

Hydrologiske konsekvenser af historiske og fremtidige klimatiske ændringer i Vestjylland

Ida B. Karlsson, Torben O. Sonnenborg og Karsten Høgh Jensen

Der hersker stadig stor uenighed om, i hvilket omfang Jordens klima og dermed nedbør og temperatur vil ændre sig i fremtiden og med hvilken effekt. For at kunne vurdere indflydelsen af klimaændringerne er det relevant at undersøge de historiske klimaforandringer og hvilken indvirkning de har haft.

I denne artikel fokuseres på et område i Vestjylland, der består af oplandet til Skjern Å. Ved at analysere nedbørs- og temperaturændringer gennem de sidste godt 150 år belyses: 1. Hvor kraftige er de fremtidige klimaændringer, der forudsiges af klimamodellerne, i forhold til de historiske klimaændringer? 2. Hvilken effekt de historiske ændringer har haft, og dermed hvilken effekt der kan forventes i fremtiden? 3. I hvilken grad er der sket tilpasning til de historiske forandringer?

En af de største debattemner i dag er klimaændringer og deres indflydelse på menneskets levevilkår. Flere klimamodeller er udviklet for at forudsige, hvordan det fremtidige CO₂-indhold i atmosfæren påvirker klimaet. Ændringer i temperatur- og nedbørsregimet er her specielt interessante, fordi disse to komponenter har afgørende indflydelse på det hydrologiske kredsløb, og dikterer forudsætninger for levevilkår, drikkevandsressourcer og landskab. For at kunne vurdere i hvilken grad disse fremtidige klimaforudsigelser giver anledning til bekymring, er det nødvendigt at sætte scenarierne i perspektiv i forhold til tidligere klimaændringer. Det giver information om, hvordan ændringer er kommet til udtryk i det hydrologiske system, f.eks. i Skjern Å's vandføring, ligesom det giver information om, hvor kraftige de forventede klimaændringer er i forhold til tidligere, f.eks. hvor meget temperaturen er steget i de sidste 100 år i forhold til, hvad der forudsiges for de næste 100.

Her belyses den historiske klimaudvikling gennem de sidste ca. 150 år på basis af resultater fra et undersøgelsesområde omkring Skjern Å i Vestjylland med et areal på 1055 km² (Larsen et al., 2003; Ovesen et al., 2000). Skjern Å er Danmarks vandrigeste åsystem med en længde på 96 km og en middelvandføring på ca. 15 m³/sek ved Alergårde målestation. I undersøgelsesområdet er der flere klimastationer, hvor der

er indsamlet data om nedbør og temperatur tilbage i tiden. Området ved Skjern Å er valgt, fordi der her er oprettet et hydrologisk undersøgelsesområde i forbindelse med HOBE-projektet (www.hobecenter.dk) til undersøgelse af det hydrologiske kredsløb på stor målestok.

Den historiske klimaudvikling kan derefter kobles med fremtidige klimascenariers temperatur- og nedbørsudvikling. Til den fremtidige klimaudvikling er der i denne artikel valgt primært at fokusere på tre forskellige klimascenarier: A1B, A2 og B2. A2 scenariet har forøgelse af CO₂ på 500 ppm fra år 2000 til år 2100. B2 scenariet har lavere CO₂ forøgelse med 250 ppm over samme årrække. Disse to repræsenterer dermed henholdsvis en kraftig og en moderat CO₂-udledning i fremtiden (Sonnenborg et al., 2007). A1B-scenariet er et klimascenarium med mellemløje CO₂-værdier, og som ligger mellem de kendte A2 og B2 scenarier. Der er anvendt resultater fra den danske klimamodel HIRHAM for A2 og B2 scenarierne, mens der for A1B-scenariet benyttes resultater fra den hollandske klimamodel RACMO.

Ved kombination af historiske og fremtidige klimadata kan fremtidige ændringers effekt på det hydrologiske kredsløb vurderes ud fra det hydrologiske respons på de historiske klima ændringer.

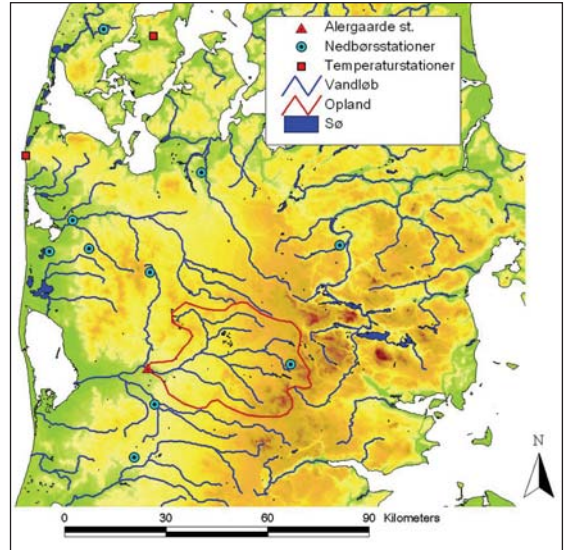
Datasættet

Temperatur er målt ved hjælp af et termometer opstillet i en ventileret afskærmning i to meters højde over jorden (Cappelen & Jørgensen, 2008). Der er anvendt resultater fra tre temperaturmålestationer, se figur 1 (den nordligste nedbørsstation har også fungeret som en temperaturmålestation). Her ses, hvordan temperaturstationerne ligger et godt stykke udenfor oplandet til Skjern Å. Det antages, at stationerne er repræsentative på trods af afstanden. For disse stationer er der månedlige temperaturdata tilgængelig tilbage fra 1873.

Nedbørsstationerne i området er opsat af Danmarks Meteorologiske Institut (Cappelen & Jørgensen, 2008), der påbegyndte indsamling af nedbørsdata i 1863. Der er udvalgt ti nedbørsstationer, der har månedlige nedbørsværdier, som strækker tilbage til år 1863, hvilket giver en kontinuerlig observationsperiode for månedsnedbør på knap 146 år. Stationernes placering kan ses på figur 1. Bemærk, at ikke alle stationerne ligger inden for oplandet til Skjern Å. Nedbørsmålinger er forstyrret af vind, fordampning, adhesion og regnfordeling omkring måleren. Dette resulterer i, at der registreres mindre nedbør, end der reelt er faldet. Derfor er en korrektion af nedbørsdata nødvendig. I denne undersøgelse er der begrænset viden om lætyperne for stationerne pga. de meget gamle tidsserier. Det er derfor antaget, at lætype B, der karakteriserer en moderat god lækategori med en årlig korrektion på 21 %, er repræsentativ for de udvalgte stationer. Der er en vis usikkerhed på denne antagelse, som ud over lækategori også inkluderer, at andelen af fast nedbør (sne og slud) antages at være konstant over observationsperioden.

Resultater: Historiske og fremtidige klimadata

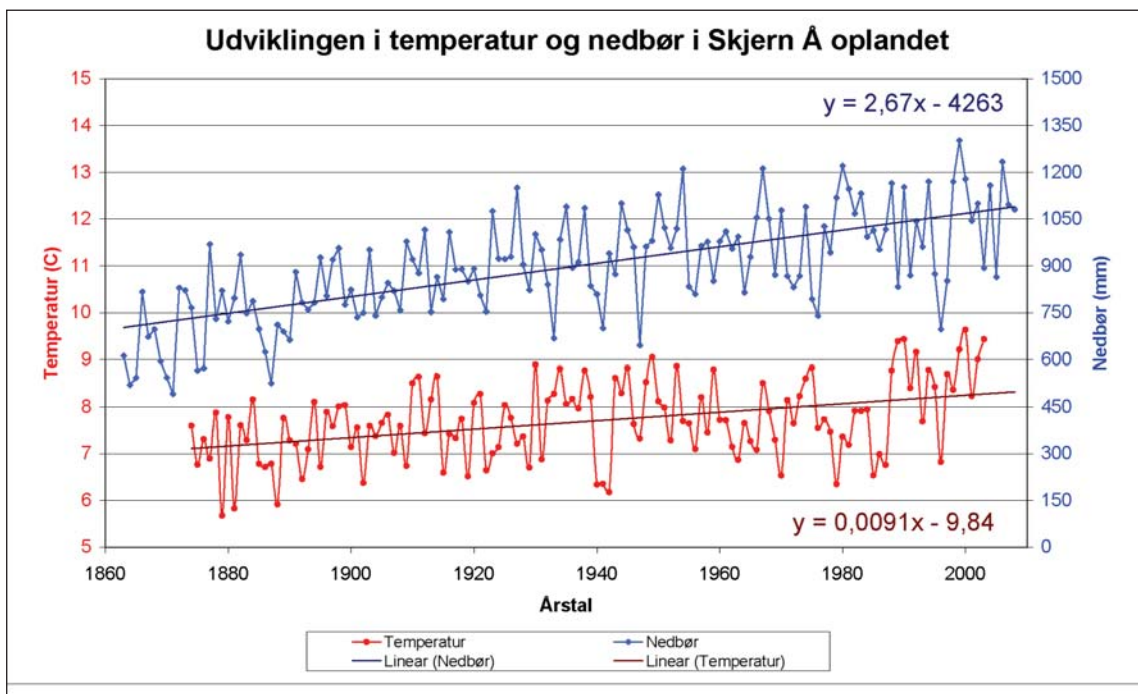
Udviklingen i årlig gennemsnitstemperatur og årlig nedbør udregnet som gennemsnit for klimastationerne i Skjern Å's opland ses på figur 2. Det ses her, at temperaturen har været svagt stigende i perioden. Der er sket en forøgelse i temperatur på 1,2°C på de godt



Figur 1. Kort over Skjern Å opland med angivelse af terrænhøjde, som går fra 170 m (rød) til havniveau (grøn), oplandgrænser, klimastationer og afstrømningsstation.

129 år, hvor hældningen af denne stigning er bestemt til 0,009°C pr. år. For den årlige nedbør i området ses også en stigende tendens svarende til 2,67 mm pr. år og en samlet forøgelse på 387 mm over hele undersøgelsesperioden. For at undersøge signifikansen af disse stigninger er der udført statistiske test på det historiske datamateriale. De klimatiske data er testet ved hjælp af et simpelt hypotesetest med et signifikansniveauet på 5%. Udviklingen i både nedbørs- og temperaturdata blev fundet til at være statistisk signifikante.

Det viser sig også, at nedbørsforøgelsen har en skæv fordeling over året, således at stigningen har været størst i vintermånederne, mens nedbøren er stort set uændret i sensommeren (figur 3). Analysen viser desuden, at stigningen i nedbør primært skyldes, at antallet af nedbørshændelser er forøget markant, mens der kun har været en ubetydelig stigning i intensiteten af de maksimale nedbørshændelser. Mht. temperatur er stigningen tilnærmelsesvis jævn over året.



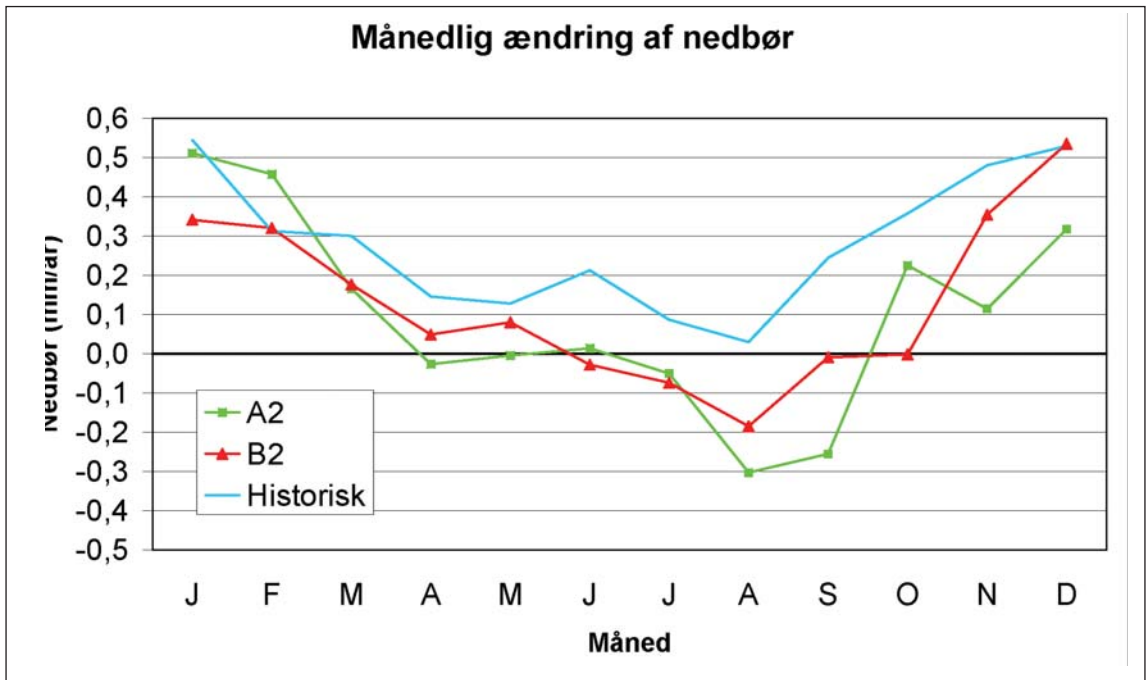
Figur 2. Historisk udvikling i nedbør og temperatur for området omkring Skjern i Vestjylland.

Hvad kan have forårsaget denne nedbørstigning? Man ved, at CO₂-indholdet først for alvor er begyndt at stige efter 1950, dermed kan det ikke være CO₂-ændringer i atmosfæren, der er den primære årsag. Klimamodellerne er bl.a. drevet af CO₂-koncentrationerne i atmosfæren og kan derfor ikke simulere den nedbørsforøgelse, der er registreret i historisk tid, på basis af CO₂-udviklingen. Seidenkrantz et al. (2009) har anført, at den opvarmning, der er sket i Danmark gennem de sidste 100-150 år, kan tilskrives en naturlig ændring i klimaet til dels forårsaget af ændringer i havstrømme. Det har betydet, at klimaet har været præget af stærke vestenvinde, som har ført varm luft til Danmark specielt om vinteren.

I de fremtidige klimascenarier forudsiges der ligeledes en forøgelse af nedbør og temperatur. Simuleringsresultatet fra de tre klimascenarier kan ses i tabel 1. Her ses, at A1B-scenariet forudsiger en nedbørsforøgelse på

0,99 mm/år, svarende til en forøgelse på 99 mm på 100 år. Det betyder, at der ifølge dette scenarium vil forekomme betydelig mindre nedbørsforøgelse i fremtiden, end hvad der er observeret i de foregående 100 år. Modsat forudsiger klimamodellen en større forøgelse i temperatur nemlig 0,023 °C pr. år, hvilket er en over dobbelt så stor stigning sammenlignet med de historiske data. Klimamodellerne viser også en sæsonvariation i nedbørsforøgelse med en kraftig stigning i vinternedbør og en formindsket eller uændret nedbør om sommeren, se figur 3.

A1B-scenariet er, som tidligere nævnt et scenarium med mellemløje CO₂-emissioner, og repræsenterer dermed en model, der ligger mellem de radikale fremtidsyn og de mere neddæmpende klimaforudsigelser. I tabellen kan der derfor også ses en sammenligning af nedbør- og temperaturstigning for to andre klimascenarier; A2 og B2 med henholdsvis kraftig og moderat CO₂-forøgelse. Her ses



Figur 3. Månedlig ændring i nedbør for klimascenarierne A2 og B2 samt for historisk data.

Table 1. Historisk og fremtidig stigning i nedbør og temperatur over 100 år

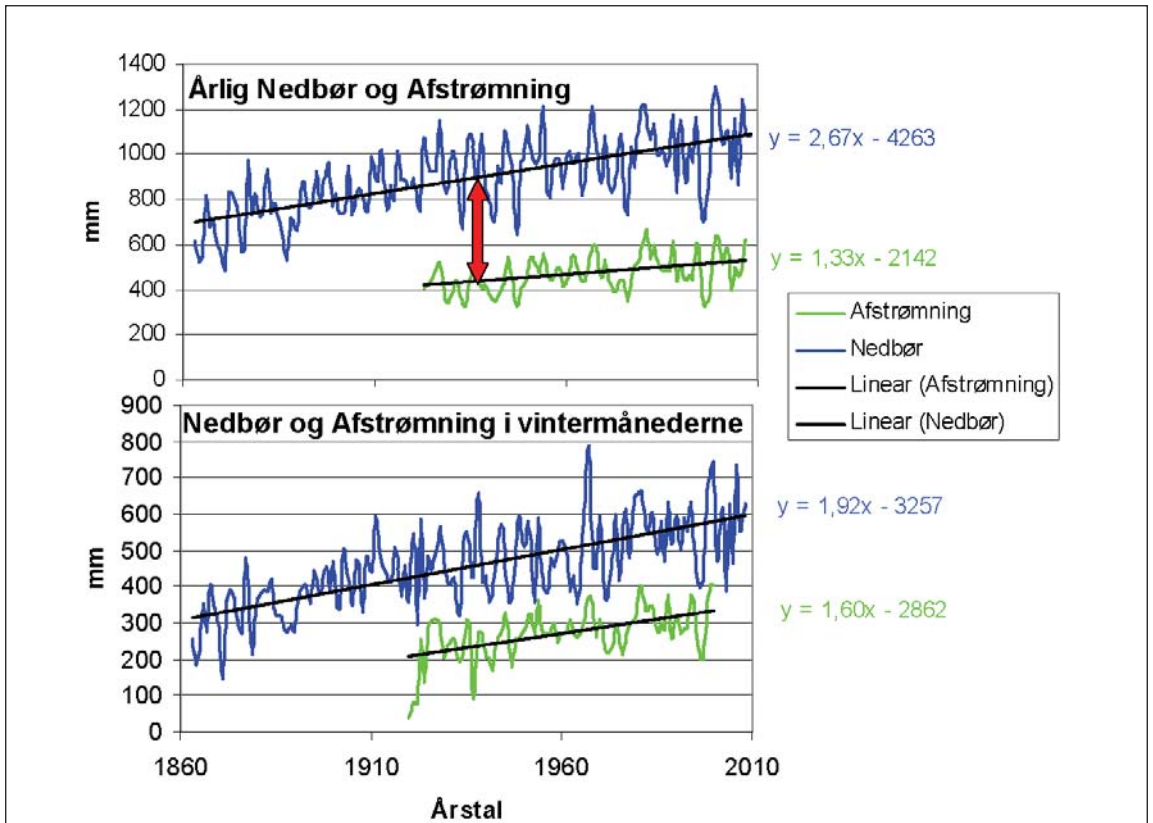
| | | Nedbørsdata | Temperaturdata |
|-------------------|---------------------------------------|-------------|----------------|
| Historisk datasæt | | 266 mm | 0,9 °C |
| Klimascenarium | A1B (Mellem CO ₂ -indhold) | 99 mm | 2,3 °C |
| | A2 (Højt CO ₂ -indhold) | 117 mm | 2,9 °C |
| | B2 (Moderat CO ₂ -indhold) | 155 mm | 2,1 °C |

den samme tendens som for A1B scenariet. Ingen af forudsigelserne giver nedbørsforøgelser, der er ligeså kraftige, som der er observeret i den historiske periode. Derimod viser begge scenarier betydeligt højere temperaturstigninger end for den historiske periode.

Diskussion: Hydrologiske konsekvenser
Udviklingen i temperatur og nedbør over de sidste 100 år forventes at have påvirket området's åsystem og udvikling. Sammenhængen mellem historiske ændringer i klima og det hydrologiske respons kan benyttes til at

perspektivere de fremtidige klimaændringers indvirkning på området.

Ændringer i vandløbsforhold kan registreres ved at analysere afstrømningen, der måles ved en hydrometrisk målestation. Afstrømningsdataet blev oprindeligt indsamlet af Hedeselskabet, der begyndte deres registreringer allerede i 1918 (DMU, 2003). For Skjern Å blev målestationen Alergårde igangsat i 1920 og der måles stadigvæk ved stationen. Placeringen af denne målestation kan ses på figur 1. På figur 4 øverst ses at den gennemsnitlige afstrømning er forøget med 133 mm over 100 år.



Figur 4. Nedbør og afstrømning fra Alergårde målestation; den røde pil markerer forskellen der skyldes fordampningen. Nederst – Det samme plot men kun for vintermånederne oktober, november, december, januar, februar og marts.

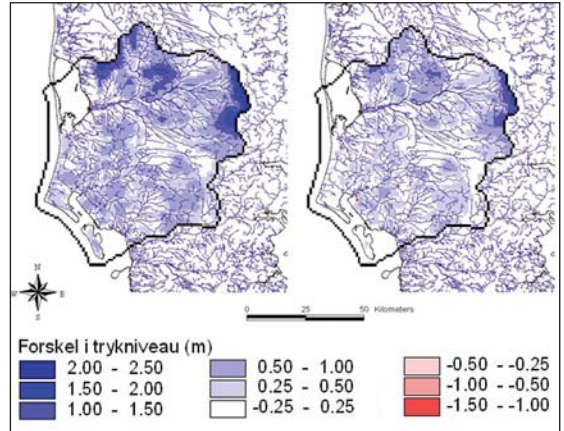
Som det ses af figur 4 er afstrømningen steget markant siden 1920. Denne stigning kan korreleres til forøgelsen i nedbør, da en stigning i nedbør vil medføre en kraftigere afstrømning. Det ses også af figuren, at stigningen i vandløbsafstrømning (1.3 mm/år) kun er halvt så stor som stigningen i nedbør (2.7 mm/år). Den resterende del af nedbørsstigningen må enten fordampe eller strømme via grundvandet ud af oplandet.

Stigningen i nedbør og afstrømning sker samtidig med en forøgelse i temperatur, der kan have ført til en forøgelse i fordampning, som formindsker afstrømningen. Afstrømningen vil også være mindre efter påbegyndelsen af kunstig vanding i 1970'erne. Desuden kan

stigningen i nedbør samt i antallet af nedbørshændelser, som nedbørsanalysen påviste, resultere i en forøget fordampning, dels pga. øget vandtilgængelighed, dels pga. forøget interceptionstab (fordampning direkte fra overfladen). Der er desuden sket en markant ændring af arealanvendelsen i Vestjylland gennem de sidste 100 år. Heden er blevet opdyrket, og der er anlagt nåleskovsplantager, som yderligere kan have påvirket både transpiration og evaporation. Fordampningsforøgelsen er sandsynligvis årsagen til, at afstanden mellem afstrømningskurven og nedbørskurven på figur 4 øverst bliver større over tiden, simpelthen fordi fordampningen gradvist er øget og afstrømningen dermed ikke forøges med samme hastighed som nedbøren.

Hvis denne slutning er korrekt vil afstanden mellem de to kurve ikke være forøget, hvis der udelukkende plottes vinterdata. Det skyldes, at vintermånederne har meget beskedne fordampning pga. lav temperatur. Derudover er både afstrømning og nedbør betydeligt større om vinteren end om sommeren og et eventuelt forøget fordampningssignal vil dermed være dæmpet. På figur 4 nederst ses et sådant plot. Afstanden mellem de to grafer, eller forskellen mellem deres hældning, er reduceret betydeligt i forhold til plottet med helårsværdier. Det indikerer, at en del af nedbørsforøgelsen er blevet opvejet af en stigende fordampning bl.a. på grund af temperaturforøgelse. Den resterende forskel kan skyldes en forøgelse i den ellers svage vinterfordampning eller at andre faktorer har spillet ind på afstrømningssignalet. I Skjern Å oplandet er der i observationsperioden foretaget ændringer på mange områder såsom vandindvinding, kloakering, dræning, vandløbsudretning eller -udbygning, som kan have påvirket det hydrologiske respons. Det er nødvendigt at opstille en hydrologisk model for den historiske periode for at kunne forklare, hvilke af disse ændringer der har haft størst effekt.

De fremtidige klimasimuleringer peger på, at udviklingen vil gå mod endnu større temperaturforøgelser, men knap så høje nedbørstigninger som i de tidligere 100 år. Baseret på den historiske udvikling vurderes den generelle stigning i nedbør at komme til udtryk som forøget vandføring i Skjern Å, hvilket også er bekræftet af hydrologiske beregninger (Sonnenborg et al., 2007), med stigende fare for oversvømmelser af omkringliggende marker i lavtliggende områder. Åen vil desuden nedroderes i højere grad og fordybe åløbet, samt forøge sedimenttransporten ud i Ringkøbing Fjord, hvilket vil kunne ændre levevilkårene for dyr ved udløbet. Temperaturstigningen vil medføre forøget fordampning og ændre planternes vilkår. Vandføringen vil sandsynligvis ikke stige i samme grad, som der er observeret de sidste 100 år, da nedbørsforøgelsen formodes at være mindre mens fordampningen drevet af forøget temperatur



Figur 5. Simulering af ændringen i grundvandsstand for klimascenarier B2 (Venstre) og klimascenarier A2 (Højre) (Sonnenborg et al., 2007).

vil være højere. Eller sagt med andre ord, et plot som det i figur 4 (øverst) vil vise en endnu større afstand mellem nedbør og afstrømning, da afstrømningen ikke vil stige i samme grad pga. den forhøjede fordampning.

Forskellen i vinter- og sommerafstrømning bliver endnu mere udtalt i fremtiden, da fordampningen forøges kraftigt om sommeren og nedbøren forhøjes om vinteren. De store sæsonudsving i afstrømning kan øge risikoen for udtørring af mindre vandløb om sommeren, og denne udtørring har stor indflydelse på økosystemerne. Udtørringen vil også influere på mængden af grundvandsindvinding, der kan tillades, da oppumpningen bliver nødt til at tage hensyn til forholdene i søer og vandløb. Omvendt vil det også kunne øge risikoen for oversvømmelser i ådalene, når den kraftigere vinter nedbør skal afstrømme.

Udover påvirkningen af vandløbsafstrømningen og fordampningen vil klimaændringerne også kunne påvirke grundvandsdannelsen. Det ville derfor være relevant at undersøge indvirkningen på grundvandet ud fra historiske observationer af grundvandsstanden i borer i området. Desværre er de tilgængelige målinger af grundvandsstanden vanskelige at anvende til dette formål. For det før-

ste findes der ingen kontinuerte tidsserier fra samme borer, der går mere end 30-40 år tilbage i tiden. Desuden er grundvandspejlingerne ofte påvirket af andre faktorer end de klimatiske, f.eks. grundvandsindvinding. Desuden varierer grundvandsstanden med årstiden og ændringer på få meter vil derfor være svære at registrere. De tilgængelige grundvandsstandsdata kan dermed ikke give noget entydig billede af en generel historisk udvikling for grundvandspejlet. Men det må forventes, at en vis del af nedbørsstigningen resulterer i en forøget grundvandsstand. En stigning af grundvandspejlet kan alt andet lige medføre, at lavtliggende områder bliver vandlidende og at der opstår søer i lavninger i terrænet.

Den fremtidige ændring i grundvandsstand kan ses i figur 5, beregnet ved hjælp af den nationale vandressourcemodel, DK-modellen, med input fra klimascenarierne B2 og A2 (Sonnenborg et al., 2007). Her ses, at B2-scenariet oplever de største grundvandstigninger, som især forekommer i de nordlige og nordøstlige dele af området, der oplever stigninger op til 2-2,5 m. Den centrale og den sydlige del oplever mindre forøgelse i størrelsesordenen 0,25-1 m eller mindre. A2-scenariet har samme fordeling af grundvandsstigning dog i mindre mængde, og i dette scenarium findes der enkelte steder, især mod sydvest, et fald i grundvandsstand. Forskellen mellem de to scenarier skyldes, at A2-scenarier har større temperaturforøgelse end B2 og derfor oplever forøget fordampning, og at nedbørsforøgelsen er 38 mm højere på 100 år i B2 i forhold til A2-scenariet. Den fremtidige udtørring af mindre vandløb pga. temperaturforøgelsen vil dermed til en vis grad blive opvejet af en buffereffekt som følge af den forøgede grundvandsstand i vinterhalvåret, mens oversvømmelse vil være udbredt i flere områder end tidligere specielt i nord-nordøst, hvor grundvandsstigningen er størst. Den historiske grundvandsændring vil sandsynligvis have haft et respons tæt på B2-scenariets dog med endnu større grundvandsstigning, da temperaturforøgelsen har været meget mindre.

Konklusion

Området omkring og ved Skjern Å har gennem de sidste 150 år været udsat for en række klimaforandringer, der har medført markante påvirkninger af de hydrologiske forhold. Nedbøren er forøget med 2,7 mm om året, hvilket har betydet, at vandføringen i Skjern Å er steget kraftigt og introduceret grundvandsstandsstigninger i oplandet. I samme periode er temperaturen desuden steget med 0,009 °C/år, hvilket har medført en stigning i aktuel fordampning. Skjern Å oplandet har også ændret sig med tiden, f.eks. er arealanvendelsen gået fra hedeland til landbrug og skovområder. Desuden er vandløbene blevet udrettet og uddybet, og omfattende dræning er blevet gennemført. Disse tiltag er sandsynligvis blevet foretaget som reaktion på den forøgede nedbør, der har resulteret i en intensivering af problemer med høj vandstand i ådale og lavtliggende områder, hvor der har været ønske om at udnytte arealerne til landbrug. Det er imidlertid interessant, at tilpasningen er sket løbende, uden at der tilsyneladende har været en lokal bevidsthed om de klimatiske ændringer.

De ændringer, der forventes i fremtiden ligner de historiske ændringer. Nedbøren stiger om vinteren af samme størrelsesorden som set indenfor de sidste 150 år, mens der om sommeren forventes en reduktion, hvilket ikke har været set før. Dette forventes at resultere i stigende vandløbsafstrømning, stigende grundvandsstand, vandlidende lavtliggende områder samt større sæsonvariation for både vandløbsafstrømning og grundvandsstand. Sammen med relativt kraftige stigninger i temperatur kan det forventes, at der vil ske ændringer i økosystemet i Skjern Å området pga. problemer med vandlidende områder, udtørings- og oversvømmelsesfare, sedimenttransport og forandret temperaturregime.

Dog har det vist sig, at de historiske ændringer, der for nedbør synes at være endnu større end i fremtidens scenarier, på trods af store hydrologiske effekter tilsyneladende er passeret udramatisk, og at mennesker løbende

har formået at tilpasse sig klimaændringerne i området og imødegået de øgede vandmængder med bl.a. forøget dræning. Spørgsmålet er om fremtidens ændringer kan passere ligeså ubemærket; vil man kunne tilpasse sig de kommende klimaændringer lige så gnidningsløst eller er det moderne menneske mindre villig til at rykke bebyggelse og følge med ændringerne?

Referencer

Cappelen, J. & Jørgensen, B. V. 2008. Dansk vejr siden 1874 – måned for måned med temperatur, nedbør og soltimer samt beskrivelser af vejret – with english translations. Technical Report 08-02, 1-10.

DMU 2003. Teknisk anvisning for gennemførelse og beregning af vingemålinger. Danmarks Miljøundersøgelser tekniske anvisninger, 1-14.

Kronvang, B., Andersen, H.E., Larsen, S.E. & Ovesen, N.B. 2006. Vil fremtidens klima føre til udtørrede bække, oversvømmende enge og stigende tab af næringsstoffer fra marker. ATV møde: Klimaændringers betydning for vandkredsløbet, 1-10.

Larsen, S.E., Kronvang, B. & Ovesen, N.B. 2003. Udviklingen i vandafstrømningen og nedbøren i Danmark de seneste 85 år. Faglig rapport fra DMU 470, 1-12.

Ovesen, N.B., Iversen, H.L., Larsen, S. E., Müller-Wohlfeil, D., Svendsen, L.M., Blicher, A. S. & Jensen, P.M. 2000. Afstrømningsforhold i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU 340, 1-86.

Seidenkrantz, M-S, Kuijpers, A. & Schmith, T., 2009. Når klimaet bryder mønstret – naturlige og menneskeskabte ændringer. Geologisk Nyt 5, 28- 32.

Skov- og naturstyrelsen 2009. Skjern Å – Danmarks største naturgenopretning. Sidst besøgt den 1. juli 2009 nationalparker.skovognatur.dk/Skjern/Omraadet/

Sonnenborg, T.O., Christensen, B.S.B. & Van Roosmalen, L. 2007. Klimaændringer - påvirkninger af grundvand og vandløb. GeologiskNyt 7, 16-19.

Thomsen, R. & Thøgersen, C. 1986. Klimasvingninger og konsekvenser for vandressourcens størrelse. Vandteknik 6, 199-208.

Om forfatterne

Ida B. Karlsson, Geologistuderende, Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet, idas_mail@yahoo.com

Torben O. Sonnenborg, Seniorforsker, Hydrologisk Afdeling, GEUS, tso@geus.dk

Karsten Høgh Jensen, Professor, Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet, khj@geo.ku.dk