

Kvantitativ tilstandsvurdering af grundvands- og overfladevandsindvinding fra Tissø

99% af vandindvindingen i Danmark er baseret på grundvand. En indvinding på ca. 3.5 mio. m³/år fra Tissø er dog en undtagelse. Kalundborgs industrier har brug for mere vand, og Kalundborg forsyning har søgt om en ny tilladelse på 7 mio. m³/år. Afløbet fra Tissø er reguleret ved et stemmeværk. En ny styring af stemmeværket diskuteres, men er øget indvinding og ændret stemmeværkstyring bæredygtig nu og i et fremtidigt klima?

Hans Jørgen Henriksen, Maria Ondracek, Lars Troldborg og Torben O. Sonnenborg, GEUS

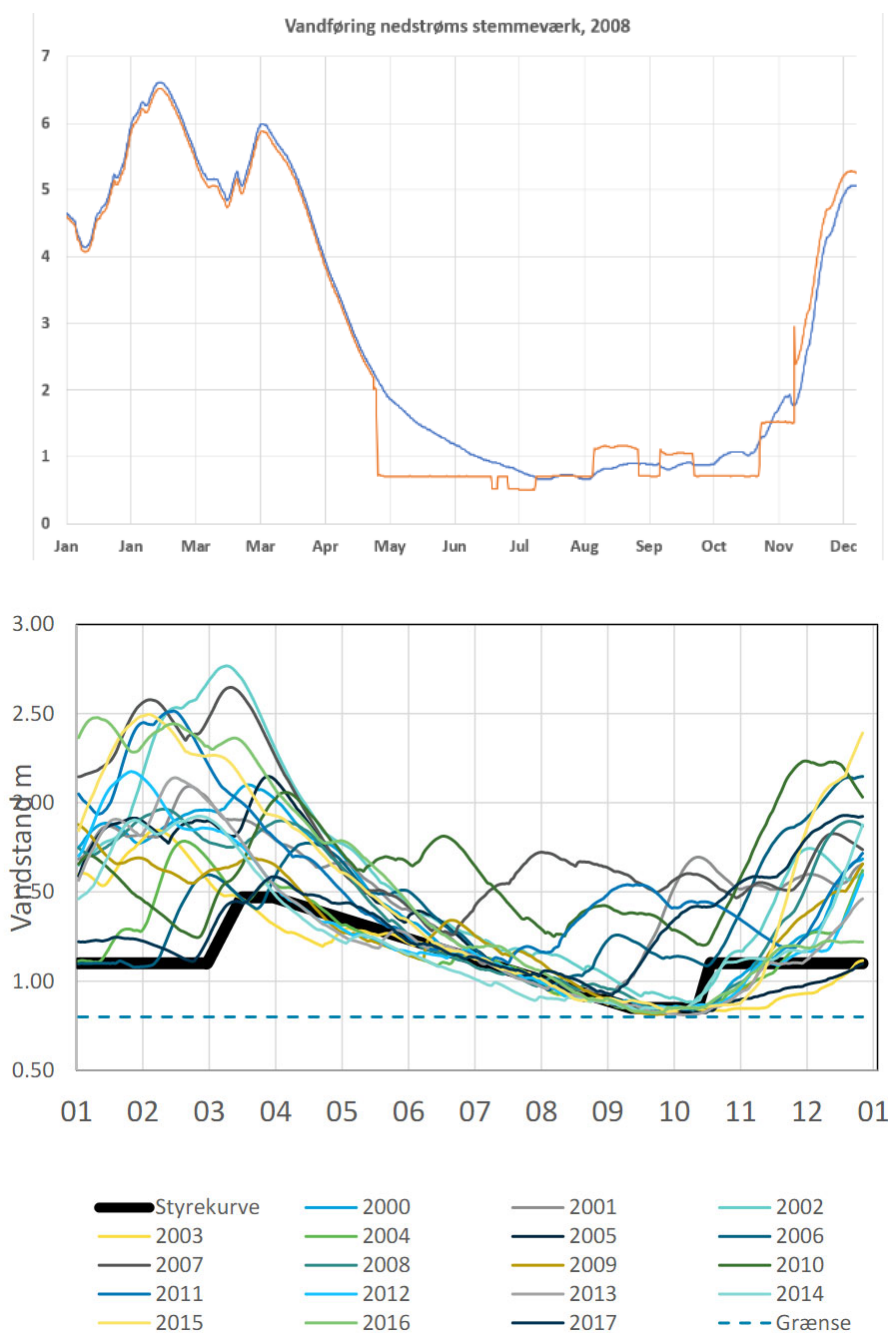
Indhold

Kvantitativ tilstandsvurdering af grundvandsforekomster omkring Tissø	3
Tidsserie analyse af påvirkning af fremtidig indvinding fra Tissø på afstrømningsregime i afløbet fra Tissø (Test 1).....	6
Analyse af ændring i afstrømningsregime og biologiske kvalitetselementer i Nedre Halleby å for fisk på basis af vandområdeplan metodik (Test 2)	8
Vurdering af klimaeffekter på afstrømningsregime og kvantitativ tilstand nedstrøms Tissø på grundlag af hydrodynamisk modelstudie og nye HIP data (Test 3).....	10
Vurdering af betydning af stemmeværk styring i et historisk perspektiv for 1990-2019 (Test 4)	12
Diskussion af betydning af stemmeværk, bæredygtig vandindvinding og klimatilpasning i forhold til fremtidig havstigning.....	13
Styring af stemmeværk.....	14
Udfordringer i forhold til vurdering af acceptabel risiko i forhold til god økologisk tilstand.....	15
Betydning af klimaeffekter på vandbalanceforhold og havstigning.....	16
Referencer	17

Kalundborg kommune har igangsat 'Projekt Tissø' i samarbejde med Kalundborg forsyning, hvor målet er at styre vandstanden i Tissø, så der nu og i fremtiden kan leveres overfladevand til industrien med høj forsyningssikkerhed. Interessenterne omkring Tissø har været aktivt involveret (Tissø Forum) for at sikre at reguleringen af vandstanden i Tissø forbliver bæredygtig. Der indvindes i dag ca. 3.5 mio. m³/år, der ønskes på længere sigt 7 mio. m³/år. Bredejere og landbrug ønsker dels at vandstanden i Tissø ikke overstiger kote 1,47 m, dels en lav grundvandsstand i sommerhalvåret i forhold til adgang på jorde. Sportsfiskerforbundet ønsker en minimumsvandføring i afløbet på mindst 0,5 m³/s, og mindst 0,7 – 1,5 m³/s i september-januar, hvor havørreden går op i systemet for at gyde. Roklubben ønsker at vandstanden i Tissø ikke overstiger 2,4 m af hensyn til klubhus/havnens huse. Hensyn til fugle kræver, at der er frie øer om sommeren (april – oktober), dvs. en maksimal vandstand på ca. 1,2-1,4 m og at øerne er oversvømmet i løbet af vinteren

(mindste 1,6 m i løbet af november-marts). Endelig ønskes en variation i vandstanden i søen, som ligner den nuværende af hensyn til botaniske forhold.

Stemmeværket styres efter en styrekurve med et styreniveau på 1,10 m fra midt oktober til 1. marts. I første halvdel af marts hæves styreniveau gradvist til 1,50 m, hvor det holdes til 1. april, hvorefter det gradvist sænkes hen over sommeren og frem til begyndelsen af september til minimumsniveauet 0,80 m. Herefter øges styreniveauet til 1,0 m. DHI har modelleret betydning af styring af stemmeværk for vandstanden i søen for udvalgte år på basis af modelberegninger /7,8/, se Figur 1.



Figur 1 Effekt af styreniveau på modelleret vandføring nedstrøms Tisø for 2008 baseret på ny styremodel 2 incl. klimaændring (rød kurve) sammenlignet med vandføring uden stemmeværk (blå kurve). Nederst er vist modelleret styreniveau og vandspejlsvariation i Tisø 2000-2017 /8/.

DHI's beregninger for udvalgte år f.eks. 2008 har vist (figur 1), at stemmeværket ikke har stor indflydelse på de høje vandstande, men stor betydning på specielt de lave vandføringer nedenfor søen. Den nye styremodel vil i relativt tørre år bevirke, at når vandstanden i Tissø kommer under styrekurven f.eks. slut april i 2008 vil det medføre et markant fald i vandføringen i Nedre Halleby å nedstrøms søen i forhold til et afløb uden regulering. Vandføringen vil her komme ned på 0,7 m³/s (eller derunder), og først stige igen når vandstanden igen kommer over styrekurven (på figur 1 sker det i perioder i august-september).

Vandføringen i Nedre Halleby å (afløbet fra Tissø) er kritisk for vandsystemets økologi, hvor det naturlige dyre-, fiske- og planteliv er afhængig af relativt naturlige, konstante forhold, og derfor har der i mange år været begrænsninger på, hvordan vandindvinding må påvirke vandløbenes vandføring.

I en ny ansøgning om vandindvinding fra Tissø er der taget udgangspunkt i en ny styring af stemmeværket (styring 2) der reducerer middel-vandstanden fra april – september med 6 cm. Det vil med en fremtidig indvinding på 5 mio. m³/år jf. DHI's beregninger /7/ betyde, at indvindingen i 2,4 % af tiden (eller 7-8 dage om året) ikke er mulig (mod 0 % af tiden i dag).

For bredejere/landbrug betyder det nye styreniveau at vandstanden vil være over 1,47 m i 41% af tiden (mod 43 % i dag, middelvandspejl april – september vil hæves fra 1,28m til 1,33 m). For økosystem og ørred vil minimumsvandføringen på 0,5 m³/s, der i dag er underskredet 11 % af tiden (ca. 40 dage om året), med fremtidig indvinding og styring være underskredet 0 % af tiden.

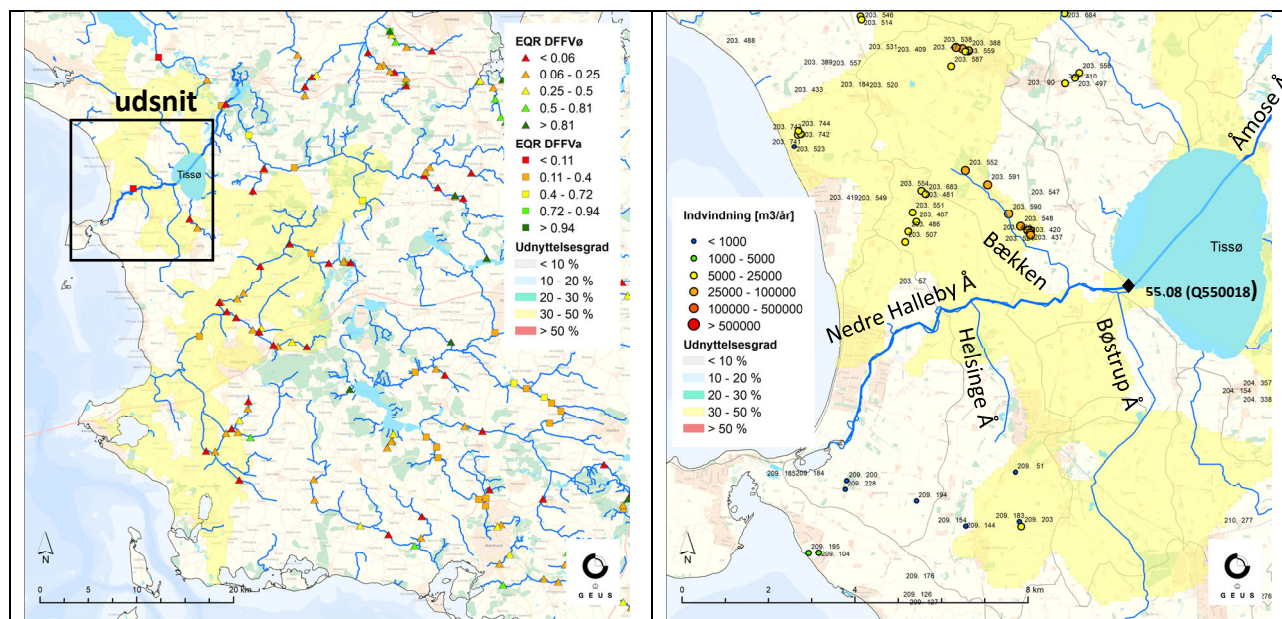
I september-januar, hvor havørreden trækker op, vil ønsket om 0,7 m³/s være underskredet 2 % af tiden (mod 17 % i dag). Endelig vil ønsket om 1,5 m³/s, der i dag er underskredet 35 % af tiden, med ny styring og indvinding på 5 mio. m³/s kun være underskredet 18% af tiden (mod 35 % nu).

GEUS er af Kalundborg vandforsyning blevet bedt om et review af modelberegninger udført af DHI, og i den forbindelse er der foretaget fire supplerende tests og analyser i forhold til den kvantitative tilstand:

1. Simpel tidsserie-analyse af påvirkning af afstrømningsregimet nedstrøms Tissø
2. Analyse af ændring af biologiske kvalitetselementer og afstrømningsregime på basis af vandområdeplan- metodik anvendt i forbindelse med kvantitativ tilstandsvurdering
3. Vurdering af klimaeffekter på afstrømningsregime op- og nedstrøms Tissø på baggrund af nye HIP data og eksisterende studier
4. Simpel tidsserie-analyse for to vandføringsstationer for 1990-2019 af betydning af stemmeværk

Kvantitativ tilstandsvurdering af grundvandsforekomster omkring Tissø

I figur 2 er vist et oversigtskort af Tissø, grundvandsforekomst dkms_3010_ks (gul markering, regional/dybere forekomst ks3-ks4), vandløbssystem, målte biologiske kvalitetselementer for fisk (DFFVa) og ørreder (DFFVø). Da udnyttelsesgraden af dkms_3010_ks overstiger 30% [1], er den en af 25 største forekomster, hvor der er gennemført en fuld ekspertvurdering i forbindelse med kvantitativ tilstandsvurdering.



Figur 2 Oversigtskort med grundvandsforekomst dkms_3010_ks (ks3-ks4 gul signatur), målt DFFVa og DFFVø anvendt i kvantitativ tilstandsvurdering [1] samt udsnit med grundvandsindvindinger. Målestation 55.08 er placeret i afløbet af Tissø med stemmeværk og omløbsstryg. Stationen er placeret opstrøms udløbet fra Bøstrup å/1,2/.

Som en del af den kvantitative tilstandsvurdering er der beregnet en udnyttelsesgrad på 44 % for dkms_3010_ks (der indvindes for 2011-2017 i alt 4,1 mio. m³/år fra forekomsten). Vandløbspåvirkningen har samlet set max 20% sandsynlighed for reduceret tilstand med en klasse for fisk (DFFVa).

Beregningen er foretaget uden inddragelse af indvindingen fra Tissø [2]. Det skal understreges, at der er andre grundvandsforekomster i området dog ingen med udnyttelsesgrad \geq 30%. Fra Halleby å og med udstrækning sydpå findes et dybereliggende magasin, dkms_3621_kalk (med udnyttelsesgrad på 25 %). Den terrænnære grundvandsforekomst, dkms_3634_ks, som er placeret i ks2 og udstrækker sig i hele området (og overlap med Tissø) har en udnyttelsesgrad på 5 %. Endelig er der terrænnære magasiner placeret i ks1 i området, dog med begrænset udnyttelsesgrad omkring 1 % (figur 2).

Indvindinger vist på udsnittet i fig.2 omkring Tissø/Nedre Halleby å er fra samtlige forekomster. Median-afsænkning for dkms_3010_ks er 1-3 m i gennemsnit (helt mod nordøst 3-6 m). Der er tale om et kvartært magasin, der dybdemæssigt er udbredt i kvartært sandlag ks3 og ks4, og i den dybere del indeholder Kertemindemergel. Længere mod syd findes saltholdige lerflager/randmoræne.

Mod nord i området omkring Tissø ses tegn på opferskning (ionbytning), mens der mod syd observeres stigende saltholdighed og tegn på saltvandsind- eller oprægning. Et enkelt indtag nordvest for Tissø har forhøjet kloridniveau (125-250 mg/l). Desuden er der i et par indtag fundet koncentrationer i intervallet 75-150 mg/l. Sulfatværdier er generelt lave (ikke væsentligt forhøjede, en enkelt måling ligger i intervallet 75-150 mg/l), se /1/:Appendix 1 side 113-116. I området indenfor få km's afstand fra Tissø er afsænkninger som følge af vandindvinding mindre end 1 m. Kalundborg kommune har i øvrigt påpeget usikkerheder med afgrænsningen af forekomster (mener de er opdelt), og genkender ikke den høje udnyttelsesgrad (er uforstående overfor en ringe kvantitativ tilstand). Forekomst dkms_3010_ks blev ved ekspertvurderingen konkluderet at være i god tilstand (med stor sikkerhed).

Påvirkningen for fisk i vandløbene (DFFVa EQR) viser at der mindre end 20 % sandsynlighed for en tilstandsændring. Påvirkningen af minimums- og medianafstrømning (Q95 og Q50) ved ID15 punkter er typisk i intervallet 10-25%'s reduktion [1,2] ved nuværende grundvandsindvinding i forhold til nulindvinding (på basis af perioden 2011-2017).

I kvantitativ tilstandsvurdering benyttes empiriske formler som sammenfattet i BOKS 1.

BOKS 1 Beregning af EQR-ændringer i forbindelse med Vandområdeplaner /1,4,5/

Analysen baseres i VP3 på perioden 2011-2017, hvor de empiriske formler opstillet af DCE for beregning af vandløbspåvirkning og EQR ændring for fisk (DFFVa) og smådyr (DVFI) [4, 5]. DVPI indgår ikke i VP3 pga. relativ stor usikkerhed på modelberegning af Dur3.

Gældende DCE formler (Graeber et al., 2014)

Observerede vandføringer:

$$\text{DVFI} = 0.020 * \text{Fre1} * \text{Q90S} + 0.103 * \text{Sin} + 0.217 \quad (\text{NSE} = 0.44; n=122)$$

$$\text{DFFVa} = 0.811 * \text{BFI} + 0.058 * \text{Sin} + 0.050 * \text{Fre}_{25} - 0.0413 * \text{Fre}_{75} - 0.319 \quad (\text{NSE} = 0.49; n= 61)$$

$$\text{DVPI} = 0.020 * \text{Fre}_{25} - 0.025 * \text{Fre}_{75} - 0.0019 * \text{Dur}_3 \quad (\text{NSE} = 0.34; n= 91)$$

Tilstand	DVFI	DVPI	DFFVa
Høj tilstand	> 1,00	> 0,70	> 0,94
God tilstand	0,71 – 1,00	0,50 – 0,70	0,72 – 0,94
Moderat	0,57 – 0,71	0,35 – 0,50	0,40 -0,72
Ringe	0,43 – 0,57	0,20 – 0,35	0,11 – 0,40
Dårlig	< 0,43	< 0,20	< 0,11

hvor

SIN: Sinusitet (angiver ved en klasse fra 1 til 4 slyngningsgraden, hvor 1 er kanal og 4 meandrerende)

BFI: Baseflow indeks (forudsigelighed, eller andel af baseflow ud af samlet flow)

Fre1: Antal hændelser pr. år der overskrider Q50

Fre25: Antal hændelser pr. år der overstiger Q25

Fre75: Antal hændelser pr. år der underskrider Q75

Q90S: = Q90/Q50

Dur3: Varighed af vandføringshændelser der overskrider 3 gange Q50

Q95, Q90, Q75, Q50, Q25, Q10, Q01 m.fl. er overskridelsespercentiler (m³/s)

Den målte tilstand jf. DFFVa svarer til dårlig tilstand i Nedre Halleby å (målt DFFVa EQR værdi = 0,02 jf. [3]). I Åmosen opstrøms Tissø er tilstanden en tilstandsklasse bedre, dvs. svarende til ringe tilstand (målt EQR = ca. 0,40). Her er morfologisk indeks væsentlig bedre (Dansk Fysisk Indeks - DFI EQR = 0,76). I flere tilløb er

der målt meget dårlig tilstand for ørred (DFFVø), se også DTU Aqua's ørredkort (fiskepleje.dk), hvor der er målt dårlig tilstand i Bækken, Helsingø og Bøstrup å. Miljømål for Nedre Halleby å er af Miljøstyrelsen fastsat til god økologisk tilstand (VP3). Tilstanden er samlet set vurderet som dårlig. Ved lokaliteten, hvor der er målt DFFVa på EQR = 0,02 i Nedre Halleby å [3], foreligger der måling af EQR for Dansk Fysisk Indeks på 0,13, og for makrofytter på 0,29 (DVPI).

Det fremgår dermed af målinger, at tilstanden i forhold til fisk i Nedre Halleby å er "dårlig", mens den er "ringe" opstrøms Tissø. Spørgsmålet er i den sammenhæng, om det er indvindingen fra Tissø på 3,5 mio. m³/år, styringen af stemmeværket eller andre forhold der er hovedårsagen til den dårlige tilstand nedstrøms Tissø? For at belyse det spørgsmål laves i første omgang en simpel analyse af betydning af vandindvindingen i dag og ved en fremtidig øget vandindvinding fra Tissø på 7 mio. m³/år. I denne simple vurdering antages en magasineringseffekt i Tissø svarende til styring af stemmeværket som i dag.

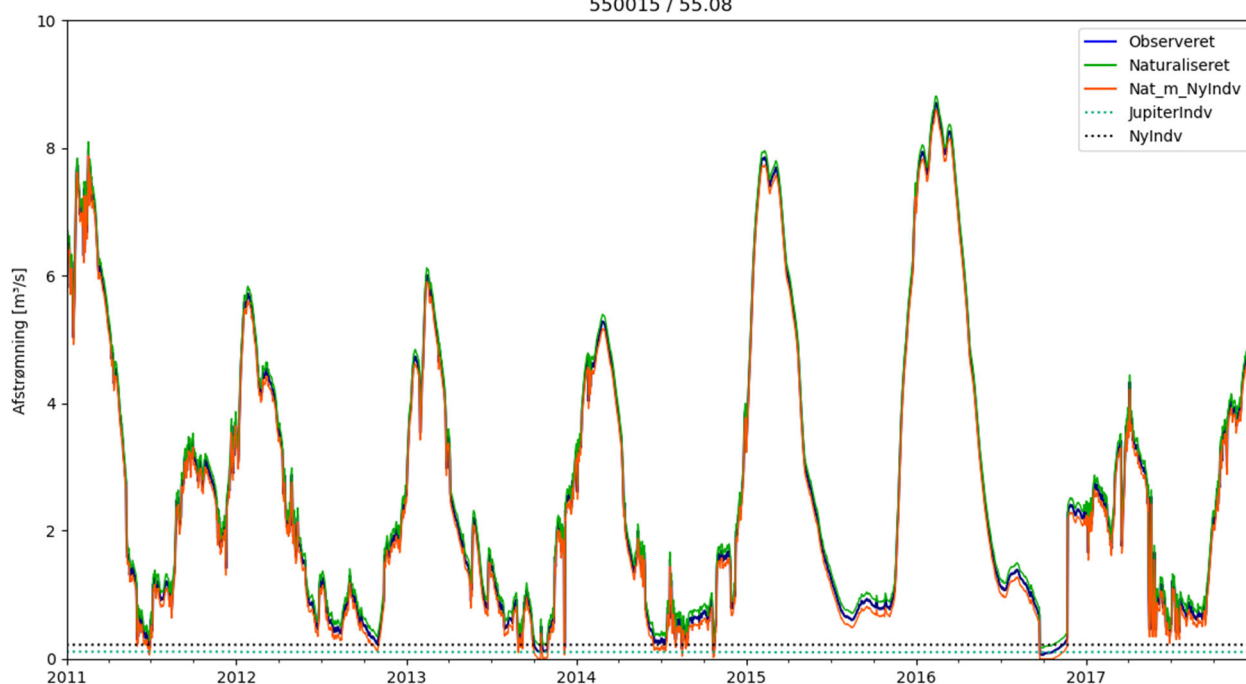
Tissø er med et areal på 12,3 km² den fjerdestørste sø i Danmark. Det topografiske opland er på 418 km², beregnet for afløbet i søens syd-ende (St. 55.08). Langt den overvejende tilstrømning til Tissø sker dog gennem Øvre Åmose Å, til søens nord-ende. Oplandet udgør her 85 % af søens samlede opland svarende til 347 km². På grund af Tissøs betydelige areal vil en indvinding af vand fra Kalundborg Forsynings anlæg på vestsiden af søen på 7 mio. m³/år ~ 220 l/s, svare til en vandstandssænkning på mindre end 2 mm pr. døgn (eller ca. 5 cm pr. måned). Stemmeværket og sænkning af styreniveauet hen over sommeren er dermed med til at garantere en øget forsyningssikkerhed (søen vandspejl må ikke sænkes under kote 80cm).

Tidsserie analyse af påvirkning af fremtidig indvinding fra Tissø på afstrømningsregiment i afløbet fra Tissø (Test 1)

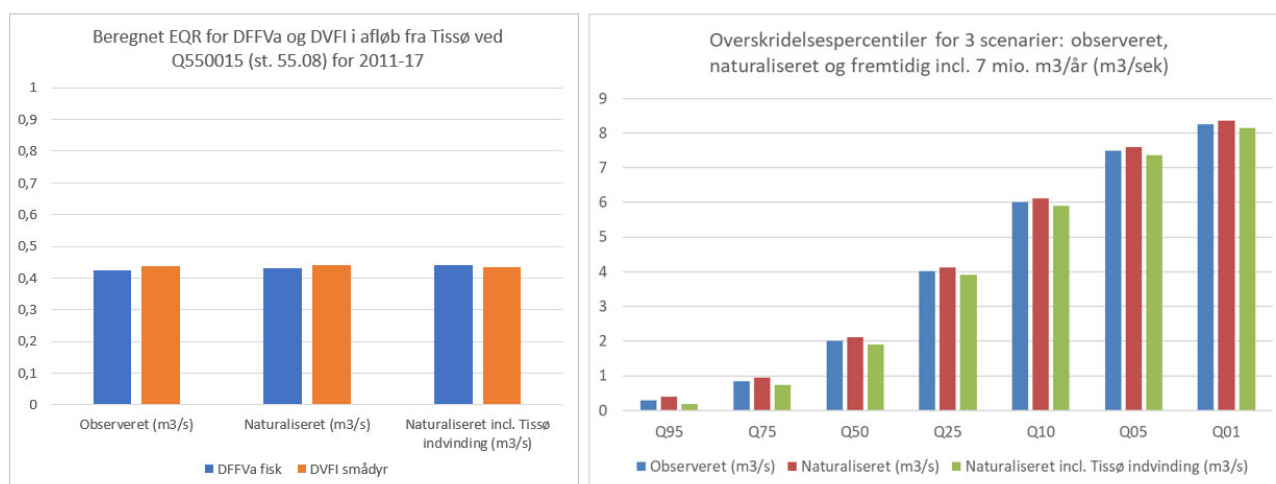
I den simple tidsserie analyse er der på basis af observeret daglig vandføring (den midterste blå kurve på figur 3) fratrukket indrapporteret vandindvinding fra Tissø hvert år, som i gennemsnit løber op i 3,5 mio. m³/år – vist med stiplede grønne strege. Herved beregnes 'naturaliseret' flow, dvs. en vandføring, hvor indvindingen er fratrukket den målte tidsserie for indvinding. Efterfølgende er beregnet en fremtidig vandføring, hvor der er fratrukket 7 mio m³/år (den nederste røde kurve). Indvindinger er vist med stiplede sorte linjer nederst på figur 3.

Resultater af beregning for udløb fra Tissø er vist i Figur 4. Den beregnede værdi for DFFVa er i god overensstemmelse med den målte EQR DFFVa i Åmose opstrøms Tissø. Det fremgår af beregningen, at EQR værdier ikke er væsentligt negativt påvirkede af vandindvindingen fra Tissø. Der ses en meget begrænset reduktion af DFFVa under 20 % sandsynlighed for negativ tilstandsændring. Da DFFVa-indikatoren primært siger noget om afstrømningsregimet i almindelighed, altså f.eks. hvor mange hændelser der er over Q25 i en tidsperiode, hvor mange hændelser der kommer under Q75 og forudsigelighed (Base flow index), giver den simple analyse ikke mulighed for at vurdere betydningen af ændret styring af stemmeværket nedstrøms Tissø. Den giver heller ikke mulighed for at vurdere forholdene for den samlede strækning nedstrøms Tissø, eller betydning af grundvandsindvindinger eller ændrede vandbalanceforhold f.eks. i et fremtidigt klima.

550015 / 55.08



Figur 3. Observeret vandføring for 2011-2017 nedstrøms Tissø (55.08) blå kurve. Beregnet hydrograf for hhv. naturaliseret flow (excl. Indvinding fra Tissø) grøn kurve, samt fremtidig vandindvinding på 7 mio. m³/år (Rød kurve).



Q550015	Min	Max	Middel	DFFVa EQR	DVFI EQR	Q95	Q90	Q75	Q50	Q25	Q10	Q05	Q01	Q001	Median	Min	BFI	DUR3	FRE25	FRE75
Observeret (m3/s)	0,07	8,71	2,66	0,42	0,44	0,29	0,49	0,84	2,00	4,01	6,01	7,48	8,25	8,69	0,17	0,95	42,83	1,43	5,29	
Naturaliseret (m3/s)	0,17	8,82	2,77	0,43	0,44	0,40	0,60	0,95	2,12	4,13	6,12	7,59	8,36	8,80	0,29	0,95	58,25	1,43	5,14	
Naturaliseret+Tissø indvinding (m3/s)	0,00	8,60	2,54	0,44	0,44	0,18	0,38	0,73	1,89	3,91	5,90	7,36	8,14	8,57	0,06	0,96	57,20	1,43	5,14	
Differens (%)	-100,0	-2,5	-8,0	0,0	0,0	-55,8	-36,9	-23,3	-10,5	-5,4	-3,6	-2,9	-2,7	-2,5	-77,4	1,3	-1,8	0,0	0,0	

Figur 4 Beregnede værdier for DFFVa og DVFI samt øvrige karakteristiske afstrømninger for 2011-2017

Sammenlignes VP3 (Vandplan 3) perioden 2011-2017 med en længere årrække (2000-2017) kan der ud fra observeret vandføring beregnes følgende karakteristiske størrelser ved st. 55.08 (kilde: VandWeb):

Q95 = 0,194 m³/s, Q75 = 0,849 m³/s, Q50 = 2,015 m³/s, Q25 = 4,009 m³/s og EQR DFFVa = 0,46. Den lavere værdi af Q95 for 2000-2017 i forhold til VP3 perioden, modsvares dermed ikke af en tilsvarende lavere

værdi for DFFVa. BFI er omtrent på samme niveau for de to perioder (=0.94), og det er dermed forskellen på Fre25 og Fre75, der forklarer den højere DFFVa værdi nedstrøms Tissø for den lange periode i forhold til VP3 perioden (Fre25 = 1,72 for lange periode mod 1,43 for VP3 perioden, mens Fre75 = 4,56 for den lange periode mod 5,14 for VP3 perioden).

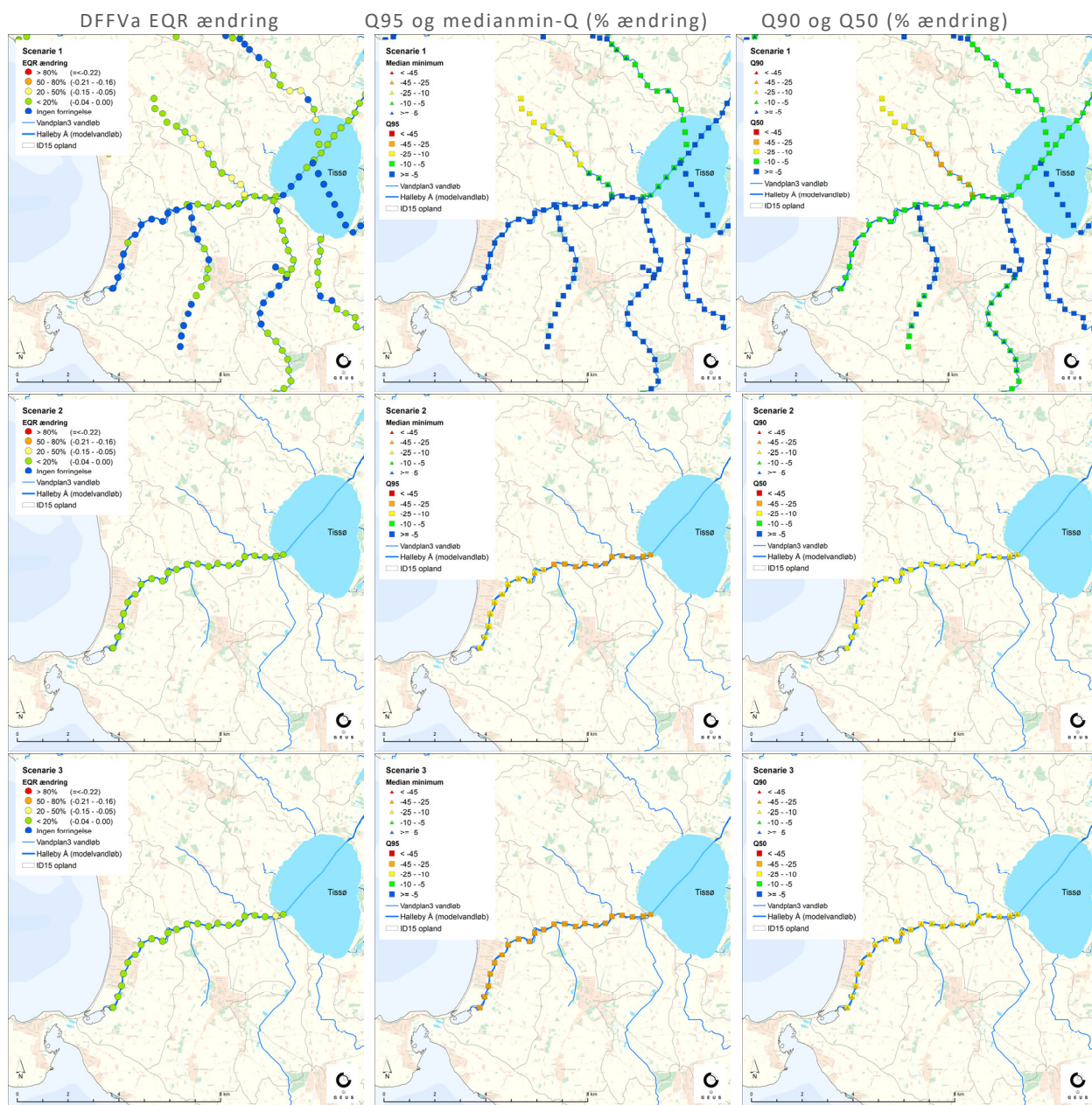
Analyse af ændring i afstrømningsregime og biologiske kvalitetselementer i Nedre Halleby å for fisk på basis af vandområdeplan metodik (Test 2)

Der fokuseres i det følgende på betydningen af såvel grundvandsindvinding i området som indvinding fra Tissø, baseret på en modelberegning med DK-model 2019 anvendt til VP3 kvantitativ tilstandsvurdering [1,2,9]. Der er beregnet og vist resultater for følgende tre ændringsscenarier: Scenarie 1: "Grundvandsindvinding – nul indvinding" svarende til /1/. Scenarie 2: "Tissø indvinding på 7 mio. m³/år + grundvandsindvinding 2011-17, minus grundvandsindvinding 2011-17" og Scenarie 3: "som Scenarie 2 med reference = nul indvinding fra Tissø og grundvand". Resultater af testberegningen baseret på VP3 modellen [9] er sammenfattet i figur 5.

VP3 beregningen (øverste række) viser, at situationen med grundvandsindvinding men uden indvinding fra Tissø giver påvirkninger svarende til, at der er mindre end 20% sandsynlighed for DFFVa tilstandsændring (med en klasse fra f.eks. god til moderat) for strækningen fra Tissø's udløb af Nedre Halleby å og ned til udløbet fra Helsing å. Nedstrøms Helsing å's udløb er der ingen negativ påvirkning i forhold til DFFVa. I tilløbet Bækken (hvor der er en del indvindinger fra terrænnære forekomster se fig. 1), er der 20-50 % sandsynlighed for reduceret tilstand for DFFVa. Det samme gælder et nordligt tilløb til Tissø. Åmose å har mindre end 20% sandsynlighed for DFFVa tilstandsændring. Der ses i store træk samme påvirkningsgrader for vandføringer (figurer i midterste og højre kolonne) i grundvandssceneriet, med en reduktion af medianmin-Q og Q95 med 25-45% reduktion i Bækken og 5-10% i øvrige vandløb incl. Åmose å og Nedre Halleby. For Q90 og Q50 er der reduktion på 10-25% i Bækken, mens at påvirkningen for de øvrige vandløb incl. Nedre Halleby å er mindre end 5%. En undtagelse er dog strækningen fra Tissø og ned til udløbet fra Bøstrup å, hvor påvirkningen for Q90 er 5-10%, mens Q50 er påvirket < 5 %.

En fremtidig Tissø-indvinding på 7 mio. m³/år vil isoleret set (midterste række i figur 5) påvirke DFFVa således, at der er mindre end 20% sandsynlighed for tilstandsændring på hele den ca. 11 km lange strækning af Nedre Halleby å ned til udløbet (venstre kolonne, midterste figur). Såvel Q95 som medianmin-Q er reduceret med 25-45 % på strækningen fra Tissø og ned til udløbet af Helsing å. Nedenfor udløbet fra Helsing å og til udløbet i Storebælt er reduktionen af medianmin-Q fortsat 25-45 %, mens reduktionen af Q95 er 10-25%. Reduktionen af Q90 er 25-45 % fra Tissø og ned til udløbet fra Bøstrup å, mens Q50 er reduceret 10-25% på denne strækning. For den resterende strækning ned til udløbet i Storebælt er reduktionen af både Q90 og Q50 på 10-25 % når man isoleret ser på indvinding fra Tissø, og benytter modellerede vandføringer for systemet baseret på modelberegning med DK-model 2019 [2,9].

Den nederste række i figur 5 sammenfatter den samlede påvirkning fra grundvandsindvinding og en fremtidig Tissø indvindingen på 7 mio. m³/år. EQR ændringen for DFFVa har fortsat < 20% sandsynlighed for tilstandsændring også incl. Tissø indvinding (dog er der ved ID15 punktet nedstrøms Tissø ved st. 55.08 en påvirkning svarende til 20-50% sandsynlighed for tilstandsændring. Påvirkningen giver i dette scenarie for hele Nedre Halleby å for medianmin-Q og Q95 anledning til en reduktion af minimumsvandføringen på 25-45 %. Det samme gælder Q90, mens Q50 er reduceret med 10-25% på hele strækningen.



Figur 5 Ændret EQR værdi for fisk (venstre kolonne), % reduktion for Q95 og medianmin-Q (midterste kolonne) og % reduktion for Q90 og Q50 (højre kolonne). Øverst: Scenarie 1 (grundvand – nul), i midten Scenarie 2 (Tissø + grundvand – grundvand) og nederst Scenarie 3 (Tissø + grundvand – nul).

I Tabel 2 er resultater for Q95 og Q90 sammenfattet.

Tabel 2 Reduktion af minimumsvandføring (Q90 og Q95) for Nedre Halleby å ved Scenarie 1, 2 og 3

Nedre Halleby å Vandløbslokalitet	Q95 % flow reduktion			Q90 % flow reduktion		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
St. 55.08	5,1	30	34	5,5	29	33
ns udløb Bøstrup å	4,6	26	29	5,1	25	29
ns udløb Bækken	4,9	26	29	5,5	24	28
ns udløb Helsinge å	4,6	24	28	5,3	23	27
udløb Storebælt	4,7	24	28	5,2	23	27

For Scenarie 1 grundvandsindvinding ses reduktioner i Q95 på omkring 5 %. Minimumsvandføringen Q95 er i Scenarie 2 og 3 hvor Tissø indvinding på 7 mio. m³/år er inkluderet, er reduceret med ca. 30-34 % på den korte strækning fra Tissø til opstrøms udløbet fra Bøstrup å. Nedstrøms Bøstrup å's udløb er påvirkningen af Q95 maksimalt 29%. Test 2 simulerer lidt for store minimumsvandføringer sammenlignet med målinger og jf. Test 1 (formentlig fordi magasinering i søen og regulering af afløb ikke er modelleret). De relative reduktioner beregnes derfor systematisk lavere ved Test 2 sammenlignet med Test 1. Dette forhold har mindre betydning i beregningen af EQR ændring for fisk da den empiriske formel for EQR DFFVa er mindre følsom overfor de absolutte minimumsvandføringer og har mere fokus på regimet (BFI, samt antal hændelser over Q25 og under Q75 over en årrække).

Vurdering af klimaeffekter på afstrømningsregime og kvantitativ tilstand nedstrøms Tissø på grundlag af hydrodynamisk modelstudie og nye HIP data (Test 3)

Med henblik på vurdering af klimaeffekters betydning for til- og afstrømning fra Tissø er anvendt udtræk af klimafaktorer fra Hydrologisk Information og Prognosesystem (HIP) for RCP8.5 scenariet for fjern fremtid (2071-2100). Klimafaktorer (f.eks. KF90) for Q90 (og øvrige percentiler mm.) beregnes dermed:

$$KFx = (Q_{XRCP8.5 FF} - Q_{90RCP8.5 RF}) / Q_{XRCP8.5 RF} \quad (2)$$

Hvor $Q_{XRCP8.5 FF}$ er fremtidig vandføring RCP8.5 2071-2100 (x:99-01)

$Q_{XRCP8.5 RF}$ er reference vandføring RCP8.5 1990-2021 (x:99-01)

I HIP er fremskrivninger for RCP8.5 baseret på i alt 17 klimamodeller. Efterfølgende er median og standardafvigelse for KFx fra de 17 klimamodelfremskrivninger estimeret.

I figur 6 er resultater for hhv. opstrøms og nedstrøms Tissø (ved st. 55.08) vist for de fire årstider efterår (september-november), vinter (december-februar), forår (marts-maj) og sommer (juni -august). På figuren er dels medianændring samt +/- 1 standardafvigelse på tværs af de 17 klimamodeller markeret.

Om efteråret, hvor reduceret vandføring kan være en barriere for opgang af havørred længere op i systemet, peger resultaterne fra Test 3 baseret på HIP data for Åmose å lige opstrøms Tissø (figur 6) på, at middel- og maksimum vandføringen (Q01) øges med ca. 5 %. Det må vurderes at være positivt for ørredopgang. Øvrige percentiler viser stort set uændret værdi, med stor variation på tværs af klimamodeller. Q10 viser største fald mens Q99 viser største stigning af disse percentiler. Nedstrøms Tissø ses lidt tilsvarende tendenser, med lidt større stigninger i Q01 og Q05 som den mest markante forskel.



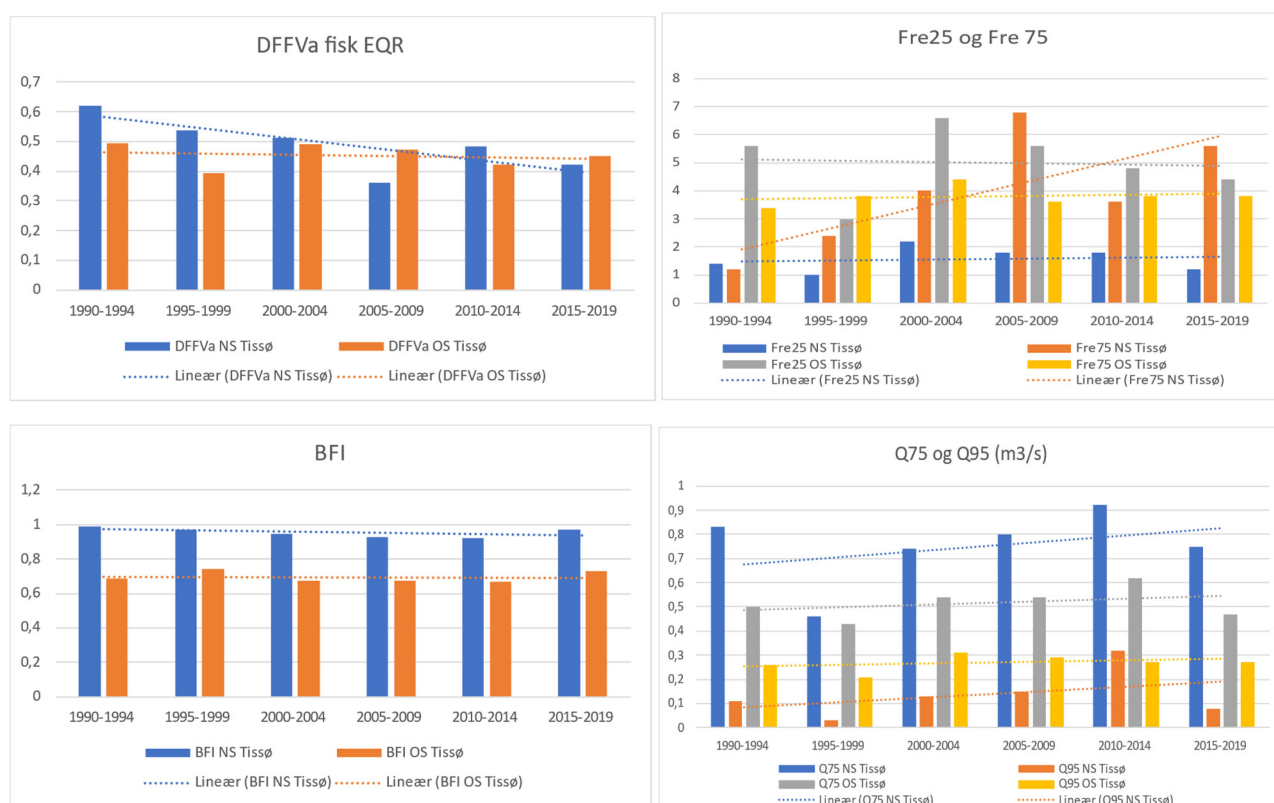
Figur 6 Klimafaktorer vandføring beregnet for opstrøms og nedstrøms Tisø for 4 sæsoner. X-akse viser beregnet median og standardafvigelse på tværs af 17 klimamodeller (kilde: /12/).

I vinterperioden ses en stigning i samtlige percentiler opstrøms Tissø med klimafaktorer i størrelsesorden 1,2 – 1,4 for Q01 – Q95, og lidt mindre stigning for Q99. Det vurderes positivt for gydeforhold. Der er meget stor usikkerhed på max afstrømningen (Q01), med en standardafvigelse (std) på over 1,5 på tværs af de 17 klimamodeller. Nedstrøms Tissø ses tilsvarende resultater.

I forårsperioden ses helt overvejende forøget vandføring for hele regimet med klimafaktorer både opstrøms og nedstrøms Tissø på 1,1 – 1,3. I sommerperioden ses en relativ stor stigning i middelvandføring på 1,2 og en meget stor stigning i Q01 med en klimafaktor på 1,8 (skal ses på baggrund af en generelt ringe vandføring) opstrøms Tissø.

Vurdering af betydning af stemmeværk styring i et historisk perspektiv for 1990-2019 (Test 4)

I nærværende afsnit analyseres den målte afstrømning opstrøms og nedstrøms Tissø ved de to vandføringsstationer med målinger for den historiske periode 1990-2019. DFFVa og øvrige karakteristiske regimevariable beregnes (vha. VandWeb). Formålet er her ud fra data, at vurdere udviklingstendenser for den historiske periode i fiskeindekset opstrøms og nedstrøms Tissø. I Test 4 beregnes karakteristiske værdier og indikator for 5 års perioder. Her er anvendt VandWeb til denne beregning [10].



Figur 7 Analyse af historiske data ud fra opstrøms (st. 55.01) og nedstrøms Tissø (st.55.08) /16/

Det fremgår af figur 7 at DFFVa EQR beregnet for afløbet fra Tissø (st. 55.01) viser faldende tendens (siden 2000), mens værdien opstrøms er relativt uændret. Den mest forklarende variable er Fre75, og det er primært udviklingen i Fre75 efter 2000 (med den nuværende styring af stemmeværket), der er problemet. Forhold opstrøms Tissø viser generelt uændret trend i samtlige variable.

Diskussion af betydning af stemmeværk, bæredygtig vandindvinding og klimatilpasning i forhold til fremtidig havstigning

Tissø Forum og DHI [7,8], har haft fokus på beregning af hvor stor en del af tiden, en given krav-minimumsvandføring kan opfyldes for en given periode (f.eks. 0,5 m³/s, 0,7 m³/s eller 1,5 m³/s i perioden august – december). Krav til stop for vandindvindingen er knyttet til en vandstand på min. 0,80 m. Hørings svar har udfordret denne tilgang. F.eks. fremhæver Danmarks Sportsfiskerforbund at havørreden (og dermed DFFVØ) påvirkes negativt af vandindvindingen fra Tissø sammenholdt med øvrig indvinding fra grundvand i oplandet til Tissø, på grund af manglende variation i vandføring i Nedre Halleby å. Danmarks Sportsfiskerforbund hævder, at det med meget stor sandsynlighed er indvindingen fra Tissø og øvrig grundvandsindvinding, der er årsagen til de dårlige ørredtætheder i området. Argumentet er her, at der skal være en naturlig afstrømning og dermed vandføring i Nedre Halleby å for at havørreden trækker op på sin gydevandring og videre op i systemet.

Fokus har i dette review derfor været på betydning af ny indvindingstilladelse og styring af stemmeværket for afstrømning nedstrøms Tissø og med fokus på fisk (DFFVa og ørredopgang). Der er gennemført 4 tests:

Test 1 Analyse af målte vandføringer og simpel beregning af betydning af Tissø for Q550015 (st. 55.08) nedstrøms Tissø, som viste at indvinding fra Tissø har forholdsvis begrænset betydning på EQR værdi for DFFVa for vandplanperioden 2011-2017, og at den empiriske formel for DFFVa peger på moderat tilstand (i den lave ende). Stemmeværk og indvinding fra Tissø har betydning i tørre perioder om sommeren og i efteråret.

Test 2 Beregning med vandområdeplan 3 modellen, tillagt indvinding fra Tissø. Test 2 belyste dermed hvordan Tissø indvinding påvirker DFFVa i forhold til grundvandsindvindinger og for den samlede strækning fra Tissø til udløbet. Tilløb fra Bækken er i forvejen påvirket af grundvandsindvinding, og Tissø indvinding resulterer i at strækning fra Tissø til udløb fra Bøstrup å, har 20-50 % sandsynlighed for reduceret tilstand bedømt ud fra empirisk formel for DFFVa. Beregning ser dog bort fra effekt af stemmeværk.

Test 3 er baseret på inddragelse af nye klimafremskrivninger fra HIP i relation til ørreder. Test 3 har belyst hvordan klimaændringer jf. RCP85 for fjern fremtid 2071-2100 påvirker sæsonmæssige afstrømning opstrøms og nedstrøms Tissø, og at der generelt må forventes mere vand vinter, forår og sommer, og påvirkninger med mere ekstreme afstrømninger i specielt efteråret. Test 3 er primært anvendelig opstrøms Tissø, idet havstigning, (ny) styring af stemmeværk og fremtidig indvinding fra Tissø ikke er beskrevet fuldt hydrodynamisk i HIP modellen. Opstrøms Tissø er det primært den øvre del af afstrømningsregimet (Q50-Q10) der i efterårsperioden har reduceret vandføring i et fremtidigt klima i forhold til 1991-2019 referenceperioden, men testen har vist at der er behov for inddragelse af nye HIP data i design af styring af stemmeværk.

Endelig er der lavet en Test 4 i form af en ren datadreven analyse af afstrømningstidsserier for perioden 1990-2019. Denne analyse har vist at styringen af stemmeværket efter 2000 har påvirket EQR værdi for DFFVa i negativ retning. Vandføringer (Q95 og Q75) er øget, men DFFVa er reduceret. Det er i første omgang Fre75 der er øget, hvilket har reduceret DFFVa. Sekundært er BFI desuden svagt reduceret. Test 4 viser samtidig at forhold opstrøms Tissø er uændrede gennem perioden. Da indvindingen har været relativt konstant gennem perioden, vurderes det at den negative trend i DFFVa kan skyldes styringen af stemmeværket efter 2000.

Styring af stemmeværk

I 1883 valgte man uddybe afløbet fra Tissø til Nedre Halleby Å for at skabe gode græsningsarealer omkring Tissø samt foretage tørvegravning inde i Store Åmose. Konsekvensen var at det uddybede åløb sænkede vandstanden i Tissø så meget, at dele af søen tørrede ud. I 1889 blev det første stemmeværk derfor bygget. Siden er reguleringen af vandstanden i Tissø blev ændret i forbindelse da Kalundborg Vandforsyning i 2001 fik tilladelse til at øge indvindingen af vand fra Tissø. Her blev det eksisterende stemmeværk i 2002 ombygget for at sikre optimal vandstand i Tissø. Der blev desuden etableret et omløbsstryg (<https://www.wintec.dk/stemmevaerk-nedre-halleby-aa/>). Porten i stemmeværket er koblet sammen med 2 vandstandsmålere i Tissø. Porten reguleres op og ned efter den aktuelle vandstand. Det sker ved, at der i hovedstationen er indlagt bestemte sigtepunkter. Disse sammenlignes med søens aktuelle middelvandstand. Hvis vandspejlet ligger over sigtepunktet sender hovedstationen besked til stemmeværket om at hæve porten. I tilfælde af det modsatte forbliver porten lukket. Porten reguleres 6 cm ad gangen. Betydning af styring af stemmeværk med nuværende metodik kan aflæses på den målte hydrograf (se Appendix A, figur A1 og A2 st. 550015.). Det fremgår, at sø og stemmeværk forsinket afstrømningen som følge af magasineringen i Tissø, og at der derudover forekommer lave vandføringer i særligt tørre perioder hvor vandstanden kommer ned under styrekurven. DHI har i [7,8] foretaget modelberegninger af betydninger af styring af stemmeværk efter et revideret styreniveau (styremetode 2), som vist i Figur 1. DHI's beregninger er baseret på en total vandbalance (NAM model), ud fra målt vandføring ved Bromølle, nedbør, potentiel fordampning, samt en hydraulisk model med indbygget stemmeværk og styring opstillet for nuværende forhold (2000-2017) og beskrivende ændringer af stemmeværk, styringsmodeller og klimadata fra A12, A1 og B1.

I [11] har DHI konkluderet følgende mht. fremtidig styring af stemmeværk og påvirkning af vandløb og fisk: *"Det vurderes derfor, at de foreslåede ændringer i styring og vandindvinding ikke vil have en signifikant effekt på de residente fisk i søen, da ændringerne i søforholdene ligger inden for de nuværende årstidsvariationer. Desuden vurderes det, at ændringerne i vandføring som følge af ny styring og vandindvinding ikke vil have en negativ påvirkning på å-miljøet, sammenholdt med den nuværende styringsmodel eller mod intet stemmeværk. Det er usikkert, om de estimerede minimumsvandføringer, som er benyttet i vurderingen af styringsmodellerne, er tilstrækkelige til at sikre god økologisk tilstand for ørreden, da de ifølge vores kendskab ikke er fastsat ud fra videnskabeligt dokumenteret viden om tilstrækkelige strømhastigheder for vandrende ørreder".*

GEUS er overordnet set enig i denne konklusion. I forbindelse med VP3 har det endnu ikke været muligt at implementere en empirisk formel for ørreder (DFFV \emptyset), og der er derfor et helt klart vidensbehov, som betyder, at det er usikkert om god tilstand for ørreder i Tissø og Halleby å systemet kan opnås. Test 4 har imidlertid påvist en trend i DFFVa i Nedre Halleby å, som kan skyldes ændringen af stemmeværket omkring 2001. Test 4 har vist, at selvom minimumsvandføringen er øget (Q95 og Q75), så er EQR værdien for DFFVa faldet fra 90'erne og til 0'erne-1'erne, som følge af øget antal hændelser under Q75 i afløbet fra Tissø (hvorved FRE75 er øget og DFFVa reduceret). Indikatoren for DFFVa peger derfor på at det muligvis er variationen i vandføringen (antal hændelser under Q75, og over Q25 samt forudsigelighed udtrykt ved BFI), fremfor minimumsvandføringens størrelse der er vigtig. GEUS vurderer derfor, at med de indikatorer der anvendes i forbindelse med vandplaner, giver det ikke nødvendigvis forbedret tilstand at sikre en mere konstant sommervandføring, der skal muligvis også tænkes i 'pulser', 'varighed' og variation i vandføringen, hvis der skal opnås god tilstand for DFFVa nedstrøms Tissø. Tilstanden er i øjeblikket meget dårlig, som også afspejlet i de morfologiske forhold (fysisk indeks). Analysen er foretaget ved sammenligning af Bromølle og

ns Tissø målte vandføringstidsserier, og der er generelt behov for et forbedret modelgrundlag (en bedre vandbalance model for hele oplandet incl. en forbedret grundvandsmodel), idet vandbalanceforhold opstrøms Tissø (nedstrøms st. 55.01) er påvirket af vådområder, vanding mm. hvis betydning ikke er nærmere vurderet i modelarbejdet.

Udfordringer i forhold til vurdering af acceptabel risiko i forhold til god økologisk tilstand

I vandområdeplan sammenhæng er der udviklet en empirisk indikator for vandplanter (DVPI [4]), som imidlertid ikke har været anvendt i de to seneste vandplaner i basisanalysen og tilstandsvurderingen, pga. for store usikkerheder på den hydrologiske model. DVPI har lighedstræk til DFFVa når det gælder Fre25 – Fre 75, og har derudover Dur3 varighed af store hændelser 3 x Q50 som et led, der reducerer tilstanden. Netop afløbet fra Tissø har stor varighed af 3 x Q50 (se Figur 1), og det er plausibelt at dette er en medvirkende faktor bag de målinger af DVPI (makrofytter), som indikerer ringe tilstand i vandløbssystemet. Beregninger af DVPI nedstrøms Tissø med Test 1 indikerer negative EQR værdier, og dokumenterer dermed problemstillingen med at sikre god tilstand specielt nedstrøms Tissø for makrofytter. Da Fre25 og Fre75 differensen samtidig er negativ, er afløbet fra Tissø primært som følge af søvolumenet og magasinering (stemmeværk eller ej) samlet set en barriere for at opnå god tilstand for DVPI nedstrøms Tissø.

På grund af de betydelige usikkerheder på indikatorer, og et behov for en fælles enighed omkring hvilke statistiske og/eller empiriske formeludtryk, der kan bringes i spil, og som kan modelleres tilstrækkeligt præcist (f.eks. DVPI og ikke mindst DFFVø), anbefales det at iværksætte et overvågningsprogram der kan følge såvel ørreder som øvrige biologiske kvalitetselementer nedstrøms- og opstrøms Tissø. Et forbedret datagrundlag i form af vandstand- og vandføringsovervågning i systemet incl. nedbørsmålinger, og en detaljeret hydrologisk og hydrodynamisk grundvands- overfladevandsmodel vil styrke vidensgrundlaget.

For et vandløbssystem som Tissø, hvor minimumsvandføring i visse situationer kan blive nul (eller ved høj havvandstand nedstrøms, kan vende med strømning fra Nedre Halleby å og op i Tissø), er der helt operationelt en udfordring med at styre stemmeværket i forhold til medianminimum. Som det fremgår af figur 4, er medianmin-Q i test 1 beregnet til ca. 285 l/s for naturaliseret flow, mens Q95 svarer til ca. 400 l/s og Q90 ca. 600 l/s for 2011-2017.

Beregninger i Test 2 resulterer i en lidt større vandføring for naturaliseret flow idet grundvandsindvindingen er inkluderet i vurderingen [6], se Appendix A figur A1. Beregningen har dog ikke magasineringen med i beregningen, og alt andet lige betyder det, at minimumsvandføringen antageligt er simuleret for højt med VP3 modellen i afløbet fra Tissø.

Skal man derfor bruge Tissø Forum's metodik på basis af målte vandføringer i afløbet, så vil det kræve at man enes om, hvilken statistisk størrelse der giver mest mening og man kan enes om i forhold til opgang af havørreder i Nedre Halleby å. Her kan den empiriske videnskab ikke hjælpe, da der ikke findes nogen brugbar empirisk formel i lighed med DFFVa for ørredop- og/eller -nedgang. Det anbefales ikke at anvende medianmin-Q eller Q95, da disse størrelser er meget lidt robuste, og vil blive endnu mere problematiske med stigende havvandspejl i et fremtidigt klima.

Metodikken med opgørelse af andelen af tiden, hvor vandføringen (eller vandstanden) overholder kravværdier er god rent kommunikativt, selvom hørings svar peger på at der fortsat mangler enighed om et fælles grundlag for vurdering af en optimal en fremtidig indvinding og styringsmodel. Det har været foreslået af DTU Aqua, at man evt. kunne anvende en analogi fra dambrug, hvor man højst må indvinde 50% af medianminimumsvandføringen. Det forudsætter at man anvender naturaliseret flow jf. Test 1.

GEUS vurderer imidlertid at medianmin-Q ikke er brugbar som styringsmål. For det første giver indikatoren ikke nogen god forklaringsgrad, hverken i forhold til fisk (DFFVa) eller ørreder [4,5,13]. For det andet er indikatoren ikke robust, når vandføringen i korte perioder kommer tæt på nul, og når der til tider sker tilbagestrømning ind i Tissø [13]. Der er derfor en opgave med at finde en brugbar flow indikator (der både har høj forklaringsgrad og kan modelleres), og som samtidig er operationel i forhold til f.eks. havørredens livscyklus, hvor hver sæson har sin "flowkalender" [5,14].

Betydning af klimaeffekter på vandbalanceforhold og havstigning

Med øget indvinding fra Tissø og ny styring af stemmeværket tabes nogen variation i vandføringen specielt i tørre år når vandstanden kommer under styreniveauet. I et fremtidigt klima, vil maksimumvandføringer i efteråret blive reduceret (jf. Test 3). Det kan yderligere forrykke forholdene for ørreder i Nedre Halleby å, selvom stigninger i vandføringen forventes resten af året.

Der foreligger med HIPdata helt nye klimafremskrivninger for RCP8.5 og RCP4.5 for 2041-71 og 2071-2100. I forbindelse med det videre arbejde med indikatorer og klimatilpasning bør disse data indgå i den modellering, der foretages af Halleby å og Tissø systemet. En integreret grundvands- overfladevandsmodel, der inkluderer en hydrodynamisk model i lighed med den DHI har opstillet, men indbygget i en forbedret hydrologisk model, der også kan beskrive ændrede vandbalanceforhold og grundvandsforhold, vil være et væsentligt modelværktøj i en fremtidig detailprojektering af vandforsyningen og vurdering af behov for evt. virkemidler såsom oppumpning af grundvand fra erstatningsboringer i tørre perioder, hvor vandføringen som følge af Tissø-regulering kan gå i nul i længerevarende tørre perioder.

Data er tilgængelige fra HIPdata både i form af biaskorrigerede daglige klimadata for 17 RCP8.5 og 5 RCP4.5 klimamodeller for 1971-2100, og en analyse af udvalgte resultater ovenfor peger på, at klimaændringer vil give nogle komplekse påvirkninger på grundvandsstand, biologiske kvalitetslementer og måske allervigtigst fremtidige oversvømmelses- og tørkehændelser, hvor der skal sikres i forhold til, og desuden sikres vandforsyning f.eks. i tørkeperioder. Vandbalanceforhold ser umiddelbart ikke ud til at give afgørende forringede forhold mht. kritiske flowstørrelser i relation til fisk og ørred [5]. Kombineret med klimatilpasning der kan sikre en passende lav(ere) vandstand i nedre del af Halleby å (f.eks. gennem etablering af højvandslukkere der virker under stormflod) og dermed fald, kunne åbne op overfor etablering af 'morfologiske hotspots / restaurerede vandløbsstrækninger' med forbedrede fysiske forhold.

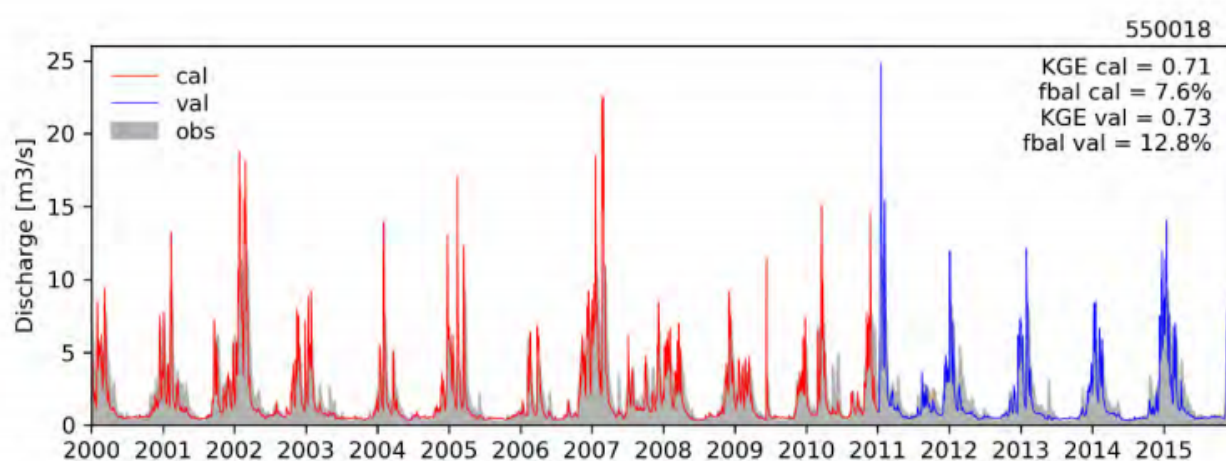
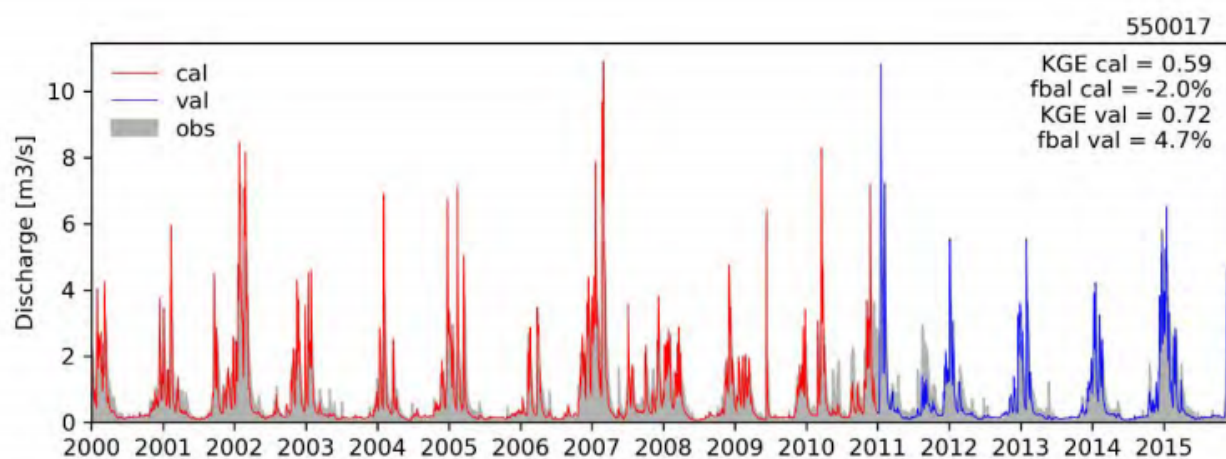
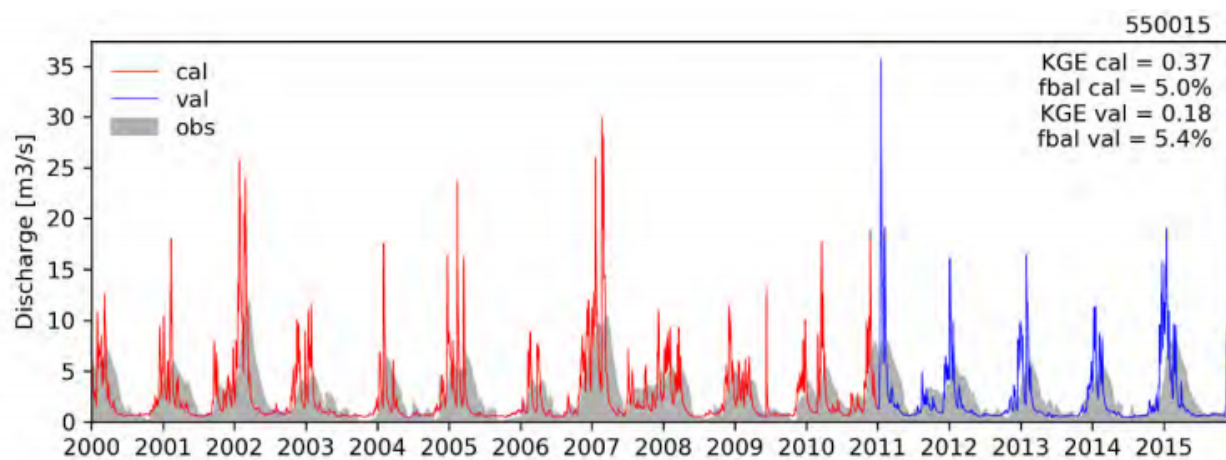
Sonnenborg et al. [13] har vurderet at månedsvandføringen i tilløbet til Tissø vil blive væsentligt reduceret opstrøms Tissø med helt op til 40 % i september i et fremtidigt klima og ca. 20 % for august og oktober. Effekten nedstrøms vil være modsat i vintermånederne, altså en forøget vandføring. Der er her tale om en hydrodynamisk beregning fra umiddelbart opstrøms Tissø til Storebælt, der tager magasineringen i regning. Resultaterne afviger fra de resultater, der er beregnet på baggrund af HIP klimafremskrivning [12] med den nye DK-model, både opstrøms og nedstrøms Tissø. I betragtning af at flere grundvandsforekomster er udnyttet over 30% i området, og området er udfordret af havstigning og oversvømmelser fra flere sider, er der væsentlige usikkerheder og modsatrettede vandforvaltningsudfordringer i spil.

Det kalder på en helhedsorienteret tilgang, og en sammenkobling af DHI's hydrodynamiske model og GEUSs hydrologiske model, samt indsamling af flere overvågningsdata/mere viden. Effekten heraf vil være en øget resilience af systemet som helhed, idet forbedrede fysiske forhold vil kunne give bedre betingelser for at man kan forbedre EQR værdier for morfologi (DVF), makrofytter (DVPI), flersamfundsfisk (DFFVa) og ørreder (DFFVø).

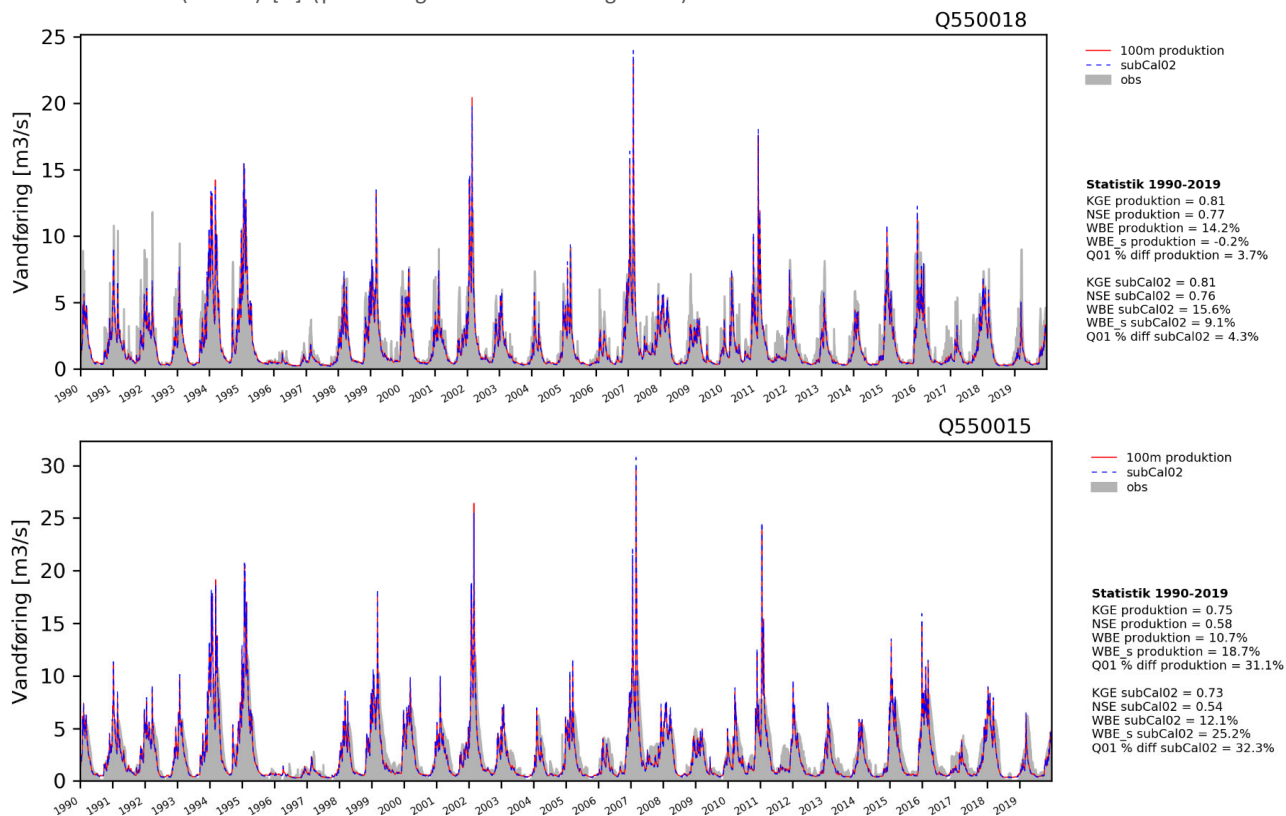
Referencer

- [1] Henriksen HJ, Voutchkova D, Ondracek M, Troldborg L og Thorling L 2021. Konsolidering af kvantitativ tilstandsvurdering for danske grundvandsforekomster i potentiel ringe tilstand på basis af ekspertvurdering. Supplerende vurderinger af kvantitativ tilstand for 90 grundvandsforekomster med modelberegnet udnyttelsesgrad større end 30%. GEUS rapport 2021/2.
- [2] Henriksen, H.J., Ondracek, M., & Troldborg, L. (2021). National Vandressource Model. Genberegning af udnyttelsesgrad og vandløbspåvirkning på basis af indberettede fordelinger af indvindinger på boringsniveau i Jupiter. GEUS Rapport 2021/1.
- [3] MST vandområdeplaner. mst.dk
- [4] Graeber, D., Wiberg-Larsen, P., Bøgestrand, J., & Baattrup-Pedersen, A. (2014). Vurdering af effekten af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand, 1–29 (in Danish).
- [5] Henriksen, H.J., Jakobsen, A., Pasten-Zapata, E., Troldborg, L. og Sonnenborg, T.O. (2021) Assessing the impacts of climate change on hydrological regimes and fish EQR in two Danish catchments. *Journal of Hydrology, Regional Studies*. 34 April 2021. Assessing the impacts of climate change on hydrological regimes and fish EQR in two Danish catchments – ScienceDirect
- [6] Olsen, M., Troldborg, L., Henriksen, H. J., Conallin, J., Refsgaard, J. C., & Boegh, E. (2013). Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows. *Journal of Hydrology*, 507, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.022>
- [7] DHI 2020 Styring af Tissø Stemmeværk. Slutrapport: Ny styringsmodel. Kalundborg Forsyning.
- [8] DHI 2021 Tissø indvinding og styring af stemmeværk. Notat vedrørende påvirkning af vandføring i Nedre Halleby Å. Foreløbig version. Kalundborg Forsyning.
- [9] Stisen S, Ondracek M, Troldborg L, Schneider RJM, van Til MJ 2019. National Vandressource Model (in Danish). Modelopstilling Og Kalibrering Af DK-model 2019. GEUS Rapport 2019/31
- [10] GEUS. VandWeb. Vandmodel.dk
- [11] DHI 2021 Væsentlighedsvurdering af ny styring af Tissø stemmeværk samt ændring af vandindvinding. Effekter på fugle, fisk og bundvegetation. Kalundborg kommune
- [12] Henriksen HJ, Kragh SJ, Gotfredsen J, Ondracek M, van Til M, Jakobsen A, Schneider RJM, Koch J, Troldborg L, Rasmussen P, Pasten-Zapata E og Stisen S. 2020. Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen: Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Information og Prognosesystem. Udarbejdet som del af FODS 6.1 2016-2020 Initiativet fælles data om terræn, vand og klima. Februar 2021.
- [13] Sonnenborg TO, Hinsby K, van Roosmalen L, Stisen S 2012. Assessment of climate change impacts on the quantity and quality of a coastal catchment using a coupled groundwater-surface water model. *Climatic Change* 113: 1025-1048
- [14] Olsen M., L. Troldborg, H.J. Henriksen, J. Conallin, J.C. Refsgaard, E. Boegh (2013) Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows, *J. Hydrol. (Amst)* 507 (2013) 52–62, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.10.022.

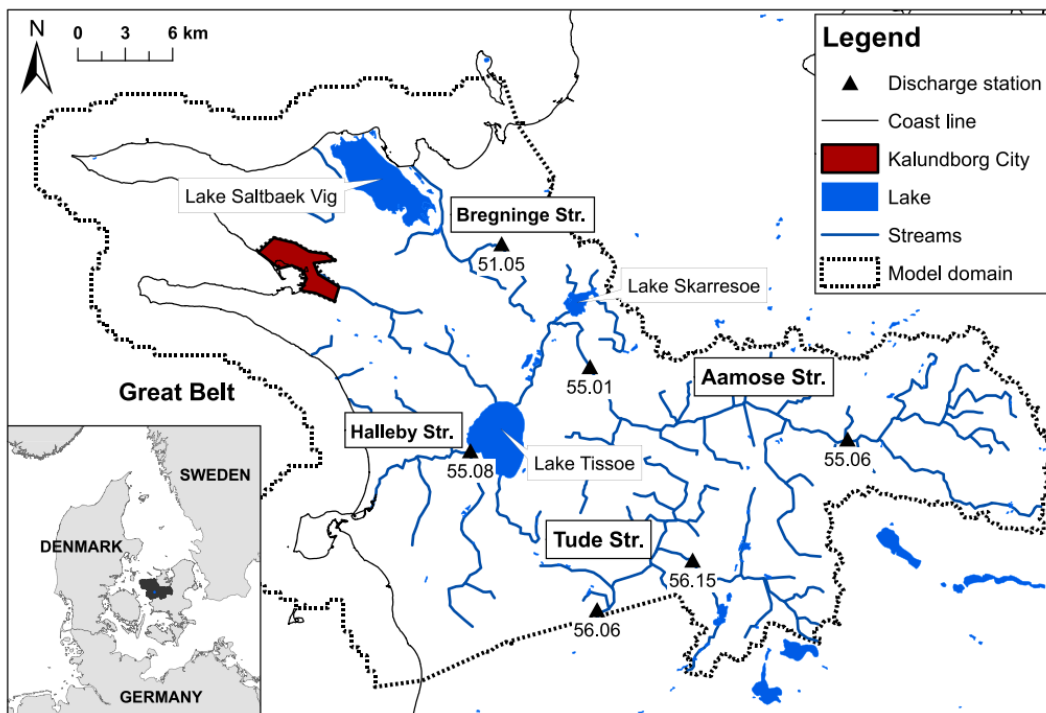
Appendix A Performance af Vandområdeplan (VP3) DK-model 2019 og DK model HIP 100m



Figur A1 Simulerede vandføringer med DK-model 2019 for station 550015 (st. 55.08), 550017 (st. 55.06) og station 550018 (55.01) [6] (placering af station se figur A3).



Figur A2 Simulerede vandføringer med DK-model HIP [12] for station Q550018 (st. 55.01) og Q550015 (st. 55.08) (placering se figur A3 nedenfor).



Figur A3 Oversigtskort med placering af vandføringsstationer. 55.08 (st.550015), 55.01 (st.550017) og 55.06 (st.550018). [13]