

Vandbalance i Danmark

Vejledning i opgørelse af vandbalance ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010

Jens Christian Refsgaard, GEUS

Simon Stisen, GEUS

Anker Lajer Højberg, GEUS

Martin Olsen, GEUS

Hans Jørgen Henriksen, GEUS

Christen Duus Børgesen, DJF-AU

Flemming Vejen, DMI

Claus Kern-Hansen, DMI

Gitte Blicher-Mathiesen, DMU-AU

Indholdsfortegnelse

Forord	4
Sammendrag	6
Symbolliste	9
1. Baggrund og formål	11
1.1 Motivation	11
1.2 Formål med Vandbalanceprojekt2010	13
2. Metode	14
2.1 Generel metodik	14
2.2 Nedbør.....	16
2.2.1 Landsdækkende nedbørmåling.....	16
2.2.2 Korrektion for måletab i vandbalanceberegninger	16
2.2.3 Månedlige standard korrektionsværdier 1961-1990	17
2.2.4 Dynamisk nedbørkorrektion baseret på bedst tilgængelige data.....	18
2.2.5 Evaluering af dynamisk korrigeret nedbør for udvalgte stationer.....	20
2.3 Fordampning	21
2.4 Modelberegninger DK-model	21
2.4.1 Modelsystem – fordampning ved MIKE SHE's Two-layer modul.....	22
2.4.2 Modelopstilling.....	23
2.4.3 Modelkalibrering	28
2.5 Modelberegninger DAISY.....	30
3. Resultater	32
3.1 Korrigerede nedbørdata	32
3.1.1 Sammenligning for Ringkøbing Fjord oplandet (RKF)	32
3.1.2 Sammenligning for Sjælland (SJ).....	34
3.2 DK-model resultater	35
3.2.1 Kalibreringsparametre og modelkalibreringer	35
3.2.2 Kalibrering og validering af referencemodeller.....	39
3.2.3 Yderligere modelberegninger - følsomhedsanalyser	49
3.2.4 Yderligere modelvalideringer – våde, varme vintre.....	53
3.2.5 DAISY modelresultater.....	55
4. Konklusioner og anbefalinger	62
4.1 Konklusioner om resultater af vandbalanceundersøgelse	62
4.2 Konklusioner om vidensniveau	64
4.3 Anbefalinger ved anvendelse af data for perioden 1990-2010 til vandbalancestudier	65
5. Referencer	67
Appendix A: Følsomhedsanalyser af modelparametre	69

Forord

De fire forskningsinstitutioner DJF, GEUS, DMU og DMI udarbejdede i 2002 et sæt anbefalinger omkring brug af hydro-meteorologiske data til bestemmelser af vandbalancer i Danmark (Plauborg et al., 2002). Anbefalingerne var foreløbige og lagde op til yderligere belysning, når nye data og metodemuligheder forelå. Med igangsættelsen af forskningsprojektet HOBE (Jensen and Illangasekare, 2011; www.hobecenter.dk) i 2007 er der skabt mulighed for ny forskning og efterprøvning af metoder over en årrække. I den praktisk orienterede anvendelse af vandbalancemodellering i hele landet har der imidlertid vist sig behov for en revision af (Plauborg et al 2002), der ikke vil kunne afvente forskningsresultaterne fra HOBE.

I 2010 vurderede de fire institutioner situationen og initierede på den baggrund nærværende revurdering af de hidtidige anbefalinger. Projektet, benævnt "Vandbalanceprojekt2010", er gennemført under ledelse af GEUS. Projektets grundlæggende arbejde er baseret på egenfinansiering fra de fire institutioner, mens modelberegninger er støttet med midler fra grundvandsprogrammet (GRUMO) under det nationale overvågningsprogram NOVANA.

Projektgruppen bestod af:

- Jens Christian Refsgaard, GEUS (projektleder)
- Anker Lajer Højberg, GEUS
- Simon Stisen, GEUS
- Martin Olsen, GEUS
- Hans Jørgen Henriksen, GEUS
- Christen Duus Børgesen, DJF AU
- Flemming Vejen DMI
- Claus Kern-Hansen, DMI
- Gitte Blicher-Mathiesen, DMU AU

I forbindelse med projektet blev der nedsat en faglig følgegruppe bestående af repræsentanter fra miljøcentrene:

- Stefán Meulengracht Sørensen, Miljøcenter Ringkøbing, BLST (nu Naturstyrelsen Vestjylland)
- Dirk-Ingmar Müller-Wohlfeil, Miljøcenter Odense, BLST (nu Naturstyrelsen Odense)
- Clea Schneider, Miljøcenter Ribe, BLST (nu Naturstyrelsen Ribe)
- Jens Asger Andersen, Miljøcenter Roskilde, BLST (nu Naturstyrelsen Roskilde)

Projektgruppen mødtes til et opstartsmøde 12. august 2010 og til to workshops den 3. november og 13. december 2010 hvor resultaterne og konklusionerne blev diskuteret. På et

afsluttende møde den 14. marts 2011 blev et udkast til slutrapport diskuteret. Følgegruppen deltog i alle møder og workshops.

Sammendrag

Baggrund og formål

Selv om det kan forekomme paradoksalt, at vi ikke har styr på noget så elementært som, hvor meget det sner, regner og fordamper, er det en kendsgerning, at der er meget stor usikkerhed forbundet med at bestemme nettonedbøren og dermed vandbalancen. Korrekte vandbalancer er helt centrale for alle hydrologiske aktiviteter og af afgørende faglig betydning for en række forvaltningsmæssige beslutninger som fx overvågning af vandressourcens tilstand, vandplaner, udpegning af nitratsårbare grundvandsforekomster, kvælstofkredsløb, klimatilpasning og grundvandskortlægning.

Vandbalanceprojekt2010 er gennemført med det formål at udarbejde nye anbefalinger for, hvordan vandbalancen bør beregnes i forbindelse med vandforvaltning i Danmark. Det forventes, at anbefalingerne kan benyttes i en årrække som erstatning for Plauborg et al. (2002), indtil der kommer ny viden fra bl.a. HOBE projektet.

Metode

Undersøgelserne i Vandbalanceprojekt2010 er baseret på anvendelse af DK-model2009 på et vestdansk (Ringkøbing Fjord oplandet) og et østdansk (Sjælland) område. Der er opstillet forskellige hypoteser om nedbørkorrektion og potentiel fordampning, som er testet ved at anvende modellen på de to områder. Modelanvendelserne skete med brug af følsomhedsanalyse og invers modellering, hvorefter de optimerede parameterverdier og de beregnede værdier for aktuel fordampning blev vurderede med hensyn til, hvorvidt de var realistiske.

Konklusioner

Hovedkonklusionen er, at der kan opnås en god hydrologisk beskrivelse med hensyn til (i) vandbalance på oplandsniveau; (ii) trykniveauer i grundvandsmagasinerne; (iii) årstidsdynamik på vandføringer; (iv) fysisk realistiske parameterverdier; og (v) fysisk realistiske værdier for perkolation og aktuel fordampning, såfremt der benyttes følgende forudsætninger:

- Dynamisk korrektion af nedbør, foretaget enten på nedbørstationsniveau eller baseret på DMI's 10 km klimagrid.
- K_c for landbrugsafgrøder på 1,05 - 1,10 i vækstsæsonen.
- Referencefordampning beregnet med Makkink formlen uden korrektion på Sjælland og med en korrektionsfaktor på 0,95 i Ringkøbing Fjord oplandet.

Analyserne viste, at det afgørende for at opnå realistiske parameterestimer var anvendelsen af en dynamisk korrektion af nedbøren fremfor den standard korrektion, der hidtil har været anvendt i praksis. For de øvrige forudsætninger er det muligt at andre kombinationer ligeledes kan give gode hydrologiske beskrivelser. Men de bør i givet fald testes før de anvendes i praksis.

Den ny viden, der er opnået om de forskellige elementer i vandbalancen siden anbefalingerne i Plauborg et al. (2002), og som danner grundlag for analyserne gennemført i Vandbalanceprojekt2010, giver mere realistiske hydrologiske beskrivelser end Plauborg et al. (2002). Men der er stadig betydelige videnshuller, som fortsat bidrager med betydelig usikkerhed til beskrivelse af vandbalanceelementerne.

Anbefalinger

Undersøgelserne er baseret på anvendelse af DK-modellen. Det betyder ikke, at en god vandbalance kun kan opnås med denne model. Ved anvendelse af andre modelværktøjer er det af afgørende betydning at sikre sig, at den aktuelle fordampning beregnes således, at nettonedbøren har samme niveau som i DK-modellen. Anbefalingerne med hensyn til anvendelse af data fra perioden 1990-2010 til vandbalancestudier (hydrologisk modellering mv.) er:

- *Nedbørkorrektio*n
 - Nedbørkorrektio
n bør ske med dynamisk korrektio
n, dvs. korrektionsværdier som varierer fra dag til dag og fra den ene station eller klimagrid til det andet. - Der bør beregnes dynamiske korrektionsfaktorer på daglig basis for DMI's 10 km grid for perioden 1990-2010. Korrektionsfaktorerne bør ideelt set beregnes ud fra stationsdata med tilhørende stationsbaseret lækategor
i, som herefter interpoleres til 10 km grid.
- *Referencefordampning*
 - Referencefordampningen kan baseres på Makkink formlen.
 - Øst for Storebælt kan Makkink værdierne benyttes direkte, mens de vest for Storebælt bør korrigeres med en faktor 0,95.
 - Afgrødekoefficienterne K_c for landbrugsafgrøder i fuld vækst bør være 1,10 i vækstsæsonen.
- *Aktuel fordampning*
 - Ved modelberegninger med andre modeller bør den aktuelle fordampning ramme samme niveau på oplandsskala som resultater en ny DK-model version, der er opdateret og recalibreret for hele landet efter samme principper som slutresultatet i dette studie for Ringkøbing Fjord og Sjælland.
 - Den årlige skovfordampning bør for løvskov ligge på samme niveau som, eller op til 50 mm/år højere end, fordampningen fra vinterhvede som er velforsynet med vand, dvs. uvandet vinterhvede i Østdanmark og vandet vinterhvede i Vestdanmark. Nåleskov bør ligge 50-150 mm/år højere end løvskov.
 - Fordampningen fra tør natur bør ligge på samme niveau som fordampning fra uvandet græs i landbrugsområder.
 - Fordampning fra våd natur bør ligge 0-20% over niveauet for referencefordampning.
- *Parameteroptimering*
 - Parameteroptimering (invers modellering) bør ske ved anvendelse af objektivfunktioner der sikrer (i) god vandbalance; (ii) god dynamik i vandløbsafstrømning; og (iii) gode simuleringer af grundvandstrykniveauer.
 - Den fysiske realisme af de optimerede værdier for modelparametre bør vurderes.

- Den fysiske realisme af de simulerede værdier for aktuel fordampning og perkolation bør vurderes.
- Modelkalibrering bør i øvrigt følge Geo-vejledningen for god praksis i hydrologisk modellering (Refsgaard et al., 2010).
- *Vanding*
 - Modellers automatiske vandingsalgoritmer bør slås fra ved invers modellering (parameteroptimering), da modellerne ellers vil kunne ende med helt urealistiske vandingsmængder. Vandingsmængder og tidspunkter for oppumpning skal derfor eksplicit specificeres, hvis de har nævneværdig betydning.
- *DK-model2009*
 - DK-model2009 bør recalibreres baseret på anbefalingerne i nærværende rapport. Herved kan anbefalingernes anvendelighed for hele landet testes.
- *Andre hydrologiske modeller*
 - Andre hydrologiske modeller, fx DAISY, som benyttes til vandbalanceberegninger baseret på nærværende anbefalinger, bør recalibreres.

Symbolliste

Bypass	En del af nedbøren sendes direkte videre (bypasses) fra jordoverfladen til den mættede zone, selvom vandindholdet i den umættede zone er mindre end markkapacitet. Anvendes alene for strukturelle jorde (Sjælland model)
CF	Korrektionsfaktor for nedbør
DAISY	Rodzonemodell (Abrahamsen and Hansen, 2000)
Detention_Stor	Detention storage: Mængden af vand der skal akkumuleres på jordoverfladen før der genereres overfladisk afstrømning
Dræntid	Dræntidskonstant
Drændybde	Drænenes vertikal dybde
E_a	Aktuel fordampning
E_{ref}	Reference fordampning
E_{pot}	Potentiel fordampning ($E_{ref} * K_c$)
ET	Fordampning (evapotranspiration)
ET_deficit_frac	ET deficit fraction: Mætningsgraden, relativ til markkapacitet, hvorunder fordampningsraten fra den umættede zone starter med at blive reduceret som funktion af vandindholdet i jorden
ET-ext. depth	ET-extinction depth: Den samlede dybde, hvorfra vand kan fordampe fra den umættede zone i Two-Layer modulet i MIKE SHE, dvs. rodzonedybden samt den kapillære stighøjde
ET-surface depth	Dybde under rodzonen hvor der kan trækkes vand op fra, tilsvarende den kapillære stighøjde
F_Kalk	Multiplikationsfaktor for hydraulisk ledningsevne i kalk. Rumlig fordeling af hydraulisk ledningsevne er interpoleret ud fra feltdata. Under kalibrering optimeres på niveauet
K_c	Afgrødekoefficient
Kx_Ler1	Horisontal hydraulisk ledningsevne for Kvartært ler
Kx_Ler2	Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært glimmersilt/ler
Kx_Sand1	Horisontal hydraulisk ledningsevne for kvartært sand
Kx_Sand2	Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært kvartssand
Kx_Sand3	Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært glimmersand
Kx_Top_ler	Horisontal hydraulisk ledningsevne for ler i toplag
Kx_Top_torv	Horisontal hydraulisk ledningsevne for tørv i toplag
Kz_Ler	Vertikal hydraulisk ledningsevne for Kvartært ler
Kz_Mergel	Vertikal ledningsevne for Præ-kvartært ler/mergel

Kz_Top_Ler	Vertikal hydraulisk ledningsevne for ler i toplag
Kz_Top_torv	Vertikal hydraulisk ledningsevne for tørv i toplag
LAI	Bladarealindeks
Lækage Koef	Vandløbslækagekoefficient
Manning	Manningtallet, udtryk for ruhed
PEST	Softwareprogram til kalibrering af model
RKF	DK-model opland for Ringkøbing Fjord
RZD	Rodzonedybde
RZD_Season	Tidslig udvikling i rodzonedybde, modsat modelopsætning hvor rodzone- dybden antages at være konstant hele året
RZD_min	Minimumsrodzonedybde: Minimumsrodzonedybde for landbrugsafgrøder
SJ	DK-model opland for Sjælland
SS_Kalk	Det spændte magasintal (specifikke magasintal) for kalk
SS_Ler	Det spændte magasintal (specifikke magasintal) for ler
SS_Mergel	Det spændte magasintal (specifikke magasintal) for mergel
SS_Sand	Det spændte magasintal (specifikke magasintal) for sand
SZ	Mættet zone
SY_Kalk	Det frie magasintal (specifik ydelse) for kalk
SY_Mergel	Det frie magasintal (specifik ydelse) for mergel
SY_Sand	Det frie magasintal (specifik ydelse) for sand
SY_Ler	Det frie magasintal (specifik ydelse) for ler
SY_Top_Ler	Det frie magasintal (specifik ydelse) for ler i toplag
SY_Top_Torv	Det frie magasintal (specifik ydelse) for tørv i toplag
Threshold_inflt	Threshold for infiltration: Opmagasineret vand på jordoverfladen før der sker infiltration til UZ
UZ	Umættet zone
VBP	Vandbalanceprojekt (nærværende studie)
WBE	Vandbalancefejl (observeret vandføring minus simuleret vandføring)
WBE _{sommer}	Vandbalancefejl for sommermånederne juni-juli-aug
θ_{ACT}	Aktuelt jordvandindhold
θ_{FC}	Jordvandindhold ved markkapacitet
θ_S	Jordvandindhold ved vandmætning
θ_{WP}	Jordvandindhold ved visnegrænse
K_{inf}	Infiltrations kapacitet i den umættede zone

1. Baggrund og formål

1.1 Motivation

Selv om det kan forekomme paradoksalt, at vi ikke har styr på noget så elementært som, hvor meget det sner, regner og fordamper, er det en kendsgerning, at der i øjeblikket er meget stor usikkerhed forbundet med at bestemme nettonedbøren og dermed vandbalancen. Korrekte vandbalancer er helt centrale for alle hydrologiske aktiviteter og af afgørende faglig betydning for en række forvaltningsmæssige beslutninger som fx:

- *Overvågning af vandressourcen's tilstand.* Mange elementer i vandressourcen, herunder perkolation fra rodzonen og grundvandsdannelsen til dybere grundvandsmagasiner, kan ikke direkte måles, men skal beregnes. Hvis der er fejl i opgørelserne over enkelte af vandbalancens elementer, vil disse fejl forplante sig til andre elementer, og vi vil opnå et fejlagtigt billede af, hvor meget vand der er til rådighed i de forskellige dele af vandkredsløbet.
- *Vandplaner.* Et vigtigt fagligt grundlag bag vandplanerne er opgørelser over de enkelte elementer i vandbalancen, som fx grundvandsdannelse og vandløbsafstrømning og deres variationer i tid og sted. Eftersom overvågningen ikke kan bidrage med målinger på alle lokaliteter, bliver vandbalanceelementerne i vandplanerne i praksis delvist baseret på modelberegninger. Hvis vi har forkerte vandbalanceforudsætninger i vores hydrologiske modeller, vil modelresultaterne til brug i vandplanerne være fejlbehæftede.
- *Udpegning af nitratsårbare grundvandsforekomster.* En fejlbehæftet vurdering af det hydrologiske kredsløb i et område kan føre til en forkert afgrænsning af fx nitratfølsomme indvindingsområder, hvis identifikation er afgørende for kommunernes udpegning af indsatsområder mht. nitrat.
- *Kvælstofkredsløb.* Udsivningen af nitrat fra rodzonen i landbrugsområder beregnes ved at multiplicere målte koncentrationer i bunden af rodzonen med modelberegneede perkolationer af vand. Hvis perkolationstallene er fejlbehæftede vil det påvirke opgørelsen af hele kvælstofkredsløbet.
- *Klimaændringer og -tilpasning.* Beregninger af klimaændringers effekt på vandets kredsløb, herunder grundvand, foregår med hydrologiske modeller, som kalibreres mod historiske data og herefter påføres fremtidige klimadata, som udledes fra beregninger med globale og regionale klimamodeller. Hvis inputdata til de nuværende hydrologiske data er fejlbehæftede, fx i form af for stor/lille nedbør og for stor/lille fordampning, vil en hydrologisk model ikke være i stand til at simulere nuværende vandbalancer med realistiske parametre. Det er ikke muligt, fordi fejlagtige input ved den automatiske kalibrering oftest vil blive kompenseret, i forhold til fejlen på vandbalanceinput, ved at parameterværdier 'skævvrides' i en sådan grad, at en eller flere parametre returneres med urealistiske værdier. Det medfører, at modellen giver "de korrekte svar af de forkerte grunde". Det går godt, så længe modellen anvendes på den klimasituation, hvorpå den er kalibreret, men når modellen benyttes

til ekstrapolation til forudsigelser af de hydrologiske effekter af et ændret klima, vil modellen give usikre eller ligefrem fejlagtige resultater. Derfor er det meget væsentligt for beregninger af klimaeffekter, at den grundlæggende hydrologiske model er så fysisk korrekt som muligt, og her er en korrekt beskrivelse af vandbalanceforhold altafgørende

- *Grundvandskortlægningen.* Hvis vandbalancerne er fejlagtige vil det eksempelvis resultere i, at placeringen og størrelsen af de grundvandsdannende oplande og indvindingsoplandene, som skal udpeges i grundvandskortlægningen, vil være systematisk forkerte. Så en forudsætning for at de udpegede oplande får høj troværdighed er, at vandbalancen er bestemt på det bedst mulige faglige grundlag, hvilket ikke er tilfældet i dag.

I takt med at beregningerne af nedbørkorrektion, referencefordampning og aktuel fordampning gennem de sidste årtier er korrigeret på basis af ny viden og nye data, har der været problemer med at få vandbalancen til at gå op for danske oplande. Problemet har ofte været, at enkelte faggrupper har opdateret viden på deres eget fagområde, uden at konsekvenserne for den samlede vandbalance samtidigt er blevet tilstrækkeligt belyst. I forbindelse med arbejdet bag Plauborg et al. (2002) blev der i enighed mellem fagfolk fra relevante discipliner (nedbør, fordampning, afstrømning, oplands-vandbalance) udarbejdet anbefalinger til brug af nedbørkorrektioner og beregning af referencefordampning. Disse anbefalinger har i vid udstrækning dannet grundlag for vandbalanceberegninger siden da. Erfaringerne viser imidlertid at, selvom problemerne er mindre end før Plauborg et al. (2002), er de stadig betydelige. I forbindelse med en opgørelse af kvælstofudvaskningen til brug for Vandplanerne gennemførte DMU (Grant et al., 2009) en beregning af nettonedbøren (perkolationen ud af rodzonen til grundvand og vandløb) med DAISY og sammenlignede nettonedbøren med resultater fra DK-model2003 (Henriksen og Sonnenborg, 2003). DMU fik vandbalancerne til at stemme for en 10-års periode for 8 af DK-modellens 10 delområder, men det krævede en parameterisering af DAISY, hvor afgrødekoefficienterne for landbrugsafgrøder blev justeret ned. Den resulterende aktuelle fordampning var urealistisk tæt på den potentielle fordampning. I forbindelse med DK-model2009 blev det generelt fundet muligt, at skruer på beregningerne af den aktuelle fordampning så de årlige vandbalancer stemmer så nogenlunde, men hvor der var signifikante fejl på månedsbasis, fx for meget vand om vinteren og for lidt om sommeren (Højberg et al., 2010a). I takt med at problemerne viser sig, eksperimenteres der med forskellige løsningsforslag i forskellige studier, fx Vejen (2005). Vi er dermed på vej tilbage til en situation, hvor der igen ikke benyttes standardiserede metoder.

Forskningsprojektet HOBE (Jensen and Illangasekare, 2011; www.hobecenter.dk), som støttes af VKR fonden med 33 mio. kr over fem år, fokuserer på grundlæggende forskning om vandbalanceforhold med omfattende målinger af bl.a. nedbør og fordampning ved hjælp af nye metoder og instrumenter. HOBE ledes af KU og har også deltagelse af AU, GEUS, DMI og DTU. Målsætningen for HOBE er at opnå ny viden, som muliggør en langsigtet løsning på vandbalanceproblemet. I mellemtiden, indtil HOBE resultaterne foreligger om nogle år, er der behov for at få opdateret Plauborg et al. (2002) med et sæt nye anbefalinger for, hvordan man i praksis skal håndtere vandbalanceproblemerne.

1.2 Formål med Vandbalanceprojekt2010

Projektets formål er, med inddragelse af de relevante faggrupper, at udarbejde anbefalinger for, hvordan vandbalancen bør beregnes i forbindelse med vandforvaltning i Danmark for så vidt angår beregninger på historiske data for perioden før 1/1-2011. Det forventes, at anbefalingerne kan benyttes i en årrække som erstatning for Plauborg et al. (2002), indtil der kommer ny viden bl.a. fra HOBE projektet.

2. Metode

2.1 Generel metodik

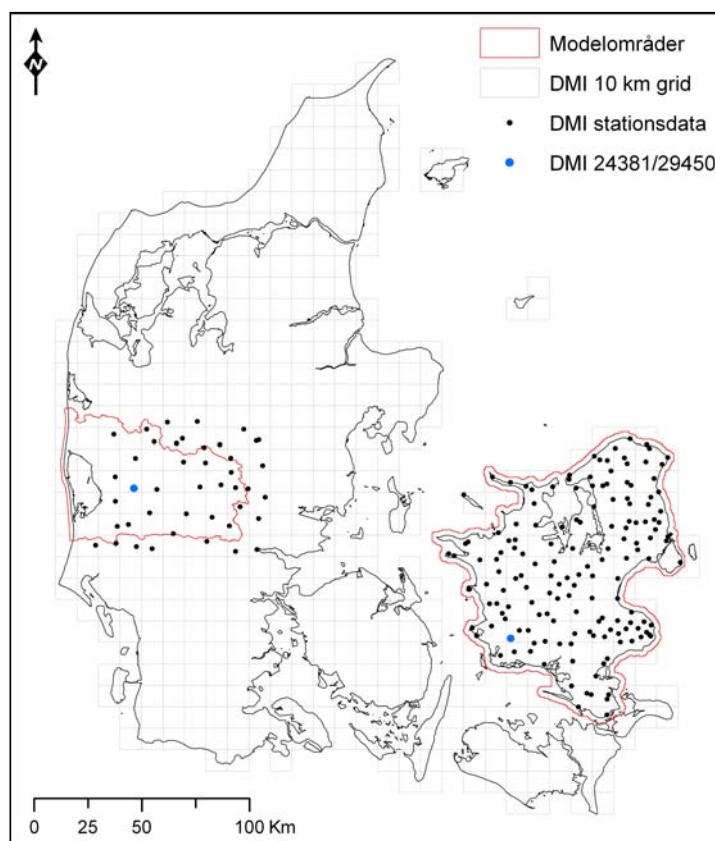
Den valgte metodik er baseret på følgende erkendelser:

- Vandbalancer kan ikke med rimelig sikkerhed opgøres for små oplande. Det skyldes to forhold: (i) der er større usikkerhed på arealmidlede værdier af input, fx nedbør, for et lille end for et stort opland; og (ii) grundvandsskel er generelt ikke sammenfaldende med topografiske oplande, hvorfor grundvandsstrømninger kan flytte betydelige vandmængder fra et topografisk opland til et andet. Et usikkert punkt er den underjordiske udstrømning, dvs. udstrømning via grundvandsmagasiner ud af oplandet, fx til tilgrænsende oplande eller havet. Den underjordiske udstrømning kan ikke måles og skal derfor bestemmes indirekte. Det kan i praksis ske ved hjælp af grundvandsmodeller. Effekten af de to forbehold bliver relativt mindre jo større opland, der benyttes. Erfaringerne fra modelleringerne af de små LOOP oplande og oplande på op til få hundrede km², viser eksempelvis at randbetingelserne i grundvandet i væsentligt omfang kan påvirke vandbalanceopgørelser for disse oplande.
- For at kunne teste forskellige hypoteser om vandbalanceforhold er det nødvendigt at have data til at kontrollere vandbalancen, dvs. inputdata i form af nedbør og potentiel fordampning og outputdata i form af vandløbsafstrømning. Eftersom langt hovedparten af vandet i danske vandløb har været en tur nede og vende i grundvandssystemerne, er data som grundvandsforhold (trykkniveauer og oppumpning) også væsentlige. Data med direkte målinger af aktuel fordampning ville være meget nyttige, men sådanne data indsamles ikke i NOVANA eller til forvaltningsformål i øvrigt. De eneste måledata for aktuel fordampning stammer fra tidligere og igangværende forskningsprojekter som fx HOBE.
- En samlet analyse af de tilgængelige data (nedbør, potentiel fordampning, vandløbsafstrømning, grundvandstrykkniveauer og –oppumpning) kræver en hydrologisk model, der integrerer overfladevand og grundvand. Hvis en hydrologisk model kalibreres mod data for vandløbsafstrømning og trykniveauer vil den så vidt muligt optimere parameterverdier, der justerer den aktuelle fordampning, således at vandløbsafstrømningen simuleres korrekt. En vurdering af, om modellen simulerer vandbalanceforholdene realistisk, kan så foretages ved at analysere: (i) hvor nøjagtigt kan modellen simulere vandløbsafstrømninger og grundvandsforhold? (ii) er de opnåede parameterverdier fysisk realistiske? og (iii) er størrelsen af den simulerede aktuelle fordampning realistisk vurderet ud fra den viden vi har fra forskningsprojekter?
- Der kan være forskellige resultater af vandbalanceforhold i forskellige dele af landet. Erfaringerne fra DK-modellen (Henriksen og Sonnenborg, 2003; Højberg et al., 2010a) viser, at det med de samme forudsætninger kan være nemmere af få vandbalancen til at stemme i et område af landet end i andre. For at nå frem til robuste konklusioner, som skal kunne benyttes i hele landet, er det derfor nødven-

digt at teste konklusionerne på forskellige oplande, som repræsenterer forskellige regimer og vandbalanceproblemer.

På den baggrund har vi benyttet følgende trinvis metode:

1. Formuler hypoteser om vandbalanceforhold. Vi har testet forskellige hypoteser om, hvordan nedbørkorrektion og referencefordampning kan opgøres. Første runde af Trin 1 blev gennemført på opstartstworkshoppen 12. august 2010.
2. Opstil en hydrologisk model baseret på vandbalancehypoteser. Vi har benyttet DK-modellen og valgt to oplande: Ringkøbing Fjord og Sjælland (Figur 1), som dels har meget forskellige hydrogeologiske regimer og dels har givet forskellige typer vandbalanceproblemer i tidligere DK-model studier.
3. Kalibrer modellen for hvert af de to oplande ved hjælp af programmet PEST (Watermark Numerical Computing), der kan benyttes til bl.a. at lave følsomhedsanalyser for betydningen af de mange forskellige parametre og til invers optimering af parameterværdierne.
4. Analyser resultaterne fra den optimerede modelkørsel med hensyn til (i) godheden af simulerede vandføringer og grundvandstrykniveauer; (ii) parameterværdiers realisme; og (iii) den simulerede aktuelle fordampnings realisme.
5. Diskuter resultaterne fra Trin 4 og om nødvendigt formuler nye hypoteser, dvs. gå tilbage til Trin 1 og gentage Trin 1-4. Sådanne diskussioner og konklusioner blev gennemført på de to workshops den 3. november og 13. december 2010.
6. Efter to gennemløb af Trin 1-5 uddrages konklusioner, der udarbejdes anbefalinger og skrives rapport. Konklusioner og anbefalinger blev fremlagt og diskuteret på workshoppen 13. december 2010.



Figur 1 Placering af case områderne Ringkøbing Fjord (RKF) og Sjælland (SJ) og anvendte nedbørstationer.

2.2 Nedbør

2.2.1 Landsdækkende nedbørmåling

Landsdækkende måling af døgn nedbørsum er gennem de sidste 50 år (frem til og med 2010) foretaget af DMI i et net af manuelle nedbørmålere af typen Hellman. I tillæg til det manuelle nedbørmålnet har der gennem de senere årtier været målt nedbør også på automatiske målestationer, men det er de manuelle målere der frem til og med 2010 har været anvendt i vandbalanceberegninger.

Ved årsskiftet 2010/2011 afløses det manuelle nedbørmålnet af et net af automatiske målere. Det er derfor vigtigt at påpege, at de nedbørdata, som nærværende undersøgelse omfatter er, målinger fra det manuelle målnet, hvorfor de konkluderende anbefalinger kan anses for gældende for brug af nedbørdata til og med 2010.

Nedbør målt med Hellman måleren anses for at være af høj kvalitet, men omfattende studier og tidligere anbefalinger (Plauborg et al., 2002) viser, at det er nødvendigt at korrigere målingerne (bl.a. fordi målingen er foretaget i 1,5 meters højde) for at få vandbalancen til at gå op.

Indenfor andre anvendelsesområder af standard nedbørmålinger end vandbalanceberegninger er korrektion for målertab enten ikke nødvendigt eller ikke praksis. Korrektion for målertab har derfor primært hydrologisk interesse, hvilket afspejles i det faktum, at der er meget få studier og anbefalinger udenfor det hydrologiske fagområde, der adresserer denne type korrektion.

2.2.2 Korrektion for målertab i vandbalanceberegninger

Ved anvendelse af standard nedbørmålinger (målt med Helmann målere i 1,5 m.o.t) i perioden 1961-2010 er det som nævnt – til brug i vandbalancestudier i Danmark – nødvendigt at korrigere for målertab for at få vandbalancen til at gå op (Plauborg et al., 2002).

Den største kilde til tab af nedbør er turbulens omkring nedbørmålerens åbning. Størrelsen af denne påvirkning afhænger hovedsagelig af målerens udformning samt af placeringen i terrænet i forhold til lægivere og terrænelementer. Af mindre betydning for tabet af nedbør er adhæsion (wetting) og fordampning. Størrelsen af disse tab afhænger af målertypen. Mens wettingtabet har relativ stor betydning for manuelle nedbørmålere, er denne fejlkilde praktisk taget fraværende for automatiske målere. For fast nedbør kan snefygning være en betydelig fejlkilde ved højere vindhastigheder.

Nedbørmålere, som er hævet over terræn (World Meteorological Organization [WMO] standard er 1.5 m), producerer turbulens, som har tendens til at reducere opfangningen af små regndråber og især snefnug. Underestimeringen af nedbør er forskellig for regn og sne, og størrelsen heraf afhænger bl.a. af nedbørmålerens udformning og evt. påmontering af skærm. Det er vist, at underestimering af nedbør hovedsagligt er en funktion af nedbørtype, læforhold og vindhastighed (Larson and Peck, 1974). I 1972 blev et studie af nedbørkorrektion indledt i Danmark. Det resulterede i en korrektionsmodel for flydende nedbør (Allerup and Madsen, 1980). Baseret på et WMO initiativ fra 1985 (Goodison et al., 1998) blev "The

Solid Precipitation Intercomparison Project” gennemført i perioden 1987-1998 med deltagelse af en lang række lande, som forpligtede sig til at drive testfelter og rapportere resultater til WMO. De nordiske lande organiserede et testfelt i Jokioinen, Finland (1987-1993). Et af målene med dette projekt var at sammenligne forskellige nedbørmålere, herunder den danske Hellmann måler, samt at etablere en korrektionsmodel for fast nedbør (sne). Projektet foreslog en række korrektionsmodeller (Goodison et al., 1998), hvoraf modellen baseret på de finske data er beskrevet i Allerup et al. (1997). På basis af data fra det finske felt blev der udviklet en model til korrektion af fast, flydende og blandet nedbør i Danmark (Allerup et al., 1997). Det elegante ved denne model er, at den forener alle typer nedbør i et enkelt udtryk. Den forenende parameter for disse nedbørtyper er snefraktionen, α .

$$CF(\alpha) = \alpha \cdot CF_{sne}(V, T) + (1 - \alpha) \cdot CF_{regn}(V, I)$$

$CF(\alpha)$ er den samlede korrektionsfaktor for enhver sammensætning af nedbørtyperne sne og regn givet ved α . Modellen for flydende nedbør er en funktion af vindhastighed og regnintensitet, mens modellen for fast nedbør er en funktion af vindhastighed og temperatur:

$$CF_{regn} = \exp\{0.007697 + 0.034331 \lambda_{regn} u + (-0.00101 \ln(I)) + (-0.012177 \lambda_{regn} u \ln(I))\}$$

$$CF_{sne} = \exp\{0.04587 + 0.23677 \lambda_{sne} u + 0.017979 T + (-0.015407 \lambda_{sne} u T)\}$$

hvor CF er korrektionsfaktoren, λ_x er vindkorrektionsfaktor [-], u er vindhastighed [m/s], I er intensitet [-] og T er lufttemperatur [$^{\circ}C$]. De empiriske konstanter i udtrykkene gælder for den danske Hellmann måler uden skærm, men der findes andre sæt konstanter til brug for korrektion af nedbør, der er målt med visse andre typer nedbørmålere og bestykninger. Til praktisk anvendelse skelnes der mellem fast og flydende nedbør. Dette kan gøres vha. nedbørtype målinger eller, forsimpelt til operationelt brug, ud fra lufttemperaturen. Da modellen ikke er valideret ved ekstreme vindhastigheder anvendes en tærskelværdi for vindhastighed på hhv. 15 m/s for flydende ($T > 2^{\circ}C$) og 7 m/s for fast ($T \leq 2^{\circ}C$) nedbør. Ved vindhastigheder over disse sættes vindhastigheden til tærskelværdien.

Ovenstående korrektionsmodel er den eneste, der er anvendt i nærværende undersøgelse. Forskelle i de resulterende korrigerede nedbørserier skyldes således ikke forskellige korrektionsmodeller, men alene hvordan modellen anvendes og hvilke data, der indgår som input. HOBE projektet vedrørende vandbalancen for Skjern Å's opland inkluderer feltmålinger, som med tiden vil kunne teste Allerup modellen for danske forhold og/eller danne grundlag for en ny formulering af en dansk nedbørkorrektionsmodel.

2.2.3 Månedlige standard korrektionsværdier 1961-1990

Hidtil har anbefalingerne for korrektion af nedbørdata til brug i vandbalanceberegninger i Danmark (Plauborg et al., 2002) været at anvende månedlige standard korrektionsværdier (Tabel 1) baseret på data for perioden 1961-1990 (Allerup et al., 1998; Vejen et al., 1998).

Tabel 1: DMI's månedlige standard korrektionsværdier (1961-1990) for tre lækategorier (Allerup et al., 1998).

Lækategori	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
A	1,29	1,3	1,26	1,19	1,11	1,09	1,08	1,08	1,09	1,10	1,17	1,26
B	1,41	1,42	1,35	1,24	1,13	1,11	1,10	1,10	1,11	1,14	1,23	1,37
C	1,53	1,53	1,45	1,29	1,16	1,13	1,12	1,12	1,13	1,17	1,29	1,48

De klare fordele ved disse korrektionsværdier er, at de er lette at anvende operationelt, da der er tale om faste værdier i tid og rum. Ulemperne er, at de ikke tager højde for de aktuelle vejrforhold (vind og temperatur) på den pågældende dag, samt at de ikke tager højde for regional variation. Dette betyder, at fx en kold vinter med meget sne, hvor nedbøren typisk må forventes at skulle korrigeres relativt meget, korrigeres med samme faktorer, som en varm vinter med lidt eller ingen sne. Desuden kan der reelt være relativt store forskellige i de faktiske korrektionsværdier selv over en længere periode. Det er fx intuitivt rimeligt at antage, at korrektionerne i perioden 1991-2006 generelt vil ligge lavere end 1961-1990 på grund af generelt varmere vintre og dermed en større andel af nedbøren som regn.

2.2.4 Dynamisk nedbørkorrektion baseret på bedst tilgængelige data

Med udgangspunkt i de netop beskrevne fordele og ulemper ved de faste månedlige nedbørkorrektioner afprøves en metode til dynamisk nedbørkorrektion, dvs. individuelle daglige korrektioner baseret på lokale vind og temperatur data, samt individuelle læforhold. Da de nødvendige klimadata ikke er til rådighed for de manuelle nedbørmålere, kræver en implementering af den dynamiske nedbørkorrektion på individuelle stationsdata en række forenklinger og antagelser. I et pilotstudie på 14 års data (Vejen, 2005) er der udviklet en forenklet praksis i form af korrektionsberegninger med to alternativer som beskrevet herunder.

Praktisk anvendelse af korrektionsmodel (Allerup et al 1997) i nærværende undersøgelse

Der er anvendt følgende antagelser:

- Der anvendes DMI stations nedbør (døgnværdier)
- Der anvendes DMI 20km gridværdier for vindhastighed og temperatur (døgnværdier)
- Der anvendes faste månedlige værdier for nedbørsintensitet (Vejen, 2005)
- Der anvendes faste månedlige værdier for wettingtab (Vejen, 2005)
- Vindhastighederne nedskaleres til målerhøjde under antagelse af et logaritmisk vindprofil med overflade ruhed på 0,25 [m] (denne ruhed repræsenterer en blanding af græs og højere bevoksning)
- Der anvendes tidsvarierende læindex for hver station efter 0-30 skalaen (Vejen et al., 1998)
- Der skelnes mellem fast og flydende nedbør ud fra temp. Flydende $> 2^{\circ}\text{C}$ ($\alpha = 0$), fast $< 0^{\circ}\text{C}$ ($\alpha = 1$). Mellem 0 og 2°C ($\alpha = 1-0.5*T$) foretages en simpel lineær skalering af CF værdier for hhv. fast og flydende nedbør.

- Der er indført en differentieret effekt af læforhold for fast og flydende nedbør:
 $\lambda_x = 1 - k_x \cdot \text{læindex}$, hvor $k_{\text{sne}} = 0,023$, $k_{\text{regn}} = 0,017$

Alternativ operationel anvendelse baseret på DMI 10 km gridnedbør:

Som et mere operationelt alternativ til overstående fremgangsmåde er en lignende beregning af dynamisk nedbørkorrektion foretaget med udgangspunkt i DMI's Klimagrid Danmark 10 x10 km nedbør (Scharling, 1999a; Scharling et al., 2002).

For den forsimplede implementering baseret på DMI's 10 km griddata gælder følgende antagelser:

- Der anvendes DMI 10 km gridværdier for nedbør (døgnværdier)
- Der anvendes DMI 20km gridværdier for vindhastighed og temperatur (døgnværdier) (Scharling, 1999b)
- Der anvendes faste månedlige værdier for nedbørsintensitet (Vejen, 2005)
- Der anvendes faste månedlige værdier for wettingtab (Vejen, 2005)
- Vindhastighederne nedskaleres til målerhøjde under antagelse af et logaritmisk vindprofil med overflade ruhed på 0.25 [m]
- Der anvendes en fast lækategori B
- Der skelnes mellem fast og flydende nedbør ud fra temp. Flydende $> 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\alpha = 0$), fast $< 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\alpha = 1$). Mellem 0 og $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\alpha = 1 - 0.5 \cdot T$) foretages en simpel lineær skalering af CF værdier for hhv. fast og flydende nedbør.
- Der er indført en differentieret effekt af læforhold for fast og flydende nedbør: $\lambda_{\text{sne}} = 0,70$ og $\lambda_{\text{regn}} = 0,78$

Teoretiske antagelser som ikke er opfyldt

Følgende antagelser i korrektionsmodellen (Allerup et al., 1997) er ikke opfyldt i de beregninger, der er lavet i nærværende undersøgelse:

- Vind og temperatur under nedbør (da der regnes på døgnværdier)
- Vind og temperatur ved selve målingen (da der anvendes 20 km grid)
- Nedbørtypen er ikke kendt, men estimeret ud fra temperaturen
- Der er ikke taget højde for vindretning

Væsentligste fordele og ulemper ved dynamisk nedbørkorrektion

De klare fordele ved den dynamiske korrektion er, at der tages højde for de aktuelle vejrforhold (vind og temperatur), hvilket vil have en effekt på både kort og lang tidsskala. Dette giver både en mere korrekt nedbørkorrektion generelt og i særdeleshed en mere korrekt tidslig variation, både ved enkelte nedbørhændelser og for år til år variation. Effekten af dynamisk nedbørkorrektion på hydrologisk modellering (især vandløbsafstrømning) er illustreret for Skjern Å's opland i Stisen et al. (2011), hvor der blev opnået en væsentlig forbedring i simuleret vandføring for både kalibrerings- og valideringsperioden.

De primære forskelle mellem anvendelse af stationsnedbør og gridnedbør er muligheden for at korrigere stationer individuelt i forhold til lokale læforhold, hvilket også giver mulighed for at foretage rumlig interpolation på korrigerede værdier (i stedet for på rå nedbørsværdier). Den dynamiske korrektion er mere beregningstung end standard korrektionsværdierne og kræver desuden adgang til vind og temperatur data.

2.2.5 Evaluering af dynamisk korrigeret nedbør for udvalgte stationer

For to udvalgte basisstationer (24381 og 29451, Figur 1) er der lavet en evaluering for årene 1990-1999. For disse stationer har DMI publiceret månedlige korrektionsprocenter for perioden 1989-1999 baseret på en dynamisk korrektion (Vejen et al., 2000). Evalueringen består i en sammenligning af de årlige middeldynamiske korrektioner for henholdsvis den af DMI beregnede dynamiske korrektion, DMI standard korrektion (konstant) og den i nærværende undersøgelse (VBP) beregnede dynamiske korrektion, som inkluderer en række forsimplinger. Formålet er at belyse, om den forsimplede dynamiske korrektion har en systematisk bias, og om den giver et bedre billede af den år-til-år variation, som standard korrektionerne ikke gengiver. En direkte sammenligning mellem de af DMI beregnede korrektionsprocenter og den forsimplede beregning er dog ikke mulig, idet de to sæt korrektionsprocenter afskiller sig fra hinanden på flere punkter. For det første er de korrektioner, der er beregnet i nærværende undersøgelse, baseret på læindex gradueret efter 0-30 skalaen (vindhyppighedsvægtede højdevinkler ved DMI's nedbørstationer), mens DMI's standard korrektioner er angivet for lækategori A, B og C.

I Tabel 2 er de tre korrektionsmetoder sammenlignet. Til sammenligning er der for de to DMI korrektioner angivet den lækategori (B), som bedst svarer til det læindex, som er anvendt i den forsimplede dynamiske korrektion VBP. Desuden indgår basisstation 29451 ikke i dette studie, og data fra denne station er derfor sammenlignet med den manuelle nabostation 29450, hvorfra der kun er fire års data til sammenligning. Sammenligningen lider desuden af, at tidsserierne ikke er komplette for alle år, fx mangler data for nogle nedbørrige dage i januar og februar 1995 for 24381 (Dynamisk, VBP).

Resultatet i Tabel 2 viser, at den overordnede korrektionsprocent for de dynamiske korrektioner er sammenlignelig, samt at de for 24381 ligger under standard korrektionsprocenten på 21. Hvad angår år-til-år variationen, følger de to dynamiske korrektioner for 24381 ikke hinanden systematisk, men korrelationen (RMSE = 3 %) er dog bedre end mellem den af DMI beregnede dynamiske korrektion og standard korrektionen (RMSE = 5 %). Det er vanskeligt at konkludere noget på baggrund af tallene for station 29451, dels fordi der ikke er tale om præcist samme måler, og dels fordi der kun er fire års data. Dog indikerer begge dynamiske korrektioner, at 1996 havde en højere korrektionsprocent end de andre år.

Tabel 2 Korrektionsprocenter for beregnet i dette studie (VBP), samt DMI's dynamiske korrektion og standard korrektion for stationerne 24381 (Ringkøbing Fjord oplandet) og 29451 (Sjælland)

	24381	DMI	24381	29451	29450
	Dynamisk	Standard	Dynamisk	Dynamisk	Dynamisk
	DMI (B)	DMI (B)	VBP	DMI (A)	VBP
1990	18	21	17		
1991	15	21	17		
1992	15	21	16		
1993	24	21	19		
1994	15	21	17		
1995	30	21	24		
1996	20	21	29	27	26
1997	17	21	18	21	17
1998	15	21	17	19	22
1999	15	21	15	19	15
Middel	18	21	19		

2.3 Fordampning

Der er i nærværende projekt ikke gennemført særskilte studier af fordampningsberegninger. I overensstemmelse med anbefalingerne fra Plauborg et al. (2002) benyttes Makkink derfor stadig som grundlag for referencefordampning. Koefficienterne i den danske udgave af Makkink formelen er kalibreret på data fra Højbakkegård, Taastrup, så Makkink gav samme middelværdi som Penman, der er internationalt anerkendt som den bedste metode til bestemmelse af referencefordampning (Mikkelsen og Olesen, 1991; Detlefsen og Plauborg, 2001). Efterfølgende analyser har vist at Makkink overestimerer referencefordampningen med 0-10% sammenlignet med Penman værdier for stationer i Vestdanmark (Plauborg et al., 2002). Derfor benyttes Makkink værdierne direkte for Sjælland, mens værdierne i Ringkøbing Fjord oplandet korrigeres med en faktor 0,95.

Afgrødekoefficienterne K_c for de forskellige vegetationstyper bestemmes, så den er inden for de intervaller der er angivet i Plauborg et al. (2002). Som udgangspunkt vælges K_c værdier beliggende i midten af disse intervaller.

2.4 Modelberegninger DK-model

Det er valgt at basere modelanalyserne på to modelområder, Ringkøbing Fjord (RKF) og Sjælland (SJ) (Figur 1), repræsenterende henholdsvis øst- og vestdanske forhold. Begge

modeller er baseret på udtræk fra DK-model2009 (Højberg et al., 2010a). Modellen for Ringkøbing Fjord er tidligere anvendt til belysning af vandbalanceproblematikken (Stisen et al., 2011).

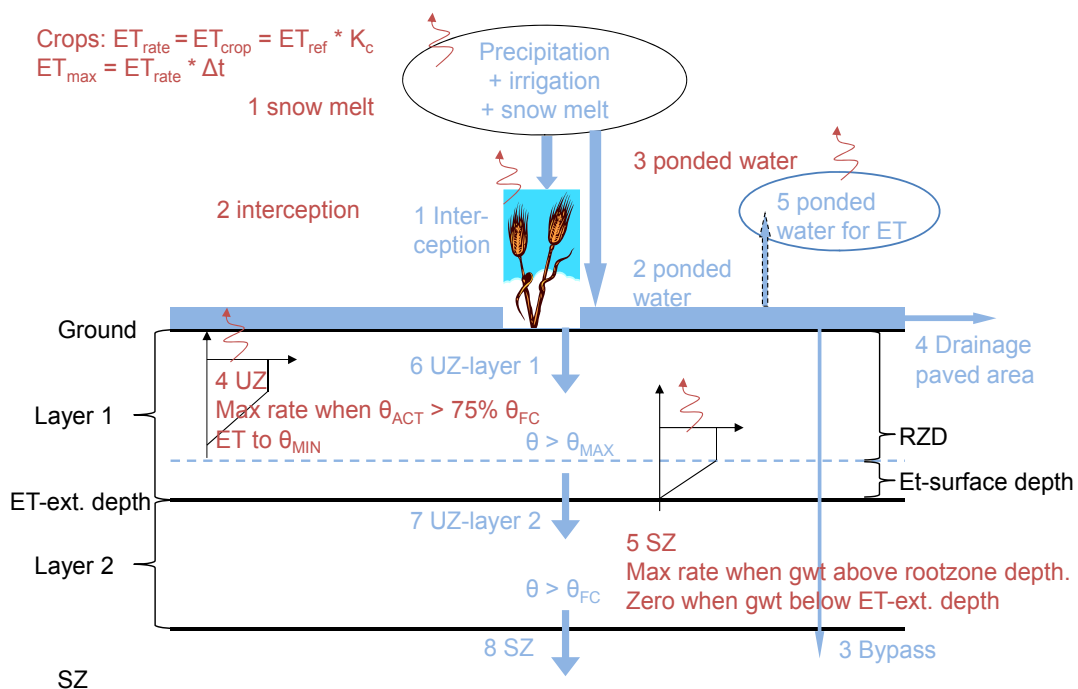
2.4.1 Modellsystem – fordampning ved MIKE SHE's Two-layer modul

Begge modeller er opstillet i MIKE SHE/MIKE 11, der udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af de væsentligste strømningsprocesser af det hydrologiske kredsløb på landfasen. Modellsystemet er beskrevet i Højberg et al. (2010b), hvortil der henvises for en detaljeret beskrivelse af de anvendte MIKE SHE/MIKE 11 moduler. I nærværende rapport gives alene en summarisk gennemgang af modulet "Two-Layer" (DHI, 2009; Yan and Smith, 1994), der er anvendt til beskrivelse af den umættede zone, og som er styrende for beregning af fordampningen og dermed den overordnede vandbalance.

Two-Layer modulet beskriver ikke selve strømmingen i den umættede zone (UZ), men fokuserer på vandbalancen og estimerer den aktuelle fordampning og mængden af vand, der infiltrerer til den mættede zone. Metoden giver en forsimplet kobling mellem den umættede zone og den mættede zone (SZ), der tager højde for den varierende fordampning, der vil forekomme i tid og sted som resultat af varierende dybde til grundvandsspejlet. I modulet er den umættede zone opdelt i to lag. Fordampning (ET) sker fra det øverste lag (Layer 1, Figur 2), der således skal repræsentere den samlede dybde, hvorfra vandet kan fordampe, dvs. rodzonedybden (RZD) samt den kapillære stighøjde. I Two-Layer er den kapillære stighøjde forsimplet ved at tillægge en ekstra dybde (ET-surface depth) til rodzonen, og den samlede dybde af det øverste lag benævnes "ET-ext. depth". De fysiske egenskaber for laget antages homogene, og der regnes på midlede forhold, dvs. uniform vandmætning i den umættede zone. Det andet lag (Layer 2, Figur 2) strækker sig fra bunden af det øverste lag og ned til grundvandsspejlet. Står grundvandsspejlet højere end ET-ext. depth, vil kun det øverste lag eksistere. Dybden af den umættede zone varierer med ændret grundvandsstand, hvor den maksimale dybde er ned til ET-ext depth (grundvandet står under lag 1), mens der ikke eksisterer en umættet zone, når grundvandet står i terræn.

I den umættede del af lag 1 er det maksimale vandindhold markkapaciteten (θ_{FC}) svarende til fri dræning, mens det minimale vandindhold optræder ved visnegrænsen (θ_{WP}). Forskellen på vandindholdet mellem disse yderpunkter er tilgængelig for fordampning fra den umættede del af lag 1. Det er muligt at styre fordampningsraten fra den umættede zone, så denne reduceres, når vandindholdet falder under en brugerdefineret procentdel ("ET deficit fraction") af markkapaciteten. Fordampning fra den vandmættede del af lag 1 sker ved maksimal rate, når grundvandsstanden står højere end "ET-ext. depth", og reduceres lineært ned til 0, når grundvandsstanden falder under "ET-ext. depth".

I modellen anvendes homogene forhold indenfor de forskellige jordtyper. I naturen optræder der derimod heterogenitet i bl.a. markkapaciteten, hvilket medfører, at der vil ske en infiltration til den mættede zone ved varierende vandmætninger selv indenfor samme jordtype. Denne heterogenitet kan i nogen grad beskrives ved anvendelse af en bypass funktion, hvor en vis procentdel af nettonedbøren bypasser den umættede zone og ledes direkte til den mættede zone ved vandindhold under markkapaciteten.



Figur 2 Skitsering af processer og deres rækkefølge i Two-Layer modulet i MIKE SHE. Blå pile, bokse og tekst angiver infiltration. Røde pile og tekst angiver fordampning.

2.4.2 Modelopstilling

I forbindelse med nærværende studie er begge modeller opdaterede og detaljerede primært mht. beskrivelsen af den rumlige fordeling samt parameterisering af de jordfysiske parametre samt vegetation. Disse forhold beskrives kort herunder, mens der for den øvrige modelopstilling henvises til Højberg et al. (2010a, 2010b) og Stisen et al. (2011).

Dræn

I modellen er de større vandløb medtaget i MIKE 11 opsætningen (Højberg et al., 2008; Højberg et al., 2010b). Det er imidlertid ikke praktisk muligt at inkludere samtlige vandløb samt mindre grøfter i modellen, bl.a. fordi modellen ikke kan have vandløb med kortere afstand end gridstørrelsen på 500 m. Mindre grøfter er derfor beskrevet vha. dræn. Modelens dræn beskriver således både den kunstige dræning samt dræning fra de mindre naturlige afdræningssystemer. Endvidere vil modellen udjævne topografien til 500 m kasser og derfor ikke være i stand til at beskrive de helt lokale topografidrevne strømninger i det øverste grundvand, som derfor i et vist omfang formentlig også repræsenteres som drænafstrømning i modellen. Drænafstrømning beskrives i modellen ved et niveau for drændybden og en tidskonstant for routningen af vand ud af elementet. Der er anvendt en drændybde på 0,5 meter under terræn i hele modelområdet. Drænvandet dirigeres til nærmeste vandløb ved anvendelse af drænkoder, hvor der er defineret drænkoder ned til 3. ordens vandløbsoplande. Den anvendte drændybde på 0,5 m, som er mindre end den fysiske

dybde af drænrør i markerne, er den dybde, der, med approksimationerne i en 500 m model, erfaringsmæssigt giver de bedste simuleringer af vandløbsdynamikken.

Fordampning fra landbrugsafgrøder

Fordampningen er styret af de jordfysiske parametre for den umættede zone samt rodzonedybden (RZD), afgrødekoeficienten for fordampning (K_c) samt bladarealindekset (LAI). I Two-Layer modulet skal der for hver jordtype angives vandindhold ved tre mætningsgrader: (i) Fuld mætning (θ_s); (ii) Markkapacitet (θ_{FC}); og (iii) Visnegrænsen (θ_{WP}). Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet (DJF) ved Århus Universitet har, baseret på laboratieundersøgelser af de jordfysiske parametre for den umættede zone, opstillet pedotransferfunktioner, der korrelerer overjordens tekstur med jordfysiske parametre (Børgesen and Schaap, 2005). På basis heraf og af en interpolation af overjordens tekstur for hele landet, er der genereret et 250 x 250 m raster grid over de jordfysiske parametre for hele landet (Greve et al., 2007). I nærværende modelopstilling er dette raster grid for B-horisonten aggregeret indenfor hver JB-type, dvs. der er beregnet et gennemsnit for hver af de tre vandmætningsgrader indenfor hver jordbundstype (JB-type). Midlingen er foretaget for hvert af de to modelområder, og værdierne er angivet i Tabel 3.

Tabel 3 Middel vandindhold ved de tre mætningsgrader for JB-typer i B-horisonten for Ringkøbing Fjord og Sjælland.

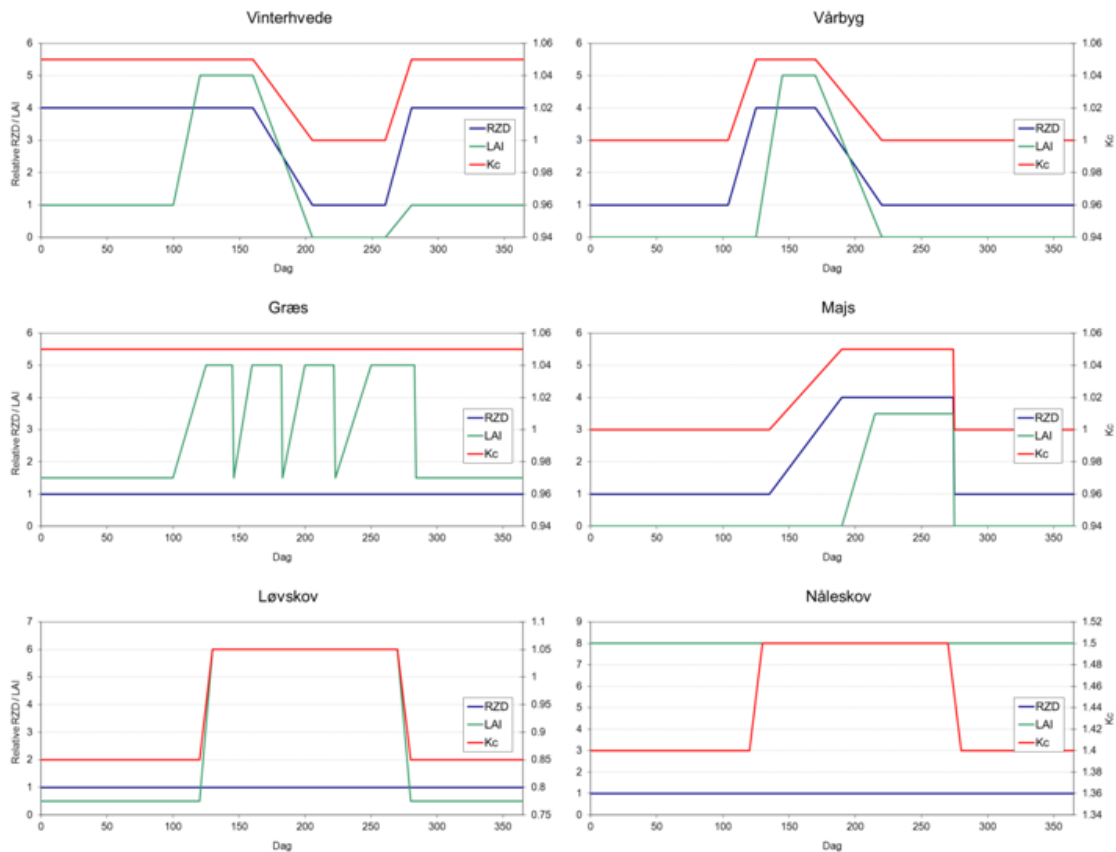
θ	JB-Type									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ringkøbing Fjord									
θ_s	0,44	0,43	0,43	0,43	0,42	0,47	0,48	0,50	0,51	0,46
θ_{FC}	0,16	0,22	0,21	0,24	0,27	0,38	0,37	0,46	0,50	0,36
θ_{WP}	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,13	0,19	0,24	0,13
	Sjælland									
θ_s	0,41	0,41	0,42	0,42	0,40	0,40	0,38	0,40	0,40	0,39
θ_{FC}	0,17	0,25	0,23	0,27	0,28	0,29	0,31	0,39	0,45	0,41
θ_{WP}	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,11	0,17	0,22	0,15

Typiske danske værdier for rodzonedybder fra litteraturen/felten for forskellige jordtyper (JB) og afgrøder er givet i Tabel 4. Værdierne er anvendt som initialværdier for den inverse kalibrering, samt til vurdering af de optimerede parametre.

Tabel 4 Rodzonedybde (mm) for forskellige afgrøder og jordbundstyper (JB), der er anvendt som initialværdier ved invers kalibrering af modellerne og til evaluering af de optimerede værdier for rodzonedybder.

JB	Vinterhvede	Vårbyg	Majs	Græs
JB1	600	600	600	600
JB2	900	800	900	700
JB3-4	1200	1100	1200	800
JB5-8	1500	1400	1500	900

Til beskrivelse af den tidlige udvikling af fordampningsparametrene er der opstillet en tids-serie for alle tre parametre: RZD, K_c og LAI for jordbrugsafgrøderne. Udviklingen i parametrene er baseret på værdier fra standard DAISY opsætning af fordampningen fra afgrøder (Styczen et al., 2004), men forenklet så der er en lineær udvikling mellem minimums og maksimumsværdierne. Derudover er rodzoneudviklingen justeret så den følger LAI ved ophør af vækstsæson/efter høst. De tidlige udviklinger af RZD, LAI og K_c er illustreret i Figur 3. For landbrugsafgrøderne er den minimale rodzonedybde fastholdt på 150 mm, mens den maksimale dybde indgår i kalibreringen. I Figur 3 er den tidlige udvikling i rodzonedybden afbildet ved dens relative størrelse mellem minimums- og maksimumsværdien, hvor sidstnævnte er givet i Tabel 4. LAI indgår ikke i kalibreringen, men har fastholdte værdier som vist på Figur 3. K_c -værdierne varierer mellem 1,00 og 1,05, men indgår i en følsomhedsanalyse, hvor maksimumsværdien er ændret til 1,10.



Figur 3 Tidslig udvikling af rodzonedybde (RZD), LAI og K_c for landbrugsafgrøder samt skov (bemærk at RZD er angivet relativt til minimums RZD, hvilket er identisk for alle jordtyper).

Den rumlige fordeling af vegetations og afgrøde typer er foretaget ud fra Amtsdatabaser fra 2006 jf. tal fra Danmarks Statistik. Først er arealer med by, søer, skov, permanent græs samt hede og ringe vegetation identificeret ud fra AIS klassifikationen. Det resterende areal er antaget at være landbrugsarealer. For disse arealer er de fire afgrøder (Vinterhvede, Vårbyg, Græs og Majs) fordelt tilfældigt indenfor de gamle amtsgrænser under hensyntagen til de registrerede procentfordelinger mellem afgrøderne. Det vil sige at for et givent Amt overholdes den procentuelle fraktion af en given afgrøde, mens den præcise placering er tilfældig. Andre afgrøder end de fire ovennævnte er inkluderet under disse med hensyntagen til de fire valgte afgrøders indbyrdes fordeling. Den opnåede rumlige fordeling af afgrøder i Danmark er i modelopstillingen fastholdt i tid, så et givent modelgrid altid har samme vegetationstype. Ydermere er landbrugsarealerne underinddelt efter JB-type, således at de fire dominerende JB-typer er repræsenteres for hvert modelområde, hvilket muliggør en differentiering af afgrødernes RZD efter jordtype. Resultatet er ialt 22 vegetationsklasser, fordelt på 4*4 afgrøder og jordtyper samt løvskov, nåleskov, permanent græs, hede/ringe vegetation, søer og by.

Fordampning fra skov

For skov er det antaget, at der er en konstant rodzonedybde, men K_c og LAI (for løvskov) ændrer sig over sæsonen, for at opnå en sæsonvariation mht. fordampningen fra skov. Den valgte parametrisering er angivet i Tabel 5. Modelberegningerne giver herefter en fordampning fra løvskov som er omtrent det samme som fordampning fra en hvedemark, der er velforsynet med vand, dvs. en uvandet hvedemark i Østdanmark og en vandet hvedemark i Vestdanmark. For nåleskov giver det en fordampning, som er cirka 100 mm/år højere end fordampning fra løvskov/hvedemark. I en tidligere undersøgelse har Sonnenborg et al. (2008) opsummeret viden fra danske studier af skovfordampning og konkluderet at (i) der er meget lidt viden om skovfordampning i Danmark; og (ii) undersøgelser tyder på at løvskov fordampner 0-50 mm/år mere end marker og granskove op til 200 mm/år mere end marker. Nye HOBE data (Ringgaard et al., 2011; Figur 31) giver forskelle mellem Gludsted plantage (nåleskov) og vandede landbrugsafgrøder på henholdsvis 50 mm og 150 mm i 2009 og 2010. På den baggrund kan det konstateres, at skovfordampningen i nærværende studie måske undervurderes lidt. Med de små skovarealer, vil det ikke have nogen betydning for vandbalancen for de to oplande, men det kan få indflydelse på lokale forhold i områder med større andele af skove.

Tabel 5 Initiale parameterverdier for skov.

Skovtype	K_c sommer	K_c vinter	LAI sommer	LAI vinter	RZD (mm)
Løvskov	1,05	0.85	6	0.5	1000
Nåleskov	1.5	1.4	8	8	850

Fordampning fra naturområder

Fordampning fra tørre naturområder, som fx hede, er antaget at svare til fordampning fra uvandede græsmarker, og tørre naturområder er derfor i modelberegningerne blevet kategoriseret som sådanne. Våde naturområder som fx vådområder er ikke prædefineret i modelopsætningen, men antages at kunne simuleres af modellen, f.eks. i områder med generelt høj vandstand eller opad rettet strømning.

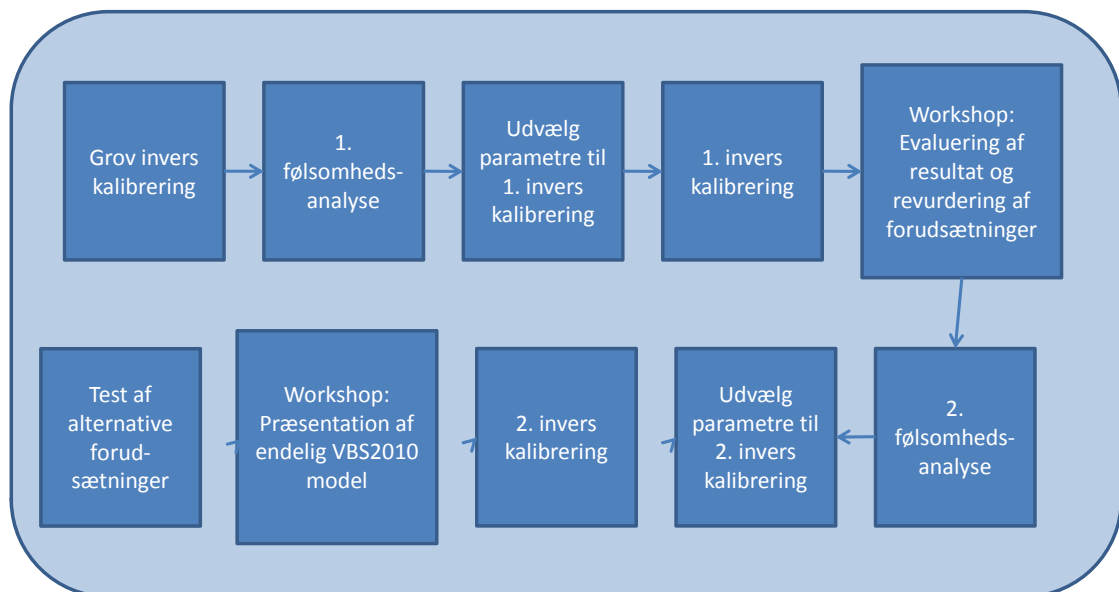
Markvanding

Data for den aktuelt forekommende vandindvinding i form af oppumpninger fra grundvandsmagasinet er medtaget i DK-modellen på baggrund af den information, der findes herom i Jupiter databasen. Dataene for indvinding til husholdning og industri for perioden op til 2006 vurderes at være pålidelig. Data for markvandingen, som i dele af Jylland udgør en væsentlig komponent af vandbalancen, er meget mere usikre. Dels fordi dataene er baseret på strømforbrug omsat til vandmængder, og dels fordi de er selvindberettede uden efterfølgende kvalitetssikring fra en uafhængig instans. Hvis der bliver problemer med at få opfyldt vandbalancen med realistiske forudsætninger om nedbørs og fordampningsforhold, kunne det derfor være relevant at undersøge hypoteser om, at de indberettede tal for markvanding repræsenterer en under- eller overestimering i forhold til den sande (ukendte) markvanding.

Markvanding kan i DK-modellen beregnes automatisk ved at angive de områder, der skal vandes, og en tærskelværdi for hvor stort vanddeficit i rodzonen skal være, før modellen simulerer en vanding. De simulerede vandingsmængder er blevet sammenholdt med de indberettede tal og tærskelværdien er så tilpasset, indtil de modelsimulerede vandingsmængder er af omtrentlig samme størrelse som de indberettede mængder. Det har typisk resulteret i en tærskelværdi for vandingsstart på 50% vanddeficit i rodzonen. Når rodzonedybden medtages som en parameter, der skal optimeres inverst, bør den automatiske vandingsrutine ikke anvendes, fordi forskellige rodzonedybder så vil resultere i forskellige vandingsmængder. Derfor er vandingsmængderne i Vandbalanceprojekt2010 blevet bestemt med en modelkørsel, som både har realistiske rodzonedybder og giver vandingsmængder af samme størrelse som de indberettede tal. Disse vandingsmængder er så lagt oveni nedbørstallene og i oppumpningstallene, hvorefter den automatiske vandingsrutine er slået fra.

2.4.3 Modelkalibrering

Modellerne er kalibreret inverst ved anvendelse af det modeluafhængige optimeringsprogram PEST (Watermark Numerical Computing), og følger samme metodik som ved kalibrering af DK-modellen (Højberg et al., 2010b). Efter kalibrering af referencemodeller, blev forudsætningerne for modelopstillingerne diskuteret på en workshop, hvorefter der er foretaget en supplerende kalibrering med justerede forudsætninger (afsnit 3.2). Processen er illustreret i Figur 4.



Figur 4 Anvendt procedure for følsomhedsanalyse og kalibrering af DK-model

Følsomhedsanalyser

Forud for kalibreringen er der gennemført en følsomhedsanalyse baseret både på inversion med PEST samt manuelle følsomhedsanalyser.

Formålet med følsomhedsanalysen var at identificere de mest følsomme parametre til den inverse kalibrering. PEST blev anvendt til at teste modelparametrenes følsomhed i forhold til observationsværdierne dvs. vandløbsafstrømning og grundvandsniveau. Derudover blev der udført manuelle analyser af parametrenes betydning i forhold de interne vandbalancekomponenter fx fordampning fra rodzonen og strømning fra den umættede zone til den mættede zone.

I PEST blev følsomhedsanalysen udført for hydrauliske, jordfysiske, dræn og fordampningsparametre. Ved de manuelle følsomhedsanalyser blev hydrauliske (lys gul), jordfysiske (mørk gul), dræn- (hvid) og fordampningsparametre (mørkebrun) udvalgt (Tabel 6) og parametrene blev ændret manuelt, så der for hver parameter var en alternativ kørsel at sammenligne med referencekørslen.

Tabel 6 Parametre der var med i de manuelle følsomhedsanalyser. Under kolonnen Analyse er det angivet om parameteren var med i 1. eller 2. manuelle følsomhedsanalyse eller begge og 3 angiver om parameteren var medtaget i PEST følsomhedsanalyse. Se symbolliste for forklaring af parametre.

Parameter	Analyse
Anisotropi	1
SY_Top_ler	1 + 3
SY_Top_Torv	3
SY_ler	1 + 3
SY_Sand (1-2 for RKF)	1 + 3
SY_Mergel	3
SY_Kalk	3
SS_ler (1-2 for RKF)	1 + 3
SS_Sand (1-3 for RKF)	1 + 3
SS_Mergel	3
SS_Kalk	3
F_Kalk	3
Kx_Top_torv	3
Kx_Top_ler	3
Kx_Ler (1-2 for RKF)	3
Kx_Sand (1-3 for RKF)	3
Kz_Top_ler	3
Kz_Ler	3
Kz_Mergel	3
Detention Storage	1 + 3
Dræntid	3
Dræn_D	3
Lækage Koef.	3
Manningstal	1
Bypass	1 + 2
θ_s	1 + 3
θ_{FC}	1 + 3
θ_{WP}	1 + 3
Infiltrationskapacitet	3
Threshold Infiltration	1 + 2 + 3
ET_deficit_fraction	1 + 2 + 3
RZD	3
RZD_Season	1 + 2
LAI	1
K_c	1 + 2

Kalibreringsmål

Som kalibreringsmål er anvendt observerede grundvandspotentialer, og daglige vandløbs-afstrømningsdata. Kalibreringskriterier er kvadratafgivelsessum (RMSE) og middelfejl (ME) for grundvandspotentialer. For vandløbsafstrømningen er der medtaget tre kalibreringsmål: (i) Nash-Sutcliffe (R^2) for hele kalibreringsperioden; (ii) den samlede vandbalancefejl for hele perioden (WBE); og (iii) vandbalancefejl for sommerperioden juni-august (WBE_{sommer}). Under kalibreringen er det tilstræbt at give en ligelig vægt til henholdsvis potentiale- og afstrømningsdataene. For yderligere detaljering af de opstillede kalibreringsmål henvises til Højberg et al. (2010b).

2.5 Modelberegninger DAISY

Motivation

Den rodzonebeskrivelse der benyttes i DK-model2009 er MIKE SHE's Two-Layer modul. I modsætning til en mere korrekt fysisk beskrivelse baseret på Richards' ligning for umættet zone strømninger, giver Two-Layer modulet en simplificeret beskrivelse med parameter-værdier, der ikke direkte kan baseres på feltmålinger. Den er valgt her af to grunde: (i) i DK-model2009 er der opnået erfaringer med Two-Layer, og det var derfor sikkert at Vandbalanceprojekt2010 kunne gennemføres uden at støde på uforudsete problemer, hvilket var væsentlig på grund af de snævre tidsrammer; og (ii) Two-Layer kræver væsentlig mindre beregningstid, hvilket var afgørende her, fordi computerkapacitet til de inverse PEST beregninger var begrænsende for, hvor mange vandbalancehypoteser der kunne afprøves, og dermed hvor grundige vandbalancestudier, der kunne gennemføres.

Når der kun benyttes én modelformulering, og den oven i købet er semi-empirisk som Two-Layer, kan det være vanskeligt fuldt ud at vurdere troværdigheden af de opnåede parameter-værdier og modelresultaterne for fordampning. Derfor har vi suppleret DK-model beregningerne med DAISY beregninger for nogle få udvalgte beregningssøjler. DAISY er baseret på Richards' ligning for umættet zone strømning, og der er et omfattende erfaringsmateriale med anvendelse af DAISY til beregning af fordampning fra landbrugsafgrøder.

Metodik

Der er gennemført modelberegninger af en række kombinationer af afgrøder-jordtyper-klimadata. Kombinationerne er vist i Tabel 7 og 8 for henholdsvis Ringkøbing Fjord oplandet og Sjælland. For Ringkøbing Fjord er der i visse sædskifter inkluderet vanding. For at sikre samme vanding i de to modelberegninger er vanding først modelberegnet med DK modellen. Vandingsmængder og tidspunkt for vanding indgår som nedbør i klimadata til DAISY modelberegningerne.

Modelberegningerne er gennemført med de typejorde, som er udviklet i forbindelse med VMPIII midtvejsevalueringen. I VMPIII sammenhæng blev der gennemført opstilling af en række typejorde (9-10 kombinationer af hyppigst forekomne kombinationer af A, B og C horisonter opstillet inden for 5 geo-regioner). Vandbalancen blev i forbindelse med VMPIII midtvejsevalueringen på landsplan kalibreret til den overordnede årlige afstrømning som

simuleret med DK-model2003 (Henriksen og Sonnenborg, 2003). Kalibreringen gennemføres ved at justere jordens opadgående hydrauliske ledningsevne (Børgesen, 2009).

Der blev anvendt klimadata i form af daglige middeltemperatur og globalstråling fra DMI's 20 km griddata for perioden 1990 til 2005 (Tabel 9).

De anvendte afgrødebeskrivelser er baseret på DAISY standard beskrivelser (Styczen et al., 2004). Referencefordampningen er beregnet med Makkink ligningen ud fra lufttemperatur og globalstråling. Der er anvendt K_c faktorer (1-1,15) afhængig af afgrødens udviklingstrin. Græs er modelberegnet som rajgræs med fire slet.

Tabel 7 Kombinationer af afgrøder, vanding og klimadata for forskellige 10 km grid og datasæt for beskrivelsen af typejorde (Børgesen, 2009) for Ringkøbing Fjord oplandet.

Id. Nr	Typejorde opdelt	JB nr	Afgrøde	Vanding	DMI
	efter georegion	for georegion			10km grid
RKF1	GEO3JT4	1	Vinterhvede	1	10142
RKF2	GEO3JT6	3	Vårbyg	0	10145
RKF3	GEO3JT4	1	Vårbyg	1	10119
RKF4	GEO3JT4	1	Vinterhvede	1	10197
RKF5	GEO3JT6	3	Vårbyg	1	10198
RKF6	GEO3JT6	3	Græs	0	10145
RKF7	GEO3JT6	3	Vinterhvede	0	10043
RKF8	GEO3JT4	1	Græs	1	10169
RKF9	GEO3JT4	1	Vårbyg	0	10092

Tabel 8 Kombinationer af afgrøder, vanding, klimadata for forskellige 10 km grid og datasæt for beskrivelsen af typejorde (Børgesen, 2009) for Sjælland.

Id. Nr	Typejorde opdelt	JB nr	Afgrøde	Vanding	DMI
	efter georegion	for georegion			10km grid
SJ1	GEO5JT9	7	Vårbyg	0	10142
SJ2	GEO5JT8	6	Vinterhvede	0	10145
SJ3	GEO5JT9	7	Græs	0	10119
SJ4	GEO5JT9	7	Vinterhvede	0	10197
SJ5	GEO5JT8	6	Vinterhvede	0	10198
SJ6	GEO5JT8	6	Vinterhvede	0	10145
SJ7	GEO5JT9	7	Græs	0	10043
SJ8	GEO5JT9	7	Vårbyg	0	10169

Tabel 9 DAISY opsætninger

Nedbørs input	UZ parametre	Betegnelse	Søjler
Dynamisk korrigeret stationsnedbør	DJF griddata	DAISY/DJF Dyn	RKF 1-9 + SJ 1-8
Standard korrigeret gridnedbør	DJF griddata	DAISY/DJF Std	RKF 1-9 + SJ 1-8

3. Resultater

3.1 Korrigerede nedbørdata

Den standardkorrigerede nedbør anvendt i nærværende undersøgelse er baseret på DMI's 10 km griddata, da det er de data, der anvendes i DK-modellen samt i de fleste nationale undersøgelser vedrørende vandbalancen. Dette betyder, at der ikke kan tages højde for individuelle læforhold, hvorfor standardværdierne for lækategori B (Tabel 1) er anvendt som anbefalet i (Plauborg et al., 2002).

Den dynamiske nedbørkorrektion på stationsdata med individuelle læindex er foretaget som beskrevet i afsnit 2.1 for de to modeloplande Sjælland (SJ) og Ringkøbing Fjord (RKF). Beregningerne er lavet for perioden 1990-2006 (inkl.) for 153 og 45 stationer for henholdsvis SJ og RKF. Efter beregningen af nedbørkorrektion er der foretages en interpolation med kriging baseret på daglige variogrammer.

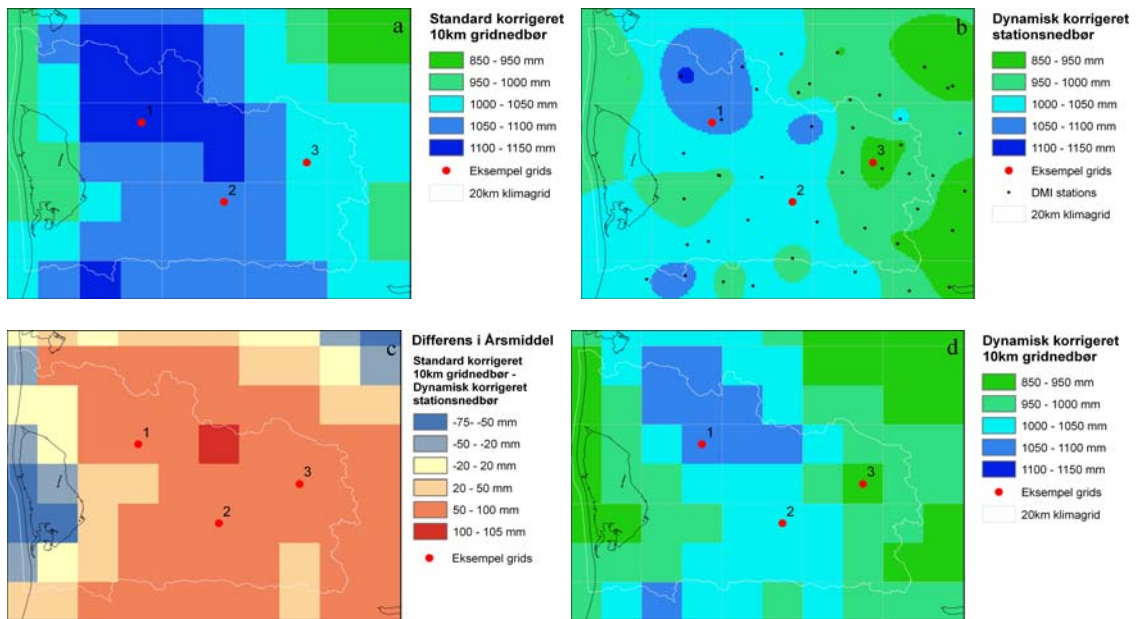
Interpolationen bør ideelt set ske i DMIs Klimagrid 10 km interpolation for at sikre sammenhæng i inputdata til landsdækkende modellering. Det har tidsmæssigt ikke været muligt at nå indenfor rammerne af nærværende undersøgelse, hvorfor ovennævnte metode er anvendt som en tilnærmelse.

Udover den stationsbaserede dynamiske korrektion er dynamisk korrektion beregnet for DMI's 10 km gridnedbør som beskrevet i afsnit 2.1. Den efterfølgende sammenligning af korrigeret nedbør forholder sig primært til forskellen mellem den standard korrigerede nedbør med DMI 10 km griddata og dynamisk korrigeret med stationsdata. Endelig foretages en sammenligning af de to dynamiske korrektioner, for at vurdere effekten af den forsimpning, der ligger i at basere nedbørproduktet på griddata alene.

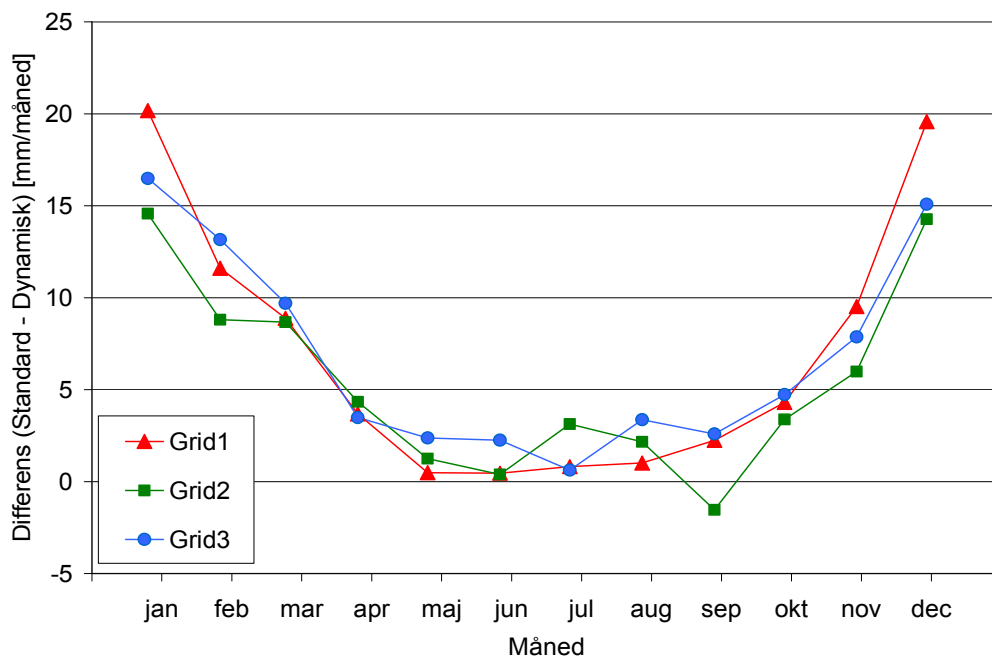
3.1.1 Sammenligning for Ringkøbing Fjord oplandet (RKF)

For Ringkøbing Fjord oplandet (Figur 5) er den dynamisk korrigerede nedbør generelt lavere end den standard korrigerede for perioden 1990-2006. Forskellen udgør omkring 70-80 mm/år i det meste af området. Den sæsonafhængige variation i differensen er illustreret i Figur 6, som viser den månedlige middel differens for tre udvalgte punkter (røde punkter i Figur 5). Af Figur 6 fremgår det tydeligt, at forskellen på de to nedbørprodukter ligger om vinteren, hvor den aktuelle nedbørtype (fast eller flydende) er helt afgørende for den dynamiske korrektion. Den generelle tendens til lavere vinternedbør med dynamisk korrektion indikerer altså, at standard referenceperioden 1961-1990 har været kendetegnet ved koldere (mere snerige) vintre end perioden 1990-2006.

Den observerede forskel i nedbør mellem de to korrektionsmetoder vil have enorm betydning på både den overordnede vandbalance og på den sæsonmæssige dynamik, da der både er tale om en stor forskel i årsmiddel og en væsentlig forskydning af forholdet mellem vinter- og sommernedbør. Samtidig er grundvandsdannelsen til de primære grundvandsmagasiner og minimumsafstrømningen i vandløb meget tæt koblet til nedbøroverskuddet i vinterhalvåret



Figur 5 Rumlig fordeling af gennemsnitlig årsnedbør (1990-2006) for Ringkøbing Fjords opland for: (a) Standard korrigeret gridnedbør; (b) Dynamisk korrigeret stationsdata; (c) Differensen af (a-b); samt (d) Dynamisk korrigerede gridnedbør.



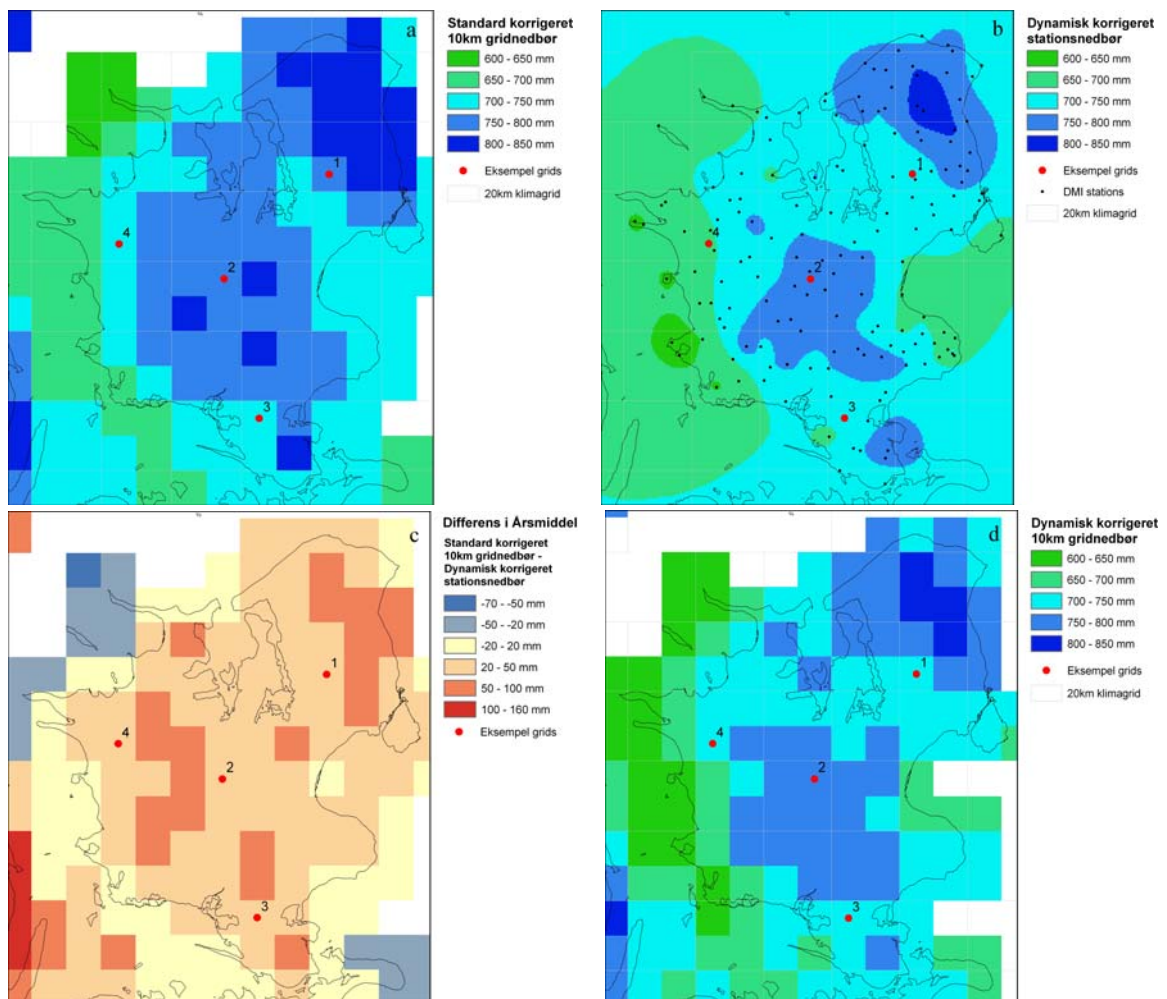
Figur 6 Sæsonvarierende differens mellem standard korrigeret og dynamisk korrigeret nedbør for tre modelgrid i Ringkøbing Fjords opland.

Figur 5d, som angiver den dynamisk korrigerede nedbør baseret på DMI's 10 km griddata, viser, at de to dynamiske nedbørprodukter er meget ensartede både hvad angår årsmiddel

og rumligt mønster. Figur 5c viser, at forskellen på standard korrektion og dynamisk korrektion er relativt jævnt fordelt i størstedelen af oplandet. Ved fjorden og kysten er dynamisk korrektion dog større end standard korrektion formentlig pga. de særlige vind- og læforhold.

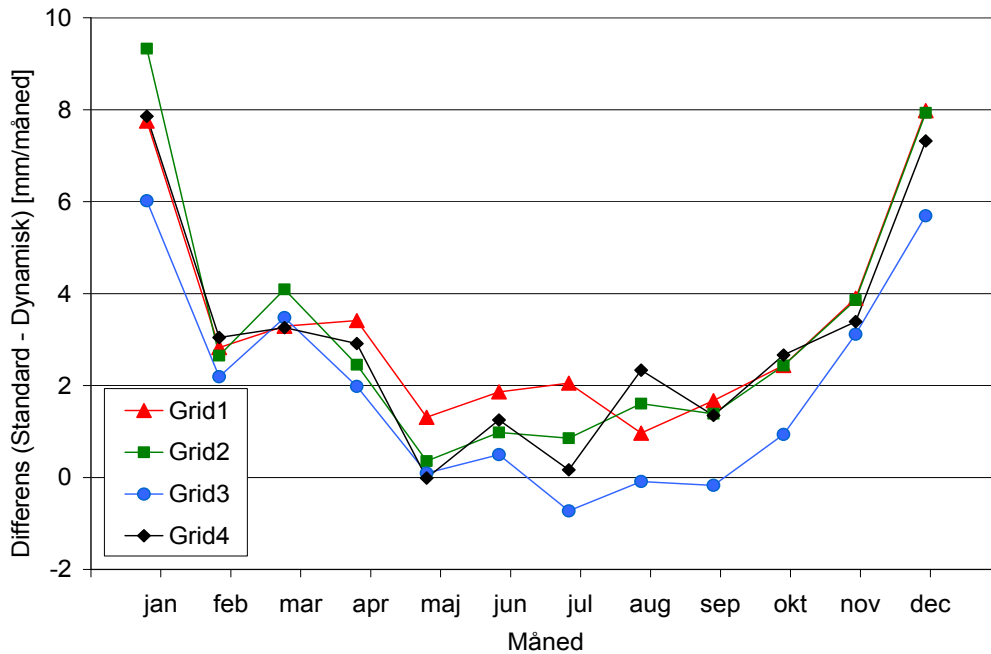
3.1.2 Sammenligning for Sjælland (SJ)

For Sjælland (Figur 7) er den dynamisk korrigerede nedbør ligeledes generelt lavere end den standardkorrigerede for perioden 1990-2006. Forskellen er dog mindre end for Ringkøbing Fjord og udgør omkring 30-40 mm/år i det meste af området. Den sæsonafhængige variation i differensen er illustreret i Figur 8, som viser den månedlige middeldifferens for fire udvalgte punkter (røde punkter i Figur 7). Som for Ringkøbing Fjord ligger forskellen på de to nedbørprodukter om vinteren (primært december og januar).



Figur 7: Rumlig fordeling af gennemsnitlig årsnedbør (1990-2006) for Sjælland for: (a) Standard korrigeret gridnedbør; (b) Dynamisk korrigeret stationsdata; (c) Differensen af (a-b); samt (d) Dynamisk korrigerede gridnedbør.

Figur 7d, som angiver den dynamisk korrigerede nedbør baseret på DMI's 10 km griddata, viser ligesom for Ringkøbing Fjord, at de to dynamiske nedbørprodukter er meget ensartede både hvad angår årsmiddel og rumligt mønster.



Figur 8 Sæsonvarierende differens mellem standard korrigeret og dynamisk korrigeret nedbør for fire modelgrid på Sjælland.

3.2 DK-model resultater

3.2.1 Kalibreringsparametre og modelkalibreringer

Som det fremgår af afsnit 2.4.1 indgår der i modelopstillingen med anvendelse af Two-Layer modulet en række parametre til beskrivelse af de overfladenære strømningsveje, fordeling af vandfluxene herimellem samt muligheden for fordampningen fra forskellige dele af systemet. Følsomhedsanalyserne (Appendix A) viste, at flere af disse parametre var betydende for såvel simuleringen af de anvendte kalibreringsmål (potentialer og vandføringer) som for de interne vandbalancekomponenter. For flere af parametrene er effekten af en justering imidlertid ikke entydig, dvs. justering af en enkelt parameter kan have en positiv effekt for nogle oplande men en negativ effekt på andre. For andre parametre er effekterne i højere eller mindre grad komplementære. Da der i nærværende opgave fokuseres på en belysning af den overordnede vandbalance og ikke på modellernes evne til at reproducere de rumlige forskelle, er det valgt at minimere antallet af parametrene inddraget i kalibreringen mest muligt.

Fastholdte parametre

Tabel 10 opsummerer de parametre, det er valgt at fastholde på deres initiale værdier under kalibreringen.

Tabel 10 Parametre det er valgt at fastholde under kalibreringen.

Parameter	Beskrivelse	Betydende	Fastholdt værdi
Parametre beskrivende overfladisk afstrømning (OL)			
Detention storage	Akkumuleret vand på jordoverfladen før der genereres overfladisk afstrømning	(Ja)	6 mm
Threshold infiltration	Opmagasineret vand på jordoverfladen før der sker infiltration til UZ	Ja	0 mm.
Parametre beskrivende vandbalance i umættet zone (UZ)			
ET deficit fraction	Reduktion af fordampning ved reduceret vandindhold i UZ	Ja	0,75. Når grundvandet står under rodzonen (ET-ext. depth), reduceres fordampning når vandindhold er $< 0,75 * \theta_{FC}$
ET-surface depth	Lag under rodzonedybde der beskriver, at der kan ske fordampning fra dyberestående vand pga. kapilær stighøjde	Ja	0 m
Bypass	En del af nedbøren sendes direkte videre (bypasses) til den mættede zone, selvom vandindholdet i UZ er mindre end markkapacitet. Anvendes alene for strukturelle jorde (Sjælland model)	Ja	Ved mere end 70 % af markkapacitet bypasses 10 % af nettonedbør. Bypass reduceres lineært til 0 fra 70 % af markkapacitet til visnegrænsen
Jordfysiske parametre	Vandindhold ved vandmætning (θ_s), markkapacitet (θ_{FC}) og visnegrænse (θ_{WP})	Ja	Fastholdt på værdier i Tabel 3
LAI	Bladarealindeks	Nej	Se Figur 3 afsnit 2.4.2
Minimums rodzonedybde	Minimums rodzonedybde for landbrugsafgrøderne	Nej	150 mm. Da der anvendes en ET-surface depth på 0 m er der nødvendig med en rodzonedybde udenfor vækstsæson for at opnå en fordampning i denne periode.
K_c	Afgrødekoefficient	Ja	Fastholdt for skov som angivet i Tabel 5 afsnit 2.4.2. For landbrugsafgrøder udføres optimering af model med alternativ K_c
Parametre beskrivende vandstrømning i mættet zone (SZ)			
Drændybde	Drænenes vertikale placering	Ja	0,5 m under topografi i hele modelområdet

Hvor der eksisterer erfaringstal fra tidligere studier er disse værdier anvendt som initialværdier. Parametrene "Threshold infiltration" og "ET surface depth" er sat til værdien nul. Effekten af "Threshold infiltration" er i væsentlig grad komplementær til "ET deficit fraction",

og er sat til nul for at holde systemet så simpelt som muligt. ET-Surface depth er en simpel beskrivelse af den kapillære stighøjde, hvis effekt er en forøgelse af rodzonedybden. Da rodzonedybden er distribueret på basis af de jordfysiske parametre, kan den ansues som en effektiv rodzonedybde inkluderende såvel den faktiske rodzonedybde samt den kapillære stighøjde, og parameteren ET-Surface depth er defor udeladt. Kolonnen "Betydende" angiver, hvorvidt parameteren blev fundet at være betydende i følsomhedsanalyserne udført enten vha. PEST eller manuelt. For de jordfysiske parametre blev det indledningsvist forsøgt at medtage disse i kalibreringen. Dette viste sig imidlertid af tekniske årsager ikke at være muligt, hvorfor disse blev fastholdt på værdierne angivet i Tabel 10.

Kalibreringsparametre der indgår i den inverse optimering

Tabel 11 viser parametrene udvalgt til kalibrering.

Tabel 11 Parametre der indgår i den inverse kalibrering af modellerne.

Model		Beskrivelse	Kommentar
RKF	SJ		
Kx_Top_ler		Horisontal hydraulisk ledningsevne for ler i toplag	For Ringkøbing Fjord model er der antaget en anisotropifaktor på 100 ($K_{\text{horisontal}} = 100 * K_{\text{vertikal}}$) for leret i toplaget.
	Kz_Top_ler	Vertikal hydraulisk ledningsevne for ler i toplag	For Sjælland indgå både horisontal og vertikal ledningsevne for top ler
Kx_Sand1		Horisontal hydraulisk ledningsevne for Kvartært sand	Der er antaget en anisotropifaktor på 10
Kx_Ler1	Kz_Ler	Horisontal og vertikal hydraulisk ledningsevne for Kvartært ler	
Kx_Sand2		Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært kvartssand	
Kx_sand3		Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært glimmersand	
Kx_Ler2		Horisontal hydraulisk ledningsevne for Præ-kvartært glimmersilt/ler	
	Kz_Mergel	Vertikal ledningsevne af Præ-kvartært ler/mergel	
	F_Kalk	Multiplikationsfaktor for hydraulisk ledningsevne i kalk	Rumlige fordeling af hydraulisk ledningsevne er interpoleret, under kalibrering optimeres på niveauet
Dræntid		Dræntidskonstant	Parametrene er antaget uniforme i hele modelområdet
Lækage Koef.		Vandløbslækagekoefficient	
RZD JB1 WW		Rodzonedybde for vinterhvede på jordbundstype JB1	Der er alene kalibreret på rodzonedybden for vinterhvede på JB 1 jorde. Det relative forhold mellem denne og de øvrige rodzonedybder er holdt konstant under kalibreringen på forholdende givet i Tabel 5.

For de hydrauliske ledningsevner blev det antaget, at den horisontale ledningsevne er 10 gange større end den vertikale ledningsevne, med undtagelse af ler i toplaget for Ringkø-

bing Fjord, hvor der blev antaget en anisotropifaktor på 100. For Sjælland blev der anvendt en distribueret hydraulisk ledningsevne for kalken, og under kalibreringen blev der optimeret på en faktor, der ganges på den hydrauliske ledningsevne for kalken (F_{kalk}), dvs. den rumlige variation i den hydrauliske ledningsevne bibeholdes, mens niveauet kalibreres. Dræntidskonstanten samt vandløbslækagekoefficienten blev antaget konstant, men forskellig, for de to modelområder. Den relative variation mellem rodzonedybderne for landbrugsafgrøderne på de forskellige jordbundstyper blev antaget at være som angivet i Tabel 5. Som kalibreringsparametre blev det derfor valgt alene at kalibrere på rodzonedybden for vinterhvede på JB1 jorde, mens det relative forhold mellem denne og de øvrige rodzonedybder blev holdt konstant under kalibreringen.

Med den anvendte forsimpning og fiksering af parameterværdier for de overfladenære strømningsprocesser er rodzonedybden den primære parameter med direkte betydning for fordampningen (de øvrige parametre kan dog indirekte påvirke beregningen af fordampningen, da de evt. kan indvirke på simuleringen af variationer i grundvandstanden). Rodzonedybden mister derfor lidt af sin fysiske betydning, fordi den skal kompensere for "skæve" værdier af de andre parametre af betydning for fordampningen, som ikke er medtaget i kalibreringen.

Modelkalibreringer

For de to modelområder er der opstillet en referencemodel. Referencemodellen er opstillet som DK-model2009 (Højberg et al., 2010b) med de justeringer, der er beskrevet i afsnit 2.4.2. For referencemodellerne er der for begge modelområder gennemført to optimeringer, hvori der anvendes henholdsvis den dynamisk korrigerede (ud fra stationsdata) og den standard korrigerede nedbør. I denne referencemodel anvendes en maksimal K_c værdi på 1,05 for landbrugsafgrøderne. Der er suppleret med en ekstra invers optimering for begge modelområder med anvendelse af en alternativ maksimal K_c værdi på 1,10 for landbrugsafgrøder og anvendelse af den dynamisk korrigerede nedbør. Ringkøbing Fjord modellen er endvidere optimeret for en variant, hvor markvandingen er forøget med 25 % på alle marvandingshændelser, ligeledes med en maksimal K_c på 1,10 for landbrugsafgrøderne. Alle inverse optimeringer er gennemført med kalibreringsværktøjet PEST. Tabel 12 giver en oversigt over de gennemførte inverse optimeringer samt de betegnelser der anvendes ved referering til de forskellige optimerede modeller.

Foruden de alternative inverse optimeringer er der gennemført en almindelig forward test-kørsel, hvor de optimerede parametre fra modellen $K_c = 1,10$ er anvendt, men hvor den dynamiske nedbør baseret på stationsdata er udskiftet med den dynamiske nedbør baseret på griddata.

Tabel 12 Oversigt over alternative MIKE SHE modelopstillinger inkluderet i analysen

Nedbørs input	Variationer i model opsætning	Betegnelse	Model område
Dynamisk korrigeret stationsnedbør	Maksimum sommer afgrødekoefficient K_c = 1,05 for landbrugsafgrøder	INV01Dyn	RKF + SJ
Standard korrigeret 10 km gridnedbør	Maksimum sommer afgrødekoefficient K_c = 1,05 for landbrugsafgrøder	INV01Std	RKF + SJ
Dynamisk korrigeret stationsnedbør	Maksimum sommer afgrødekoefficient K_c = 1,10 for landbrugsafgrøder	INV02Dyn	RKF + SJ
Dynamisk korrigeret stationsnedbør	Maksimum sommer afgrødekoefficient K_c = 1,10 for landbrugsafgrøder og markvandingen er forøget med 25 %	INV03Dyn	RKF
Dynamisk korrigeret 10 km gridnedbør	Forward kørsel med samme model opsætning som INV02 (ingen invers optimering)	FWD02DynGrd	RKF + SJ

3.2.2 Kalibrering og validering af referencemodeller

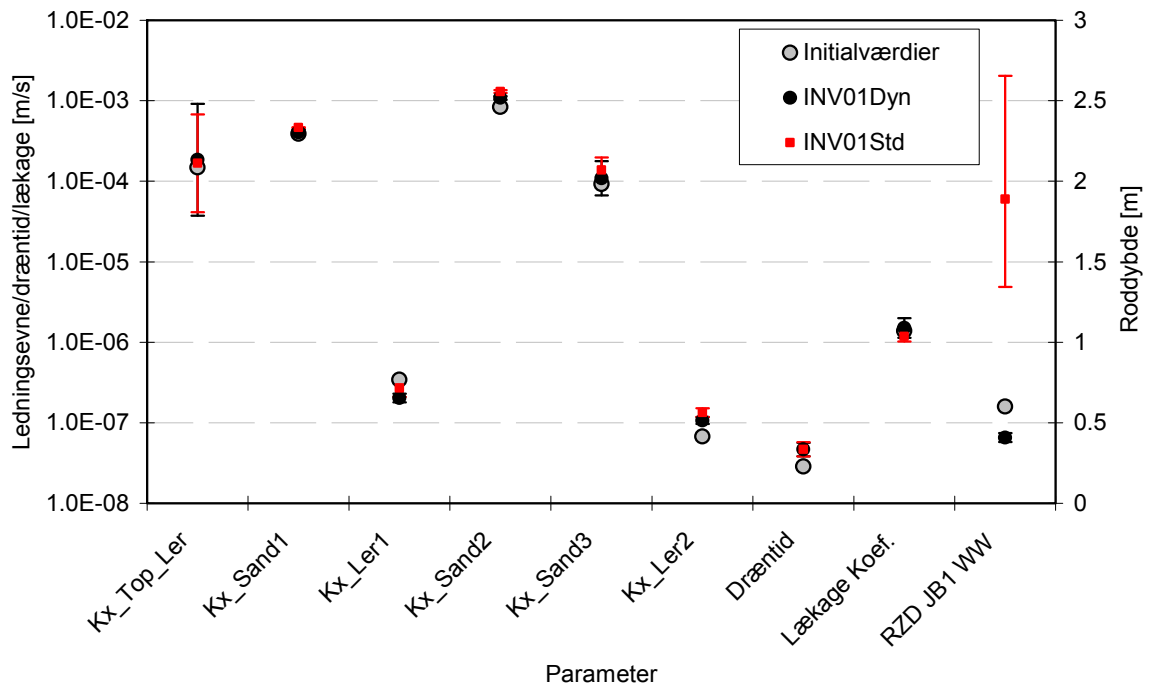
I nærværende afsnit præsenteres resultaterne for kalibrering af referencemodellerne for Ringkøbing Fjord oplandet samt for Sjælland ved anvendelse af henholdsvis dynamisk og standard korrigeret nedbør.

Ringkøbing Fjord oplandet

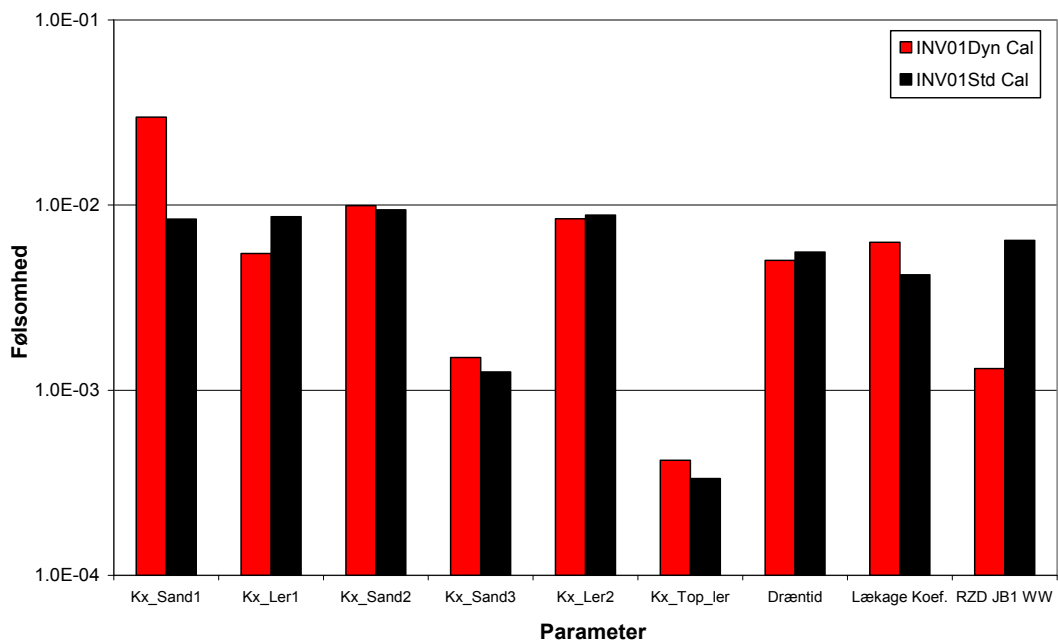
Figur 9 viser de optimerede parametre for Ringkøbing Fjord oplandet for referencemodellen ved anvendelse af henholdsvis dynamisk korrigeret nedbør samt nedbør korrigeret ved standardmetoden. For hovedparten af parametrene opnås der meget sammenlignelige værdier for modelparametrene samt estimerede 95 % konfidensintervaller. Eneste undtagelse er rodzonedybden (RZD JB1 WW: Vinterhvede på jordtype JB1), hvor der estimeres en værdi på 0,40 m ved anvendelse af den dynamisk korrigerede nedbør, hvilket vurderes at ligge indenfor et realistisk niveau. Benyttes derimod den standardkorrigerede nedbør, er den optimerede værdi for rodzonedybden 1,90 m, hvilket ikke er realistisk for en vinterhvede på en sandet jordbund. Ligeledes bemærkes, at anvendelse af standard korrigeret nedbør resulterer i en meget dårligt bestemt rodzonedybde, som også er indikeret ved det betydelige 95 % konfidensinterval for denne parameter (over mere end to dekader).

Med den anvendte parameterisering samt valg af kalibreringsparametre kan fordampningen, og dermed den overordnede vandbalance altovervejende kalibreres ved optimering af rodzonedybden. Med den dynamisk korrigerede nedbør opnås et realistisk niveau for rodzonedybden, der samtidigt er godt bestemt. Den urealistisk store rodzonedybde, der estimeres ved anvendelse af standard korrigeret nedbør indikerer derimod, at der ved dette nedbørinput er behov for en væsentlig større fordampning, idet en større rodzonedybde alt andet lige betyder, at en større vandmængde er tilgængelig for fordampning. Estimering af et bredt konfidensinterval for de optimerede parametre kan have flere årsager, såsom korrelation mellem parametre, manglende følsomhed under optimeringen, eller at parameteren er dårligt bestemt. Den maksimale parameterkorrelation var 0.51 mellem K_{x_Ler1} og

Kx_Ler2, hvilket erfaringsmæssigt ikke er problematisk for kalibreringen. Følsomhederne for de optimerede værdier er vist i Figur 10. Som det fremgår af figuren, har rodzonedybden en mindre følsomhed ved anvendelse af den standard korrigerede nedbør. Følsomheden for rodzonedybden er dog større end for parameteren Kx_Top_ler, der af Figur 9 ses at have et mindre konfidensinterval. Manglende følsomhed er således ikke hele forklaringen til det meget brede konfidensinterval estimeret for rodzonedybden ved anvendelse af standard korrigeret nedbør. Det er derfor sandsynligt, at rodzonedybden er dårligt bestemt, når "den direkte" fordampning og dermed nettonedbøren alene styres af rodzonedybden. Dette indikerer, at der kan være en konceptuel fejl, såsom inkonsistens mellem det anvendte klimainput og observationsdataene.

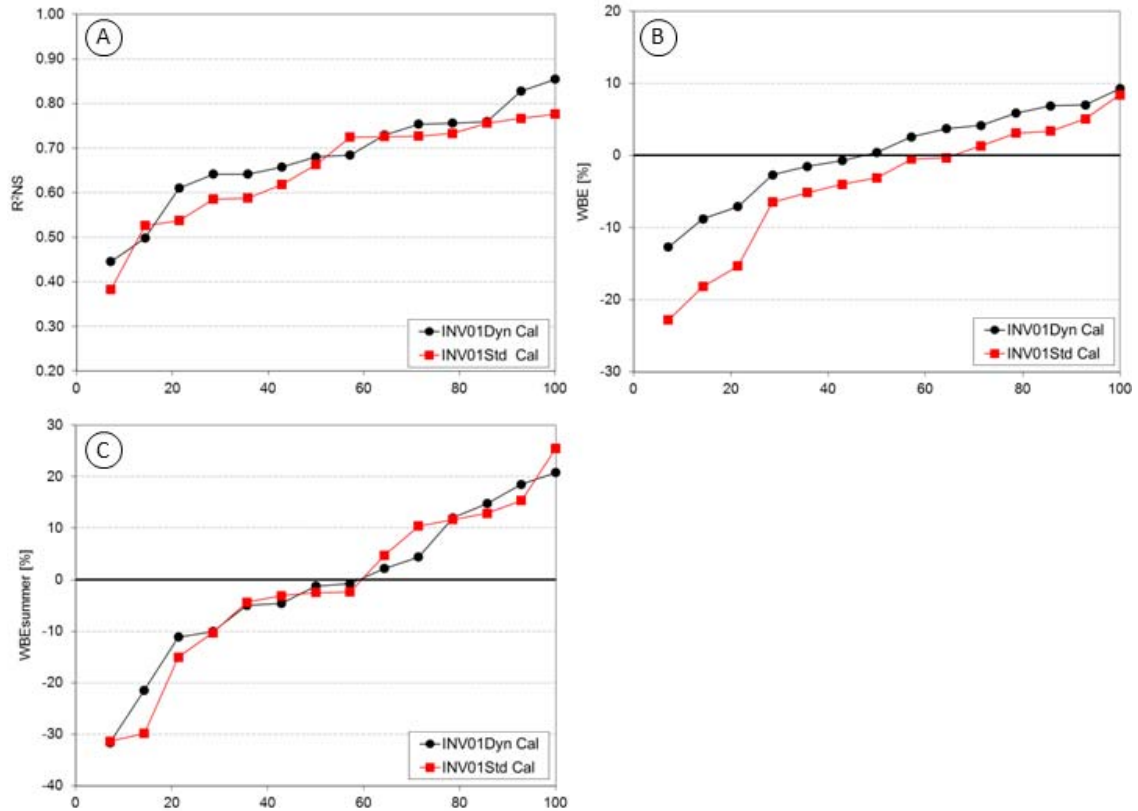


Figur 9 Optimerede parameterverdier for Ringkøbing Fjord model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. Lodrette streger angiver 95 % konfidensintervaller for de optimerede parametre.



Figur 10 Parameterfølsomheder for optimerede parameter for Ringkøbing Fjord model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør

Figur 11 viser kalibreringsresultaterne af den inverse optimering for Ringkøbing Fjord oplandet (Nash-Sutcliffe: R^2 -NS; den samlede vandbalance: WBE; og vandbalancen for sommermåderne juni, juli og august: WBE_{sommer}). Som det fremgår af Figur 11(A), er det muligt at kalibrere modellerne til nævned samme R^2 -værdier (Nash-Sutcliffe), med en anelse bedre resultater med dynamisk korrigerede nedbørinput. Middelværdien for alle stationer for R^2 er 0,68 og 0,65 ved anvendelse af henholdsvis dynamisk og standardkorrigeret nedbør. Vandbalancefejlene viser forskellen mellem den observerede og den simulerede vandføring (henholdsvis årsmiddel- og sommervandføring), dvs. negative værdier opnås for stationer, hvor den simulerede vandføring er større end den observerede, mens positive vandbalancefejl opnås for det modsatte tilfælde. Af Figur 11(B) fremgår det, at årsmiddel vandbalancefejlen for de to modeller ligger forskudt. De største negative vandbalancefejl (dvs. simuleret vandføring er større end observeret) opnås for modellen med standardkorrigeret nedbør. Middel vandbalancefejlen for hele perioden for de to modeller er henholdsvis 0,46 % og -3,91 % ved anvendelse af dynamisk og standardkorrigeret nedbør. Vandbalancefejlen for sommermånederne juni, juli og august er vist på Figur 11(C). Det ses, at de to modeller er meget sammenlignelige mht. deres evne til generelt at ramme sommervandføringen, med en middel vandbalancefejl for sommerperioden på -0,95 % og -1,32 % for henholdsvis dynamisk og standard korrigeret nedbør.



Figur 11 Kalibreringsresultater for Ringkøbing Fjord model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

Performance for trykniveauerne (RMSE og ME) for de to optimeringer af referencemodellen for Ringkøbing Fjord er vist i Tabel 13, beregnet for hhv. de enkelte modellag samt for modellen samlet. Som det fremgår er der meget lille variation i performance mellem de to modeller for de enkelte lag, ligesom der opnås samme middel performance for de to kalibreringsmål. Forskellen på modelperformance for trykniveauet varierede meget lidt mellem kalibrerings- og valideringsperioden og mellem de forskellige modeloptimeringer. Dette skyldes, at den simulerede vandbalance i vandløbene indgår i kalibreringen. For at tilgodese denne bliver der under optimeringen justeret på fordampningsparamterene, så der opnås en nettonedbør, der tilgodeser vandføringen. Forskellen i den samlede årlige nedbør ved hhv. dynamisk og standard korrektion bliver således modvirket ved en forskel i fordampningen så den resulterende nettonedbør for de to modeller er sammenlignelige, se også afsnit 3.2.4. På grund af den meget begrænsede forskel i model performance mht. potentialet for de forskellige optimeringer, er det er valgt kun at vise kalibreringsresultatet i forhold til trykniveau for referencemodellerne for Ringkøbing Fjord oplandet og Sjælland.

Tabel 13 Modelperformance for trykniveau for Ringkøbing Fjord modellen for kalibreringsperioden (2000-2003). Modellens performance er angivet ved RMSE fejl (m) samt middel fejl ME (m) for hvert modellag, samt samlet for hver model.

Model lag	RMSE		ME		Antal observationer
	INV01Dyn	INV01Std	INV01Dyn	INV01Std	
1	2,9	2,9	-1,3	-1,3	65
2	3,3	3,2	-0,4	-0,5	23
3	3,7	3,7	0,1	0,3	324
4	2,7	2,7	-0,4	-0,2	106
5	4,3	4,3	1,0	1,1	338
6	5,3	5,3	0,7	0,8	144
7	3,1	3,0	0,6	0,5	376
8	3,3	3,3	-0,8	-0,8	305
9	5,1	4,9	2,2	2,1	116
10	5,0	4,9	-1,3	-1,3	108
11	4,6	4,7	0,2	0,1	6
Vægtet middel	3,8	3,8	0,2	0,3	

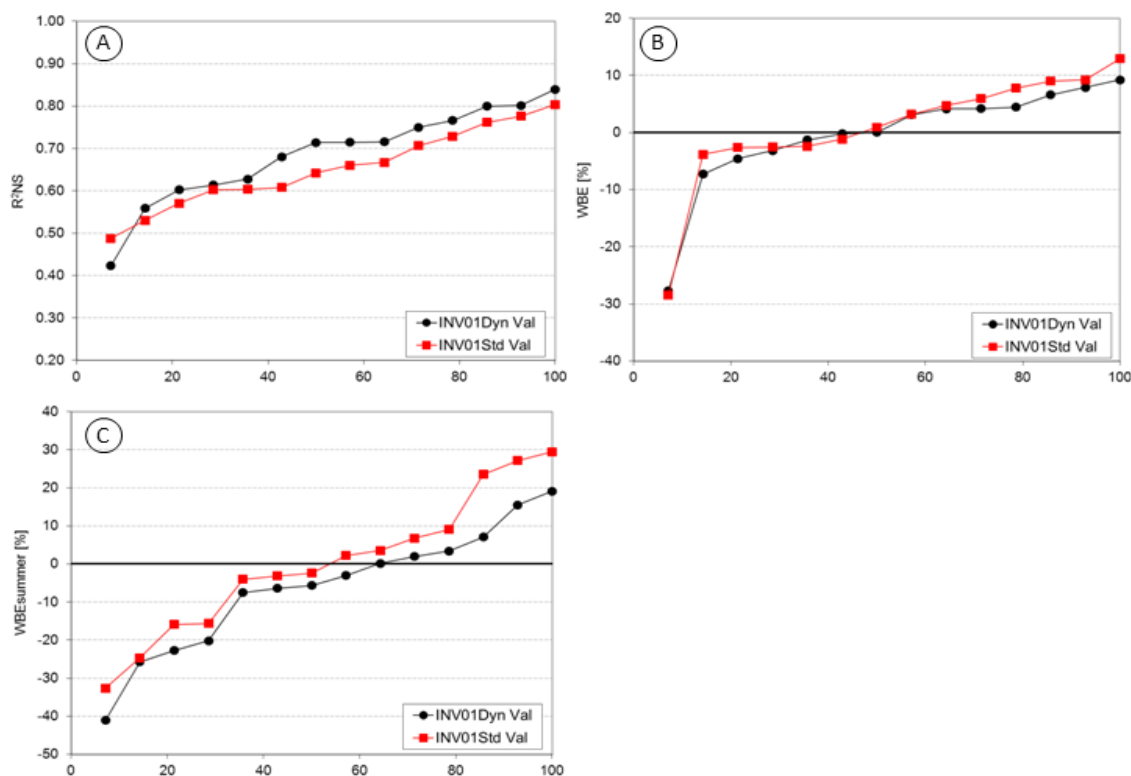
Valideringstestresultater for Ringkøbing Fjord opland

Figur 12 viser performance for vandføringsstationerne beregnet for valideringsperioden, dvs. 1. januar 1995 – 31. december 1999 (som altså ligger forud for kalibreringsperioden, og indeholder bl.a. den tørre periode omkring 1996), mens middelværdierne for performance for henholdsvis kalibreringsperioden og valideringsperioden er vist i Tabel 14. Som det fremgår af både figur og tabel, er der samlet set ikke markante forskelle i modellernes performance for de to perioder.

Tabel 14 Middelværdier for kalibreringsmål for Ringkøbing Fjord oplandsmodel for kalibrerings- og valideringsperiode ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør

	Kalibrering			Validering		
	R ²	WBE	WBE _{sommer}	R ²	WBE	WBE _{sommer}
INV01Dyn	0,68	0,46	-0,95	0,69	-0,32	-6,07
INV01Std	0,65	-3,91	-1,32	0,65	0,91	0,24

Samlet set indikerer optimeringerne for Ringkøbing Fjord modellen således, at det er muligt at opnå sammenlignelige kalibrerings- og valideringsresultater ved anvendelse af de to alternative nedbørinput. Derimod ses der en markant forskel med hensyn til de optimerede værdier for rodzonedybden, hvor kalibrering af modellen med den standard korrigerede nedbør resulterede i en urealistisk dyb rodzone, der endvidere er associeret med et bredt konfidensinterval. Gennem kalibrering af modelparametrene er det således muligt at modvirke effekten af de forskellige nedbørinput, og opnå modeller der performer lige vel med hensyn til de anvendte kalibreringsmål. Det er imidlertid givet, at de to modeller ikke vil give samme resultater for interne vandbalancekomponenter som fx aktuell fordampning.



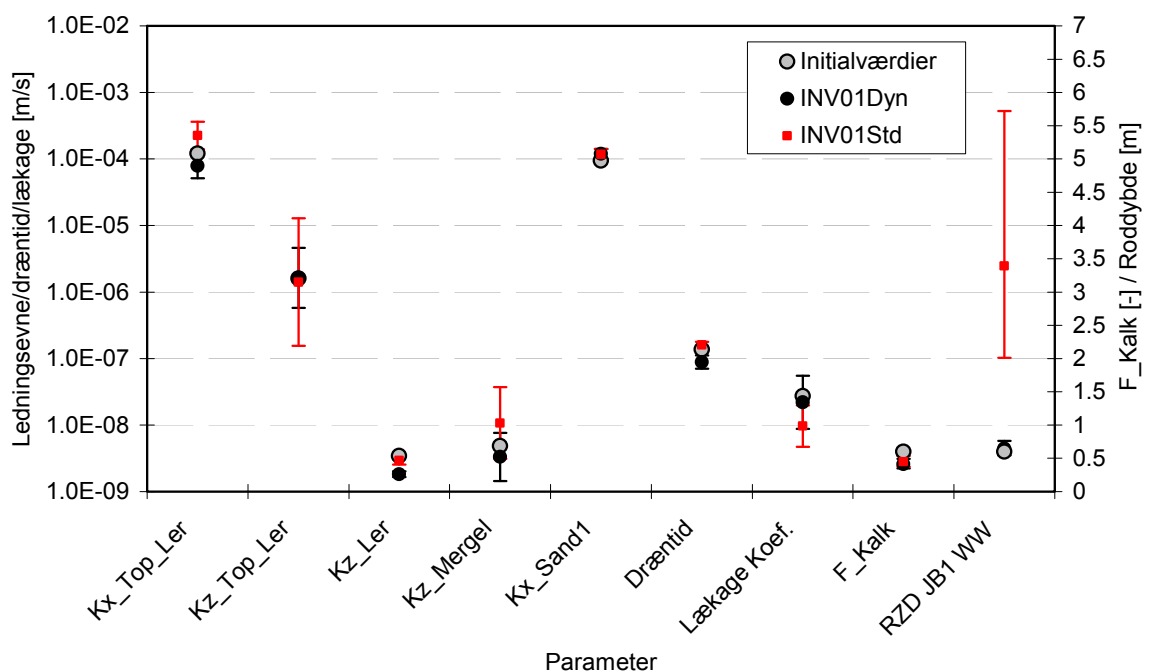
Figur 12 Valideringsresultater for Ringkøbing Fjord model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

Sjælland

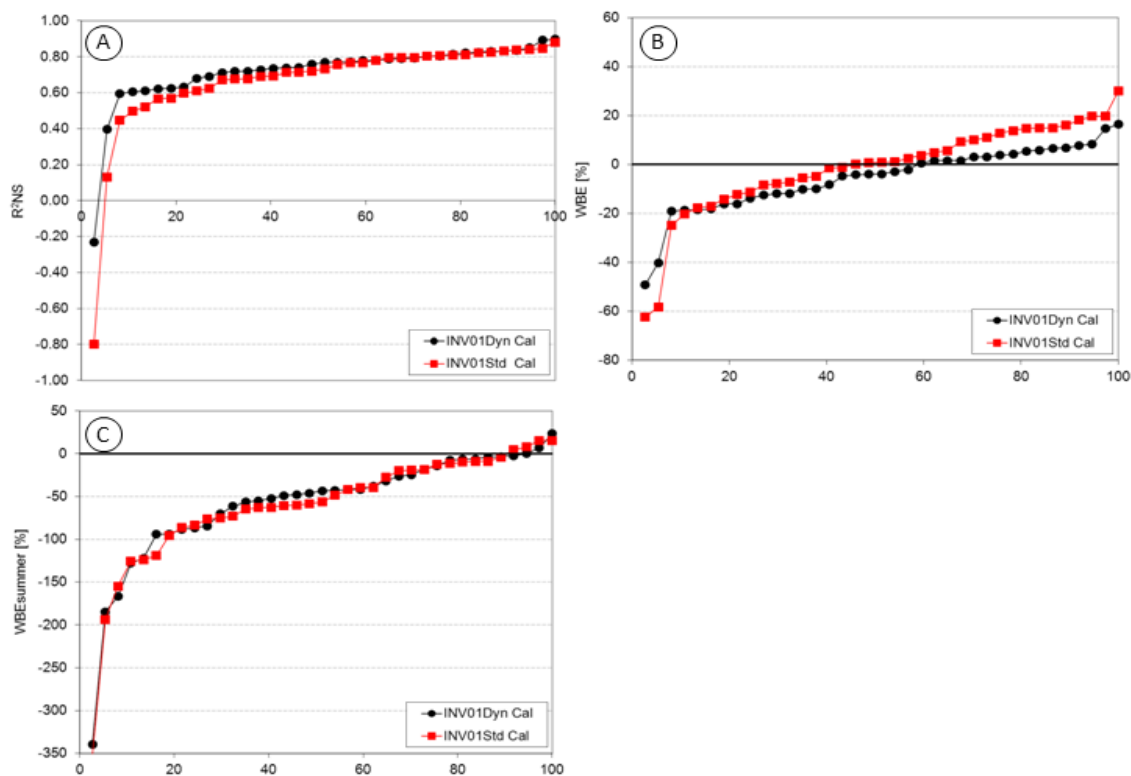
De optimerede parameterverdier for referencemodellen for Sjælland ved anvendelse af henholdsvis dynamisk og standardkorrigeret nedbør er vist på Figur 13. I lighed med resultatet for Ringkøbing Fjord modellen ses, at de to alternative nedbørinput giver sammenlignelige parameterverdier samt 95 % konfidensintervaller for alle parametre med undtagelse af rodzonedybden. Ved anvendelse af dynamisk korrigeret nedbør estimeres en rodzonedybde på 0,65 m, som ligger tæt på de 0,60 m, der er anvendt som initialværdi. Den optimerede værdi for rodzonen ligger derimod på 3,39 m når den standard korrigerede nedbør benyttes, og konfidensintervallet er endvidere meget bredt. Tilsvarende resultaterne for Ringkøbing Fjord, kan det brede konfidensinterval for rodzonedybden ikke forklares ved parameterkorrelationer eller manglende parameterfølsomhed. Den maksimale parameterkorrelationer var 0.64 mellem Lækage Koef. og Kx_Top_ler .

Modelperformance for modellen for Sjælland er vist på Figur 14 og 15 for henholdsvis kalibrerings- og valideringsperioden, mens middelværdierne er givet i Tabel 15. Af figureerne fremgår det, at modellen baseret på den dynamisk korrigerede nedbør opnår en bedre beskrivelse af vandløbsdynamikken, udtrykt ved Nash-Sutcliffe R^2 -værdien, for både kalibrerings- og specielt for valideringsperioden. Det er især oplande med de laveste R^2 -værdier, hvor der opnås en forbedring med den dynamisk korrigerede nedbør. For den samlede vandbalance er der et par stationer, der markerer sig ved en meget negativ vandbalancefejl

for begge modeller (der simuleres en højere vandføring end den observerede). For de øvrige stationer er vandbalancefejlen generelt under +/- 20 % for kalibreringsperioden, mens der i valideringsperioden er flere med en negativ vandbalancefejl, specielt for modellen med den dynamisk korrigerede nedbør. Modellen med standard korrigeret nedbør ses at have et lidt større spænd i de opnåede vandbalancefejl, dvs. en lidt stejlere gradient i Figur 14(B) og 15(B). Dette betyder altså, at modellen med det dynamisk korrigerede nedbør samlet set giver en bedre overordnet tilpasning af vandbalancen. Vandbalancefejlen for sommermånederne ses at være væsentlig større end for Ringkøbing Fjord modellerne, hvilket primært skyldes, at sommervandføringerne i de sjællandske vandløb generelt er meget lave og ofte tæt på nul. Selv en lille absolut fejl på vandføringerne vil derved resultere i en meget stor relativ fejl. For begge modeller ses, at vandbalancefejlen for sommermånederne generelt er negativ, dvs. der simuleres for meget vand i sommerperioderne.



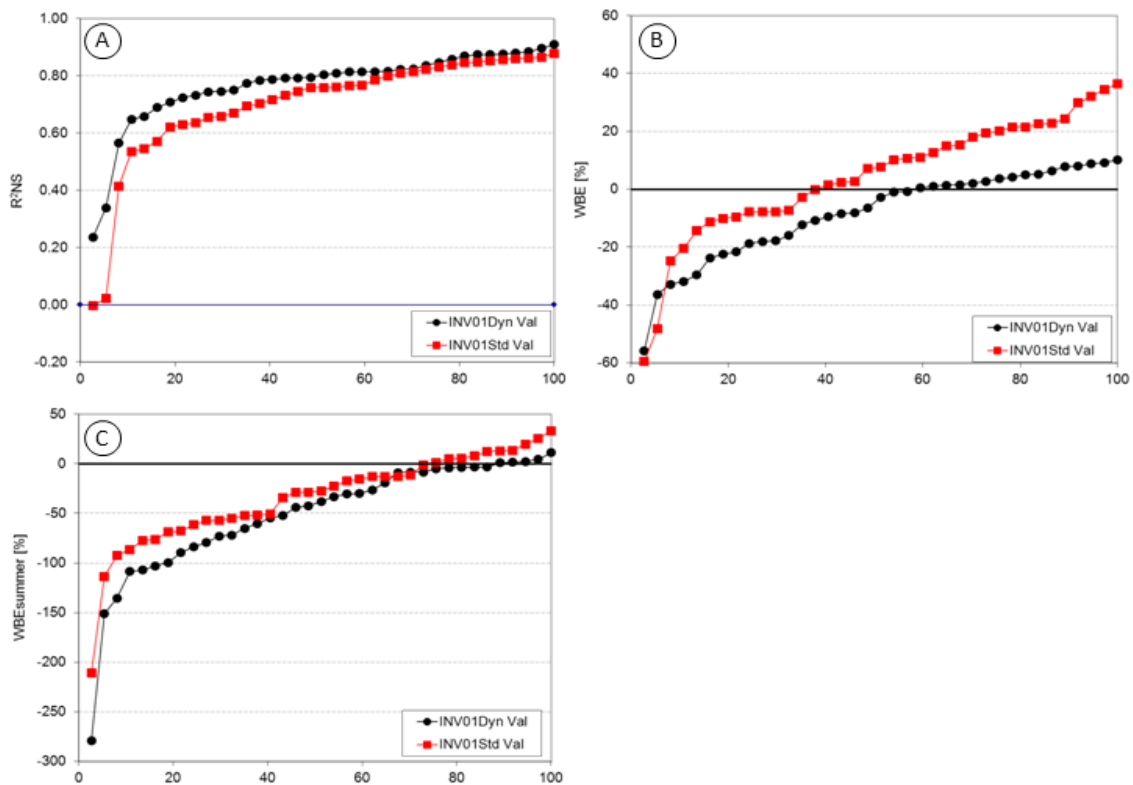
Figur 13 Optimerede parameterværdier for Sjælland model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. Lodrette barer angiver 95 % konfidensintervaller for de optimerede parametre.



Figur 14 Kalibreringsresultater for Sjælland modellen ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

Tabel 15 Middelværdier for kalibreringsmål for Sjælland model for kalibrerings- og valideringsperiode ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør

	Kalibrering			Validering		
	R^2	WBE	WBE _{sommer}	R^2	WBE	WBE _{sommer}
INV01Dyn	0,72	-5,51	-58,16	0,77	-8,32	-51,50
INV01Std	0,66	-1,32	-60,95	0,70	4,51	-34,37

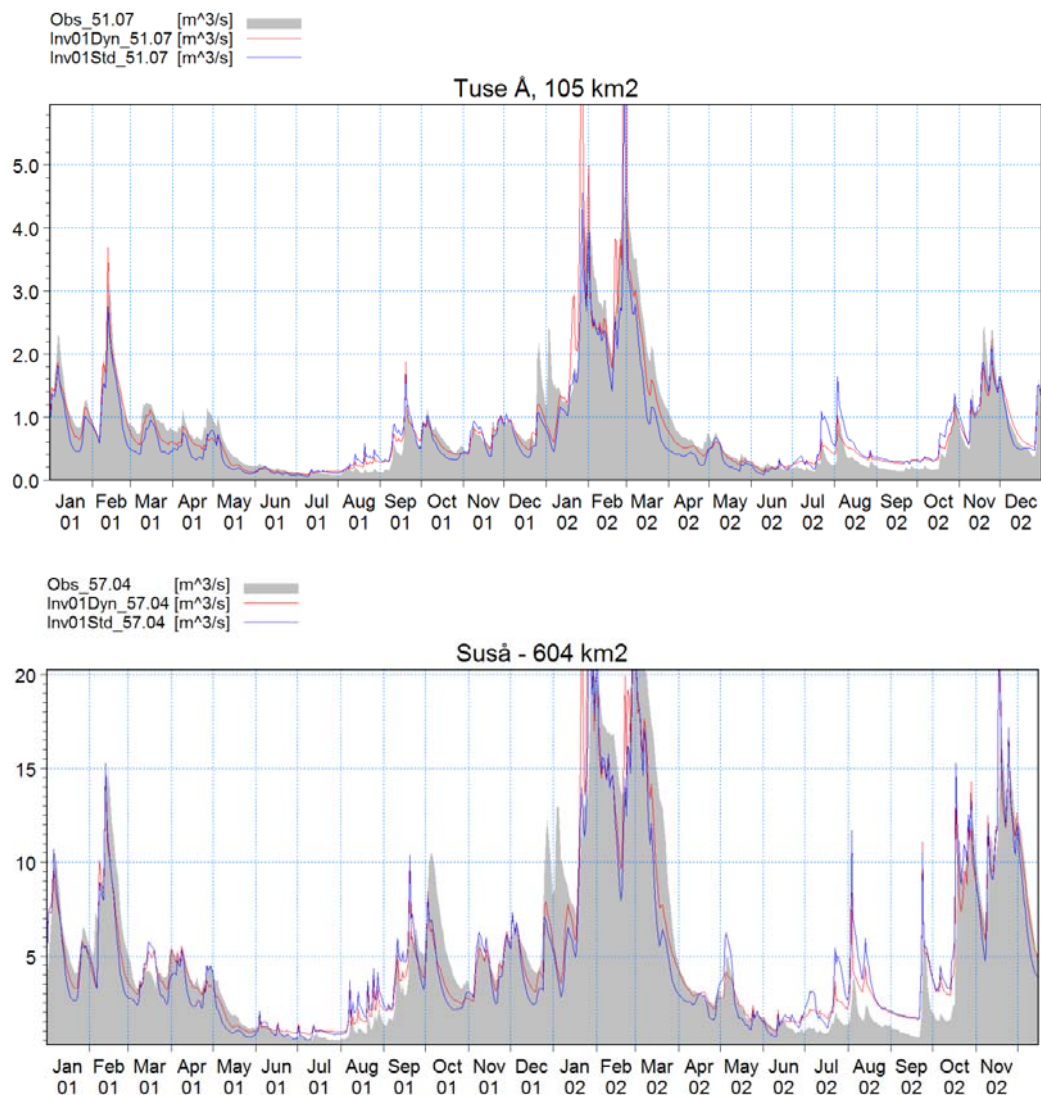


Figur 15 Valideringsresultater for Sjælland model ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

Vandbalancefejlen beregnes som den observerede minus den simulerede samlede vandføring. En negativ vandbalancefejl betyder således, at der simuleres for meget vand i modellen, og jo større vandbalancefejl er numerisk jo større er problemet. Af tabel 15 fremgår det, at modellen baseret på den dynamiske nedbørkorrektion har størst problemer mht. simulering af for meget vand i vandløbene. Dette er umiddelbart paradoksalt, idet standardkorrektion samlet giver den største nedbørsmængde. Årsagen hertil skal søges i den simulerede dynamik. Den øgede nedbør ved anvendelse af den standardkorrigerede nedbør kompenseres ved optimering af en stor rodzonedybde. En dyb rodzone har imidlertid en dæmpende effekt mht. simulering af vandløbsdynamikken. Dette skyldes, at når rodzonen udtørres om sommeren skal et stort jordvolumen mættes op før grundvandsstanden stiger tilstrækkeligt til en aktivering af drænene, og dermed hurtig afstrømning til vandløbene. Med en stor rodzonedybde er kun en lille del af drænene aktive i det tidligere efterår, hvor der observeres hurtige peaks i vandløbene. Den dæmpende effekt af den dybe rodzone forsøges kompenseres ved anvendelse af en højere drænværdi, så de aktive dræn får endnu større betydning mht. en hurtigt udstrømning til vandløbene i det tidlige efterår. En øget dræn tidskonstant resulterer imidlertid også i en overestimering af hydrografernes resession, og vandføringen efter en peak hændelse underestimeres således af modellen, hvilket samlet set resulterer i en underestimering af den samlede vandføring. Dette er illustreret i Figur 16, hvor de simulerede hydrografer for

modellerne med hhv. dynamisk og standard korrigeret nedbør er sammenlignet med den observerede vandføring ved vandføringsstationerne 51.07 (Tuse Å) og 57.04 (Suså).

Forskellen i den simulerede dynamik for de to modeller har kun begrænset effekt på de anvendte kalibreringsmål. Nash-Sutcliffe R^2 -værdien er i overvejende grad styret af peakværdierne, som fanges næsten lige godt af begge modeller: Ligeledes er der ikke væsentlig forskel mht. hvorledes sommervandføringerne simuleres. Af de anvendte kalibreringsmål er det således primært den samlede vandbalancefejl, der indikerer en forskel i modellerne, omend denne er begrænset. Til trods for den sammenlignelige performance af de to modeller, viser Figur 16 dog, at der er væsentlig forskel mht. den simulerede dynamik, og således også i modellernes evne til simulering af det samlede grundvands-overfladevandssystem.



Figur 16 Observerede og simulerede vandføringer i 51.07 (Tuse Å) og 57.04 (Suså).

Modelperformance for trykniveauerne er vist i Tabel 16 for kalibreringsperioden. Som for Ringkøbing Fjord modellen ses kalibreringsresultatet for de to modeller at være meget tæt på hinanden, og ingen af modellerne adskiller sig som signifikant bedre end den anden.

Tabel 16: Modelperformance for trykniveau for Sjælland modellen for perioden 2000-2003. Modellens performance er angivet ved RMSE fejl (m) samt middelfejl (m) for hvert model-lag, samt samlet for hver model.

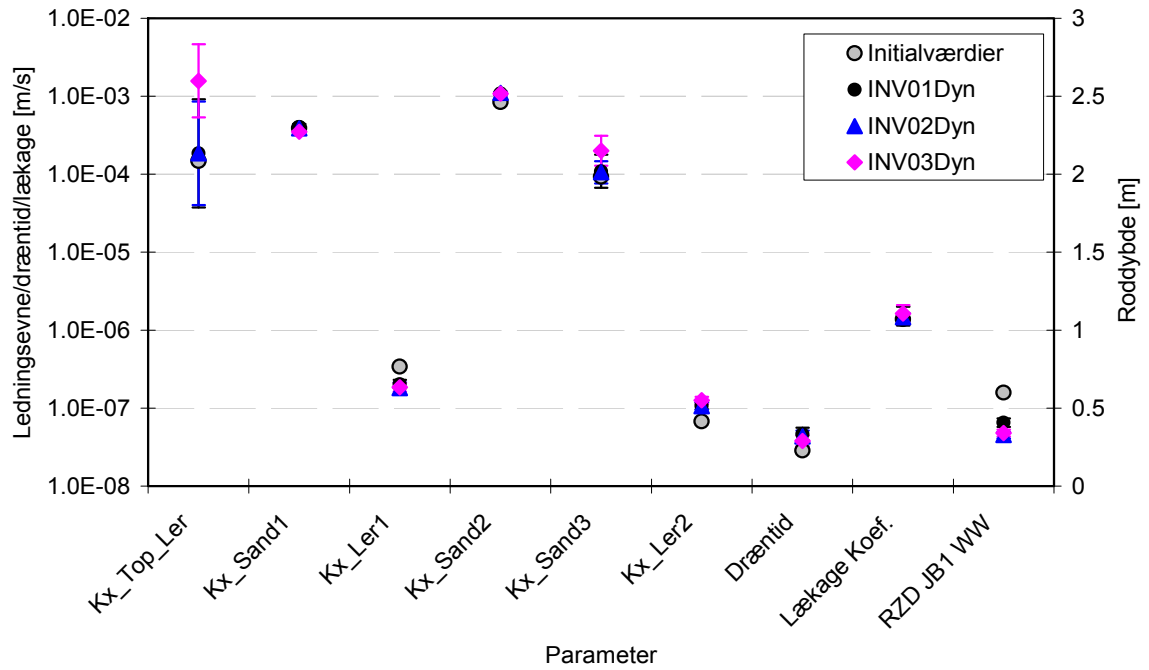
Model lag	RMSE		ME		Antal Observationer
	INV01Dyn	INV01Std	INV01Dyn	INV01Std	
1	4,7	4,5	-4,2	-3,9	22
2	3,5	3,6	-2,1	-2,1	17
3	3,5	3,4	-0,6	-0,2	231
4	4,1	3,3	-1,3	-0,8	10
5	3,3	3,1	1,4	0,9	102
6	6,3	5,9	1,9	2,9	4
7	3,6	3,3	1,9	1,2	28
8	2,9	2,5	1,5	1,0	7
10	3,4	3,2	-1,3	-1,5	649
Vægtet middel	3,5	3,3	-0,8	-0,9	

3.2.3 Yderligere modelberegninger - følsomhedsanalyser

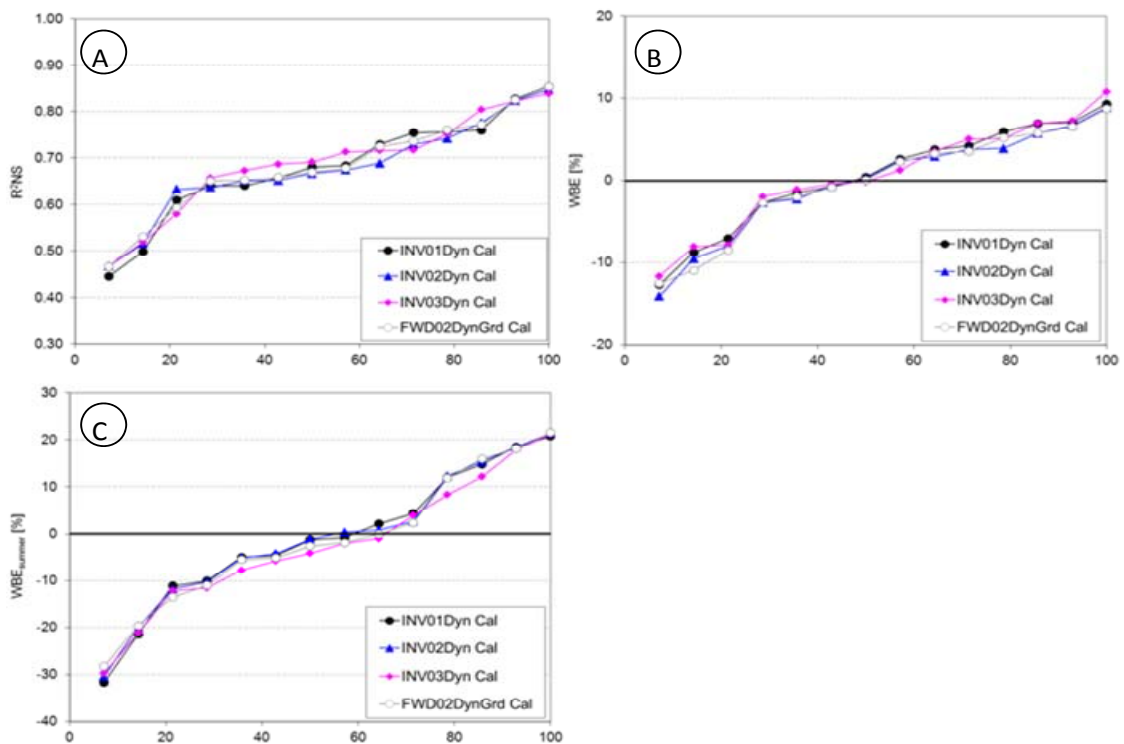
Som supplement til kalibrering af referencemodellerne for de to områder ved anvendelse af henholdsvis dynamisk og standard korrigeret nedbør er der gennemført en kalibrering for alternative modelopstillinger, se Tabel 12.

Ringkøbing Fjord

For Ringkøbing Fjord modellen er der foretaget en invers optimering for to alternative modelopstillinger. I den første alternative opstilling (INV02Dyn) er der anvendt en maksimal afgrødekoeficient (K_c) for landbrugsafgrøder på 1,10 i modsætning til en maksimal værdi på 1,05 anvendt i referencemodellen. Den anden alternative opstilling (INV03Dyn) adskiller sig fra referencemodellen ved, at markvandingen er forøget med 25 %. Begge alternative modelopstillinger er optimeret ved anvendelse af den dynamisk korrigerede nedbør. De optimerede parametre for de alternative modelopstillinger er sammenlignet med resultaterne fra referencemodellen baseret på den dynamisk korrigerede nedbør i Figur 17, mens kalibreringsresultatet for den simulerede vandføring er sammenlignet i Figur 18. Performance for valideringsperioden er udeladt, idet den viser samme tendenser som resultaterne fra kalibreringsperioden.



Figur 17 Optimerede parameterværdier for Ringkøbing Fjord model ved anvendelse af alternative modelopstillinger, se tekst og Tabel 12 for yderligere beskrivelse (INV02: K_c forøget fra 1,05 til 1,10 og INV03: markvanding forøget med 25 %).



Figur 18 Kalibreringsresultater for Ringkøbing Fjord model for alternative modelopstillinger, se tekst og tabel xa1 for yderligere beskrivelse . A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

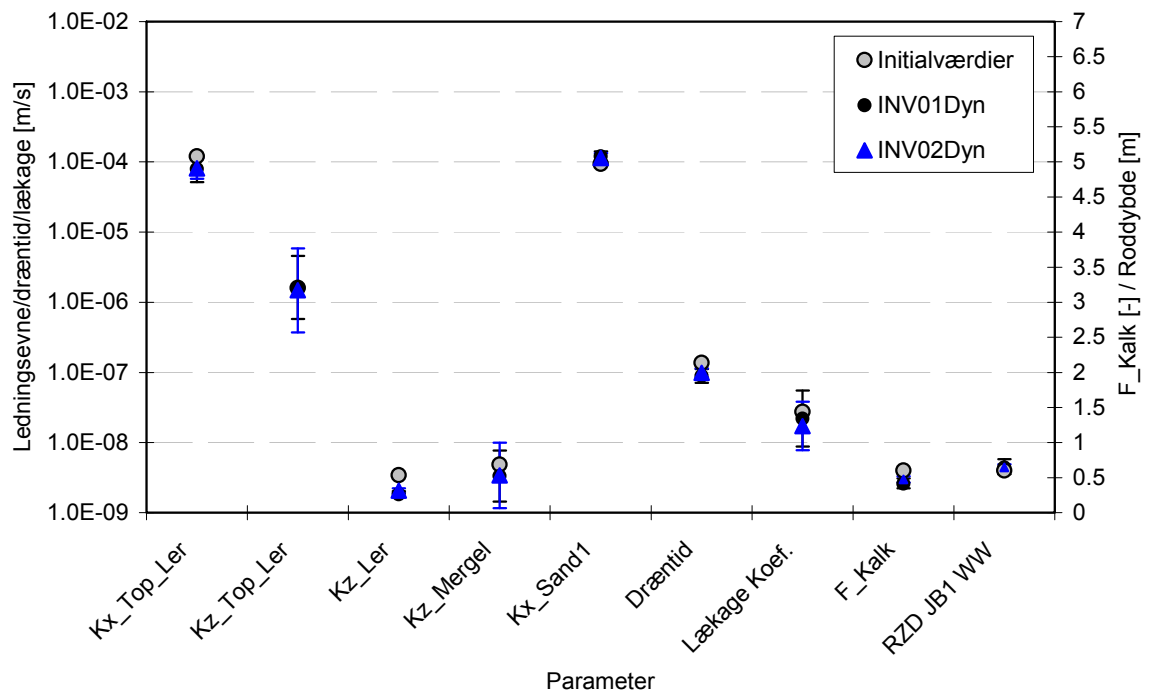
Som det fremgår af Figur 17 er de optimerede værdier for de tre alternative modelopstillinger sammenlignelige. Størst variation af parameterverdierne findes som forventeligt for de dårligst bestemte parametre, dvs. parametre med det bredeste konfidensinterval. For den estimerede rodzonedybde ses, at en øgning af K_c værdien fra 1,05 til 1,10 medfører en mindre reduktion i rodzonedybden. Dette er ikke overraskende, idet en forøget K_c resulterer i en højere fordampning, hvilket kompenseres ved en reduktion i rodzonedybden, så den samlede fordampning er konstant. Ligeledes ses en øget markvanding at medføre en mindre reduktion af rodzonedybden. Dette kan forklares ved, at en øget vanding giver en større vandmætning i den umættede zone, og dermed en større vandvolumen tilgængelig for fordampning, hvilket modvirkes ved en mindre rodzonedybde, så den samlede fordampning ligeledes holdes konstant.

For såvel kalibrerings- som valideringsperioden opnås der meget sammenlignelige resultater for de tre alternative modelopstillinger. Det er således muligt gennem modelkalibreringen at kompensere for variationerne mellem de testede alternative modeller. Dette betyder, at det på basis af de gennemførte modelkalibreringer for Ringkøbing Fjord modellen ikke er muligt at identificere, hvilken K_c værdi der bør foretrækkes. Ligeledes er det gennem modelkalibreringerne ikke muligt at afgøre, hvorvidt de anvendte markvandingsmængder, der er baseret på de rapporterede værdier, er realistiske, eller eksempelvis kunne være 25 % højere i gennemsnit.

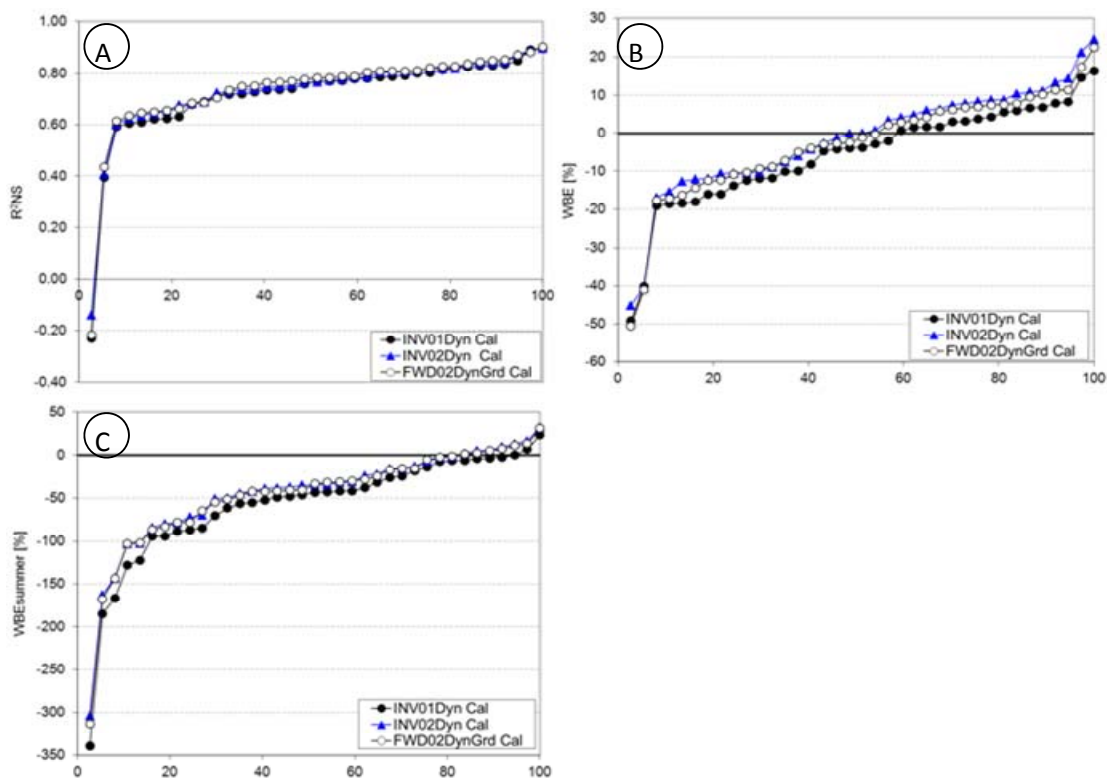
Endelig er der for Ringkøbing Fjord modellen gennemført en forward simulering (FWD02DynGrd) med anvendelse af de optimerede parameterverdier for INV02Dyn, men hvor den dynamisk korrigerede nedbør baseret på 10 km griddene er anvendt i stedet for den dynamisk korrigerede nedbør baseret på stationsdataene. Resultaterne for denne kørsel er sammenlignet med de øvrige alternative modeller for kalibreringsperioden i Figur 18. Som det fremgår af figuren, er performance af modellerne med de to alternative dynamisk korrigerede nedbørdata nær identiske.

Sjælland

For Sjælland modellen er der gennemført en optimering med en alternativ opstilling (INV02Dyn), hvori K_c ligeledes er ændret fra 1,05 til 1,10. De optimerede værdier af modelparametrene er vist i Figur 19, mens performance for kalibreringsperioden er vist på Figur 20. Performance for valideringsperioden er udeladt, idet de viser samme tendenser som resultaterne fra kalibreringsperioden. Som det fremgår af Figur 19, er samtlige parametre for de to alternative opstillinger nær identiske, med en variation på rodzonedybden for vinterhvede for JB1 på godt 1 mm (3 mm for vinterhvede på JB5).



Figur 19 Optimerede parameterverdier for Sjælland model ved anvendelse af alternative K_C værdier, se tekst og Tabel 9 for yderligere beskrivelse.



Figur 20 Kalibreringsresultater for Sjælland modeller med alternative K_C værdier, se tekst og Tabel 9 for yderligere beskrivelse . A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

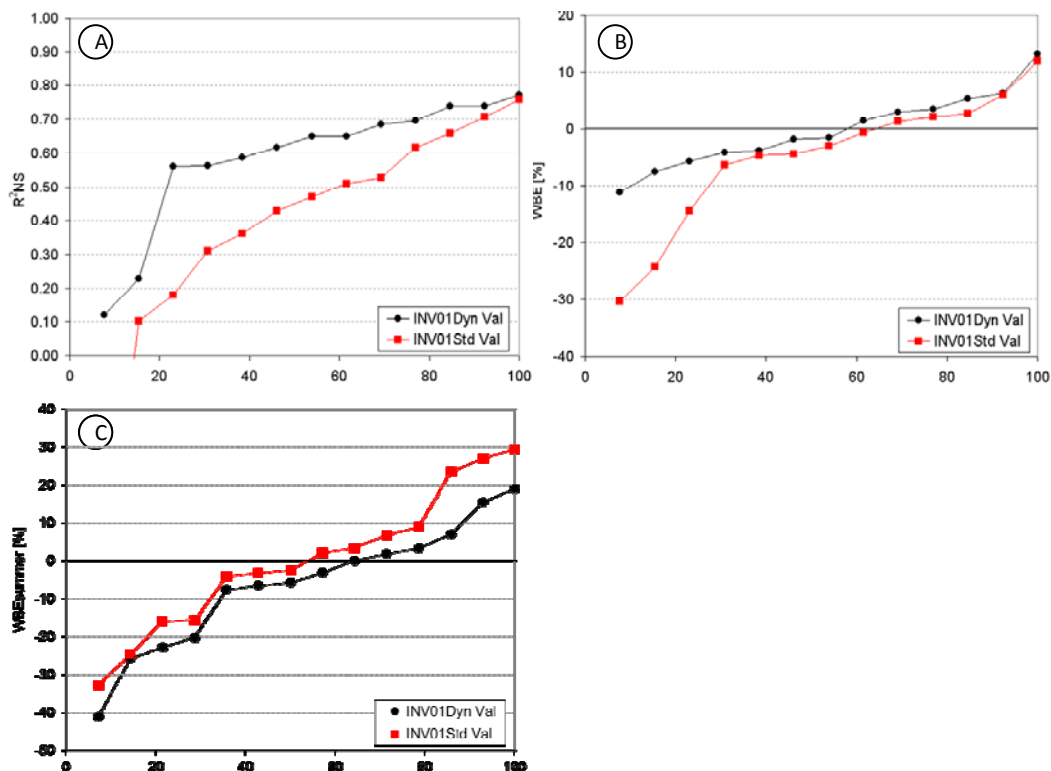
Modellen med K_c på 1,10 performer generelt lidt bedre for både R^2 og på vandbalancen for både kalibrerings- og valideringsperioden. Forskellen mellem de to modeller er dog ikke markant, som det fremgår af Figur 20. Baseret på de gennemførte kalibreringer er det således heller ikke muligt at favorisere den ene K_c værdi frem for den anden.

I lighed med modellen for Ringkøbing Fjord er der gennemført en forward simulering for Sjælland modellen med anvendelse af parameterværdierne optimerede i INV02Dyn, men hvor nedbørinputtet er udskiftet med nedbøren korrigeret dynamisk på basis af griddata fremfor stationsdata. Performanceresultaterne for denne kørsel er sammenlignet med de to øvrige modeller i Figur 20 for kalibreringsperioden. Som det fremgår af figuren, er der kun meget beskedne forskelle mellem modellerne ved anvendelse af de alternative dynamisk korrigerede nedbør.

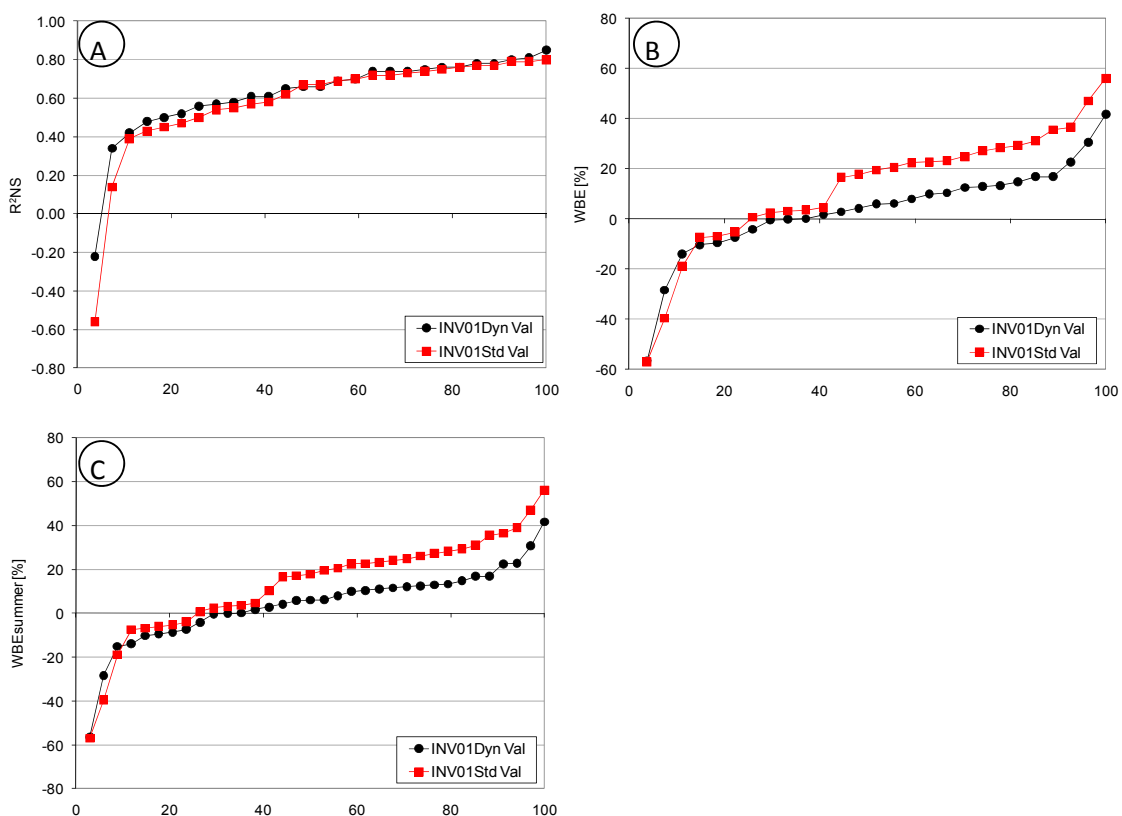
3.2.4 Yderligere modelvalideringer – våde, varme vintre

Som et supplement til valideringskørslerne for perioden 1995-1999 (afsnit 3.2.2) er der foretaget en yderligere validering for perioden 2004-2007, som er karakteriseret ved, at der er relativt mere regn og mindre sne i vintrene, end der er i både kalibreringsperioden 2000-2003 og i den første valideringsperiode 1995-1999.

Resultaterne fremgår af Figur 21 og Figur 22.



Figur 21 Valideringsresultater for Ringkøbing Fjord for perioden 2004-2007 med de varme, våde vintre ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.



Figur 22 Valideringsresultater for Sjælland for perioden 2004-2007 med de varme, våde vintre ved anvendelse af dynamisk (Dyn) og standard (Std) korrigeret nedbør. A) Nash-Sutcliffe (R^2), B) Vandbalance for kalibreringsperiode, C) Vandbalance for sommermånederne juni, juli og august.

Af Figur 21 fremgår det, at Ringkøbing modellen med dynamisk korrigeret nedbør har en væsentlig bedre beskrivelse af både dynamik (R^2 -NS) og årlig vandbalance (WBE), mens sommervandbalancerne er lige gode. Forklaringen herpå er, at modellen baseret på standard korrigeret nedbør i nogle af årene, specielt 2007, giver alt for stor afstrømning. For Sjælland (Figur 22) giver modellen baseret på dynamisk korrigeret nedbør også en bedre performance, selvom forskellen ikke er så stor som for Ringkøbing.

Dette ekstra valideringstest på 2004-2007 er et stærkere test end den første test på 1995-1999, fordi 2004-2007 adskiller sig mest fra kalibreringsperioden. Vi kan derfor konkludere at modellen baseret på dynamisk korrigerede nedbørdata er mest robust i forhold til at simulere hydrologien i perioder, der adskiller sig fra kalibreringsperioden med hensyn til vinternedbørens sammensætning mht. sne/regn. Det er væsentligt bl.a. for modellens evne til at kunne forudsige effekterne af klimændringer.

3.2.5 DAISY modelresultater

De 17 (9+8) DAISY kolonner (Tabel 7 og 8), som er kørt, er så vidt muligt identiske med 17 specifikke gridceller i MIKE SHE opsætningerne for Ringkøbing Fjord oplandet og Sjælland. Det betyder, at de har samme klimainput for nedbør, referencefordampning og temperatur, samme JB type, samme afgrøde og samme markvanding. Der, hvor modellerne er forskellige, er i den præcise jordparametrisering (selvom samme JB-type er anvendt) og afgrødeudvikling (LAI, roddebyde og K_c).

DAISY kolonnerne er kørt med de to forskellige nedbørinput dynamisk korrigeret stationsnedbør og standard korrigeret gridnedbør ligesom MIKE SHE optimeringerne INV01Dyn og INV01Std (Tabel 9).

Resultater for Ringkøbing Fjord oplandet

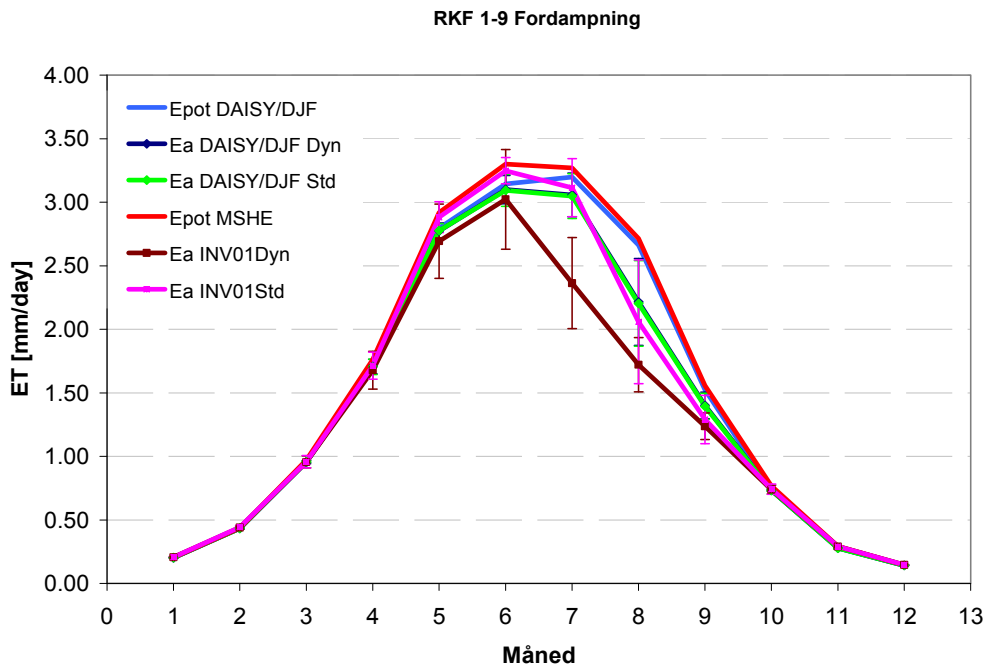
Resultaterne for Ringkøbing Fjord oplandet er angivet som den månedlige middel aktuelle fordampning for alle år (1991-2003) og på tværs af alle DAISY kolonner. Der er nogen variation i resultaterne på tværs af de forskellige kolonner, og derfor er standardafvigelsen indenfor kolonnerne angivet i figurene. Dog er der nogle helt klare tendenser, som fremtræder tydeligt i de midlede fordampningstal.

Figur 23, som viser sæsonvariationen i aktuel og potentiel fordampning for de fire kørsler DAISY og MIKE SHE med henholdsvis dynamisk (Dyn) og standard korrigeret (Std) nedbør, illustrerer den generelle tendens til at tre af kørslerne DAISY/DJF Dyn, DAISY/DJF Std og INV01Std giver højere fordampningsværdier tæt på den potentielle, mens INV01Dyn giver lavere fordampning i sensommeren (juli-august). Desuden ses det, at de to DAISY kørsler, som jo ikke er kalibrede kørsler, giver samme fordampning uafhængigt af forskellige nedbørinput. Dette er helt forståeligt, da forskellen i nedbør ligger i vinterperioden, hvor effekten på fordampning er minimal. Omvendt er MIKE SHE kørslerne kalibreret til at ramme den rette vandbalance, hvorfor forskellene i nedbør må kompenseres via fordampningen.

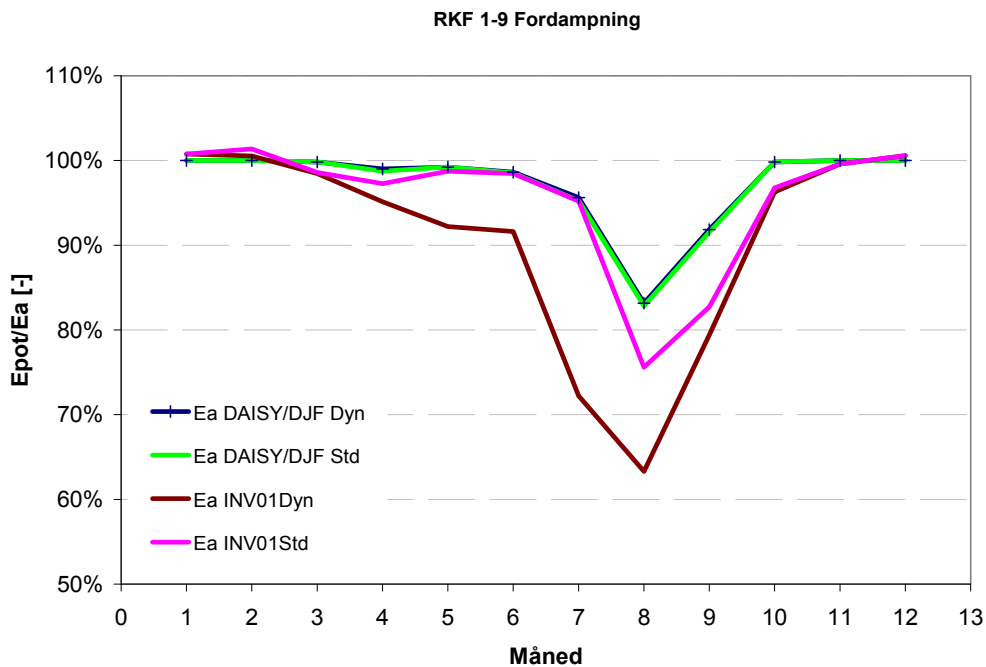
De specifikke fordampningsrater (E_{pot}/E_a) er angivet i Figur 24, som fremhæver den lavere fordampningsrate for INV01Dyn. Betragtes de akkumulerede fordampningskurver, Figur 25, ses det, at de tre kørsler DAISY/DJF Dyn, DAISY/DJF Std og INV01Std giver samme årsfordampning, hvilket er forståeligt, da modelopsætningerne (DAISY og INV01Std) er baseret på den hidtil anbefalede standardkorrigerede nedbør. Omvendt er INV01Dyn den eneste kørsel, der har en fordampning væsentligt under den potentielle fordampning med en forskel på omkring 90 mm/år, mens de øvrige kørsler ligger på en forskel på omkring 30-40 mm/år.

Sammenligning af den simulerede perkolation fra de fire modelkørsler er illustreret i Figur 26, som viser den tydelige forskel i vinterperkolation imellem de to DAISY kørsler, hvilket er en logisk konsekvens af de forskellige nedbørinput og de ensartede fordampningsrater. Derudover ses det, at INV01Std (med den meget store roddebyde) giver et unaturligt perkolationmønster henover året. For INV01Std ses et stort nettooptag fra den mættede zone i april-maj samt en høj perkolation fra den umættede zone i juni og juli. Dette skyldes sandsynligvis den enorme tilgængelige vandmængde, som er resultatet af en fysisk set urealistisk stor roddebyde. Omvendt giver INV01Dyn en mere forventeligt sæsonvariation i perko-

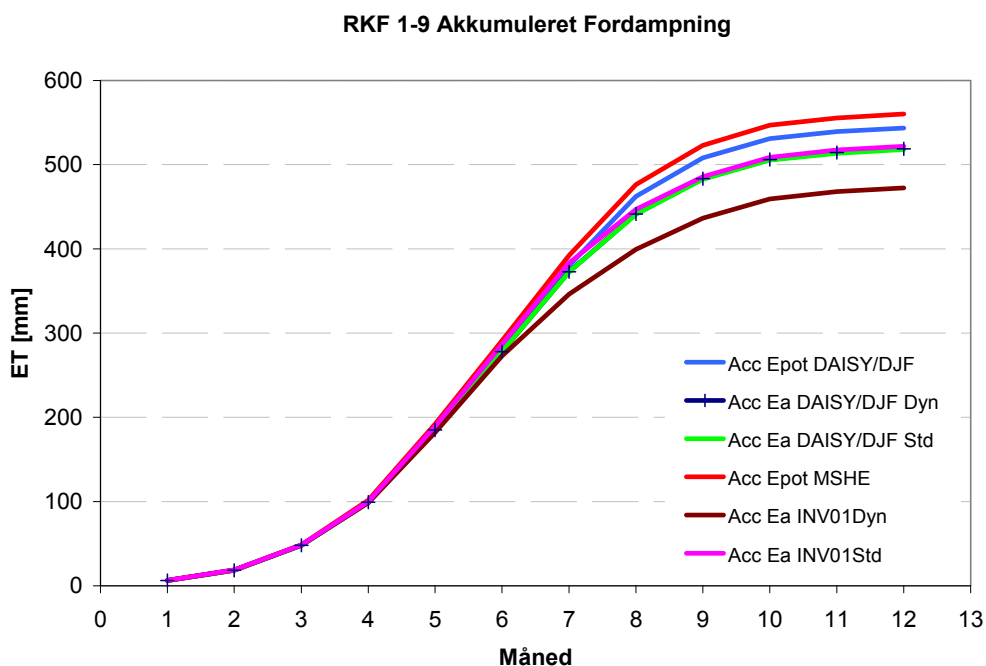
lationen, som er sammenlignelig med DAISY kørslerne. Dog viser begge MIKE SHE kørsler en tendens til at have højere perkolations end DAISY i efteråret, sandsynligvis for at matche de tidlige "peaks" i de observerede afstrømningshydrografer.



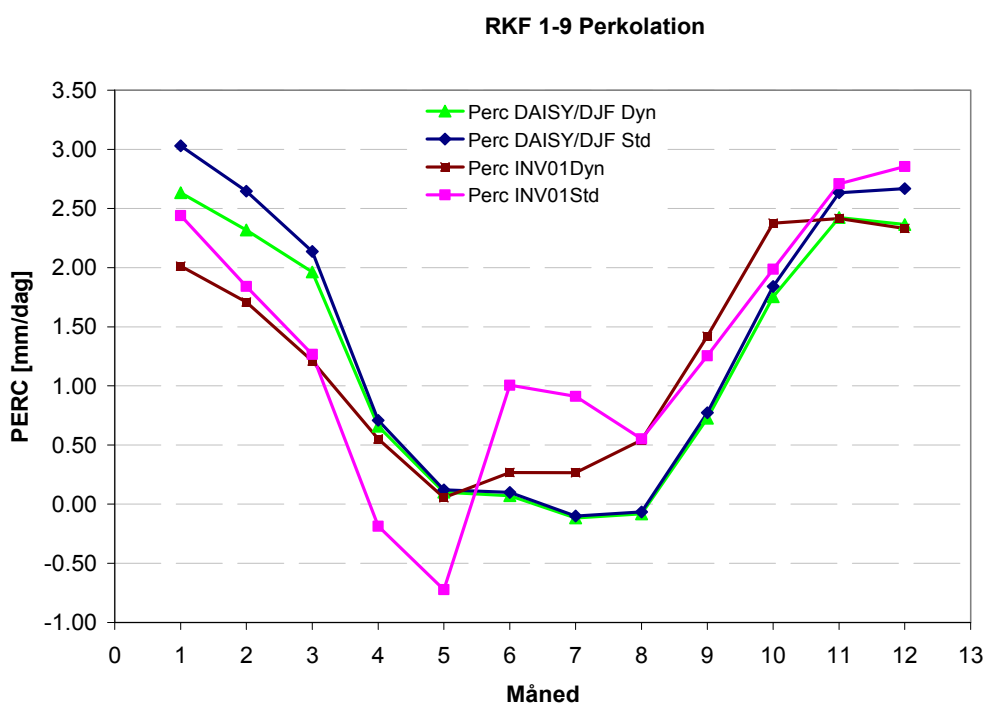
Figur 23: Middel fordampning, aktuel (E_a) og potentiel (E_{pot}), pr. måned for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler RKF 1-9.



Figur 24: Procent aktuel fordampning (E_a) ift. potentiel fordampning (E_{pot}). Middel procent pr. måned for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler RKF 1-9.



Figur 25: Årsakkumulert fordampning, aktuell (E_a) og potentiel (E_{pot}), for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler RKF 1-9.



Figur 26: Månedlig middel perkolation (Perc) for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler RKF 1-9.

Resultater for Sjælland

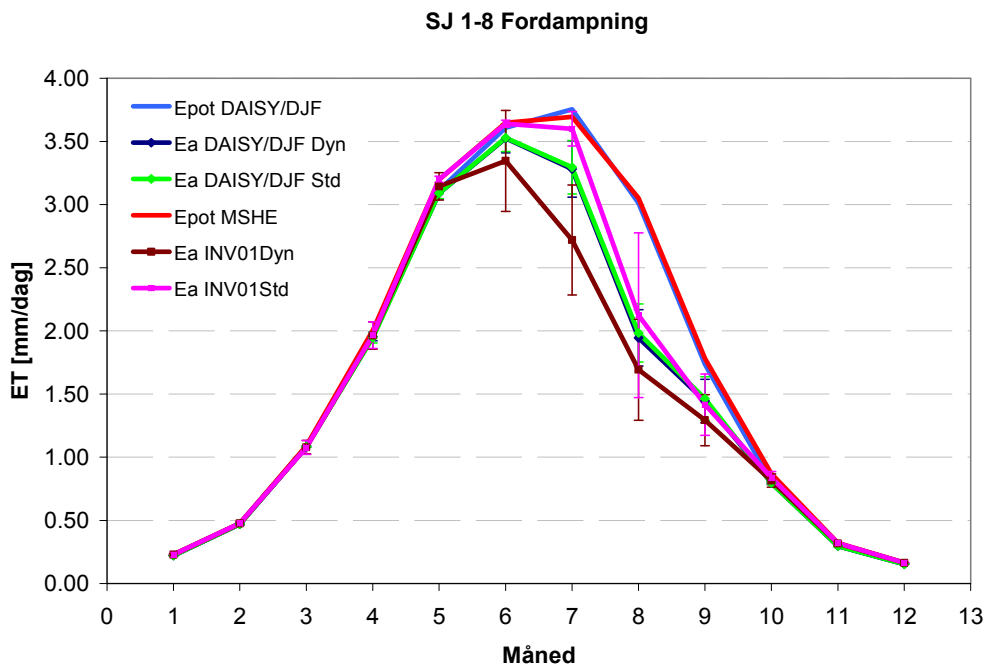
Resultaterne for Sjælland er ligesom for Ringkøbing Fjord angivet som den månedlige middelaktuelle fordampning for alle år (1991-2003) og på tværs af alle DAISY kolonner. Der er nogen variation i resultaterne på tværs af de forskellige kolonner, men dog viser de midlede fordampningstal samme klare tendenser som for Ringkøbing Fjord.

Figur 27, som viser sæsonvariationen i aktuel og potentiel fordampning for de fire kørsler for Sjælland, illustrerer præcist samme generelle tendens som for Ringkøbing Fjord, nemlig at tre af kørslerne DAISY/DJF Dyn, DAISY/DJF Std og især INV01Std giver høje fordampningsrater tæt på den potentielle, mens INV01Dyn giver lavere fordampning i sensommeren (juli-august). Også her giver de to DAISY kørsler samme fordampning uafhængigt af forskellige nedbørinput, mens der er store forskelle på de to MIKE SHE kørsler.

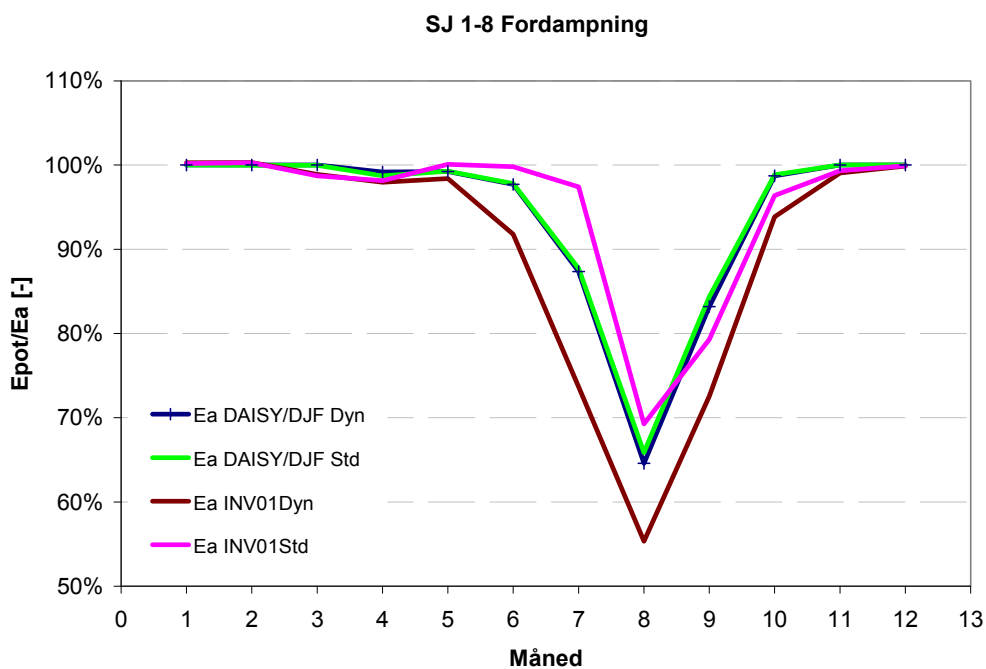
De specifikke fordampningsrater (E_{pot}/E_a) er angivet i Figur 28, som i lighed med figuren for Ringkøbing Fjord fremhæver den lavere fordampningsrate for INV01Dyn. For de akkumulerede fordampningskurver, Figur 29, tegner der sig også samme billede som for Ringkøbing Fjord, idet de tre kørsler DAISY/DJF Dyn, DAISY/DJF Std og INV01Std igen giver samme årsfordampning. Omvendt er INV01Dyn den eneste kørsel, der har en fordampning væsentligt under den potentielle fordampning med en forskel på omkring 100 mm/år, mens de øvrige kørsler ligger på en forskel på omkring 45-55 mm/år.

Sammenlignes den simulerede perkolation fra de fire modelkørsler (Figur 30), ses samme tendens for DAISY kørslerne, med højere perkolation med standard korrigeret nedbør. Til forskel fra Ringkøbing Fjord viser DAISY simuleringerne for Sjælland dog en højere opadrettet flux i sommermånederne.

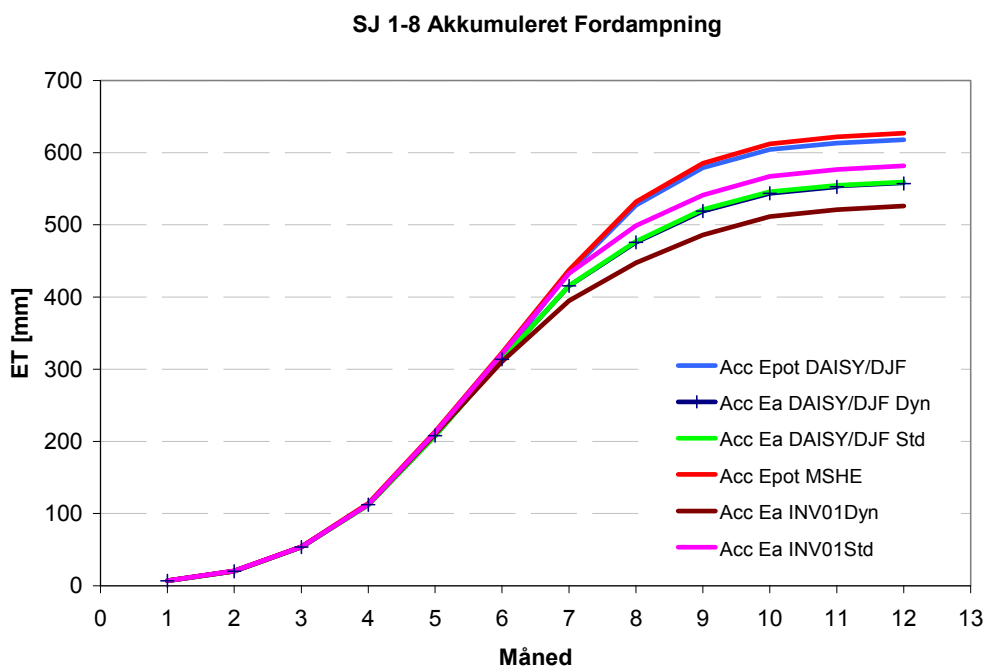
For INV01Std (med den meget store roddybde) ses samme tendens som for Ringkøbing Fjord, nemlig et nettooptag fra den mættede zone i april-maj samt en uventet perkolation fra den umættede zone i juni måned. INV01Dyn viser en mere realistisk sæsondynamik i perkolationen med laveste perkolation i sommermånederne, dog afviger perkulationskurven for INV01Dyn væsentligt fra begge DAISY kørsler, idet variationen mellem vinter og sommer perkolation er langt mindre for INV01Dyn.



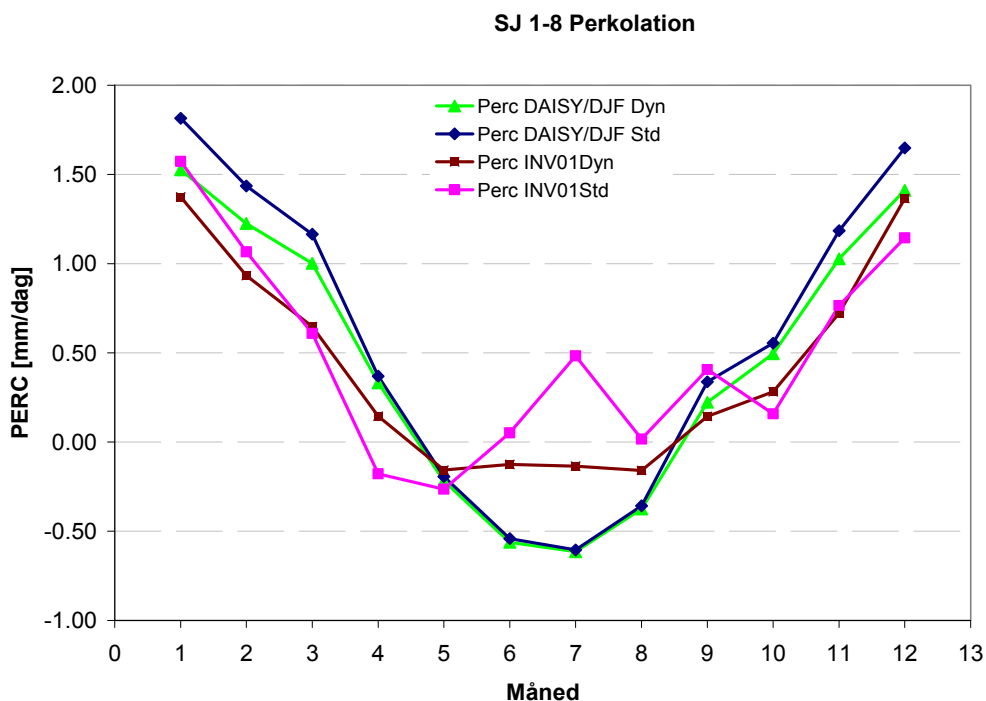
Figur 27 Middelt fordampning, aktuel (E_a) og potentiel (E_{pot}), pr. måned for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler SJ 1-8.



Figur 28 Procent aktuel fordampning (E_a) ift. potentiel fordampning (E_{pot}). Middelt procent pr. måned for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler SJ 1-8.



Figur 29 Års-akkumuleret fordampning, aktuel (E_a) og potentiel (E_{pot}), for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler SJ 1-8.

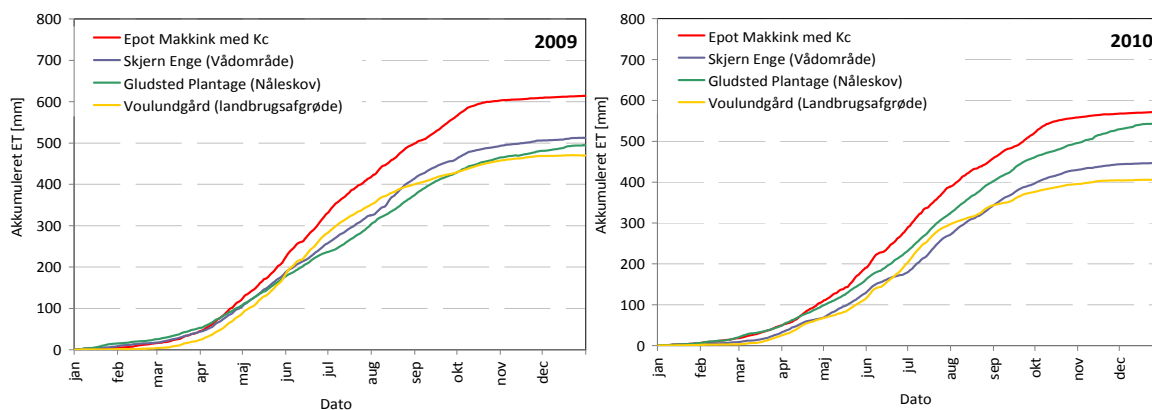


Figur 30 Månedlig middel perkolation (Perc) for alle år 1991-2003 og modelgrids/søjler SJ 1-8.

Sammenligning med HOBE data for aktuell fordampning

To års data er tilgængelige for målte fordampningsfluxe fra HOBE projektet. I HOBE er der opstillet tre eddycorrelationsmaster på tre forskellige overfladetyper i Ringkøbing Fjords opland. De tre overflader er vådområde/eng (Skjern Enge), nåleskov (Gludsted plantage) og vandet landbrugsafgrøde (Voulundgård). Figur 31 viser de akkumulerede fordampninger for de tre overflader samt den potentielle fordampning. Den potentielle fordampning er E_{pot} Makkink fra DMI 20 km grid for Voulund reduceret med en faktor 0,95 (som anbefalet i nærværende rapport) og efterfølgende multipliceret med en afgrødekoefficient svarende til en vinterafgrøde med maksimum $K_c = 1,05$.

Figurerne viser, at der er en betydelig differens mellem potentiel og aktuell fordampning for de pågældende år, især for landbrugslokaliteten, hvor forskellen ligger på omkring 150-170 mm/år. Her er naturligvis tale om en enkelt mark og for to specifikke år, som muligvis ikke er repræsentative for hele oplandet til Ringkøbing Fjord over en længere årrække. Men også engen og nåleskoven viser fordampningsrater under potentiel fordampning, hvilket understreger at modelberegnede fordampningsrater for landbrugsafgrøder midlet over en årrække ikke bør ligge tæt på den potentielle, som det er tilfældet med flere af de her præsenterede simuleringer.



Figur 31: Målt aktuell fordampning fra tre forskellige overflader i Ringkøbing Fjord oplandet. Data er indhentet i HOBE projektet (Ringgaard et al., personlig kommunikation).

4. Konklusioner og anbefalinger

4.1 Konklusioner om resultater af vandbalanceundersøgelse

Nedbørkorrektion

Ved brug af nedbørkorrektion i vandbalanceberegninger giver dynamisk korrektion mere realistiske resultater end standard korrektioner, specielt med hensyn til de resulterende optimerede rodzonedybder og størrelser af aktuel fordampning.

Dynamisk korrektion giver lavere nedbør for begge oplande for perioden 1990-2006 end korrektion med standardværdier baseret på meteorologiske data for perioden 1960-1990. Forskellen er større for Ringkøbing Fjord end for Sjælland.

En beregningsprocedure med (i) korrektion af stationsdata efterfulgt af (ii) interpolation til gridværdier giver teoretisk mere nøjagtige nedbørskøn, end den omvendte rækkefølge som benyttes i dag med (i) interpolation af rådata til 10 km grid efterfulgt af (ii) nedbørkorrektion af griddata med lækategorie B. Vandbalanceprojekt2010 viser, at valget af beregningsprocedure kun har lille betydning for den årlige vandbalance for store oplande, dvs. at dynamisk korrektion baseret på griddata og lækategorie B kan benyttes til de fleste opgaver for større oplande. Andre studier i Ringkøbing Fjords opland har dog vist, at interpolationsmetoden kan have betydning for modellering af mindre oplande (Fu et al., 2011).

Aktuel fordampning (E_a)

Den aktuelle fordampning (E_a) beregnet med DK-modellen giver værdier, der ligger inden for det usikkerhedsinterval, som kan udledes af de foreløbige resultater fra HOBE, hvor der nu er to års fluxmålinger af E_a med eddykorrelationsmetoden. DK-modellens fordampningsrelaterede parameter (rodzonedybden) er realistisk for både Ringkøbing Fjord oplandet og for Sjælland.

Aktuel fordampning beregnet med DAISY opsætninger, der er baseret på DAISY standard og DJF praksis, giver væsentlig højere værdier end E_a beregnet med DK modellen, når der benyttes dynamisk korrigeret nedbør. Hvis der benyttes standard korrigeret nedbør er forskellen væsentlig mindre. De DAISY beregnede E_a værdier er urealistiske, fordi der er alt for lille forskel på E_a og referencefordampningen sammenlignet med fx de foreløbige HOBE målinger.

Det er vigtigt at understrege, at forskellen mellem de realistiske DK-model værdier og de urealistiske DAISY værdier primært skyldes, at beregningsprincipperne er fundamentalt forskellige. DK-modellens fordampningsparametre er bestemt ved parameteroptimering, således at vandføringer simuleres bedst muligt på oplandsskala (invers modellering), mens DAISY opsætningen er baseret på parameterværdier estimeret ud fra feltdata på punktskala (forward modellering). DK-modellens resultater er således direkte baseret på informationer fra vandføringsdata, mens DAISY parametriseringen er lavet (via DAISY standardiserings projektet), så DAISY giver E_a værdier, som gør det muligt at lukke vandbalancen med de forudsætninger, der anvendes i Plauborg et al. (2002). E_a beregnet med andre opsætninger af DAISY ville nemt kunne give andre og mere realistiske fordampningsværdier.

Forskellene på Two-layer og DAISY skyldes derfor ikke, at Two-layer er fysisk mere korrekt end DAISY's beskrivelser af den umættede zone og fordampningsprocesser.

I nærværende projekt er der fokuseret på fordampning fra landbrugsområder, fordi disse områder arealmæssigt er dominerende for vandbalancerne i de to oplande. Der er ikke foretaget grundige vurderinger af fordampning fra forskellige typer skovområder, og de våde naturområder er ikke direkte repræsenteret i modellen. Der er væsentlig større usikkerhed om fordampningens størrelse fra disse områder.

Vanding

Vandbalancen kan simuleres med realistiske parameterverdier, når der benyttes vandingsverdier af samme størrelsesorden som de indrapporterede opgørelser fra Vestjylland. Det var imidlertid ligeledes muligt at opnå realistiske parameterestimater og sammenlignelig modelperformance for en alternativ optimering af Ringkøbing Fjord modellen, hvori markvandingen var øget 25 %. På basis af analyserne udført i Vandbalanceprojekt2010 studiet er det derfor ikke muligt at konkludere, hvorvidt de rapporterede indvindingsmængder til markvanding er korrekte indenfor en spændvidde på 25 %. For at kunne konkludere herom vil det være nødvendigt med et bedre datagrundlag, og der vil desuden formentlig også være behov for at anvende nogle performance kriterier, der er mere følsomme overfor effekterne af vanding.

Overordnet vandbalance

Modelberegningerne i Vandbalanceprojekt2010 viser, at der kan opnås en god hydrologisk beskrivelse med hensyn til (i) vandbalance på oplandsniveau; (ii) trykniveauer i grundvandsmagasinerne; (iii) årstidsdynamik på vandføringer; og (iv) fysisk realistiske parameterverdier og E_a værdier, såfremt der benyttes følgende forudsætninger:

- Dynamisk korrektion af nedbør foretaget enten på nedbørstationsniveau eller baseret på DMI's 10 km klimagrid.
- K_c for landbrugsafgrøder på 1,05 – 1,10 i vækstsæsonen.
- Referencefordampning beregnet med Makkink formlen uden korrektion på Sjælland og med en korrektionsfaktor på 0,95 i Ringkøbing Fjord oplandet.

Analyserne viste, at det afgørende for at opnå realistiske parameterestimater var anvendelsen af en dynamisk korrektion af nedbøren fremfor den standard korrektion, der hidtil har været anvendt i praksis. For de øvrige forudsætninger er det muligt, at andre kombinationer ligeledes kan give gode hydrologiske beskrivelser. Men de bør i givet fald testes, før de anvendes i praksis.

Ovenstående forudsætninger med hensyn til nedbørs- og fordampningsdata giver ikke nogen markant forbedring af DK-modellens simuleringer af sommervandføringer, som til visse formål ikke er tilstrækkelig god.

4.2 Konklusioner om vidensniveau

Den ny viden, der er opnået om de forskellige elementer i vandbalancen siden anbefalingerne i Plauborg et al. (2002), og som danner grundlag for analyserne gennemført i Vandbalanceprojekt2010, giver mere realistiske hydrologiske beskrivelser end ved brug af anbefalingerne i Plauborg et al. (2002).

Der er imidlertid stadig en række videnshuller, hvoraf følgende bidrager med usikkerhed til beskrivelse af vandbalanceelementerne:

- *Korrektion for fast- og blandet nedbør.* Der er ikke fremkommet ny viden siden anbefalingerne i Plauborg et al. (2002). Dvs. den bagvedliggende empiri for udvikling af modellen for korrektion af fast og blandet nedbør i Danmark er baseret på målinger i Finland i forbindelse med WMO eksperimentet for fast nedbør. En af anbefalingerne i det eksperiment var, at der blev arbejdet videre med at teste for mulige regionale og klimatiske forskelle i korrektionsforholdene. Der indsamles derfor i disse år relevante data i HOBE projektet, som indenfor en kortere årrække, når der har været et tilstrækkeligt antal nedbørhændelser med fast og blandet nedbør (det kræver antagelig flere snevintre), vil kunne benyttes til udvikling eller tilpasning af en korrektionsmodel for fast og blandet nedbør baseret på danske data.
- *Korrektion for flydende nedbør.* Den korrektionsmodel, der er benyttet i Vandbalanceprojekt2010, er gennemprøvet og udviklet på basis af målinger i Danmark. Korrektionsberegningerne kan optimeres yderligere sammenlignet med den forholdsvis enkle metode i nærværende studie. Optimeringen går primært på at overholde forudsætningerne for korrektionsmodellen med hensyn til at anvende vindhastigheds- og temperaturdata for en given nedbørperiode (fremfor døgnværdier som i nærværende studie), samt benytte målt regnintensitet (fremfor brug af klimatologiske værdier). Der kan endvidere tages yderligere højde for læforholdene ved de enkelte nedbørstationer, og observationer af nedbørtype kan muligvis inddrages med henblik på en bedre klassifikation af nedbørtypen.
- *Aktuel fordampning.* Der er betydelig usikkerhed omkring størrelsen af den aktuelle fordampning fra landbrugsafgrøder, vådområder og skove. Vandbalanceprojekt2010 er baseret på modelberegninger, hvor modellen er kalibreret mod vandløbsafstrømninger og grundvandstrykniveauer, uden at direkte målinger af fordampningen er indgået. Der er gode data på vej fra Ringkøbing Fjord oplandet (HOBE), men der mangler tilsvarende data fra andre dele af Danmark.
- *Underjordisk udstrømning til havet.* Denne størrelse er meget usikkert bestemt, fordi den ikke kan måles direkte. Der er HOBE undersøgelser på vej for Ringkøbing Fjord, men HOBE resultaterne vil ikke være repræsentative for andre kystområder i Danmark.
- *Vandføringsdata.* Der er hidtil gennemført meget lidt forskning omkring usikkerheder på vandføringsdata i Danmark. Et sådant studie er på vej i HOBE.
- *Oppumpning til husholdning og industri.* Oppumpningsdata fra perioden før kommunalreformen, dvs. data op til 2006 er pålidelige. Men data fra perioden efter 2006 er mangelfulde og af svingende kvalitet.
- *Markvanding.* Data for markvanding er usikre. Det kan i visse områder i det vestlige Jylland påvirke den samlede vandressourceopgørelse.

- *Two-layer rodzonemodellen* er grundlæggende empirisk. Det ville være ønskeligt med beregninger med en mere fysisk baseret rodzonemodel.
- *DAISY standardisering*. De nuværende anbefalinger for parametrisering af DAISY er tilpasset forudsætningerne i Plauborg et al. (2002). Med de nye anbefalinger fra Vandbalanceprojekt2010 vil der være behov for en revision af DAISY standardiseringen.

4.3 Anbefalinger ved anvendelse af data for perioden 1990-2010 til vandbalancestudier

Nedbørkorrektio

- Nedbørkorrektio bør ske med dynamisk korrektio, dvs. korrektionsværdier som varierer fra dag til dag og fra det ene 10 km grid til det andet.
- Der bør beregnes dynamiske korrektionsfaktorer på daglig basis for DMI's 10 km grid for perioden 1990-2010. Korrektionsfaktorerne bør ideelt set beregnes ud fra stationsdata med tilhørende stationsbaseret lækategori, som herefter interpoleres til 10 km grid.

Referencefordampning

- Referencefordampningen kan baseres på Makkink formlen.
- Øst for Storebælt kan Makkink værdierne benyttes direkte, mens de vest for Storebælt bør korrigeres med en faktor 0,95.
- Afgrødekoefficienterne K_c for landbrugsafgrøder i fuld vækst bør være 1,10 i vækstsæsonen.

Aktuel fordampning

- Ved modelberegninger med andre modeller bør den aktuelle fordampning ramme samme niveau på oplandsskala som resultater en ny DK-model version, der er opdateret og recalibreret for hele landet efter samme principper som slutresultatet i dette studie for Ringkøbing Fjord og Sjælland.
- Den årlige skovfordampning bør for løvskov ligge på samme niveau som, eller op til 50 mm/år højere end, fordampningen fra vinterhvede som er velforsynet med vand, dvs. uvandet vinterhvede i Østdanmark og vandet vinterhvede i Vestdanmark. Nåleskov bør ligge 50-150 mm/år højere end løvskov.
- Fordampningen fra tør natur bør ligge på samme niveau som fordampning fra uvandet græs i landbrugsområder.
- Fordampning fra våd natur bør ligge 0-20% over niveauet for referencefordampning.

Parameteroptimering

- Parameteroptimering (invers modellering) bør ske ved anvendelse af objektivfunktioner der sikrer (i) god vandbalance; (ii) god dynamik i vandløbsafstrømning; og (iii) gode simuleringer af grundvandstrykniveauer.
- Den fysiske realisme af de optimerede værdier for modelparametre bør vurderes.
- Den fysiske realisme af de simulerede værdier for aktuel fordampning og perkolation bør vurderes.
- Modelkalibrering bør i øvrigt følge Geo-vejledningen for god praksis i hydrologisk modellering (Refsgaard et al., 2010).

Vanding

- Modellers automatiske vandingsalgoritmer bør slås fra ved invers modellering (parameteroptimering), da modellerne ellers vil kunne ende med helt urealistiske vandingsmængder. Vandingsmængder og tidspunkter for oppumpning skal derfor eksplícit specificeres, hvis de har nævneværdig betydning.

DK-model2009

- DK-model2009 bør recalibreres baseret på anbefalingerne i nærværende rapport. Herved kan anbefalingernes anvendelighed for hele landet testes.

Andre hydrologiske modeller

- Andre hydrologiske modeller, fx DAISY, som benyttes til vandbalanceberegninger baseret på nærværende anbefalinger, bør recalibreres.

5. Referencer

- Abrahamsen P, Hansen S (2000) DAISY: an open soil-crop-atmosphere system model, *Environmental Modelling and Software*, 15:313-330.
- Allerup P, Madsen H (1980) Accuracy of Point Precipitation Measurements. *Nordic Hydrology* 11(2):57-70.
- Allerup P, Madsen H, Vejen F (1997) A comprehensive model for correcting point precipitation. *Nordic Hydrology* 28(1):1-20.
- Allerup P, Madsen H, Vejen F (1998) Standardværdier (1961-90) af nedbørkorrektioner. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 98-10.
- Børgesen CD, Schaap MG (2005) Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*, 127(1-2):154-167.
- Børgesen CD (2009) Landsdækkende modelberegning af kvælstofudvaskning fra landbruget for årene 2003-2007. I: Børgesen CD, Waagepetersen J, Iversen TM, Grant R, Jacobsen B, Elmholt S (red.) Midtvejsevaluering af vandmiljøplan III. Hoved- og baggrundsnotater, Aarhus Universitet, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet s. 101-142.
- Detlefsen NK, Plauborg F (2001) Revurdering af metoder til beregning af referencefordampning (potentiell fordampning). DJF Rapport nr 61 Markbrug.
- DHI (2009) MIKE SHE USER MANUAL, VOLUME 2: REFERENCE GUIDE.
- Fu S, Sonnenborg TO, Jensen KH, He X (2011) Impact of Precipitation Spatial Resolution on the Hydrological Response of an Integrated Distributed Water Resources Model. *Vadoze Zone Journal, Special Section HOBE*, 10:25-36.
- Goodison BE, Louie PYT, Yang D (1998) WMO solid precipitation measurement intercomparison. World Meteorological Organization, WMO/TD 872, Geneva.
- Grant R, Blicher-Mathiesen G, Andersen PM (2009) Ny lokal beregning af nettonedbør. *Vand og Jord*, 16(3):104-108.
- Greve MH, Greve MB, Bocher PK, Balstrom T, Breuning-Madsen H, Krogh L (2007) Generating a Danish raster-based topsoil property map combining choropleth maps and point information. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 107(2):1-12.
- Henriksen HJ, Sonnenborg A (Eds.) (2003) Ferskvandets kredsløb. NOVA 2003 Temarapport. GEUS
- Højberg AL, Trolborg L, Nyegaard P, Ondracek M, Stisen S, Christensen BSB (2010a) DK-model2009 Sammenfatning af opdateringen 2005-2009, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2010/81
- Højberg AL, Trolborg L, Nyegaard P, Ondracek M, Stisen S, Christensen BSB, Nørgaard A (2008) Sjælland, Lolland, Falster og Møn – Opdatering januar 2008, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2008/65.
- Højberg AL, Nyegaard P, Stisen S, Trolborg L, Ondracek M, Christensen BSB (2010b) DK-model2009 Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2010/78
- Jensen KH, Illangasekare TH (2011) HOBE: A Hydrological Observatory. *Vadoze Zone Journal, Special Section HOBE*, 10:1-7.

- Larson LW, Peck EL (1974) Accuracy of Precipitation Measurements for Hydrologic Modeling. *Water Resources Research* 10(4):857-863.
- Mikkelsen HE, Olesen JE (1991) Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning. *Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Beretning S1257. Statens Planteavlsforsøg.*
- Plauborg F, Refsgaard JC, Henriksen HJ, Blicher-Mathiesen G, Kern-Hansen C (2002) Vandbalance på mark- og oplandsskala. DJF rapport. Markbrug nr. 70.
- Refsgaard JC, Trolborg L, Henriksen HJ, Højberg AL, Møller RR, Nielsen AM (2010) God praksis i hydrologisk modellering. *Geo-Vejledning 7, GEUS.*
- Ringgaard R, Herbst M, Friberg T, Schelde K, Thomsen AG, Soegaard H (2011) Energy Fluxes above Three Disparate Surfaces in a Temperate Mesoscale Coastal Catchment. *Vadose Zone Journal, Special Section HOBE, 10:54-66.*
- Scharling M (1999a) Klimagrid - Danmark, Nedbør 10x10 km (ver.2). DMI Technical Report 99-15, Trafikministeriet, DMI.
- Scharling M (1999 b) Klimagrid - Danmark, Nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning, 20x20 og 40x40 km. DMI Technical Report 99-12, Trafikministeriet, DMI.
- Scharling M, Kern-Hansen C (2002) Klimagrid-Danmark. Nedbør og Fordampning 1990-2000, Beregningsresultater til belysning af vandbalancen i Danmark. DMI Technical Report 02-03, Trafikministeriet, DMI.
- Sonnenborg TO, Gundersen P, Refsgaard JC (2008) Sammenligning af vandbalancer for mark og løvskov tre steder på Sjælland - Hvordan påvirker skovrejsning med løvtræer grundvandsdannelsen kvantitativt på lerjorder?
- Stisen S, Sonnenborg TO, Højberg AL, Trolborg L, Refsgaard JC (2011) Evaluation of climate input biases and water balance issues using a coupled surface-subsurface model, *Vadose Zone Journal, Special Section HOBE, 10:37-53.*
- Styczen M, Hansen S, Jensen LS, Svendsen H, Abrahamsen P, Børgesen CD, Thirup C, Østergaard HS (2004) Standardopstillinger til DAISY-modellen. *Vejledning og baggrund.*
- Vejjen F (2005) Pilotprojekt: Beregning af dynamisk korrektion af nedbør på Samsø, 1989-2003. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 05-16, Copenhagen.
- Vejjen F, Allerup P, Madsen H (1998) Korrektion for fejlkilder af daglige nedbørmålinger i Danmark. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 98-9, Copenhagen.
- Vejjen F, Madsen H, Allerup P (2000) Korrektion for fejlkilder på måling af nedbør - Korrektionsprocenter ved udvalgte stationer 1989-1999. Danmarks Meteorologiske Institut, Teknisk Rapport 00-20, Copenhagen.
- Watermark Numerical Computing. Pest – Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition, pp. 336 & Addendum to the PEST manual, pp. 206. Watermark Numerical Computing.
- Yan JJ, Smith KR (1994) Simulation of Integrated Surface Water and Ground Water Systems - Model Formulation. *Water Resources Bulletin, 30(5), 1-12.*

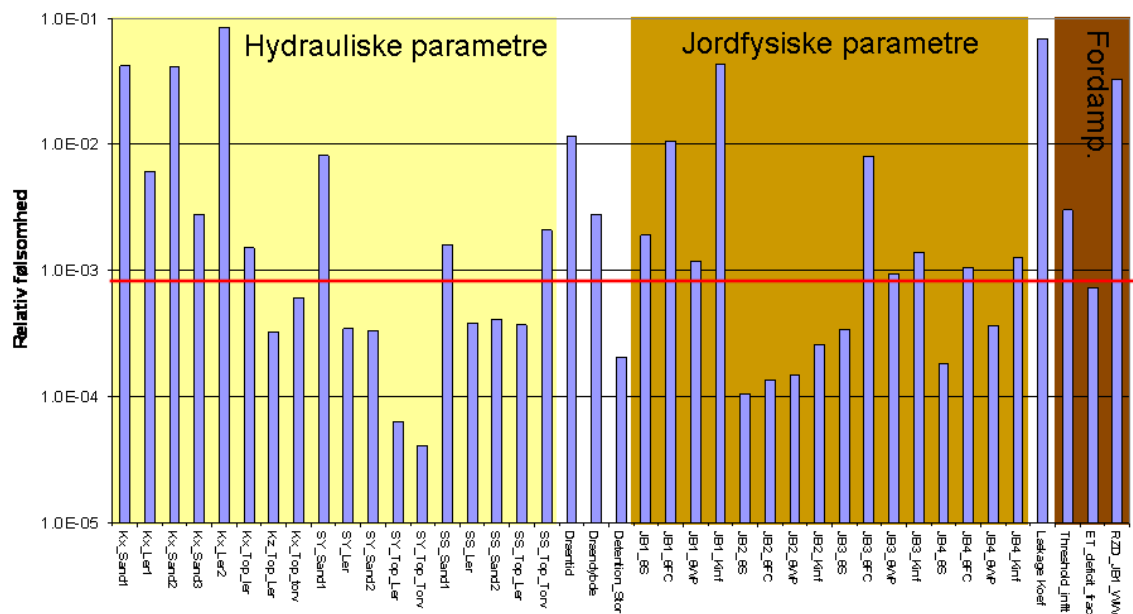
Appendix A: Følsomhedsanalyser af modelparametre

I forbindelse med modelkalibreringen (Figur 3) blev der gennemført omfattende følsomhedsanalyser. Formålet hermed var, at identificere de parametre, som modelsimuleringerne af vandføringer og grundvandstrykniveauer viste størst følsomhed overfor, og som derfor blev udvalgt til den endelige parameteroptimering. Der blev gennemført to typer af følsomhedsanalyser: (i) automatiske følsomhedsanalyser ved hjælp af PEST, hvor modelresultaternes følsomhed over ændringer (perturbationer) af værdier i de enkelte modelparametre blev undersøgt; og (ii) manuelle følsomhedsanalyser, hvor udvalgte modelparametre blev ændret manuelt fra en modelkørsel til en anden.

Dette appendix indeholder resultaterne af de gennemførte følsomhedsanalyser.

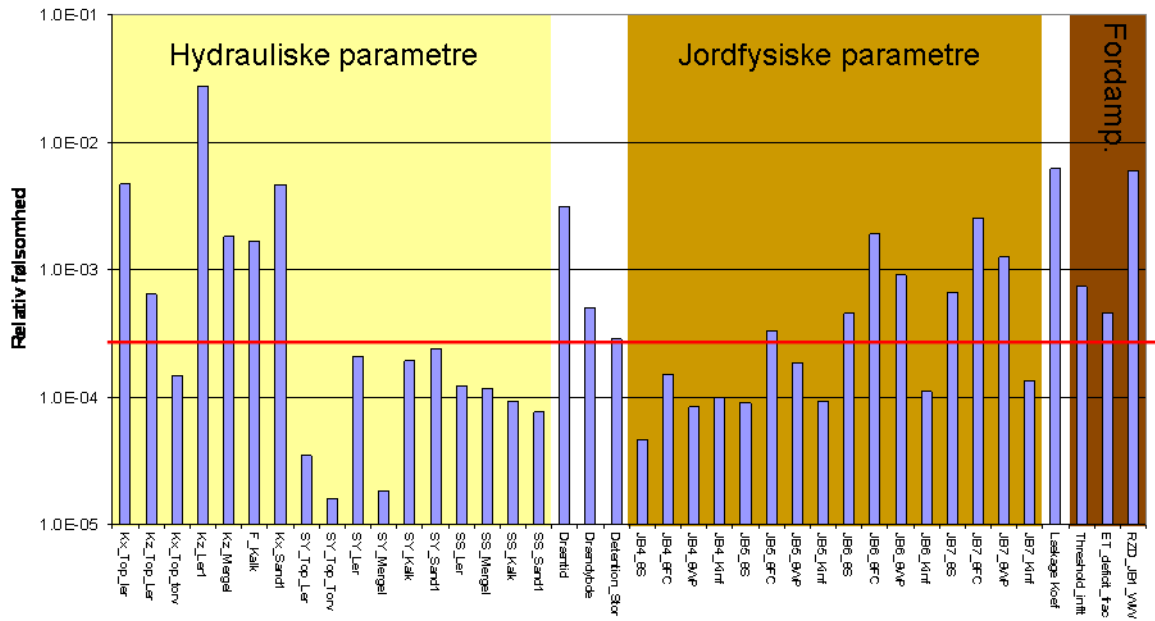
Resultater fra PEST følsomhedsanalyser

Ringkøbing Fjord



Figur A1 Parametre der var inkluderet i første følsomhedsanalyse med PEST for Ringkøbing Fjord. Den vandrette røde streg angiver grænsen for hvornår parametrene kan klassificeres som følsomme. Baggrundsfarver angiver inddeling i grupper af parametre: lys gul = hydrauliske parametre, mørk gul = jordfysiske parametre og brun = fordampningsparametre.

Sjælland

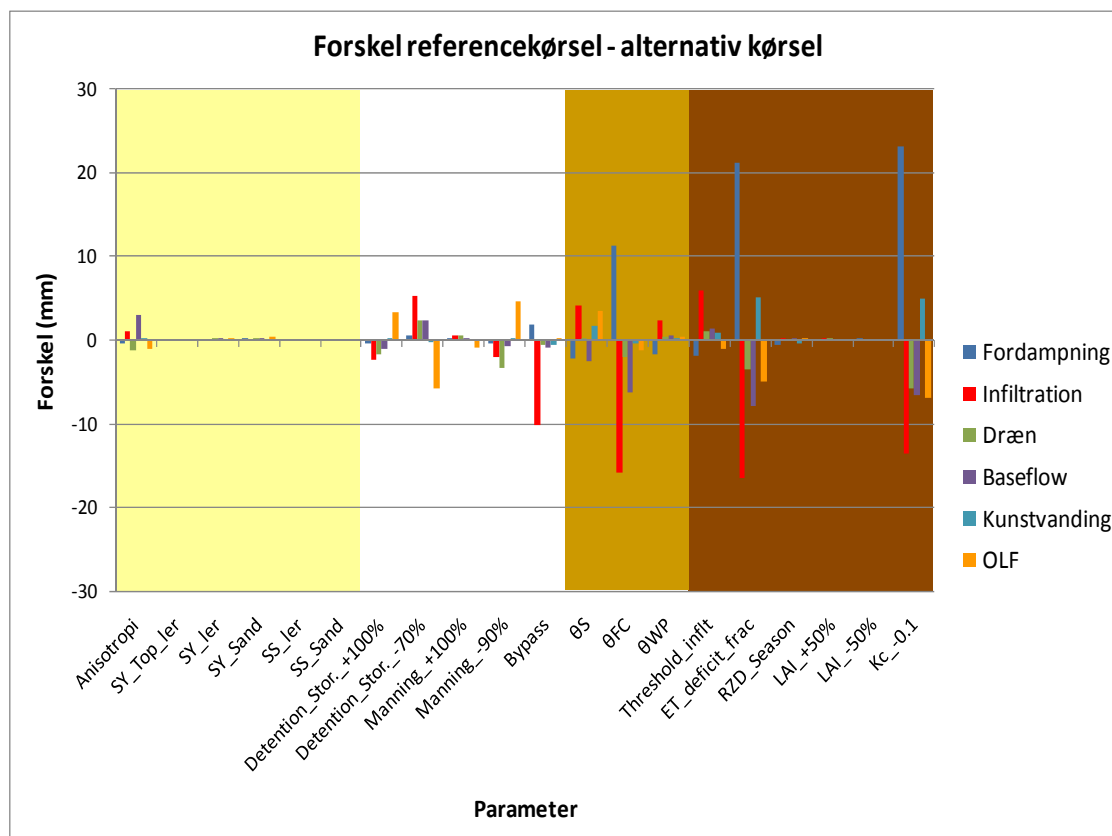


Figur A2 Parametre der var inkluderet i første følsomhedsanalyse med PEST for Sjælland. Den vandrette røde streg angiver grænsen for hvornår parametrene kan klassificeres som følsomme. Baggrundsfarver angiver inddeling i grupper af parametre: lys gul = hydrauliske parametre, mørk gul = jordfysiske parametre og brun = fordampningsparametre.

Resultater fra manuel følsomhedsanalyse

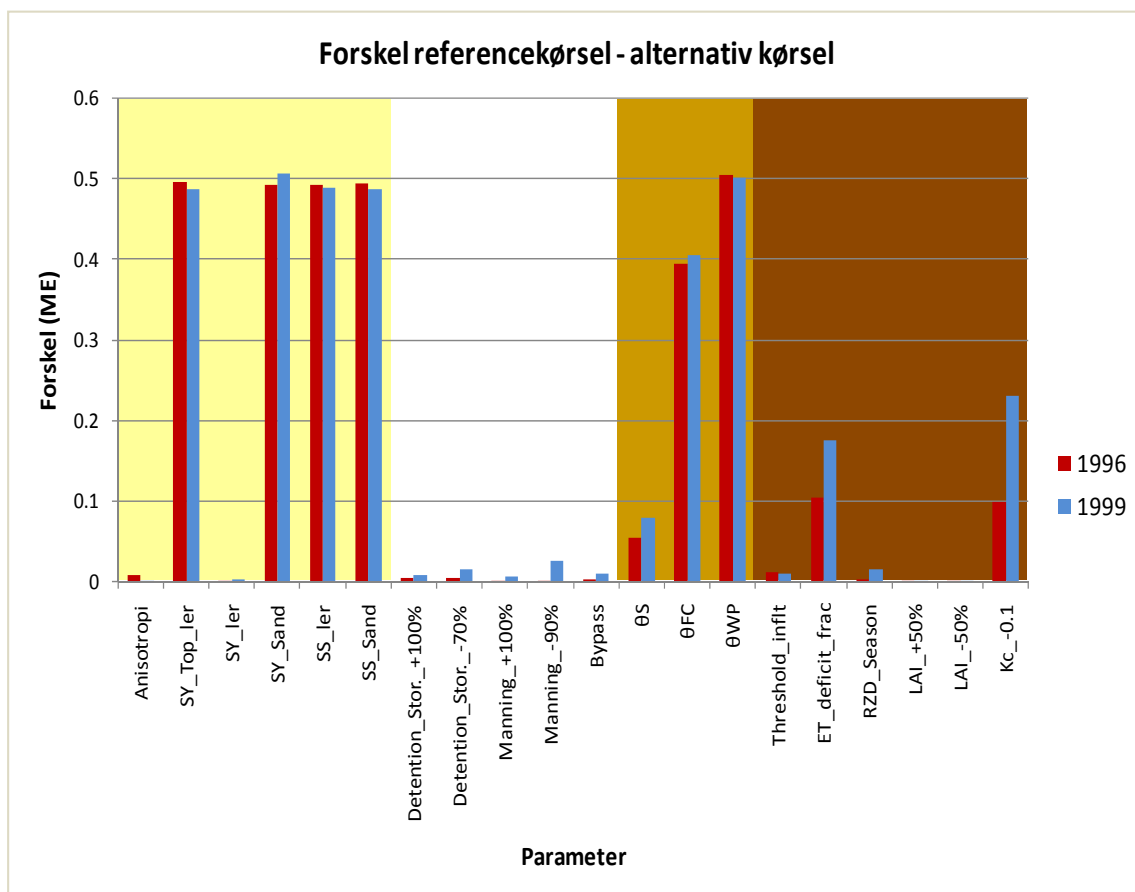
Med den manuelle følsomhedsanalyse var det især ændringen i fordelingen mellem modellens interne vandbalancekomponenter (fx fordampning og infiltration), det var interessant at se nærmere på, da dette ikke var muligt med følsomhedsanalysen med PEST.

Ringkøbing Fjord



Figur A3 Årlig forskel i interne vandbalancekomponenter mellem output fra referencekørsel og output fra alternative kørsler for DK-model for Ringkøbing Fjord ved første manuelle følsomhedsanalyse. Resultaterne er baseret på simuleringer for perioden 1990-2003.

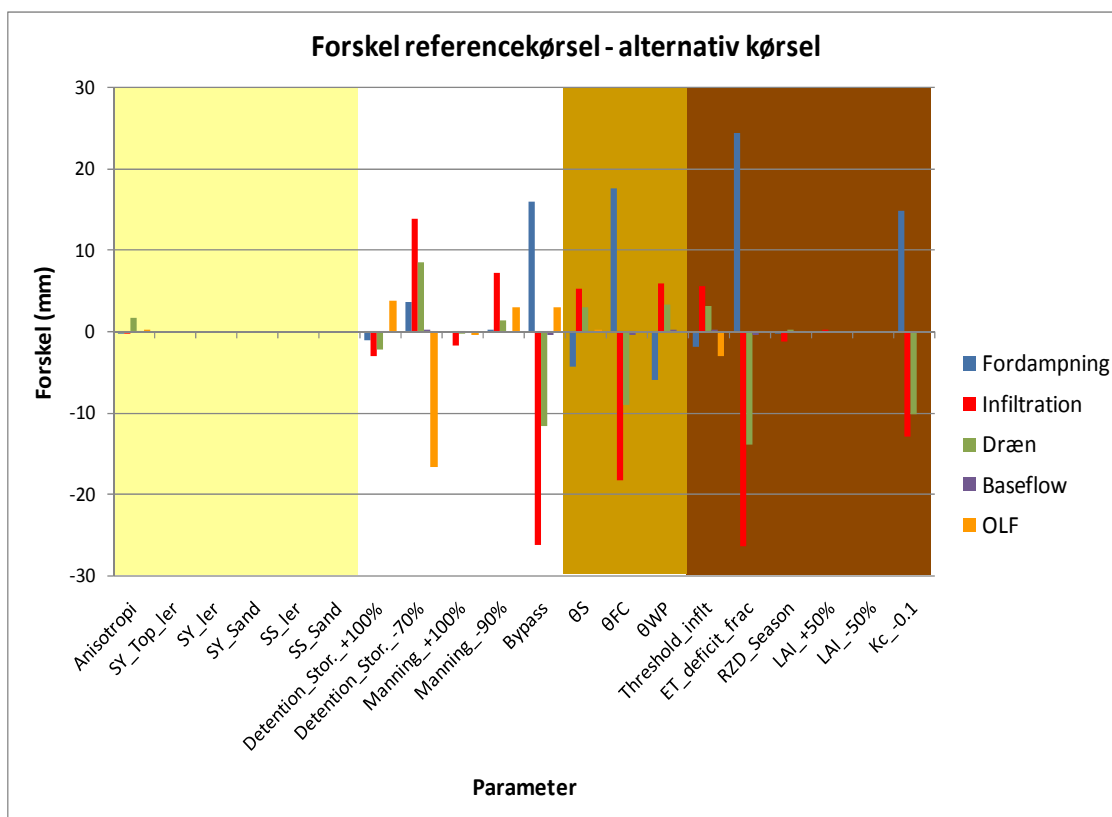
I forhold til interne vandbalancekomponenter var det især fordampning (blå søjler) og infiltration (røde søjler), der var følsomme overfor ændringerne i den første manuelle følsomhedsanalyse. De parametre, der gav de største ændringer i den interne fordeling mellem vandbalancekomponenterne, var relateret til fordampning og jordfysiske forhold: reduktion af K_c for landbrugsafgrøder, reduktion af mætningsgraden for hvornår fordampningen starter med at blive reduceret som funktion af vandindholdet i jorden og reduktion af markkapacitet (Figur A3).



Figur A4 Absolut forskel i årlig middelfejl mellem referencekørsel og alternativ kørsel ved simulering af vandløbsafstrømning for DK-model for Ringkøbing Fjord ved første manuelle følsomhedsanalyse. Røde søjler viser resultater fra et tørt år (1996) og blå søjler fra et vådt år (1999). Resultaterne er baseret på simuleret og observeret daglig afstrømning fra 12 vandføringsstationer.

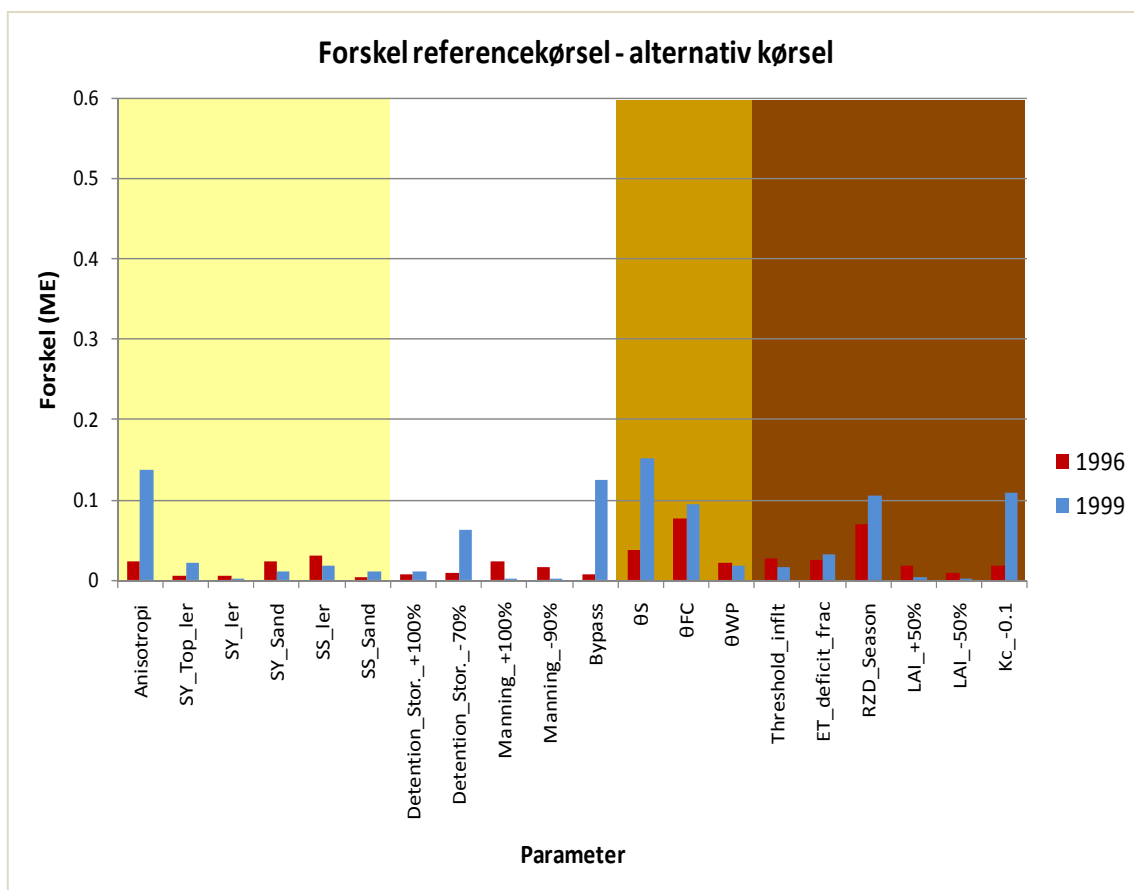
I forhold til simulering af afstrømning fra vandløb i Ringkøbing Fjord modellen var de parametre, der havde den største påvirkning på simuleringerne hydrauliske parametre, jordfysiske parametre og fordampningsparametre: forøgelse af det frie magasintal (specifik ydelse) for topler og sand, forøgelse af de spændte magasintal (specifikke magasintal) for ler og sand, reduktion af markkapaciteten og visnegrænse, reduktion af K_c for jordbrugsafgrøder fra 1,15 til 1,05 og reduktion af mætningsgraden for, hvornår fordampningen starter med at blive reduceret som funktion af vandindholdet i jorden (Figur A4).

Sjælland



Figur A5 Årlig forskel i interne vandbalancekomponenter mellem output fra referencekørsel og output fra alternative kørsler for DK-model for Sjælland ved første manuelle følsomhedsanalyse. Resultaterne er baseret på simuleringer for perioden 1990-2003.

I forhold til interne vandbalancekomponenter var det både fordampning (blå søjler), infiltration (røde søjler), overfladisk afstrømning (OLF, gule søjler) og dræn (grønne søjler), der var følsomme overfor ændringerne i den første manuelle følsomhedsanalyse. De parametre, der gav de største ændringer i den interne fordeling mellem vandbalancekomponenterne, var relateret til dræn, fordampning og jordfysiske forhold: reduktion af detention storage, introduktion af en simpel bypass-routing funktion, reduktion af K_c for landbrugsafgrøder, reduktion af mætningsgraden for hvornår fordampningen starter med at blive reduceret som funktion af vandindholdet i jorden og reduktion af markkapacitet (Figur A5).



Figur A6 Absolut forskel i årlig middelfejl mellem referencekørsel og alternativ kørsel ved simulering af vandløbsafstrømning for DK-model for Sjælland ved første manuelle følsomhedsanalyse. Røde søjler viser resultater fra et tørt år (1996) og blå søjler fra et vådt år (1999). Resultaterne er baseret på simuleret og observeret daglig afstrømning fra 12 vandføringsstationer.

I forhold til simulering af afstrømning fra vandløb i DK-modellen for Sjælland var de parametre, der havde den største påvirkning på simuleringerne hydrauliske parametre, drænpa-parametre, jordfysiske parametre og fordampningsparametre: ændring af anisotropi, tilføjelse af simpel bypass-routing funktion, forøgelse af mætningsgrænse og reduktion af markkapaciteten, sæsonvariation i rodzoneudvikling for landbrugsafgrøder og reduktion af K_c for landbrugsafgrøder fra 1,15 til 1,05 (Figur A6).

Af de udvalgte parametre er det især ændring i markkapaciteten, ændring af K_c og ændring af grænsen for hvornår fordampningen reduceres som funktion af vandindholdet, der påvirker simuleringen af vandføring og den interne fordeling mellem vandbalancekomponenter både ved Ringkøbing Fjord og på Sjælland. Inkludering af en bypass-routing funktion er desuden også vigtig for simulering af vandføring og vandbalance på Sjælland.

Parametre til optimering via invers kalibrering

På baggrund af følsomhedsanalyserne blev parametrene i Tabel A1 udvalgt til optimering via invers kalibrering (PEST).

Tabel A1 De udvalgte parametre til den endelige kalibrering af DK-model ved VBP2010 for modellen for Ringkøbing Fjord (RKF) og Sjælland (SJ). Se symbolliste for forklaring.

RKF	SJ
Kx_Sand1	Kx_Top_ler
Kx_Ler1	Kx_Top_ler
Kx_Sand2	Kz_Ler
Kx_Sand3	Kz_Mergel
Kx_Ler2	F_Kalk
Kx_Top_ler	Kx_Sand1
Dræntid	Dræntid
Lækage Koef.	Lækage Koef.
RZD_JB1_WW	RZD_JB1_WW