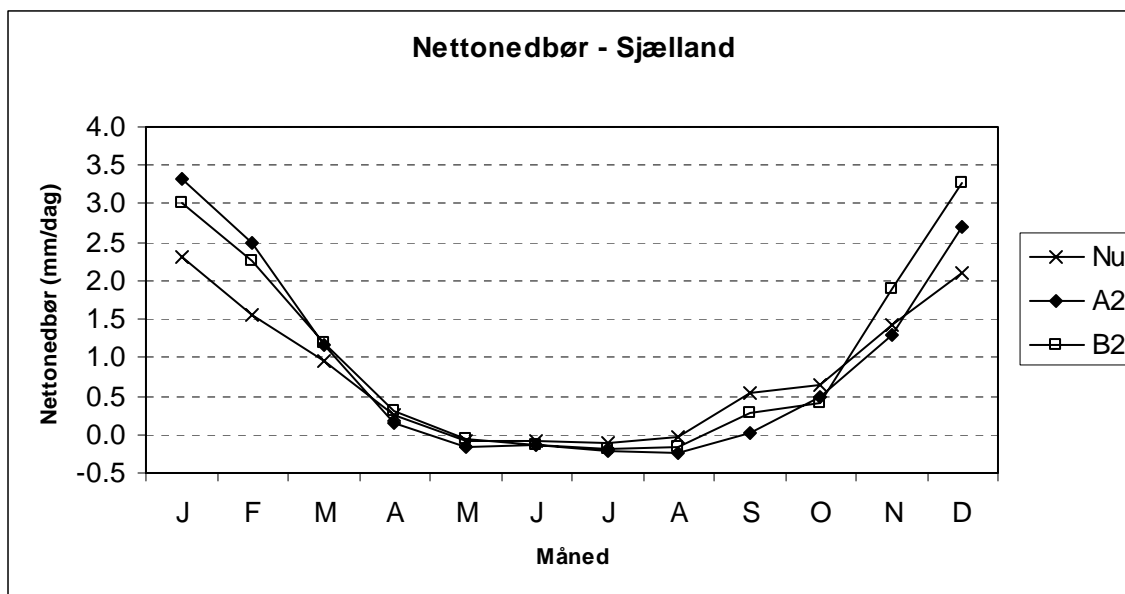
Opland	Scenarium		
	Nu	A2	B2
Jylland	580	657 (13,2%)	708 (22,0%)
Sjælland	287	329 (13,9%)	366 (26,6%)

I alle fire fremtidsscenarier findes en nettonedbør, der er større end den nuværende. Stigningen er specielt markant i B2-scenarierne, hvor der predikteres stigninger på over 20% svarende til 128 mm/år og 79 mm/år for hhv. Vestjylland og Sjælland. For A2-scenariet findes der absolutte stigninger i nettonedbøren på 77 mm/år og 42 mm/år for Vestjylland og Sjælland.

Den sæsonmæssige fordeling af nettonedbøren fremgår af figur 18 og 19. For begge områder ligger nettonedbøren i perioden december-marts markant over nutidsværdierne. I perioden april-juni er forskellen mellem nutids- og fremtidsscenarierne relativt lille, mens der predikteres lavere nettonedbør i perioden juli-oktober i både A2- og B2-scenarierne. Specielt i september er der stor forskel på nutids- og fremtidsscenarierne, hvor der for A2-scenariet predikteres en værdi, der svarer til den nutidige august-værdi. I november stiger nettonedbøren i B2-scenariet relativt kraftigt, mens værdien for A2-scenariet ligger tæt på nutidsværdien.



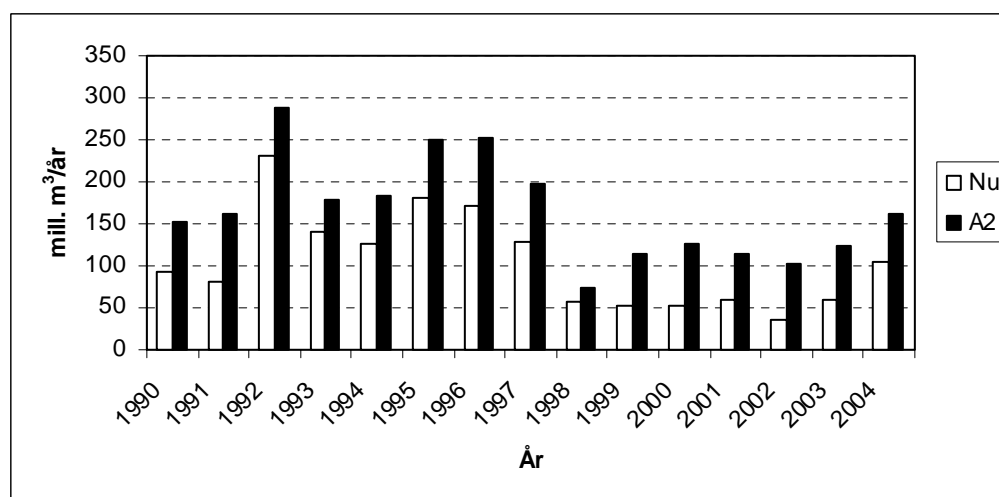
Figur 18 Månedlige middelværdier af nettonedbør i Vestjylland for nutidsscenariet samt A2- og B2-scenarierne.



Figur 19 Månedlige middelværdier af nettonedbør på Sjælland for nutidsscenariet samt A2- og B2-scenarierne.

4.6 Markvanding

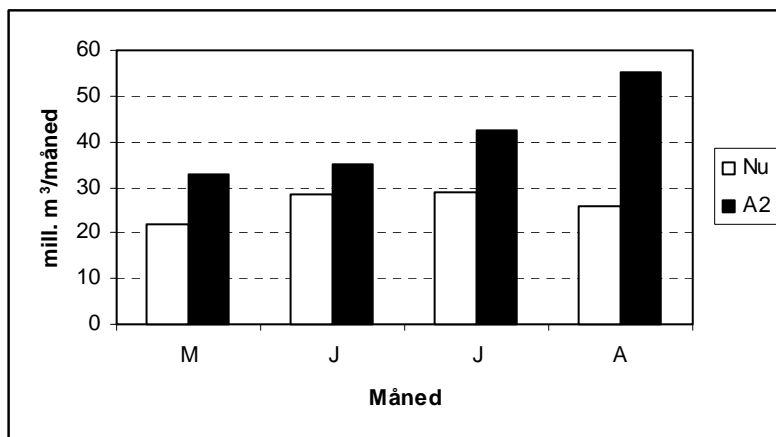
Pga. den højere referencefordampning og den lavere nedbør for sommermånederne i fremtidsscenerierne bliver behovet for markvanding større i fremtidssceneriet. I nedenstående figur 20 er det samlede årlige markvandingsbehov i Vestjyllandsmodellen vist for hhv. nutidssceneriet og A2-sceneriet. I middel stiger markvandingsbehovet fra 105 mill. m³/år til 165 mill. m³/år, svarende til hhv. 63 og 100 mm/år for de 30% af det samlede modelområde, hvor der benyttes kunstig vanding. Det forøgede markvandingsbehov er bestemt på basis af maj-august. Såfremt kortere vækstsæsoner og/eller en ekstra vækstsæson medfører krav til afgrødevanding f.eks. i september, bliver der tale om endnu større ændringer end angivet ovenfor.



Figur 20 Totalt markvandingsbehov i månederne maj-august for nutids- og fremtidssceneriet (Vestjylland).

For år med maksimal vandingsbehov (f.eks. 1992 hvor tilladelser stort set udnyttes fuldt ud) ses en stigning i vandingsbehovet på ca. 20 %, mens der i enkelte år er tale om ca. en for-

dobling af vandingsbehovet. Opdeles markvandingsbehovet på måneder, se figur 21, findes en kraftig stigning i august, hvor nettonedbøren i A2-scenariet er mindst. I de tre andre sommermåneder er stigningen i markvanding mere moderat.



Figur 21 Markvandingsfordeling på månederne maj-august (middelværdier) for nutids- og A2-scenariet.

5 Resultater

5.1 Grundvandsniveau – Vestjylland

I det følgende præsenteres resultater fra modelberegninger for Vestjylland, som repræsenterer (1) den naturlige tilstand, hvor hverken grundvandsindvinding eller markvanding er inkluderet, og (2) indvindingspåvirket tilstand, hvor markvanding i månederne maj-august kvantificeres, og hvor grundvandsindvindingen fastsættes som summen af middelindvindingen 1990-1999 for alm. vandforsyning og den genererede markvanding.

På figur 22 og 23 ses ændringen i grundvandets trykniveau i modellens lag 1, 3 og 5 for hhv. A2- og B2-scenarierne uden grundvandsindvinding i forhold til nutidsscenariet. Lag 1 repræsenterer de øverste grundvandsmagasiner og er et frit magasin. Lag 5 repræsenterer det primære magasin i området, og er lokaliseret i kote -10 - 0 m. I tabel 7 ses, på hvor store arealer der predikteres stigninger i grundvandsstanden på hhv. 0,25 - 1,0 m og over 1,0 m. De største effekter ses for scenarium B2, hvor der i 57% af beregningslag 5 vil optræde en stigning i grundvandspotentialet på mellem 0,25 og 1,0 m, mens der i 7% af området vil ske en stigning på over 1,0 m. Arealet, hvor der optræder signifikante stigninger i trykniveauet, falder generelt, når man går mod jordoverfladen, og i beregningslag 1 sker der kun stigninger på 0,25 - 1,0 m i 33% af modelområdet. Det skal bemærkes, at der i hele modellen er indlagt dræn i en halv meters dybde under terræn, hvilket betyder, at trykniveauet vil have svært ved at stige op over dette niveau. Det er derfor muligt, at trykniveauet beregnet for lag 1 er underestimeret.

I gennemsnit stiger grundvandsstanden i B2-scenariet med 30 cm i lag 1 og 43 cm i lag 3 og 5. De gennemsnitlige stigninger i trykniveauet dækker over en betydelig geografisk variation, se figur 22 og 23. De største stigninger ses at ske ved vandskel med stigninger på i størrelsesordenen 1-2 meter. Langs vandløb i det øverste modellag er stigninger mere moderate. Den største stigning ses i øvrigt at optræde i Skjern Å oplandet, mens stigningen er mere moderat i den sydlige del af modellen.

Tabel 7 Andel af landareal (i %), hvor der sker stigninger i trykniveauet på hhv. 0,25 - 1,0 m og over 1,0 m, i Vestjyllandsmodellen for A2- og B2-scenarierne uden indvinding (u.i.) og A2-scenariet med indvinding (m.i.).

Beregningslag	Trykniveau-stigning (m)	Scenarium		
		A2 - u.i.	B2 - u.i.	A2 - m.i.
Lag 1	0,25 - 1,0	24,2	32,7	22,6
	> 1,0	2,2	6,5	2,0
Lag 3	0,25 - 1,0	36,8	52,0	32,6
	> 1,0	2,9	8,3	2,0
Lag 5	0,25 - 1,0	39,6	57,4	34,2
	> 1,0	2,1	7,4	1,6

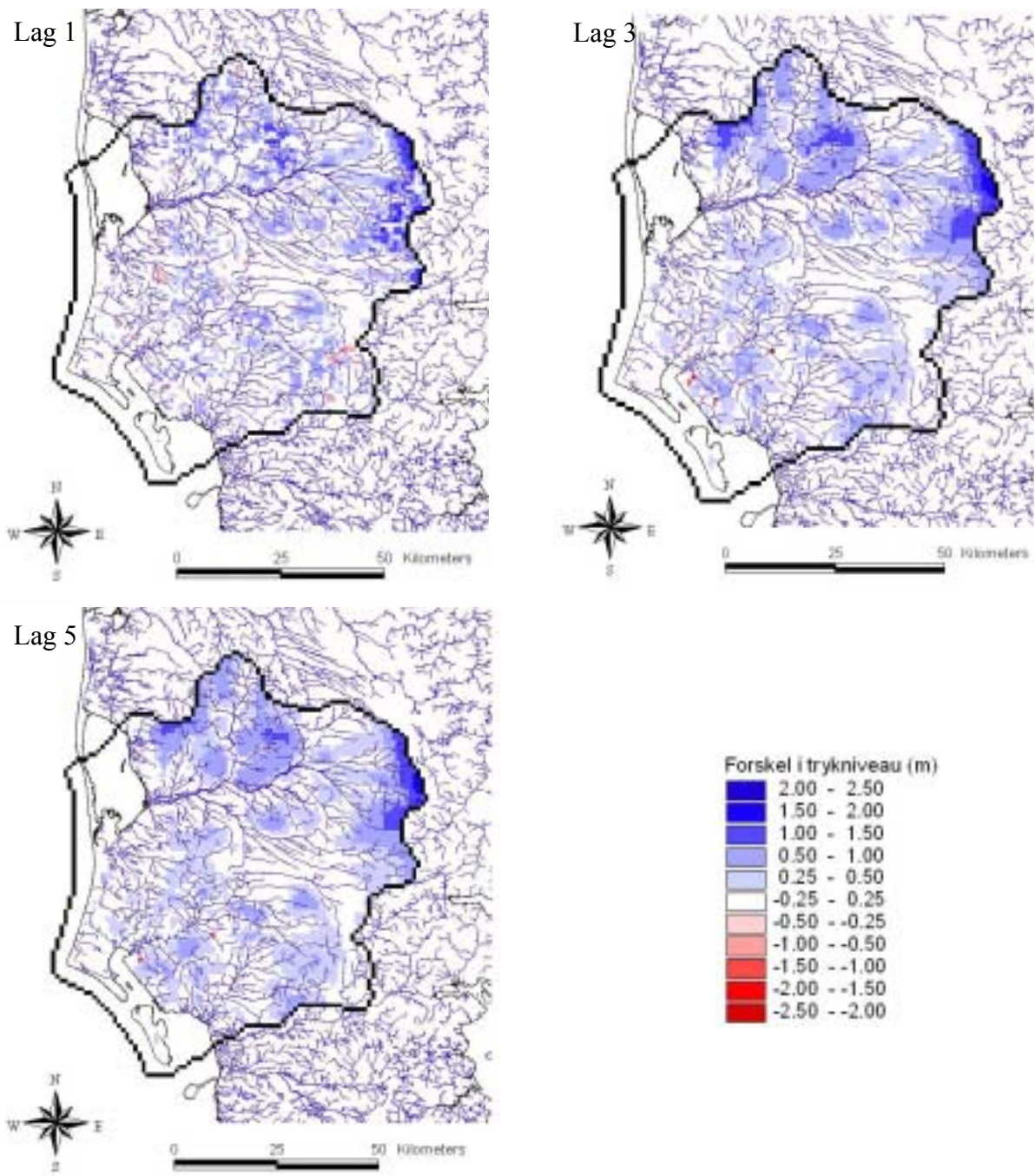
Når grundvandsindvinding medtages i modellen, vil grundvandsstanden generelt falde i hele modelområdet i forhold til situationen uden vandindvinding. Da der indvindes mere grundvand i fremtidsscenerierne end i nutidsscenariet pga. øget behov for markvanding (se afsnit 4.6), må det forventes, at de klimabetingede stigninger i trykniveauet vil blive mindre. På figur 24 ses den geografiske fordeling af ændringerne i trykniveauet for hhv. beregningslag 1, 3 og 5. I gennemsnit er stigningen i grundvandsstanden lidt mindre end for situationen uden indvinding, se tabel 7. De lokale områder med et fald i trykniveau skyldes primært markvandsindvindinger, der lokalt resulterer i større fald end den generelle stigning som følge af

generelt forøget grundvandsniveau. Ændringer i trykniveauet vil kunne medføre ændringer i strømningsveje og indvindingsoplande til f.eks. drikkevandsboringer, som vil kunne 'flytte' de grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande, der er genstande for grundvandsbeskyttelse. Disse effekter er dog ikke analyseret i nærværende undersøgelse.

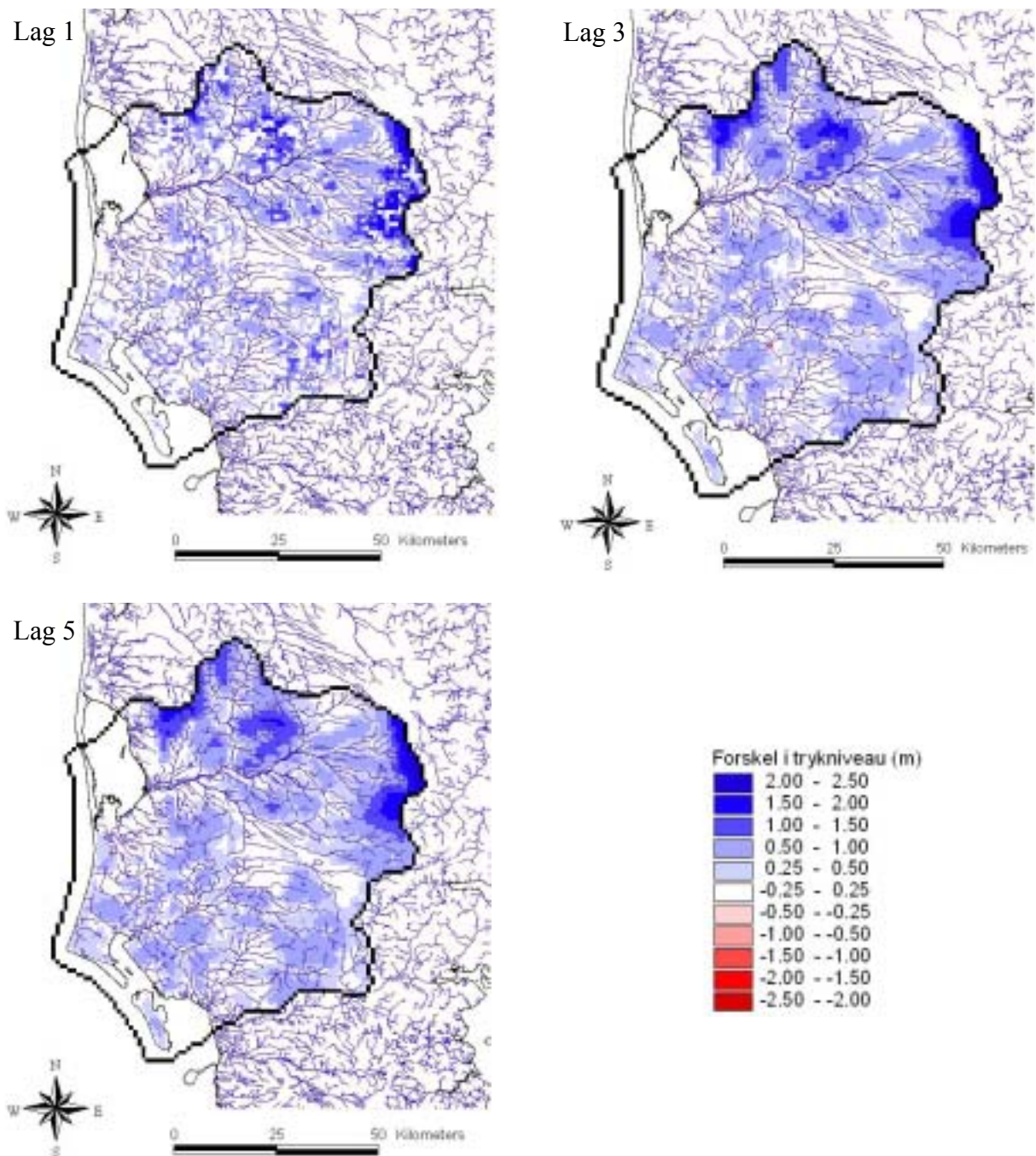
De sæsonmæssige variationer i trykniveauet er på figur 25 præsenteret for beregningslag 1. Pga. den reducerede nettonedbør om sommeren i A2- og B2-scenarierne falder grundvandsspejlet i maj-oktober mange steder i oplandet. Til gengæld er stigningen i grundvandsspejlet markant om vinteren, hvor der specielt i B2-scenariet predikteres en stigning på over 25 cm i det meste af modelområdet. I tabel 8 ses, hvor store arealer i beregningslag 1 der udsættes for signifikante stigninger i grundvandsstanden i hhv. sommer- og vinter-perioden. I A2-scenarierne er arealet, hvor der sker signifikante trykniveaustigninger, relativt beskedent om sommeren, mens det om vinteren er ca. 37% og 4% af arealerne, hvor der sker stigninger på 0,25 – 1,0 m og over 1,0 m (både med og uden grundvandsindvinding). For B2-scenariet findes, at der om vinteren vil ske stigninger i grundvandsspejlet mellem 0,25 og 1,0 m i næsten 42% af området og over 1,0 m stigninger i næsten 10% af modelområdet.

Tabel 8 Andel af landareal (i %), hvor der sker stigninger i trykniveauet på hhv. 0,25 – 1,0 m og over 1,0 m, i Vestjyllandsmodellen i beregningslag 1 for hhv. maj-oktober (sommer) og november-april (vinter) for scenarium A2 og B2 uden indvinding (u.i.) og A2 med indvinding (m.i.).

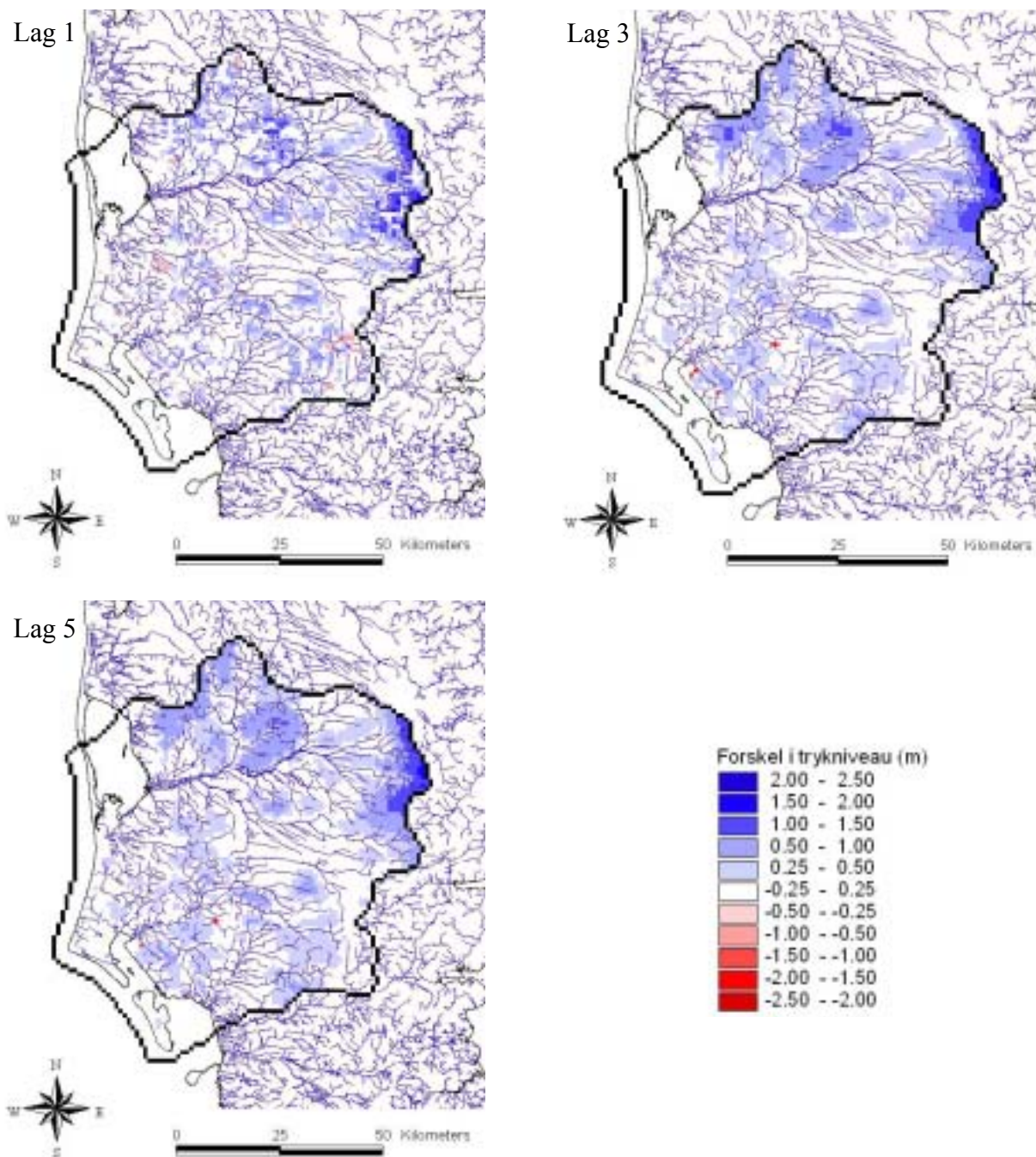
Sæson	Trykniveaustigning (m)	Scenarium		
		A2 – u.i.	B2 – u.i.	A2 – m.i.
Sommer	0,25 – 1,0	15,8	25,7	13,6
	> 1,0	1,1	4,3	0,9
Vinter	0,25 – 1,0	37,4	41,5	36,9
	> 1,0	4,0	9,5	3,5



Figur 22 Forskel i middeltrykniveau mellem A2- og nutidsscenariet (A2-Nu) for lag 1, 3, og 5 i Vestjyllandsmodellen (ingen grundvandsindvinding).

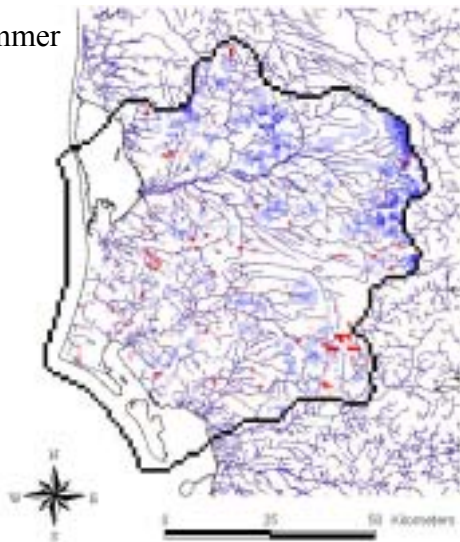


Figur 23 Forskel i middeltrykniveau mellem B2- og nutidssceneriet (B2-Nu) for lag 1, 3, og 5 i Vestjyllandsmodellen (ingen grundvandsindvinding).

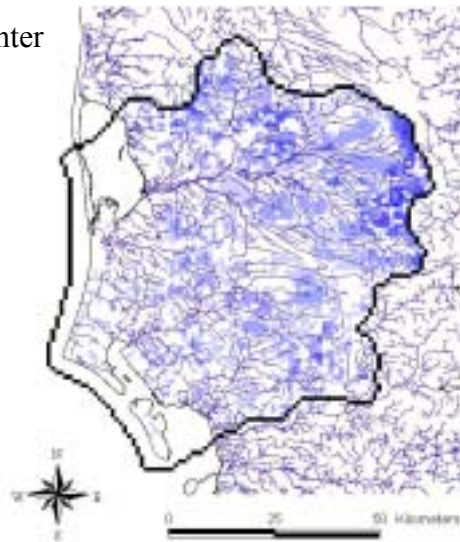


Figur 24 Forskel i middeltrykniveau mellem A2- og nutidsscenariet (A2-Nu) for lag 1, 3, og 5 i Vestjyllandsmodellen (med grundvandsindvinding).

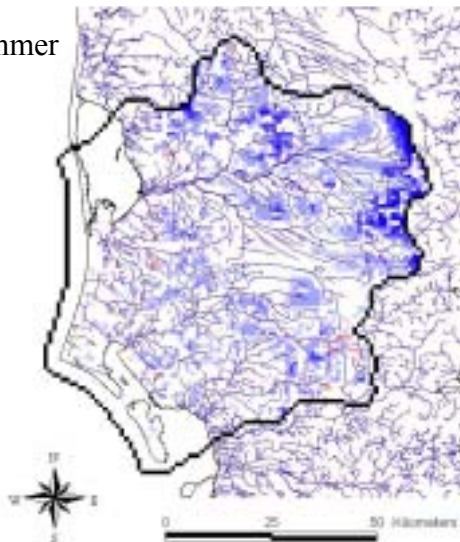
A2 sommer



A2 vinter



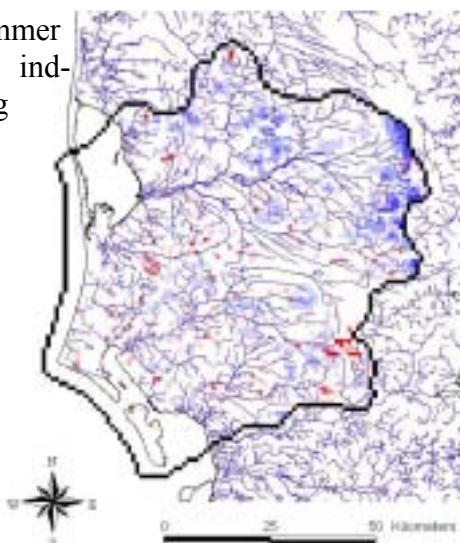
B2 sommer



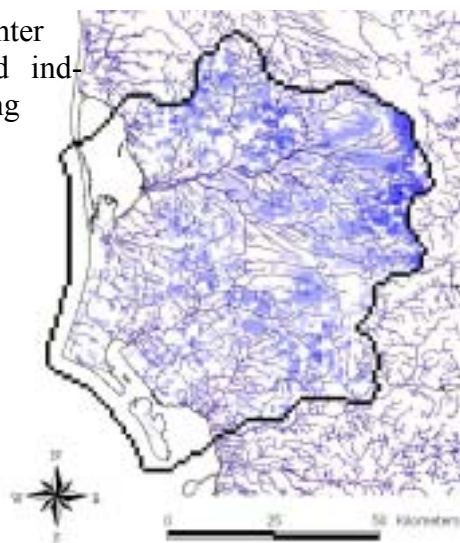
B2 vinter



A2 sommer
- med ind-
vinding



A2 vinter
- med ind-
vinding



Figur 25 Ændringen i middeltrykkniveau i beregningslag 1 for hhv. maj-oktober (venstre) og november-april (højre) for scenarium A2 og B2 uden indvinding og A2 med indvinding. Skalaen kan ses på figur 22.

5.2 Grundvandsniveau - Sjælland

I det følgende præsenteres resultater fra modelberegninger for Sjælland, som repræsenterer (1) den naturlige tilstand, hvor grundvandsindvinding ikke er inkluderet, og (2) indvindingspåvirket tilstand, hvor grundvandsindvindingen fastsættes som middelindvindingen 1990-1999.

På figur 26 ses ændringen i grundvandets trykniveau i modellens beregningslag 3 og 9 for hhv. A2- og B2-scenarierne uden grundvandsindvinding i forhold til nutidsscenariet. Lag 3 repræsenterer de øverste grundvandsmagasiner, mens lag 9 repræsenterer det primære magasin i området, som hovedsageligt udgøres af de prækvartære kalk- og kridtformationer, se figur 6. I tabel 9 ses, i hvor store områder grundvandsstanden stiger signifikant i de to scenarier. I A2-scenariet findes der stigninger på mellem 0,25 – 1,0 m i hhv. 12% og 9% af modelområdet for beregningslag 3 og 9, mens der ikke findes stigninger på over 1,0 m. I B2-scenariet predikteres der betydeligt større stigninger. I ca. 19% og 21% (hhv. lag 3 og 9) af modelområdet findes der stigninger på 0,25 – 1,0 m, mens der sker stigninger på over 1,0 m i ca. 4% og 2% af området for hhv. lag 3 og 9.

I gennemsnit stiger grundvandsstanden relativt beskedent på Sjælland, med højeste midelværdier på ca. 15 cm i B2-scenariet. Gennemsnitsværdierne dækker imidlertid over en betydelig geografisk variation, se figur 26. I Nordøstsjælland stiger trykniveauet i begge scenarier, og i B2-scenariet er der tale om ganske betydelige stigninger på over 0,5 m i et stort område. I A2-scenariet findes der mange steder i den sydvestlige del af Sjælland tendens til reduktioner i trykniveauet, som viser sig mest markant i lag 3. For B2-scenariet er trykniveauet i denne del af Sjælland kun lidt eller ikke påvirket af klimaforandringerne. Den geografiske forskel i trykniveauets ændringer kan delvis forklares vha. ændringerne i nettonedbørsfordelingen, se figur 27. F.eks. findes der for scenarium A2 god overensstemmelse mellem områderne, hvor trykniveauet falder og hvor ændringen i nettonedbør er negativ. Til gengæld kan ændringerne i middelnettonedbør ikke forklare stigningen i trykniveau i Nordsjælland. De pågældende lokaliteter er sammenfaldende med områder, hvor den geologiske opbygning er karakteriseret ved, at der stort set ikke optræder sammenhængende lavpermeable lerlag, se figur 28. I disse områder opnås der derfor et strømningssystem, som ligner det, der forefindes i Vestjylland, og den øgede nettonedbør strømmer derfor ikke via dræn til vandløb men bidrager til en større grundvandsdannelse med stigende trykniveau til følge.

Tabel 9 Andel af landareal (i %), hvor der sker stigninger i trykniveauet på hhv. 0,25 – 1,0 m og over 1,0 m, på Sjælland for A2- og B2-scenarierne uden indvinding (u.i.) og A2-scenariet med indvinding (m.i.).

Beregningslag	Trykniveau- stigning (m)	Scenarium		
		A2 – u.i.	B2 – u.i.	A2 – m.i.
Lag 3	0,25 – 1,0	12,2	18,5	13,9
	> 1,0	0,0	3,7	0,0
Lag 9	0,25 – 1,0	8,5	21,2	10,8
	> 1,0	0,0	1,6	0,0

På figur 29 ses den geografiske fordeling af ændringerne i trykniveauet for hhv. beregningslag 3 og 9, når grundvandsindvinding inkluderes i beregningerne. Der findes stort set samme ændring i trykniveauet som for situationen uden grundvandsindvinding, hvilket skyldes, at der i begge tilfælde (nu- og A2-scenariet) indvindes samme mængde og at denne er jævnt fordelt over året.

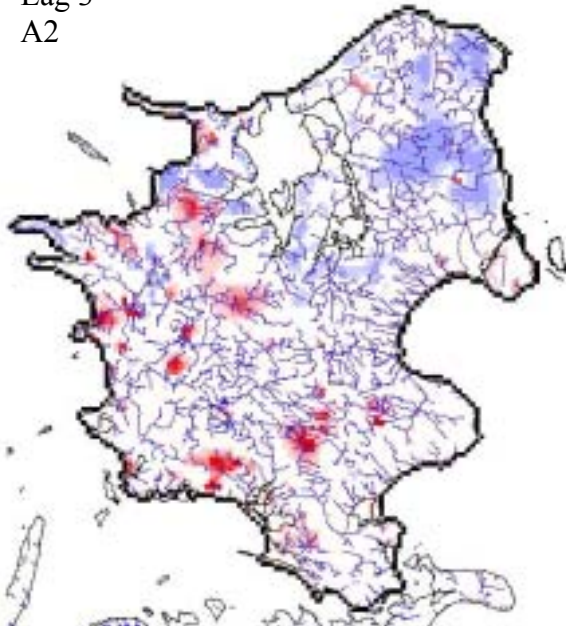
De sæsonmæssige variationer i ændringen i trykniveauet er på figur 30 præsenteret for beregningslag 3. Der findes hverken for A2- eller B2-scenariet nævneværdige sæsonmæssige

forskelle. I begge scenarier er trykniveauet højere på Nordsjælland og generelt lavere på resten af Sjælland i forhold til nutidsscenariet for både sommer og vinter. I tabel 10 ses, hvor store arealer i beregningslag 3 der oplever en signifikant stigende grundvandsstand i hhv. sommer- og vinter-perioden. Igen findes der meget små forskelle på sommer- og vinterperioden, med en tendens til større forskelle mellem fremtids- og nutidsscenariet om sommeren end om vinteren. Dette kan skyldes, at der midles over perioder (maj-oktober, november-april), som både inkludere stigende og faldende trykniveau.

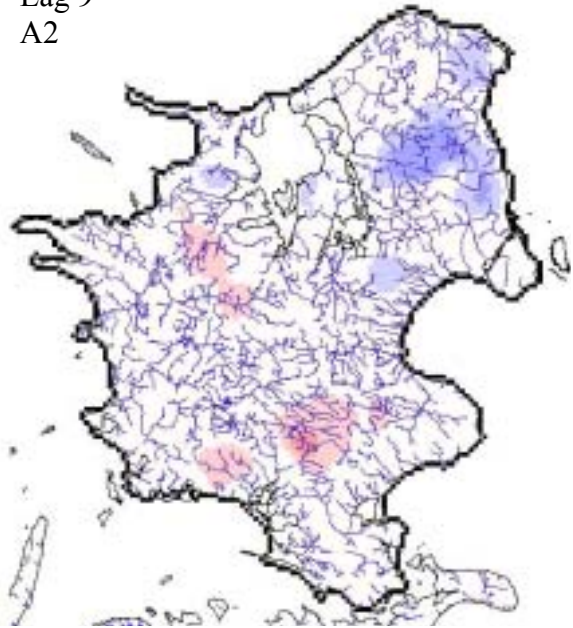
Tabel 10 Andel af landareal (i %) i beregningslag 3, hvor der sker stigninger i trykniveauet på hhv. 0,25 – 1,0 m og over 1,0 m, for hhv. maj-oktober (sommer) og november-april (vinter) for scenarium A2 og B2 uden indvinding (u.i.) og A2 med indvinding (m.i.).

Sæson	Trykniveau- stigning (m)	Scenarium		
		A2 – u.i.	B2 – u.i.	A2 – m.i.
Sommer	0,25 – 1,0	13,2	18,9	13,9
	> 1,0	0,0	4,0	0,0
Vinter	0,25 – 1,0	10,4	18,1	13,6
	> 1,0	0,0	3,0	0,0

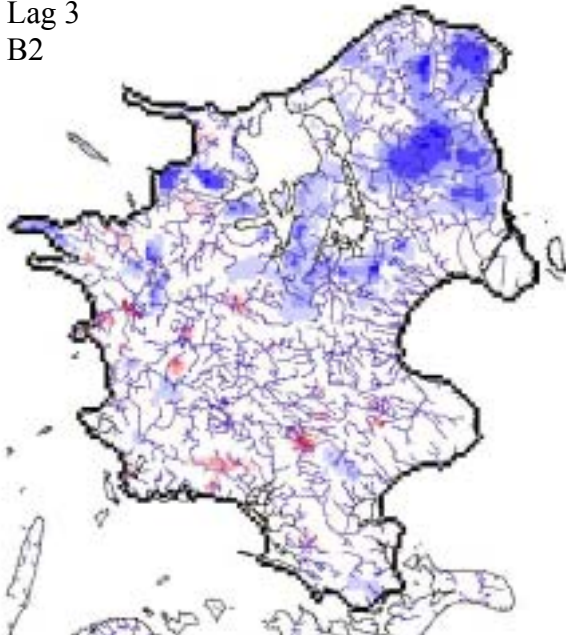
Lag 3
A2



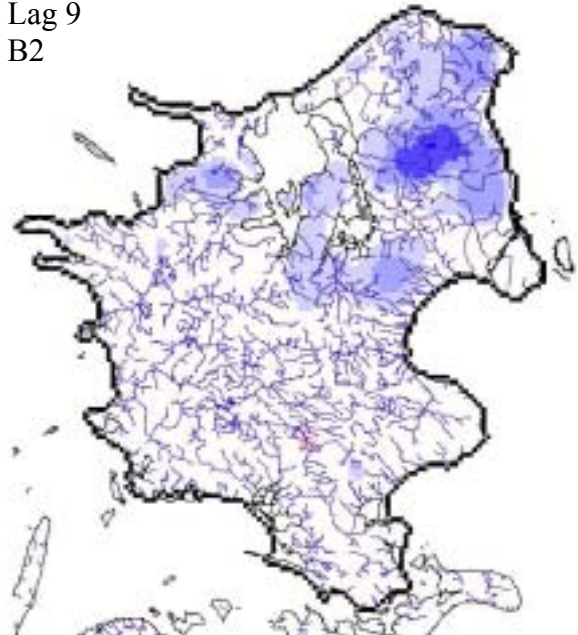
Lag 9
A2



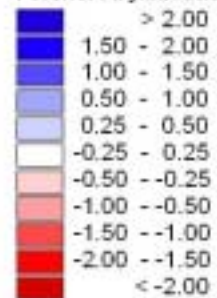
Lag 3
B2



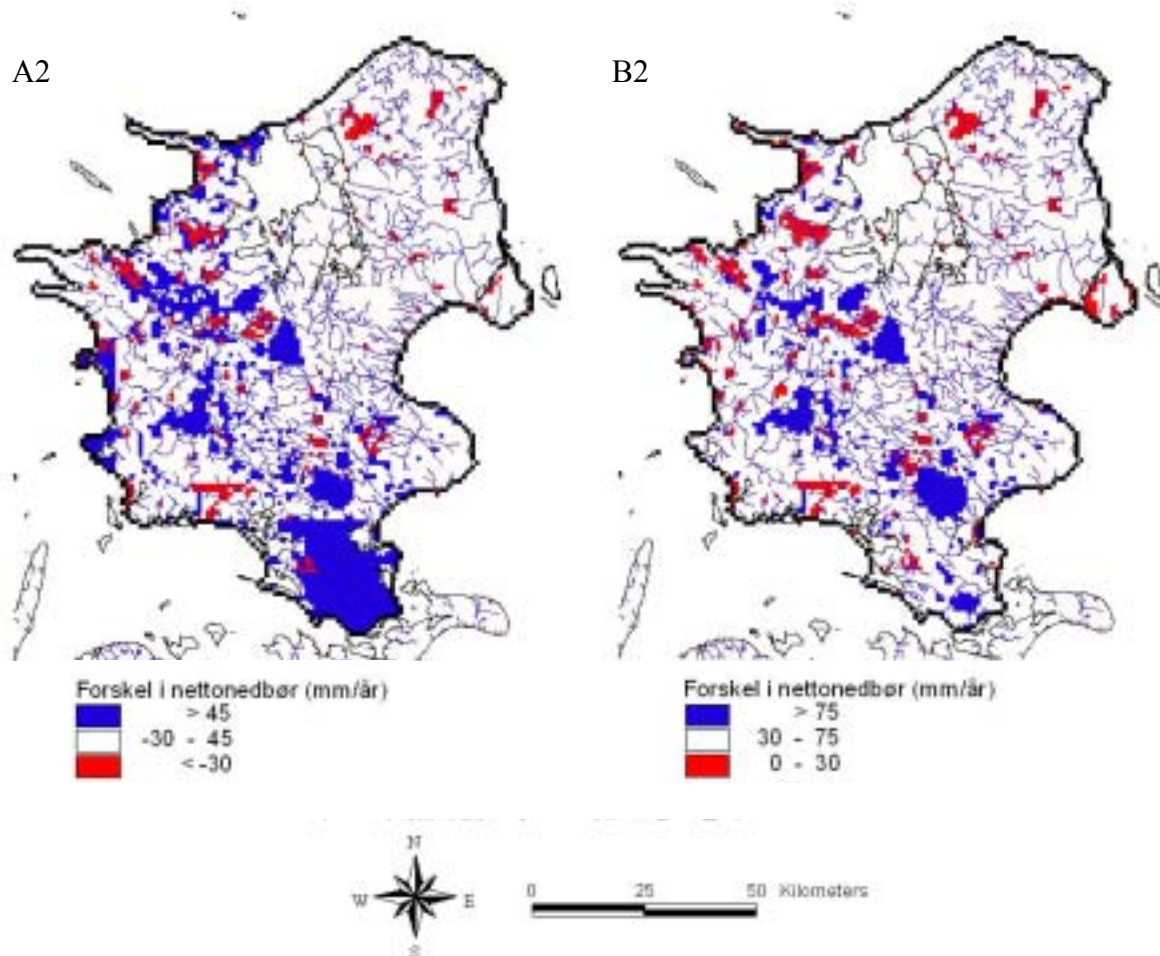
Lag 9
B2



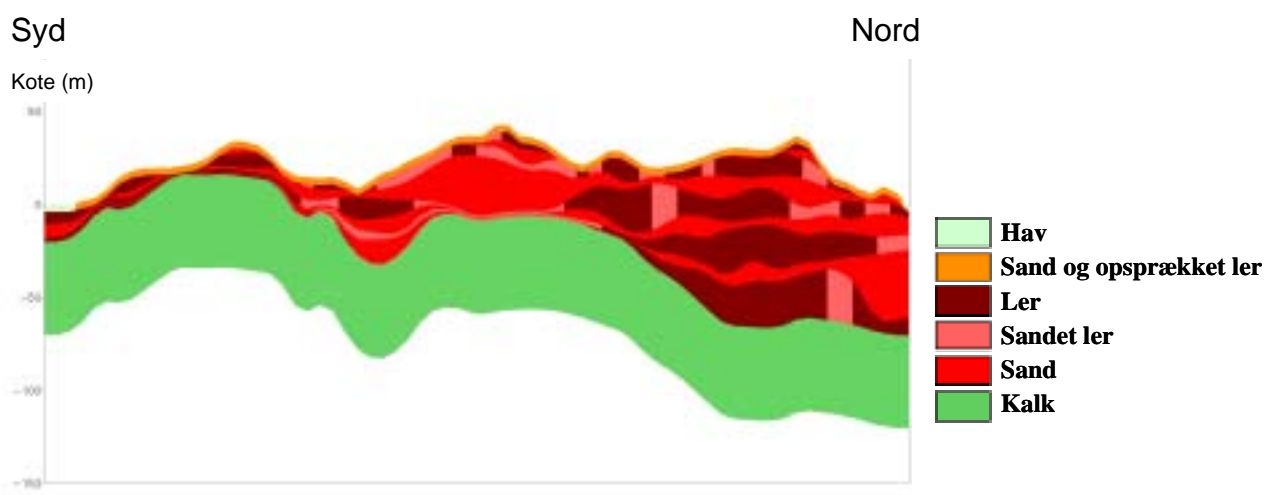
Forskel i trykniveau (m)



Figur 26 Forskel i middeltrykniveau mellem A2- og nutidsscenarioet (A2-Nu) og B2- og nutidsscenarioet for lag 3 og 9 i Sjællandsmodellen (ingen grundvandsindvinding).

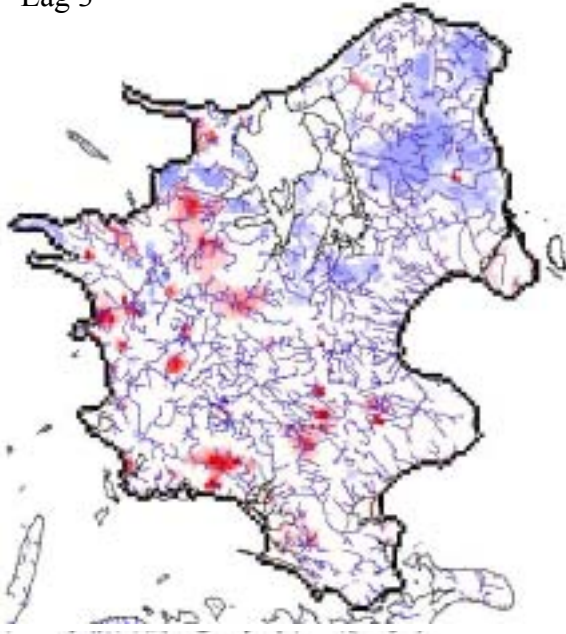


Figur 27 Forskel mellem nutidsscenariets og fremtidsscenariernes middelnedbør på Sjælland.

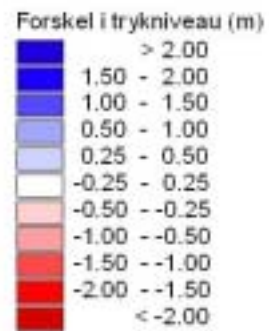
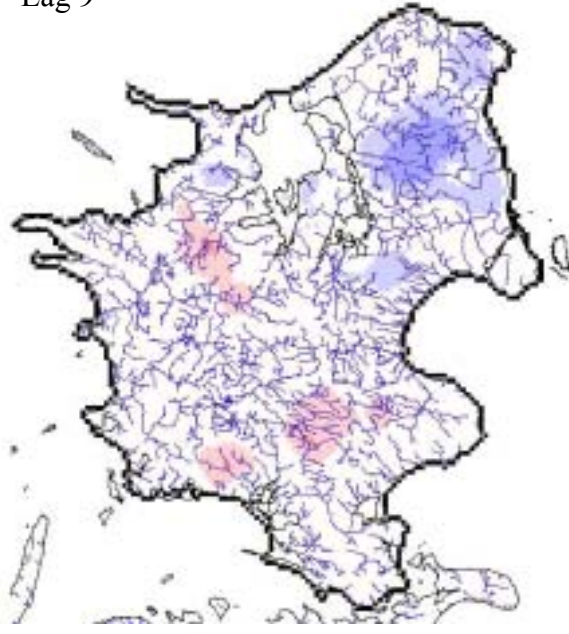


Figur 28 Geologisk tværsnit gennem Sjællandsmodellen (snit 3 på figur 2).

Lag 3

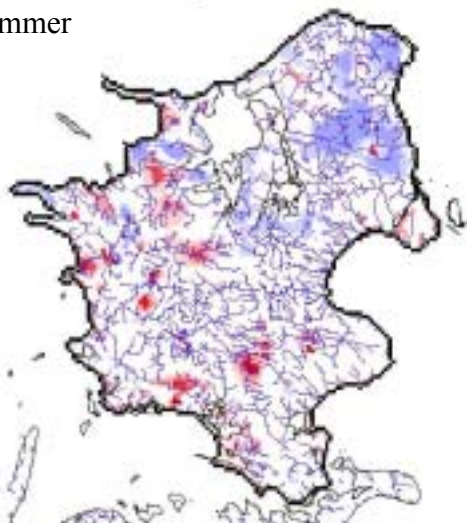


Lag 9

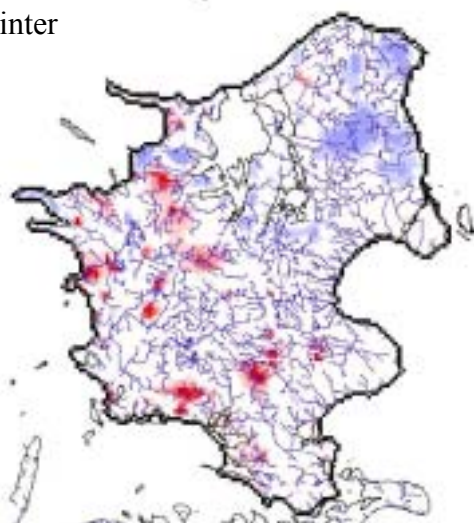


Figur 29 Forskel i middeltrykniveau mellem A2- og nutidsscenariet (A2-Nu) for lag 3 og 9 i Sjællandsmodellen (med grundvandsindvinding).

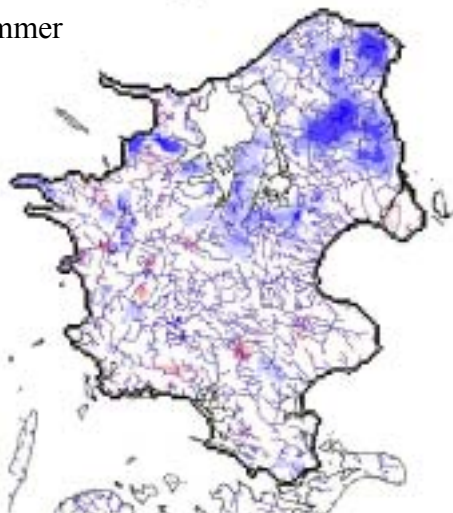
A2 sommer



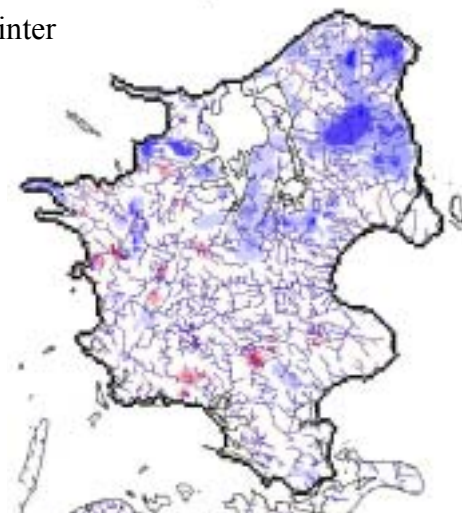
A2 vinter



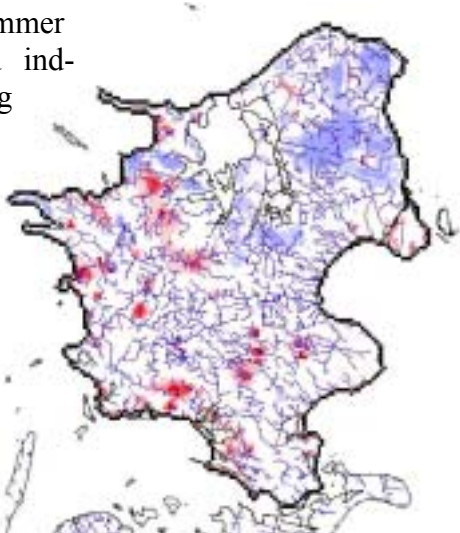
B2 sommer



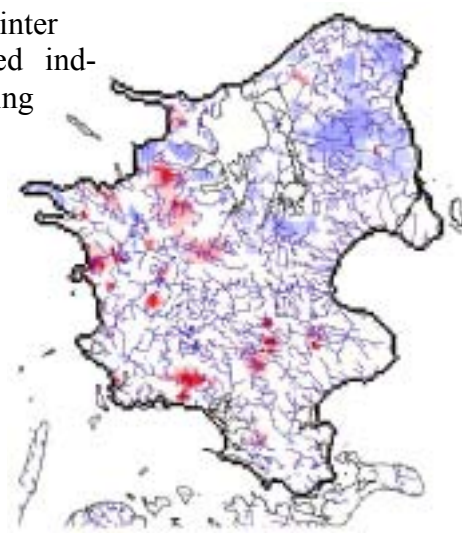
B2 vinter



A2 sommer
- med ind-
vinding



A2 vinter
- med ind-
vinding



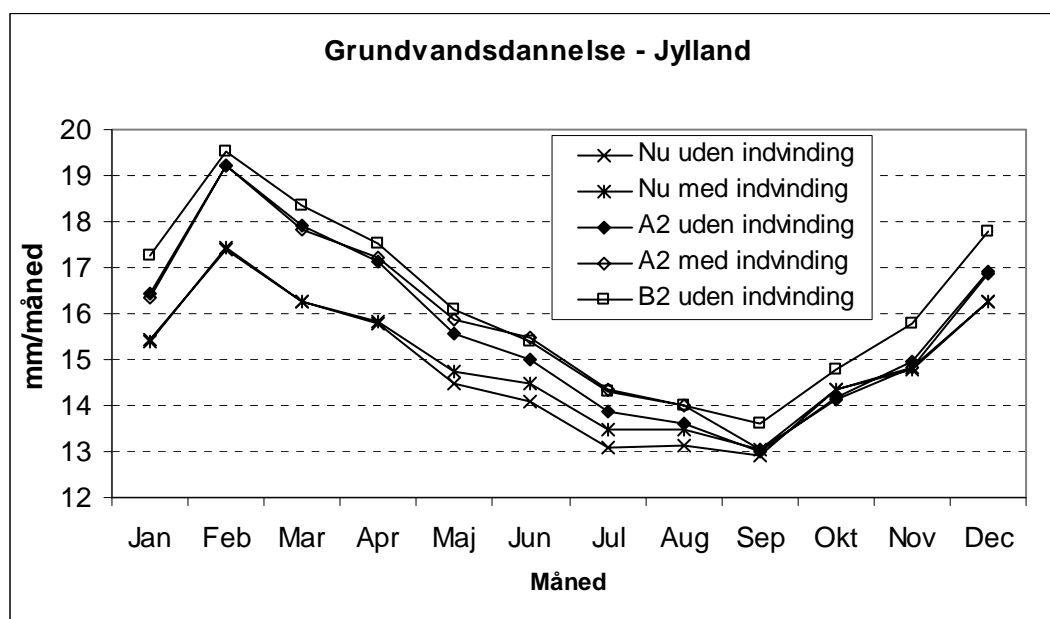
Figur 30 Ændringen i middeltrykkniveau i beregningslag 3 for hhv. maj-oktober (venstre) og november-april (højre) for scenarium A2 og B2 uden indvinding og A2 med indvinding. Skalaen kan ses på figur 26.

5.3 Grundvandsdannelse

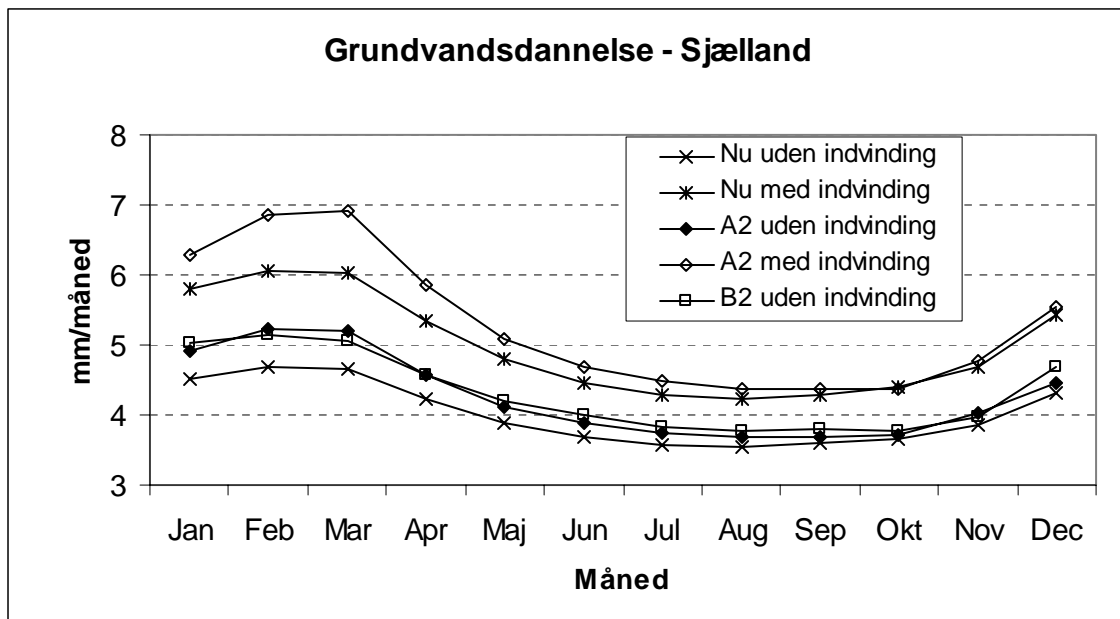
I tabel 11 er den gennemsnitlige grundvandsdannelse til de dybe magasiner i Vestjylland og på Sjælland opgjort. I Vestjylland stiger grundvandsdannelsen med 10 mm for A2-scenariet og 16 mm for B2-scenariet. Grundvandsindvindingen har kun mindre betydning for størrelsen af grundvandsdannelsen. Mht. den sæsonmæssige variation, se figur 31, øges grundvandsdannelse i A2-scenariet i perioden december-august, mens den er uændret i september-november. I B2-scenariet ligger grundvandsdannelsen over værdierne for nutidsscenarioet i alle måneder. På Sjælland stiger grundvandsdannelsen med 3 mm/år for både A2- og B2-scenarierne. Stigningen finder primært sted i perioden januar-juli, mens der kun sker en lille forøgelse af den gennemsnitlige grundvandsdannelse i den resterende del af året, se figur 32. I forhold til ændringen, som grundvandsindvindingen resulterer i, er effekten af klimaændringerne forholdsvis lille.

Tabel 11 Gennemsnitlig grundvandsdannelse (mm/år) til dybe magasiner i Vestjylland (til lag 5) og på Sjælland (til lag 3).

Opland	Nu		A2		B2
	Uden indv.	Med indv.	Uden indv.	Med indv.	Uden indv.
Vestjylland	179	180	189	190	195
Sjælland	48	60	51	63	51



Figur 31 Månedlige gennemsnitsværdier for grundvandsdannelsen til de dybe magasiner i Vestjylland i Nu-, A2- og B2-scenarierne.



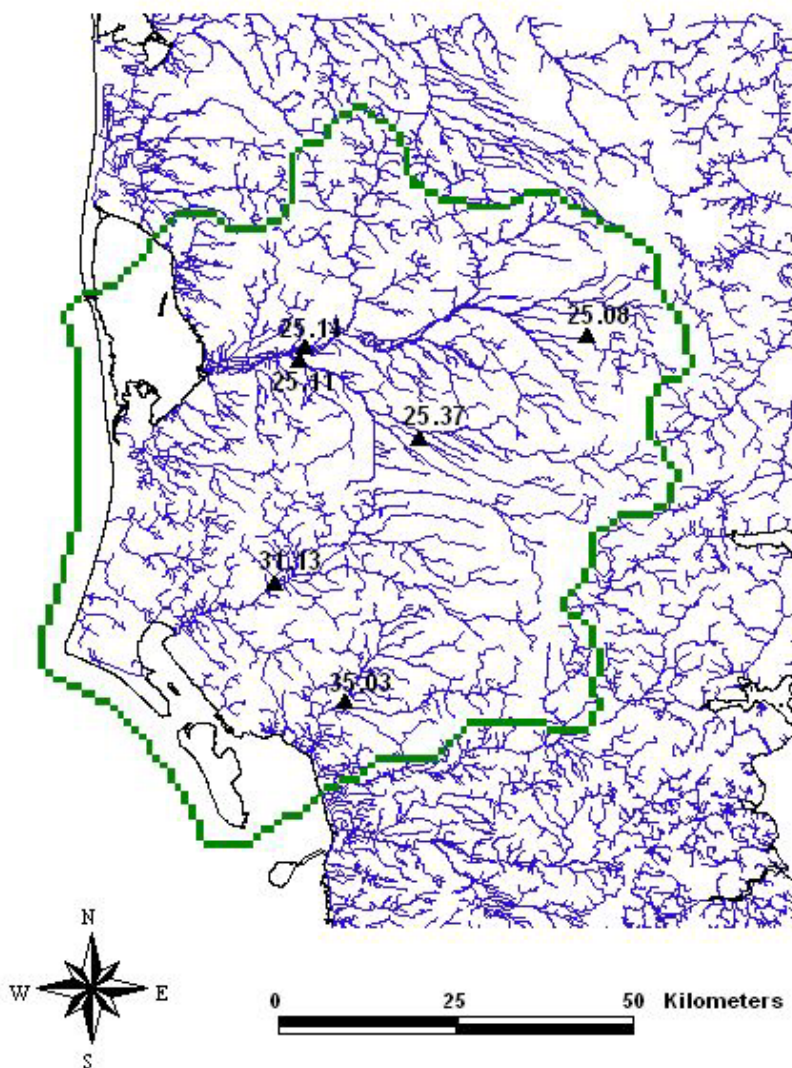
Figur 32 Månedlige gennemsnitsværdier for grundvandsdannelsen til de dybe magasiner i Sjælland i Nu-, A2- og B2-scenarierne.

5.4 Vandløbsafstrømning – Vestjylland

I nedenstående tabel 12 er det vist, fra hvilke vandløbsstationer der trækkes resultater ud af modellen. På figur 33 ses de seks stationers geografiske placering. Der er udvalgt fire stationer med et relativt stort opland (25.14, 25.11, 31.13, 35.03) samt to stationer med et relativt lille opland (25.08, 25.37).

Tabel 12 Vandføringsstationer i Vestjylland, hvor resultater fra modelberegningerne evalueres. Med. min. betegner median minimum ved den pågældende station (Ovesen et al., 2000).

Station	Vandløb	Opland (km ²)	Middel afstrømning (l/s/km ²)	Med. min. (l/s/km ²)
25.14	Skjern Å	1558	15,4	7,5
25.11	Omme Å	612	13,5	4,9
31.13	Varde Å	814	14,7	6,1
35.03	Sneum Å	223	14,4	5,4
25.08	Skjern Å	82	19,9	1,6
25.37	Simmelbæk	50	10,9	2,8



Figur 33 Illustration af modelområdet for Vestjylland. Desuden er placeringen af vandløbsstationer, hvorfra modelresultater analyseres, angivet (▲).

5.4.1 Naturlig tilstand (ingen grundvandsindvinding)

I tabel 13 er middelaflstrømningen for perioden 1990-2004 vist. Middelaflstrømningen stiger for alle stationer fra nutidsscenarioet til fremtidsscenarierne. Den største stigning findes for B2-scenarioet, hvor middelaflstrømningen stiger med mellem 15% og 36%. For station 25.14, som integrerer over det største areal, findes stigninger på hhv. 12% og 18% for A2- og B2-scenarierne.

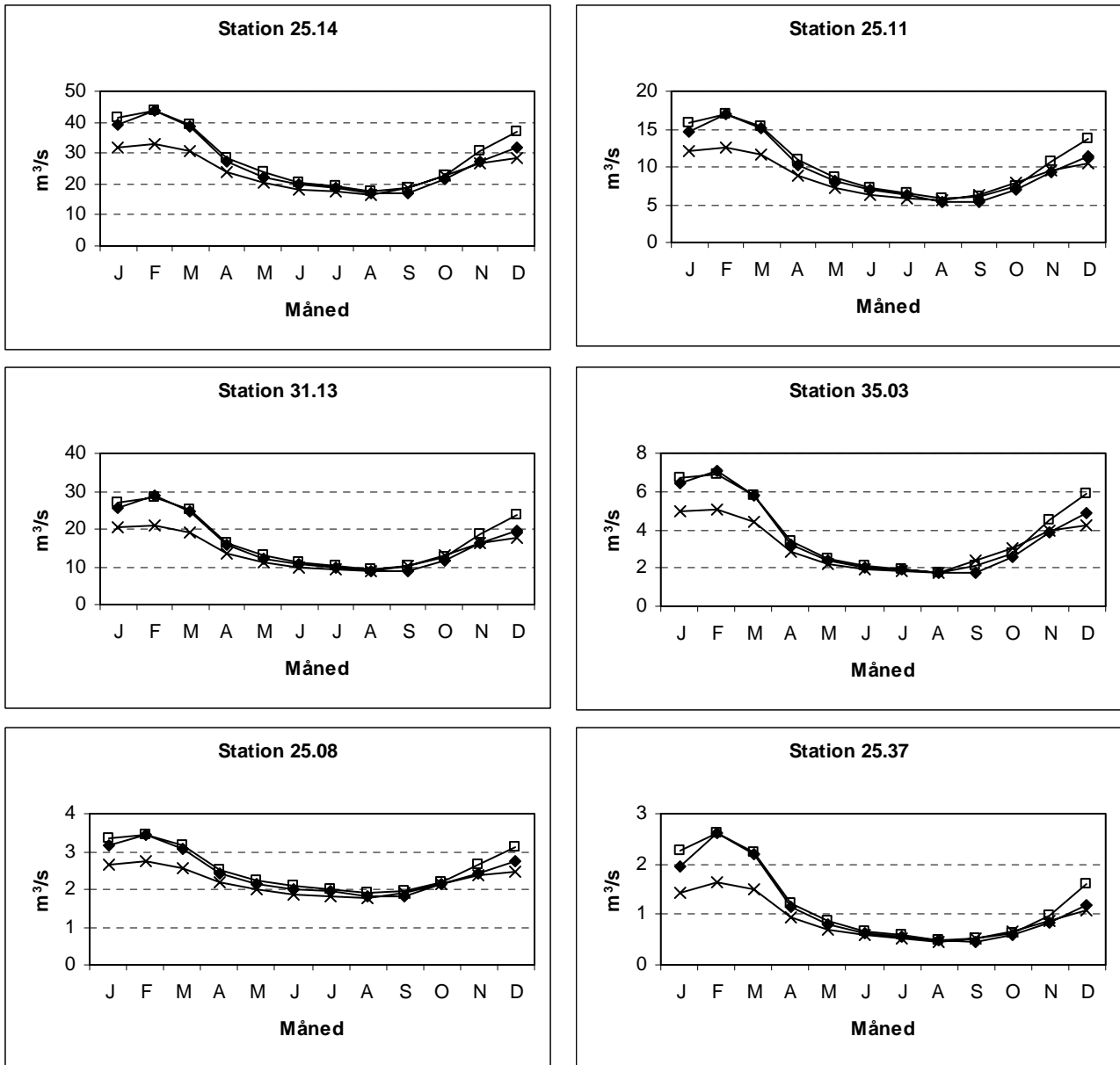
Tabel 13 Middelaflstrømning (m³/s) for de Vestjyske vandløb (ingen vandindvinding).

Scenarium	Vandføringsstation					
	25.14	25.11	31.13	35.05	25.08	25.37
Nu	24,1	8,7	14,2	3,21	2,21	0,90
A2	26,9	9,7	16,0	3,62	2,43	1,11
B2	28,5	10,4	17,0	3,86	2,55	1,22

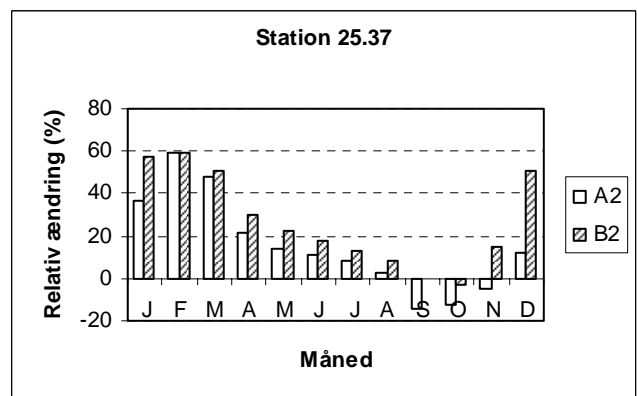
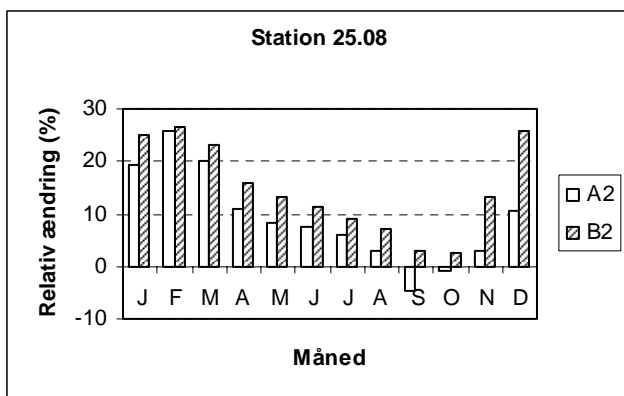
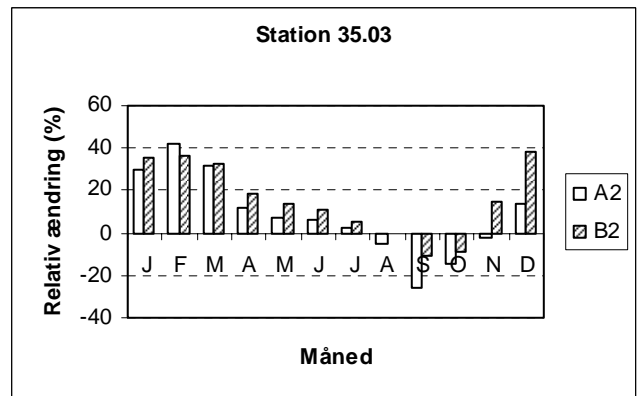
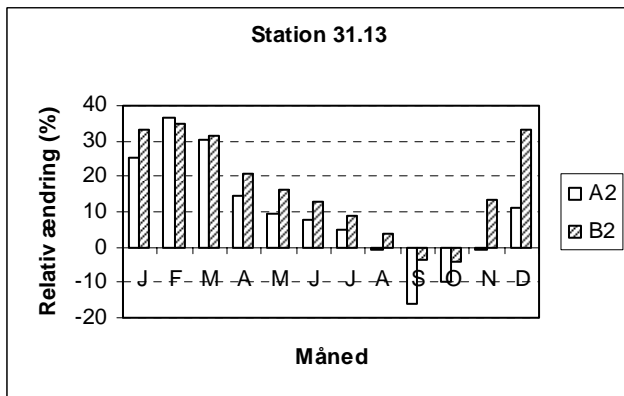
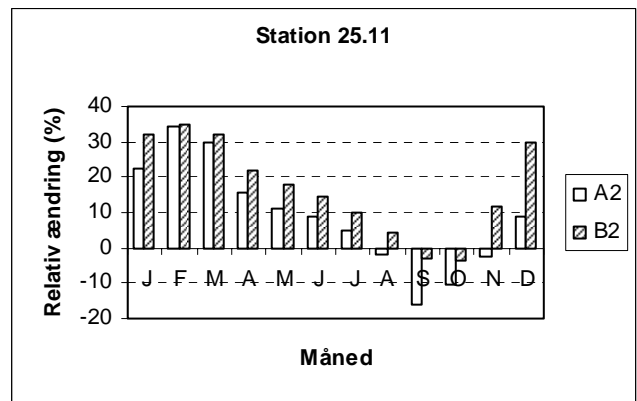
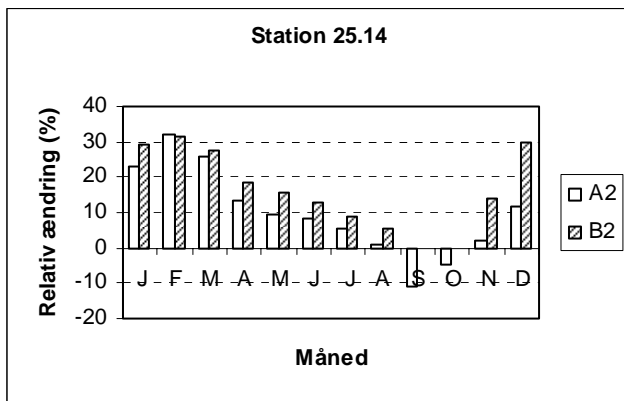
Den sæsonmæssige variation i vandløbsafstrømningen er vist på figur 34. Den relative forskel mellem nutidsscenarioet og de to fremtidsscenarier er vist på figur 35. For A2-scenarioet findes der stigninger i månedsmiddelaflstrømningen i månederne december-juni, mens der for specielt september og oktober findes væsentlige reduktioner i afstrømningen. Den samme tendens ses for B2-scenarioet, men her ligger den fremtidige afstrømning generelt højere. Der predikteres for begge fremtidsscenarier en relativ stor stigning i månedsmiddelaflstrømning i januar-marts (stigning på 20-60%), mens der er relativ lille forskel på nutids- og fremtidsafstrømningen i månederne april-august.

I tabel 14 er modelværdier for udvalgte fraktil-værdier i vandføring vist (nutidsscenarioet). På figur 36 er de relative ændringer af fraktil-værdierne i fremtidsscenarierne illustreret. De største relative ændringer opnås for 95%-fraktilen, som for de store afstrømningsstationer ligger mellem 25 og 40% (størst for B2-scenarioet). For 5%-fraktilerne findes der stort set uændrede eller svagt stigende afstrømningsværdier. Hvis de relative ændringer i månedlige afstrømninger vist på figur 35 betragtes, ses der at optræde relativt store reduktioner i september- og oktober-afstrømninger i specielt A2-scenarioet. Det påvirker imidlertid ikke størrelsen af 5%-fraktilen, da denne primært optræder i august.

På figur 37 er den samlede afstrømning ved station 25.11 opdelt på hhv. grundvandstilstrømning, drænaflstrømning og overfladevandsafstrømning. Pga. skalaproblemer repræsenterer de beregnede strømningskomponenter ikke direkte strømningen, som den foregår i feltet, men resultaterne kan benyttes til at give et indtryk af den relative fordeling mellem strømningskomponenterne, og de kan i særdeleshed benyttes til at give et indtryk af forskellene mellem vandløbstilstrømningen i forskellige geologiske miljøer. Det største bidrag til den forøgede vintervandføringen i scenarium A2 og B2 udgøres af drænvandsafstrømning. I januar-februar stiger drænvandsafstrømningen med 3-4 m³/s i forhold til nutidsscenarioet, hvilket skyldes, at grundvandsstanden stiger op over drænniveau (en halv meter under terræn) i et større område end i nutidsscenarioet. Stigningen i grundvandstilstrømningen til vandløbet i vinterperioden ligger i intervallet 1-2 m³/s. Mens den relative forøgelse af drænvandsafstrømning er størst i februar, så har den relative stigning i grundvandstilstrømning maksimum i marts og april. Desuden ses en relativ stor stigning i overfladevandsafstrømning i december-marts, men som absolut størrelse er der tale om et relativt lille bidrag. Mht. sommervandføringen reduceres de tre strømningskomponenter faseforskudt. I A2-scenarioet reduceres overfladevandsafstrømningen mest i juli-september. For drænaflstrømningen findes der markante fald i august-oktober, og grundvandstilstrømningen reduceres i perioden september-november. I september, hvor den største samlede reduktion optræder, falder grundvands-, drænvands- og overfladevandsafstrømningen med hhv. 0,36, 0,57 og 0,25 m³/s. Alle tre bidrag er dermed væsentlige for faldet i vandløbsafstrømning i denne periode.



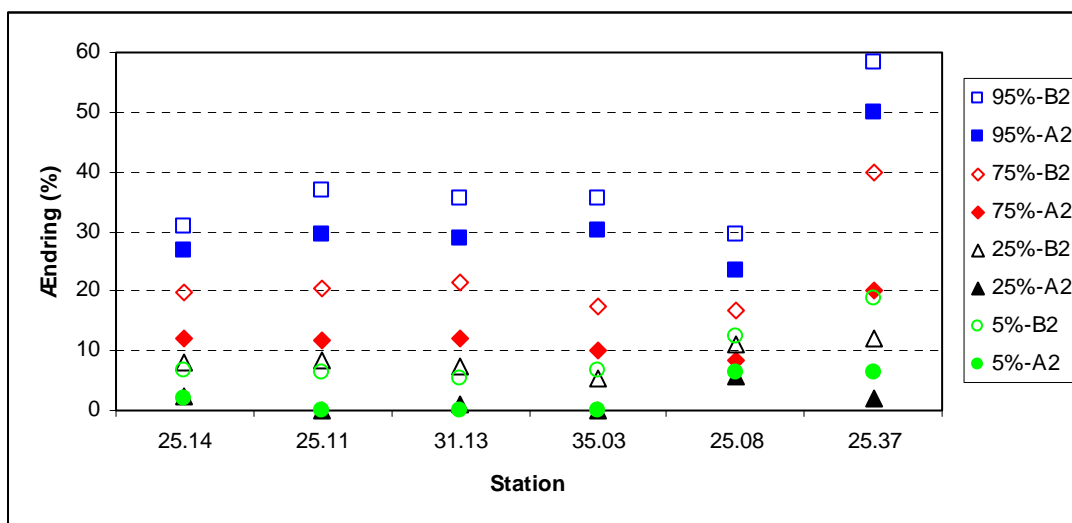
Figur 34 Månedlige middelvandføringer for nutidsscenariet (x), A2-scenariet (◆) og B2-scenariet (□) hvor grundvandsindvinding ikke er inkluderet.



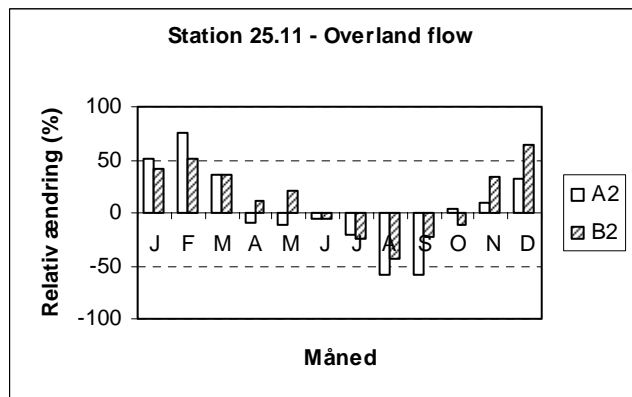
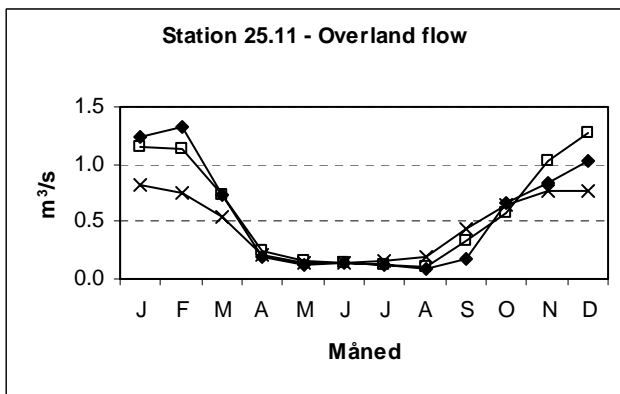
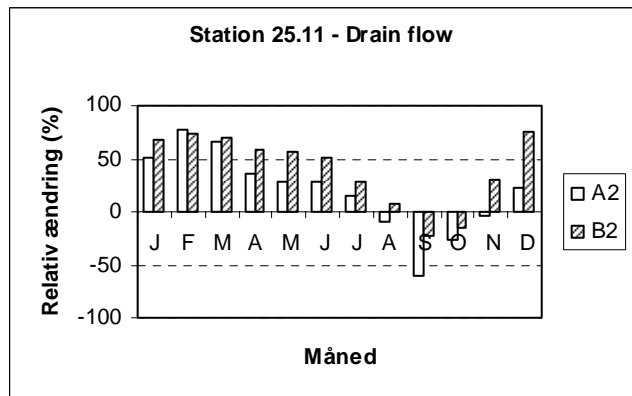
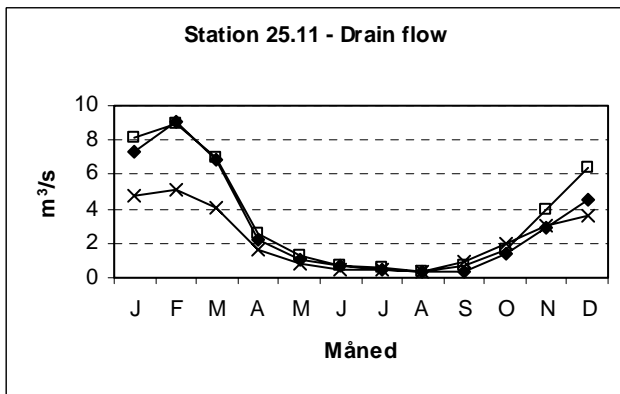
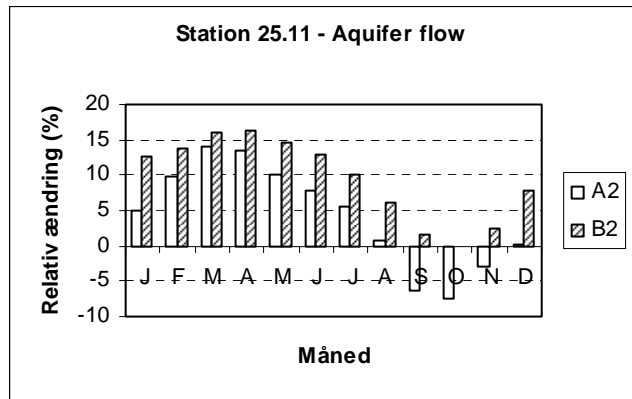
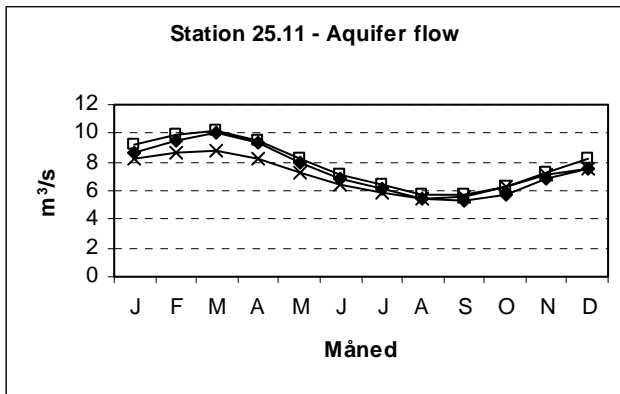
Figur 35 Relativ ændring i månedlig middelvandføringer for A2-scenariet og B2-scenariet (grundvandsindvinding ikke inkluderet).

Tabel 14 Udvalgte fraktil-værdier (m³/s) for nutids-scenariet for de seks vandføringsstationer (ingen grundvandsindvinding).

Station	Fraktil-værdi			
	5%	25%	75%	95%
25.14	15,0	17,7	27,9	42,2
25.11	4,6	5,9	10,3	16,6
31.13	7,6	9,4	16,7	28,7
35.03	1,5	1,9	4,0	7,3
25.08	1,6	1,8	2,4	3,4
25.37	0,32	0,50	1,0	2,4



Figur 36 Relativ ændring i fraktil-værdier for de seks afstrømningsstationer for A2- og B2-scenarierne.



Figur 37 Totalafstrømningen fra station 25.11 opdelt på hhv. grundvandsafstrømning, drænastrømning og overfladevandsafstrømning.

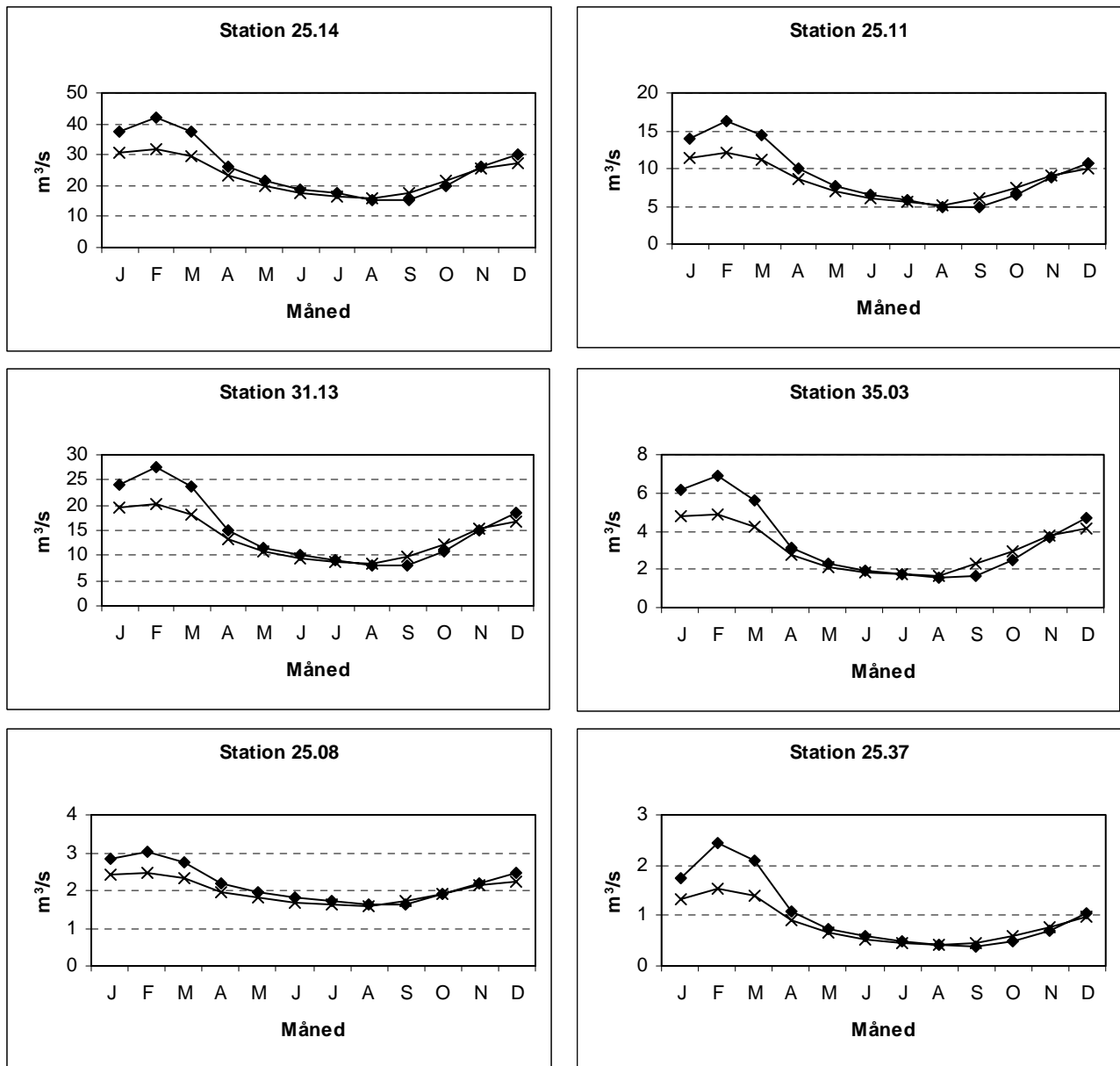
5.4.2 Indvindingspåvirket tilstand

Middelvandføringerne i de Vestjyske vandløb, når der indvindes grundvand og markvandes, er vist i tabel 15 for hhv. nutids- og A2-scenarierne. I forhold til situationen uden indvinding falder middelfaststrømningen for de fire store stationer i begge scenarier med ca. 5%, mens faldet er på ca. 10% for de to små stationer (25.08 og 25.37).

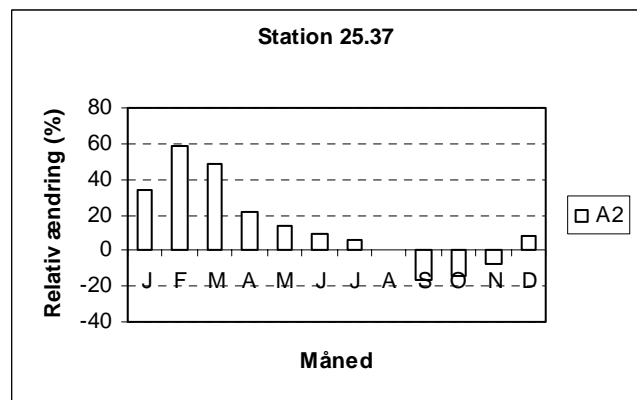
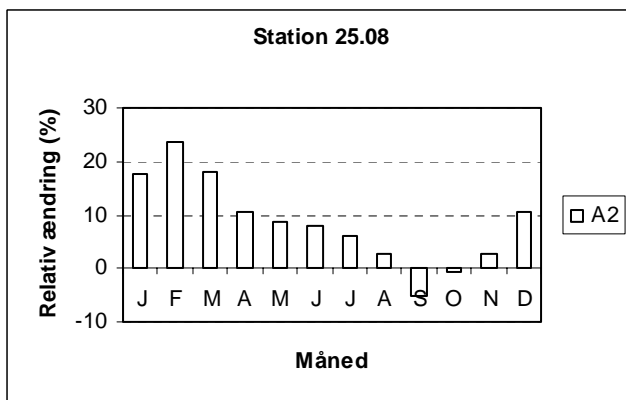
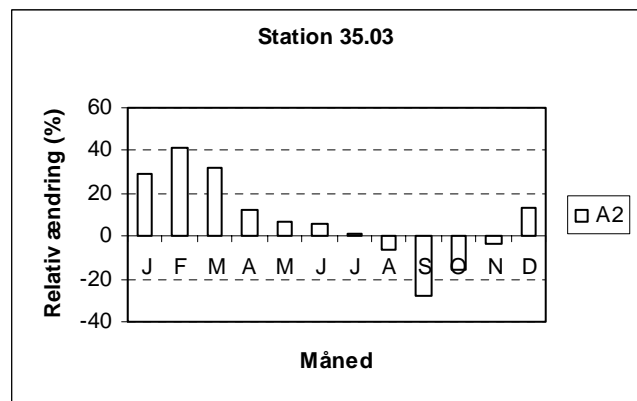
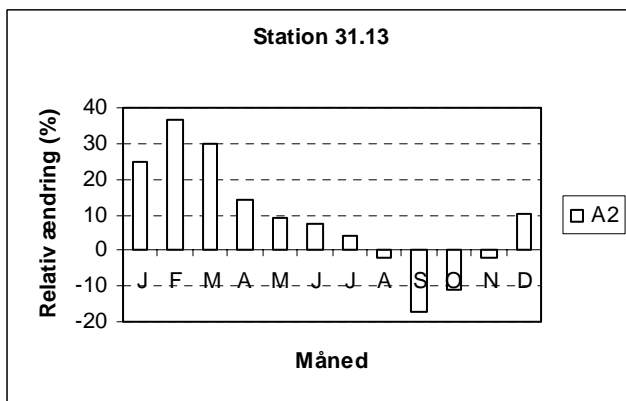
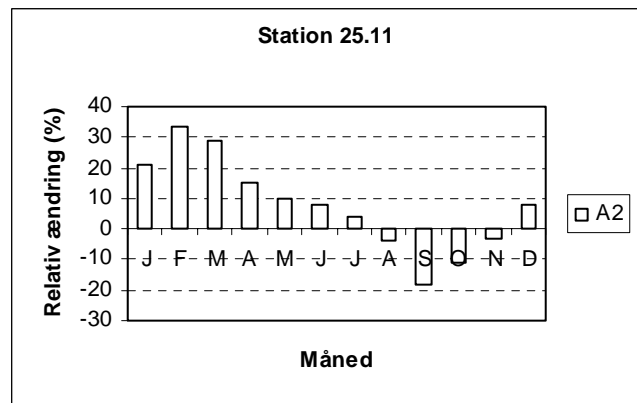
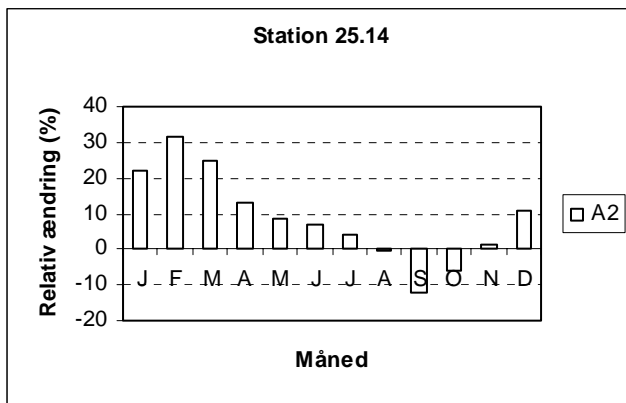
Tabel 15 Middelfaststrømning (m³/s) for de Vestjyske vandløb (med vandindvinding).

Scenarium	Vandføringsstation					
	25.14	25.11	31.13	35.05	25.08	25.37
Nu	23,0	8,3	13,5	3,09	1,98	0,83
A2	25,6	9,2	15,1	3,47	2,17	1,01

På figur 38 ses månedlige middelværdier af vandløbsafstrømningen, mens den relative forskel mellem nutids- og A2-scenariet er vist på figur 39. Der findes generelt samme tendens i sæsonvariationerne, som i situationen uden indvinding. Der optræder en lidt større påvirkning i sommermånederne, hvilket skyldes den større grundvandsindvinding til markvanding, som finder sted i maj-august for A2-scenariet. Effekten ses også på de relative ændringer af 5%- og 25%-fraktilerne, figur 40, som er reduceret i forhold til situationen uden grundvandsindvinding (se figur 36).



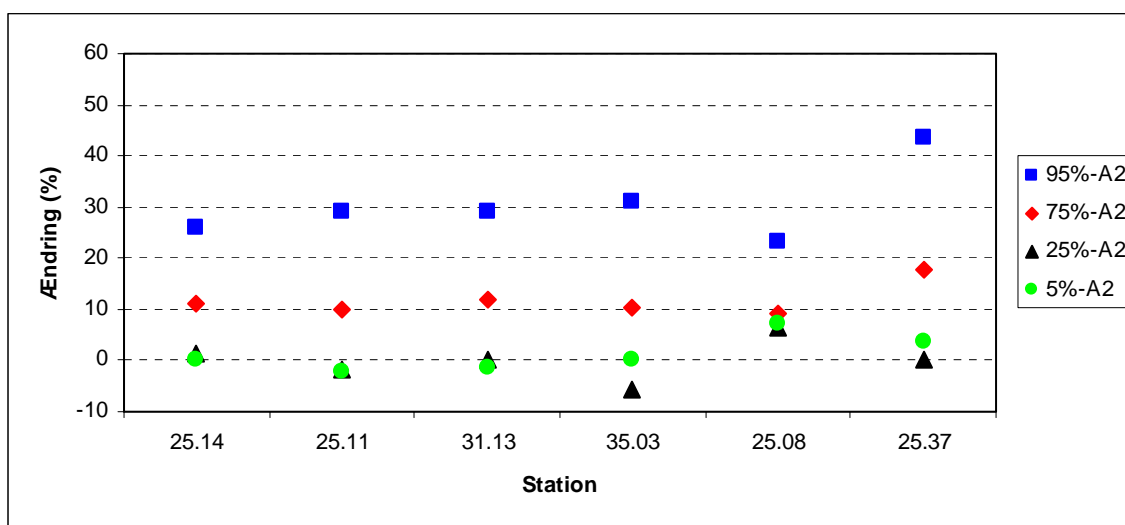
Figur 38 Månedlige middelvandføringer for nutidsscenarioet (x) og A2-scenarioet (♦) hvor grundvandsindvinding er inkluderet.



Figur 39 Relativ ændring i månedlig middelvandføringer for A2-scenariet (grundvandsindvinding inkluderet).

Tabel 16 Udvalgte fraktil-værdier (m³/s) for nutids-scenariet for de seks vandføringsstationer (med grundvandsindvinding).

Station	Fraktil-værdi			
	5%	25%	75%	95%
25.14	14,2	16,7	26,9	40,7
25.11	4,3	5,6	9,9	15,9
31.13	7,0	8,8	15,8	27,5
35.03	1,4	1,8	3,8	7,1
25.08	1,4	1,6	2,2	3,0
25.37	0,27	0,45	0,95	2,3



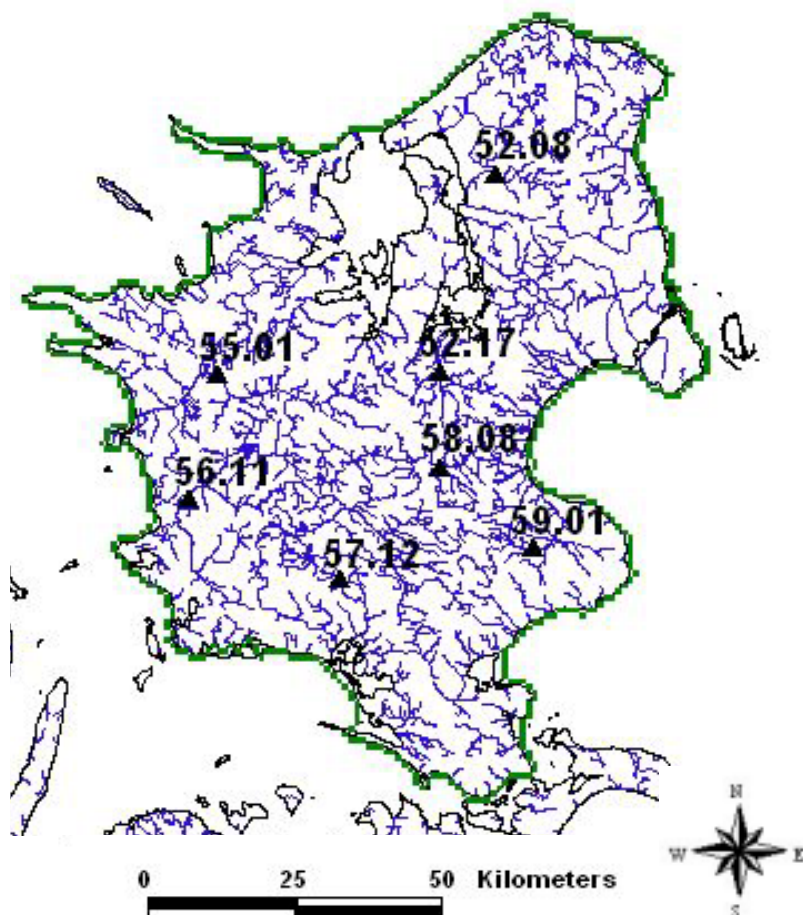
Figur 40 Relativ ændring i fraktil-værdier for de seks afstrømningsstationer for A2-scenariet (med grundvandsindvinding).

5.5 Vandløbsafstrømning – Sjælland

Der er udvalgt 7 vandføringsstationer på Sjælland, hvor effekten af klimaforandringer analyseres mht. vandløbsafstrømning, se tabel 17 samt figur 41. Stationerne 57.12, 55.01 og 56.11 er karakteriseret ved, at oplandene er relativt store, og indvindingspresset i forhold til den østlige del af Sjælland er relativt beskedent. Stationerne 52.08, 52.17 og 58.08 har relativt små oplande og er placeret i områder med betydelig grundvandsindvinding.

Tabel 17 Vandføringsstationer på Sjælland, hvor simuleret vandløbsafstrømning analyseres. Med. min. betegner median minimum ved den pågældende station (Ovesen et al., 2000).

Station	Vandløb	Opland (km ²)	Middel afstrømning (l/s/km ²)	Med. min. (l/s/km ²)
57.12	Suså	763	7,4	0,6
55.01	Åmosen	293	6,3	0,7
56.11	Tude Å	261	7,6	0,7
59.01	Tryggevælde Å	129	6,8	0,4
52.08	Havelse Å	102	4,7	0,6
52.17	Lavringe Å	64	8,2	0,3
58.08	Slimmenge Å	56	6,1	0,0



Figur 41 Placering af vandløbsstationer på Sjælland (▲), hvor fremtidig afstrømning analyseres.

5.5.1 Naturlig tilstand (ingen grundvandsindvinding)

I tabel 18 er middelfafstrømningen for situationen uden grundvandsindvinding præsenteret for nutids-, A2- og B2-scenarierne. Som for Vestjylland har begge klimascenarier højere middelfafstrømning end i nutidsscenarioet, og igen findes de største værdier for B2-scenariet. I A2-scenariet er den relative stigning på 14-18%, mens stigningen for B2-scenariet er på 26-34%.

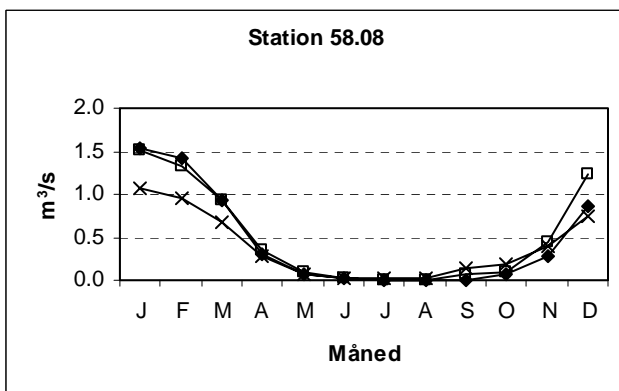
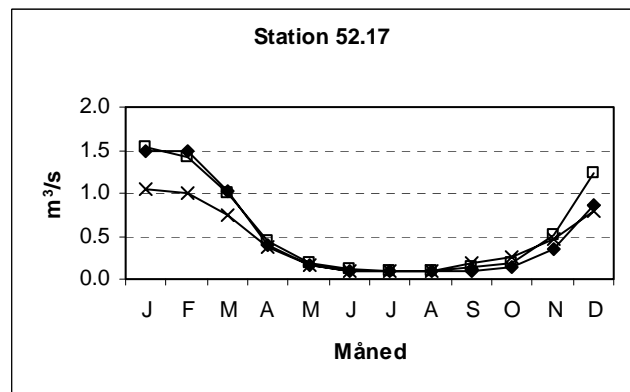
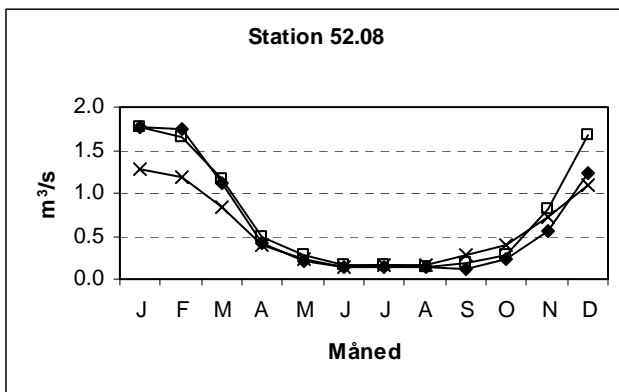
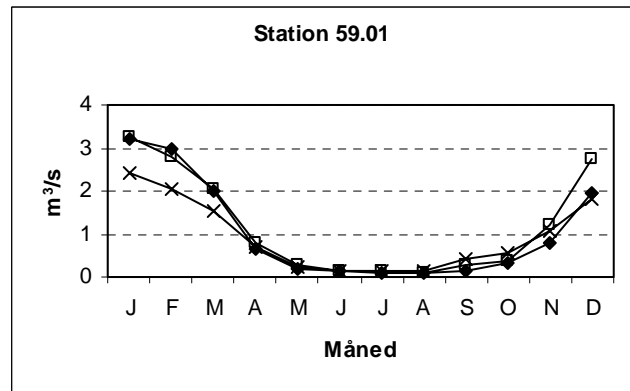
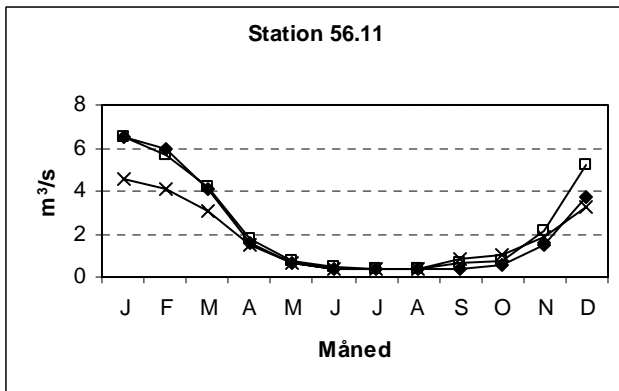
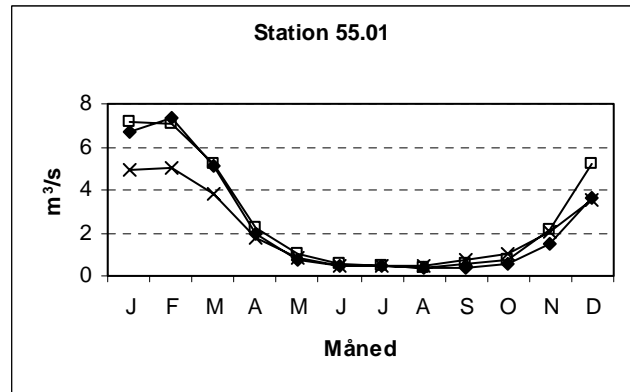
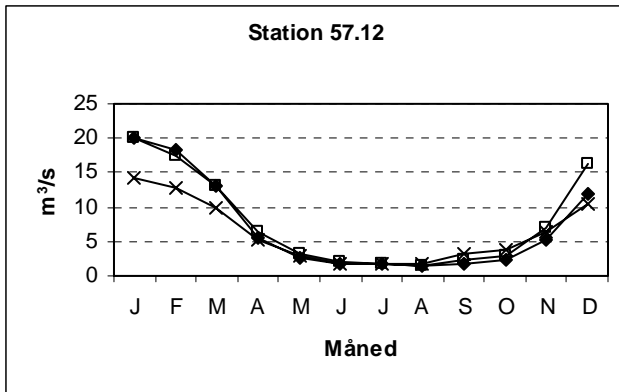
Tabel 18 Middelfafstrømning (m³/s) for de Sjællandske vandløb (ingen vandindvinding).

Scenarium	Vandføringsstation						
	57.12	55.01	56.11	59.01	52.08	52.17	58.08
Nu	6,11	2,08	1,82	0,93	0,57	0,44	0,38
A2	7,09	2,41	2,15	1,04	0,65	0,52	0,45
B2	7,78	2,71	2,38	1,17	0,73	0,57	0,51

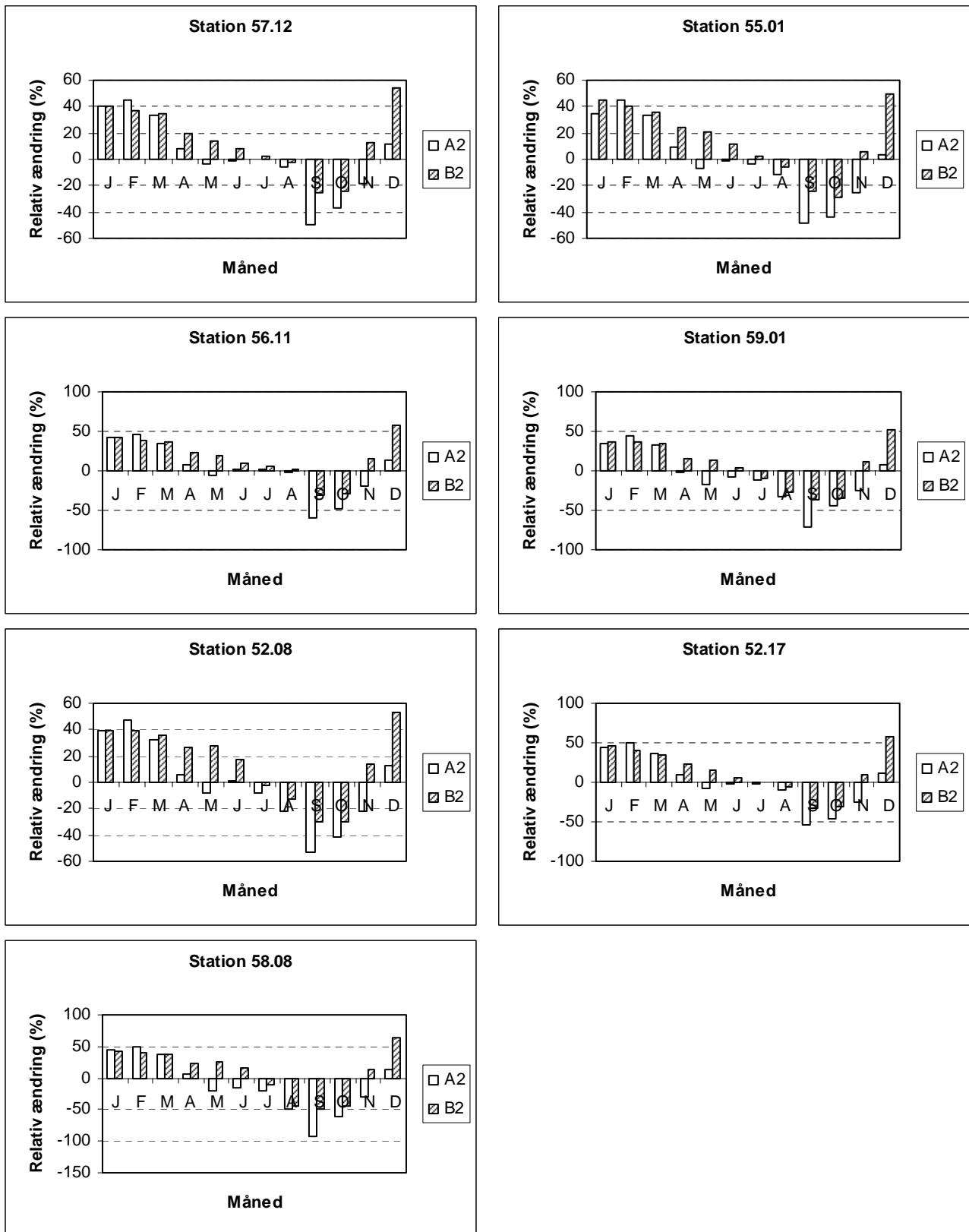
På figur 42 ses de månedlige middelværdier af vandløbsafstrømningen. De største absolutte forskelle mellem nutids- og fremtidsscenarierne optræder i perioden december-marts, hvor afstrømningen i fremtidsscenarierne ligger markant over nutidsværdierne. I sommerhalvåret er den absolutte forskel mindre, men til gengæld er de relative ændringer store, se figur 43. I A2-scenariet reduceres afstrømningen i perioden august-november, og i september optræder der relative ændringer på 50% eller derover for de fleste stationer. Perioden med lave vandløbsafstrømninger forlænges i fremtidsscenarierne helt frem til oktober måned, og samtidig reduceres både 5%- og 25%-fraktilerne i forhold til nutidsscenarioet for de fleste stationer (se figur 44).

I forbindelse med evaluering af minimumsvandføringerne skal det bemærkes, at der ved anvendelse af delta change metoden sandsynligvis sker en overestimering af de lave vandføringer. Det skyldes, at metoden ikke er i stand til at beskrive de ændringer i nedbørsdynamikken, som klimamodellerne forudsiger der sker i A2- og B2-scenarierne. Hvis sommernedbøren i et varmere klima i højere grad vil falde som nogle kraftige hændelser, med længerevarende tørkeperioder imellem, må det forventes, at vandløbsafstrømning specielt på Sjælland vil blive påvirket af tørkeperioderne. Ved anvendelse af delta change metoden antages det, at dynamikken i nedbør er som i den nuværende periode, dvs. antallet af regnvejrsdage er det samme, forholdet mellem store og små nedbørshændelser er det samme, etc., og ændringerne i nedbørsdynamik vil derfor ikke bliver beskrevet. Hvis disse effekter skal kvantificeres, er det nødvendigt at benytte den såkaldte direkte metode, hvor klimamodellens resultater benyttes mere direkte som input til den hydrologiske model.

På figur 45 ses hvordan den totale vandløbsafstrømning ved station 59.01 fordeler sig på grundvandstilstrømning, drænafstrømning og overfladevandsafstrømning. Til forskel fra Vestjylland er grundvandstilstrømningen den mindste af de tre komponenter og er reelt uden betydning for den totale afstrømning. Resultatet afspejler til dels modellens problemer med at repræsentere småskalastrukturer såsom grøfter og små vandløb. Det må derfor forventes, at den reelle grundvandstilstrømning er større end resultaterne viser, mens drænafstrømningen, som er den dominerende afstrømningskomponent, er overestimeret. Resultaterne kan imidlertid benyttes relativt i sammenligningen med afstrømningsfordelingen fra Vestjylland. Drænafstrømningen øges i fremtidsscenarierne om vinteren og reduceres kraftigt i perioden august-november.



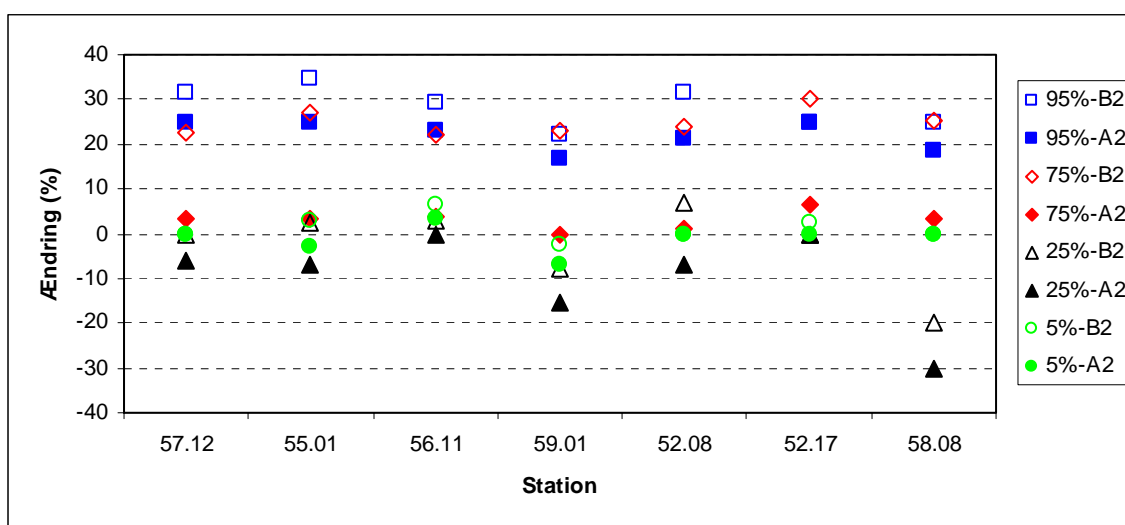
Figur 42 Månedlige middelvandføringer for nutidsscenarioet (x), A2-scenariet (◆) og B2-scenariet (□) hvor grundvandsindvinding ikke er inkluderet.



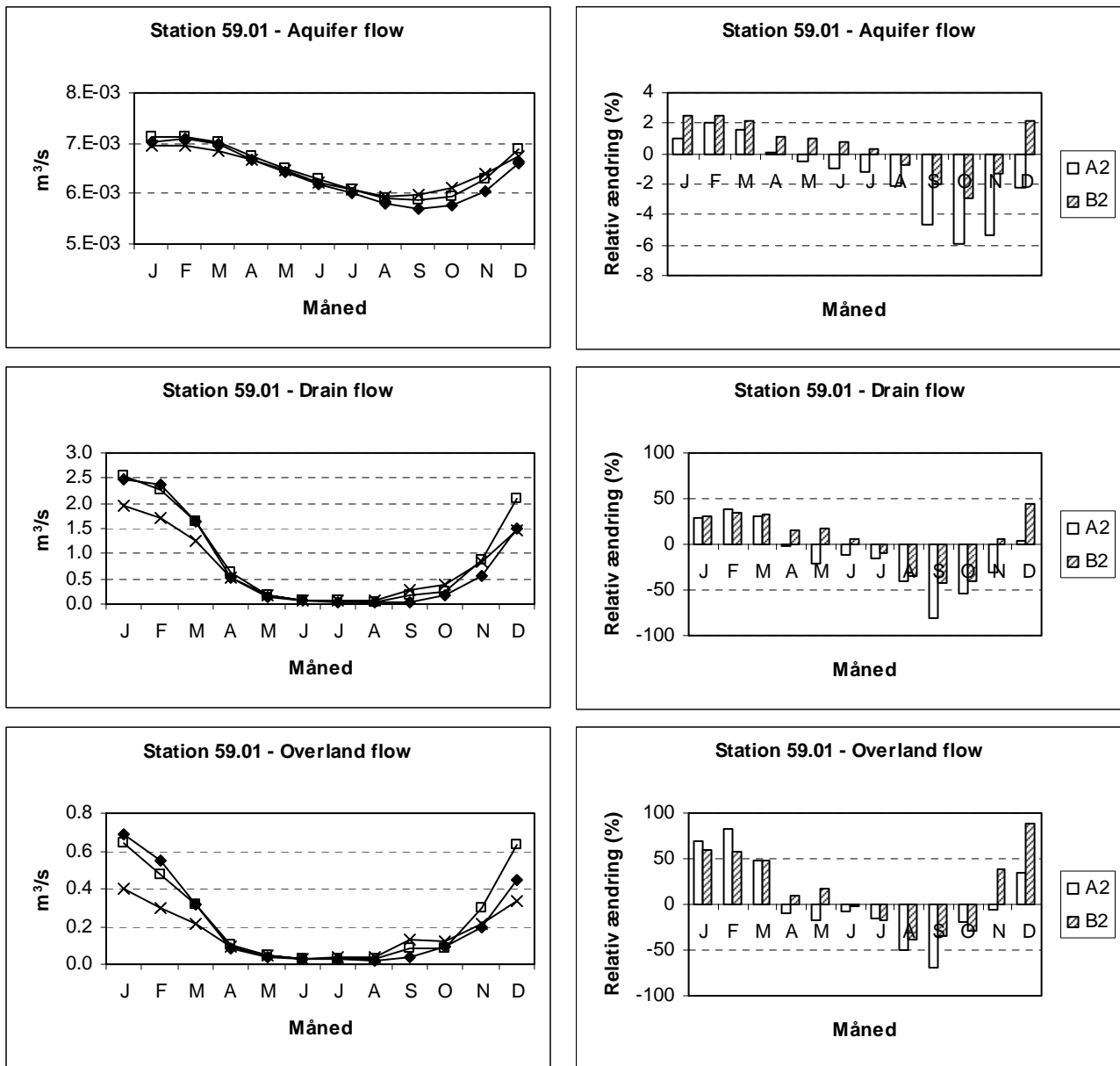
Figur 43 Relativ ændring i månedlig middelvandføringer for A2-scenariet og B2-scenariet (grundvandsindvinding ikke inkluderet).

Tabel 19 Udvalgte fraktil-værdier (m³/s) nutids-scenariet for vandføringsstationer på Sjælland (ingen grundvandsindvinding).

Station	Fraktil-værdi			
	5%	25%	75%	95%
57.12	1,5	1,7	8,4	20,1
55.01	0,34	0,44	2,95	7,2
56.11	0,30	0,36	2,7	6,5
59.01	0,085	0,13	1,3	3,6
52.08	0,11	0,14	0,79	1,9
52.17	0,079	0,09	0,63	1,6
58.08	0,005	0,01	0,59	1,6



Figur 44 Relativ ændring i fraktil-værdier for afstrømningsstationer på Sjælland for A2- og B2-scenarierne.



Figur 45 Totalafstrømningen fra station 59.01 opdelt på hhv. grundvandsafstrømning, drænastrømning og overfladevandsafstrømning.

5.5.2 Indvindingspåvirket tilstand

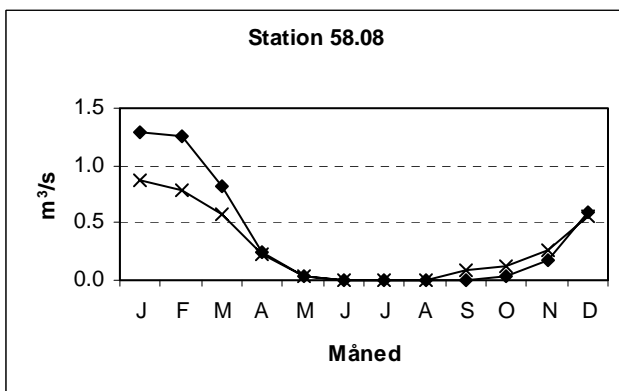
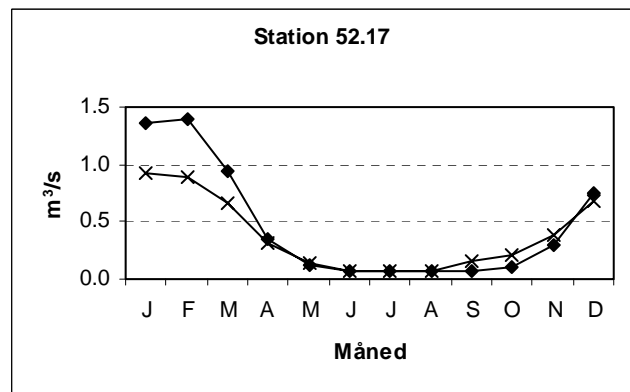
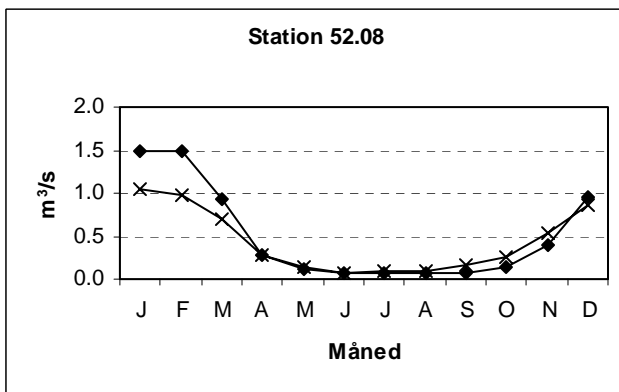
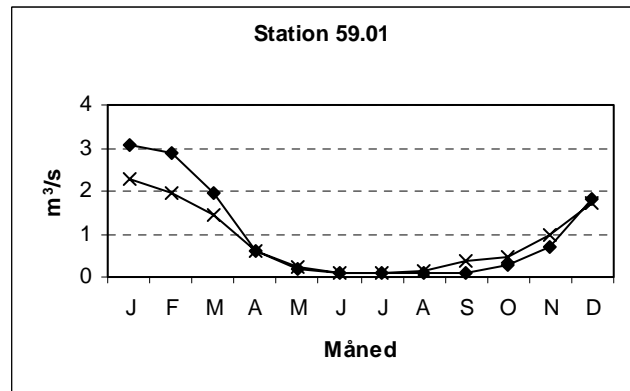
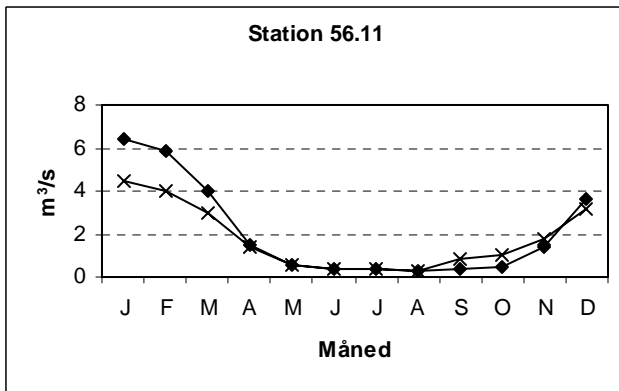
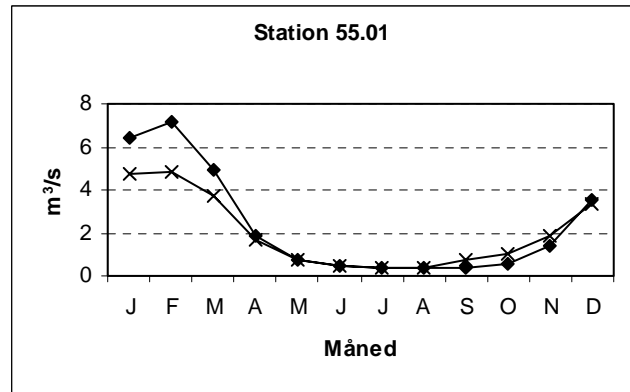
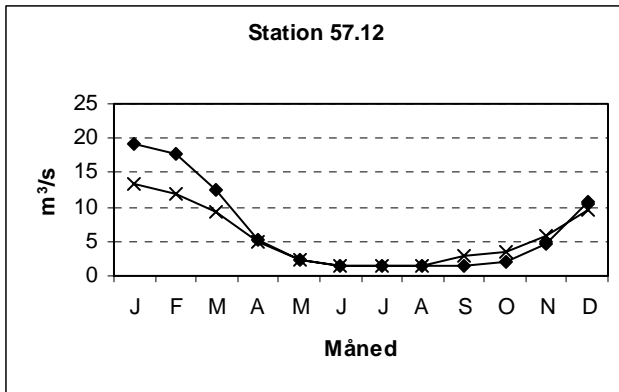
I tabel 20 er middelfafstrømningen i situationen med grundvandsindvinding præsenteret for nutids- og A2-scenarierne. Når grundvandsindvinding medtages i modellen reduceres middelfafstrømningen specielt for station 52.08 og 58.08 kraftigt (se også tabel 18), hvor afstrømningen falder med over 30%.

Tabel 20 Middelfafstrømning (m³/s) for de Sjællandske vandløb (med vandindvinding).

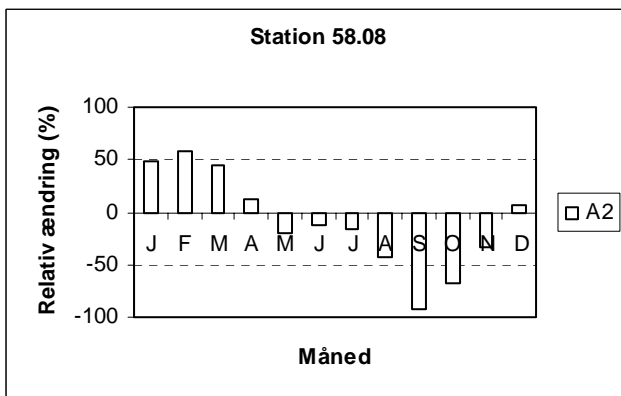
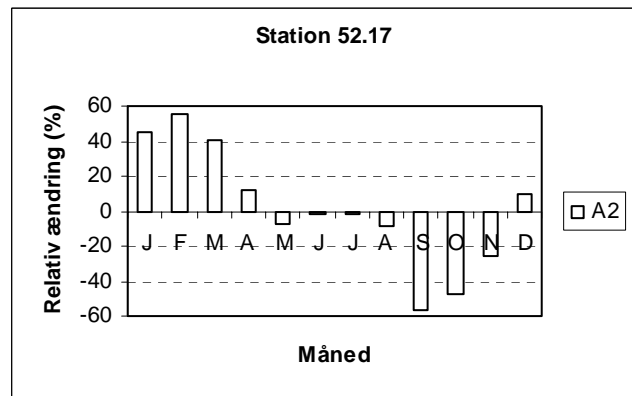
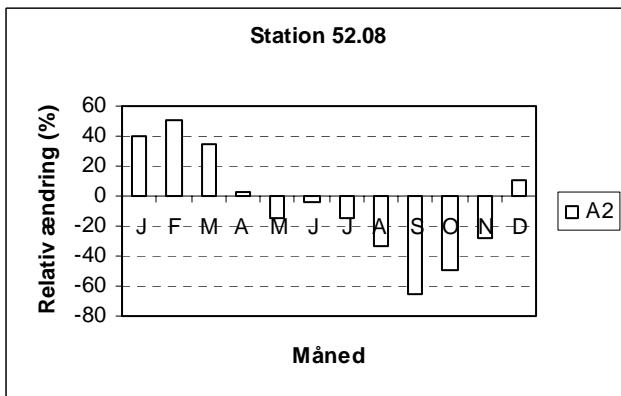
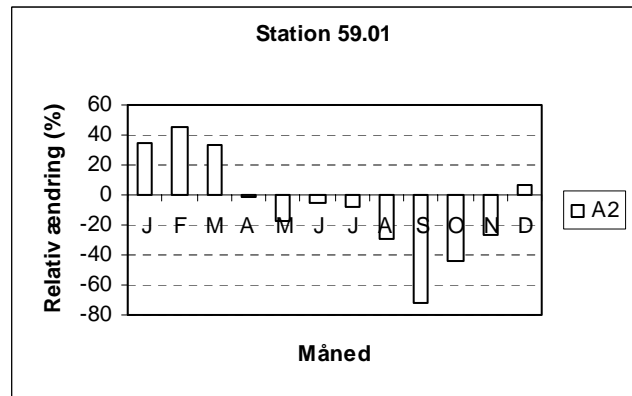
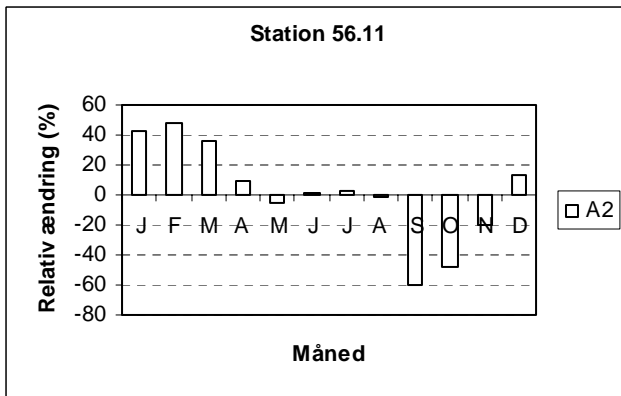
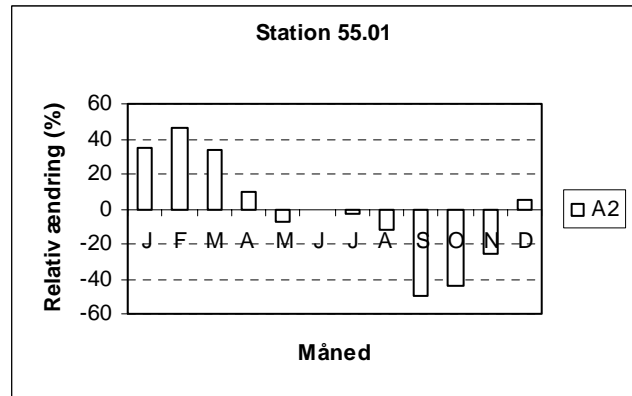
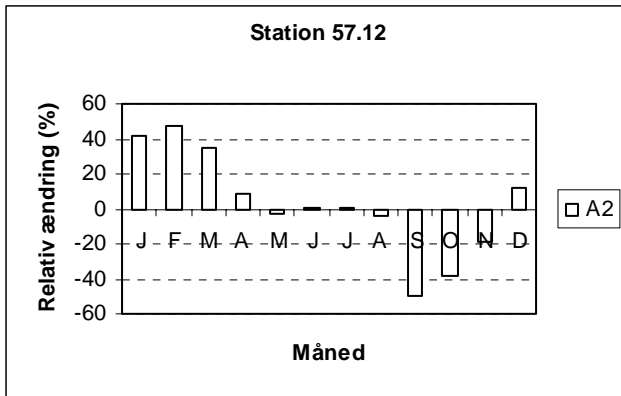
Scenarium	Vandføringsstation						
	57.12	55.01	56.11	59.01	52.08	52.17	58.08
Nu	5,7	2,0	1,75	0,87	0,43	0,38	0,29
A2	6,7	2,3	2,09	0,98	0,50	0,46	0,37

Mht. den relative ændring af afstrømningen over året, se figur 47, opnås imidlertid samme billede, som når analysen gennemføres uden grundvandsindvinding. Det samme gør sig gældende for 5%- og 25%-fraktilerne, som påvirkes relativt beskedent af, at indvindingen inkluderes i analysen (figur 48).

Effekten af hhv. grundvandsindvinding og klimaændringer på månedlige vandføringer ved station 59.01 er sammenlignet på figur 49. Figuren viser den relative forskel mellem afstrømningen i nutidsscenariet uden indvinding og (1) afstrømningen i nutidsscenariet med grundvandsindvinding og (2) afstrømningen i A2-scenariet uden grundvandsindvinding. Det ses, at grundvandsindvindingen resulterer i en jævn reduktion i vandløbsafstrømningen over året, mens klimaændringerne kun påvirker afstrømningen negativ om sommeren. Til gengæld har klimaændringerne betydeligt større indflydelse på sommervandføringerne end grundvandsindvindingen for station 59.01.



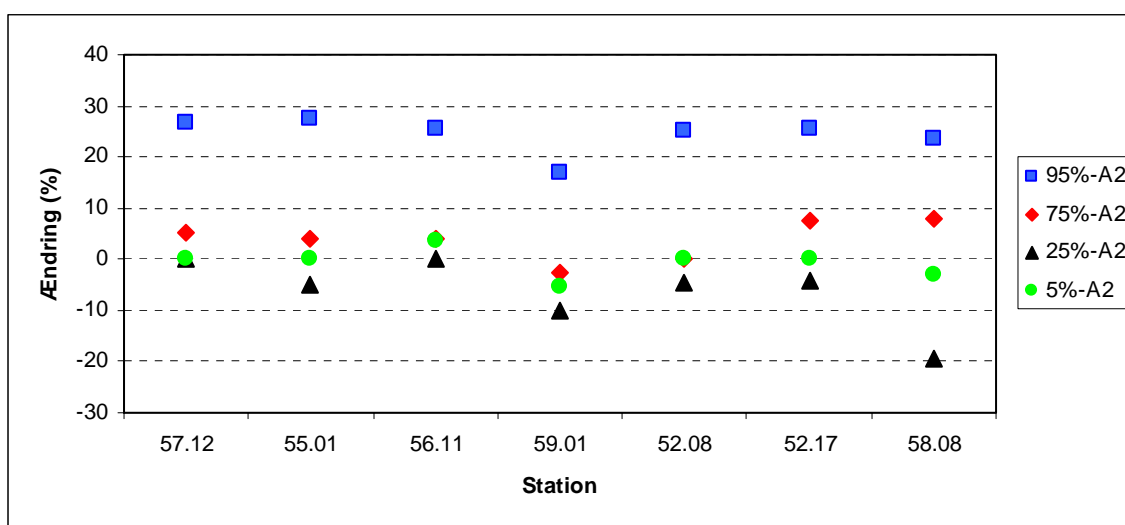
Figur 46 Månedlige middelvandføringer for nutidsscenariet (x) og A2-scenariet (♦) (grundvandsindvinding inkluderet).



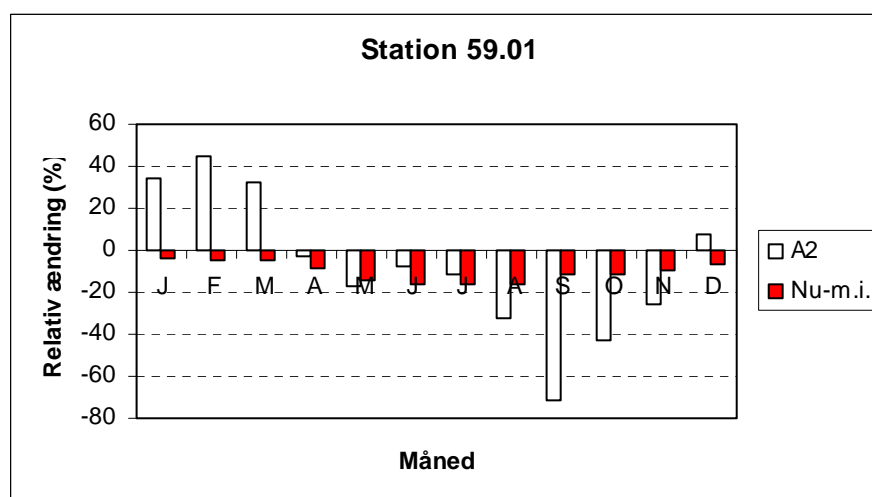
Figur 47 Relativ ændring i månedlig middelvandføring for A2-scenariet (grundvandsindvin-
ding inkluderet).

Tabel 21 Udvalgte fraktil-værdier (m³/s) for nutids-scenariet for vandføringsstationer på Sjælland (med grundvandsindvinding).

Station	Fraktil-værdi			
	5%	25%	75%	95%
57.12	1,3	1,5	7,6	19,2
55.01	0,31	0,41	2,82	6,9
56.11	0,27	0,33	2,59	6,3
59.01	0,072	0,101	1,20	3,45
52.08	0,051	0,064	0,61	1,60
52.17	0,060	0,070	0,53	1,46
58.08	0,0035	0,0057	0,38	1,40



Figur 48 Relativ ændring i fraktil-værdier for afstrømningsstationer på Sjælland for A2-scenariet (med grundvandsindvinding).



Figur 49 Relativ påvirkning af afstrømningen ved station 59.01 mellem nutids- og A2-scenariet uden grundvandsindvinding og mellem nutidsscenarioet hhv. uden og med grundvandsindvinding (Nu-m.i.).

5.6 Vandbalancer

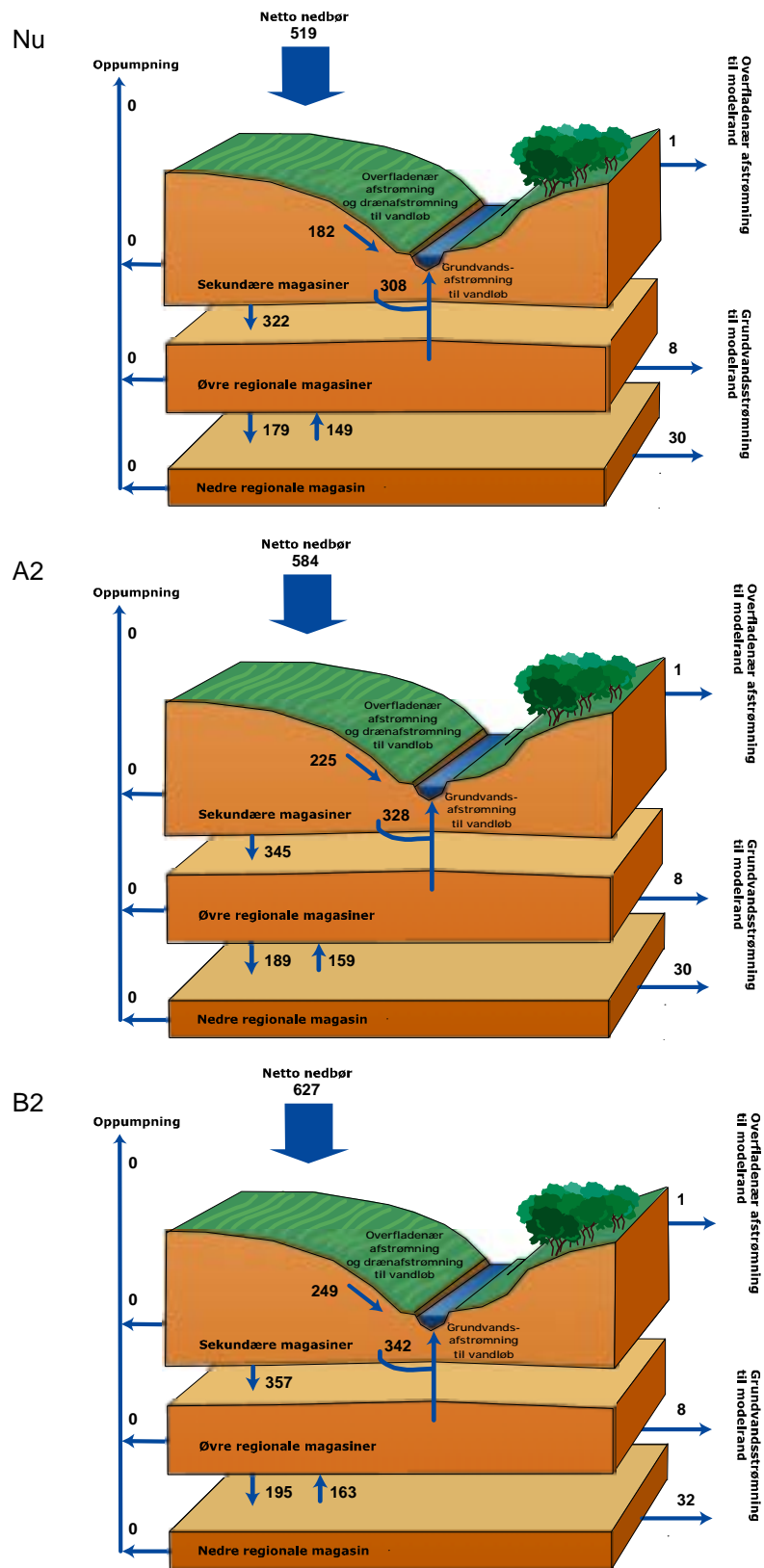
På figur 50 ses vandbalancen for Vestjylland for nutids-, A2- og B2-scenarierne uden vandindvinding. "Overfladenær afstrømning og drænvandsafstrømning" repræsenterer det vand, der strømmer til vandløb via dræn eller på jordoverfladen, "Sekundære magasiner" repræsenterer beregningslag 1, "Øvre regionale magasiner" repræsenterer beregningslag 2-4, og "Nedre regionale magasiner" repræsenterer beregningslag 5-16 (se figur 5 mht. beregningslagenes placering). Alle værdier repræsenterer årlige middelværdier for perioden 1990-2004.

Nettonedbøren stiger både i A2- og B2-scenarierne, men udstrømningen over modelranden (strømning til havet) er relativt uændret. Den øgede nettonedbør resulterer derfor i en forøgelse af vandløbsafstrømningen. I B2-scenariet stiger nettonedbøren med 108 mm/år i forhold til nutidsscenariet. Heraf strømmer ca. 2/3 af til vandløbene via dræn og overfaldenær afstrømning, mens 1/3 strømmer via grundvandet til vandløbene. Grundvandsdannelsen forøges markant, og der genereres en betydelig forøgelse af gennemstrømningen af både de øvre og nedre regionale magasiner. Der observeres de samme tendenser for A2-scenariet, om end de absolute ændringer er mindre.

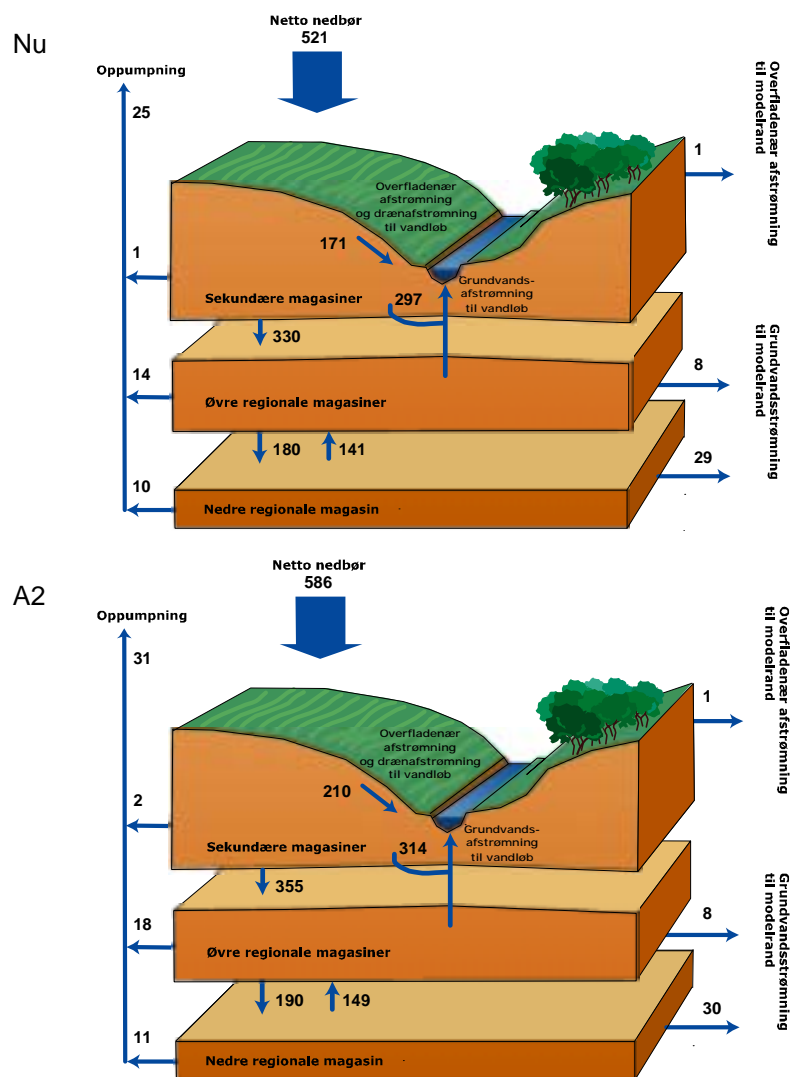
Vandbalancer for nutids- og A2-scenarierne med markvanding og grundvandsindvinding er vist på figur 51. Nettonedbøren øges i begge scenarier med et par millimeter, da noget af den tilførte markvanding siver ned til grundvandet. Grundvandsindvindingen øges i A2-scenariet mest i de øvre regionale magasiner, da markvandingen primært oppumpes herfra. Ellers ses samme tendenser som i situationen uden indvinding: Vandløbsafstrømningen øges markant og den største del af den øgede tilstrømning kommer fra dræn- og overfaldevandsafstrømning.

Vandbalancerne for Sjælland er vist på figur 52 og 53. Her repræsenterer de "Sekundære magasiner" beregningslag 1 og 2, de "Øvre regionale magasiner" udgøres af beregningslag 3-8, mens "Nedre regionale magasiner" består af beregningslag 9 (se figur 6 for placering af lag). Som for Vestjylland resulterer den øgede nettonedbør ikke i nævneværdige ændringer i afstrømningen til havet, og den øgede mængde vand strømmer derfor af via vandløb. I modsætning til Vestjylland har stigningen i nettonedbør næsten ingen effekt på grundvandsdannelsen (til det dybe grundvand), og der observeres derfor heller ikke signifikante stigninger i tilstrømningen af grundvand til vandløbene. Stigningen i nettonedbør resulterer næsten udelukkende i en forøgelse af afstrømning via dræn og overfladevandsafstrømning.

Når vandindvinding inkluderes, reduceres drænvandsafstrømningen betydeligt i forhold til situationen uden indvinding, og grundvandsdannelsen øges markant. Ellers findes samme effekter af den øgede nettonedbør som i situationen uden vandindvinding, hvor drænvandsafstrømningen stiger, mens de øvrige vandflukse er relativt upåvirkede.

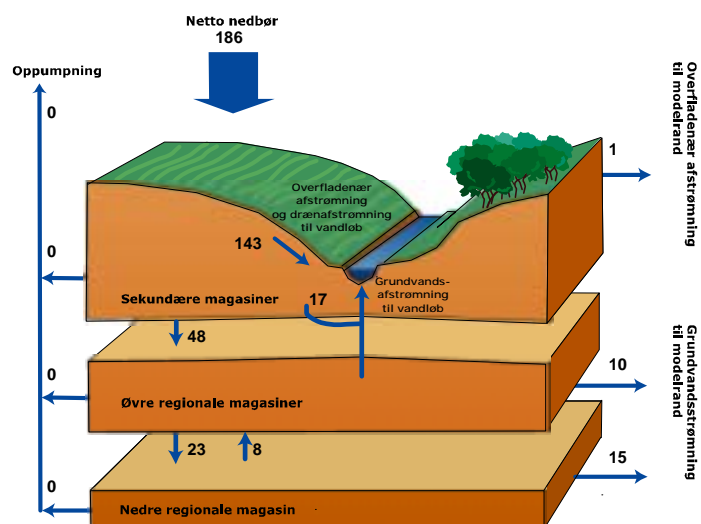


Figur 50 Vandbalancer for hhv. nutids-, A2- og B2-scenerierne i situationen uden indvinding for Vestjylland. Alle værdier i mm/år.

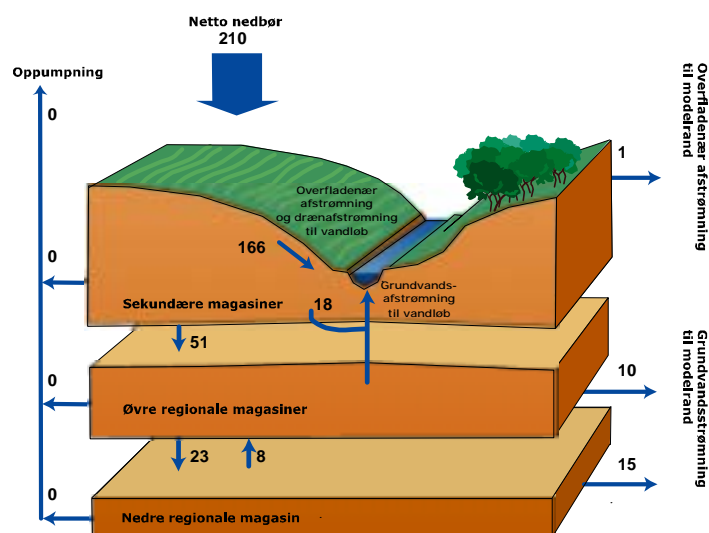


Figur 51 Vandbalancer for hhv. nutids- og A2-scenerierne i situationen med indvinding for Vestjylland. Alle værdier i mm/år.

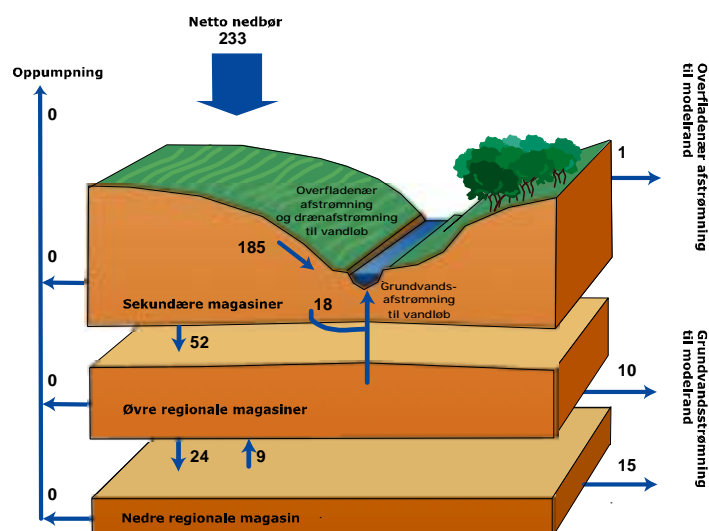
Nu



A2

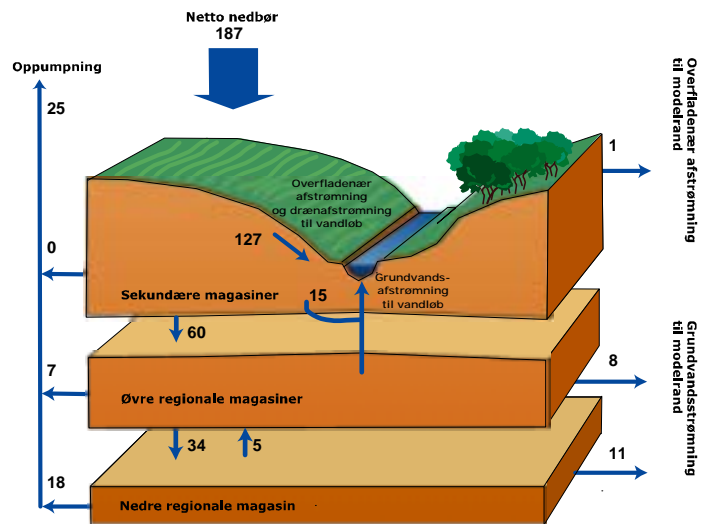


B2

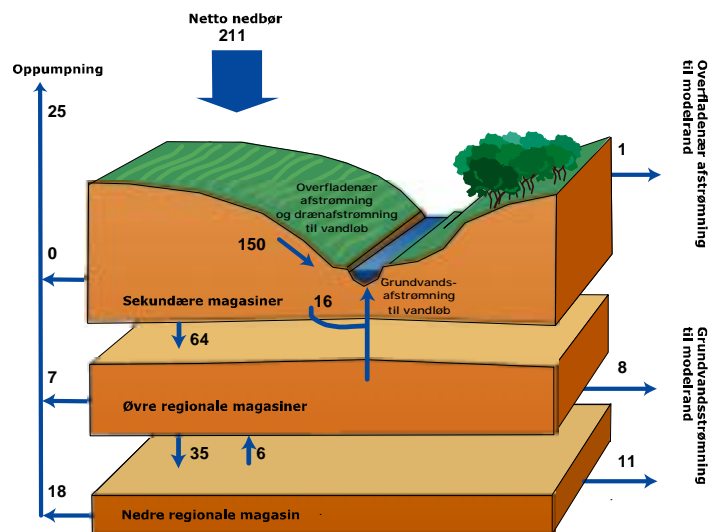


Figur 52 Vandbalancer for hhv. nutids-, A2- og B2-scenerierne i situationen uden indvinding for Sjælland. Alle værdier i mm/år.

Nu



A2



Figur 53 Vandbalancer for hhv. nutids- og A2-scenerierne i situationen med indvinding for Sjælland. Alle værdier i mm/år.

6 Konklusion

Der er i dette projekt foretaget en vurdering af effekterne af klimaændringer på det hydrologiske kredsløb i Danmark. På basis af klimamodelsimuleringer for emissionsscenario A2 og B2 er der genereret data for nedbør, temperatur og fordampning, der kan anvendes som input til den nationale vandressourcemodel, som den hydrologiske analyse er baseret på. Herved har det været muligt at kvantificere drivhuseffektens konsekvenser for vandkredsløbet i Danmark, herunder betydningen for grundvandsstand, grundvandsdannelse og vandløbsafstrømning samt de sæsonmæssige variationer i de nævnte størrelser. Der er foretaget analyser for både Vestdanmark og Østdanmark, idet de regionale forskelle i jordbund, geologi og nutidigt klima kunne forventes at resultere i regionale forskelle på konsekvenserne af klimaændringerne.

Direkte effekter af klimaændringer

For Danmark som helhed betyder klimaændringerne, at nettonedbøren stiger markant. Den største stigning findes for B2-scenariet, hvor den årlige nettonedbør stiger med 22% og 27% for hhv. Vestjylland og Sjælland. Det er umiddelbart overraskende, at B2-scenariet giver den største stigning i nettonedbør, da dette scenarium er baseret på den mindste emission af drivhusgasser. Det skyldes bl.a., at fordampningen er mindre i B2-scenariet end i A2-scenariet. Hvis de sæsonmæssige variationer i nettonedbør betragtes, slår effekten af de højere koncentrationer af drivhusgasser og dermed temperatur igennem i A2-scenariet. I sommerhalvåret, specielt august og september, findes der signifikant lavere nettonedbørsværdier, end resultaterne baseret på nutidsklimaet giver.

I Vestjylland betyder den lavere nettonedbør om sommeren, at rodzonen bliver mere tør, og at behovet for markvanding stiger markant. Til gengæld resulterer stigningen i middelnedtonedbør i, at grundvandsdannelsen og grundvandsstanden stiger. I B2-scenariet, som giver de største stigninger i grundvandsstanden, vil der i vinterhalvåret ske en stigning i grundvandsstanden på mere end 0,25 m i over 50% af området, og i næsten 10% af området vil grundvandsstanden stige med mere end 1 m.

Mht. vandløbsafstrømning viser modelberegningerne, at middelvandføringen stiger. Der er imidlertid store sæsonmæssige variationer i, hvor meget vandføringen ændres. For både A2- og B2-scenariet stiger den gennemsnitlige vinterafstrømning generelt med af størrelsesorden 30%, hvilket hovedsageligt skyldes en forøgelse af tilstrømningen via dræn, grøfter og andre terrænnære strømningsveje, som igen er en konsekvens af stigninger i grundvandsstanden. Desuden vil ekstremvandføringerne stige, idet der predikteres en forøgelse af 95%-fraktilen med ca. 30%.

Samlet viser analysen, at den tilgængelige vandressource øges i Vestjylland, og at der ikke umiddelbart kan forventes problemer med at efterkomme det nutidige vandbehov i fremtiden. Resultaterne tyder også på, at ådale og lavtliggende område vil være i fare for at blive uegnede til landbrug, da de vil være vandlidende en stor del af året. Desuden vil risikoen for oversvømmelser blive forøget som følge af større ekstremvandføringer.

På Sjælland vil de kraftigste effekter af klimaændringerne bestå i en markant forlængelse af perioden med lave vandløbsafstrømninger. Pga. reduktionen i middelvandføringen i august-oktober vil der i mange vandløb optræde sommerlignende vandføringer i af størrelsesorden to måneder mere end nu, svarende til at vandføringerne først stiger markant i november måned. Samtidig vil minimumsvandføringerne blive påvirket negativt. For de fleste af de analyserede vandløb findes der fald i både 5%- og 25%-fraktilerne.

Som for Vestjylland stiger vinterafstrømningen også markant på Sjælland, men for Sjælland er der tale om endnu større stigninger i månedsmiddelfafstrømningen på mellem 30% og 50% for begge fremtidsklimascenarier i januar-februar. Udtrykt ved 95%-fraktilen findes der

stigninger i maksimumsafstrømning på omkring 30% i B2-scenariet og 20-25% i A2-scenariet.

Grundvandsdannelsen til de dybe magasiner på Sjælland øges beskedent med nogle få mm om året. Tilsvarende påvirkes trykniveauet på Sjælland generelt kun ganske lidt af klimaændringerne. Der er tendens til lokale ændringer, hvor der på Nordsjælland findes stigende trykniveau, mens der flere steder på Sydvestsjælland ses faldende trykniveau. Der er imidlertid tale om relativt små forskelle mellem nutids- og fremtidsscenerierne.

Antagelser og simplificeringer

Det skal pointeres, at analysen, der er præsenteret i nærværende rapport, vil være påvirket i større eller mindre grad af en række problemer og antagelser, hvoraf de vigtigste er:

- De nuværende problemer med fastlæggelse af vandbalancen i Danmark betyder, at beregnet netto-nedbør er nedjusteret på baggrund af sammenligninger mellem simuleret og målt afstrømning for at opnå tilfredsstillende resultater med DK-modellen (det vil sige, at der er fortsat uløste problemer med vandbalancen i Danmark, bl.a. i hvilket omfang nedbøren skal korrigeres, når den falder som regn og fast nedbør, som følge af systematiske målefejl samt i hvilket omfang de målte fordampninger skal korrigeres for forskellige afgrøder, skov, vådområder osv.). Det antages i den gennemførte analyse at netto-nedbør beregnet på basis af de fremtidige klimainput skal nedjusteres tilsvarende, hvilket på den ene side må betegnes som værende usikkert, men på den anden side virker som den umiddelbart mest plausible antagelse.
- Den hydrologiske analyse af effekterne af fremtidens klima er baseret på den såkaldte delta change metode. Metoden er ikke i stand til at beskrive fremtidige ændringer i klimaets dynamik, som forventes at være præget af flere ekstreme stormhændelser med høje nedbørsintensiteter og vindhastigheder, eller øvrige ændringer i nedbørsmønstre og tidlig dynamik. I delta change metoden arbejdes der med en fastfrosset 'tidlig og rumlig dynamik'. Der er derfor risiko for (Graham et al., 2005), (1) at maksimumsvandføringer i vandløbene er underestimerede i den foreliggende analyse, og (2) at minimumsvandføringer om sommeren overestimeres, da det i den foreliggende analyse antages, at nedbøren falder forholdsvis jævnt fordelt over sommeren, mens den i fremtidsscenerierne vil have en tendens til at falde som enkelte kraftige nedbørshændelser adskilt af relativt tørre mellemliggende perioder.
- Det antages, at de regionale forskelle i den fremtidige udvikling af klimaet ikke har signifikant effekt på den gennemførte hydrologiske analyse. Der tages med andre ord ikke højde for, hvordan ændringer i nedbør, temperatur og fordampning kunne ændre sig 'rumligt' som følge af klimaændringer f.eks. i kystnære område i Vestjylland eller på Sjælland (dette indgår i et igangværende PhD studie).
- Ændringer i havniveau, som forventes at stige med op til ca. en meter i løbet af det enogtyvende århundrede, er ikke inkluderet i analysen. Det må derfor forventes, at grundvandsstanden specielt i kystnære egne af landet og langs lavtliggende vandløb underestimeres i den foreliggende analyse. Stigende havniveau må forventes at resultere i en opstuvning i vandløb med forøget risiko for oversvømmelser til følge og øgede forekomster af mere eller mindre permanente vådområder i ånære områder. Effekter af flere storme, der stuver vand op langs kyster og fjorde (f.eks. Roskilde fjord i situationer med nordvestenstorm), er ikke beskrevet i undersøgelsen.
- Den foreliggende analyse er gennemført med en model, som ikke tager hensyn til, at ændringer i grundvandsspejlets beliggenhed (stigende grundvandsspejl) vil påvirke størrelsen af aktuel fordampning pga. ændringer i vandtilgængeligheden. Der er derfor risiko for, at den aktuelle fordampning ikke estimeres korrekt i den foreliggende analyse. Dette har dels betydning for udstrækningen af de såkaldte vådområder (som har maksi-

mal fordampning året rundt), som vil stige, ligesom en reduktionen af den umættede zones tykkelse andre steder vil kunne give anledning til stigende 'kapilar opadgående' vandbevægelse og dermed fordampning (typisk i områder hvor umættet zone er begrænset til få meter).

- Ændringer i afgrødevalg som følge af ændrede vækstbetingelser samt ændringer i dyrkningspraksis, f.eks. reduktion af vækstsæsonens længde som følge af højere temperaturer og CO₂-koncentrationer, er ikke inkluderet i analysen. Det betyder, at både behovet for markvanding og estimeringen af aktuel fordampning formentlig er undervurderet, og at simuleringerne her er biased og ikke fuldt ud beskriver de mest sandsynlige scenarier (se Bresser et al., 2005).
- Der er i nærværende analyse ikke foretaget en grundig analyse af oversvømmelsesrisiko som følge af forøgede vandløbsafstrømningshændelser. En vurdering af oversvømmelse kræver en mere detaljeret beskrivelse af topografien, vandløbssystemet og øvrige overfladehydrologiske forhold, som pt. ikke er inkluderet i DK-modellen. Desuden kræver denne analyse, at der predikteres endnu mere realistiske vandstande i vandløbene, en anvendelse som DK-modellen ikke er kalibreret til (f.eks. er effekter af grøde og vandløbsvedligeholdelse ikke fuldt ud inddraget i modelopstillingen - modellen antager et konstant Manningtal for vandløb uden sæsonvariationer), og modellens resultater mht. ekstremvandstande i vandløb vil med den øjeblikkelige opsætning derfor være behæftede med betydelige usikkerheder (betydning af oversvømmelser af ånære arealer er heller ikke detaljeret beskrevet).
- Endelig er der ikke taget højde for, at de mere ekstreme afstrømningsforhold med forøget vinterafstrømning og længere perioder med lav sommervandføring vil kunne give anledning til kulturtekniske tiltag (dræning, kloakering, erosion, uddybning af grøfter, ændret vandløbsvedligeholdelse mv.), der vil kunne virke tilbage på en ændret fordeling af nettonedbøren mellem det, der strømmer overfladenært af og det, der siver ned til grundvandsmagasinerne.

Udover ovenstående usikkerheder og mangler i den hydrologiske analyse vil resultaterne være påvirket af usikkerhederne i klimamodellerne. Graham et al. (2005) viser bl.a., at valget af global atmosfærisk klimamodel har væsentlig indflydelse på de hydrologiske resultater. Samlet er resultaterne produceret i dette projekt og de heraf udledte konklusionerne behæftet med en betydelig usikkerhed, som der er et stort behov for at få kvantificeret og undersøgt nærmere.

Implikationer og perspektivering

De øgede middel- og maksimumsvandføringer i vandløb vil resultere i stigende risiko for oversvømmelser af lavtliggende områder. Generelt vil kystnære områder og ådale være truet af oversvømmelser, men specielt vil oplande der afvandes af vandløb der reguleres af frisluser, som åbner ved lavvande og lukker ved højvande, være truet (ATV, 2003). Generelt højere havniveau vil resultere i længere lukketider for sluserne, som i kombination med højere grundvandsstand og større vandløbsafstrømning vil føre til større opstuvning, større risiko for oversvømmelser og øget behov for aflastningsområder, hvor der kan fortages kontrollerede oversvømmelser. Dette vil naturligvis have implikationer for arealanvendelsen, idet eksempelvis landbrugsaktiviteter i disse områder vil blive stærkt begrænset. Det bør undersøges nærmere, hvilke arealer der er truet af afvandingsproblemer, så der kan tages højde for problemet i den fysiske planlægning.

De ændrede afstrømningsforhold vil også stille krav til vandløbenes fysiske udformning, som bør modificeres således, at effekterne af både lavere sommervandføring og højere vintervandføring tilgodeses.

På Sjælland giver de reducerede vandløbsafstrømninger i sommer- og efterårsperioden anledning til bekymring, og problemet kan muligvis blive forværret pga. antropogene tiltag. I 1989 besluttede folkettingen, at Danmarks skovareal skal fordobles indenfor de næste 80-100 år. Samtidig benyttes skovrejsning i forbindelse med beskyttelse af grundvandskvaliteten. Da fordampningen fra skovdækkede områder er betydeligt større end fra eksempelvis græsarealer (Ladekarl et al., 2005), er der risiko for, at skovrejsningen vil betyde, at minimumsvandføringen reduceres yderligere. Grundvandsindvinding bidrager til reduktionen i sommervandføringen, og det kan derfor blive nødvendigt at reducere indvindingstilladelser i områder, hvor minimumsvandføringerne bliver kritisk lav. Da den totale årlige nettonedbør øges, vil det være interessant at undersøge muligheden for at øge den tilgængelige ressource enten via etablering af overfladiske vandreservoarer eller via øget anvendelse af kunstig infiltration. I begge tilfælde vil vandforsyningen kunne sikres uden at vandløbsafstrømningen påvirkes negativt.

Den øgede nettonedbør om vinteren vil resultere i forøget udvaskning af næringsstoffer fra landbrugsarealer. På Sjælland vil langt den største del af den øgede nettonedbør strømme ned gennem rodzonen til de øverste grundvandsforekomster, hvor det via dræn vil strømme til vandløbene. Der vil derfor forekomme en betydelig øget gennemstrømning af de øverste jordlag i vinterperioden, hvilket må forventes at resultere i en forøget næringsstofudvaskning. For Vestjylland vil en større del af den øgede nettonedbør strømme via grundvandet til vandløbene. Også i dette tilfælde vil næringsstofudvaskningen forøges.

Der er risiko for, at ændringerne i grundvandssystemerne, som klimaændringerne afstedkommer, vil påvirke vandets strømningsveje fra jordoverfladen til eksempelvis kildepladser. Der anvendes i disse år store ressourcer på at kortlægge sårbarheden af de danske grundvandsforekomster med henblik på at iværksætte indsatsplaner, og der er derfor risiko for, at klimaændringerne resulterer i ændringer i placeringen af infiltrationsområder og indvindingsoplande til de eksisterende kildepladser. I værste tilfælde vil det kunne betyde, at de områder, der pt. beskyttes f.eks. vha. skovrejsning, ikke i fremtiden vil være relevante i forhold til sikring af vandkvaliteten ved de kildepladser, som indsatsen var iværksat for at beskytte.

Forskningsbehov

Hvis der skal tilvejebringes et bedre grundlag for at forudsige effekterne af de fremtidige klimaændringer er der en række forskningsbehov, som skal tilfredsstilles:

1. Der er et stort behov for at tilvejebringe et vidensgrundlag, som gør det muligt at reducere usikkerheden på den øjeblikkelige vandbalance i Danmark. De primære forskningsbehov findes i forbindelse med korrektion af målt nedbør. I en tid hvor klimaet er i konstant forandring, er det nødvendigt at etablere operationelle metoder til korrektion af nedbør, som afhænger af vindhastighed og temperatur ved den enkelte nedbørsstation. Mht. referencefordampning er der behov for at basere beregningen på et mere fysisk funderet grundlag end det som Makkink-formlen er baseret på. Der er ligeledes behov for at opnå konsensus om, hvor stor fordampningen fra skov er (hvor interceptionstab kvantificeres). Endelig er der et forskningsbehov i forbindelse med bestemmelse af aktuel fordampning.
2. Der er behov for bedre analyser af, hvilke arealer der vil blive vandlidende pga. øget grundvandsstand. I forhold til det nærværende arbejde vil denne analyse kræve, (a) at effekten af stigende havniveau kvantificeres, (b) at den hydrologiske models beskrivelse af terrænnær afstrømning og vandspejlsforhold (drænvandsafstrømning, overfladevandsafstrømning, grundvandsspejlets beliggenhed) forbedres, hvilket eventuelt betyder, at der skal benyttes en finere diskretisering end den, der pt. anvendes i DK-modellen (1 x 1 km), samt (c) at der anvendes en terrænmodel med høj opløselighed for at vurdere omfanget af vandlidende områder.
3. Der er behov for en bedre analyse af oversvømmelsesrisiko pga. højere maksimumsvandføring i områder med høj oversvømmelsesrisiko (f.eks. Sønderjylland). Analysen vil kræve

ve, (a) at der benyttes direct metoden i stedet for delta change metoden, (b) at den hydrologiske models beskrivelse af vandstande i floder og vandløb forbedres, (c) at der anvendes en flodmodel som inkluderer effekten af udstrømning til lavtliggende arealer (oversvømmelse), samt (d) at der anvendes en detaljeret digital terrænmodel.

4. Der er behov for en bedre analyse af minimumsvandføring i vandløb. Denne analyse vil kræve, (a) at der benyttes direct metoden i stedet for delta change metoden, (b) at den hydrologiske model udvides med en integreret og dynamisk beskrivelse af umættet zone og fordampning, (c) at der tilvejebringes realistiske estimater for markvandingsbehov i fremtiden.
5. Der er et behov for at inkludere realistiske scenarier for den fremtidige antropogene udvikling i perioden, som analysen dækker. Disse scenarier skal bl.a. kvantificere udviklingen i vandforbrug til industri og alm. vandforsyning, dyrkningspraksis og afgrødevalg i et klima med højere CO₂-koncentrationer og temperaturer, samt arealanvendelse fordelt på natur, skov, landbrug, og bymæssig bebyggelse.
6. Der er behov for at inkludere effekterne af klimatisk variabilitet i klimascenarierne. Som beskrevet i Thomsen (1993) optræder der naturlige svingninger i mængden af både sommer- og vinternefbør, og det vil være relevant at udnytte de historiske data for den naturlige klimatiske variabilitet i nedbør og temperatur i evalueringen af de fremtidige forhold.
7. Der er et stort behov for at få kvantificeret usikkerheden på hydrologiske prediktioner, som dem der er præsenteret i denne rapport. Der er ingen, som kender udviklingen i drivhusgasemission, og alene af den grund er der behov for at gennemregne effekterne af forskellige emissionsscenarioer (udover A2- og B2-scenarierne behandlet her). Derudover er der forskelle på prediktionerne fra forskellige regionale klimamodeller, ligesom der er forskel på forudsigelserne fra de enkelte regionale klimamodeller afhængig af, hvilken global atmosfærisk klimamodel der benyttes til etablering af randbetingelser.
8. På længere sigt er der behov for at analysere, hvilke tiltag der kan gøres for at modvirke de kraftigste effekter af klimaforandringerne, samt at få kvantificeret hvor stort potentiale de forskellige tiltag har på det hydrologiske system. Eksempler på tiltag inkluderer ændringer i vandløbsudformning, etablering af aflastningsområder til kontrollerede oversvømmelser, øget dræning, ændret arealanvendelse inklusiv skovrejsning, samt øget brug af kunstig infiltration. Der er desuden behov for at gennemføre opgørelser af den fremtidige bæredygtige vandindvinding, som både skal tage hensyn til klimaændringer samt afledte effekter såsom behov for øget markvanding.

7 Referencer

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J. (1986), An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, 61-77.
- Allen, R., J.L. Monteith, A. Perrier, L. Santos Pereira, & A. Segeren (1990), Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, Annex V: FAO Penman-Monteith formula, FAO, Rome, Italy.
- Allerup, P., H. Madsen, and F. Vejen (1998), Standardværdier (1961-90) af nedbørskorrekationer. Danish Meteorological Institute, Tech. Rep. No. 98-10, Copenhagen.
- Aslyng, H.C. & S. Hansen (1982), Water balance and crop production simulation. Hydro-technical Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 200 pp.
- Bresser, A.H.M., M.M. Berk, G.J. van den Born, L. van Bree, F.W. van Gaalen, W. Ligtoet, J.G. van Minnen, and M.C.H. Witmer (2005), The effects of climate change in the Netherlands, Netherlands Environmental Assessment Agency, 111 pp.
- ATV (2003), Effekter af klimaændringer – tilpasninger i Danmark, Baggrundsrapport, Akademiet for Tekniske Videnskaber, ATV, September 2003, 50 pp.
- Brouyere, S., G. Carabin, and A. Dassargues (2004), Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium, *Hydrogeology Journal*, 12, 123–134.
- Christensen, J.H., O.B. Christensen, P. Lopez, E. van Meijgaard & M. Botzet (1996), The HIRHAM4 regional atmospheric climate model, DMI Sc. Rep. 96-104.
- Christensen, O.B., & J.H. Christensen (2004), Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate, *Global and Planetary Change*, 44, 107-117.
- Christensen, N.S., A.W. Wood, N. Voisin, D.P. Lettenmaier, and R.N. Palmer (2004), The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin, *Climatic Change*, 62, 337–363.
- Christensen, B.S.B., H.J. Henriksen, & P. Nyegaard (2000), Status for arbejdet med DK-model Jylland, GEUS, København, http://www.vandmodel.dk/status_dk_model_jylland_3_00.pdf.
- EEA (2005), Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Europe, EEA Technical report no. 7/2005, European Environment Agency, 106 pp.
- Giorgi, F., P.H. Whetton, R.G. Jones, J.H. Christensen, L.O. Mearns, B. Hewitson, H. von Storch, R. Francisco, & C. Jack (2001), Emerging patterns of simulated regional climate changes for the 21st century due to anthropogenic forcings, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3317-3321.
- Graham, L.P., S. Hagemann, S. Jaun, & M. Beniston (2005), On interpreting hydrological change from regional climate models, submitted to *Climate Change*.
- Henriksen, H.J., & L. Trolborg (2003), Opgørelse af den udnyttelige ferskvandsressource, Kap. 3 i *Freskvandets Kredsløb*, Henriksen & Sonnenborg (eds.), NOVA 2003 Temarapport.
- Henriksen, H.J., L. Trolborg, P. Nyegaard, T.O. Sonnenborg, J.C. Refsgaard, & B. Madsen (2003a), Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark, *J. Hydrology*, 280, 52-71.
- Henriksen, H.J., L. Trolborg, A.L. Højberg, & P. Nyegaard (2003b), Konstruktion, kalibrering og validering af den nationale vandressourcemodel (DK-model), Kap. 8 i *Freskvandets Kredsløb*, Henriksen & Sonnenborg (eds.), NOVA 2003 Temarapport.

Hay, L.E., R.L. Wilby, and G.H. Leavesley (2000), A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States, *J. Am. Water Res. Ass.*, 36, 387-398.

Kinzelbach, W. (1986), *Groundwater modelling, An introduction with sample programs in BASIC*. Developments in Water Science, 25, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Kleinn, J., C. Frei, J. Gurtz, D. Luthi, P.L., Vidale, & C. Schar (2005), Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model, *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 110(D4), No. D04102.

Kriyanova, V., F. Hattermann, & A. Habeck (2005), Expected changes in water resources availability and water quality with respect to climate change in the Elbe River basin (Germany), *Nordic Hydrology*, 36(3-4), 321-333.

Ladekarl, U.L., K.R. Rasmussen, S. Christensen, K.H. Jensen, & B. Hansen (2005), Groundwater recharge and evapotranspiration for two natural ecosystems covered with oak and heather, *J. Hydrology*, 300, 76-99.

Loaiciga H.A., D.R. Maidment, and J.B. Valdes (2000), Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA., *J. Hydrol.*, 227, 173-194.

Nakicenovic, N., et al., (2000), *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 pp.

Nielsen, K., M. Stjernholm, B. Olsen Østergaard, D.-I. Müller-Wohlfeil, I.-L. Madsen, A. Kjeldgaard, G. Groom, H. S. Rolev, A.M. Hermansen, B. Skov-Petersen, H. Kvist Johansen, V. Hvidberg, M. Egholm, J. Jensen, V. Bacher & H. Larsen (2000), *Arealinformationssystemet, Danmarks Miljøundersøgelser*.

Ovesen, N. B., H. L. Iversen, S. E. Larsen, D.-I. Müller-Wohlfeil, L. M. Svendsen, A. S. Blicher & P. M. Jensen (2000), *Afstrømningsforhold i danske vandløb*, Faglig rapport fra DMU, nr. 340.

Payne, J.T., A.W. Wood, A.F. Hamlet, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier (2004), Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin, *Climatic Change*, 62, 233-256.

Plauborg, F., J.C. Refsgaard, H.J. Henriksen, G. Blicher-Mathiesen & C. Kern-Hansen, (2002), *Vandbalance på mark- og oplandsskala*. DJF-rapport 70, 45 pp.

Plauborg, F. & J.E. Olesen (1991), *Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingsstyring i landbruget*. Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Beretning nr. S2113, 103 pp.

Refsgaard, J.C., & B. Storm, (1995), MIKE SHE, In: Singh, V.P. (Ed.). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 809 - 846.

Scharling, M. (2001), *KLIMAGRID DANMARK - Sammenligning af potentiel fordampning beregnet ud fra Makkinks formel og den modificerede Penman formel*. DMI Technical Report 10-19, Trafikministeriet, Danmark.

Scharling, M. (1999), *KLIMAGRID - DANMARK, Nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning 20*20 & 40*40 km*, DMI Technical Report 99-12, Trafikministeriet, Danmark.

Shabalova, M.V., W.P.A. van Deursen, & T.A. Buishand (2003), Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model, *Climate Research*, 23(3), 233-246.

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

Thomsen, R. (1993), Future droughts, water shortages in parts of Western Europe, *Eos, Transactions, AGU*, 74(14), 161, 164-165.

Troldborg, L., & H.J. Henriksen (2006), *Optimering af DK-model for Københavns Energi*, GEUS rapport 2006/8.

Vanrheenen, N.T., A.W. Wood, R.N. Palmer, & D.P. Lettenmaier (2004), Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacramento–San Joaquin river basin hydrology and water resources, *Climatic Change*, 62, 257–281.

van Roosmalen, L., J.H. Christensen, M. Butts, K.H. Jensen, J.C. Refsgaard (2006), Climate data for a study on the effects of future climate change on water resources in Denmark, Conference proceeding for Nordic Hydrologic Conference 2006, 8 pp.