

Simulering af ekstremvandføringer og grundvandsbetinget oversvømmelse

Analyse af mulighed for optimering af DK-model
(Horsens Fjord opland)

Anker Lajer Højberg, Martin Olsen
& Hans Jørgen Henriksen

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



G E U S

Simulering af ekstremvandføringer og grundvandsbetinget oversvømmelse

Analyse af mulighed for optimering af DK-model
(Horsens Fjord opland)

Anker Lajer Højberg, Martin Olsen
& Hans Jørgen Henriksen

Simulering af ekstremvandføringer og grundvandsbetinget oversvømmelse

Analyse af mulighed for optimering af DK-model
(Horsens Fjord opland)

Anker Lajer Højberg, Martin Olsen
& Hans Jørgen Henriksen



Datablad

Titel:	Simulering af ekstremvandføringer og grundvandsbetinget oversvømmelse – Analyse af mulighed for optimering af DK-model (Horsens Fjord opland)
Forfattere:	Anker Lajer Højberg, Martin Olsen, Hans Jørgen Henriksen, GEUS.
Udgiver:	Koordineringsenhed for forskning i klimatilpasning Aarhus Universitet
URL:	http://kft.au.dk
Udgivelsesår:	2012
Redaktion afsluttet:	December 2012
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Om KFT:	Koordineringsenhed for forskning i klimatilpasning (KFT) er etableret under regeringens strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark. KFT består af Aarhus Universitet, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Københavns Universitet (KU), Roskilde Universitet, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) samt Danmarks Meteorologiske Institut (DMI). KFT's sekretariat har adresse ved DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. KFT skal fremme tværgående videnopbygning inden for forskning i klimatilpasning samt i klima og klimaeffekter relevant for klimatilpasning og indgå i forskningspolitiske netværk for at tilgodese dette og inddrage erfaringer fra internationale klimarelaterede aktiviteter. KFT skal sikre, at data og forskningsresultater er til rådighed for forskningsmiljøerne, samfundet og de sektorer, som skal udmønte konkrete tilpasningsinitiativer. KFT kommunikerer blandt andet igennem Miljøministeriets www.klimatilpasning.dk
Emneord:	Ekstremvandføring, grundvandsbetinget oversvømmelse, modelvurderinger
Sideantal:	99
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) på Miljøministeriets hjemmeside http://www.klimatilpasning.dk og KFT's hjemmeside http://kft.au.dk

Indhold

Forord	7
1. Resumé	8
1.1 Analyser og resultater	8
1.2 Anbefalinger	9
2. Ordliste og forkortelser	11
3. Introduktion	13
3.1 Baggrund	13
3.2 Formål	14
3.3 Rapportens indhold	14
4. Studieområder	15
4.1 Vandføringsstationer i Danmark.....	15
4.2 Horsens modelområde	16
5. Analyse af DK-modellens vandløbsbeskrivelse	18
5.1 Metodik	18
5.2 Resultater	20
5.2.1 Vandbalancefejl og NSE	20
5.2.2 Minimumsvandføringer	22
5.2.3 Maksimumsvandføringer	24
5.2.4 Timing	24
5.3 Delkonklusion – Observeret og simuleret vandføring	26
6. Alternative konceptualiseringer	27
6.1 Metodik	27
6.1.1 Hydrologiske model	28
6.1.2 Tilpasning af modeller til Horsens området.....	30
6.1.3 Modelkalibrering	31
6.1.4 Alternative konceptualiseringer	36
6.1.5 Opdeling i deloplande.....	38
6.1.6 Modelkørsler og statistik.....	39
6.2 Tidligere undersøgelser	40
6.3 Resultater	40
6.3.1 Regional kalibrering vs. lokal kalibrering og gridopløsning.....	40
6.3.2 Ændret procesbeskrivelse og heterogenitet	47

6.4	Delkonklusion – Alternative konceptualiseringer	51
7.	Grundvandsbetinget oversvømmelser	53
7.1	Metodik.....	53
7.2	Resultater	55
7.2.1	Vurdering af høj grundvandsstand	55
7.2.2	Vurdering af indikatorer	57
7.2.3	Betydning af gridskala.....	59
7.3	Delkonklusion – Grundvandsbetinget oversvømmelser	61
8.	Konklusioner og anbefalinger	63
9.	Referencer	66
	Appendiks A - Analyse af DK-modellens vandløbsbeskrivelse	67
	Appendiks B - Hydrografer	90
	Appendiks C – Tidsserier for flow komponenter	92
	Appendiks D - Simulerede minimums og maksimumsvandføringer	98

Forord

Nærværende projekt (Grundvand og oversvømmelse) er finansieret af KFT, Klima- og Energiministeriet og udført i 2012 af de Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

Anledningen til iværksættelsen af projektet er behovet for en etablering af et nationalt screeningsværktøj til vurdering af ekstremvandføringer samt identificering af områder med risiko for oversvømmelse forårsaget af en højtliggende grundvandsstand under fremtidige klimaforhold.

Målgruppen er primært til fagfolk og i særdeleshed personer der arbejder med hydrologisk modellering i kommuner, vandselskaber, regioner, stat, rådgivere m.fl.

1. Resumé

Det overordnede mål for nærværende projekt er en analyse af DK-modellens evne til simulering af ekstremvandføringer samt grundvandsbetinget oversvømmelser, samt vurdere hvorledes simuleringen af disse forhold kan optimeres gennem videreudvikling af modellen. Analyserne er baseret på den seneste version af DK-modellen, der er tilpasset jf. anbefalingerne fra det nationale vandbalancestudie (Refsgaard et al., 2011) og som er anvendt i forbindelse med vurdering af klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort) (Henriksen et al., 2012), hvor resultaterne er gjort tilgængelig på klimatilpasningsportalen (www.klimatilpasning.dk)

1.1 Analyser og resultater

Nærværende analyse er opdelt i tre delelementer:

Analyse af simuleret vandføring

Baseret på sammenligning af observerede og simulerede vandføringer er DK-modellens evne til simulering af vandføringer på landsplan analyseret, med vægt på simuleringen af hhv. lave og høje vandføringer. Resultatet herfra viser, at DK-modellen er i stand til at simulere den samlede vandføring på landsplan tilfredsstillende, men at der er en væsentlig variation mht. hvor godt de enkelte vandføringsstationer simuleres. Der er derimod problemer med simulering af de meget lave samt de meget høje vandføringer. De lave vandføringer overestimeres generelt og den årlige dynamik samt år til år variationerne fanges ikke tilfredsstillende. De høje vandføringer simuleres omvendt for lavt for samtlige sæsoner.

Vurdering af effekt ved alternative konceptualiseringer

Betydningen af alternative model konceptualiseringer for simulering af ekstremvandføringer er analyseres ved anvendelse af forskellige gridstørrelser i modellen (100 m, 250 m og 500 m), alternative procesbeskrivelser for den umættede zone og vandløbsstrømningen samt heterogenitetsbeskrivelser, hvor der er anvendt forskellige rumlig fordeling af jordtyper og landbrugsafgrøder, vandløbslækage og drændybde. Endvidere er der foretaget en sammenligning mellem modeller der er kalibreret til hhv. lokale og regionale observationsdata, dvs. i sidstnævnte tilfælde er modellen opstillet og tilpasset et større modelområde.

Analysen viser, at en reduktion af gridstørrelsen, med efterfølgende kalibrering, ikke er tilstrækkelig til at opnå en bedre beskrivelse af ekstremvandføringerne. Mens det har en positiv effekt på minimumsvandføringen, der reduceres, sker der ligeledes en reduktion i maksimumsvandføringerne, hvilket ikke er ønskeligt da disse i forvejen simuleres for lavt. Reduktion af gridstørrelsen medfører en væsentlig omfordeling af de enkelte flowkomponenter til vandløbet (overfladisk, dræn- og baseflow). Kalibrering af de tre modeller resulterede i sammenlignelige parameterværdier for de hydrauliske ledningsevner. Derimod blev der opnået stor forskel på de optimerede værdier for vandløbslækagen, hvilket vurderes at være relateret til den bedre opløsning af topografien. Ved en bedre opløsning af topografien omkring lavninger, som eksempelvis omkring vandløbene, bliver drænene placeret i

lavere koter med en større dræning til følge. De største forskelle mht. simulerede vandføringer opnås ved reduktion af gridstørrelsen fra 500 m til 250 m. En videre reduktion til en 100 m opløsning har mindre effekt på modelsimuleringerne.

En mere fysisk korrekt beskrivelse af strømningen i vandløbene medfører kun ubetydelige ændringer i de simulerede maksimums- og minimumsvandføringer. Anvendelsen af Richards ligning i stedet for Two-layer-modellen til at beskrive den umættede zone resulterer derimod i en reduktion af de simulerede sommer minimumvandføringer, specielt for de større oplande. For de mindre oplande er effekten ikke helt entydig idet der opnås såvel reducerede og øgede vandføringer i både minimums- og maksimumsvandføringerne.

For de alternative heterogenitetsbeskrivelser observeres en tydelig sammenhæng mellem arealstørrelse og effekten af de alternative beskrivelser, hvor effekten er størst i oplande under ca. 30 km², mens større oplande kun udviser begrænset følsomhed overfor den lokale heterogenitetsbeskrivelse.

Simulering af grundvandsbetinget oversvømmelse

Der er opstillet tre indikatorer til identificering af områder der er i risiko for oversvømmelse forårsaget af en høj grundvandsstand. Disse er baseret på 1) overskridelse af en grundvandsstand, der i middel overskrides en måned om året, 2) en middel af den maksimale årlige grundvandsstand og 3) den maksimale grundvandsstand for hele perioden. De to første indikatorer giver et sammenligneligt resultat, mens der observeres nogen forskel mht. de udpegede arealer ved anvendelse af den tredje indikator. Det har ikke været muligt at sammenligne modelresultaterne direkte med observerede oversvømmelser, men der er opnået en god overensstemmelse mellem simuleringerne og våde arealer identificeret ud fra AIS data.

Betydningen af varierende gridstørrelser for udpegning af potentielt vandlidende områder er endvidere undersøgt ved anvendelse af modeller med en gridopløsning på 100 m, 250 m og 500 m. Der blev fundet en god overensstemmelse mellem modellerne med en gridopløsning på 100 m og 250 m mht. udpegning af arealer. Med en opløsning på 500 m, er det ikke muligt at repræsentere mindre lavninger i terrænet, hvor de grundvandsbetingede oversvømmelse ofte forekommer. Arealerne udpeget på basis af modellen med en 500 m gridopløsning varierer således også markant i forhold til de to finere opløsninger. For en model kalibreret til hhv. lokale og regionale forhold med en 500 m gridopløsning observeres en generelt en god overensstemmelse mellem de udpegede arealer men også lokale variationer.

1.2 anbefalinger

Baseret på den samlede analyse anbefales følgende videreudvikling af DK-modellen for at opnå en bedre beskrivelse af ekstremvandføringer samt udpegning af områder med risiko for oversvømmelse pga. højtliggende grundvandsspejl:

- De største forskelle i simuleringsresultaterne observeres ved en reduktion af gridstørrelsen fra 500 m til 250 m, mens den videre reduktion til 100 m har mindre

effekt i forhold til såvel simuleringen af vandføringer samt grundvandsbetinget oversvømmelse. Det anbefales derfor, at DK-modellen detaljeres til en 250 m gridstørrelse, hvilket i forhold til en national model vurderes muligt at gennemføre på sigt.

- Drænenes placering vurderes at have en betydelig effekt på simulerede vandføringer og udpegning af oversvømmelsestruede arealer. I DK-modellen er der indlagt dræn i hele modellen, der repræsenterer såvel kunstig dræning ved markdræn samt mindre vandløb og grøfter, der ikke er medtaget i modelopstillingen. Selv ved reduktion af gristørrelsen vil det ikke være praktisk muligt at indlægge samtlige vandløb og grøfter i modellen, hvorfor der til stadighed vil være behov for anvendelse af dræn til beskrivelse af afstrømningen fra disse områder. Med en fortsat detaljering af modellen mht. den rumlige beskrivelse af arealanvendelsen samt mindre gridopløsning, vil der i stigende grad være behov for en revurdering af drænkonceptet, hvor der bør ses på mulighed for et distribueret drænkoncept, f.eks. i form af distribueret drændybde og/eller tidskonstant for drænene. Som minimum bør drændybden i DK-modellen justeres fra 0,5 m til 1,0 m under terræn.
- Der er testet tre indikatorer for vurdering af områder, der potentielt er i risiko for oversvømmelse. De tre indikatorer er baseret på forskellige mål for den maksimale grundvandsstand: middel af en årlig maksimal grundvandsstand; den absolutte maksimale grundvandsstand for en periode; eller en grundvandsstand der i middel overskrides én måned om året. Indikatorerne giver store sammenfald i de udpegede områder, men der observeres også væsentlige forskelle, specielt ved anvendelse af den absolutte maksimale grundvandsstand. For at kunne identificere de(n) mest brugbare indikator er der behov for lokale observationer af oversvømmede områder til verificering.

2. Ordliste og forkortelser

<i>Ord/ forkortelse</i>	<i>Beskrivelse</i>	<i>Beskrevet i rapport</i>
Baseflow	Vand der strømmer fra grundvand til vandløb over vandløbsbunden	Afsnit 6.3
CV	Variationskoefficient = standard afvigelse/middelværdi	
DK1 – DK7	Modelområder i DK-model	Figur 2
DrnRnd	Model med alternativ heterogenitetsbeskrivelse – tilfældig fordeling af drændybde	Afsnit 6.1.4
Dræn- strømning	Vand der strømmer via dræn til vandløb eller model- rand	Afsnit 6.3
Fbal	Vandbalancefejl mellem observerede og simulerede vandføringer	Afsnit 5.1
H_Max	Maksimal grundvandsstand (1991 – 2010)	Afsnit 7.1
H_MiddelMax	Middel af årlig maksimal grundvandsstand	Afsnit 7.1
H_Over- skridelse	Grundvandsstand der i middel overskrides en måned om året	Afsnit 7.1
LU	Model med alternativ heterogenitetsbeskrivelser - UZ og vegetationsfordeling	Afsnit 6.1.4
MAE_H	Middel absolut fejl mellem observeret og simuleret potentiale	Afsnit 6.1.3
ME_H	Middelfejl mellem observeret og simuleret potentiale	Afsnit 6.1.3
ME_q	Middelfejl mellem observeret og simuleret daglig vandføring	Afsnit 6.1.3
ME_{qs}	Middelfejl mellem observeret og simuleret daglig vandføring i sommermånederne	Afsnit 6.1.3
NSE	Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient	Afsnit 5.1
Overfladisk afstrømning	Afstrømning af vand på jordoverfladen til vandløb	Afsnit 6.3
Q01	1 % fraktilværdi for vandføring – lave vandføringer	Afsnit 5.1
Q99	99 % fraktilværdi for vandføring – høje vandføringer	Afsnit 5.1
Richards	Model med alternativ procesbeskrivelse – anvendelse	Afsnit 6.1.4

<i>Ord/ forkortelse</i>	<i>Beskrivelse</i>	<i>Beskrevet i rapport</i>
	af Richards ligning til beskrivelse af umættet strømning	
RMS	Middelværdien af kvadratafgivelsessummen	Afsnit 6.1.3
SomQ₀₁	Minimale sommervandføring	Afsnit 6
St. dev.	Standard afvigelse	
StV	Model med alternativ procesbeskrivelse – anvendelse af dynamisk løsning for vandløb (Saint Venant)	Afsnit 6.1.4
UZ	UZ Umættet zone	
V2L1	Model med alternativ heterogenitetsbeskrivelse – geostatistisk fordeling med varians på 2,0 og korrelationslængde på 1000 m	Afsnit 6.1.4
V2L5	Model med alternativ heterogenitetsbeskrivelse – geostatistisk fordeling med varians på 2,0 og korrelationslængde på 50 m	Afsnit 6.1.4
VinQ₉₉	Maksimal vinterafstrømning	Afsnit 6

3. Introduktion

3.1 Baggrund

I perioden 2010-2012 blev der gennemført en analyse af klimaeffekter på grundvandsdannelse og grundvandsstand (Klimagrundvandskortet) www.klimatilpasning.dk. Klimaforandringer vil imidlertid ikke alene forårsage ændrede forhold i grundvandsmagasinerne, men vil ligeledes kunne resultere i ændrede afstrømningsforhold i vandløb, hvor der specielt forventes ændringer i ekstremvandføringerne, med udtørring eller oversvømmelse til følge. Resultaterne fra klimagrundvandskortet til indledende screening pegede endvidere på, at der er relativt store usikkerheder på de simulerede ændringer i det terrænnære grundvandsspejl. Der er derfor behov for en nærmere vurdering af modelskala og procesbeskrivelsernes betydning for afgrænsning af grundvandsoversvømmelsestruede områder, der kan danne baggrund for den fortsatte modeludvikling. Udpegnings af problematiske vandløbsstrækninger eller arealer er af stor betydning for såvel udarbejdelsen af fremtidige vandplaner samt den kommunale arealplanlægning og klimatilpasning/-sikring.

I lighed med vurderingen af klimaeffekterne på grundvandsdannelse og grundvandsstand, er det muligt at anvende hydrologiske modeller til simulering af ekstremvandføring og detaljering af grundvandsoversvømmelsestruede arealer. Begge forhold kræver ikke blot en god beskrivelse af det hydrologiske system, men generelt også anvendelse af modeller med en god opløsning samt eventuelt forbedrede procesbeskrivelser, detaljeringer der imidlertid er numerisk tungere at løse og derfor er forbundet med forøgede afviklingstider. Sådanne mere detaljerede modeller er desuden ressourcekrævende at opstille. Det er derfor ønskeligt, at kunne anvende en storskala model som DK-modellen i en indledende screeningsfase, til udpegnings af områder, hvor ekstra undersøgelser/modeller er påkrævet.

DK-modellen er en storskala model, hvor formålet har været at tilvejebringe et værktøj, der baseret på et fagligt videnskabeligt grundlag kan anvendes til en national ensartet vurdering af de overordnede vandbalanceforhold. DK-modellen er løbende blevet opdateret, hvilket dels har været for at nyttiggøre ny viden fra lokale studier, såsom den nationale grundvandskortlægning. Der er imidlertid også behov for andre typer opdateringer for at optimere modellen, så den kan anvendes til simulering af andre forhold, såsom min og max vandløbsafstrømninger og anvendelse på mindre skala. En sådan opdatering skal bygge på en analyse af hvad der skal til for at opnå en forbedret beskrivelse, f.eks. anvendelse af alternative procesbeskrivelser eller en detaljering af den rumlige eller tidslige opløsning i modellen.

Fokus for nærværende projekt er en vurdering af DK-modellens evne til at simulere de overfladenære hydrologiske forhold samt interaktionen mellem vandløb og grundvand, med henblik på identificering af udviklingsbehov for en forbedret beskrivelse af risikoen for oversvømmelse forårsaget af grundvand samt vurdering af ekstremvandføringer.

3.2 Formål

Det langsigtede udviklingsmål med projektet er at bidrage til udvikling af et landsdækkende risikostyringsværktøj, indeholdende information om hvordan grundvandsforhold og vandstande i vandløbssystemer kan forventes at ændre sig og blive under et fremtidigt klima.

De konkrete projektformål har været at vurdere, hvorvidt beskrivelsen af strømningsdynamikken i de overfladenære jordlag samt interaktion med vandløb i DK-modellen kan optimeres, til opnåelse af en forbedret beskrivelse af ekstreme vandføringer samt af risikoen for oversvømmelse i lavtliggende områder forårsaget af en høj grundvandsstand. Projektet har haft til formål at give ny viden, der kan danne basis for en fremtidig anvendelse og eventuel opdatering af DK-modellen for beskrivelsen af ovenstående forhold. Projektet har ikke haft til formål at gennemføre en landsdækkende opdatering af DK-modellen.

Projektet tager udgangspunkt i den seneste version af DK-modellen, der er opdateret og kalibreret i forbindelse med det nationale vandbalancestudie (Refsgaard et al., 2011) og anvendt til vurdering af fremtidige grundvandsforhold (klimagrundvandskort) (Henriksen et al., 2012). Opgaven er løst ved analyse af betydningen af forskellige gridstørrelser samt antagelser om forskellige grader af heterogenitet i udvalgte parametre. Desuden er der afprøvet alternative procesbeskrivelser i det anvendte modelsystem MIKE SHE/ MIKE 11.

Projektet indeholder tre delopgaver:

- Analyse af DK-modellens evne til at beskrive vandføringer ved sammenligning af observerede og simulerede vandføringer for hele Danmark (kapitel 5).
- Opstilling og afprøvning af alternative konceptualiseringer samt gridopløsninger med henblik på identificering af modelforhold, der er vigtige for at opnå en forbedret beskrivelse af ekstremvandføringerne (kapitel 6).
- Analyse af koncepter for udpegning af lavtliggende områder i risiko for oversvømmelse forårsaget af stigende grundvandsstand (kapitel 7).

3.3 Rapportens indhold

Rapporten er bygget op omkring de tre delopgaver beskrevet ovenfor. Indledningsvist gives der en kort beskrivelse af studieområderne, hvorefter de tre delopgaver behandles separat i de efterfølgende kapitler. Rapporten afsluttes med en opsamling af delkonklusionerne fra de enkelte afsnit.

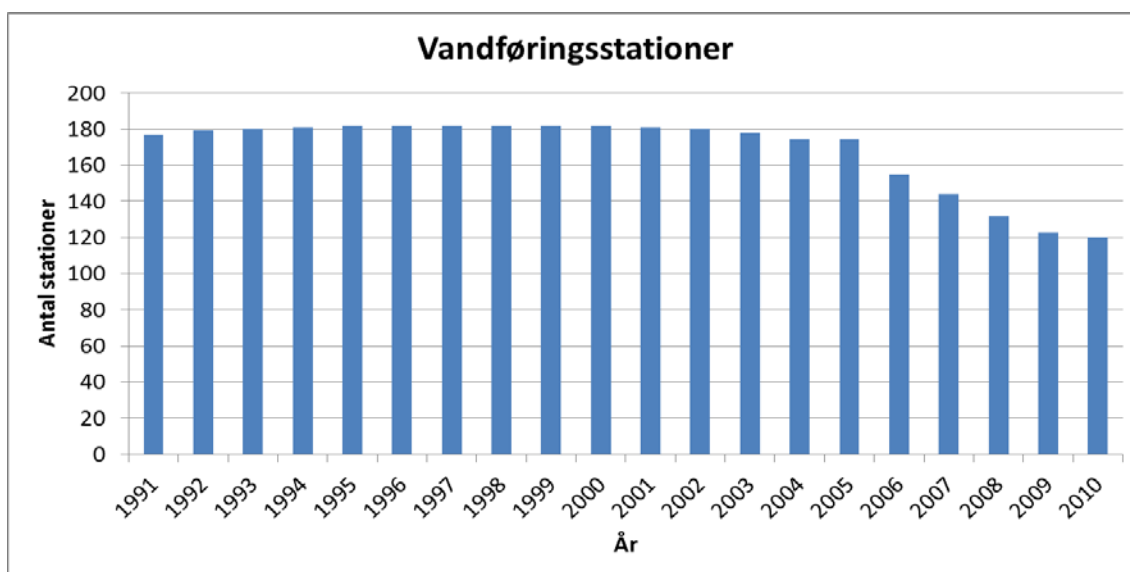
Rapporten henvender sig primært til fagfolk og i særdeleshed personer der arbejder med hydrologisk modellering og er således en teknisk rapport. Resultaterne vil kunne anvendes som basis ved opstilling af lokalmodeller, samt som grundlag for prioriteringer af fremtidige opdateringer af DK-modellen.

4. Studieområder

Sammenligningen mellem observerede og simulerede vandføringer er udført for hele Danmark på basis af de vandføringsstationer, der indgik i den nyeste kalibrering af DK-modellen udført i 2011. Testen af alternative model konceptualiseringer samt gridopløsninger er gennemført for et testområde ved Horsens. Her er der taget udgangspunkt i en model opstillet for Horsens Fjord oplandet i CLIWAT og KIMONO projektet (Sonnenborg et al., 2012). Horsens Fjord modellen bygger på et udsnit af DK model for Midtjylland (område 5 jf. Fig. 2), dvs. baseret på DK modellens geologi og opsætning, med detaljeringer i vandløbsoplande, randbetingelser mv. tilpasset Horsens Fjord oplandet.

4.1 Vandføringsstationer i Danmark

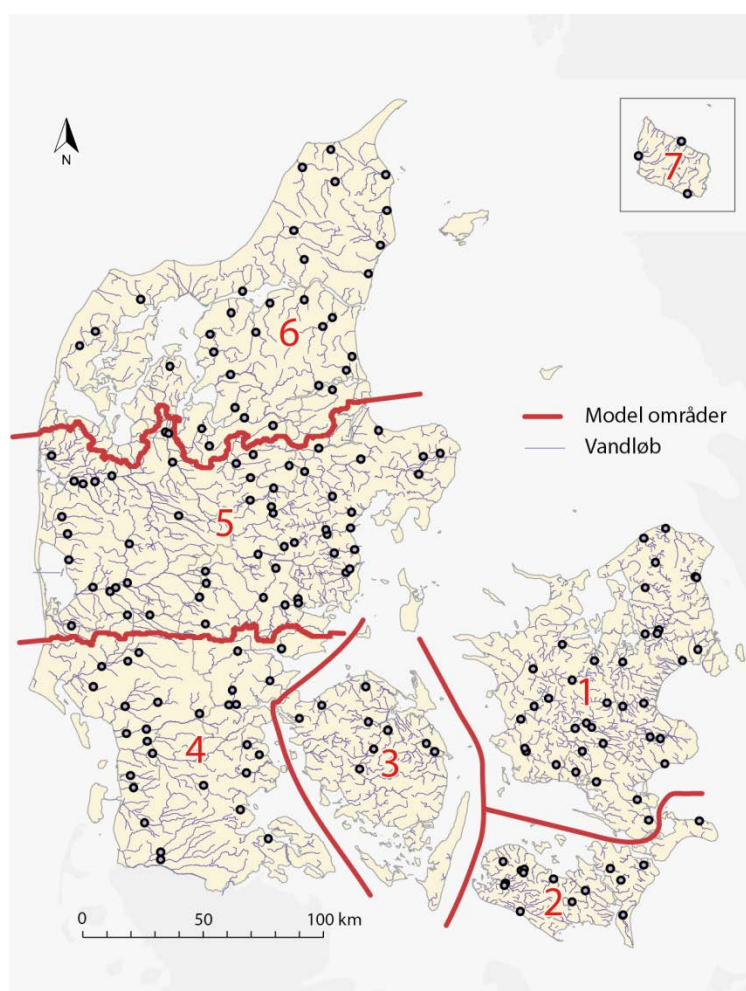
Der er gennemført en sammenligning mellem observerede og simulerede vandføringer baseret på vandføringsstationer medtaget under kalibrering af DK-model 2011 versionen. Vandføringsdata er indhentet fra DCE og indeholder stationer fra det nationale overvågningsprogram NOVANA (Bijl et al., 2007) samt data fra amternes regionale overvågning frem til 2006. Ud fra det samlede datasæt er der udvalgt vandføringsstationer til kalibrering af DK-modellen, baseret på kriterier om arealstørrelse (generelt arealer $\geq 50 \text{ km}^2$) samt et krav om, at vandføringerne ikke er påvirket væsentligt af opstrøms reguleringer eller søer. Der er udvalgt i alt 182 stationer til kalibrering af DK-modellen, som ligeledes er de stationer, der anvendes i nedenstående analyse af modellens evne til at simulere vandføringen i perioden 1991 – 2010. Frem til 2005 har hovedparten af stationerne været aktive, men specielt med amternes nedlukning er antallet reduceret frem til 2010, som illustreret på Figur 1. De i alt 182 vandføringsstationer fordeler sig på de syv delområder i DK-modellen som angivet i Tabel 1, mens deres placeringer fremgår af Figur 2.



Figur 1. Udvikling i antal af vandføringsstationer inkluderet i DK-modellen og anvendt i analysen af modellens evne til simulering af vandføringen i perioden 1991 til 2010.

Tabel 1. Oversigt over vandføringsstationer medtaget i analysen

	Delområde	Antal stationer	Middel oplands-areal (km ²)	Max. oplands-areal (km ²)	Min. oplands-areal (km ²)
DK1	Sjælland	37	133	756	27
DK2	Sydhavsøerne	16	48	203	10
DK3	Fyn	10	243	535	28
DK4	Syddjylland	28	191	815	12
DK5	Midtjylland	56	317	2603	14
DK6	Nordjylland	32	155	556	53
DK7	Bornholm	3	39	49	24

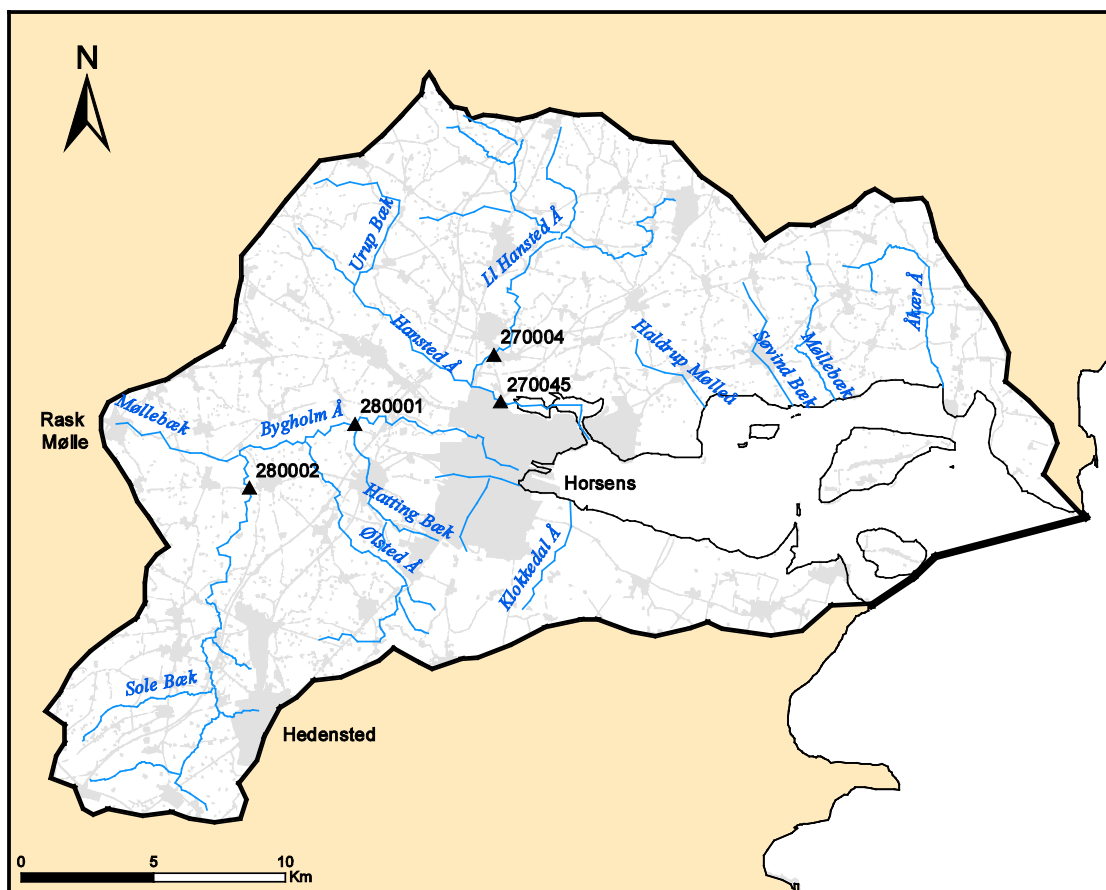


Figur 2. Placering af vandføringsstationer medtaget i analysen.

4.2 Horsens modelområde

Studieområdet er oplandet til Horsens Fjord (517 km²) på østkysten af Jylland (Figur 3). Arealanvendelsen i oplandet er domineret af landbrug (75 %) med små områder med skov,

Der er fire vandføringsstationer i oplandet. To af dem er placeret i det nordlige kupperet område, mens de to andre er beliggende i den sydlige og mere flade del af oplandet. For tre af stationerne er der 20 års vandføringsdata (1991-2010), mens der for den tredje kun er 7 års vandføringsdata (1991-1997).



GEUS

5. Analyse af DK-modellens vandløbsbeskrivelse

5.1 Metodik

DK-modellens evne til at beskrive vandføringen er analyseret ved sammenligning af forskellige beregnede størrelser, der beskriver hhv. middel samt høje og lave vandføringer. Beregningerne er foretaget for hele perioden 1991 – 2010 under ét samt ved en opdeling af data på sæsonerne: vinter (december, januar og februar), forår (marts, april og maj), sommer (juni, juli og august) samt efterår (september, oktober og november). Hvor værdier er angivet som absolutte størrelser er disse angivet som arealspecifikke vandføringerne, dvs. vandføringer normaliseret med oplandsarealet, så en sammenligning på tværs af oplande med forskellige arealer og dermed forskellige vandføringer er mulig. Fremfor enheden l/s/km² er det valgt at benytte enheden mm/d, så vandføringerne kan forholdes til nedbøren.

Følgende størrelser er beregnet og indgår i analysen:

Vandbalancefejl, F_{bal} :

F_{bal} er vandbalancefejlen udtrykt ved forskellen mellem den observerede og simulerede vandføring:

$$F_{bal} = 100 \frac{\overline{Q}_{obs} - \overline{Q}_{sim}}{\overline{Q}_{obs}}$$

hvor $\overline{Q}_{obs}$ og $\overline{Q}_{sim}$ er middel af hhv. den observerede og simulerede vandføring.

Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, NSE :

Denne størrelse udtrykker modellens forklaringsgrad eller evne til at simulere dynamikken i afstrømningen (afvigelse mellem simulerede og observeret daglige vandføringer dvs. et udtryk for hvor godt afstrømningshydrografen reproduceres af modellen; NSE er typisk meget afhængig af hvor godt især de store afstrømninger beskrives):

$$NSE = \frac{\sum (Q_{obs} - \overline{Q}_{obs})^2 - \sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q}_{obs})^2}$$

Fraktilværdier, Q_{01}, Q_{99} :

For observerede og simulerede vandføringer er der beregnet 1 % og 99 % fraktilværdier. 1 % fraktilværdierne er udtryk for lave vandføringer (overskrides i 99 % af tiden) mens 99 % fraktilværdierne er et mål for de høje vandføringer (overskrides i 1 % af tiden). Fraktilværdierne er beregnet for de enkelte år indenfor perioden, hvorefter en middelfejl for samtlige år i perioden er beregnet.

Medianminimum:

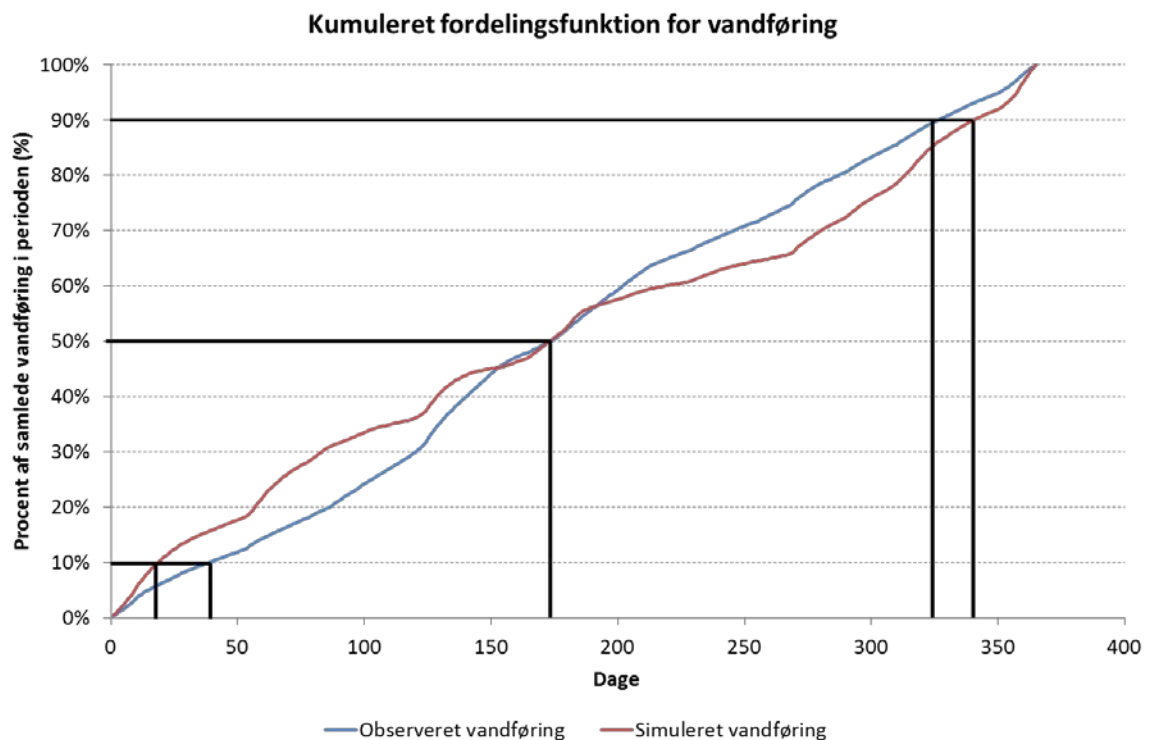
Baseret på daglige vandføringer for perioden 1991 – 2010 er der beregnet en medianminimumsværdi for de observerede samt simulerede vandføringer. Medianminimumsværdien udregnes som medianværdien af de årlige minimumsværdier for perioden. Medianminimum er således den daglige vandføring der statistisk underskrides hvert andet år, hvilket typiske forekommer i sommermånederne juni – august.

Minimum af syv dages glidende middel:

Defineret som minimum af en 7 dages glidende middelværdi på årsbasis.

Fraktilværdier for kumuleret fordelingsfunktion:

Disse er beregnet ved først at kumulere de daglige vandføringer og derefter beregne fraktilværdier for den kumulerede fordelingsfunktion, som illustreret på Figur 4 for 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier. Fraktilværdierne angiver hvor mange dage der går, før en given procentdel af den samlede vandmængde i perioden er løbet igennem vandføringsstationen og kan således anvendes som udtryk for timingen af vandføringen. Eksemplet i Figur 4 viser et tilfælde, hvor de første 10 % af den samlede vandføring opnås først for den simulerede vandføring (svarende til en positiv forskel mellem observerede og simulerede fraktilværdier), mens 50 % opnås efter det samme antal dage og 90 % opnås først for den observerede vandføring (svarende til en negativ forskel mellem observerede og simulerede fraktilværdier).



Figur 4. Eksempel på 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier for den kumulerede vandføring.

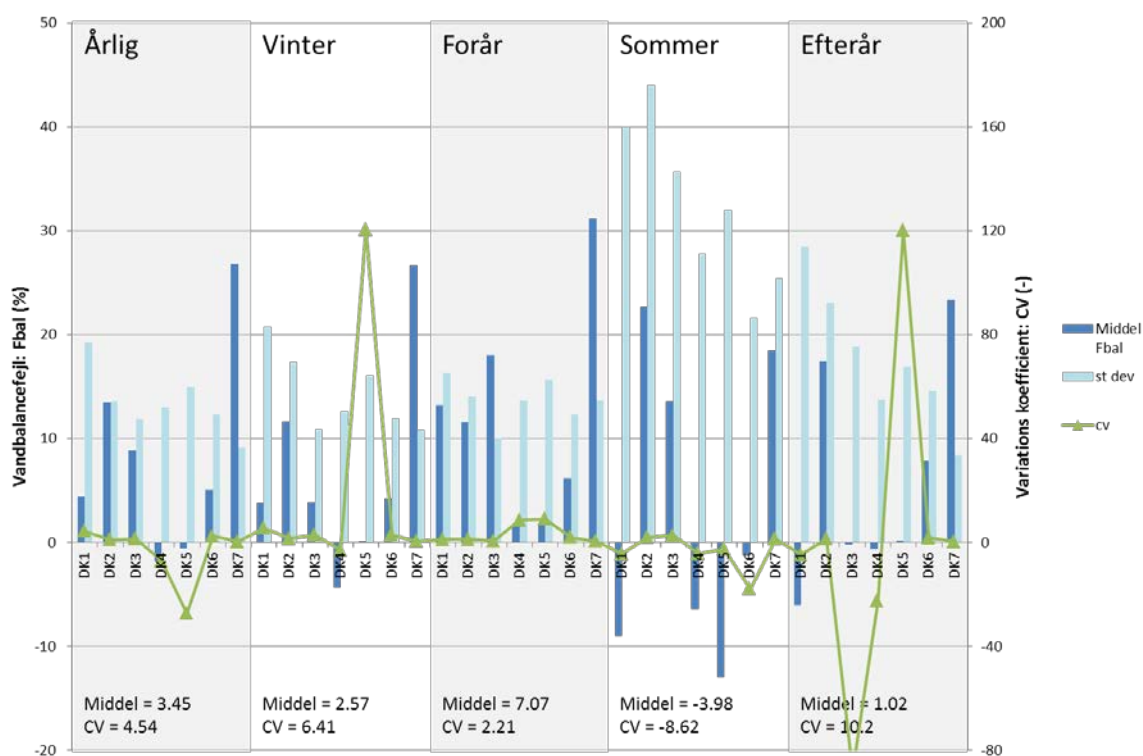
5.2 Resultater

En detaljeret gennemgang af de enkelte størrelser er givet i Appendix A, mens det kun er hovedkonklusionerne der er trukket frem i nedenstående.

5.2.1 Vandbalancefejl og NSE

De beregnede vandbalancefejl, Figur 5, viser, at DK-modellen generelt er i stand til at simulere den samlede vandbalance acceptabelt, med en fejl på 3,5 % for hele landet og under 10 % for de fleste delområder, med undtagelse af DK2 og DK7, der har fejl på hhv. 13 % og 27 %. Den mindste vandbalancefejl på landsplan opnås for efterårsperioden ($F_{bal} = 1,02\%$), mens den største fejl sker i forårsperioden ($F_{bal} = 7,07\%$). Der er dog en betydelig variation mht. simuleringen af den samlede vandbalance for de enkelte stationer, som udtrykt ved standardafvigelsen. Den største absolutte standardafvigelse registreres for sommermåneder, mens den mindste absolutte standardafvigelse forekommer for forårs-månederne. Betragtes imidlertid variationskoefficienten ($CV = \text{standard afvigelse/middelværdi}$), der er et udtryk for variationen normeret mht. middelværdien, ses de største variationer for efterårsmånederne. Dette betyder, at den lave værdi for middel vandbalancefejlen for efterårsperioden fremkommer ved positive og negative vandbalancefejl, der er større end middelfejlen men som udligner hinanden.

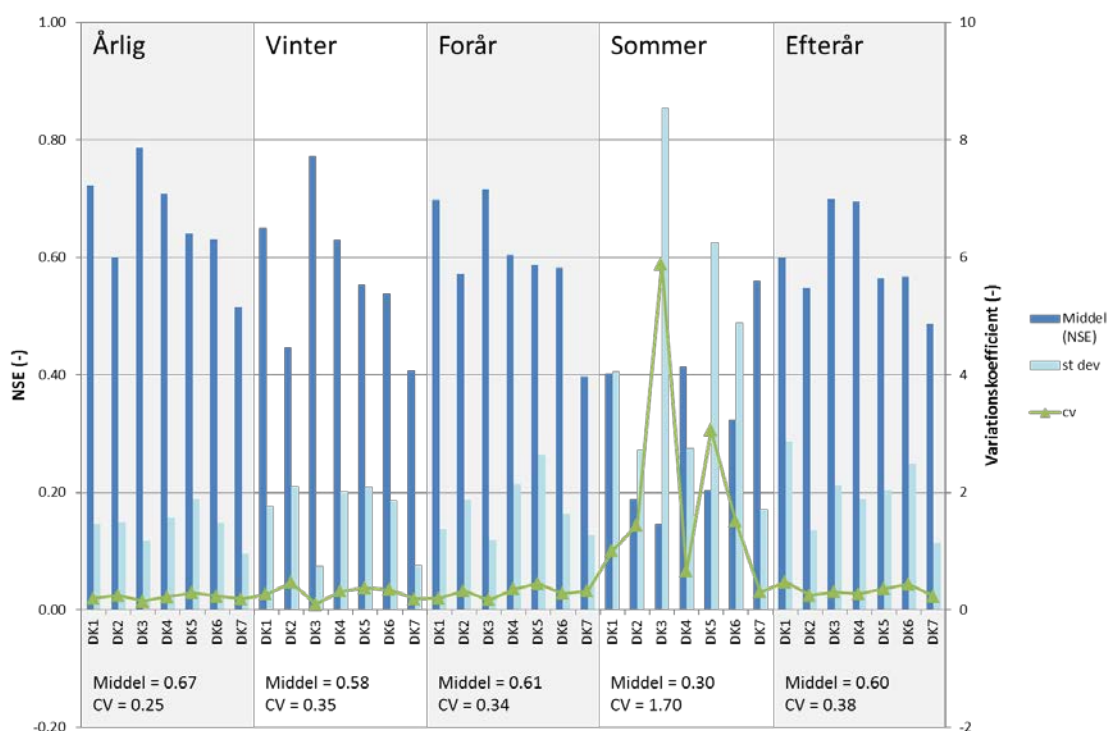
De store stationer har generelt en lille vandbalancefejl for såvel hele perioden som på sæsonbasis, der er dog ikke en generel tendens med faldende vandbalancefejl for stigende oplandsstørrelse, Appendix A.



Figur 5. Vandbalancefejl for de syv delområder indeholdt i DK-modellen opgjort for hele perioden under ét samt de fire sæsoner.

Vandløbsdynamikken udtrykt ved NSE for alle stationer for hele perioden er 0,67, Figur 6, hvilket vurderes at være tilfredsstillende for en national model. Sommermånederne har den mindste (dårligste) NSE, der for alle stationer samlet er på 0,30. Betragtes de enkelte modelområder, er det ligeledes sommermånederne der har den mindste NSE, eneste undtagelse er DK7, hvor sommermånederne har den største NSE. Sæsonen med den største NSE varierer for de enkelte modelområder.

For stationer med et oplandsareal på op til ca. 100 km² ses ingen umiddelbar sammenhæng mellem oplandsstørrelse og NSE. For stationer over 100 km² er der en tendens til en stigende NSE (bedre beskrivelse af dynamikken) med stigende oplandsstørrelse (Appendiks A).

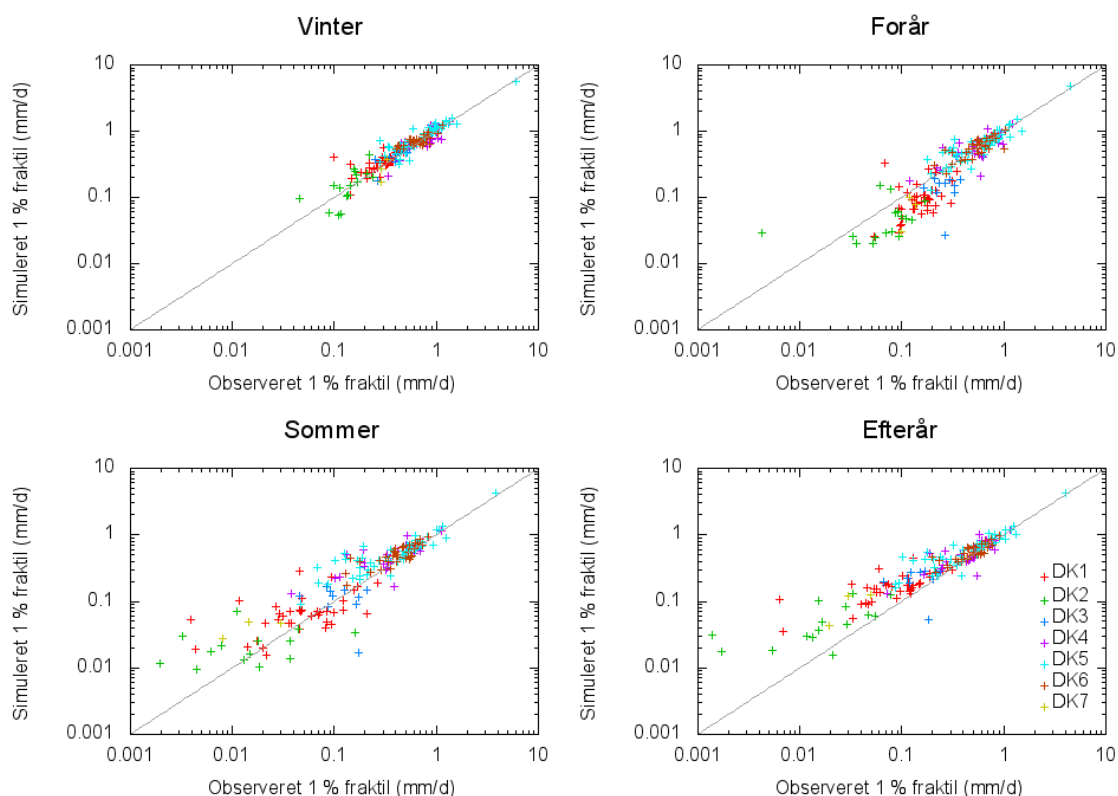


Figur 6. NSE for hele perioden samt de enkelte sæsoner opgjort for de 7 delmodeller.

5.2.2 Minimumsvandføringer

Medianminimumsvandføring, 1 % fraktilværdier og minimum af syv dages glidende middel er alle størrelser der måler modellens evne til at simulere de lave vandføringer. De tre størrelser viser sammenstemmende, at de lave vandføringer generelt overestimeres af modellen. 1 % fraktilværdierne viser, at der kun sker en underestimering i forårsperioden og dette sker kun for øerne (DK1 – DK3 og DK7). Der er en tendens til faldende forskel mellem observerede og simulerede 1 % fraktilværdier med stigende observeret værdi, Figur 7. For medianminimumsværdierne og forskellen mellem observerede og simulerede minimum af syv dages glidende middel er der ligeledes en tendens til faldende forskel mellem observerede og simulerede værdier ved stigende oplandsareal, Appendiks A.

Forskel i 1 % fraktil i procent



Figur 7. Simulerede 1 % fraktilværdier som funktion af observerede 1 % fraktilværdi.

Der er betydelig variation mht. hvor godt DK-modellen simulerer medianminimum, 1 % fraktilværdierne (Figur 7) og minimum af syv dages glidende middel, hvor der ses variation såvel mellem de enkelte delområder som indenfor ét delområde. Der er dog nogle lighedspunkter for øerne, der repræsenterer de mest lerede oplande (DK1 – DK3 og DK 7) og de jyske og generelt mere sandede delområder (DK 4 – DK6). De mindste vandføringer forekommer i sommerperioden for alle delområderne. For de observerede data ses en del variation i minimum af syv dage glidende middel fra år til år. Specielt for de lerede oplande (delområde DK1, DK2 og DK3) fanges denne variation ikke i tilstrækkeligt grad af modellen.

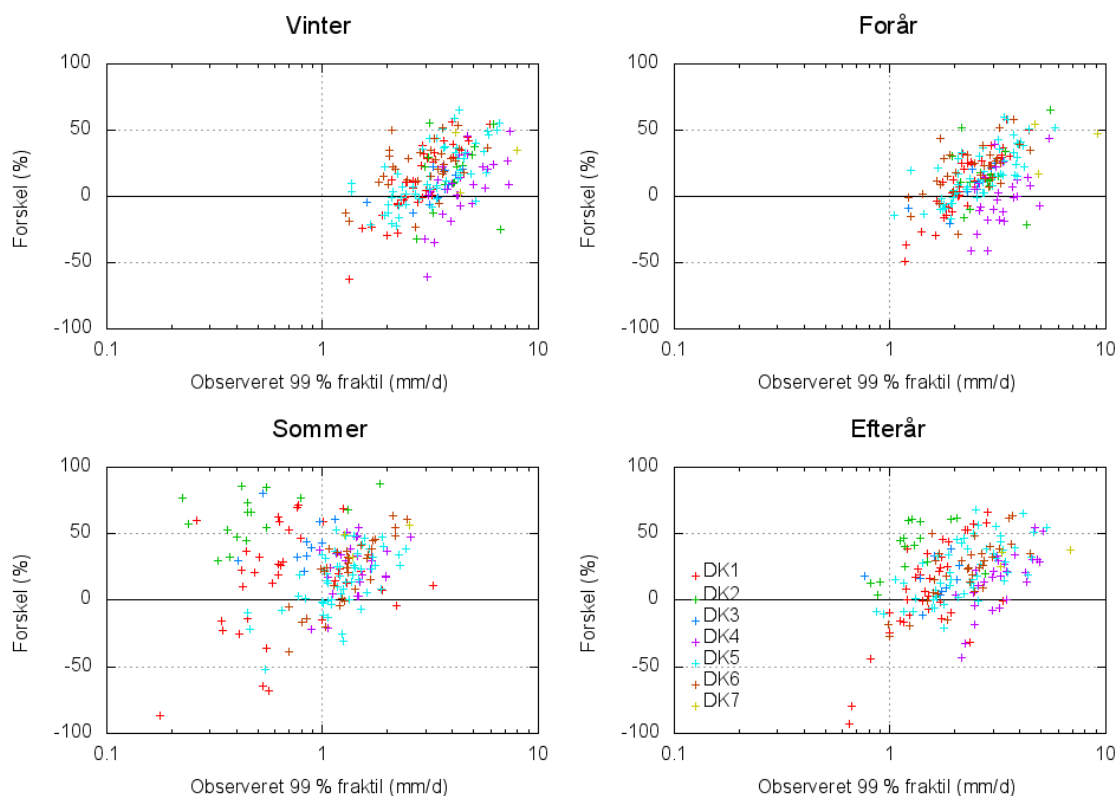
Der er ikke foretaget en separat analyse, med opdeling af oplande i hhv. lerede og sandede områder. Forskellen mellem de observerede vandføringer for hhv. øerne og Jylland indikerer dog de forskellige afstrømningsregimer for sandede og lerede oplande. Grundvandstilskuddet til vandløbene (ofte benævnt baseflow) er generelt større for de sandede områder og resulterer i en mindre variation mellem høj og lav vandføring i forhold til de lerede områder, hvor de hurtige og overfladenære strømningsprocesser (overfladisk samt drænastrømning) har større dominans og resulterer i større variation i vandføringerne. De forskelle der ses mellem de observerede og simulerede størrelser viser, at der er størst udfordring i at simulere vandføringer med størst variation, såsom variationen i minimum af syv dages glidende middel. Ligeledes forekommer de laveste vandføringer i de lerede oplande, hvor de ofte er tæt på 0. Dette resulterer i meget store relative forskelle mellem de observerede og simulerede lave vandføringer, der kan overstige flere hundrede procent,

hvilket dermed indikerer at procentvise afvigelser ikke giver en robust vurdering af performance i forhold til minimumsvandføringer.

5.2.3 Maksimumsvandføringer

De maksimale vandføringer er vurderet på baggrund af 99 % fraktilværdierne. Disse vandføringer underestimeres generelt af modellen, hvilket er gældende for alle delområder for såvel hele året under ét samt de fire sæsoner. Betragtes forskellen i forhold til de observerede værdier, ses imidlertid, at vandføringen overestimeres for de laveste observerede værdier, mens det omvendte gør sig gældende for de største vandføringer. Der er en nærmest lineær sammenhæng med stigende forskel for stigende observeret værdi. Det er især tydeligt for vinter-, forårs- og efterårsmånederne.

Forskel i 99 % fraktil i procent



Figur 8. Forskel mellem 99 % fraktilværdier beregnet på baggrund af observeret og simuleret vandføring som funktion af 99 % fraktilværdi for det observerede datasæt.

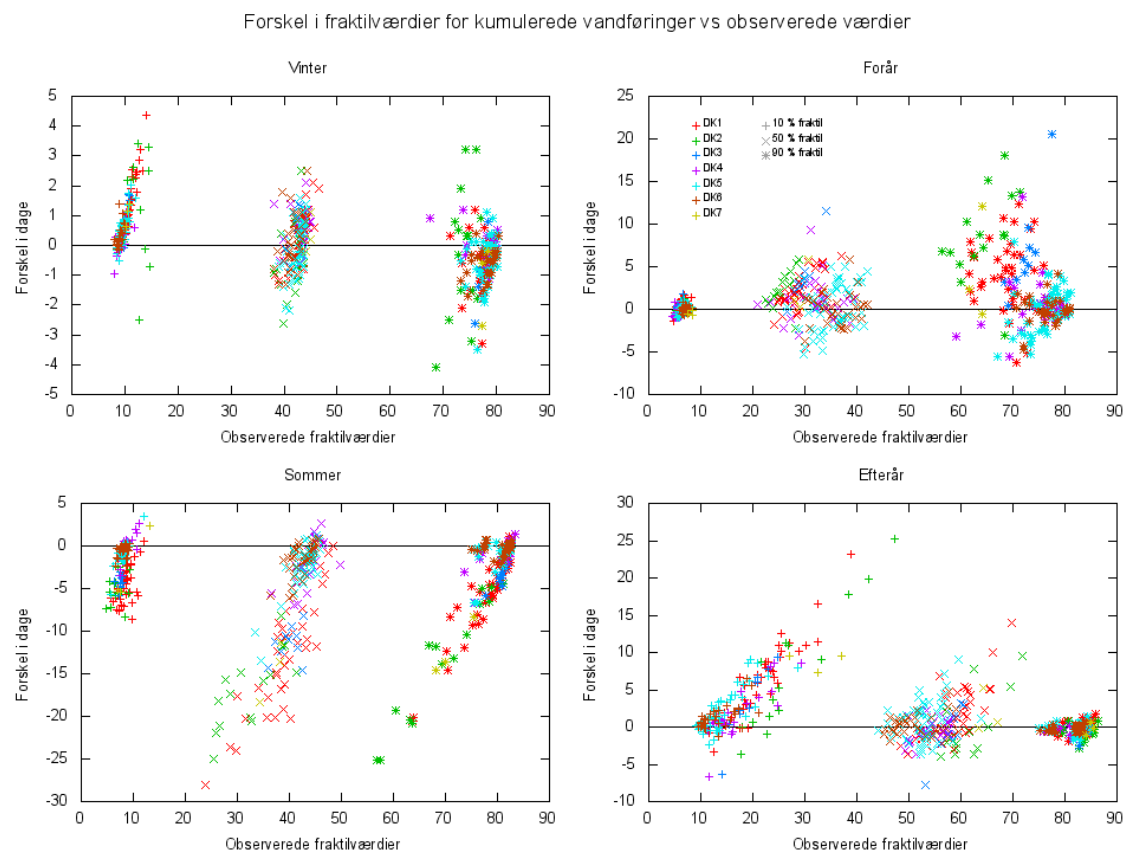
5.2.4 Timing

I sommermånederne er der en negativ forskel mellem de observerede og simulerede 10 % fraktilværdier, Figur 9. Det betyder, at 10 % af den samlede vandføring i sommermånederne først opnås i det observerede datasæt. For de øvrige perioder forholder det sig omvendt, med de største forskelle i efterårsperioden for alle syv delområder, hvor der også er en tendens til stigende forskel når den observerede fraktilværdi øges. En væsentlig positiv

fejl i efterårsperioden indikerer, at de tidlige toppe på hydrografen for efteråret generelt simuleres for tidligt af modellen. I vinterperioden er fejlen mindre, men der ses en stor variation i fejlen mellem de enkelte stationer. I forårsperioden er fejlen også lille uden sammenhæng med de observerede størrelser.

Den største fejl i timingen for halvdelen af den samlede vandføring (50 % fraktilværdi) optræder i sommermånederne, hvor fejlen som for 10 % fraktilværdierne er negativ, dvs. den simulerede vandføring kommer senere end den observerede, og der er en svag tendens til, at fejlen stiger med faldende observerede vandføringer. For vinterperioden er der stor variation i fejlen mellem de enkelte stationer, men samlet set er der ikke en væsentlig over- eller underestimering. I forårs- og efterårsperioderne er der ligeledes ikke en udtalt bias med over- eller underestimering ligesom der ikke er sammenhæng mellem fejlen og de observerede fraktilværdier.

For de jyske oplande er fejlen i 90 % fraktilværdierne meget små, dog med nogen variation for forårsmånederne. For de øvrige delområder er der en negativ forskel mellem de observerede og simulerede værdier i sommermånederne, hvor fejlen stiger for faldende observerede fraktilværdier for delområderne DK1 og DK2. For efterårs- og vintermånederne er fejlene små, mens der ses en positiv fejl i forårsmånederne.



Figur 9. 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier for kumulerede vandføringer for de fire sæsoner.

5.3 Delkonklusion – Observeret og simuleret vandføring

Analysen af observerede og simulerede vandføringer viser, at mens DK-modellen generelt er i stand til at simulere median- og middelværdier er der problemer med simulering af ekstremvandføringerne, dvs. de meget lave samt de meget høje vandføringer. De lave vandføringer overestimeres generelt og den årlige dynamik samt år til år variationerne udtrykt ved variationen i minimum af syv dage glidende middel fanges ikke tilfredsstillende. Ligeledes er timingen for de lave vandføringer udtrykt ved fraktilværdierne af de kumulerede vandføringer i sommerperioden dårlig. De høje vandføringer simuleres omvendt for lavt for samtlige sæsoner.

6. Alternative konceptualiseringer

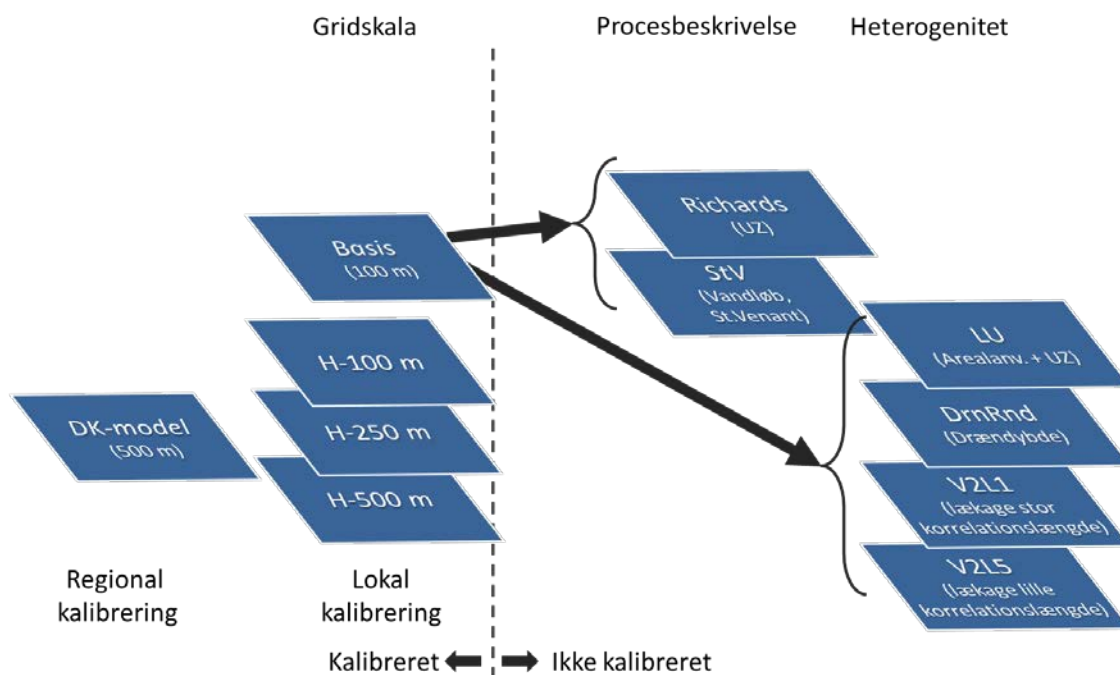
Formålet med denne del af projektet er at opstille og teste alternative modelkonceptualiseringer samt forskellige gridopløsninger for at identificere forhold, der er vigtige for at opnå en forbedret beskrivelse af ekstremvandføringerne. Dette er gjort ved at teste betydningen af følgende:

1. Regional kalibrering vs. lokal kalibrering
2. Forskellige gridopløsninger
3. Alternative procesbeskrivelser (Richards ligning til beskrivelse af den umættede zone og St. Venants ligning for en fuld dynamisk beskrivelse af vandløbsstrømningen)
4. Alternativ beskrivelse af heterogenitet (arealanvendelse, drændybde og vandløbslækage).

Fokus har været på betydningen af ovenstående forhold på simulerede ekstremvandføringer dvs. de højeste vintervandføringer ($VinQ_{99}$) og de laveste sommervandføringer ($SomQ_{01}$).

6.1 Metodik

Analyserne er baseret på modelsimuleringer der varierer mth. gridopløsning samt heterogenitetsforholdene, som skitseret på Figur 10. Betydningen af en regional vs. lokal kalibrering er undersøgt ved sammenligning af resultater fra DK-modellen for område 5 (*DK-model*) og en model med samme gridstørrelse (500 m), der er kalibreret til lokale observationsdata (*H-500m*). Ved opstilling og lokalt kalibrering af modeller med en gridopløsning på 100 m (*H-100m*), 250 m (*H-250m*) og 500 m (*H-500m*) er forskelle forårsaget af gridopløsningen vurderet. Endeligt er betydningen af procesbeskrivelse og heterogenitet analyseret ved sammenligning af en 100 m model (*Basis*) og varianter heraf, hvor enten procesbeskrivelsen eller heterogeniteten er ændret.



Figur 10. Oversigt over modeller anvendt i analysen. Venstre side viser modeller kalibreret hhv. regionalt (DK-model) og lokalt, hvor der til den lokale kalibrering er opstillet modeller med forskellige gridstørrelser. Højre side viser modeller med alternative proces- og heterogenitetsbeskrivelser. Disse modeller er baseret på en lokalmodel med 100 m gridsopløsning (*Basis*), modellerne er ikke kalibreret efter indbygning af alternative proces- og heterogenitetsbeskrivelser.

6.1.1 Hydrologiske model

Udgangspunktet for den hydrologiske modellering er DK-modellen, der oprindeligt blev udviklet af GEUS i perioden 1996-2001 (Henriksen et al., 2003). I perioden 2005-2009 har GEUS foretaget en omfattende opdatering af DK-modellen (DK-model version 2009) (Højberg et al., 2010b; Højberg et al., 2012), med bl.a. en opdatering af den geologiske model på baggrund af nye data fra grundvandskortlægningen. Efterfølgende er DK-modellen anvendt i det nationale vandbalancestudie (Refsgaard et al., 2011, Stisen et al., 2012) og i den forbindelse opdateret til DK-model version 2011. Denne seneste opdatering indeholder en detaljering af de jordfysiske parametre i den umættede zone samt vegetationsfordelingen. Endvidere er der sket et skift fra en standard korrigeret til en dynamisk korrigeret nedbøren i 2011 versionen, hvilket er en af de væsentligste anbefalinger fra vandbalancestudiet.

DK-model er baseret på MIKE SHE/MIKE 11, der udgør et deterministiske fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af de væsentligste strømningsprocesser af det hydrologiske kredsløb på landfasen. Modelsystemet er beskrevet i Højberg et al. (2010a), hvortil der henvises for en detaljeret beskrivelse af systemet. I nærværende rapport gives en summarisk gennemgang af de moduler, der har betydning for de udførte simuleringer med henvisning til øvrige uddybende referencer.

Umættede zone og vegetationsfordeling

Aktuel fordampning er i DK-modellen beskrevet ved et vandbalancemodul "Two-layer". Modulet giver en forsimplet kobling mellem den umættede og den mættede zone, hvor selve strømmingen i den umættede zone ikke beskrives, men der tages højde for den variation der er i fordampningen i tid og sted som følge af varierende jordtype- og vegetationsforhold samt dybden til grundvandsspejlet, der beskrives i MIKE SHE. I forbindelse med vandbalancestudiet (Refsgaard et al., 2011) er der baseret på erfaringstal opstillet værdier for de jordfysiske parametre i den umættede zone samt forventelige rodzonedybder for de medtagne landbrugsafgrøder på varierende jordtyper. Den rumlige fordeling af vegetations og afgrøde typer er foretaget ved først at identificere arealer med by, søer, skov, permanent græs samt hede og ringe vegetation ud fra AIS klassifikationen (AIS, 2000). Det resterende areal er antaget at være landbrugsarealer. For disse arealer er fire afgrøder (vinterhvede, vårbyg, græs og majs) fordelt tilfældigt indenfor de gamle amtsgrænser under hensyntagen til procentfordeling mellem afgrøderne i 2006 opgjort af Danmarks Statistik på amts niveau. Det vil sige, 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.

Drænaforstrømning

I modellen er de større vandløb medtaget i MIKE 11 opsætningen (Olsen og Højberg 2010). 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 (500 m i DK-modellen). Mindre grøfter er derfor beskrevet vha. dræn. Modellens 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 drænaforstrømning i modellen. Drænaforstrømning 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 i modellen er mindre end den fysiske dybde af drænrør i markerne. Indplaceringen af dræn i en mindre dybde i modellen er valgt for at modvirke den udglatning af topografien, der sker ved anvendelse af en griopløsning på 500 m.

Vandløbsbeskrivelse

Udvekslingen mellem grundvandsmagasinerne og vandløbene styres af en vandløbslæke, der tager hensyn til den hydrauliske ledningsevne af vandløbsbunden samt den omkringliggende geologi. For vandløbsbunden eksisterer der ikke viden om variationer i den hydrauliske ledningsevne, hvorfor der er anvendt en uniform beskrivelse, dvs. samme konstante værdi for alle vandløb. Til beskrivelse af vandstrømningen i vandløbene er det valgt at anvende en simpel løsning, hvor vandet routes (dirigeres) gennem vandløbet ("No discharge transformation"). Denne løsning er begrundet i modeltekniske årsager, hvor en

fuld dynamisk beregning af vandløbsstrømningen vil medføre signifikant længere simuleringstider.

6.1.2 Tilpasning af modeller til Horsens området

Modellen *DK-model* er en direkte anvendelse af DK-modellen for område 5. Der er således ikke sket en tilpasning af denne model, men resultater er blot trukket ud for Horsens modelområdet. For de øvrige modeller er der foretaget nogle tilpasning til de lokale forhold i Horsens området. Herunder beskrives nogle generelle karakteristika for de lokale modeller i forhold til DK-modellen.

I DK-modellen for område 5 er der anvendt 12 beregningslag til afgrænsning af de overordnede Kvartære og Præ-kvartære grundvandsmagasiner. Ikke alle grundvandsmagasiner genfindes i hele Midtjylland og indenfor Horsens modelområdet er specielt den Præ-kvartære lagpakke karakteriseret ved få magasiner. Da der i projektet fokuseres på de terrænnære forhold, er det valgt kun at medtage syv af beregningslagene i de lokale modeller. De tre øverste lag er sammenfaldende med DK-model for område 5, mens de tre næste lag har en konstant tykkelse på hhv. 10 m, 20 m og 50 m, mens det sidste beregningslag har en fast bundkote i -200 m.

Med en detaljering af gridopløsningen vil der ske en mindre grad af udglatning af topografien og drændybden bør derfor revurderes. En gridstørrelse på 100 m vil i langt højere grad være i stand til at beskrive de naturlige topografiske variationer og det vurderes at drændybden i landbrugsområder bør være tættere på den faktiske dybde på ca. 1 m under terræn. For bedst muligt at isolere effekten af gridopløsningen ved sammenligningen på tværs af de lokale modeller med varierende gridstørrelser, er det valgt at anvende en uniform drændybde på 1 m under terræn i samtlige lokalt kalibrerede modeller.

I forhold til DK-modellen er vandløbsnetværket i de lokale modeller udbygget ved tilføjelse af flere mindre vandløbsstrækninger, der er identisk for alle de lokalt tilpassede modeller med undtagelse af *H-500m*, hvor det været nødvendigt at tilpasse spidserne i to mindre vandløb, da vandløb ikke kan opløses i en detalje mindre end gridopløsningen. Det anvendte vandløbsnetværk fremgår af Figur 3. Vandløbenes vertikale placering defineres vha. vandløbstværsnit, der i DK-modellen er indlagt for hver 500 – 1000 m. For at opnå en bedre beskrivelse af den vertikale placering i lokalmodellerne er der i disse indlagt tværsnit for hver 100 m i modellen, svarende gridopløsningen i den mest detaljerede model. Tværsnittenes vertikale placering er tilpasning efter en topografisk 100 m højdemodel. Vandføringen i vandløbene beskrives som DK-modellen ved brug af en vandløbs-routing funktion og vandløbslækagen til beskrivelse af udveksling mellem grundvandsmagasin og vandløbsbund antages ligeledes at være uniform. I forhold til den overfladiske afstrømning er overfladeruheden (Mannings tallet) beskrevet i 50 m gridopløsning i stedet for 500 m.

6.1.3 Modelkalibrering

Modellerne er kalibreret inverst ved anvendelse af PEST, der er en gradientbaseret ikke-lineær invers optimeringsrutine (Pest 2005).

Kalibreringsstrategi

Kalibreringsparametrene er udvalgt på basis af erfaringerne fra kalibrering af DK-modellen samt kalibrering i forbindelse med i CLIWAT og KIMONO projektet (Sonnenborg et al., 2012). Disse parametre er vist i Tabel 2 og er anvendt i kalibreringen af samtlige modeller. Under kalibreringen er der optimeret på rodzonedybden for vinterhvede på JB1 jordtypen, mens rodzonedybden for de øvrige vegetationer er låst fast til denne med forholdende angivet i Tabel 3. Modellerne er i kalibreringen kørt for perioden 1985-1998 med kalibreringsperioden 1994-1998, hvilket giver en 9-årig opvarmningsperiode.

Tabel 2. Parametre medtaget i kalibreringen.

Parameter	Beskrivelse	Kommentar
kx1_ss	Horisontal hydrauliske ledningsevne af smeltevandssand	Der er antaget en anisotropi faktor mellem horisontal og vertikal ledningsevne på 10 (Horisontal ledningsevne = 10 x vertikal ledningsevne)
kz2_ler	Vertikal hydrauliske ledningsevne af kvartært ler	
kx3_kvartss	Horisontal hydrauliske ledningsevne af kvartssand	
kx4_gs	Horisontal hydrauliske ledningsevne af glimmersand	
kx5_gl	Horisontal hydrauliske ledningsevne af glimmerler	
dræn	Dræntidskonstant	Parametrene er antaget konstante i hele oplandet
Vlækage	Vandløbslækagekoefficient	
Rd_wwJB1	Rodzonedybde for vinterhvede på jordbundstype JB1	Det relative forhold mellem denne og øvrige rodzone dybder er holdt fast under kalibreringen med forholdene angivet i Tabel 3

Tabel 3. Rodzonedybde (m) for de anvendte kombinationer af afgrøder og jordbundstyper (JB), der er anvendt som initialværdier ved den inverse kalibrering

JB	Vinterhvede	Vårbyg	Majs	Græs	Løvskov	Nåleskov
JB1	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	0,85
JB2	0,9	0,8	0,9	0,7		
JB3-4	1,2	1,1	1,2	0,8		
JB5-8	1,5	1,4	1,5	0,9		

Modellerne er kalibreret mod vandføringer og grundvandspotentialer. I Horsens området er fremskaffet data fra fire vandføringsstationer, Tabel 4, hvoraf den ene er en QQ-station, dvs. afstrømningstidsserien er konstrueret ud fra en korrelation til vandstrømning i en reference station, hvor relationen er etableret på basis af enkeltmålinger i vandløbet. Til trods for den usikkerhed der ligger i dataene fra en QQ-station (hvor daglig vandføring beregnes ud fra en korrelation til 270004 LL. Hansted å og et antal enkelte målinger af vandføringen ved QQ stationen uden daglig registrering af vandstanden og anvendelse af QH relation), er det valgt at medtage stationen i kalibreringen, da formålet ikke er at opnå en model der er så god som mulig for Horsens, men derimod at se på forskelle ved alternative opstillinger. Af samme årsag er det valgt at lade alle fire stationer indgå med samme vægt i kalibreringen. En af stationerne (280002) har kun data frem til 1998, hvilket har været styrende for valget af kalibreringsperioden.

Tabel 4. Vandføringsstationer medtaget i kalibrering af modellerne.

DMUstnr	Areal (km²)	Start obser- vations år	Slut obser- vations år	Type	Vandløb
270004	74,96	1976	2010	Q/h	LILLE-HANSTED Å
270045	136,27	1976	2010	QQ	HANSTED Å
280001	154,19	1974	2010	Q/h	BYGHOLM Å
280002	77,18	1977	1998	Q/h	GESAGER Å

Grundvandspotentialerne er medtaget i kalibreringen som hhv. tidsserier samt middellobservationer. I området er der udvalgt 37 tidsserier af grundvandspotentialet, hvor samtlige enkeltobservationer er medtaget i kalibreringen. Herudover er der medtaget 433 indtag med én eller flere observationer i kalibreringsperioden, hvor der er kalibreret mod et middelpotentiale. Dvs. for hvert indtag er der foretaget en midling af de observerede potentialer, der er sammenholdt med et middel af de simulerede potentialer i de modelgrids som observationsindtagene er lokaliseret i.

Vandføringer og potentialer er medtaget i kalibreringen ved opstilling af en objektiv funktion, der er et mål for forskellen mellem de observerede og simulerede størrelser, der søges minimeret under kalibreringen. Der blev opstillet fire bidrag til den samlede objektivfunktion (Φ):

1. Middelfejl (observeret – simuleret) for vandføringer beregnet ud fra daglige observerede og simulerede vandføringer (ME_q)
2. Middelfejl (observeret – simuleret) for sommervandføringer beregnet ud fra daglige observerede og simulerede vandføringer for sommerperioden (juni til august) (ME_{qs})
3. RMS for pejletidsserier (RMS_H), der er middelværdien af kvadratafgivelsessummen
4. Middelfejl (observeret – simuleret) for de simulerede middelpotentialer (ME_H)

Middelfejlen på sommervandføringen er medtaget for at give ekstra vægt til minimums-vandføringer, idet indledende modelsimuleringer viste, at modellen generelt havde svært ved at simulere disse. Den samlede objektivfunktion kan opskrives som:

$$\Phi = \omega_{ME_q} ME_q + \omega_{ME_{qs}} ME_{qs} + \omega_{RMS_H} RMS_H + \omega_{ME_H} ME_H$$

hvor ω_i er vægtene, der tildeles de enkelte bidrag, dvs. hvor stor vægt de får i kalibreringen. Da projektet har fokus på vandføringer, er der givet mest vægt til vandføringsdata og der er anvendt vægte så det samlede relative bidrag fra de fire grupper er omtrentligt 3:1:1:1, dvs. middelfejlen på den samlede vandføring vægter tre gange mere end de øvrige bidrag, og vandføringsdataene vægter samlet dobbelt så meget som potentiale dataene. For at opnå denne vægtning er ω_i justeret, hvilket er sket på basis af 100 m modellen. Under kalibreringerne af modellerne er der anvendt samme initialværdier for parametrene. Selv ved anvendelse af samme parameterværdier vil der være nogen variation mht. forskellen mellem observerede og simulerede data for de tre anvendte gridopløsninger. Dette betyder, at forholdet 3:1:1:1 for de fire grupper ikke vil være helt ens for de tre modelopstillinger. Det er dog valgt at bibeholde samme vægte for alle tre kalibreringer.

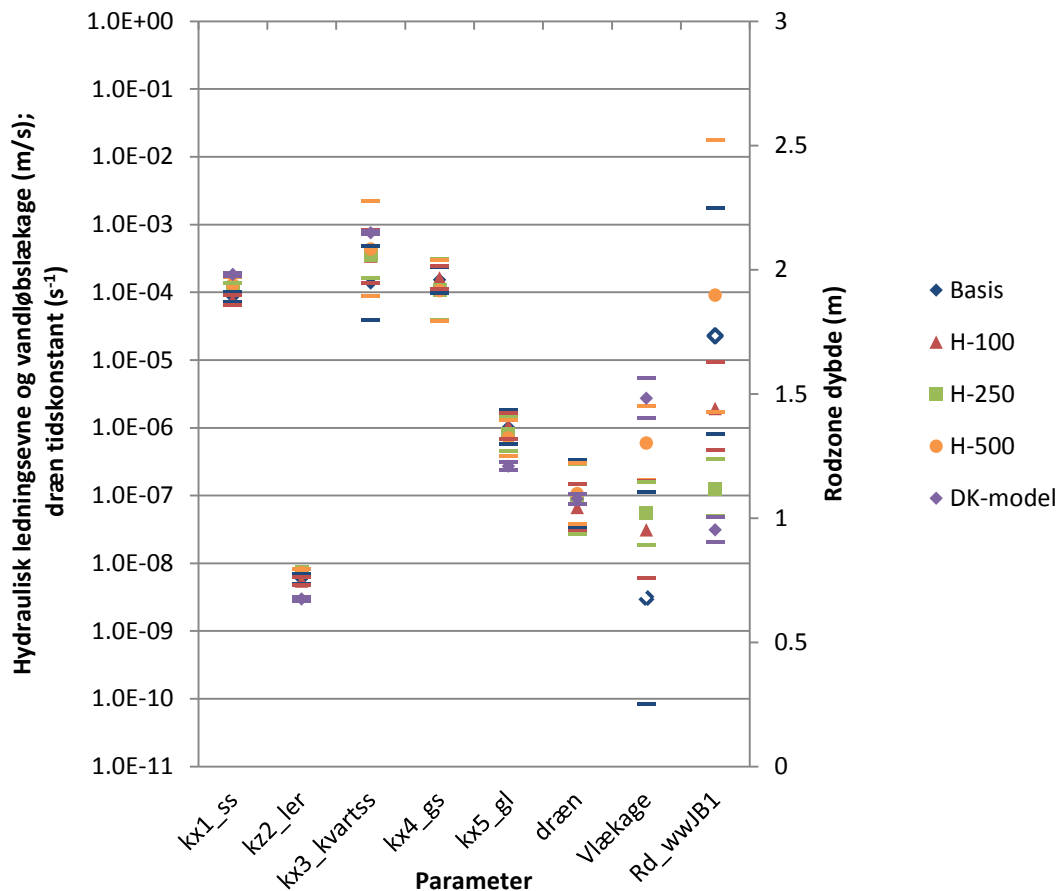
Indledningsvist blev der gennemført en kalibrering af modellen med en 100 m diskretisering. Efterfølgende blev der foretaget nogle justeringer mht. vandløbsopsætningen, ligesom vægtningen af objektivfunktionsbidragene blev tilpasset jf. ovenstående. Pga. tidsbegrænsningen i projektet var det ikke muligt at foretage en rekalkibrering af 100 m modellen før simuleringerne med de alternative konceptualiseringer skulle igangsættes. Det blev derfor valgt at anvende modellen fra den første kalibrering som basismodel (*Basis*) for analysen af alternative konceptualiseringer, med følgende justeringer:

1. Anvendelse af det justerede vandløbsopsætning
2. Justering af vandløbslækage. Den optimerede værdi for vandløbslækagen var meget lav (3,1e-9 m/s), hvilket formegentligt skyldes tildeling af en for høj vægt til middelfejlen for sommervandføringerne. Ved en meget lav vandløbslækage begrænses udvekslingen mellem vandløb og grundvandet, og det blev vurderet, at effekten af en distribueret vandløbslækage ville blive underestimeret ved anvendelse af denne lave værdi. Vandløbslækage blev derfor manuelt justeret til 1e-7 m/s.
3. Justering af rodzonedybden. Optimeringen resulterede i en rodzonedybde på 1,7 m for en JB1 jordtype, hvilket er urealistisk stor og formegentligt ligeledes skyldes en for stor vægt på sommervandføringen. Rodzonedybden er derfor manuelt justeret til 1,0 m for JB1.

Kalibreringsresultater

De optimerede parametre for samtlige fire kalibrerede modeller (*Basis*, *H-100m*, *H-250m* og *H-500m*) er vist på Figur 11, hvor de optimerede parametre fra DK-model område 5 ligeledes er vist. For de lokalt kalibrerede modeller er der opnået meget sammenlignelige parameterværdier for de hydrauliske ledningsevner, mens der er noget større spredning på vandløbslækagen samt rodzonedybden, der ligeledes generelt har de største 95 % konfidensintervaller. Den optimerede værdi for vandløbslækagen ses at falde med faldene gridstørrelse, hvorimod der ikke ses en sammenhæng mellem gridstørrelse og de optimerede rodzonedybder. Sammenligning mellem parameterværdierne opnået ved den lokale

og regionale kalibrering (*DK-model*) viser, at der er lidt større forskel i de optimerede hydrauliske ledningsevner, men den største forskel er ligeledes på vandløbslækagen og rodzonedybden.



Figur 11. Optimerede parametre for Basis model, *H-100m*, *H-250m* og *H-500m*. Vandrette barer angiver estimerede 95% konfidensintervaller. Værdierne for vandløbslækagen (Vlækage) og rodzone-dybden (Rd_wwJB1) er efterfølgende manuelt justeret for *Basis* modellen, se tekst for yderligere forklaring.

Performance af de tre modeller der alene varierer mht. gridstørrelserne er vurderet på baggrund af bidragene medtaget i objektivfunktionen suppleret med NSE og vandbalancefejlen (F_{bal}) for vandføringer samt den absolutte middelfejl (MAE) for potentialerne, Tabel 5. Baseret på værdierne i tabellen ses der kun at være mindre forskelle mellem modellernes performance, dog opnås der er lidt forbedret resultat for faldende gridstørrelse, med undtagelse af middelfejlen for sommervandføringen (ME_{qs}), hvor det modsatte gør sig gældende, ligesom RMS_H for *H-250m* modellen er lidt bedre end for *H-100m* modellen. Af middelfejlen på de midlede potentialer (ME_H) ses, at *H-100m* i middel simulerer en grundvandsstand der ligger 0,30 m under det observerede potentiale, mens *H250m* og *H-500m* simulerer et vandspejl der er hhv. 0,60 m og 0,78 m over det observerede.

Tre af de fire vandføringsstationer i Horsens området indgår ligeledes i kalibrering af *DK*-modellen område 5 (280002 indgår ikke). For de tre stationer er der beregnet NSE og vandbalancefejl, som er indsat i Tabel 5 for sammenligning. Som det fremgår, er der opnået en bedre NSE for *DK*-model, mens vandbalancen er dårligere. En lokal tilpasning af modellen ved kalibrering til de lokale data skulle umiddelbart forventes at give en væsentlig

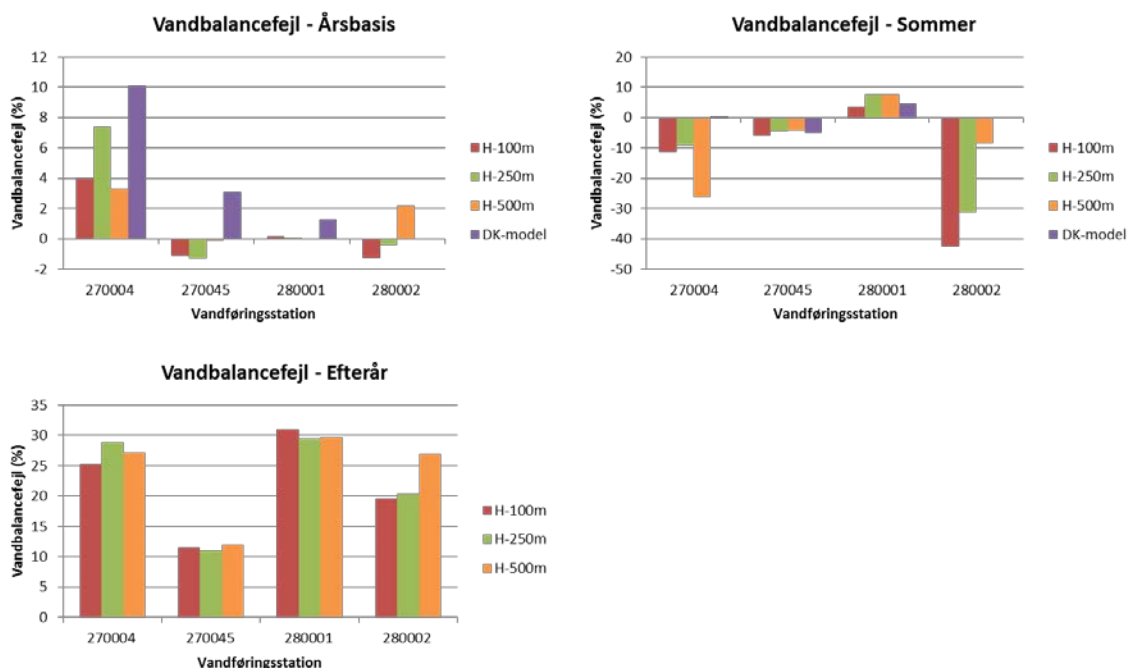
bedre performance. I nærværende projekt er der ikke foretaget en sammenligning i forhold til de øvrige forhold, eksempelvis potentialerne, idet dette ikke er tilgængeligt for *DK-model*. Det er dog bemærkelsesværdigt, at der med *DK-model* opnås en bedre beskrivelse af NSE, hvilket viser, at en lokal tilpasning ikke nødvendigvis resultere i en bedre model performance for alle variable.

Der kan være mange årsager til den dårligere NSE i de lokale modeller, eksempelvis randproblemer, de foretagne justeringer i modelopstillingen, forskellene i formulering af objektive funktionerne i de to kalibreringer, som muligvis vil kunne identificeres og justeres ved yderligere analyse. I nærværende projekt har formålet ikke været at opnå den bedst kalibrerede model for Horsens området, og det er derfor valgt ikke at forsøge med en yderligere optimering af lokalmodellerne.

Tabel 5. Performance for de tre kalibrerede modeller med varierende gridstørrelse, beregnet som middel for alle observationer anvendte i kalibreringen. For vandføringer er performancekriterierne arealvægtet.

	<i>H-100m</i>	<i>H-250m</i>	<i>H-500m</i>	<i>DK-model</i>
	Vandføring			
NSE (-)	0,63	0,64	0,60	0,72
Fbal (%)	0,16	0,81	0,90	3,77
ME_q (m³/s)	-1,3E-03	2,4E-03	6,0E-03	-
ME_{qs} (m³/s)	-2,3E-02	-1,1E-02	-1,0E-02	-
	Grundvandspotentialer			
RMS_H (m)	3,46	3,37	4,61	-
ME_H (m)	0,30	-0,60	-0,78	-
MAE (m)	4,58	4,75	4,96	-

For alle modeller er der for oplandet som helhed opnået tilfredsstillende vandbalancefejl. Der er imidlertid betydelig variationer i de opnåede vandbalancefejl for de fire stationer medtaget i kalibreringen, ligesom der er en sæson variation. Dette er illustreret i Figur 12, hvor vandbalancen for de fire stationer er opgjort for hele perioden på årsbasis og for sommer og efterårsperioderne. Det bemærkes, at for både årsbasis og sommerperioden er der stationer, hvor vandbalancefejlen er mindst for modellen med et 500 m grid. En detaljering af griddet kombineret med en kalibrering af modellen garanterer således ikke nødvendigvis en bedre beskrivelse af vandbalancen.



Figur 12. Vandbalancefejl opgjort pr. vandføringsstation på årsbasis samt for sommer og efterårsperioderne.

6.1.4 Alternative konceptualiseringer

Basis modellen er udgangspunktet for de alternative konceptualiseringer med forskellige procesbeskrivelse og varierende heterogenitet. Herunder beskrives forskellen mellem de alternative konceptualiseringer og *Basis* modellen. Ingen af de alternative konceptualiseringer (procesbeskrivelse og heterogenitet) er kalibreret.

Alternativt UZ-koncept

For den umættede zone er der afprøvet en alternativ procesbeskrivelsesmodel, *Richards*, hvor Two-layer modulet er erstattet af Richards ligning, der giver en mere korrekt fysisk beskrivelse vandstrømningen i den umættede zone. Jordtypen i de tre horisonter: A (0-30 cm), B (30-80 cm) og C (>80cm) er beskrevet ved brug af et horisonttype-kort, der dækker hele Danmark i 500 m gridopløsning og beskriver de 30 mest hyppige kombinationer af JB-jordtyper i A, B og C horisonten. De jordfysiske parametre til beskrivelse af umættede zone strømning er beskrevet ved en retentionskurve og en kurve for den hydrauliske ledningsevne (som funktion af mætningsgraden) for hver JB-type i hver horisont. Den vertikale diskretisering er opsat så A-horisonten har en cellehøjde på 5 cm, B-horisonten på 10 cm og diskretiseringen i C-horisonten er mellem 0,5 m og 5 m, med de tyndeste lag øverst. Denne modelopsætning var den mest beregningstunge af de alternative koncepter der blev afprøvet.

Alternativt vandløbs-koncept

En alternativ procesbeskrivelsesmodel, *StV*, er sat op med fuld dynamisk beskrivelse af vandløbsstrømningen ved brug af St. Venants ligning for alle strækninger.

Alternativ beskrivelse af UZ og arealanvendelse

Som nævnt i afsnit 6.1.1 er arealanvendelsen på landbrugsjorde distribueret tilfældigt på basis af den relative fordeling indenfor de tidligere amtsgrænser hentet fra Danmarks statistisk. Dvs. den faktiske placering af landbrugsafgrøder er ikke kendt, og denne vil endvidere variere fra år til år, hvilket ikke er medtaget i modellen. For at se hvordan en ændring i den rummelige fordeling af arealanvendelsen på landbrugsjorde påvirker afstrømningen er der konstrueret 10 alternative kort (realisationer) over arealanvendelse på landbrugsjord. I disse kort er arealanvendelse tilfældigt (random) omfordelt, men den relative fordeling af de forskellige arealanvendelser er bevaret (Tabel 6). Ved omfordeling af arealanvendelsen er der ikke taget højde for hvilken JB-jordtype arealanvendelsen er placeret på.

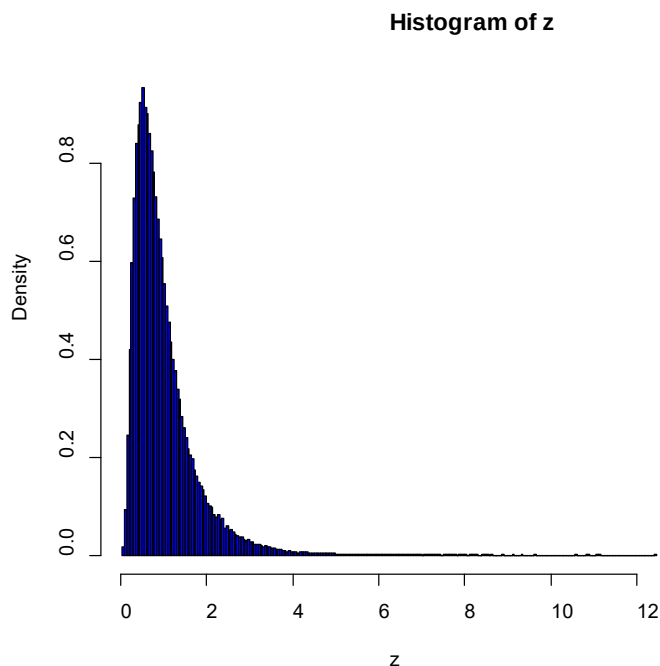
Tabel 6. Relativ fordeling af arealanvendelse på landbrugsjord i oplandet til Horsens Fjord.

Arealanvendelse	Relativ fordeling på landbrugsjord (%)
Vinterhvede	45
Vårbyg	26
Græs	24
Majs	5

For hver af de 10 realisationer er der gennemført en simulering med modellen, hvor der kun er ændret på arealanvendelsen. Resultatet fra de 10 realisationer benævnes LU i resultatafsnittet.

Alternativ beskrivelse af drændybde

I modellen simuleres en grundvandsstand indenfor hvert modelgrid, hvilket er en middel grundvandsstand for cellen, men pga. af geologisk heterogenitet vil der være variationer omkring denne middel situation. Ligeledes indplaceres dræn i en fast dybde, men pga. topografisk variation, der ikke opløses af modellens grid, vil der være variationer i den faktiske placering af drænene indenfor en gridcelle. Dette betyder, at der under naturlige forhold vil være forskel i hvornår der sker en aktivering af drænene indenfor eksempelvis et areal på 100 m x 100 m, mens der i modellen først sker en dræning når middel grundvandsstanden når over middeldybden til drænene. En mere korrekt repræsentation vil således være anvendelse af en alternativ drænfunktion, der kan tage hensyn til denne heterogenitet. Dette er imidlertid ikke muligt i MIKE SHE. For at vurdere betydningen af heterogenitet mht. dræning er der genereret 10 realisationer, hvor drændybden varierer for de enkelte modelgrids. Variationen i drændybden er relateret til den topografiske variation, ved analyse af forskellen mellem den faktiske topografi (10 m DTM) og 100 m modeltopografien. I ca. 95 % af tilfældene var den faktiske topografi mellem 1.5 m højere og 1.5 m lavere end modeltopografien og forskellen var omtrent normalfordelt. På basis heraf, er der generet 10 realisationer af drændybden med en middelværdi på 1 m og en standard afvigelse på 0,75 m. For at undgå drænniveauer over topografien samt en fordeling med de fleste drændybder omkring middelværdien, er de 10 realisationer genereret ud fra en log-normalfordeling. Figur 13 viser et eksempel på fordelingen af drændybderne fra én af realisationerne.



Figur 13. Eksempel på realisation for fordelingen af drændybde.

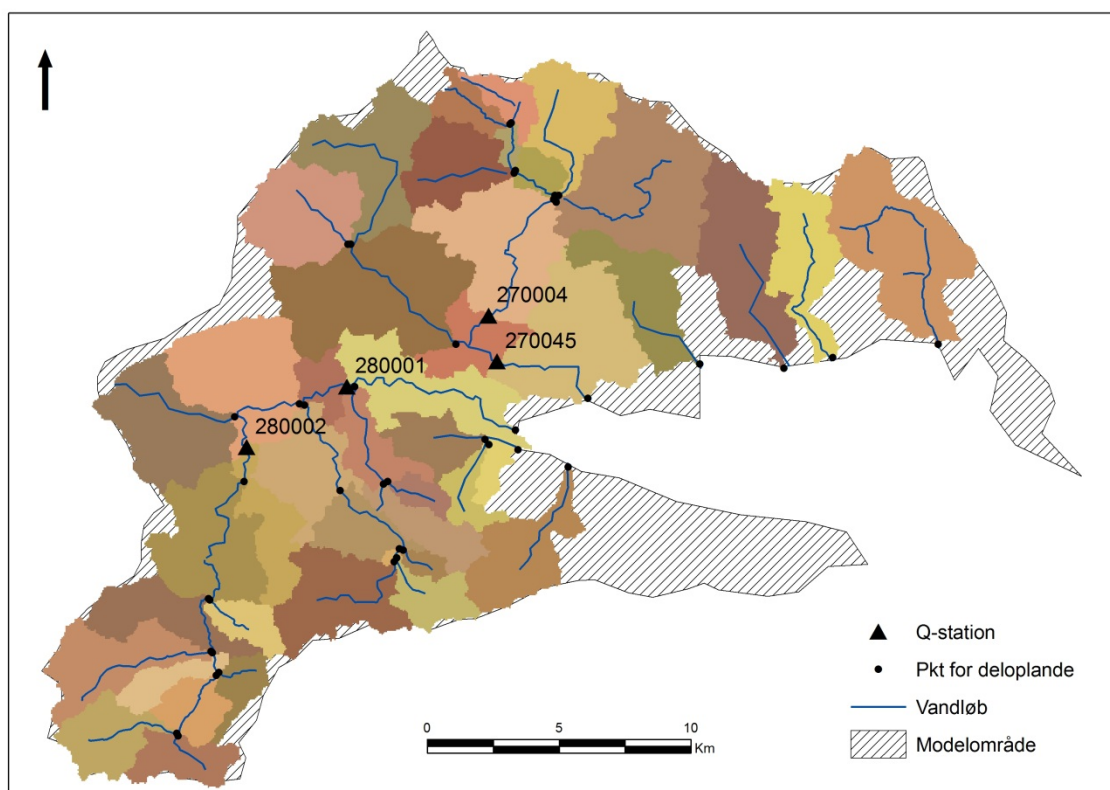
Resultatet fra de 10 realisationer med varierende drændybde benævnes DrnRnd i resultat-afsnittet.

Alternativ beskrivelse af vandløbslækage

Generelt er der ikke informationer om den hydrauliske ledningsevne i vandløbsbunden samt dennes variation. I DK-modellen er det derfor valgt, at anvende en konstant vandløbslækage, som er konstant indenfor hele oplandet. For at se hvordan en varierende vandløbslækage påvirker afstrømningen er der opsat to forskellige alternative beskrivelser for heterogeniteten i vandløbslækagen. I begge tilfælde er der anvendt en middelværdi på 1×10^{-7} m/s svarende til vandløbslækagekoefficienten i *Basis* modellen og det er antaget at lækagen følger en lognormalfordeling. Ligeledes er der i begge tilfælde anvendt stor varians ($\sigma^2 = 2$) for vandløbslækagen, mens der er anvendt to forskellige korrelationslængder på hhv. 50 m (V2L5) og 1000 m (V2L1). I det første tilfælde er korrelationslængden mindre end gridstørrelsen på 100 m, og der vil således være en tilfældig variation fra grid til grid. Modsat vil den store korrelationslængde på 1000 m sikre en vis korrelation mellem nabo grids. For hver af beskrivelse er der genereret 10 realisationer.

6.1.5 Opdeling i deloplande

For at belyse hvorledes gridstørrelse og alternative konceptualiseringer påvirker simuleringen af ekstremvandføringerne for forskellige oplandsstørrelser, er oplandet til Horsens Fjord opdelt i 41 deloplande udover oplandene til de fire vandføringsstationer, Figur 14. De i alt 45 deloplande har et oplandsareal fra 2 km² til 179 km² med et middelfareal på 34 km².



Figur 14. Opdeling af oplandet til Horsens fjord i 45 deloplande. Det skraverede område viser modelområdet for lokalmodellerne.

6.1.6 Modelkørsler og statistik

Til beregning af ekstremvandføringer er alle modeller kørt i 25 år, hvor de første 5 år er "opvarmning" og de efterfølgende 20 år (1991 – 2010) er anvendt til at beregne vandføringsstatistik. For hvert år i perioden 1991-2010 er der for hvert opland beregnet 1 % fraktilværdier for sommermånederne, der er den laveste simulerede vandføring i sommerperioden (juni-august), og vinter 99 % fraktilværdier, der er den højeste simulerede vandføring i vinterperioden (december-februar). Herefter er der for hvert opland for perioden 1991-2010 beregnet den næstlaveste sommervandføring ($SomQ_{01}$) og den næsthøjeste vintervandføring ($VinQ_{99}$), hvilket svarer til en hændelse, der optræder to gang på de tyve år, eller én gang for hvert 10. år.

For simuleringer med alternative heterogenitetsbeskrivelser (LU, DrnRnd, V2L1 og V2L5) er $SomQ_{01}$ og $VinQ_{99}$ beregnet for hvert delopland og hver realisation, som beskrevet i afsnittet herover. Herefter er der på tværs af de 10 realisationer beregnet middel værdier og CV for hvert delopland.

6.2 Tidligere undersøgelser

Analysen med varierende gridstørrelse kan ses som en udvidelse af analysen udført af van der Keur et al. (2011), der analyserede betydningen af gridstørrelser på simulering af vandføringer for et delopland til Odense Fjord, med modelopstillinger hvor gridstørrelsen gradvist blev reduceret fra 500 m til 100 m, med spring på 100 m. I analysen blev der ikke foretaget en rekalkibrering, men kun ændret på gridstørrelsen. van der Keur et al. (2011) analyserede hvordan gridstørrelsen ændrede de simulerede bidrag til vandføringen, dvs. dræn-, overland- og baseflow (forstået som tilstrømning fra grundvandet til vandløbene over vandløbsbunden) samt den samlede ændring i de simulerede vandføringer, herunder minimums- og maksimumsværdier. De overordnede resultater fra analysen er:

- Drænflow. Der blev observeret en stigning på 15 % i drænflowet når gridstørrelsen blev ændret fra 500 m til 100 m. Mere betydende er dog, at der blev fundet en større sæsonvariation, hvor 500 m modellen gav de højeste vandføringer om vinteren og de laveste vandføringer om sommeren.
- Overland flow. Bidraget fra overfladisk afstrømning øges ved reduceret gridstørrelse, hvilket tilskrives den bedre opløsning af den topografiske variation i modellerne ved reduktion af gridstørrelsen.
- Baseflow. Der observeres ikke en entydig sammenhæng mellem baseflow komponenten og ændring i gridstørrelse. Dog ses generelt et større tilskud for større gridopløsning.
- Minimumsvandføringer. Sommervandføringer observeres generelt at stige for reduceret gridstørrelse. Hvor tydelige denne tendens observeres varierer dog mellem de medtagede oplande.
- Maksimumsvandføringer. Ved reduktion af griddet ses en betydelig reduktion i de høje vandføringer for perioden januar – marts samt for hele perioden under et. For sommermånederne observeres gridstørrelse imidlertid kun at have ringe effekt på resultaterne.

I afsnit 5 viste analysen af DK-modellens evne til simulering af vandføringer på landsplan, at minimumsvandføringer generelt simuleres for højt, mens de højeste vandføringer simuleres for lavt. I denne sammenhæng er det bemærkelsesværdigt, at van der Keur et al. (2011) generelt observerede højere sommervandføringer og lavere intervandføringer når gridstørrelsen blev reduceret. En reduktion af gridstørrelsen i sig selv kan således ikke forventes at føre til en bedre simulering af ekstremværdierne. Van der Keur et al. (2012) bemærker dog, at undersøgelsen er baseret på modeller, der ikke er kalibreret og anbefaler en udvidelse af analyse, hvor dette medtages.

6.3 Resultater

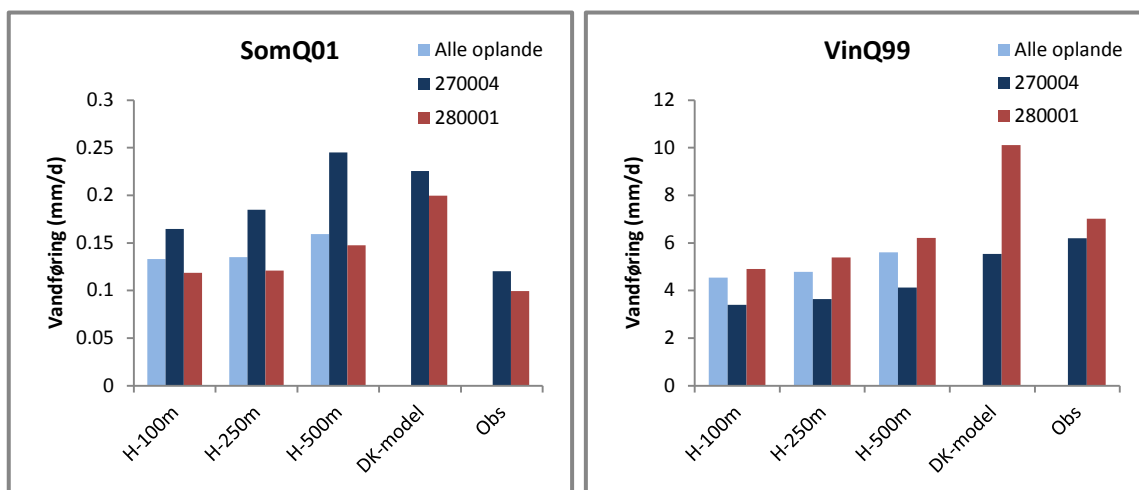
6.3.1 Regional kalibrering vs. lokal kalibrering og gridopløsning

I den første analyse vurderes betydningen af forskellige gridstørrelser (*H-100m*, *H-250m* og *H-500m*) samt betydningen af den regionale kalibrering anvendt i DK-modellen (*DK-model*) og den lokale kalibrering (*H-500m*). De simulerede størrelser sammenlignes derudover

med observerede data for vandføringsstationerne 270004 og 280001, der er de eneste to stationer med kontinuerte Q-h vandføringsmålinger for hele perioden 1990 – 2010.

Figur 15 viser simulerede minimums- og maksimums vandføringer (SomQ₀₁ og VinQ₉₉) opnået ved anvendelse af de tre modeller med varierende gridstørrelser (kalibreret til lokale data) samt *DK-model*. På figuren er vist de observerede og simulerede værdier for de to Q-h stationer, samt middelværdier baseret på simuleringer fra samtlige 45 deloplande. Observerede og simulerede værdier for de to stationer samt den relative forskel er endvidere givet i Tabel 7.

Generelt ses vandføringen at blive reduceret ved reduktion af gridstørrelsen, og de observerede sommer minimumsvandføringer overestimeres af modellerne, mens maksimumsvandføringerne underestimeres. Eneste undtagelse herfra er *DK-model*, hvor maksimumsvandføringer overestimeres for opland 280001. Af Tabel 7 ses, at sommervandføringen simuleret med *H-100m* modellen overestimeres med 37 % og 19 % for hhv. 270004 og 280001. Overestimeringen af sommervandføringen ses endvidere at stige med stigende gridstørrelse for begge stationer. For maksimumsvandføringer sker der en underestimering på 45 % og 30 % for de to oplande, som falder til hhv. 34 % og 12 % for *H-500m* modellen.



Figur 15. Sammenligning af ekstremvandføringer (SomQ₀₁ og VinQ₉₉) fra modeller kalibreret på forskellig skala (DK-model vs. H-) og med forskellig gridopløsning (H-) i forhold til de observerede vandføringer. Sammenligningen er foretaget for de to Qh stationer med data i hele perioden samt for alle 45 deloplande.

Tabel 7. Observerede og simulerede minimums og maksimumsvandføringer. I parentes er angivet hvor mange procent de simulerede værdier udgør af de observerede værdier (simuleret/observeret*100 %).

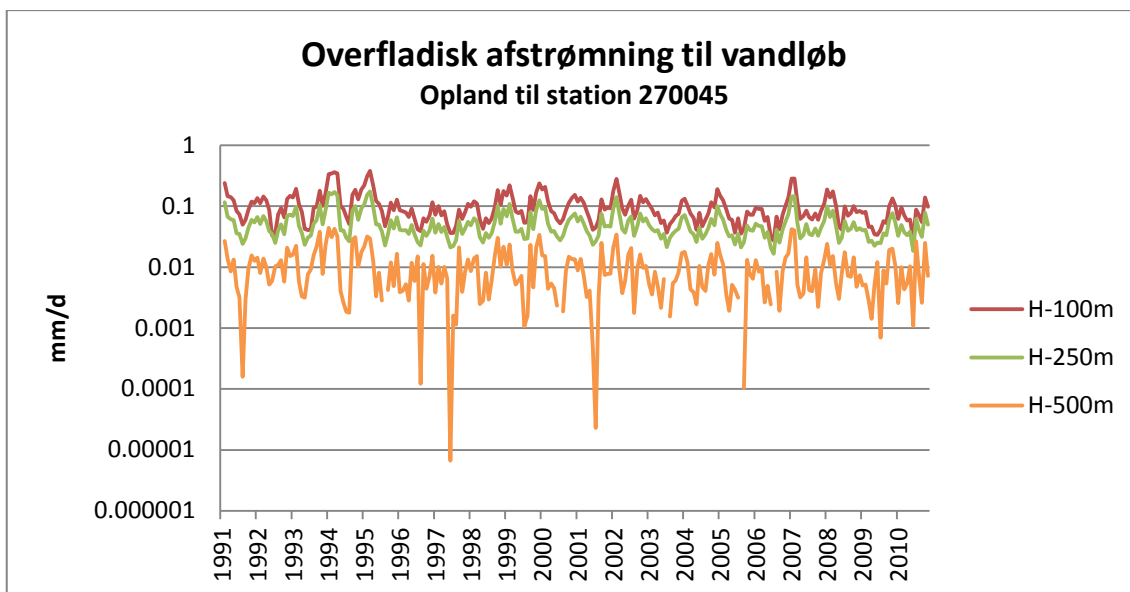
Q	Opland	Obs (mm/d)	H-100m (mm/d)	H-250m (mm/d)	H-500m (mm/d)	DK-model (mm/d)
SomQ01	270004	0,12	0,17 (137%)	0,19 (154%)	0,25 (204%)	0,23 (188%)
WinQ99	270004	6,20	3,40 (55%)	3,64 (59%)	4,12 (66%)	5,54 (89%)
SomQ01	280001	0,10	0,12 (119%)	0,12 (122%)	0,15 (149%)	0,20 (201%)
WinQ99	280001	7,02	4,90 (70%)	5,40 (77%)	6,21 (88%)	10,10 (144%)

Den lokalt kalibrerede 500 m model (*H-500m*) simulerer lavere vandføringer end den regionalt kalibrerede 500 m model (*DK-model*). De væsentligste forskelle på de to 500 m modeller er den lokale tilpasning samt placeringen af drændybden. I *DK-model* er drænenene placeret tættere på terræn og drænenes bidrag til den samlede afstrømning i vandløbene forventes derfor at være mindre end i *H-500m* modellen. Det er derfor mest sandsynligt, at forskellen mellem de to modeller skyldes den lokale tilpasning af *H-500m* samt de forskellige objektive funktioner anvendt i hhv. *DK-model* og *H-500m*.

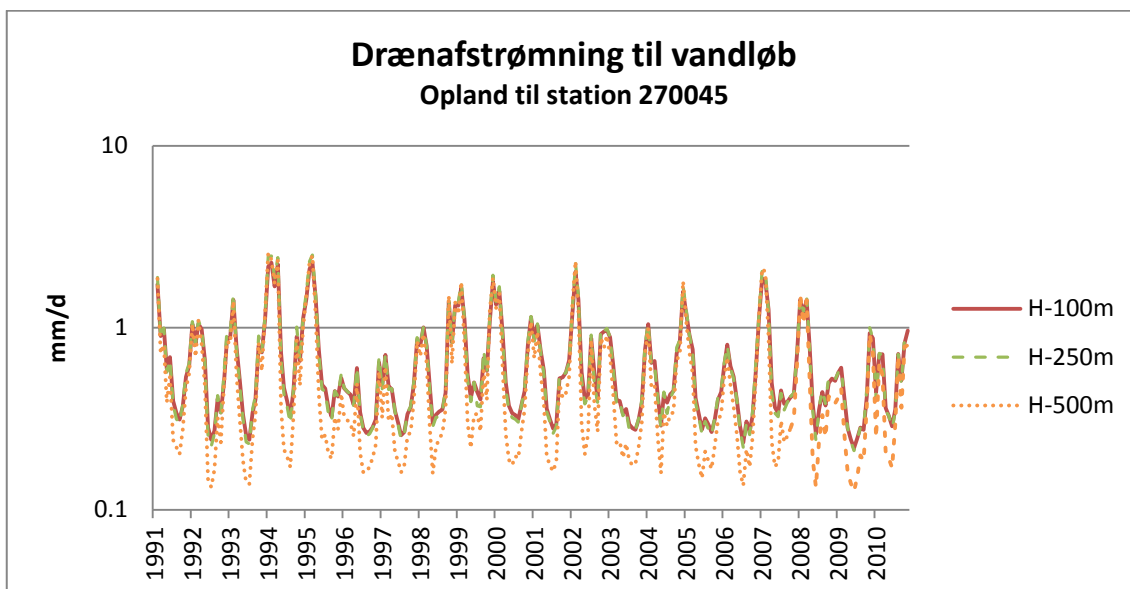
Detaljeret af modelgriddet fra 500 m til 250 m ses at have en tydelig effekt på simulering af minimumsvandføringen, der reduceres ved en detaljeret af griddet. En yderligere detaljeret af griddet til en 100 m opløsning har derimod ringe effekt på de simulerede værdier. I afsnit 6.1.3 er middelfejlen for potentialerne indenfor Horsens modelområde beregnet for de lokalt kalibrerede modeller. Heraf fremgår det, at *H-100m* i middel underestimerer potentialet (ME = 0.30 m), mens *H-250m* og *H-500m* overestimerer potentialet med middelfejl på hhv. -0,60 m og -0,78 m. Det simulerede potentiale falder således ved reduktion af gridstørrelsen og kan være med til at forklare den observerede reduktion i minimumsvandføringen. Indenfor Horsens området er der ikke beregnet en forskel mellem observeret og simuleret potentiale for *DK-model*. Analysen omkring oversvømmelse af lavtliggende områder, afsnit 7, indikerer imidlertid, at den simulerede grundvandsstand ligger betragtelig højere i *DK-model* end i *H-500m*, hvilket vil resultere i en øget udveksling med vandløbene.

For vinter maksimumvandføring ($V_{inQ_{99}}$) ses det samme overordnede mønster mht. forskelle i regionalt vs. lokal kalibrering samt anvendelse af forskellige gridstørrelser, med faldende vandføringer for faldende gridstørrelse. Grunden til at de lokalt kalibrerede modeller generelt simulerer lavere ekstremvandføringer for de høje vandføringer kan skyldes forskellen i drændybden. Ved en placering af drænenene i 1 m vil der ske en dræning ved en lavere grundvandsstand, dvs. drænstrømningen starter tidligere på efteråret, hvor grundvandsstande stiger fra et lavt sommerniveau. Drænstrømningen vil således ske over en længere periode og have en udjævnende effekt i forhold til de høje vandføringer. Foruden drænplaceringen kan forskelle i objektive funktioner ved kalibrering af den regionale model i forhold til de lokale modeller samt den lokale tilpasning i øvrigt også have betydning for forskellene i de simulerede ekstremvandføringer.

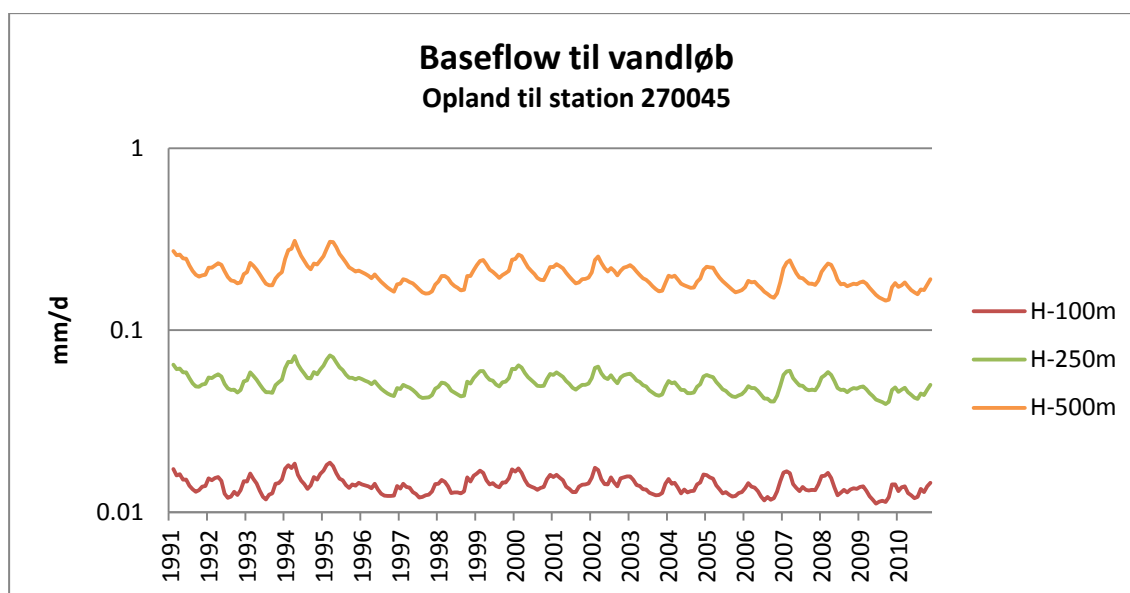
Bidragene fra overfladisk-, dræn og baseflow til station 270045, der afdræner det nordlige og mest kuperede område, er optegnet på Figur 16 - Figur 18, mens de samlede vandbalancekomponenter opgjort for hele Horsens Fjord oplandet samt de to Q-h stationer er vist i Tabel 8. For den overfladiske afstrømning ses der at være god overensstemmelse med resultaterne fra van der Keur et al. (2011), der fandt en øget overfladisk afstrømning når gridstørrelsen reduceres. For drænafstrømningen, Figur 17, ses ligeledes, at modellen med det største grid (500 m) har den mindste drænstrømning i sommerperioden, men der er ingen forskel for *H-250m* og *H-100m*. I vinterperioden ses en reduktion i drænstrømningen for reduceret gridstørrelse, som også blev fundet af van der Keur et al. (2010), dog er der tale om en begrænset forskel og den største forskel observeres mellem *H-250m* og *H-100m*.



Figur 16. Simuleret overfladisk afstrømning til station 270045, der afdræner det nordlige og mest kuperede område. Bemærk logaritmisk y-akse.



Figur 17. Simuleret drænafstrømning til station 270045, der afdræner det nordlige og mest kuperede område. Bemærk logaritmisk y-akse.



Figur 18. Simuleret baseflow til station 270045, der afdræner det nordlige og mest kuperede område. Bemærk logaritmisk y-akse.

I modsætningen til van der Keur et al. (2011), der ikke fandt en entydig sammenhæng mellem gridstørrelse og baseflow, er der i nærværende projekt en tydelig sammenhæng, med aftagende baseflow ved reduktion af gridstørrelsen, Figur 18. Den relative forskel i baseflowet mellem 500 m og 250 m modellerne er næsten den samme som den relative forskel mellem 200 m og 100 m modellerne.

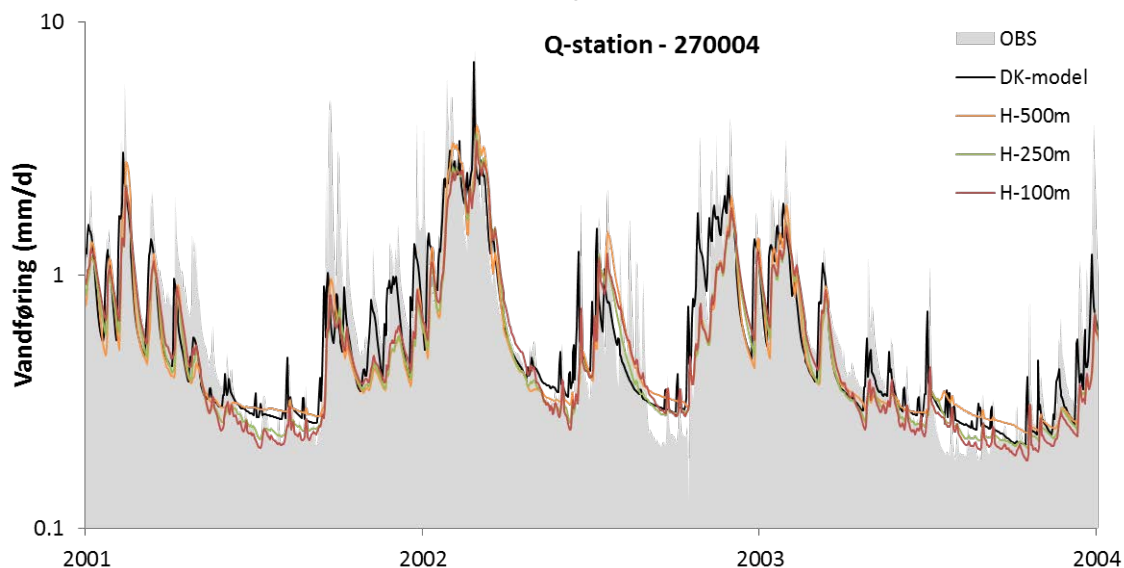
Tabel 8. Vandbalancekomponenter for hele Horsens Fjord samt de to -h stationer 270045 og 280001.

mm/år	Hele opland			270045 (Nord)			280001 (Syd)		
	100m	250m	500m	100m	250m	500m	100m	250m	500m
Nedbør	834,5	834,0	836,6	861,9	861,9	861,7	871,0	869,1	878,2
Fordampning	563,8	557,0	564,7	559,1	551,3	563,5	546,3	540,0	548,4
Infiltration	349,4	349,3	338,6	338,5	326,2	313,2	341,3	340,8	346,2
Baseflow	5,0	13,6	47,4	5,1	18,7	73,3	5,9	16,0	52,2
Dræn til vandløb	178,2	173,9	153,6	238,2	243,0	199,9	266,8	263,4	232,6
OL til vandløb	15,6	9,1	2,3	36,8	19,0	3,7	12,1	4,9	1,7

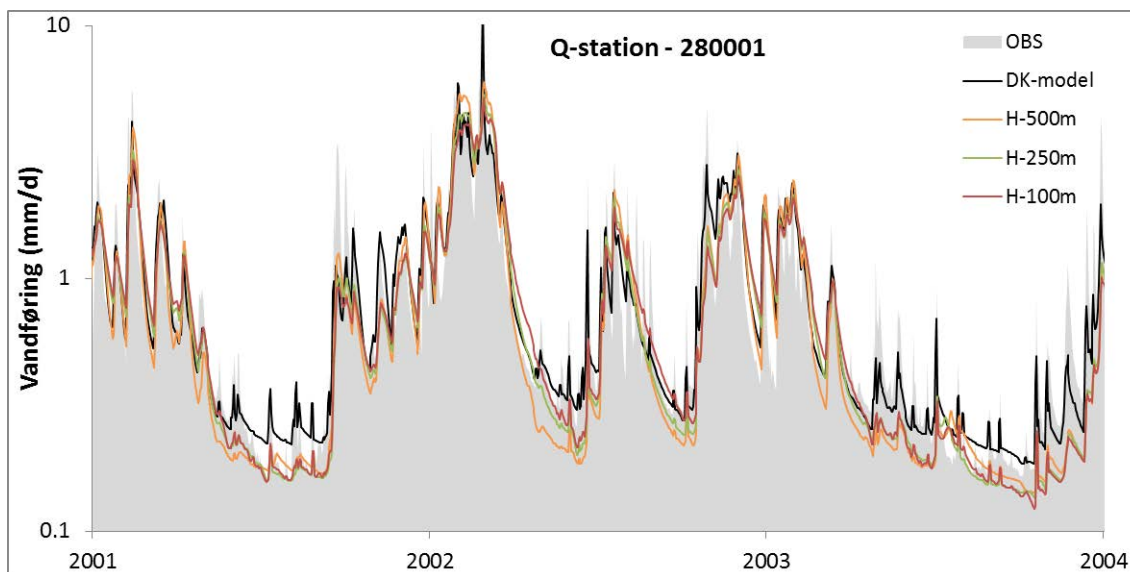
Opdelingen i de tre flowkomponenter for station 280001 viser samme fordeling af de tre strømningskomponenter som 270045 og er vedlagt i Appendiks C. Dog er der forskelle mht. de absolutte simulerede størrelser, hvilket reflekterer de forskellige strømningsregimer for det nordlige kuperede og det sydlige flade opland.

Den samlede simulerede og observerede vandføring for de to Q-h stationer med data for hele perioden er sammenlignet i Figur 19 og Figur 20. For den nordlige station (270004) ses den samlede vandføring at blive reduceret med faldende gridstørrelse for såvel de lave sommervandføringer som de høje efterårs- og vinter vandføringer. Mens de største efter-

års- og vintervandføringer ligeledes opnås for de største gridopløsninger for det sydlige opland, Figur 20, er der variationer fra år til år mht. hvilken gridopløsning der giver den mindste sommervandføring. At der opnås sammenlignelige sommervandføringer for de tre gridstørrelser betyder, at den lavere overfladisk- og drænafstrømning der ses for 500 m modellen i sommerperioden modvirkes af et øget baseflow.



Figur 19. Observeret og simuleret vandføring for station 270004 placeret i det nordlige kuperede område. Bemærk logaritmisk y-akse.

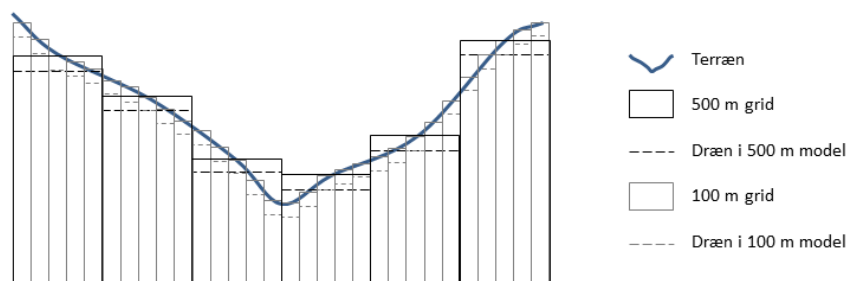


Figur 20. Observeret og simuleret vandføring for station 270004 placeret i det sydlige flade område. Bemærk logaritmisk y-akse.

Samlet set har en reduktion af gridstørrelsen haft en positiv effekt på simuleringen af minimumsvandføringer men negativ effekt på maksimumsvandføringerne. For Horsens område har det således ikke været muligt at opnå en bedre beskrivelse af de høje vandføringer ved en reduktion af modellens gridstørrelse alene. Af Figur 16 ses, at der sker en betydelig tilvækst i den overfladiske afstrømning ved overgangen fra 500 m til 100 m gridopløsning. En øget maksimumsvandføring vil derfor potentielt kunne opnås ved en optimering af pa-

rametrene til beskrivelse af den overfladiske afstrømning. Ved sammenligning af Figur 16 og Figur 18 fremgår det imidlertid, at den overfladiske afstrømning er næsten 10 gange højere end baseflowet i 100 m modellen. Et større bidrag fra den overfladiske afstrømning vurderes derfor ikke at være realistisk, hvis modellen skal benyttes i forbindelse med en kildeopsplitning, dvs. estimering af fluksene fra de forskellige flow komponenter (overfladisk-, dræn- og baseflow). I *H-500m* er baseflowets andel af den samlede vandføring betydeligt større end tilfældet er for *H-100m*, Figur 17. En væsentlig årsag hertil vurderes at være den store forskel i de optimerede vandløbslækage værdier, Figur 11, hvor værdien for *H-100m* er en faktor 20 mindre end værdien for *H-500m*.

En forklaringsmodel for den reducerede vandløbslækage for reduceret gridstørrelse kan være drænenes fysiske placering. Principskitsen på Figur 21 viser placeringen af dræn i hhv. en 100 m og en 500 m model, når drænenes indplaceres i en fast dybde under terræn. Som det fremgår af figuren vil den bedre topografiske opløsning i *H-100m* medføre, at drænene bliver placeret dybere i lavtliggende områder, som omkring vandløbene. Dette betyder, at drænbidraget i disse områder vil være større i 100 m modellen ved en lavtliggende grundvandsstand som i sommerperioden, hvilket også fremgår af Figur 17. Under kalibreringen vil den optimerede værdi for dræntidskonstanten primært være styret af modellens evne til at beskrive recessionen af vandløbshydrograferne og i mindre grad følsom overfor sommervandføringen. For de tre gridstørrelser opnås der således også næsten ens optimerede værdier for dræntidskonstanten, Figur 11. Den øgede drænafstrømning i sommerperioden for modellerne med reducerede gridstørrelser betyder, at de simulerede sommervandføringer overestimeres, hvilket under kalibreringen forsøges kompenseret ved en reduktion i vandløbslækage, for at minimere baseflowet.



Figur 21. Principskitse for placering af dræn i 500 m og 100 m model.

I det anvendte drænkonscept beskriver drænene både kunstig dræning samt mindre vandløb og grøfter der ikke er medtaget i modellen. Et øget baseflow vil derfor også kunne opnås ved indbygning af flere vandløbsgrene i modellen. Muligheden for at inkludere flere vandløb øges i takt med en reduktion af gridopløsningen.

Samlet observeres der en forbedret performance af modellen ved en reduktion af gridstørrelsen mht. den simulerede dynamik (NSE) den samlede vandbalance samt simulering af potentialerne, Tabel 5. Minimumsvandføringerne beskrives endvidere bedst af modellen med 100 m griddet, hvorimod maksimumsvandføringerne beskrives dårligere, Figur 15. Overordnet vurderes der derfor at være opnået en forbedret modelbeskrivelse ved reduktion af gridstørrelsen. Den negative effekt af reduceret gridstørrelse på simulering af maksi-

mumsvandføringerne vurderes at være relateret til det anvendte drænkconcept med dræning i hele området i fast dybde under terræn.

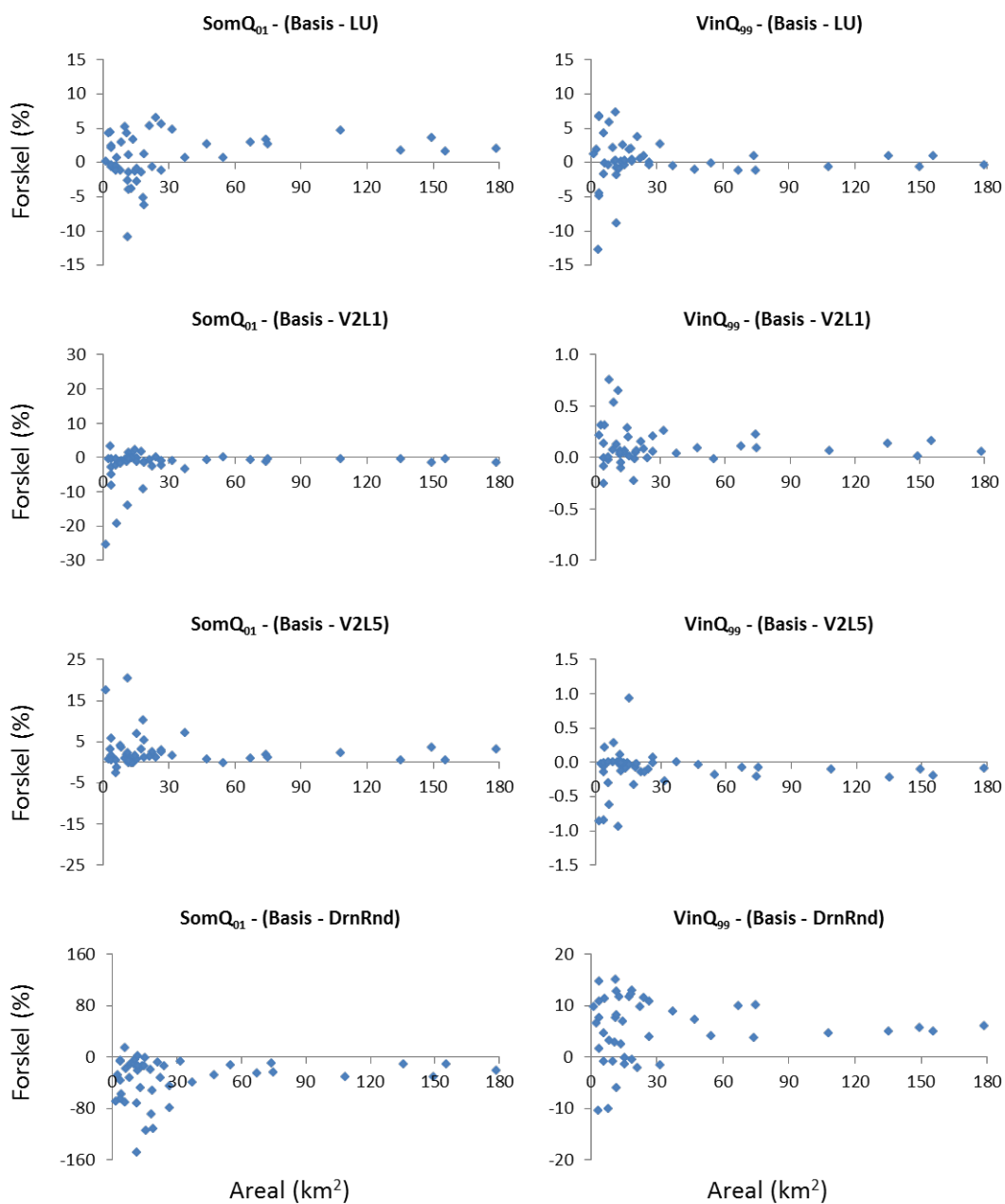
6.3.2 Ændret procesbeskrivelse og heterogenitet

I denne del af analysen fokuseres der på betydning af hhv. alternative procesbeskrivelser samt heterogenitet i udvalgte parametre. Det er valgt at teste en alternativ beskrivelse af hhv. den umættede zone samt vandløbsstrømningen, idet der for disse anvendes en forsimplet beskrivelse i DK-model konceptet, som potentielt kan have betydning for modellens evne til simulering af ekstremvandføringer. Det anvendte modelsystem MIKE SHE/ MIKE11 er et fuldt distribueret system, hvilket betyder, at der er muligt at tildele hver enkel modelcelle unikke parametre. Der eksisterer imidlertid ikke tilstrækkelig med viden og data til at kunne foretage en så detaljeret distribueret for alle datatyper, såsom den hydrauliske ledningsevne for vandløbsbunden, samt placeringen af kunstigt drænede områder. Vandløbslækagen er derfor antaget at være homogen, ligesom drændybden og tidskonstanten (effektiviteten) er antaget at være konstant i hele området. For andre datatyper er en fuld distribueret beskrivelse af den tidslige variation krævende at indbygge i modellen, hvilket gælder for landbrugsafgrøder, hvorfor det af praktiske årsager er nødvendigt at foretage nogle antagelser og forsimplinger. Landbrugsafgrøder er derfor fordelt jf. den statistiske fordeling af afgrøder som beskrevet i afsnit 6.1.1,

De simulerede minimums- og maksimumsvandføringer for de alternative konceptualiseringer er vist i Appendiks D. Betydningen af de forskellige heterogenitetsbeskrivelser er vist i Figur 22, hvor den relative forskel mellem *Basis* modellen og middel af de 10 realisationer med alternative heterogenitetsbeskrivelser er vist som funktion af oplandsareal for de 45 deloplande. I samtlige tilfælde ses de største forskelle at optræde for de mindste oplande, hvor der også er den største variation fra opland til opland. Ved arealer større end ca. 30 km² er effekten af heterogeniteten næsten ens for alle oplande og samtidigt mindre betydende. Fordelingen af afgrøder og jordfysiske parametre for den umættede zone (LU) har sammenlignelig betydning for både minimums- og maksimumsvandføringerne, mens de øvrige typer af heterogenitet ses at have markant større betydning for de lave vandføringer. Der er en tendens til, at de to formuleringer for heterogeniteten i vandløbslækagen med samme varians (2,0) men stor og lille korrelationslængde på hhv. 1000 m (V2L1) og 50 m (V2L5), har modsatte effekt på minimums- og maksimumsvandføringerne.

Den største effekt observeres ved en distribueret af drændybden, der giver et klart signal med større minimumsvandføringer og mindre maksimumsvandføringer. Årsagen hertil vurderes at være, at der ved en distribueret af drændybden er nogle områder, hvor drænene ligger lavere end 1 m under topografi, som er anvendt i *Basis* modellen. I disse områder vil der således forekomme dræning ved en lavere grundvandsstand, der typiske optræder i sommerperioden. Den forøgede dræning i sommerperioden vil afstedkomme en øget sommervandføring og dermed større minimumsvandføringer. I efterårs og vinterperioden når grundvandsstanden bygges op, vil en større del af området bidrage til drænstrømningen, men fra områderne med et dybtliggende dræn vil denne drænstrømning være reduceret, idet en stor del af vandet fra disse områder allerede er drænet. Distribueringen af dræn

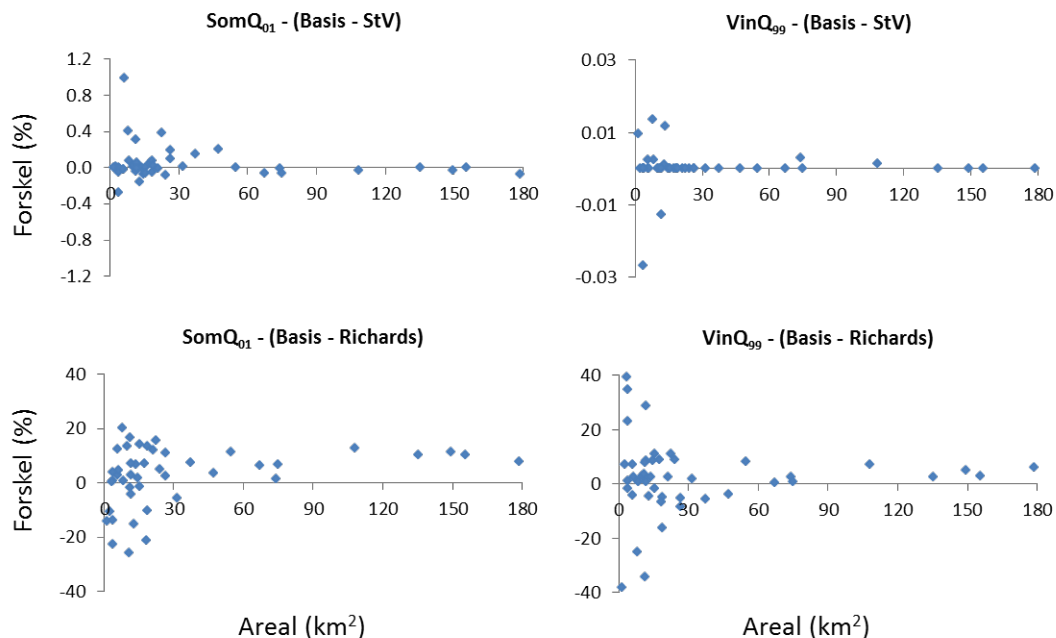
ses således at have samme udglattende effekt på vandføringen, som blev observeret mellem *DK-model* og *H-500m* modellerne, der har samme gridopløsning, men hvor drændybden er ændret fra 0,5 m til 1 m under terræn.



Figur 22. Relativ forskel mellem *Basis* model og middel af realisationer for heterogenitetsbeskrivelserne af de umættede jordfysiske parametre og vegetationsfordelingen (LU), vandløbslækagen med en korrelationslængde på 1000 m (V2L1) og 50 m (V2L5) samt fordelingen af drændybden (DrnRnd).

Figur 23 viser de tilsvarende relative forskelle mellem *Basis* modellen og modellerne med de alternative procesbeskrivelser. For modellen baseret på en fuld dynamisk beskrivelse af vandløbsstrømningen (StV) ses negligeabel effekt for både minimums- og maksimumsvandføringerne. Når det alene er vandføringerne der er i fokus, opnås der således ikke en forbedret beskrivelse ved anvendelse af den fulde dynamiske løsning. Anvendelsen af Ri-

chards ligning til beskrivelse af strømningen i den umættede zone ses derimod at have en betydelig effekt. For de større oplande opnås en reduktion i sommervandføringen på ca. 10 %, mens der ikke sker samme reduktion i vinter maksimumsvandføringen. For de mindre oplande er tendensen mindre tydelig, idet der både forekommer oplande med en reduceret og øget vandføring ved anvendelse af Richards ligning for såvel minimums- og maksimumsvandføringerne. En væsentlig forskel på beskrivelsen af den umættede zone ved anvendelse af hhv. Two-layer og Richards ligning er, at sidstnævnte inkluderer en beskrivelse af strømningen forårsaget af kapillære kræfter. Der kan derfor ske en opadrettet strømningen under umættede forhold, hvilket kan resultere i en øget fordampning. Den generelle reduktion af sommervandføringen ved anvendelse af Richards ligning vurderes derfor at være forårsaget af en større fordampning. For nogle af de mindre oplande ses det omvendte forhold, hvor *Basis* giver den mindste sommervandføring. Disse oplande er ikke analyseret yderligere, men en mulige forklaring kan være, at grundvandsstanden i disse områder er tilstrækkeligt tæt på terræn, så vandtilgængeligheden ikke bliver begrænsende for fordampningen beregnet med Two-layer. Endvidere er der anvendt standardværdier ved parameteriseringen af Richards ligning, som således ikke er kalibreret for området.

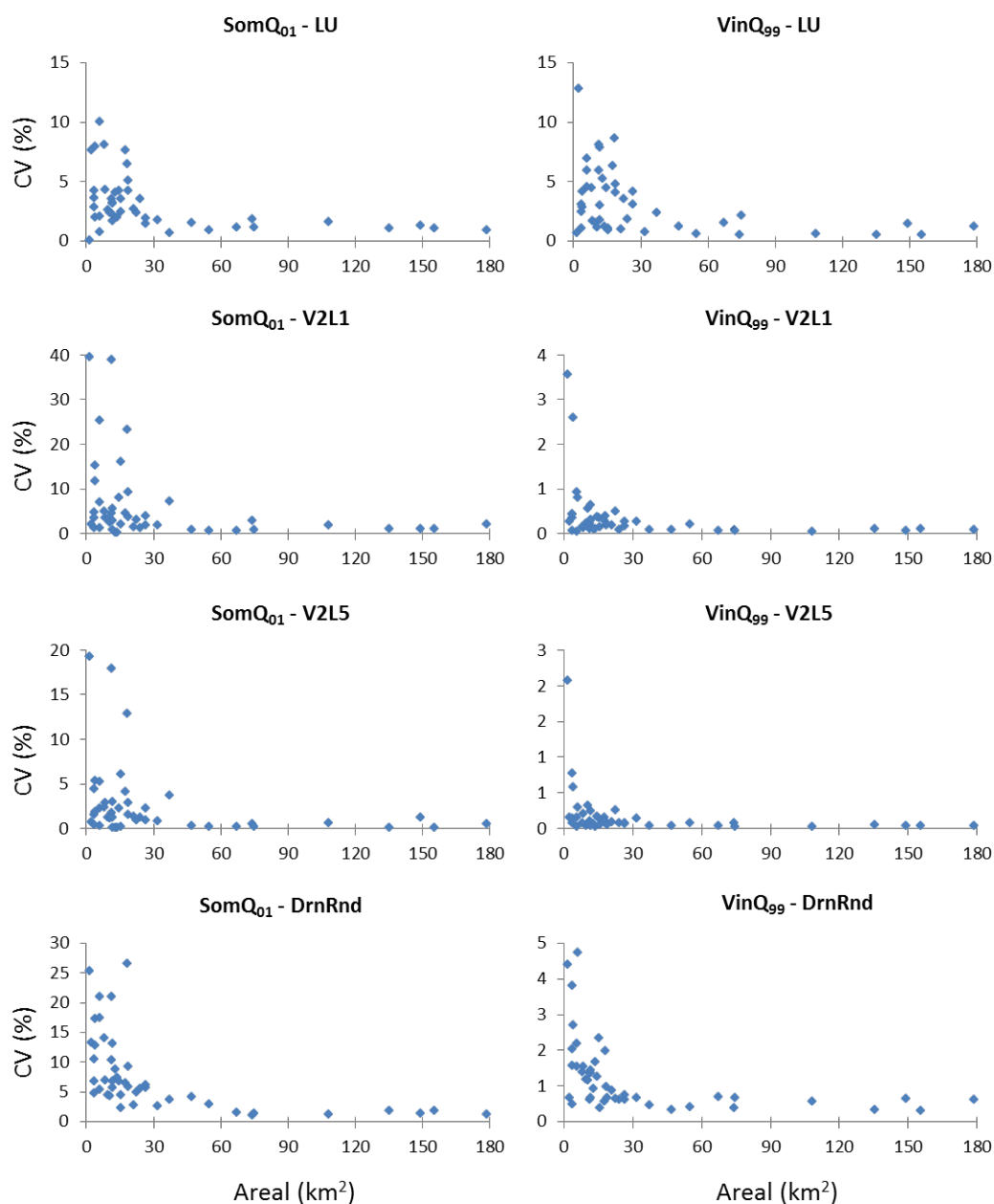


Figur 23. Relativ forskel mellem *Basis* model og model med alternative procesbeskrivelser ved anvendelse af dynamisk vandløbsbeskrivelse (StV) og Richards ligning til beskrivelse af den umættede strømning (Richards).

Figur 22 er baseret på middel af de 10 realisationer af heterogeniteten og viser således den generelle effekt ved alternative heterogenitetsbeskrivelser. For de ti realisationer er der imidlertid betydelig forskel i effekten for de enkelte deloplande, hvilket er vist på Figur 24, der viser variationskoefficienten beregnet for de ti realisationer ($[\text{Standard afvigelse for realisationerne}] / [\text{Middelværdi af realisationerne}] \cdot 100 \%$). For alle de undersøgte typer af alternative heterogenitetsbeskrivelser ses en klar sammenhæng mellem variationskoefficienten og oplandsareal. For de små oplande ses der at være betydelige variationer i resultaterne for de ti realisationer (stor CV), mens der er begrænset forskelle for oplande over ca. 30 km² (lille CV). Som ved forskellen mellem *Basis* og middel af realisationerne ses det ligeledes, at det kun er de alternative beskrivelser af arealanvendelse og jordfysiske parametre

(LU), der har sammenlignelig effekt for minimums- og maksimumsvandføringer, mens de øvrige primært påvirker minimumsvandføringerne. For de alternative heterogenitetsbeskrivelser af vandløbslækagen ses størst variation ved de store korrelationslængder (V2L1), men relationen mellem variationskoefficienten og oplandsareal ikke er veldefineret for hverken lille eller stor korrelationslængde, idet der for de små oplande optræder mange med en lav CV og forholdsvis få med en høj CV. For heterogeniteten i afgrøder og umættet zonebeskrivelse (LU) samt specielt for de alternative drænbeskrivelser (DrnRnd) ses der en mere veldefinerede relation mellem variationskoefficienten og oplandsareal.

Med udgangspunkt i eksisterende data samt det anvendte modelsystem, er det ikke muligt at opnå en bedre deterministisk beskrivelse af heterogeniteten. Forskellen mellem de ti realisationer for hver heterogenitetsbeskrivelse udtrykker således en usikkerhed på modellen, der ikke kan reduceres. For minimumsvandføringerne er variationskoefficient helt op til 40 % for de mindste oplande, mens de for oplandene over 30 km² generelt ligger under nogle få procent. Den kalibrerede *H-100m* model overestimerede minimumsvandføringen for stationerne 270004 og 280001 med hhv. 37 % og 19 %, Tabel 7. Disse stationer har oplandsareal betydeligt over de 30 km², og kun en lille del af den samlede modelusikkerhed kan derfor tilskrives den ikke beskrevne heterogenitet i afgrøde og UZ parametre samt vandløbslækagen og dræningsforhold.



Figur 24. Variationskoefficienten for de ti realisationer med alternative heterogenitetsbeskrivelser for de 45 deloplande (vegetationsfordelingen (LU), vandløbslækagen med en korrelationslængde på 1000 m (V2L1) og 50 m (V2L5) samt fordelingen af drændybden (DrnRnd)).

6.4 Delkonklusion – Alternative konceptualiseringer

Sammenligningen mellem de to 500 m modeller der er kalibreret hhv. regionalt (*DK-model*) og lokalt (*H-500m*) viser, at der kan opnås en markant ændret strømningsbeskrivelse ved gennemførelse af en lokal tilpasning af DK-modellen. I nærværende studie resulterede den lokale tilpasning i en tydelig reduktion i såvel sommer minimums- som vinter maksimums-

vandføringerne. Dette vurderes primært at skyldes forskellene i det simulerede grundvandspotentiale samt de forskellige drændybder.

I modelstudiet af effekten på simulerede ekstremvandføringer for forskellige gridopløsninger blev der observeret en reduktion i både minimums- og maksimumsvandføringer. Mens en reduktion i minimumsvandføringen er positiv i forhold til en bedre simulering af de observerede forhold, har reduktionen i maksimumsvandføringen en negativ effekt, idet disse vandføringer simuleres for lavt af modellen. Ved reduktion af gridstørrelsen sker der en omfordeling af de enkelte flowkomponenter til vandløbet (overfladisk, dræn- og baseflow), hvor der sker en markant stigning i den overfladiske afstrømning samt reduktion i baseflow ved overgang fra 500 m til 100 m modellen. For 100 m modellen er der således en væsentlig højere overfladisk afstrømning i forhold til baseflow. Et øget bidrag i den overfladiske afstrømning, til opnåelse af større maksimumsvandføringer, vurderes at resultere i et urealistisk forhold mellem den overfladiske afstrømning og baseflow, mens et øget baseflow vurderes mere realistisk. For at opnå et øget baseflow er der behov for en revurdering af det anvendte drænkconcept. Det anvendte drænkconcept beskriver såvel den kunstige dræning samt mindre vandløb og grøfter, der ikke er medtaget i modellen, hvorfor afstrømningen i områder uden modelvandløb vil registreres som drænflow. Et øget baseflow vil derfor også kunne opnås ved en detaljering af vandløbsnetværket, hvor flere af de mindre vandløbsgrene medtages. En sådan detaljering vil være mulig i takt med en reduceret gridstørrelse.

En overgang fra en simpel routing i vandløbene til en fuld dynamisk beskrivelse (Saint Venant, StV) har negligeabel betydning for simulering af ekstremvandføringerne. Anvendelsen af Richards ligning i stedet for Two-layer-modellen til at beskrive den umættede zone resulterede derimod i en reduktion af de simulerede sommer minimumvandføringer, specielt for de større oplande, hvilket tilskrives den øgede fordampning der kan opnås med Richards ligning, der inkluderer en beskrivelse af opadrettede strømninger i den umættede zone. For de mindre oplande er effekten ikke helt entydig idet der opnås såvel reducerede og øgede vandføringer i både minimums- og maksimumsvandføringerne. For de større oplande er det således muligt at opnå en bedre beskrivelse af sommer minimumsvandføringen ved anvendelse af Richards ligning uden det resultere i de samme reduktioner af vinter maksimumsvandføringerne. Modellen baseret Richards ligning har afviklingstider der er adskillige gange længere end en anvendelse af Two-layer modellen, som skal vurderes i forhold til den 10 % reduktion/forbedring, der er sket i simulering af sommervandføringen

For de alternative heterogenitetsbeskrivelser observeres en tydelig sammenhæng mellem arealstørrelse og effekten af de alternative beskrivelser, hvor effekten er størst i oplande under ca. 30 km², mens større oplande kun udviser begrænset følsomhed overfor den lokale heterogenitetsbeskrivelse. Den rumlige heterogenitet i arealanvendelse og parameterisering af den umættede har sammenlignelig effekt for både sommer og vinter vandføringerne, mens de øvrige undersøgte heterogenitetsbeskrivelser primært har effekt for de lave sommervandføringer.

7. Grundvandsbetinget oversvømmelser

Formålet med denne delopgave har været at vurdere, hvorvidt der kan opstilles et koncept, der gør det muligt at anvende DK-modellen til identificering af områder med risiko for oversvømmelse på land forårsaget af høj grundvandsstand. Formålet har således ikke været, at opnå den mest korrekte beskrivelse af områder med oversvømmelse, men at vurdere hvorvidt der kan opnås sammenlignelige resultater ved anvendelse af en detailmodel med god rumlig opløsning og den nationale *DK-model*.

I opgaven fokuseres der på områder i det åbne land med højtliggende grundvandsspejl, mens eventuel oversvømmelse forårsaget af vandløb, der går over deres breder ved store vandføringer, ikke medtages i vurderingen.

7.1 Metodik

Et område der potentielt er i risiko for oversvømmelse er karakteriseret ved et højtliggende grundvandsspejl, der konstant eller i perioder vil være tæt på eller direkte over terræn. For at kunne anvende en model til vurdering af hvor disse områder er beliggende, skal der først opstilles kriterier for dels hvor tæt grundvandsspejlet skal være på terræn og i hvor lang tid dette skal optræde. I nærværende projekt er der opstillet alternative indikatorer herfor, hvor følgende variable er anvendt til vurdering af grundvandets placering:

1. Høj grundvandsstand i en given del af perioden ($H_{\text{Overskridelse}}$)
2. Middel af den årlige maksimale grundvandsstand ($H_{\text{MiddelMax}}$)
3. Den maksimale grundvandsstand indenfor hele perioden (H_{Max})

I det første tilfælde (indikator 1) trækkes værdier ud til identificering af områder hvor grundvandsstanden overskrider et givent niveau i en vis andel af tiden. Det vil sige, det antages, at et område potentielt kan være oversvømmet, når der periodevis optræder en høj grundvandsstand, også selvom området ikke nødvendigvis er karakteriseret ved en generel høj grundvandsstand. Det er valgt at se på overskridelser der sker i 8 % af tiden eller mere, svarende til 1 måned om året. Det er dog ikke ensbetydende med, at denne grundvandsstand netop vil forekomme 1 måned om året. For år med stor grundvandsdannelse vil værdien overskrides i flere måneder, mens der ikke vil ske en overskridelse i år med lav grundvandsdannelse. Som en alternativ variabel anvendes middel af de årlige maksimale grundvandsstande, indikator 2 ovenfor. Dette udtryk vil udpege områder, hvor grundvandsstanden generelt er højtstående. Endelig ses der på den maksimale grundvandsstand for hele perioden (indikator 3). Det kan være et rimeligt udtryk for den mest ekstreme situation i perioden, men giver ikke nogen information om, hvorvidt hændelsen kun forekommer én enkelt gang eller er et tilbagevendende problem.

Udover identificering af de relevante variable, skal der defineres nogle kriterier for hvornår en grundvandsstand ligger tilstrækkeligt højt til, at der kan opstå oversvømmelse (design af indikator 1-3). I nærværende projekt er der analyseret for tre forskellige dybder til grund-

vandsspejlet, hvor der anvendes forskellige dybder afhængigt af om det er middel dybden eller den maksimale dybde der anvendes. De faktiske dybder er angivet under resultatafsnittet.

Analysen er baseret på fire modeopstillinger (Figur 10):

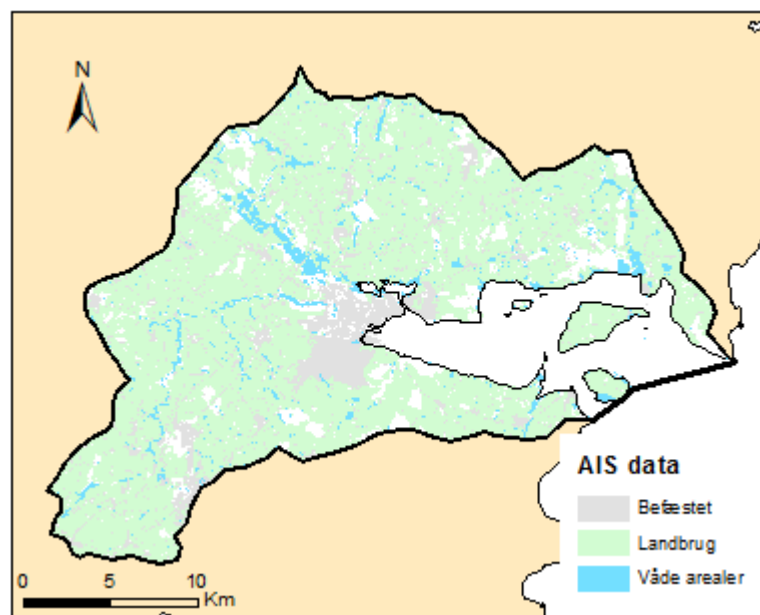
1. Horsens lokalmodel i 100 m gridopløsning (*H-100m*)
2. Horsens lokalmodel i 250 m gridopløsning (*H-250m*)
3. Horsens lokalmodel i 500 m gridopløsning (*H-500m*)
4. DK-modellen for område 5 (Midtjylland) i 500 m gridopløsning: *DK-model*

For hver model er der udtrukket grundvandsstande svarende til de tre indikatorer for identificering af høj grundvandsstand samt for de tre dybder til grundvandet (som fremgår af resultatafsnittet).

Til trods for, at opgaven ikke har været at vurdere modellens evne til at beskrive de faktiske oversvømmelsesområder, er det ønskeligt at teste modellen mod observerede data for en overordnet vurderingen af modellens evne til at kunne identificere områder med højt grundvandsspejl. Der er ikke sket en systematisk indsamling af data om oversvømmelser i det åbne land indenfor modelområdet. Ved henvendelse til Hedensted Kommune, er dog beskrevet et par områder, hvor der historisk er observeret oversvømmelser. Endvidere har Region Midtjylland fået etableret et såkaldt "Skybrudskort", der er etableret på baggrund af en ekstrem nedbørhændelse med deraf følgende overfladisk afstrømning samt oversvømmelse fra vandløb. Kortet kan derfor ikke umiddelbart anvendes til vurdering af områder der oversvømmes pga. stigende grundvandsspejl som følge af nedbør der falder over en længere tidshorisont, men uden evt. opstuvning fra nedstrøms beliggende vandløb eller op i drænsystemer i forbindelse med fx kortvarige skybrud. Til den overordnede vurdering af modellen, er det derfor valgt at anvende kortmateriale fra AIS (AIS, 2000), hvor arealerne i Tabel 9 er defineret som våde arealer og anvendt til sammenligningen. Figur 25 viser fordelingen af befæstede arealer, landbrug og arealer defineret som våde arealer indenfor modelområdet. Testen mod AIS data er baseret på 100 m modellen, dvs. *H-100m*.

Tabel 9. AIS koder og areal for områder udpeget som våde områder.

AIS kode	Beskrivelse	Areal (km ²)
3210	Overdrev	3,6
4110	Eng	8,9
4120	Mose	8,2
4210	Marsk og strandenge	2,4
5120	Sø	3,1
Samlet		26,2



Figur 25. Opdeling af arealanvendelse på befæstede områder, landbrug og våde areal , hvor våde arealer er defineret som angivet i Tabel 9.

7.2 Resultater

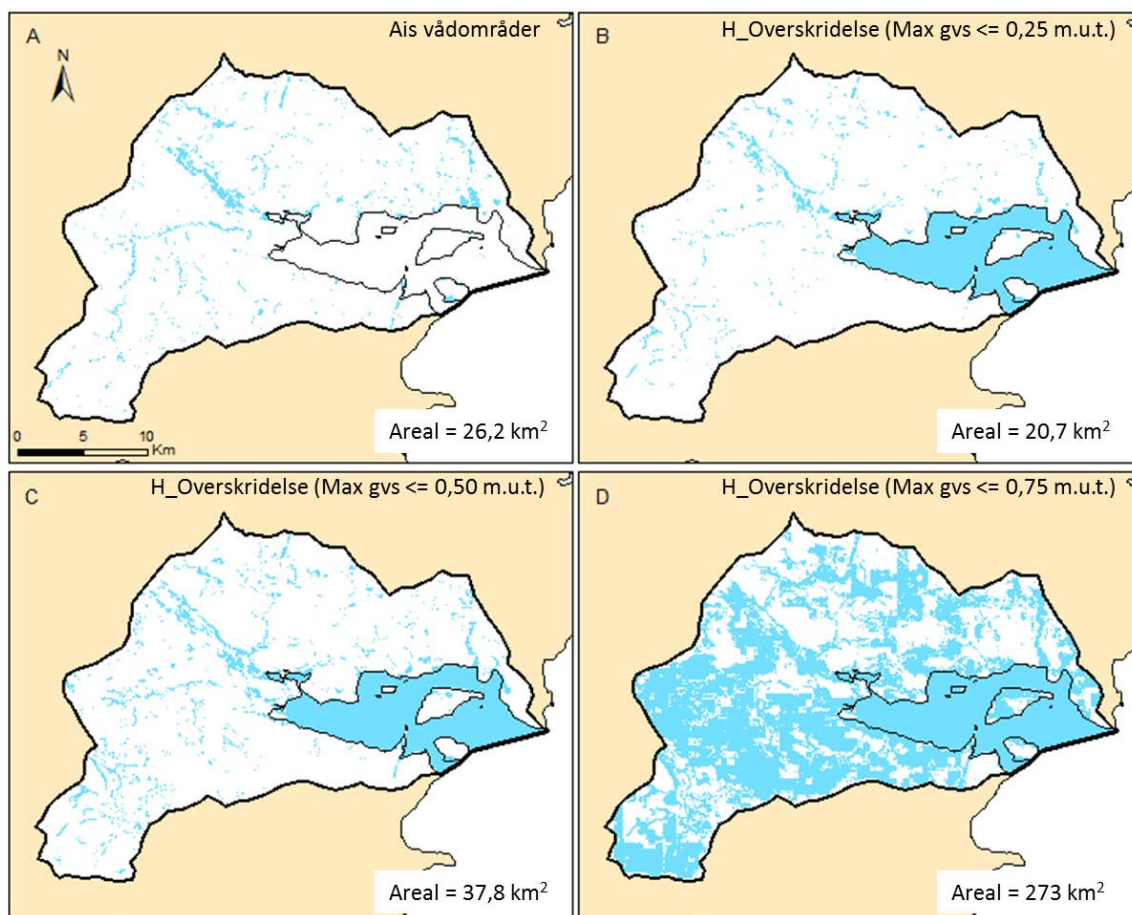
7.2.1 Vurdering af høj grundvandsstand

Indledningsvist er der set på hvilken dybde, der kan anvendes som afskæringsværdi til identificering af område med risiko for oversvømmelse. Til denne del er der taget udgangspunkt i en overskridelse af en høj grundvandsstand på 8 %, svarende til én måned pr. år i gennemsnit. For dette udtræk er der identificeret områder, hvor afstand fra terræn til det øvre grundvand er lig med eller mindre end hhv. 0,25 m, 0,5 m og 0,75 m. Disse områder er sammenholdt med de våde arealer fra AIS datasættet i Figur 26.

Af Figur 26 ses der en god overensstemmelse mellem de våde arealer i AIS datasættet og de simulerede områder, hvor grundvandsstanden ligger 0,25 m eller tættere på terrænet, Figur 26 (B). Dog er de simulerede områder generelt mindre end på AIS datasættet, med undtagelse af de sydvestlige områder, hvor modellen simulerer områder med grundvandet tæt på terræn, som ikke optræder som våde områder i AIS datasættet. Uoverensstemmelsen i dette område kan skyldes flere forhold. Det meste af området er udlagt til landbrug (388 km² ud af i alt 526 km²). En del af landbrugsarealerne kan potentielt være karakteriseret ved en periodevis høj grundvandsstand, der imidlertid kan afhjælpes ved effektiv kunstig dræning, der gør arealet anvendelig for dyrkning. Disse arealer vil derfor ikke blive karakteriseret som våde arealer i AIS datasættet. Det kan derfor ikke umiddelbart afvises, at der kan optræde høje grundvandsstande i områder som modellen udpeger som potentielt våde indenfor landbrugsområder. For en mere detaljeret vurdering heraf er det nødvendigt at tilvejebringe detaljeret lokalkendskab. En anden sandsynlig forklaring er, at modellen ikke i

tilstrækkelig grad er i stand til at beskrive de aktuelle forhold. Specielt vil den geologiske beskrivelse i modellen have stor betydning for simuleringen. Den geologiske model anvendt i nærværende projekt er den geologiske model fra DK-modellen område 5 (Midtjylland) (Højberg et al., 2010a), som for Horsens modelområdet i overvejende grad er baseret på den nationale tolkning, hvor den geologiske opbygning er tolket i voxels (kasser), der har en udbredelse på 1 x 1 km horisontalt og 10 m vertikalt. Den geologiske model er således ikke opstillet på basis af detaljeret lokal geologisk viden, og kan derfor heller ikke forventes at beskrive de øvre geologiske forhold detaljeret.

Anvendelsen af en afskæringsværdi på en grundvandsstand tættere eller lig med 0,25 m under terræn giver et areal (20,7 km²) der samlet set er mindre end de våde arealer fra AIS data (26,2 km²). Da det er hensigten at identificere områder, der potentielt kan blive vandlidende og ikke kun de permanent våde arealer, bør det samlede areal udpeget med modellen være større end AIS arealerne. Med en afskæringsværdi på 0,5 m under terræn, Figur 26 (C), opnås et samlet areal, der er ca. 11 km² større end AIS datasættet. Det øgede areal optræder dels ved en øgning af de våde arealer, men der optræder også nye områder, der ikke optræder ved en afskæringsværdi på 0,25 m under terræn. Overordnet set er der god overensstemmelse mellem AIS data og en afskæring på 0,5 m, mht. udpegning af våde områder. Med et større areal er det imidlertid givet, at modelsimuleringen vil identificere nogle ekstra arealer. Ved anvendelse af en afskæring på 0,75 m under terræn, Figur 26 (D), sker der et drastisk forøgelse af arealet til 273 km², som vurderes urealistisk. Det er derfor valgt at gå videre med en afskæringsværdi på 0,5 m under terræn.



Figur 26. Våde arealer fra AIS data (A) sammenholdt med simulerede områder, hvor dybden til grundvandvandet i middel er mindre end eller lig 0,25 m (B), 0,50 m (C) og 0,75 m (D) en måned om året.

7.2.2 Vurdering af indikatorer

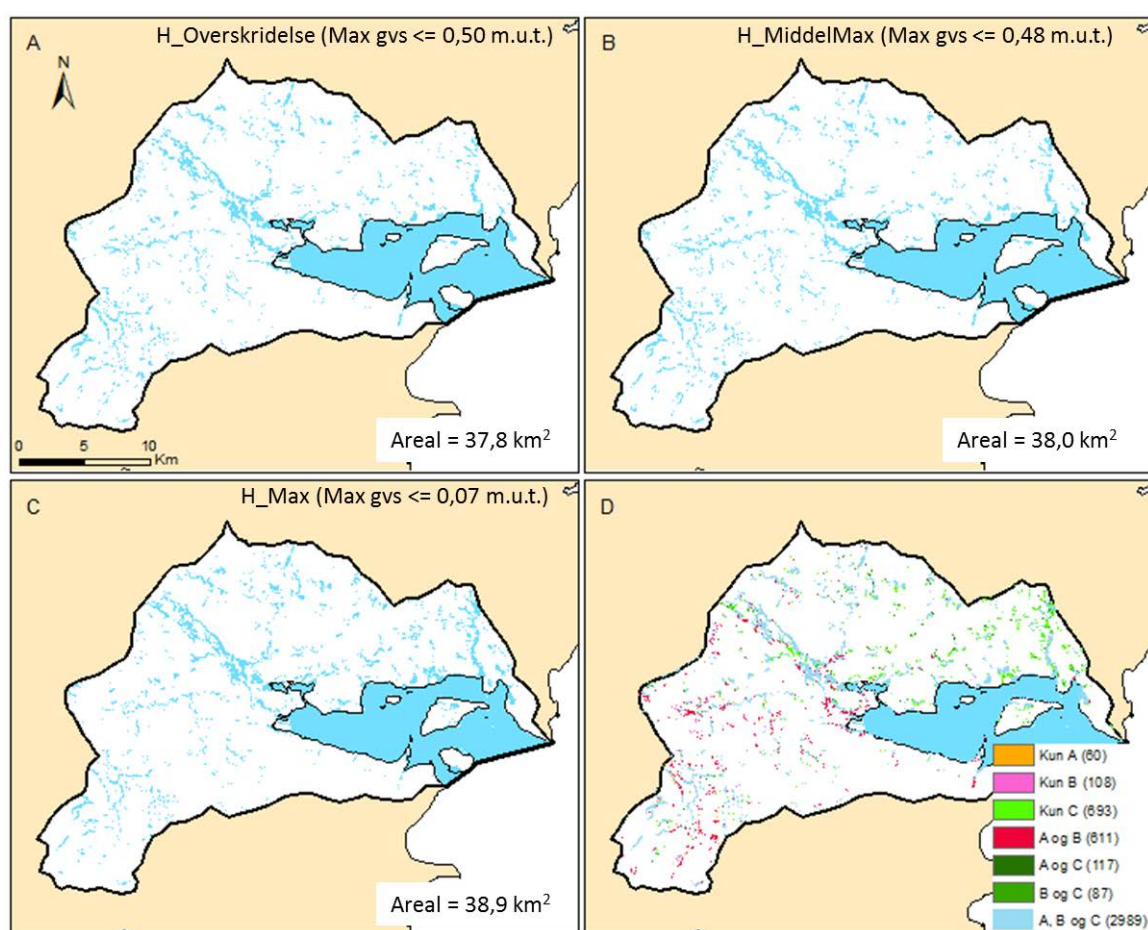
De tre variable for vurdering af høj grundvandsstand er sammenlignet på Figur 27. For $H_{\text{MiddelMax}}$ og H_{max} er afskæringsværdien for den maksimale grundvandsstand justeret så det samlede areal er så ens som muligt for de tre alternativer. For $H_{\text{MiddelMax}}$ resulterer dette i en afskæringsværdi på 0,48 m, hvilket er meget tæt på de 0,5 m anvendt for $H_{\text{Overskridelse}}$. Da H_{Max} variabelen kun medtager den største værdi for hele perioden, har det naturligt været nødvendigt at anvende en væsentligt lavere afskæringsværdi for denne.

I Figur 27(D) er den rumlige forskel mellem anvendelse af de tre metoder sammenlignet. Farveskalaen angiver om modellens 100 m grids identificeres på baggrund af $H_{\text{Overskridelse}}$ (Kun A), $H_{\text{MiddelMax}}$ (Kun B), H_{Max} (Kun C) eller af flere af de tre indikatorer. Tallene i parentes på Figur 27 angiver hvor mange af modellens 100 m grids der identificeres af de tre metoder, mens Tabel 10 viser den procentvise fordeling. Som det fremgår af figuren er der generelt god overensstemmelse mellem de tre alternative metoder, hvor hovedparten af de grids der udpeges som potentielle oversvømmelsesområder er sammenfaldende for de tre metoder (A, B og C). Endvidere ses, at det kun er få grids der

kun udpeges af H_Overskridelse eller H_MiddelMax, mens næsten 700 grids kun udpeges af H_Max og disse grids forekommer primært i den nordlige del af modelområdet. For det undersøgte område er de to første metoder således i tæt overensstemmelse, mens der opnås et andet billede ved anvendelse af H_max. Uden lokale data til verificering af de tre metoder, er det imidlertid ikke muligt at afgøre hvilken af de tre, der er mest korrekt, ligesom den optimale afskæringsværdi anvendt i de tre metoder ikke kan bestemmes.

Tabel 10. Procentvis fordeling af grids der udpeges som potentielt oversvømmelsestruet ved anvendes af de tre indikatorer.

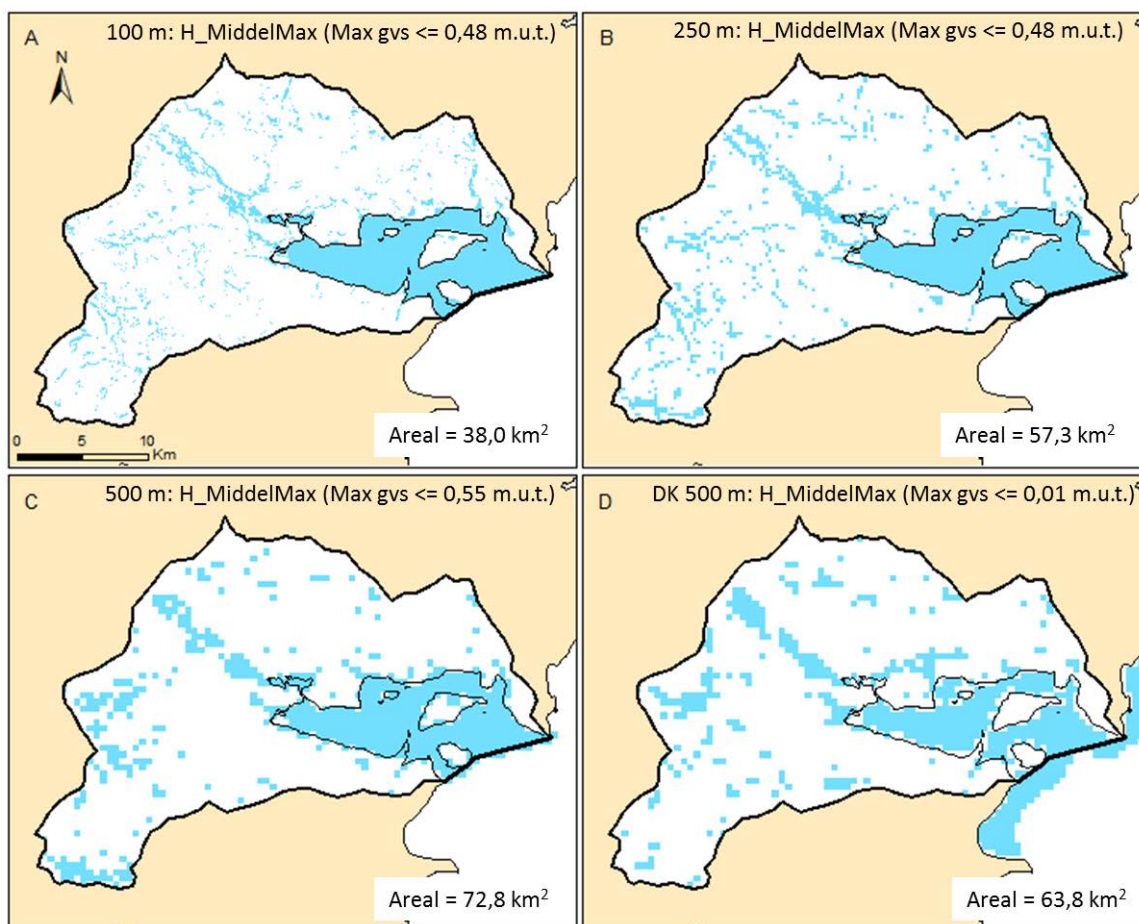
Indikator	A	B	C	A+B
A: H_overskridelse	1,3	13	2,5	
B: H_MiddelMax		2,3	1,9	
C: H_Max			15	64



Figur 27. Sammenligning af områder simuleret som våde ved anvendelse af de tre variable: A) grundvandsstand 0,50 m eller tættere på terræn i middel en måned om året, B) Middel årlig maksimal grundvandsstand 0,48 m eller tættere på terræn og C) maksimal grundvandsstand 0,07 eller tættere på terræn i perioden 1991 – 2010. Sammenfald og forskel i modelgrids ved anvendelse af de tre metoder er angivet i (D).

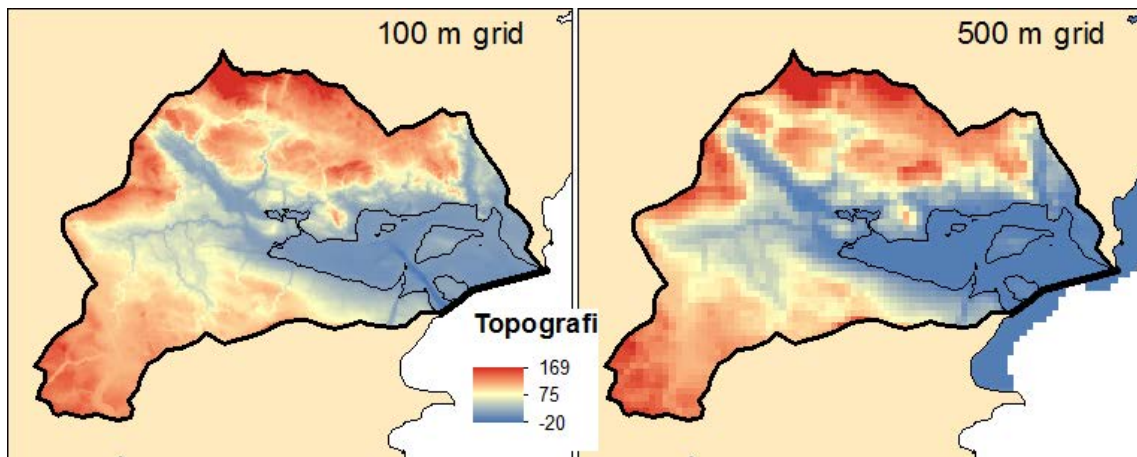
7.2.3 Betydning af gridskala

På Figur 28 er områder identificeret på baggrund af H_MiddelMax sammenstillet for de tre lokalmodeller, med en gridopløsning på hhv. 100 m, 250 m og 500 m, samt DK-modellen opstillet for Midtjylland. For 100 m og 250 m modellerne er der anvendt en afskæringsværdi for en maksimal grundvandsstand på 0,48 m eller tættere på terræn. For de to modeller opstillet med et 500 m grid, er afskæringsværdien justeret så der visuelt er opnået den bedste overensstemmelse med 100 m modellen. Sammenligningen mellem 100 m og 250 m modellerne viser en overordnet god overensstemmelse mellem de udpegede områder. For 250 m modellen er det samlede areal imidlertid større, hvilket skyldes de forskellige gridstørrelser. Mindre områder med en udbredelse på nogle få gridceller i 100 m modellen, vil ligeledes udgøre få celler i 250 m modellen, men hver celle vil have et areal der er 2,5 x 2,5 gange større i 250 m modellen. Den største forskel mellem 100 m og 250 m modellerne findes ved den sydlige rand. For 500 m modellen, der er kalibreret lokalt til Horsens området, er der anvendt en lidt større afskæringsværdi på 0,55 m. Ved sammenligningen med 100 m modellen ses, at der er sammenfald mellem de større områder, men at detaljeringen er væsentlig forringet og flere af områderne med usammenhængende arealer i 100 m modellen slet ikke genfindes i 500 m modellen. I lighed med 250 m modellen fremstår et større område ved den sydlige rand som værende et områder med potentiel risiko for oversvømmelse. Ved anvendelse af DK-modellen Figur 28 (D), ses mønstret at være noget forskelligt fra 500 m modellen tilpasset de lokale data. For de større sammenhængende områder, såsom strukturen fra Horsens Fjord mod nordvest (Hansted ådal) samt området mod vest (ved Rask Mølle), er der generelt overensstemmelse mellem de to 500 m modeller, mens der er større variation mht. udpegning af de mindre ikke sammenhængende områder. Ved sammenligning mellem 100 m modellen og de to 500 m modeller, er der dog ingen af de to modeller der generelt er bedst.



Figur 28. Sammenligning af områder udpeget som områder i potentiel risiko for oversvømmelse pga. høj grundvandsstand ved anvendelse af modeller kalibreret til området med ved anvendelse af 100 m (A), 250 m (B) og 500 m (C) grid opløsninger, samt anvendelse af DK-model for område 5 (D), der ikke er kalibreret til lokale data.

Med de forskellige gridstørrelser vil der være forskel på hvor detaljeret modellerne kan gengive den topografiske variation og dermed lavning hvori der kan forekomme en høj grundvandsstand. En manglende topografisk opløsning kan være en væsentlig årsag til udpegningen af de forskellige områder med 100 m/250 m og 500 m modellerne. Den topografiske opløsning ved anvendelse af gridstørrelser på hhv. 100 m og 500 m er sammenstillet på Figur 29. Af figuren fremgår det, at det med 100 m opløsning er muligt at beskrive de lokale lavninger i meget større detaljegråd end tilfældet er for 500 m modellen. Ådalen ved Hedensted Å fanges dog godt af 500 m opløsningen, hvor 500 m modellerne også udpeger områder, der er i overensstemmelse med 100 m /250 m modellerne. Det vestlige område, hvor begge 500 m modellerne udpeger områder med potentielt risiko for oversvømmelse, ses af Figur 29 ligeledes at være beliggende i en ådal struktur der dækker over flere grids. I den centrale del af området ved Bygholm Å og Ølsted Å er der imidlertid også lavtliggende områder, hvor 100 m/250 m identificerer en potentiel oversvømmelsesrisiko. Disse områder er ligeledes repræsenteret ved flere grids i 500 m modellerne, men modellerne identificerer ikke disse områder som potentielt vandlidende. For en 500 m models evne til at udpege områder med risiko for oversvømmelse, synes det således ikke at være en tilstrækkelig betingelse at areal dækker flere modelgrids.



Figur 29. Sammenligning af den topografiske opløsning ved anvendelse af gridstørrelser på 100 m og 500 m.

For DK-modellen bemærkes det endvidere af Figur 28, at der er anvendt en væsentlig mindre afskæringsværdi på 0,01 m, dvs. umiddelbart under terrænoverfladen. Dette betyder, at DK-modellen har en grundvandsstand, der generelt står væsentlig højere end for modellerne tilpasset de lokale data i Horsens området. En af årsagerne hertil vurderes at skyldes drændybden, hvor der i modellerne kalibreret til lokale data er anvendt en drændybde på 1,0 m, mens der i DK-modellen er anvendt en drændybde på 0,5 m. Herved vil dræningen i de lokale modeller for Horsens starte tidligere, dvs. ved lavere grundvandsstand. En anden betydende årsag til forskellen mellem DK-modellen og 500 m modellen for Horsens området vurderes at være fordi sidstnævnte model er tilpasset lokale data ved kalibreringen, mens DK-modellen er tilpasset data for hele Midtjylland.

7.3 Delkonklusion – Grundvandsbetinget oversvømmelser

Udpegning af områder der potentielt er vandlidende på baggrund af de to indikatorer: H_overskridelse (grundvandsstanden ligger i middel 0,5 m eller tættere på terræn en måned om året) og H_MiddelMax (middel af årlig maksimale grundvandsstand ligger 0,48 m eller tættere på terræn) giver nærværd identiske resultater for Horsens modellen. Ved anvendelse af indikatoren H_Max (maksimale grundvandsstand i perioden) er det nødvendigt at anvende en afskæringsværdi tættere på terræn (0,07 m eller tættere på terræn) for at opnå udpegning af et sammenligneligt areal. Hovedparten af de udpegede områder er sammenfaldende med områder udpeget med H_Overskridelse og H_MiddelMax, men 17 % af det areal, der udpeges af H_Max, bliver ikke udpeget ved anvendelse af de to andre indikatorer. For at kunne vurdere hvilken af de tre indikatorer der er mest optimalt samt hvilken afskæringsværdi, der skal anvendes mht. dybde til grundvandet, er det nødvendigt med lokale observationer/viden om områder der periodevist er vandlidende.

Der er god overensstemmelse i udpegede områder ved anvendelse af model med hhv. 100 m og 250 m gridopløsning. Dog medfører den større gridstørrelse i 250 m modellen, at der udpeges et større samlet areal. Ved anvendelse af en model med en 500 m gridopløsning bliver detaljeringen væsentligt forringet, og mange af de mindre usammenhængende områder genskabes ikke med denne gridopløsning. Ved sammenligning med 100 m modellen

er der forskel på hvilke af de mindre områder der fanges af hhv. *DK-model* og *H-500m* modellerne, men ingen af dem er generelt bedst. *DK-model* har generelt en grundvandsstand der er væsentlig højere end grundvandsstanden i de øvrige modeller. En væsentlig årsag hertil vurderes, at være den anvendte drændybde, hvor drændybden i *DK-modellen* er 0,5 m under terræn, mens der i de øvrige modeller er anvendt en drændybde på 1,0 m.

8. Konklusioner og anbefalinger

Hovedkonklusionerne fra de tre delopgaver er summeret i Tabel 11.

Tabel 11. Opsummering af resultaterne opnået i de tre delopgaver.

Delopgave	Konklusion
Analyse DK-models vandløbsbeskrivelse	• DK-modellen generelt er i stand til at simulere vandbalancen tilfredsstillende med en middel vandbalancefejl på 3,5 % for de 182 vandføringsstationer medtaget i analysen. Der er dog væsentlig variation på vandbalancefejlen mellem de enkelte stationer • I middel opnås der en opnås tilfredsstillende beskrivelse af årstidsvariationen udtrykt ved en middel Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) på 0,67 for alle stationer. Der er dog ligeledes stor variation mellem enkelte stationer • Sommer minimumsvandføringer overestimeres generelt og den årlige dynamik samt år til år variationerne fanges ikke tilfredsstillende • De høje vandføringer simuleres generelt for lavt for samtlige sæsoner
Alternative konceptualiseringer	• Der blev opnået en markant ændring i strømningsbeskrivelsen ved gennemførelse af en lokal tilpasning af DK-modellen. Hvilket vurderes at være en kombination af den lokale tilpasningsamt ændret drændybde for de to modeller. • En reduktion af gridstørrelsen resulterede i en reduktion af såvel minimums- og maksimumsvandføringer og der blev observeret en ændring af de enkelte flowkomponenter til vandløbet (overfladisk, dræn- og baseflow). Dette tilskrives den bedre topografiske opløsning ved mindre gridstørrelse, der resulterer i større overfladisk afstrømning, samt placering af dræn i en dybere kote i de lavtliggende områder. • En overgang fra en simpel routing i vandløbene til en fuld dynamisk beskrivelse (Saint Venant, StV) er ubetydelig for simulering af ekstremvandføringerne. Anvendelsen af Richards ligning i stedet for Two-layer-modellen til at beskrive den umættede zone resulterede derimod i en reduktion af de simulerede sommer minimumvandføringer, specielt for de større oplande, hvilket tilskrives den øgede fordampning der kan opnås med Richards ligning. For de mindre oplande er effekten ikke helt entydig idet der opnås såvel reducerede og øgede vandføringer i både minimums- og maksimumsvandføringerne. • For de alternative heterogenitetsbeskrivelser observeres en

	tydelig sammenhæng mellem arealstørrelse og effekten af de alternative beskrivelser, hvor effekten er størst i oplande under ca. 30 km ² .
Grundvandsbetinget oversvømmelse	• Der er afprøvet tre indikatorer for udpegning af potentielt vandlidende områder. De tre indikatorer resultere i nogen variation mht. de udpegede områder, men pga. manglende observationer af oversvømmelser, har det ikke været muligt at vurdere deres anvendelighed i forhold til hinanden. • Der er god overensstemmelse i udpegede områder ved anvendelse af model med hhv. 100 m og 250 m gridopløsning. Dog medfører den større gridstørrelse i 250 m modellen, at der udpeges et større samlet areal. • Ved anvendelse af en model med en 500 m gridopløsning bliver detaljeringen væsentligt forringet, og mange af de mindre usammenhængende områder genskabes ikke med denne gridopløsning. • DK-modellen har generelt en grundvandsstand der er væsentlig højere end grundvandsstanden i de øvrige modeller. En væsentlig årsag hertil vurderes, at være den anvendte drændybde, der er placeret 0,5 m under terræn, mens der i de øvrige modeller er anvendt en drændybde på 1,0 m.

Baseret på delkonklusioner anbefales følgende videreudvikling af DK-modellen for at opnå en bedre beskrivelse af ekstremvandføringer samt udpegning af områder med risiko for oversvømmelse pga. højtliggende grundvandsspejl:

- Gridstørrelse. Den anvendte gridstørrelse blev observeret at have betydning for såvel simuleringen af ekstremvandføringerne samt identificeringen af potentielt vandlidende områder. Den største forskel blev observeret ved overgangen fra 500 m til 250 m opløsning. Det anbefales derfor, at DK-modellen detaljeres til en 250 m gridstørrelse, hvilket i forhold til en national model vurderes muligt at gennemføre på sigt.
- Drænenes placering vurderes at have en betydelig effekt på simulerede vandføringer og udpegning af oversvømmelsestruede arealer. I DK-modellen er der indlagt dræn i hele modellen, der repræsenterer såvel kunstig dræning ved markdræn samt mindre vandløb og grøfter, der ikke er medtaget i modelopstillingen. Selv ved reduktion af gristørrelsen vil det ikke være praktisk muligt at indlægge samtlige vandløb og grøfter i modellen, hvorfor der til stadighed vil være behov for anvendelse af dræn til beskrivelse af afstrømningen fra disse områder. Med en fortsat detaljering af modellen mht. den rumlige beskrivelse af arealanvendelsen samt mindre gridopløsning, vil der i stigende grad være behov for en revurdering af drænkonceptet, hvor der bør ses på mulighed for et distribueret drænkoncept, f.eks. i form af distribueret drændybde og/eller tidskonstant for drænene. Som minimum bør drændybden i DK-modellen justeres fra 0,5 m til 1,0 m under terræn.

- Grundvandsbetinget oversvømmelse. Der er testet tre indikatorer for vurdering af områder, der potentielt er i risiko for oversvømmelse. De tre indikatorer havde store sammenfald i de udpegede områder, men der blev også observeret væsentlige forskelle. For at kunne identificere de(n) mest brugbare indikatorer er der behov for lokale observationer til verificering. For modellen kalibreret regionalt med en drændybde på 0,5 m (*DK-model*) blev der observeret et væsentligt højere grundvandspotentiale end de øvrige modeller, der ligger meget tæt på terrænet og vurderes at være urealistisk. Dette peger ligeledes på et behov for en revurdering af det anvendte drænkconcept.

9. Referencer

- Areal Informations Systemet - AIS (2000). Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser, URL: <http://ais.dmu.dk>
- Bijl, L. van der, Boutrup, S. & Jensen, P.N. (red.) (2007) NOVANA. Det nationale program for overvågning af vandmiljøet og naturen. Programbeskrivelse 2007-09 – del 2. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 120 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 615. <http://www.dmu.dk/Pub/FR615.pdf>
- Henriksen, H.J., Højberg, A.L., Olsen, M., Seaby, L.P., van der Keur, P., Stisen, S., Trolldborg, L., Sonnenborg, T.O. & Refsgaard, J.C. (2012) Klimaeffekter på hydrologi og grundvand – Klimagrundvandskort. www.klimatilpasning.dk
- Henriksen, H.J. et al., 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. Journal of Hydrology, 280(1-4): 52-71.
- Højberg, A.L., Trolldborg, L., Stisen, S., Christensen, BBS, og Henriksen, HJ.: (2012) Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model - <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815212002423>
- Højberg, A.L., Nyegaard, P., Stisen, S., Trolldborg, L., Ondracek, M., & Christensen, B.S.B. (2010a) DK-model2009 - Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland. GEUS rapport 2010/78, København, http://vandmodel.dk/xpdf/dk-model2009_midtjylland.pdf
- Højberg, A.L., Trolldborg, L., Nyegaard, P., Ondracek, M., Stisen, S., Christensen, B.S.B. (2010b) DKmodel2009 - Sammenfatning af opdateringen 2005-2009, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2010/81
- Olsen, M. & Højberg, A.L. (2011) Udbygning af vandløbsnetværk - DK-model2009, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/139
- Pest (2005) Pest – Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition, pp. 336 & Addendum to the PEST manual, pp. 206. Watermark Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/>
- Refsgaard, J.C., Stisen, S., Højberg, A.L., Olsen, M., Henriksen, H.J., Børgesen, C.D., Vejen, F., Kern-Hansen, C. og Blicher-Mathiesen, G., 2011. Vejledning i opgørelse af vandbalancen ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010. GEUS rapport 2011/77.
- Stisen, S., Højberg, AL, Trolldborg, L., Refsgaard, J, C, Christensen, BSB, Olsen, M, og Henriksen, HJ (2012): On the importance of appropriate rain-gauge catch correction for hydrological modelling at mid to high latitudes - <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/4157/2012/hess-16-4157-2012.html>
- Sonnenborg, T.O., Henriksen, H.J, Johnsen, R., Blæsbjerg, H., Steen, M., Pedersen, J., Rasmussen, K. & Sørensen, I. (2012) KIMONO – klimaændringer og punktkilder. Slutrapport KIMONO projektet. Naturstyrelsen. Rapportudkast december 2012.
- van der Keur, P., Refsgaard, J.C. & Højberg, A.L. (2011) Drainage in MIKE SHE, a sensitivity study for model domain grid size - Explored for a sub basin of the DK-model Area 3 (Funen) , Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/141

Appendiks A - Analyse af DK-modellens vandløbsbeskrivelse

A.1 Resumé

- *Fbal* – vandbalancefejlen. For samtlige stationer under ét ligger vandbalancefejlen for hele perioden 1991-2010 på 3,45 %. For de enkelte delområder er vandbalancefejlen under 10 % for hele perioden, med undtagelse af delområde DK2 og DK7, der har vandbalancefejl på hhv. 13 % og 27 %. Den mindste vandbalancefejl på landsplan opnås for efterårsperioden ($F_{bal} = 1,02$ %), mens den største fejl sker i forårsperioden ($F_{bal} = 7,07$ %). Der er dog en betydelig variation mht. simuleringen af den samlede vandbalance for de enkelte stationer. Den største standardafvigelse registreres for sommermåneder, mens den mindste absolutte standard afvigelse forekommer for forårsmånederne. De store stationer har generelt en lille vandbalancefejl for såvel hele perioden som på sæsonbasis, der er dog ikke en generel tendens med faldende vandbalancefejl for stigende oplandsstørrelse.
- *NSE* – Nash-Sutcliffe. NSE for alle stationer for hele perioden er 0,67. For alle delområder opnås den dårligste NSE i sommermånederne, hvor NSE for samtlige stationer under et er 0,30. For stationer med et oplandsareal på op til ca. 100 km² ses ingen umiddelbar sammenhæng mellem oplandsstørrelse og NSE. For stationer over 100 km² er der en tendens til en stigende NSE med stigende oplandsstørrelse.
- *Fraktilværdier* (*Q01, Q50, Q99*).
 - o 1 %. De lave vandføringer simuleres generelt for højt for alle sæsoner og alle delområder. De mindste forskelle mellem observerede og simulerede værdier forekommer i forårsmånederne for de jyske oplande, mens øerne har den mindste forskel i sommermånederne.
 - o De mindste vandføringer forekommer i sommermånederne for alle syv deloplande, hvor den største forskel optræder for øerne (DK1 – DK3 og DK7), mens årstidsvariationen i de lave vandføringer er mindre for de jyske oplande. For øerne ses den mindste absolutte forskel mellem de observerede og simulerede værdier i sommerperioden med de lave vandføringer, og de største forskelle forekommer i forårs- eller efterårsmånederne. Modsat forholder det sig for de jyske oplande, hvor den største forskel optræder i sommermånederne, og den mindste i forårsmånederne. Den største relative forskel optræder for de mindste vandføringer og for sommer og efterårsperioderne er der en tendens til faldende forskel med stigende observeret 1 % fraktilværdi. De mindste vandføringer optræder generelt i oplande i de lerede områder (delområde DK1, DK2 og DK3), hvor de lave vandføringer er meget ringe og ofte tæt på 0. Det resulterer i meget store relative forskelle mellem de observerede og simulerede lave vandføringer, der kan overstige adskillige 100 %.
 - o 99 %. De høje vandføringer underestimeres generelt af modellen, hvilket er gældende for alle deloplande for såvel hele året under et samt de fire sæsoner. Betragtes forskellen som funktion af de observerede værdier ses imidlertid, at vandføringen overestimeres for de laveste observerede værdi-

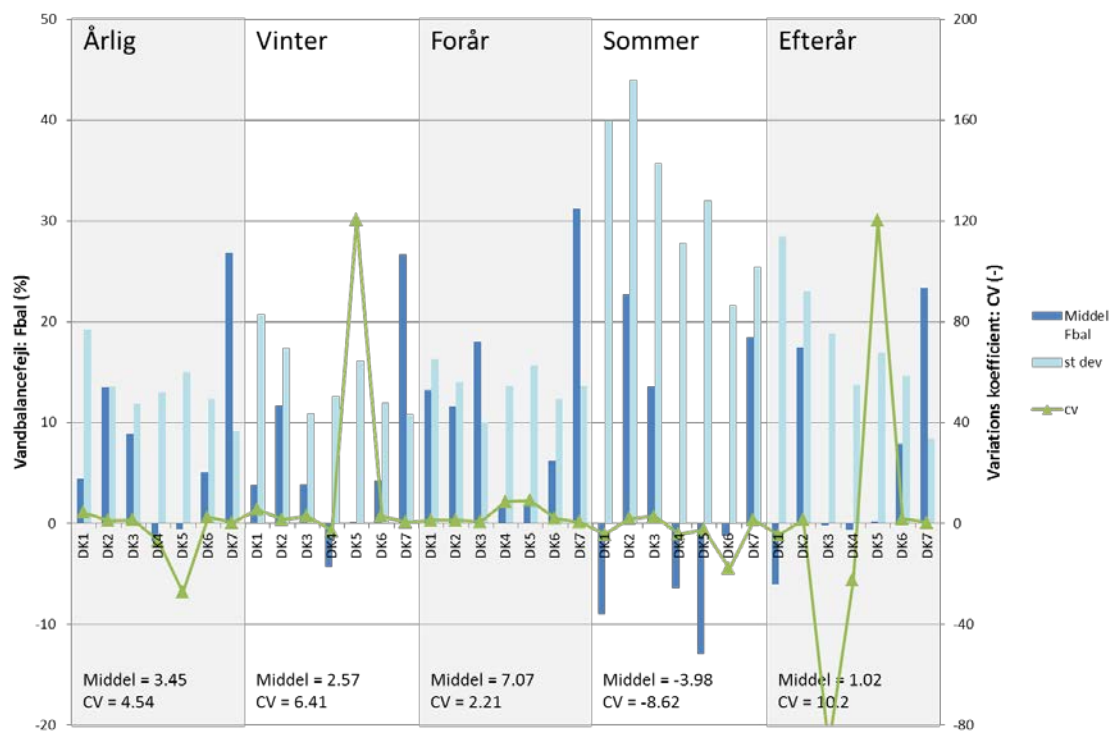
er, mens det omvendte gør sig gældende for de største vandføringer. Der er en nærmest lineær sammenhæng med stigende forskel for stigende observeret værdi. Dette er specielt tydeligt for vinter-, forårs- og efterårsmånederne.

- *Medianminimum.* Medianminimumsværdierne er et udtryk for de lave vandføringer, og således sammenlignelig med 1 % fraktilværdierne. Resultaterne for sammenligningen mellem observerede og simulerede medianminimumsværdier er dog også meget lig det der blev observeret for 1 % fraktilværdierne. De største absolutte fejl ses for stationer med størst medianminimumsværdi, mens de største relative fejl optræder for de mindste oplande med lave medianminimumsværdier. Der er ligeledes en tendens til faldende fejl ved stigende oplandsstørrelse.
- *Minimum af syv dages glidende middel.* Denne værdi er ligeledes et udtryk for de lave vandføringer, dog for lave vandføringer betragtet over en periode på 7 dage. Som 1 % fraktilværdierne og medianminimumsværdierne overestimeres minimum af syv dages glidende middel generelt af modellen, dvs. de lave vandføringer simuleres for højt. For de observerede data ses en del variation i minimum af syv dage glidende middel fra år til år. Specielt for de lerede oplande (delområde DK1, DK2 og DK3) fanges denne variation ikke i tilstrækkeligt grad af modellen. Der er en tendens til faldende forskel mellem observerede og simulerede minimum af syv dage glidende middel ved stigende oplandsareal.
- *Fraktilværdier for kumuleret fordelingsfunktion.*
 - o 10 %. I sommermånederne er der en negativ forskel mellem de observerede og simulerede 10 % fraktilværdier. Det betyder, at 10 % af den samlede vandføring i sommermånederne først opnås i det observerede datasæt. For de øvrige perioder forholder det sig omvendt, med de største forskelle i efterårsperioden for alle syv delområder, hvor der også er en tendens til stigende forskel når den observerede fraktilværdi øges. En væsentlig positiv fejl i efterårsperioden indikerer, at de tidlige toppe på hydrografen for efteråret generelt simuleres for tidligt af modellen. I vinterperioden er fejlen mindre, men der ses en stor variation i fejlen mellem de enkelte stationer. I forårsperioden er fejlen også lille uden sammenhæng med de observerede størrelser.
 - o 50 %. Den største fejl i timingen for halvdelen af den samlede vandføring optræder i sommermånederne, hvor fejlen som for 10 % fraktilværdierne er negativ, dvs. den simulerede vandføring kommer senere end den observerede, og der er en svag tendens til, at fejlen stiger med faldende observerede vandføringer. For vinterperioden er der stor variation i fejlen mellem de enkelte stationer, men samlet sker der ikke en væsentlig over- eller underestimering. I forårs og efterårsperioderne er der ligeledes ikke en udtalt bias med over- eller underestimering ligesom der ikke er sammenhæng mellem fejlen og de observerede fraktilværdier.
 - o 90 %. For de jyske oplande er fejlen i 90 % fraktilværdierne meget små, dog med nogen variation for forårsmånederne. For de øvrige delområder er der en negativ forskel mellem de observerede og simulerede værdier i sommermånederne, hvor fejlen stiger for faldende observerede fraktilværdier for delområderne DK1 og DK2. For efterårs- og vintermånederne er fejlene små, mens der ses en positiv fejl i forårsmånederne.

Analysen af observerede og simulerede vandføringer viser, at mens DK-modellen generelt er i stand til at fange median og middelværdier er der problemer med simulering af ekstremvandføringerne, dvs. hhv. de meget lave samt de meget høje vandføringer. De lave vandføringer overestimeres generelt og dynamikken udtrykt ved NSE samt år til år variationerne udtrykt ved variationen i minimum af syv dage glidende middel fanges ikke tilfredsstillende. Ligeledes er timingen for de lave vandføringer udtrykt ved fraktilværdierne af de kumulerede vandføringer i sommerperioden dårlig. De høje vandføringer simuleres omvendt for lavt for samtlige sæsoner.

A.2 Fbal

Den samlede vandbalancefejl for samtlige vandføringsstationer medtaget i kalibrering af DK-modellen fremgår af Figur 30. Vandbalancefejlen er opgjort per sæson samt for hele perioden 1991-2010 for de syv delområder. Tallene nederst i figuren er beregnet for alle vandføringsstationer under et. Samlet set sker der en mindre underestimering af vandbalancen på landsplan med en middel vandbalancefejl på 3.45 %. Med undtagelse af DK2 og DK7 ligger den samlede vandbalancefejl for hele perioden under 10 % for de enkelte delområder. Den mindste vandbalancefejl på landsplan opnås for efterårsperioden ($F_{bal} = 1.02\%$), mens den største fejl sker i forårsperioden ($F_{bal} = 7.07\%$). Der er dog en betydelig variation mht. simuleringen af den samlede vandbalance for de enkelte stationer, som udtrykt ved standardafvigelsen. Den største absolutte standardafvigelse registreres for sommermåneder, mens den mindste absolutte standardafvigelse forekommer for forårs-månederne. Betragtes imidlertid variationskoefficienten ($CV = \text{standard afvigelse}/\text{middelværdi}$), der er et udtryk for variationen normeret mht. middelværdien, ses de største variationer for efterårsmånederne. Dette betyder, at den lave værdi for middel vandbalancefejlen for efterårsperioden fremkommer ved store hhv. positive og negative vandbalancefejl, der i stor udstrækning udligner hinanden.

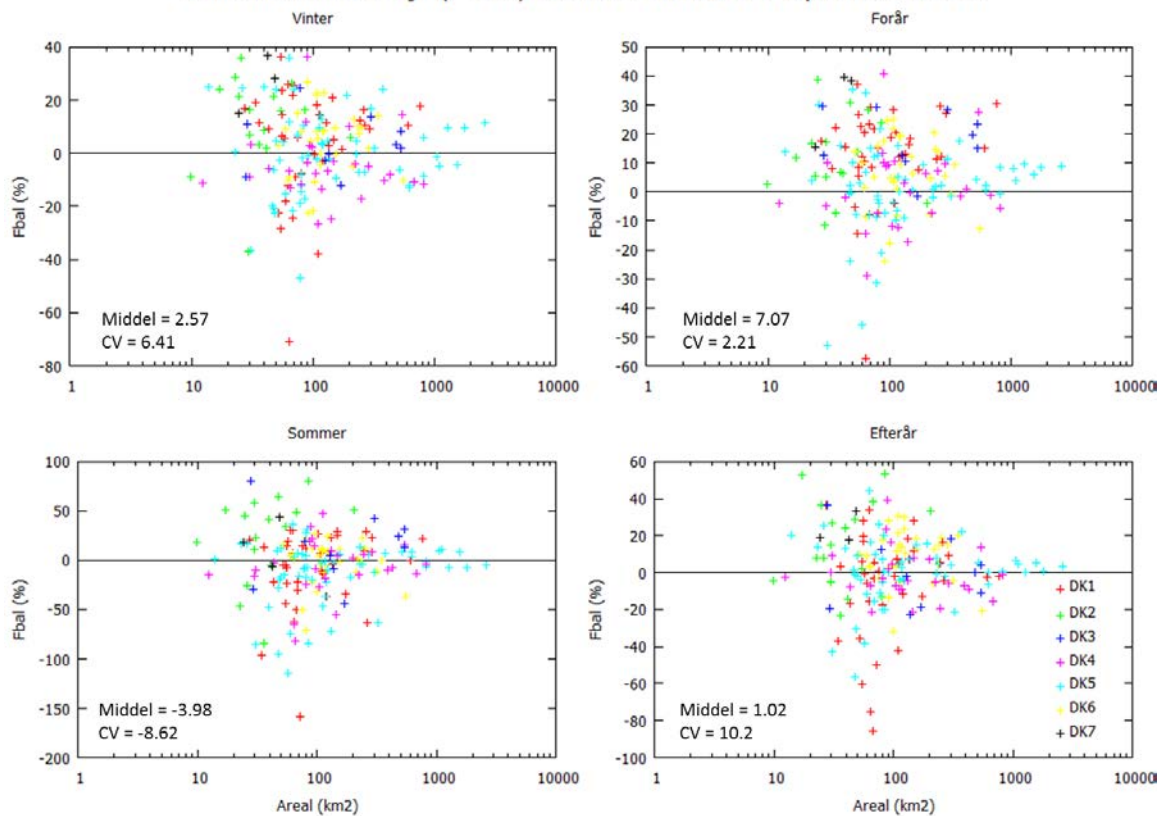


Figur 30. Vandbalancefejl for de syv delområder indeholdt i DK-modellen opgjort for hele perioden under ét samt de fire sæsoner.

Betragtes vandbalancen for de enkelte modelområder, er det kun i DK6, at den maksimale vandbalancefejl forekommer i efteråret, mens den maksimale fejl forekommer i foråret (3 modelområder) eller sommeren (3 modelområder) for de øvrige delmodeller. Der er ingen tendens mht. den minimale vandbalancefejl.

Figur 31 viser vandbalancefejlen som funktion af oplandsarealet for samtlige stationer medtaget i kalibreringen. Heraf fremgår det, at de største stationer ($> 800 \text{ km}^2$) generelt har en lille vandbalancefejl, der er dog ikke en tydelig tendens til faldende vandbalancefejl med stigende oplandsareal. Størsteparten af stationerne har et areal mellem halvtreds og op til et par hundrede km^2 og for denne gruppe ses ingen relation mellem vandbalancefejl og oplandsareal.

Vandbalancefejl (Fbal) som funktion af oplandsareal

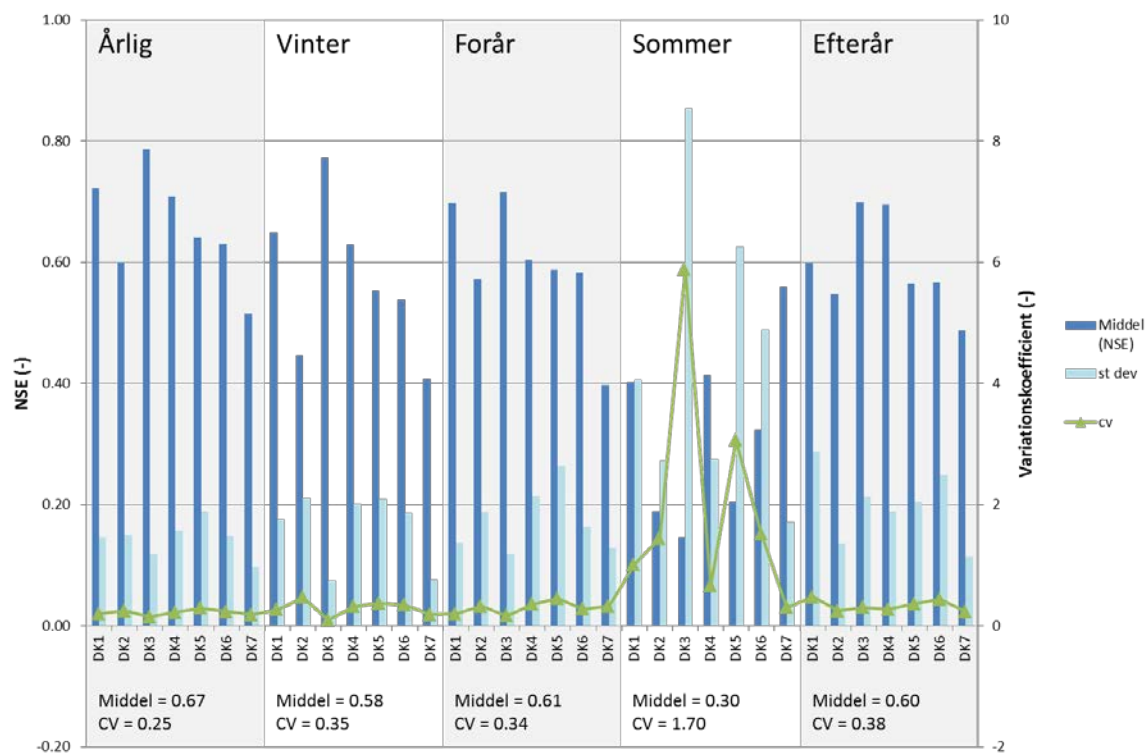


Figur 31. Vandbalancefejl som funktion af oplandsareal.

A.3 NSE

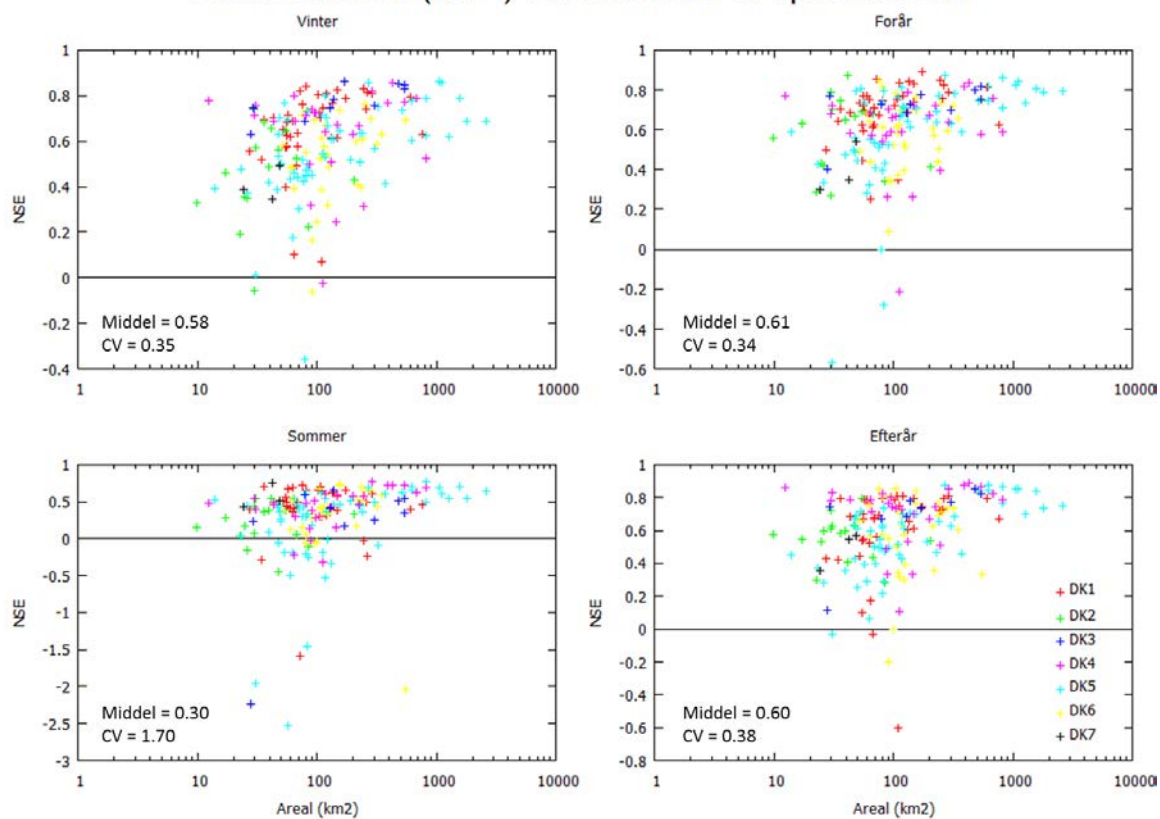
Nash-Sutcliffe koefficienten (NSE) er angivet i Figur 32. Sommermånederne har den mindste NSE, der for alle stationer samlet er på 0.30 mod en NSE på 0.67 for hele perioden. Betragtes de enkelte modelområder, er det ligeledes sommermånederne der har den mindste NSE, eneste undtagelse er DK7, hvor sommermånederne har den største NSE. Sæsonen med den største NSE varierer for de enkelte modelområder.

I Figur 33 er NSE afbildet som funktion af oplandsstørrelsen. For stationer op til ca. 100 km² ses der en stor variation i NSE, med flere gode værdier omkring 0,8, men også en del væsentlig lavere og enkelte steder er der negative værdier. For stationer over 100 km² ses en tendens til en stigende NSE for stigende oplandsstørrelse for alle fire sæsoner.



Figur 32. NSE for hele perioden samt de enkelte sæsoner opgjort for de 7 delmodeller.

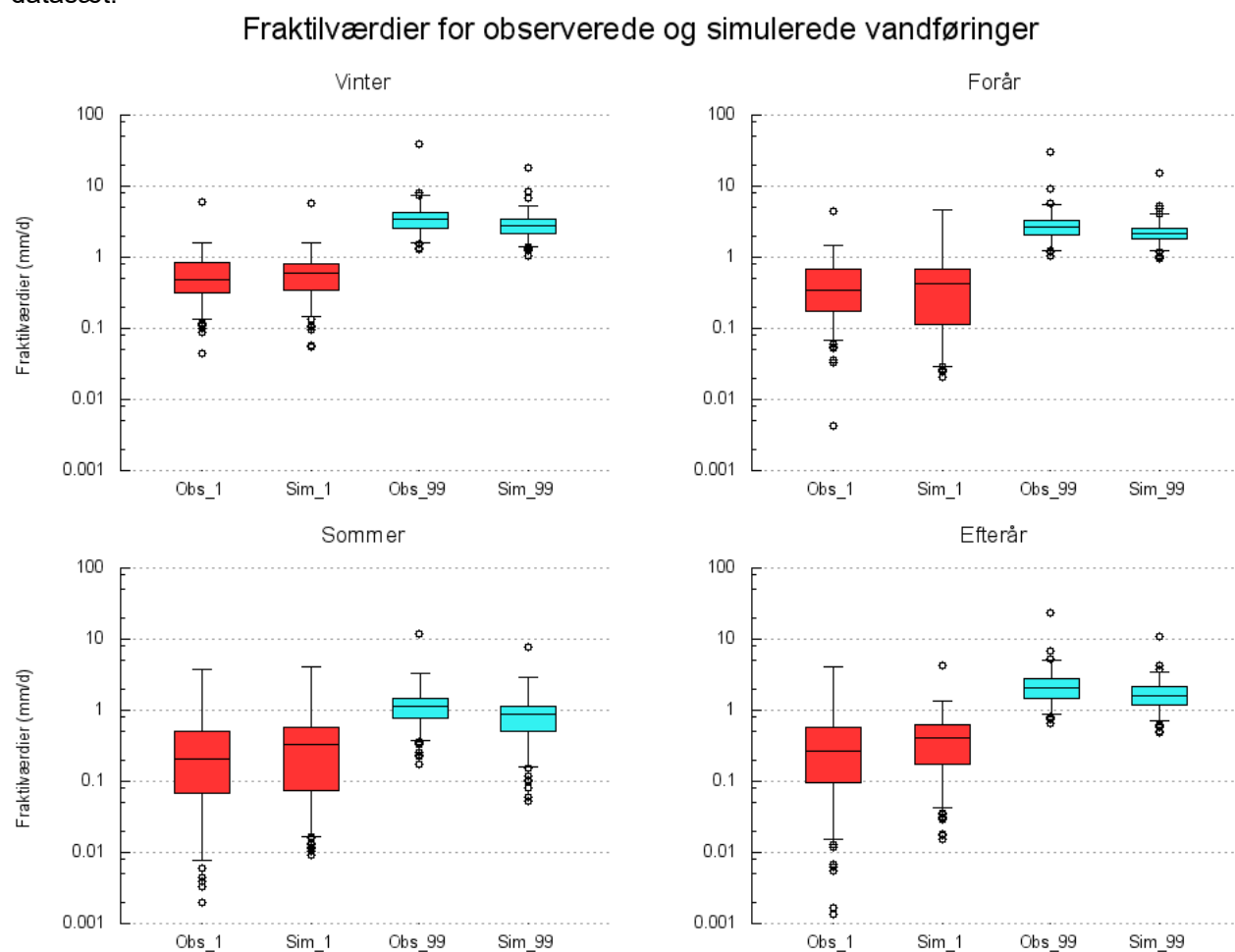
Nash-Sutcliffe (NSE) som funktion af oplandsareal



Figur 33. NSE som funktion af oplandsareal.

A.4 Vandføringsfraktilværdier

Modellens evne til at simulere fraktilværdierne for vandføringerne er analyseret ved først at beregne de årlige fraktilværdier for det observerede og simulerede datasæt, samt forskellen mellem disse fraktilværdier. Herefter er middelfejlen for hver vandføringsstation beregnet som gennemsnittet af de 20 år der indgår i analysen. Til sammenligning mellem de observerede og simulerede størrelser er den specifikke vandføring anvendt, dvs. den absolutte forskel i m^3/s divideret med vandføringsstationens oplandsareal, der er konverteret til mm/d . Figur 34 viser 1 % og 99 % fraktilværdierne beregnet for de observerede og simulerede vandføringer for alle 182 stationer medtaget i analysen. For det samlede datasæt er der generelt en god overensstemmelse mellem de observerede og simulerede værdier mht. såvel middelværdien samt spredningen omkring denne. De observerede 1 % fraktilværdier ligger dog generelt lidt under de observerede, dvs. de lave vandføringer simuleres lidt for højt med modellen for alle fire sæsoner. For 99 % fraktilværdierne ligger de observerede værdier derimod generelt højere end de simulerede værdier, hvilket betyder at de store vandføringer generelt underestimeres af modellen. Endvidere ses, at spredning på vandføringerne er størst for 1 % fraktilværdierne, både i det observerede og simulerede datasæt.

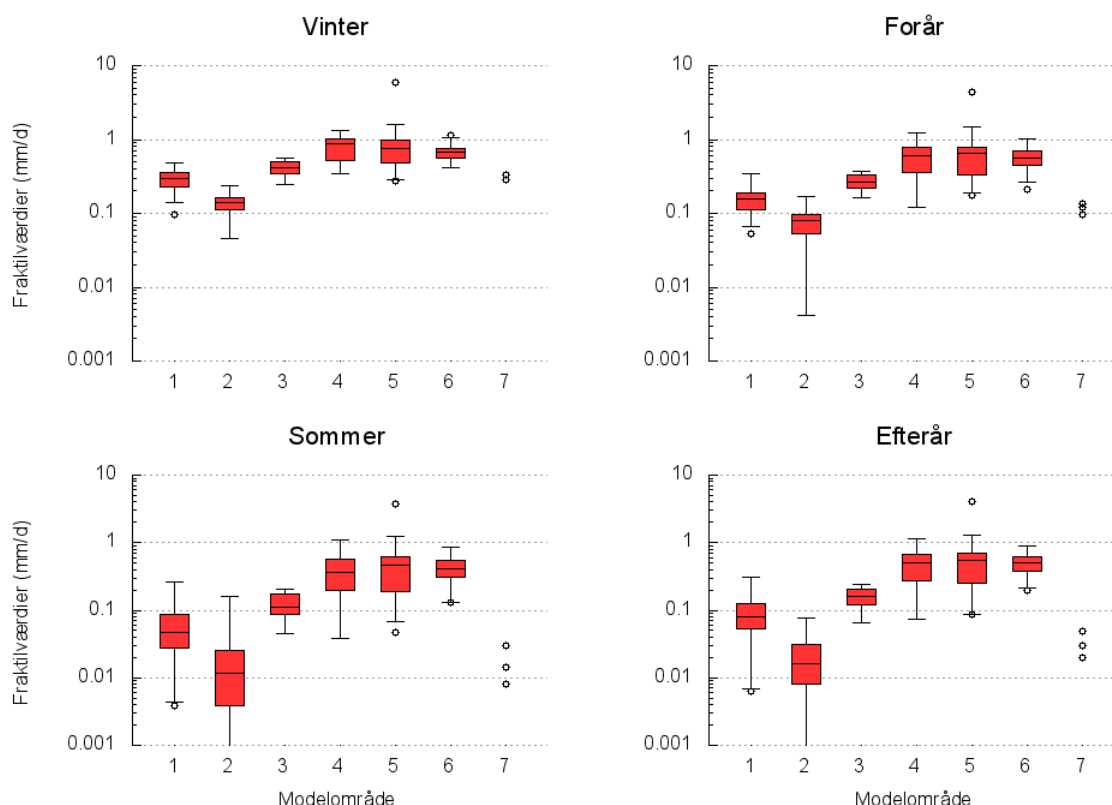


Figur 34. 1 % (1) og 99 % (99) fraktilværdier for observerede (Obs) og simulerede (Sim) vandføringer for samtlige vandføringsstationer medtaget i analysen. Øvre og nedre del af boksen er hhv. 1.

og 3. kvartiler af data mens horisontale linjer angiver 95 % af data. Punkter angiver "outlier", der ligger udenfor 95 % af det samlede datasæt.

Figur 35 viser 1 % fraktilværdierne beregnet for de observerede vandføringer. Af figuren fremgår det, at de mindste værdier forekommer i sommerperioden, men at de lave vandføringer fortsætter ind i efterårsperioden. Endvidere ses, at 1 % fraktilværdierne er betydelig større i de jyske oplande (DK4 – DK6) sammenholdt med øerne (DK1 – DK3 og DK7).

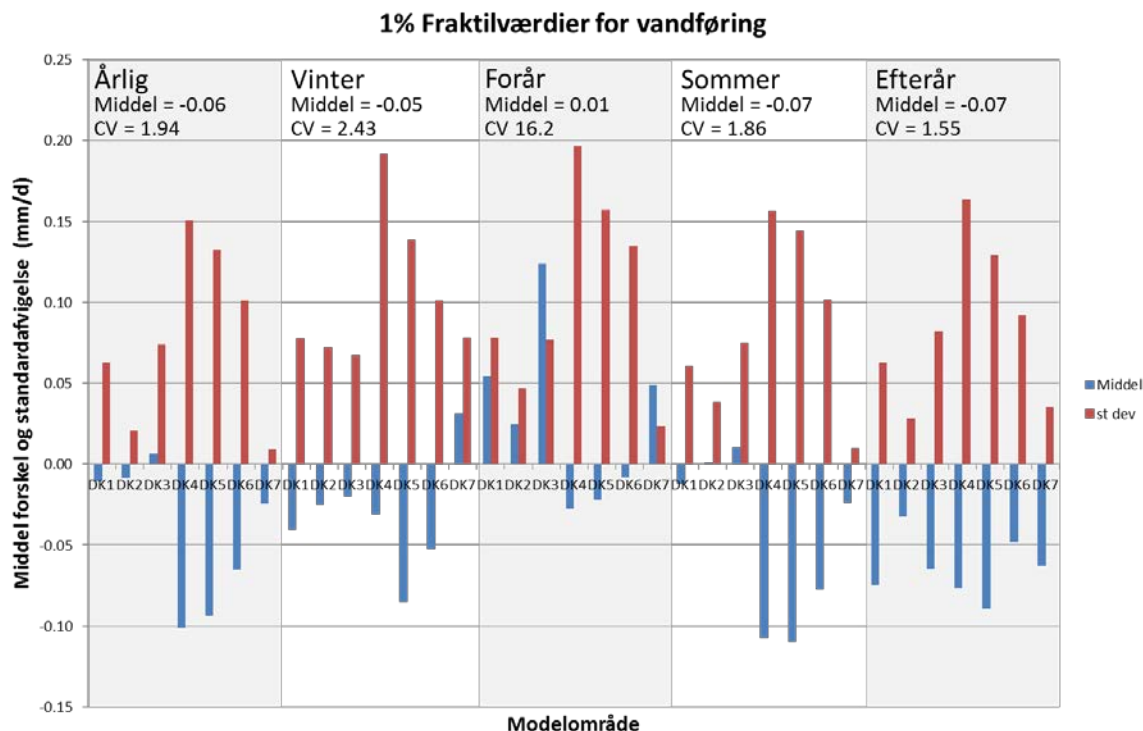
1 % fraktilværdier for observerede vandføringer



Figur 35. 1 % fraktilværdier for observerede vandføringer for de syv delmodeller.

Forskellen mellem observerede og simulerede 1 % fraktiler er vist på Figur 36 opgjort for de enkelte delområder på års- og sæsonbasis. På landsplan ses der at være en positiv forskel i forårsmånederne, mens de øvrige sæsoner, samt på årsniveau, alle har negative forskelle. Modellen overestimerer altså generelt de lave vandføringer, hvilket er gældende for alle oplande med undtagelse af områderne DK1 – DK3 og DK7, dvs. øerne, der har positive værdier i forårsmånederne, ligesom DK3 og DK7 endvidere har positive værdier for hhv. sommer- og vintermånederne. De mindste forskelle i observerede og simulerede 1 % fraktiler forekommer i forårsmånederne for de jyske oplande (DK4 – DK6), mens øerne har de mindste værdier i sommermånederne. DK3 har den største afvigelse i foråret, mens de øvrige øer (DK 1, DK 2 og DK7) har den største afvigelse i efterårsmånederne. For de jyske oplande ses den største afvigelse i sommermånederne. Forskellene er angivet i absolute størrelser. Det ville derfor være forventeligt, at de mindste forskelle optræder i sommermånederne, hvor vandføring er mindst. Dette stemmer overens med resultatet for øerne, men for de jyske oplande bemærkes, at sommermånederne er behæftet med de største forskelle.

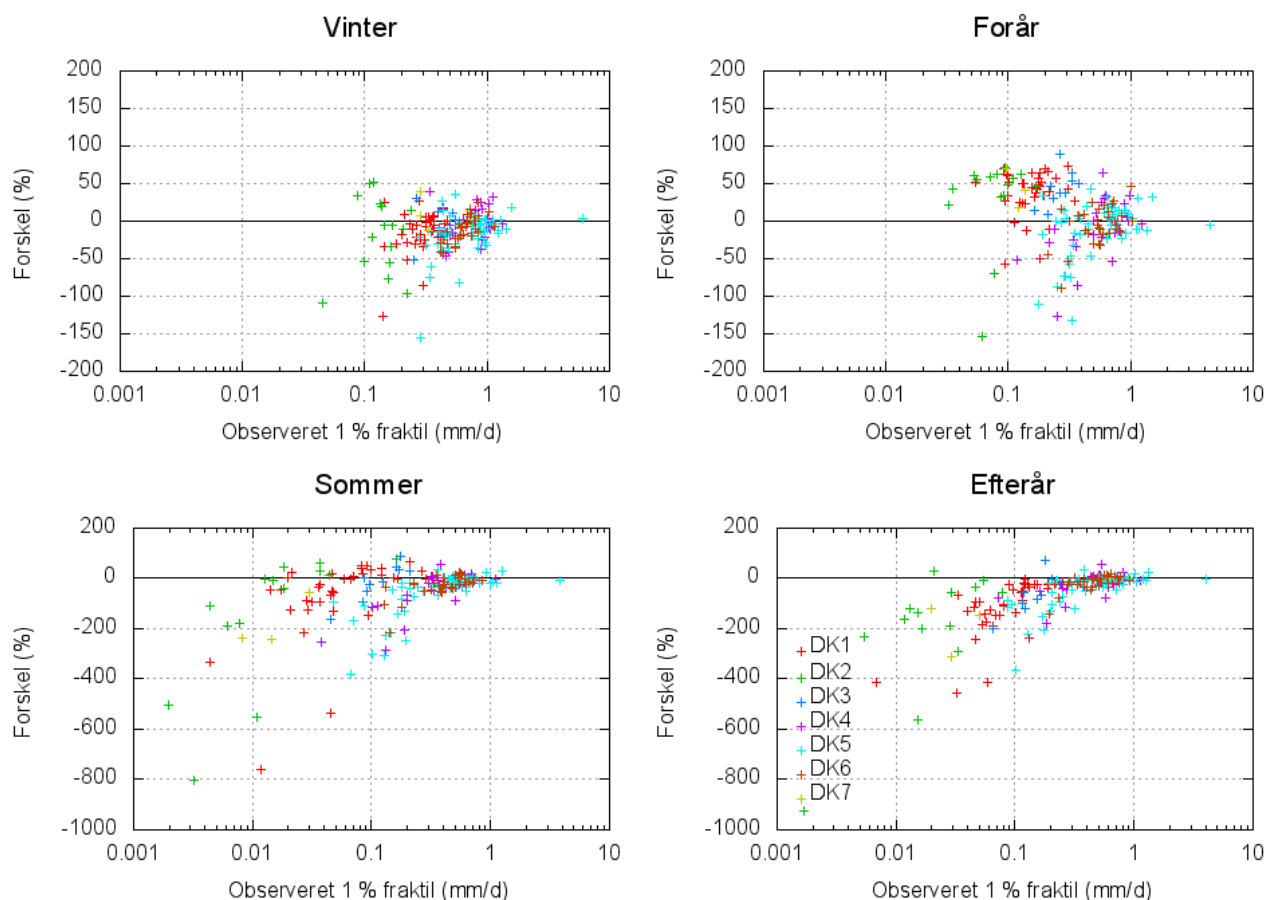
Der ses at være en forholdsvis ens standardafvigelse for de forskellige sæsoner indenfor samme delområde. Den relative variation i forskellene mellem observerede og simulerede forskelle er således forholdsvis konstant i alle fire sæsoner.



Figur 36. Forskel mellem 1 % fraktilværdier for observeret og simuleret vandføring opgjort for de syv delmodeller på års- og sæsonbasis. Middel angiver middelforskellen for delområdet i den pågældende periode, og standardafvigelse angiver variationen i forskellen mellem observeret og simuleret data.

Figur 37 viser den relative forskel mellem de observerede og simulerede 1 % fraktilværdier som funktion af de observerede værdier. Heraf fremgår det, at de største relative fejl forekommer for vandløbene med de mindste vandføringer, hvor fejlen for nogle stationer er væsentlig over 100 %. Stationerne med de mindste specifikke vandføringer er generelt placeret i delområde DK 1 - DK3 og DK7 (Figur 35) og den store relative fejl for de små oplande skyldes i høj grad den ringe vandføring i low-flow situationer, som specielt i de lerede oplande ofte ligger tæt på nul.

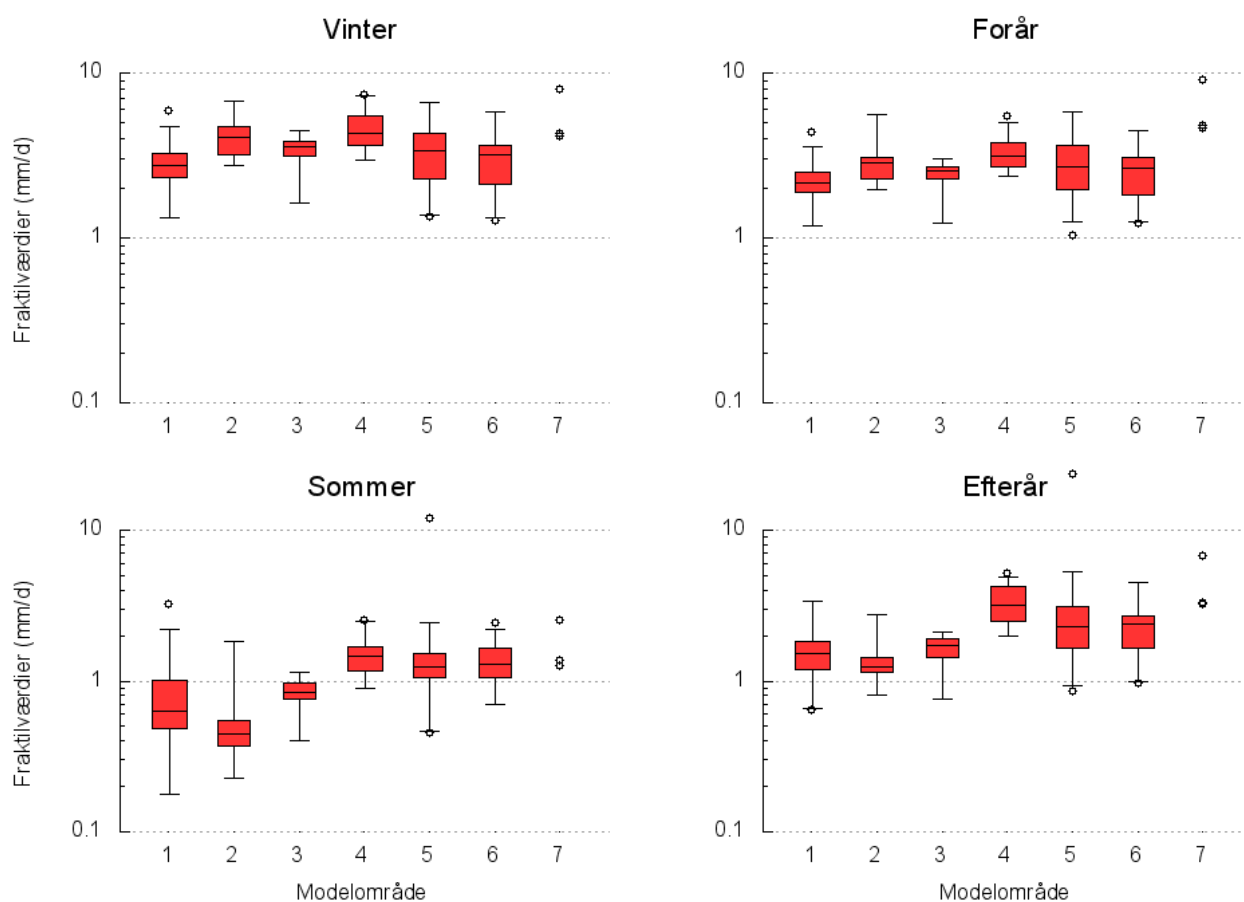
Forskel i 1 % fraktil i procent



Figur 37. Relativ forskel mellem 1 % fraktilværdier for observeret og simuleret vandføring.

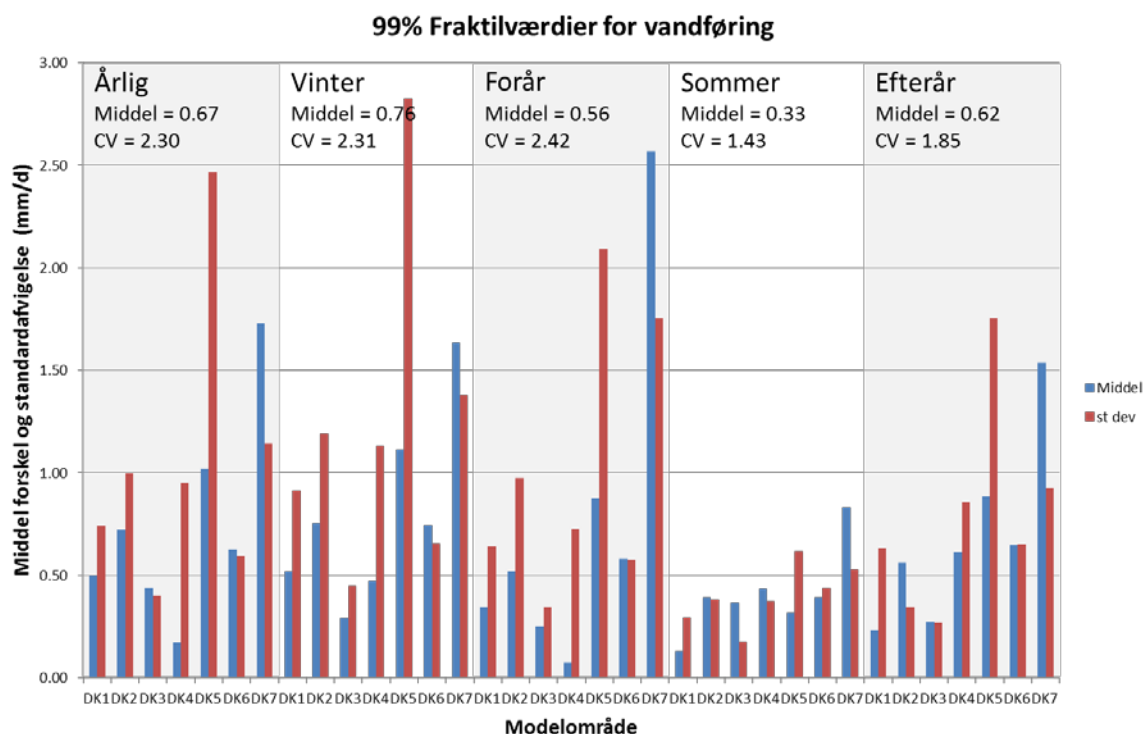
99 % fraktilværdierne beregnet på basis af de observerede data er vist i Figur 38. Som 1 % fraktilerne ses de største værdier at optræde for de jysekløvede oplande (DK4 – DK5). For vinter og forårsmånederne er der derimod ikke samme generelle forskel mellem de observerede vandføringer for Jylland og øerne.

99 % fraktilværdier for observerede vandføringer



Figur 38. 99 % fraktilværdier for observerede vandføringer for de syv delmodeller.

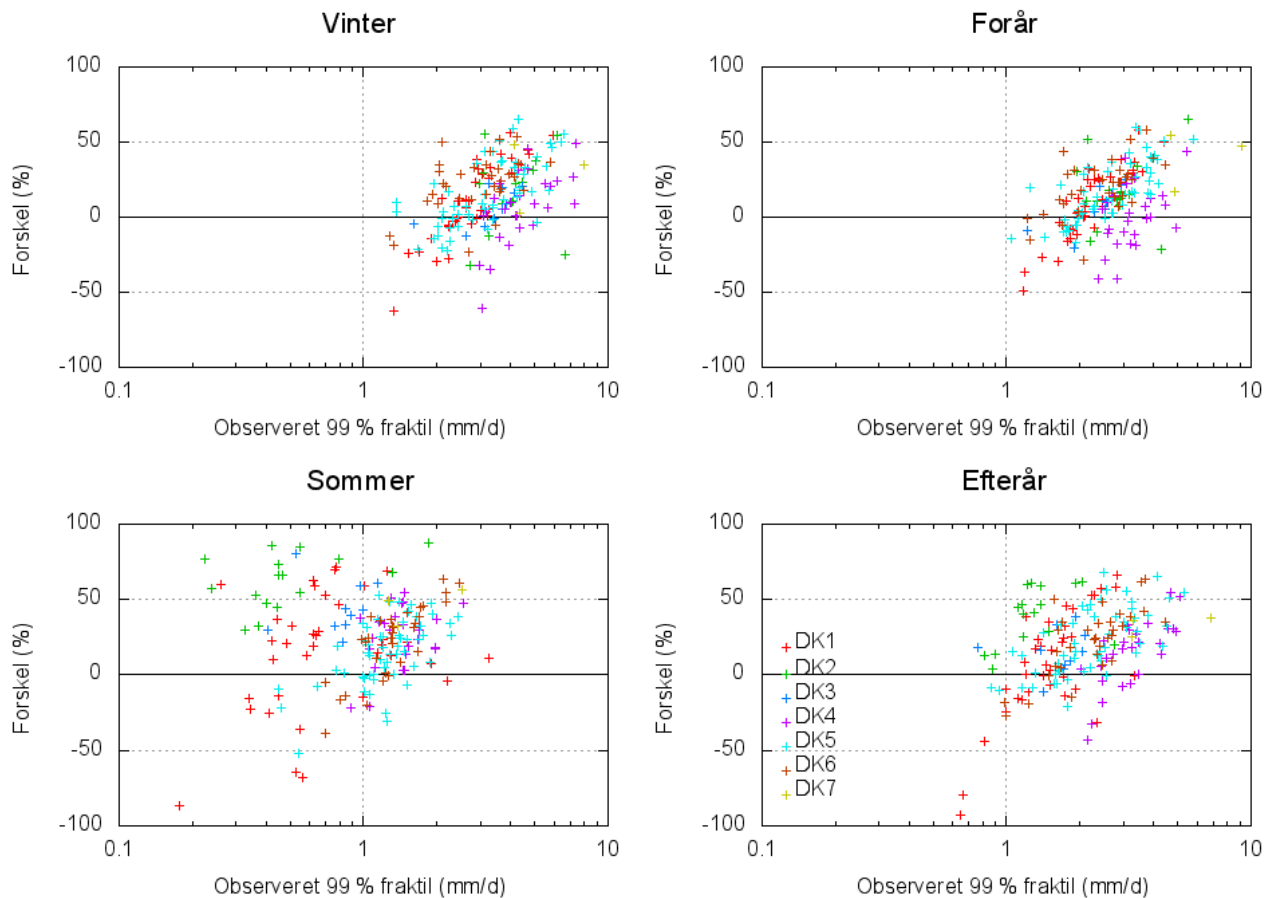
Forskellen mellem 99 % fraktilværdierne for de syv delmodeller opgjort på års- og sæson-basis er vist i Figur 39. Som det fremgår, er forskellen positiv for alle modelområder og perioder. Modellen simulerer således de største vandføringer for lavt både for hele året og de enkelte sæsoner. Standardafvigelsen af forskellene er i samme størrelsesorden som middelfejlen, dvs. middelfejlen for de enkelte vandføringsstationer indenfor et opland er sammenlignelig. Underestimering af de høje vandføringer således udtryk for en generel tendens og ikke blot et udtryk for at enkelte vandføringer afviger markant.



Figur 39. Forskel mellem 99 % fraktilværdier for observeret og simuleret vandføring opgjort for de syv delmodeller på års- og sæsonbasis. Middel angiver middelforskellen for delområdet i den pågældende periode, og standardafvigelse og variationskoefficient angiver variationen i forskellen mellem observeret og simuleret data.

Betragtes forskellen i 99 % fraktilværdierne som funktion af den observerede værdi, Figur 40, ses der at være en sammenhæng mellem de observerede størrelse og forskellen. Ved de laveste observerede værdier er forskellen negativ, dvs. modellen simulerer for store 99 % fraktilværdier, mens det omvendte gør sig gældende for de store 99 % fraktilværdier i det observerede datasæt, men en tendens for alle deloplande til stigende forskel for stigende vandføring.

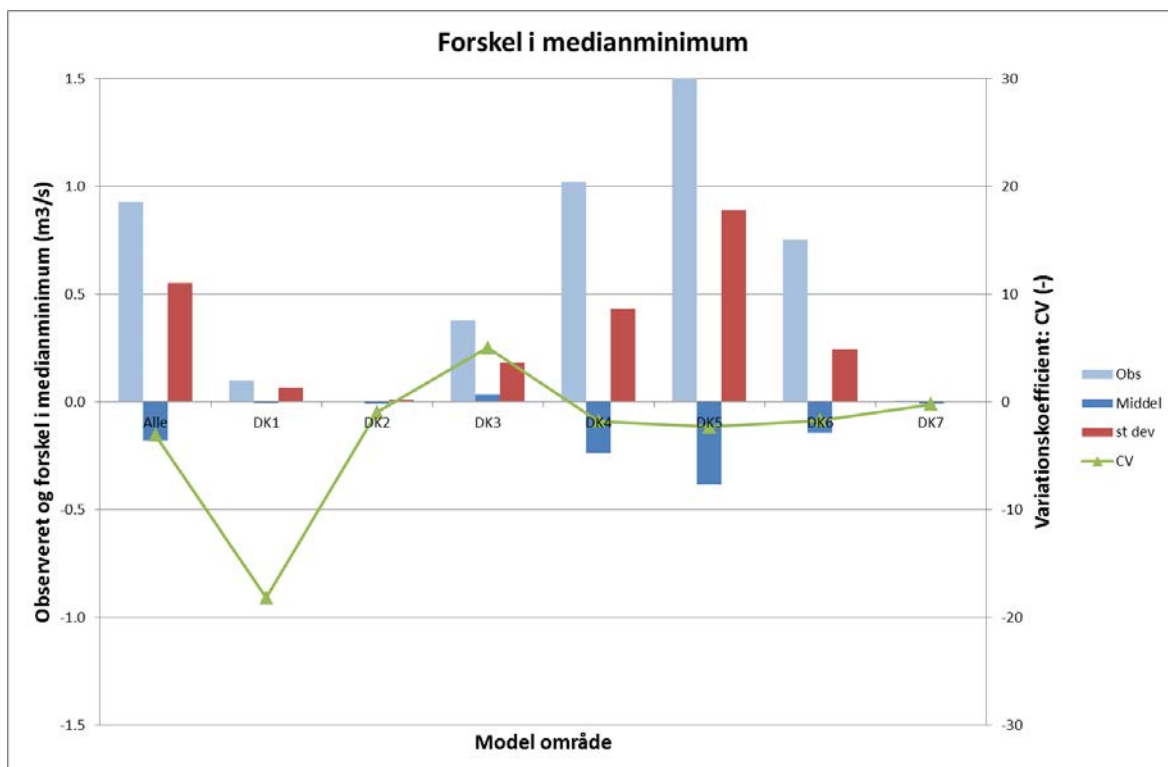
Forskel i 99 % fraktil i procent



Figur 40. Relative forskel mellem 99 % fraktilværdier for observeret og simuleret vandføring.

A.5 Medianminimum

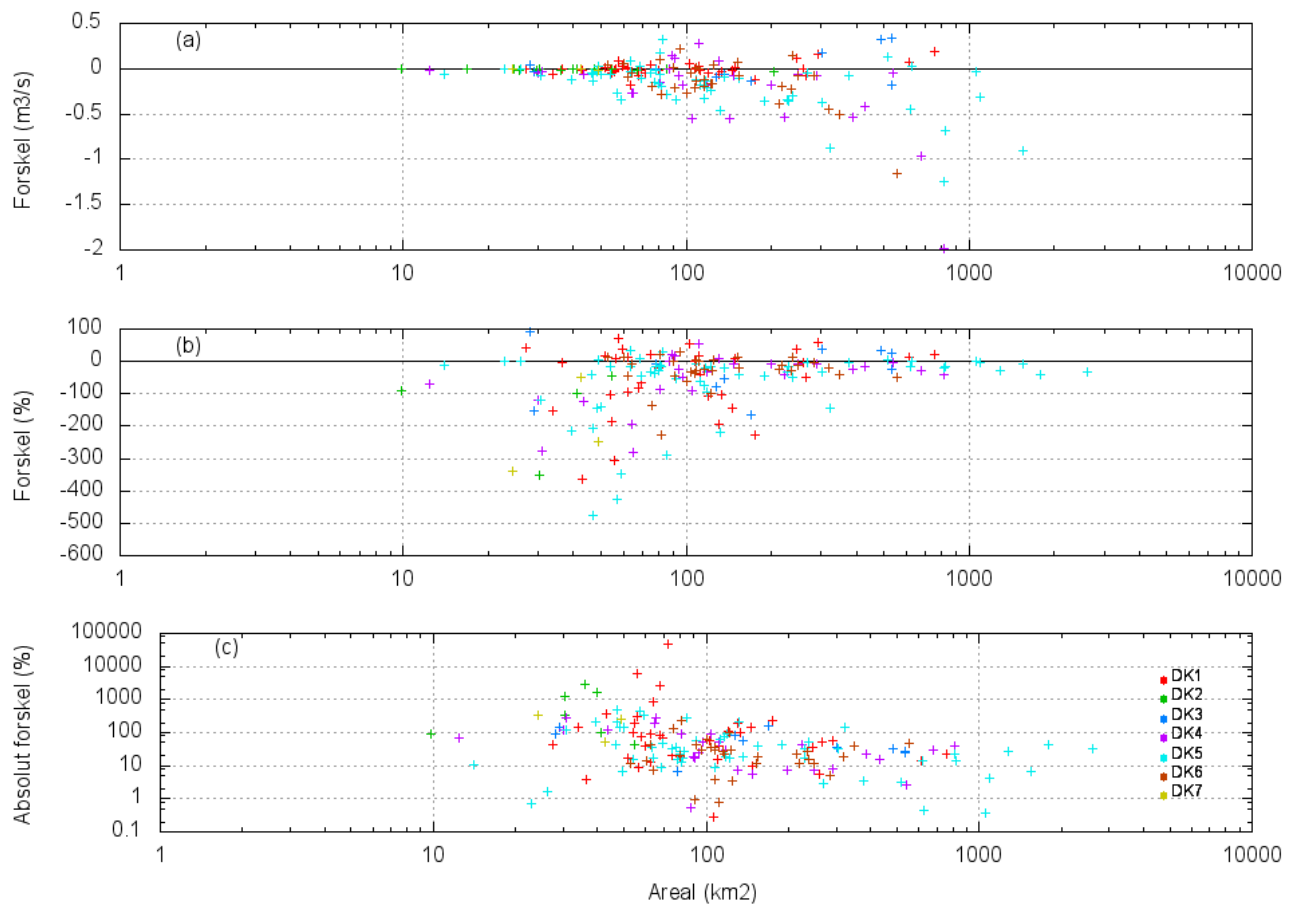
Medianminimum beregnet på basis af de observerede værdier samt forskellen mellem medianminimumsværdier for observerede og simulerede vandføringer er vist på Figur 41 som middel for alle stationer samt indenfor de enkelte delmodeller. Som det fremgår af figuren forekommer de største observerede medianminimumsværdier for de jyske delmodeller (DK4, DK5 og DK6). Den absolutte størrelse af middelfejlen mellem observeret og simuleret medianminimum følger generelt de observerede størrelser, således at den absolutte fejl er størst for delmodeller med den største observerede medianminimum. DK1, og i mindre grad DK3, skiller sig ud ved at have en meget stor CV, dvs. der er stor variation mht. hvor god modellen er til at simulere medianminimum for de enkelte stationer, hvilket også kan ses af Figur 42(c), hvor nogle af stationerne i DK1 har en meget stor relativ fejl.



Figur 41. Observeret samt middel forskel mellem observeret og simuleret medianminimum.

Fejlen i medianminimumsværdierne er angivet for samtlige stationer som funktion af oplandsarealet på Figur 42, angivet som såvel absolutte fejl i m^3/s (a), relative fejl (b) samt den absolutte forskel i procent (c). Tre af de store stationer i område 5 har en forskel der er mindre end $-2 \text{ m}^3/\text{s}$ (ned til $-5 \text{ m}^3/\text{s}$), men for læsevenligheds skyld er akser afskåret ved $-2 \text{ m}^3/\text{s}$, ligeledes er der en enkelt station på Sjælland hvor den relative forskel er under de -600% medtaget i Figur 42 (b). Alle stationer er derimod medtaget på Figur 42 (c), hvor den absolutte fejl mellem observerede og simulerede værdier er angivet i procent af den observerede værdi. Det fremgår af figuren, at de største stationer, med den største medianminimumsvandføring ligeledes har de største absolutte afvigelser, mens den største relative afvigelse forekommer for vandføringer med de små medianminimumsvandføringer, hvor fejlen for enkelte stationer i modelområde DK1 og DK2 kan komme helt op på adskillige tusinder procent. For de øvrige delområder er der ligeledes forskelle på mellem 100 og 1000 %, men hovedparten af stationerne har en fejl der ligger mellem 10 % og 100 %. Fra-regnes stationer med en fejl på mere end 1000 %, er middel af den absolutte relative fejl 64 %.

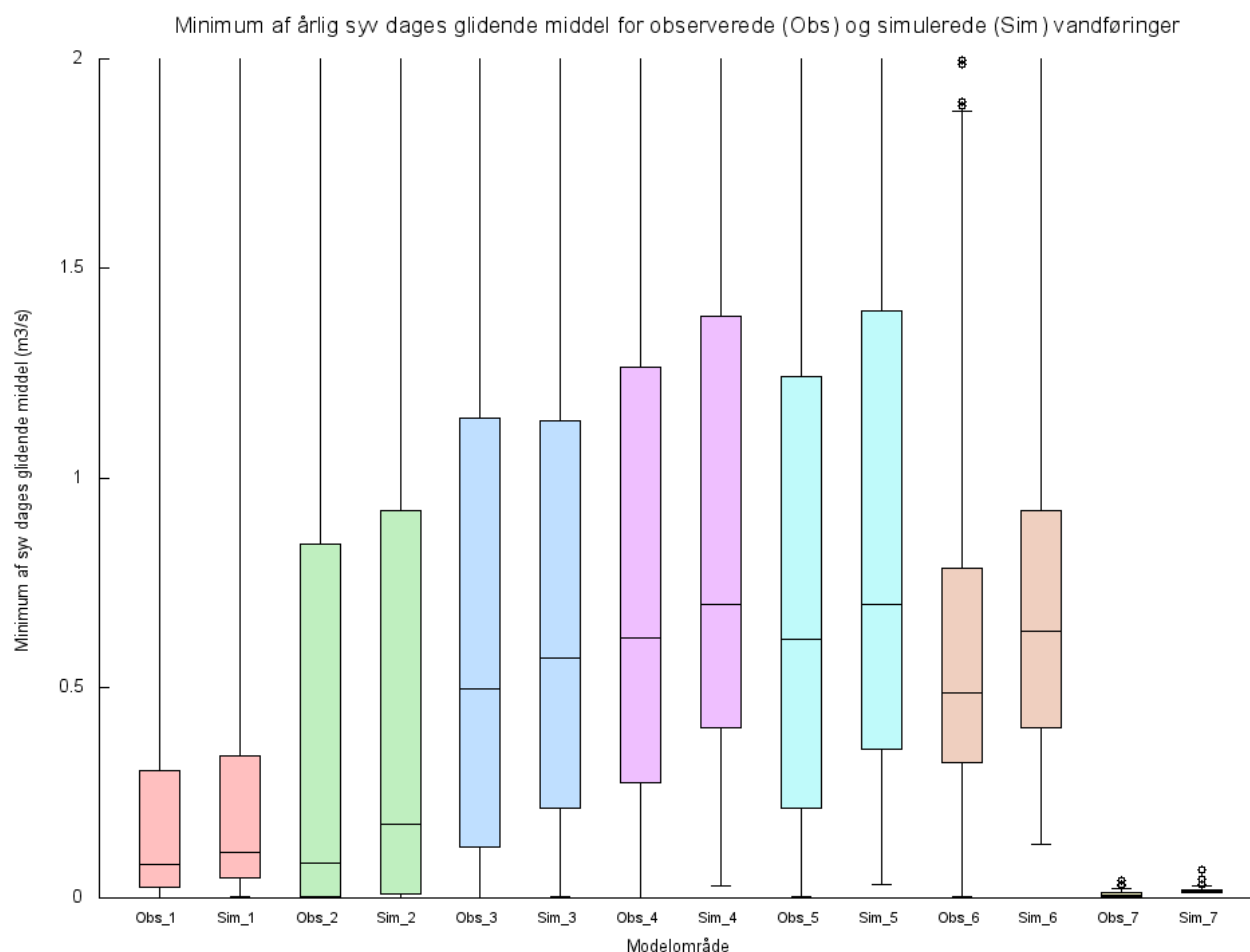
Forskel i medianminimum vs areal



Figur 42. Forskel i medianminimum som funktion af oplandsareal (a) forskel i vandføringer (b) forskel i % og (c) absolutte forskel i %.

A.6 Minimum af syv dages glidende middel

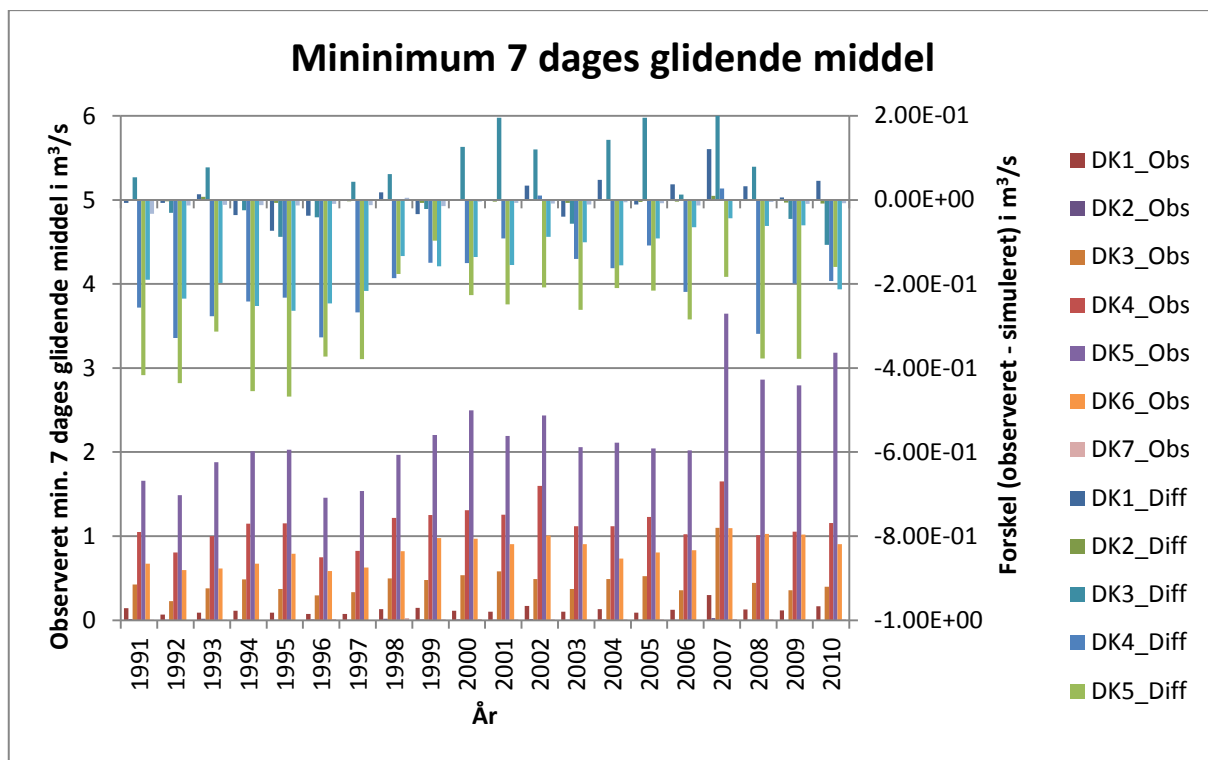
Minimum af årlige syv dages glidende middel er beregnet for hvert år i perioden 1991 – 2010. Figur 43 viser et boxplot af værdierne baseret på samtlige år i perioden 1991-2010 og for alle stationer indenfor de enkelte delområder. Af figuren fremgår det, at middelværdierne for de observerede data konsekvent ligger under de simulerede værdier for alle delområder. Derimod er spredningen indenfor de enkelte delområder sammenlignelig for begge datasæt, dog er der lidt større spredning i de observerede data for DK3.



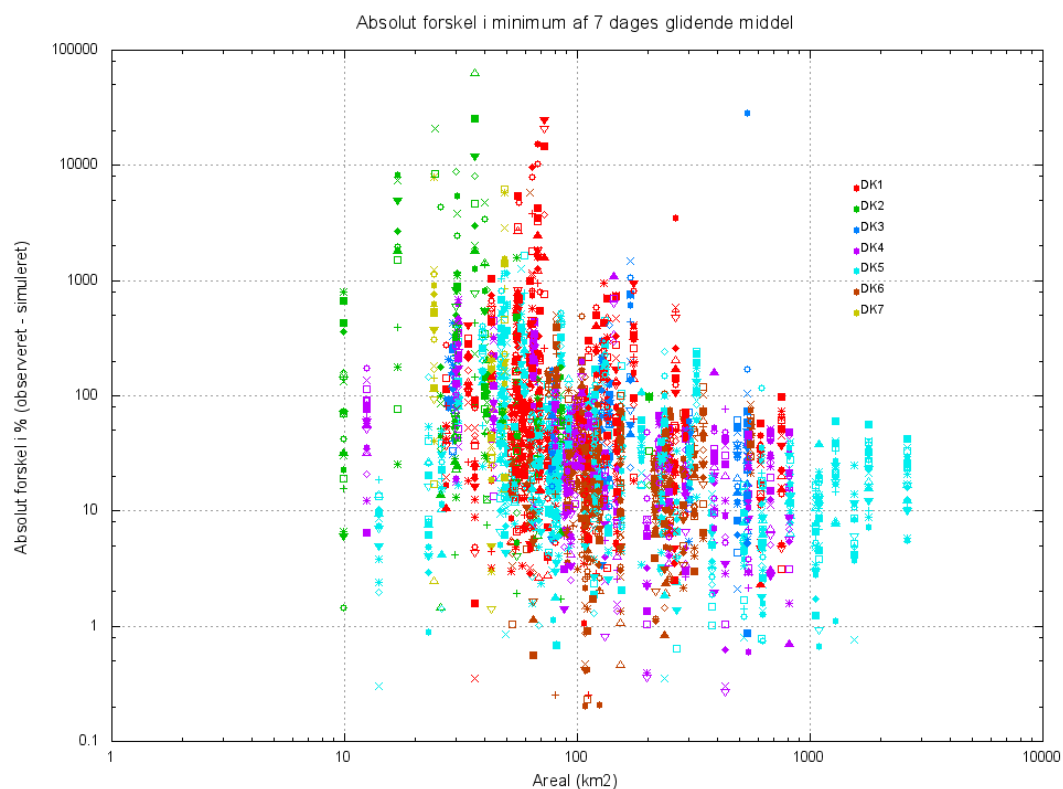
Figur 43. Boxplot af minimum af syv dages glidende middel på årsniveau beregnet på tværs af perioden 1991-2010 og for samtlige vandføringsstationer indenfor et delområde.

Figur 44 viser den årlige minimumsværdi for syv dages glidende middel for de syv modelområder, hvor den nederste del viser de observerede værdier (venstre y-akse) og den øverste del af figuren viser forskellen mellem de observerede og simulerede værdier (højre y-akse). Der er nogen forskel i de årlige værdier beregnet på basis af de observerede vandføringer, hvor årene 1996 og 1997 har de mindste vandføringer. De Jyske oplande (DK4, DK5 og DK6) har de største minimumsværdier og har samtidigt den største absolutte forskel mellem de observerede og simulerede værdier. Den relative fejl er vist i Figur 45 hvor fejlen er vist som funktion af oplandsarealet. Minimum af syv dages glidende middel opgøres på årsbasis og hver station optræder således 20 gange på figuren, svarende til de tyve år for hvilke analysen er foretaget. Af figuren fremgår det, at der er stor spredning mht. fejlen mellem værdierne beregnet på baggrund af hhv. de observerede og simulerede vandføringer. Der er dog en tendens til faldende fejl ved stigende oplandsstørrelse.

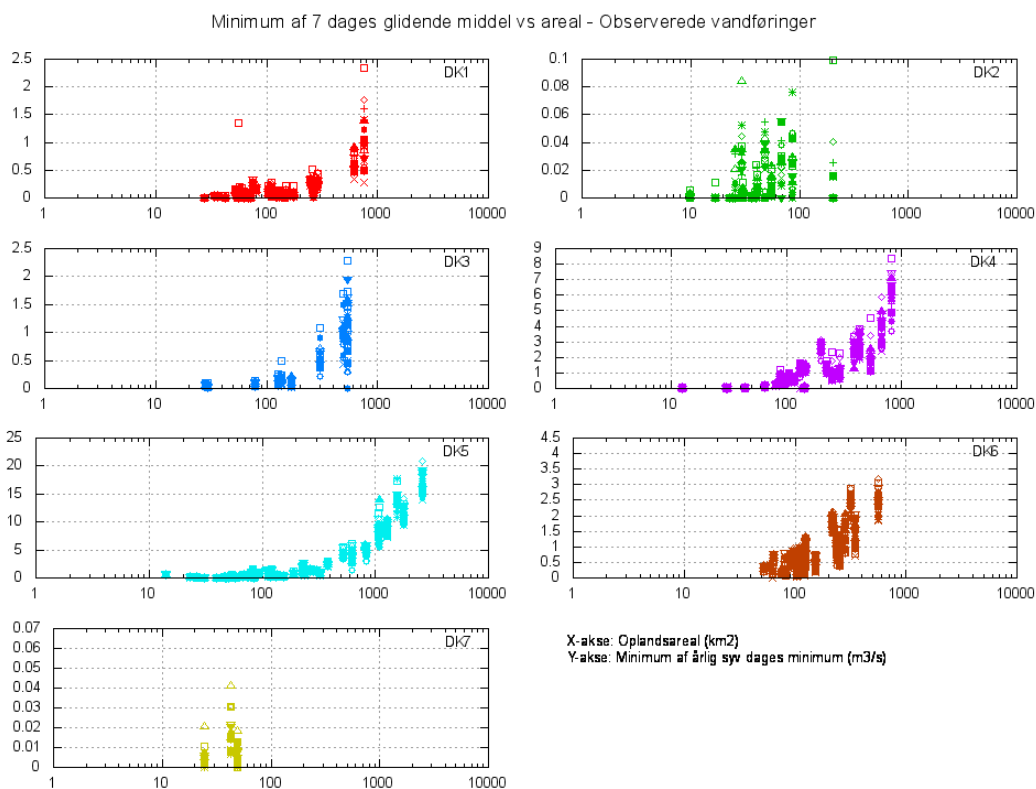
Figur 46 og Figur 47 og viser de faktiske værdier for årlig minimum af syv dages glidende middel baseret på hhv. observerede og simulerede data. Ved sammenligning af figurene genkendes modellens tendens til overestimering af værdien. Der fremgår dog også, at den spredning der ses i de observerede data fra år til år, specielt for DK1, DK2 og DK3 der repræsenterer de lerede oplande, ikke fanges tilstrækkeligt af modelsimuleringerne.



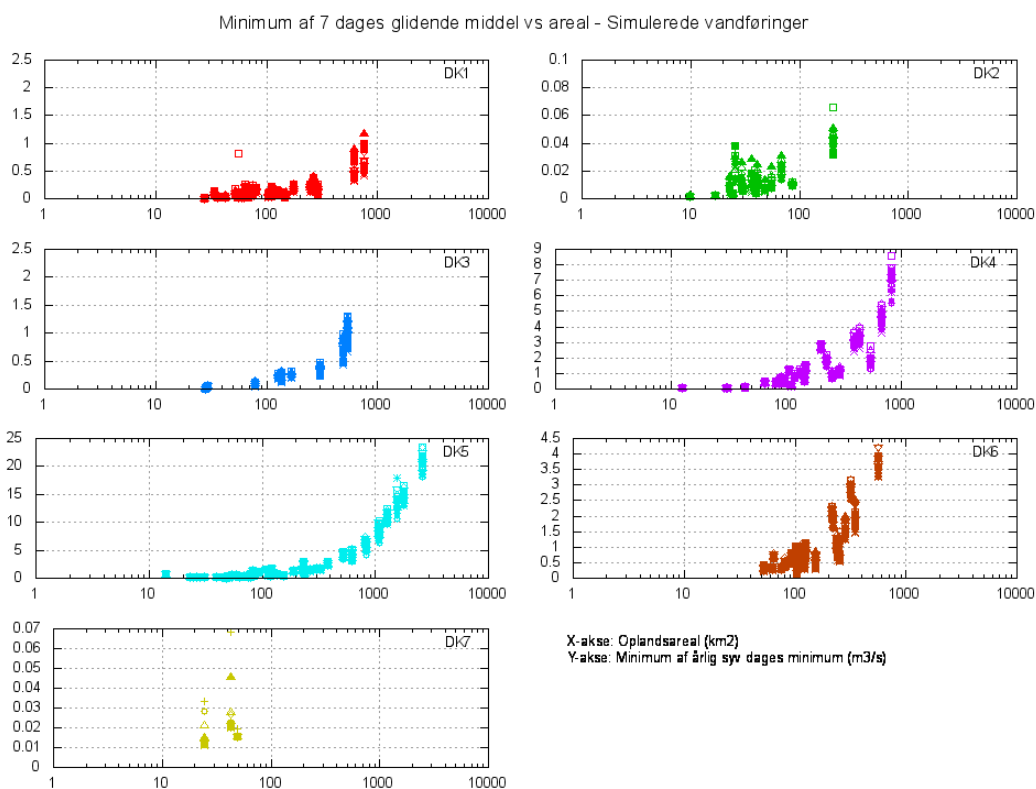
Figur 44. Minimum af årlig syv dages glidende middel.



Figur 45. Absolutte forskel i minimum af syv dage glidende middel i procent. Hver station optræder med i alt 20 værdier (en for hvert år).



Figur 46. Årlige minimum af syv dages glidende middelværdier beregnet ud fra observerede vandføringer.

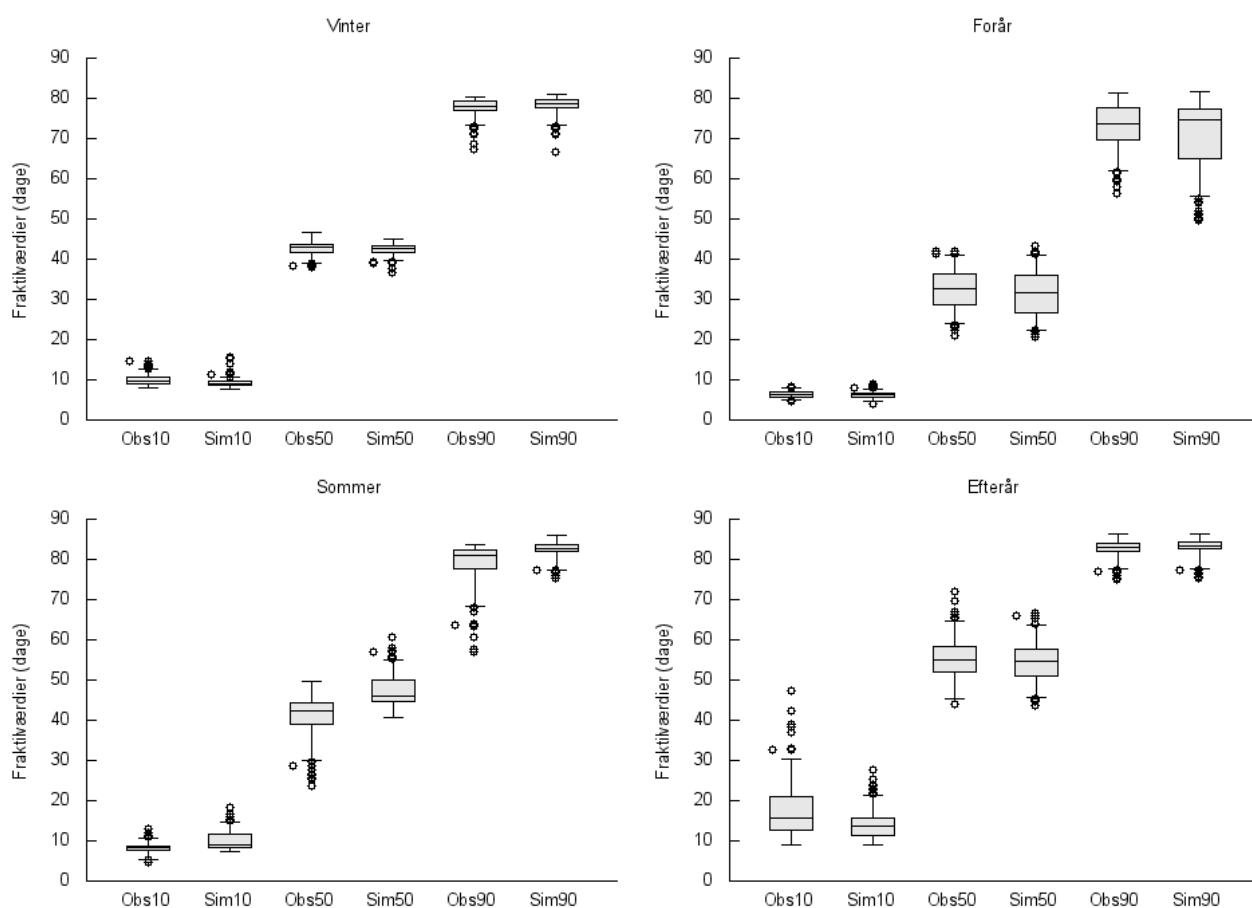


Figur 47. Årlige minimum af syv dages glidende middelværdier beregnet ud fra simulerede vandføringer.

A.7 Fraktilværdier for kumulerede vandføringer

De observerede og simulerede fraktilværdier fremgår af boxplottet i Figur 48. Her fremgår det, at de observerede og simulerede fraktilværdier for vinterperioden er meget sammenlignelige. Det samme billede tegner sig for forårsperioden, dog er der lidt større forskel for 90 % fraktilværdierne, hvor der ses en større spredning for de simulerede værdier forårsaget af simulerede værdier der er lavere end de observerede. For sommermånederne ses at de simulerede fraktilværdier generelt er større end de observerede. Mens der er størst spredning i de simulerede 10 % fraktilværdier, gør det modsat sig gældende for 90 % fraktilerne, hvor der er væsentlig større spredning i det observerede datasæt. For efterårsperioden ses en større spredning for de observerede 10 % fraktiler, der endvidere er større end de simulerede størrelser. For 50 % og 90 % fraktilerne er de observerede og simulerede værdier derimod næsten ens.

Fraktilværdier for kumulerede vandføringer for observerede (Obs) og simulerede (Sim) data

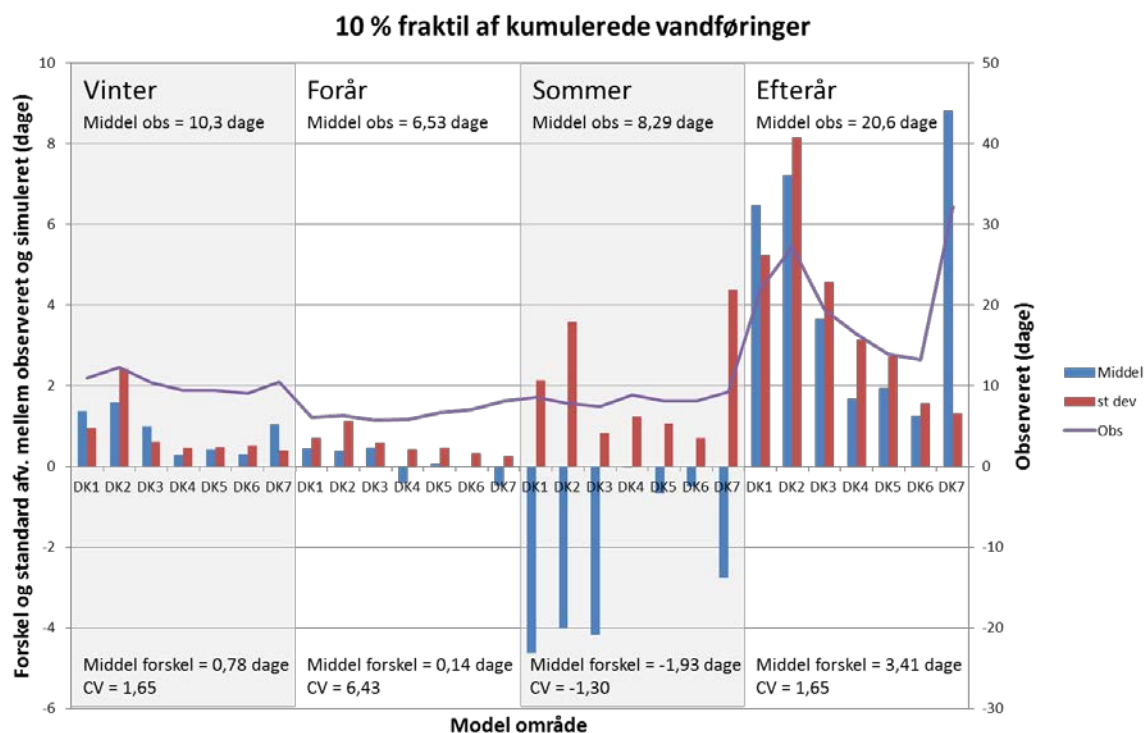


Figur 48. Boxplot af observerede (Obs) og simulerede (Sim) 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier. Øvre og nedre del af boksen er hhv. 1. og 3. kvartiler af data mens horisontale linjer angiver 95 % af data. Punkter angiver "outlier", der ligger udenfor 95 % af det samlede datasæt.

10 %, 50 % og 90 % fraktilerne for den kumulerede vandføring er vist på Figur 49 til Figur 51. Figurene viser forskellen mellem fraktilværdierne beregnet på baggrund af de observerede og simulerede vandføringer samt standardafvigelsen i forskellen opgjort på sæson

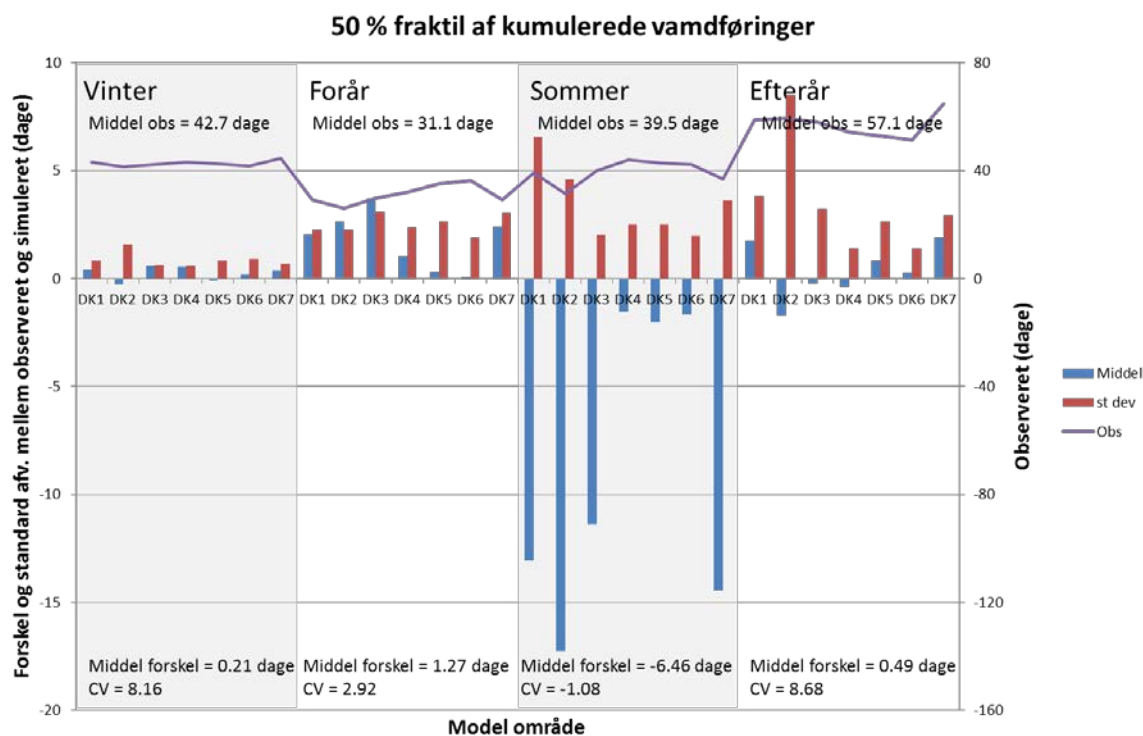
basis for hver af de syv delmodeller. Endvidere er de observerede fraktilværdier vist (højre y-akse) og middelfejl samt variationskoefficient for samtlige vandføringer angivet nederst i figuren for hver sæson.

Af Figur 49 fremgår det, at den observerede 10 % fraktilværdi ligger relativt konstant for vinter, forår og sommermånederne, mens efterårsmånederne har væsentlig højere fraktilværdier, der tillige varierer meget mellem de enkelte delmodeller. For sommermånederne er forskellen negativ for alle modelområder, dvs. i forhold til de observerede data går der længere tid i simuleringerne før 10 % af den samlede vandføring i sommermånederne er opnået. For de øvrige sæsoner forholder det sig omvendt, hvilket er specielt udtalt for efterårsmånederne.

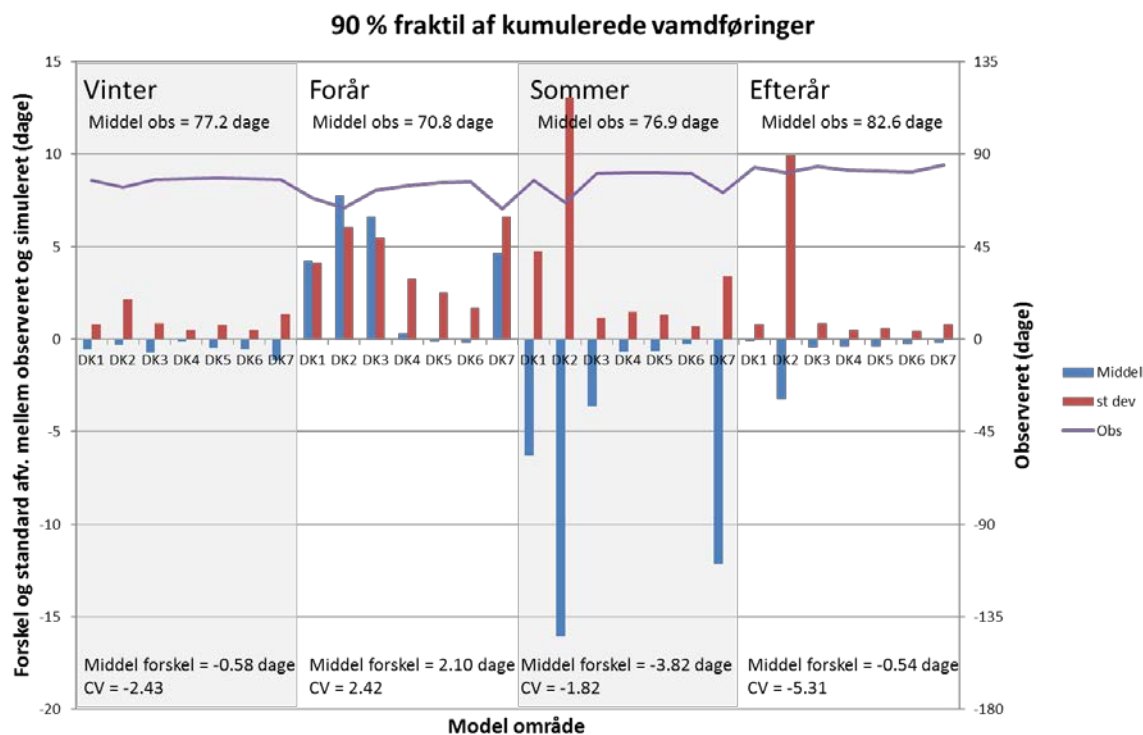


Figur 49. 10 % fraktil af kumulerede vandføringen samt forskel mellem de observerede og simulerede værdier.

For de observerede 50 % fraktilværdier, Figur 50, er der relativt små variationer mellem de enkelte oplande for alle fire perioder. Forskellen mellem de observerede og simulerede værdier er størst i sommermånederne, hvorimod fejlen for efterårsmånederne generelt er mindre end tilfældet var for 10 % fraktillerne, dette til trods for, at de observerede 50 % fraktiller naturligt er væsentligt større end 10 % fraktillerne (der går længere tid før 50 % af den samlede vandføring i perioden er opnået). Der er dog væsentlige forskelle mht. middelfejlen for efterårsperioden indenfor de enkelte delområder, hvilket ses af, at standardafvigelsen for alle delmodeller er større end middelfejlen, resulterende i en variationskoefficient for alle stationerne under et på 8,68.



Figur 50. 50 % fraktil af kumulerede vandføringen samt forskel mellem de observerede og simulerede værdier.



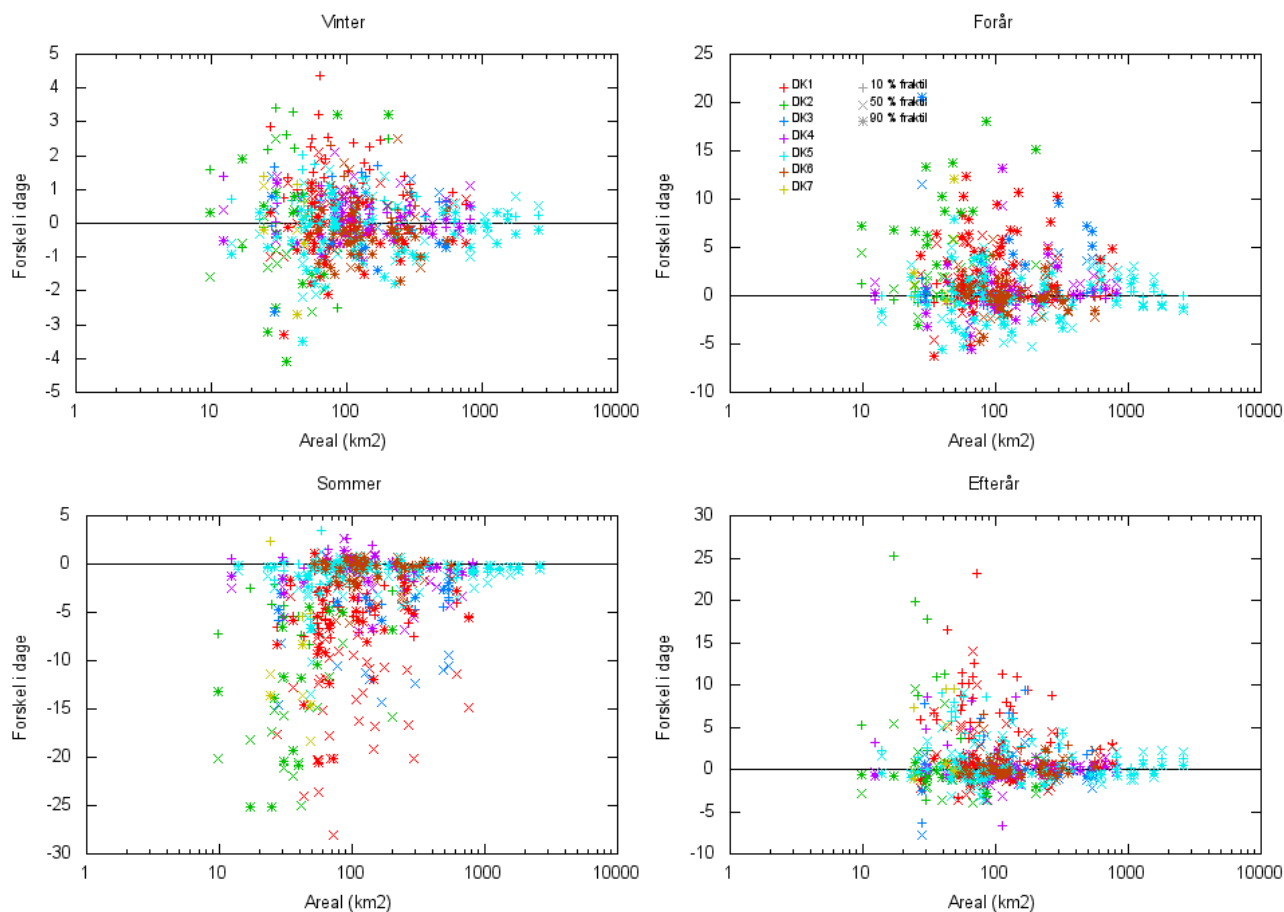
Figur 51. 90 % fraktil af kumulerede vandføringen samt forskel mellem de observerede og simulerede værdier.

Figur 51 viser 90 % fraktilerne for de kumulerede vandføringer. Fraktilværdierne beregnet for de observerede data ses at være en meget ens for delmodellerne, dog med nogen vari-

ation for DK2 og DK7 i forårs- og sommermånederne. Som for 50 % fraktileerne ses den største forskel mellem de observerede og simulerede værdier for sommermåned, hvilket er særlig udtalt for DK1, DK2, DK 3 og DK 7. Efterårsperioden har derimod den mindste forskel både når alle stationer betragtes under et samt for de enkelte delmodeller, med undtagelse af DK2 der har den mindste afvigelse i vinterperioden.

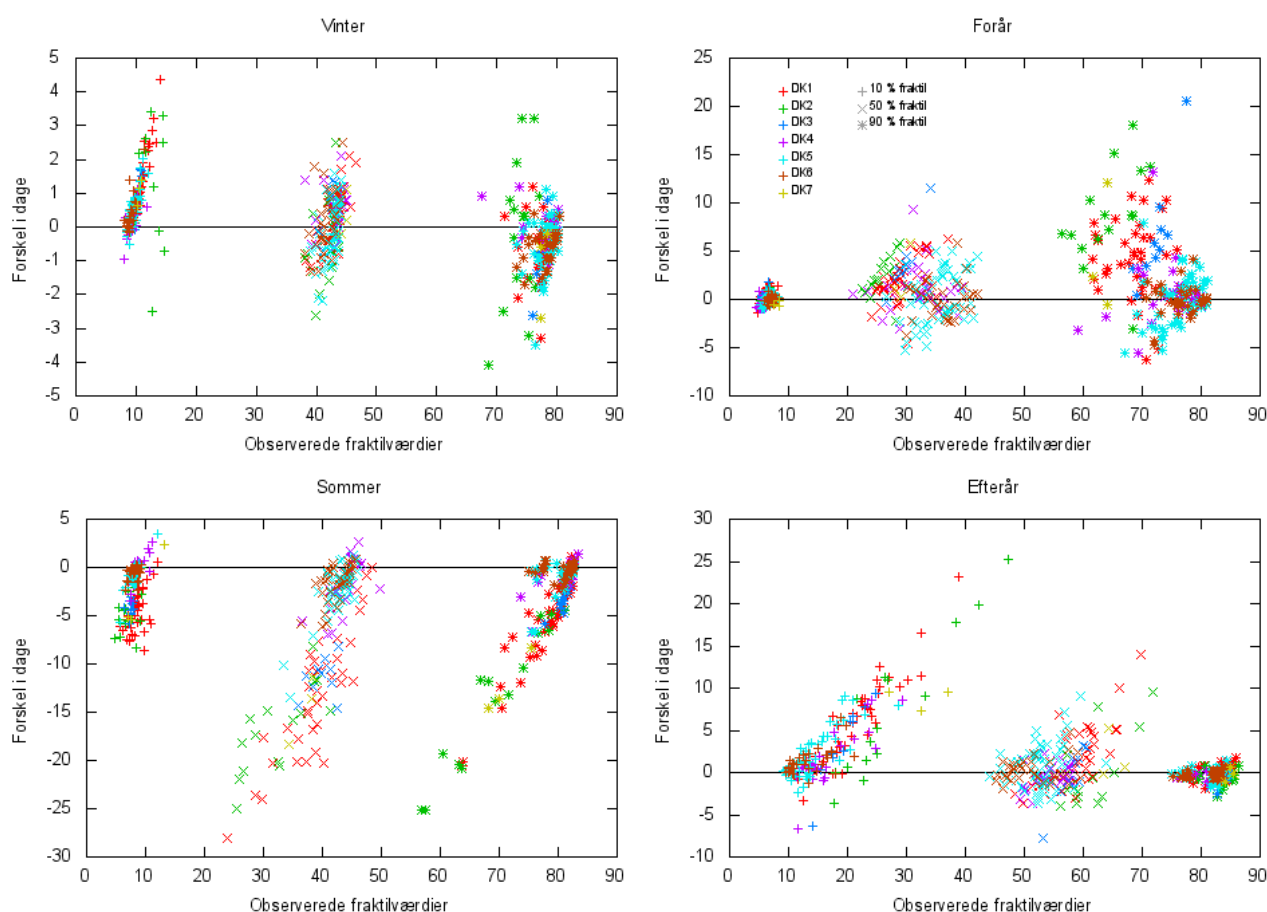
Betragtes 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdierne under et, kan det ses, at de jyske oplande (DK4, DK5 og DK6) generelt er de oplande hvor modellen performer bedst. Den overordnede timing mht. den samlede vandføring beskrives således generelt bedst for de jyske oplande. Figur 52 viser 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdierne for alle oplande som funktion af oplandsarealet, hvor det ses, at de største oplande har den mindste forskel for alle fire perioder. De største vandløbsoplande i Danmark er beliggende i Jylland, hvilket kan være en del af forklaringen til den gode overensstemmelse mellem observeret og simuleret timing for de jyske oplande. Figur 52 viser imidlertid, at også de mindre jyske oplande har relativt små afvigelser i forhold til de øvrige delmodeller.

Forskel i fraktilværdier for kumulerede vandføringer vs areal



Figur 52. 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier for alle stationer som funktions af oplandsareal.

Forskel i fraktilværdier for kumulerede vandføringer vs observerede værdier

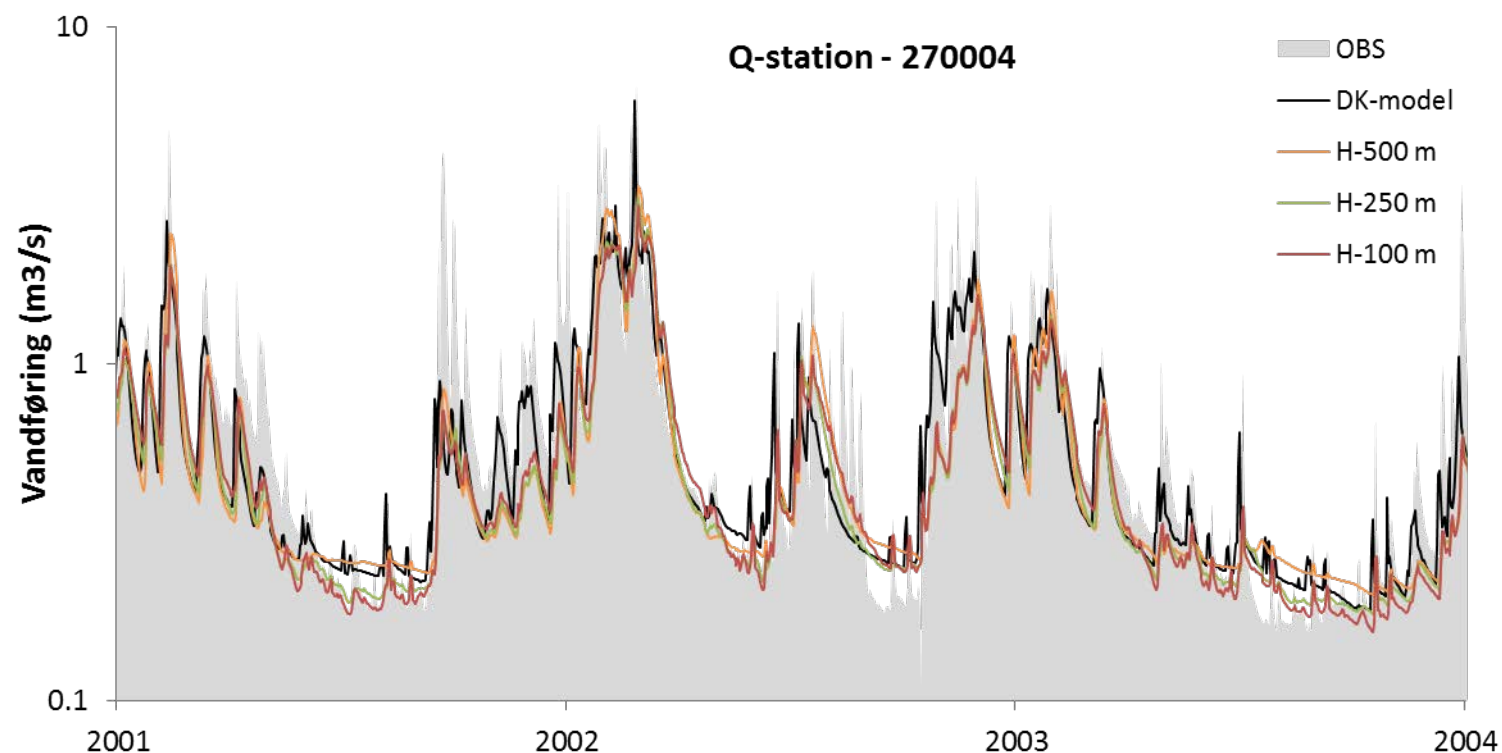


Figur 53. 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdier for kumulerede vandføringer for de fire sæsoner.

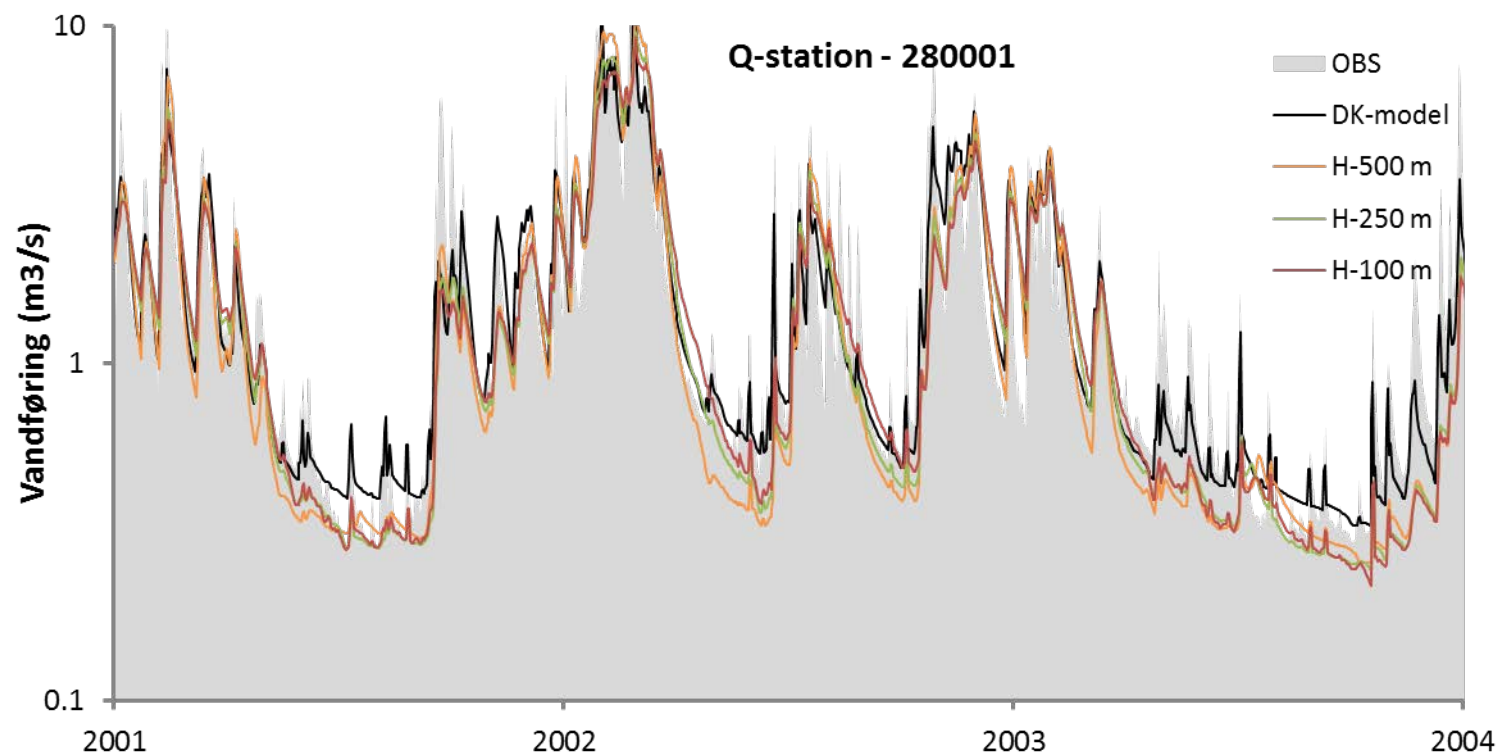
Figur 53 viser forskellene i 10 %, 50 % og 90 % fraktilværdierne som funktion af de observerede fraktilværdier. For vintermånederne er der en relativ lille variation i de observerede fraktilværdier, men nogen spredning mht. forskellen i de observerede og simulerede værdier. Der ses endvidere en systematik i data, med generelt positive forskelle i 10 % fraktilværdien og negative forskelle for 90 % fraktilerne mens 50 % fraktilerne ligger med både positive og negative forskelle. Samme systematik ses ikke for forårmånederne, hvor der for alle forskelle er såvel positive som negative værdier. De generelt negative forskelle for sommermånederne genkendes i figuren, og der er en tendens for 50 % og 90 % fraktilerne, hvor forskellen mellem de observerede og simulerede værdier bliver mere negativ ved faldende observerede fraktilværdier. De negative værdier betyder, at den kumulerede vandføring i simuleringerne er forsinket i forhold til observerede data. Trenden i Figur 53 betyder, at denne forskel forstærkes des hurtigere de kumulerede vandføringer opnås i vandløbene. Det er dog primært områderne DK1 og DK2 hvori trenden fremtræder. For efterårsperioden ses den modsatte trend for 10 % og 50 % fraktilerne, med en stigende positiv fejl ved stigende observerede fraktilværdier. Det stemmer overens med Figur 48, hvor det fremgår, at der er størst spredning i de observerede fraktilværdier, som generelt er højere end de simulerede. De simulerede vandføringer er således ikke i stand til at reproducere den store variation i de observerede fraktilværdier. I modsætning til sommerperioden ses trenden i 10 % og 50 % fraktilværdierne for efterårsperioden i alle syv delmodeller.

Appendiks B - Hydrografer

B.1 Hydrografer for varierende gridstørrelser

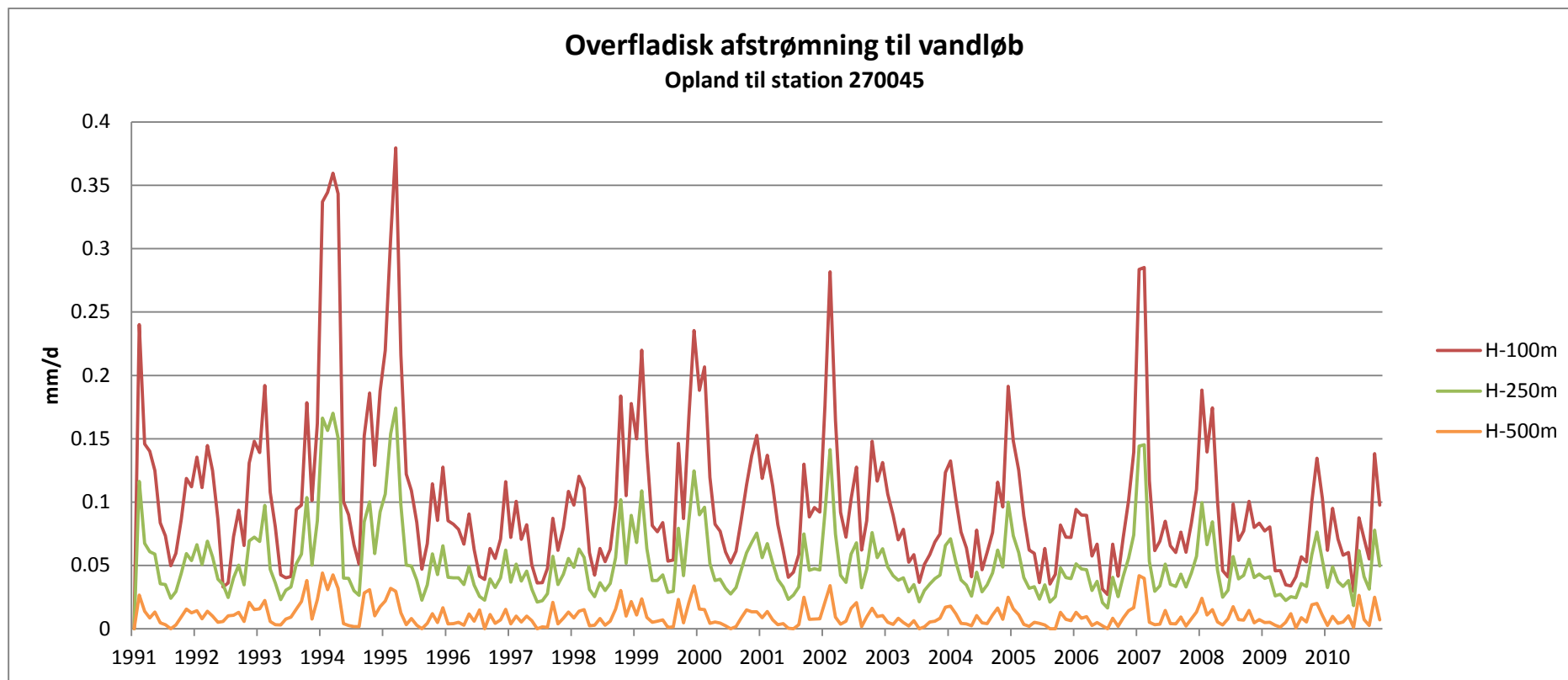


Figur 54. Simulerede vandføringer ved forskellige gridstørrelser sammenlignet med observeret data ved station 270004 i Lille Hansted Å, der er placeret i det nordlige område karakteriseret ved lerede jorde og stor topografisk variation.

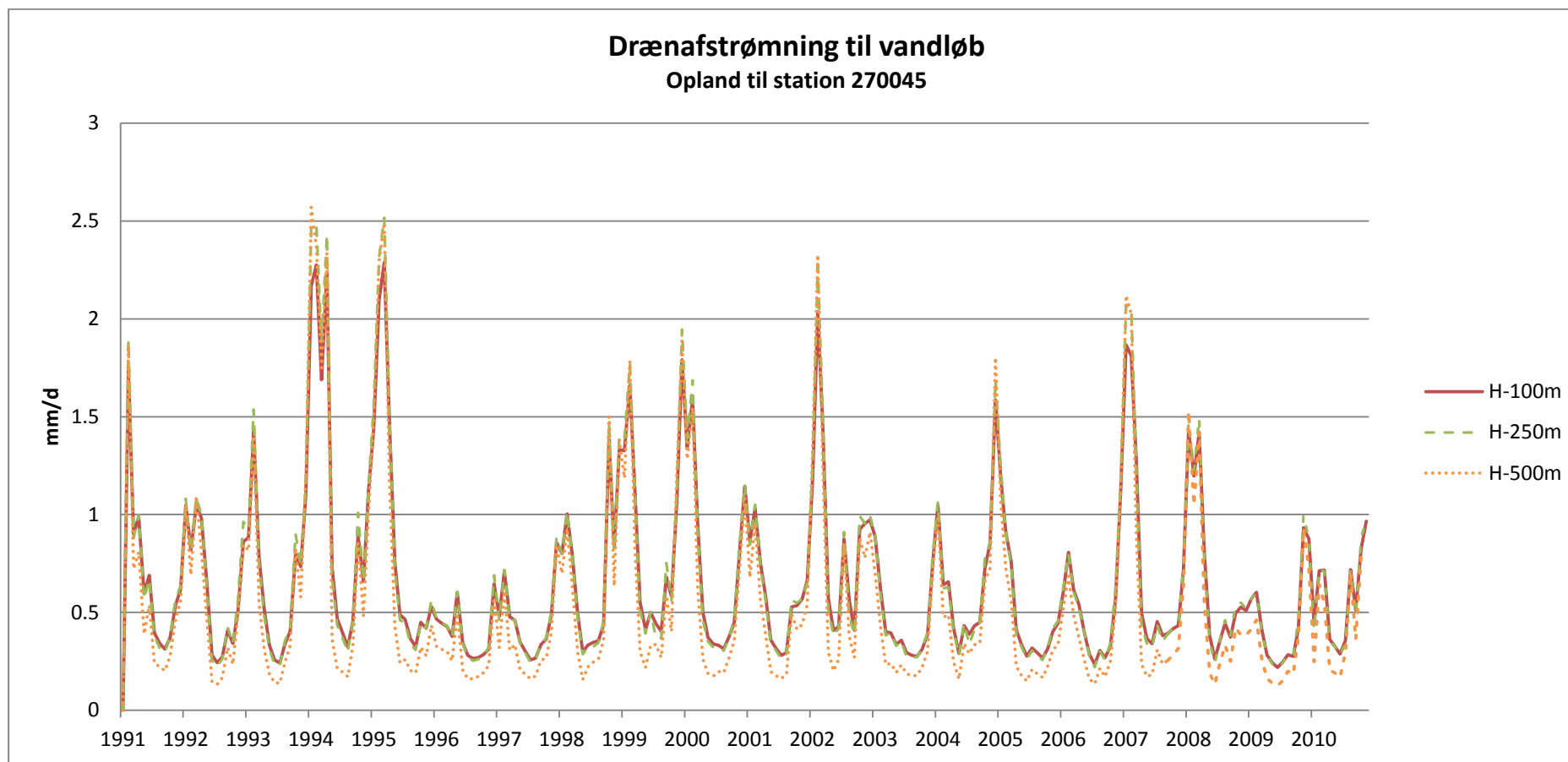


Figur 55. Simulerede vandføringer ved forskellige gridstørrelser sammenlignet med observeret data ved station 280001 i Bygholm Å, der er placeret i det sydlige område karakteriseret ved sandede jorde og lille topografisk variation.

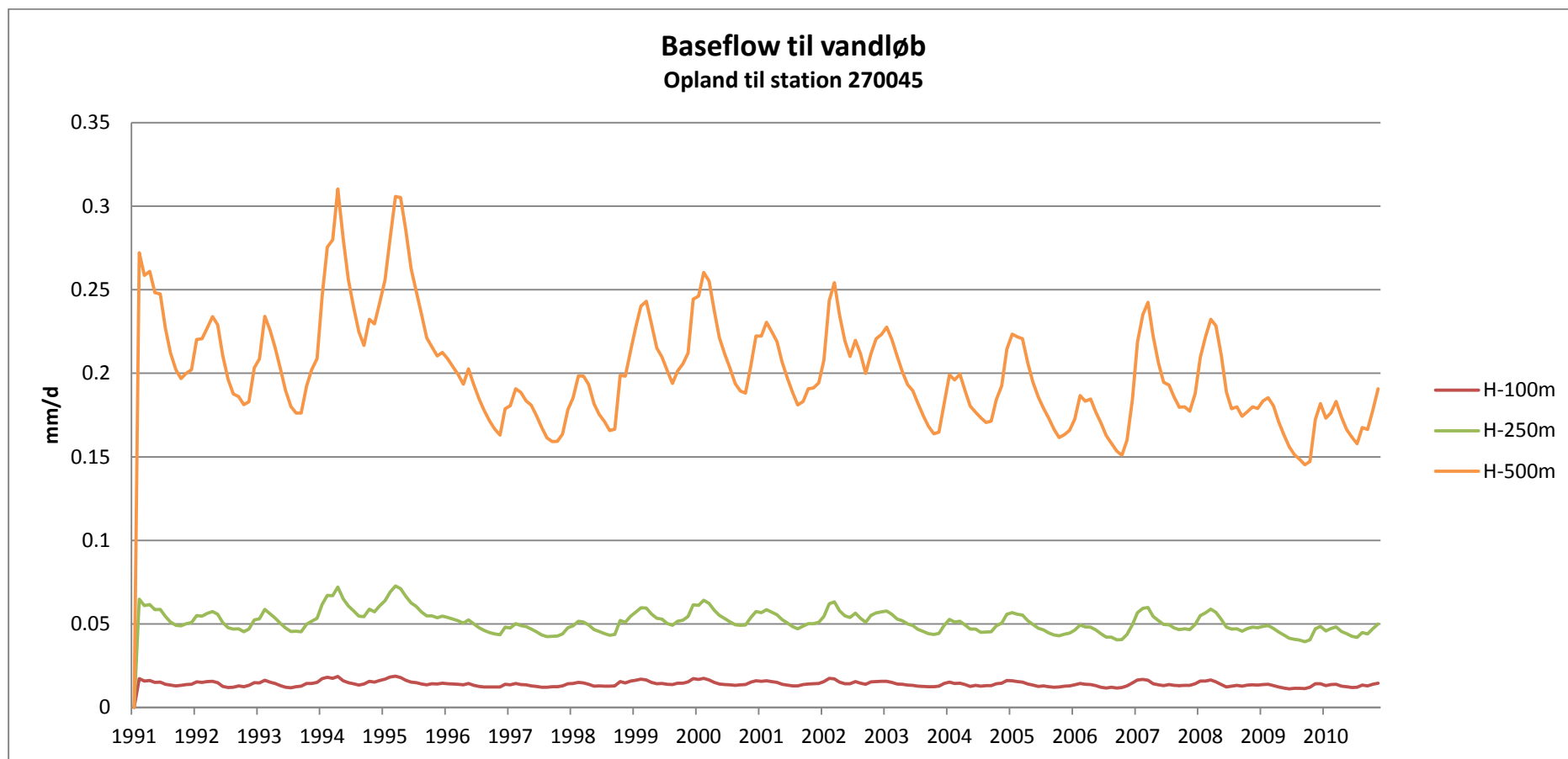
Appendiks C – Tidsserier for flow komponenter



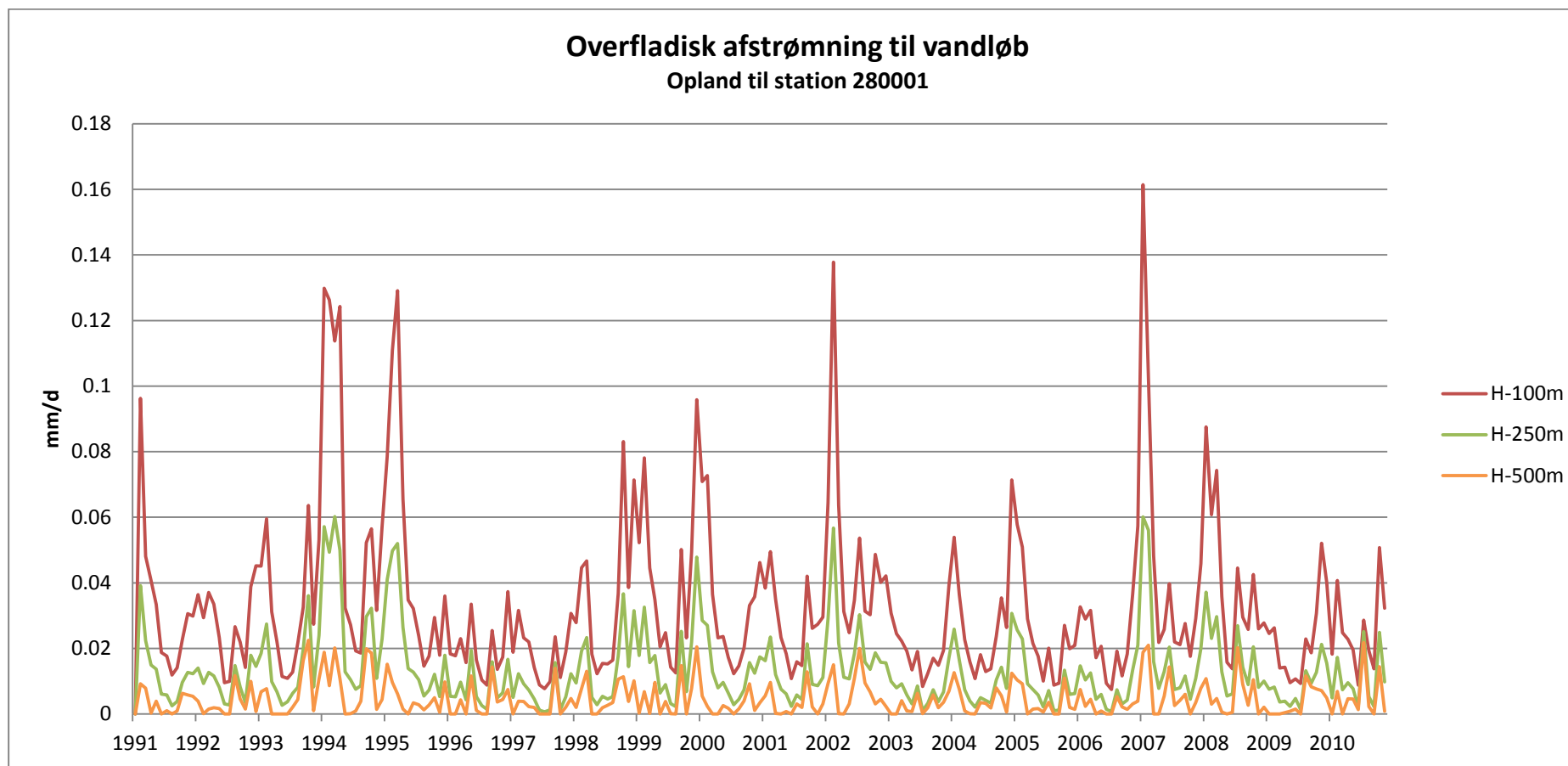
Figur 56. Overfladisk afstrømning til station 270045 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det nordlige område karakteriseret ved lerede jorde og stor topografisk variation.



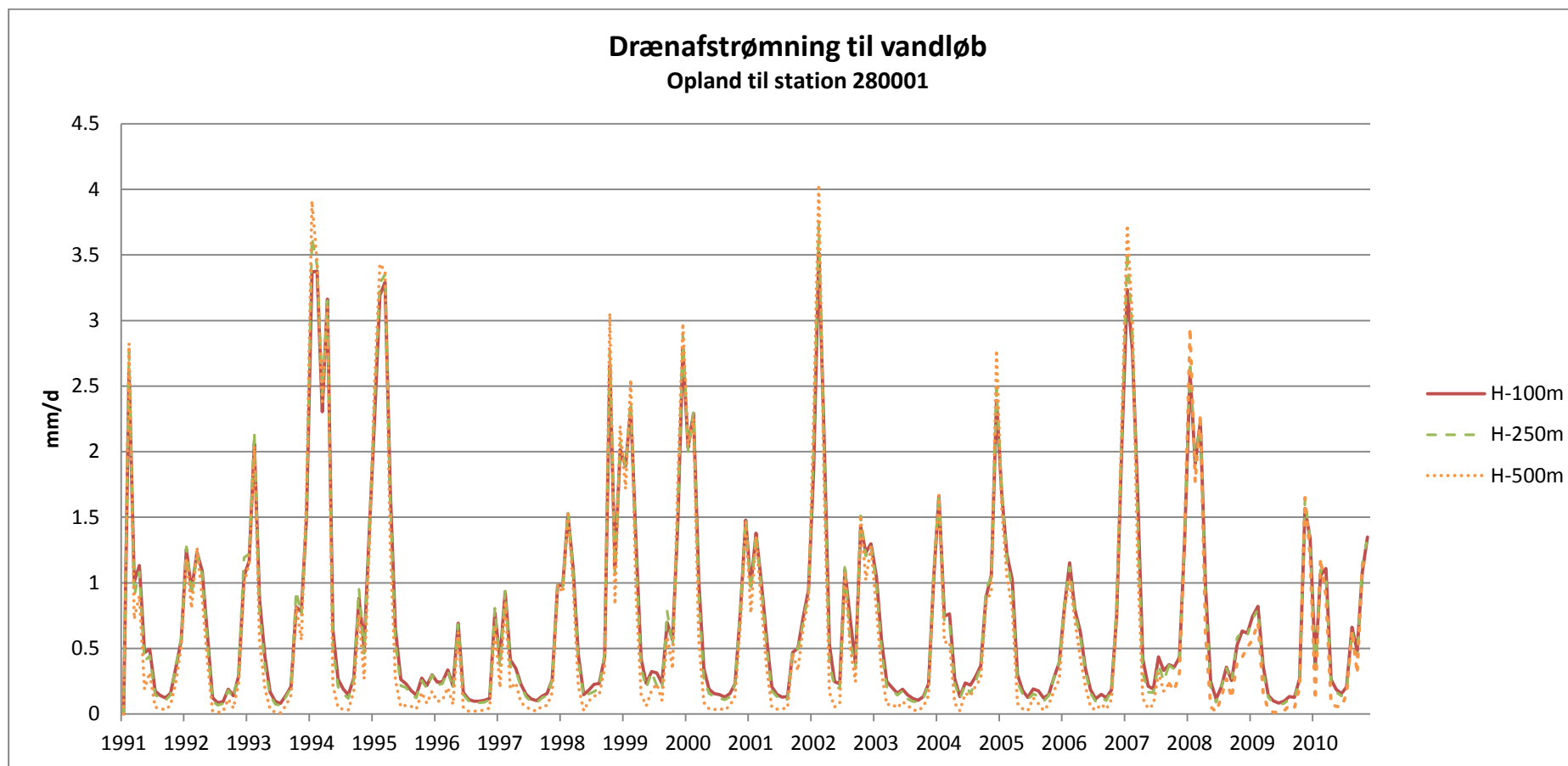
Figur 57. Drænastrømning til station 270045 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det nordlige område karakteriseret ved lerede jorde og stor topografisk variation.



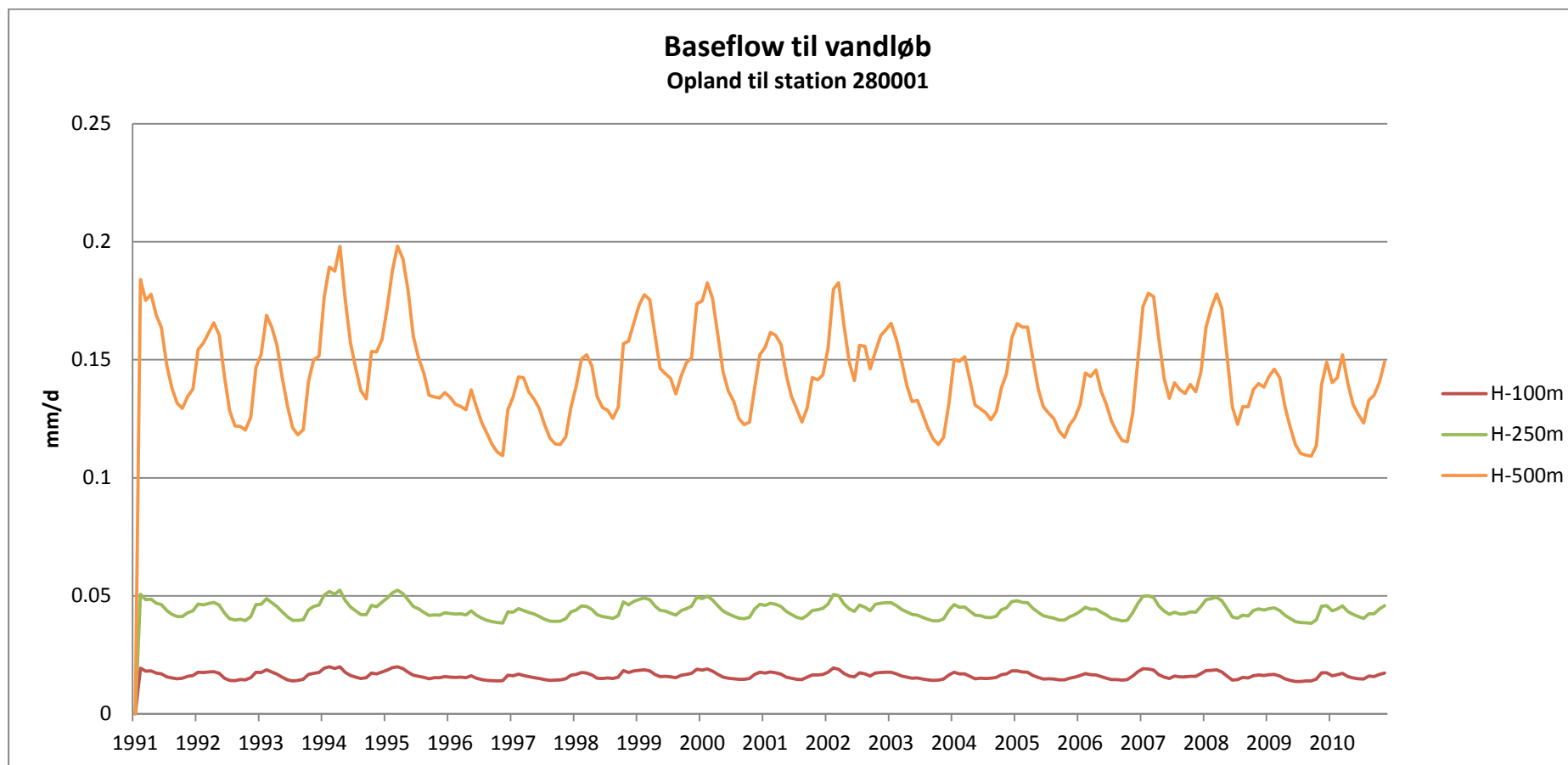
Figur 58. Baseflow til station 270045 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det nordlige område karakteriseret ved lerede jorde og stor topografisk variation.



Figur 59. Overfladisk afstrømning til station 280001 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det sydlige område karakteriseret ved sandede jorde og lille topografisk variation.

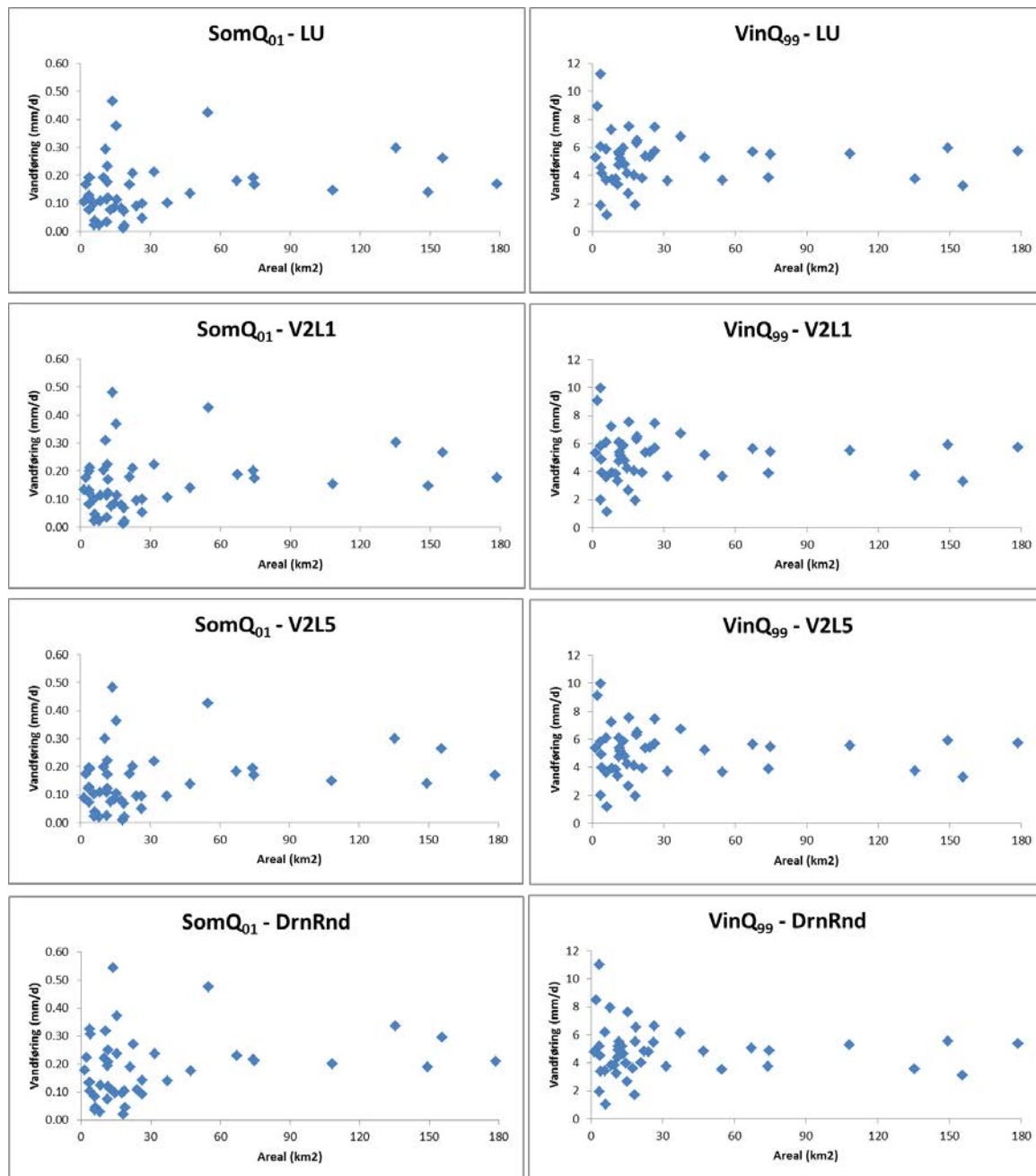


Figur 60. Drænastrømning til station 280001 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det sydlige område karakteriseret ved sandede jorde og lille topografisk variation.

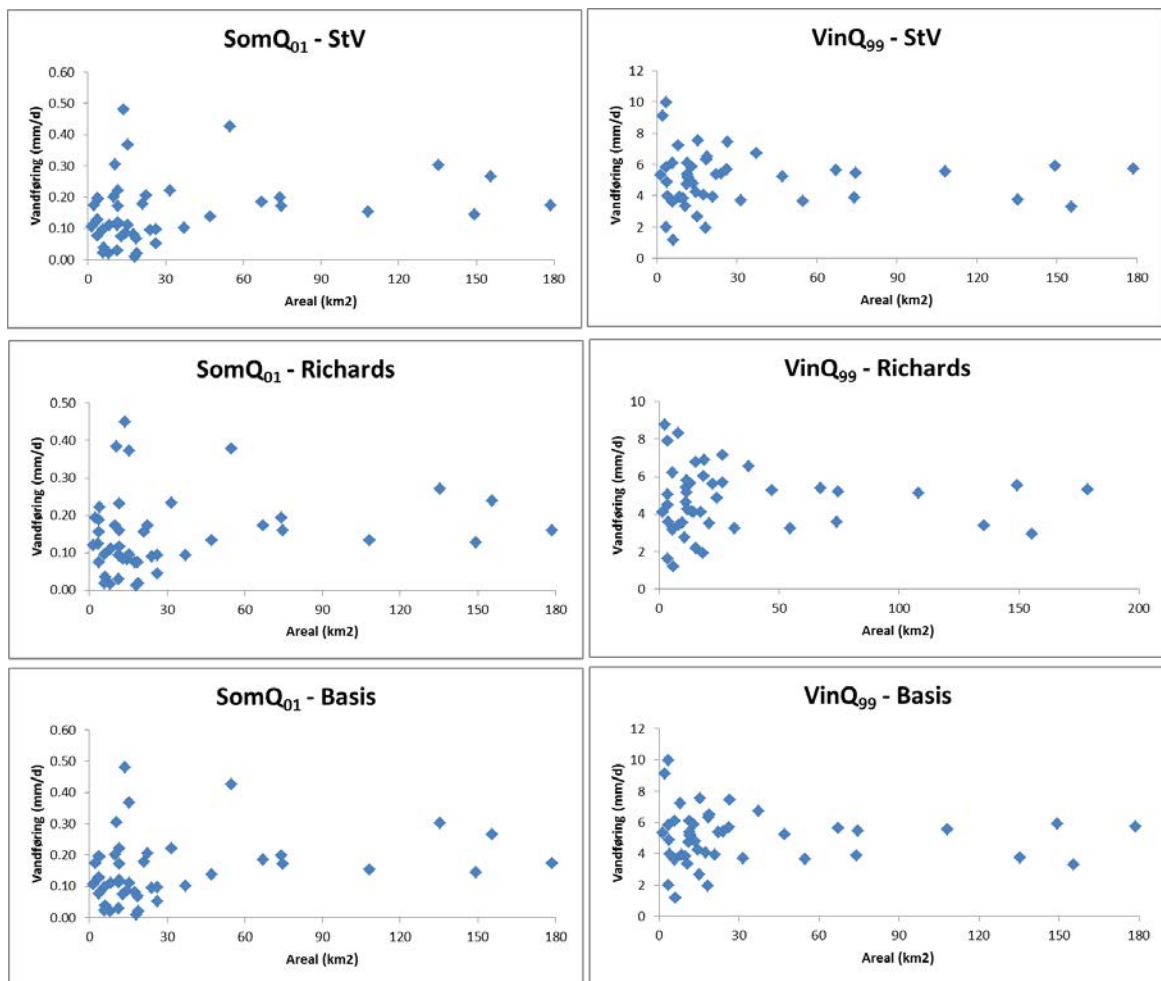


Figur 61. Drænaflow til station 280001 simuleret ved anvendelse af forskellige gridstørrelser. Stationen afdræner det sydlige område karakteriseret ved sandede jorde og lille topografisk variation.

Appendiks D - Simulerede minimums og maksimumsvandføringer



Figur 62. Simulerede minimums- og maksimumsvandføringer i de 45 oplande angivet som middel af de ti realisationer med alternative heterogenitetsbeskrivelser.



Figur 63. Simulerede minimums- og maksimumsvandføringer i de 45 deloplade for modellerne med alternative procesbeskrivelser samt *Basis* modellen.