

Styring af Tissø Stemmeværk

Slutrapport : Ny styringsmodel



Kalundborg Forsyning

Projekttitel : Styring af Tissø Stemmeværk

Projektnr. : 11823051

Dato : Juni 2020

Forside:	
Udarbejdet af:	TVJ, CBP
Dokument Nr.:	11823051
Dato:	Juni 2020
Version:	Endelig rapport

Indholdsfortegnelse

Indledning	7
Formål	8
Fremgangsmåde	8
1 Beskrivelse af Tissø stemmeværk	9
1.1 Beskrivelse	9
2 Lokale styringsmodeller	12
2.1 Beskrivelse	12
2.2 Styringskriterier	12
2.2.1 Vandindvinding	12
2.2.2 Fugle	12
2.2.3 Fisk	13
2.2.4 Flora	13
2.2.5 Landbrug	14
2.2.6 Rekreative formål	14
2.3 Kravkurver	15
2.3.1 Sigtepunktskurven	15
2.4 Styringsmodeller	17
2.5 Lokal styringsmodel 1: Ny nedre og øvre kravkurve, indvinding opprioriteret	18
2.6 Lokal styringsmodel 2: Ny nedre og øvre kravkurve, indvinding nedprioriteret	20
2.7 Lokal styringsmodel 3: Ombygning og automatisering af stemmeværket	21
2.8 Resultater af lokale styringsmodeller	22
3 Modelværktøj	23
3.1 Formål	23
3.2 2001-model	23
3.3 Opdatering	24
3.4 Kalibrering	24
3.5 Udbygning af nedstrøms model	28
4 Aftestning af styringsmodeller	30
4.1 Klimavariation ud fra historiske data	30
4.2 Historisk klimavariation med klimaændringer	30
4.3 Klimaændring og serie af tørre/våde år	33
5 Modelresultater	35
5.1 Ændringer med det formål at sænke høj søvandstand	35
5.2 Ændringer i indvinding og effekt på minimumsvandføringen	37

5.3	Delkonklusioner for lokale modeller	41
6	Den endelige styringsmodel	Error! Bookmark not defined.
6.1	Modelberegning med den endelige styringsmodel	44
6.2	Effekt af klimændring og klimavariabilitet	45
6.3	Effekt af reduceret indvinding ved lav søvandstand	53
6.4	Tidsvariation med endelig styringsmodel	55
7	Konklusioner	58
7.1	Konklusioner	58
7.1.1	Indledende analyser	58
7.1.2	Ny styringsmodel	59

Figurer

Figur 1-1	Stemmeværket med tre manuelle slug samt en automatisk port. Omløbsstryget ses i baggrunden.	9
Figur 1-2	Tegning af overløbskant med udsparinger (koter i DNN), Hedeselskabet 2002.	10
Figur 1-3	Overløbskant ved omløbsstryget. Der ses flow ved to udskæringer i spunsvæggen.	11
Figur 2-1	Tissø fugleøer.	13
Figur 2-2	Nedre Halleby Å nedstrøms stemmeværk.	13
Figur 2-3	Overdrev langs Tissøs nordvestlige søbred.	14
Figur 2-4	Sigtepunktskurven (jf. Kalundborg Kommunes hjemmeside, "Vandstanden i Tissø").	15
Figur 2-5	Styrekurven for Tissø, målt vandstand samt positionen af stemmeværkets automatiske port i 2018 (fuldt åben januar-april og lukket om sommeren).	16
Figur 2-6	Principskitse: Øvre og nedre kravkurve til styring af Tissø Stemmeværk.	17
Figur 2-7	Kravkurver for Lokal Styringsmodel 1.	19
Figur 2-8	Kravkurver for lokal styringsmodel 2.	21
Figur 3-1	Oversigt over sø og vandløb medtaget i modellen.	23
Figur 3-2	Skematisk repræsentation af omløbet samt stemmeværk.	24
Figur 3-3	Plot af målt og modelberegnet søvandstand (st. 55.08) mod vandføring (st.55.11) i situationer, hvor stemmeværket er lukket.	25
Figur 3-4	Plot af målt og modelberegnet søvandstand (st. 55.08) mod vandføring (st.55.11) i situationer, hvor stemmeværket er åbent.	25
Figur 3-5	Den årlige variation af Manning tallet som er anvendt under kalibreringen.	26
Figur 3-6	Modelberegnet (sort) og målt (blå) søvandstand ved station 55.08.	26
Figur 3-7	Modelberegnet (sort) og målt (blå) vandføring nedstrøms stemmeværk ved station 55.11.	27
Figur 3-8	Modelberegnet (sort) og målt (blå) vandstand nedstrøms stemmeværk ved station 55.11.	27

Figur 3-9	Oversigt over udbredelse af oversvømmelse langs Nedre Halleby Å ved højvandsituation i Storebælt.	29
Figur 4-1	Delta change faktorer for klimaændring, Tissø området (www.klimatilpasning.dk).	32
Figur 4-2	Ændring i referencefordampning på Sjælland ved klimaændringer.	33
Figur 4-3	Årsmiddel afstrømning ved 55.11 Bromølle (1970-2018).	34
Figur 5-1	Beregnet søvandstande for den eksisterende situation (sort) og en situation, hvor stemmeværket er fjernet (blå).	36
Figur 5-2	Procent af tid (y-akse), hvor minimumsvandføringskriterier (hhv. 0,5, 0,7 og 1,5 m ³ /s) ikke overholdes ved øget indvinding (hhv. 3,5, 5,0 og 7,0 mio. m ³ /år).	38
Figur 5-3	Søvandstand for den nuværende situation (sort) sammenlignet med den, hvor der styres efter minimumsvandføring (blå), med sigtepunktskurve (rød).	39
Figur 5-4	Vandføring til Nedre Halleby Å for den nuværende situation (sort) sammenlignet med den, hvor der styres efter minimumsvandføringen (blå) med krav til minimumsvandføring (rød).	39
Figur 5-5	Akkumuleret indstrømning til Tissø fratrukket minimumsvandføringen samt indvindingen (2004-2005).	41
Figur 6-1	Styringsmodel A: Zoneoversigt for vandstand og vandføring over året. Minimumsvandføringen for de enkelte zoner varierer alt efter krav til ophold og vandring af fisk i Nedre Halleby Å.	43
Figur 6-2	Styringsmodel B: Zoneoversigt for vandstand og vandføring over året.	44
Figur 6-3	Årlige maksimale søvandstande for det nuværende og det fremtidige klima. Resultaterne er vist med en årlig indvinding på 5 mio. m ³ , (Styringsmodel B).	45
Figur 6-4	Årlige minimumssøvandstande for det nuværende og det fremtidige klima. Resultaterne er vist med en årlig indvinding på 5 millioner m ³ , (Styringsmodel B).	46
Figur 6-5	Årlig minimumsvandstand ved fremtidigt klima plottet imod det nuværende klima. Punkter under den orange linje indikerer, at den fremtidige minimumsvandstand ligger under den nuværende. Grænse for reduktion i indvinding er indtegnet (grøn), (Styringsmodel B)	47
Figur 6-6	Indvinding for perioden 1971 til 2017 for både nuværende og fremtidigt klima. Indvindingen svarer til 5 millioner m ³ om året. (Styringsmodel B)	47
Figur 6-7	Simuleret søvandstand (blå), forsyningsgrænse ved 0,8 m (orange) og perioder med reduceret indvinding (gul) iberegnet klimaændringer og klimavariabilitet, 1975-1977, (Styringsmodel B).	48
Figur 6-8	Simuleret søvandstand (blå), forsyningsgrænse ved 0,8 m (orange) og perioder med reduceret indvinding (gul) iberegnet klimaændringer og klimavariabilitet, 1996-1997, (Styringsmodel B).	49
Figur 6-9	Sammenligning af modelberegnet Tissø vandstand med eksisterende styring i forhold til sigtepunktskurven (blå kurve), med styringsmodel B (rød kurve) og med zoner (grå kurver) for nuværende klima samt en indvinding på 5 mio. m ³ /år.	51
Figur 6-10	Simuleret vandføring (sort kurve), simuleret vandstand (grøn kurve), overgang zone II-III (lyserød) og krav til minimumsvandføring (blå kurve) for styringsmodel A med nuværende klima samt 5 mio. m ³ /år i indvinding.	52
Figur 6-11	Simuleret vandføring (sort kurve), simuleret vandstand (grøn kurve), overgang zone II-III (lyserød) og krav til minimumsvandføring (blå kurve) for styringsmodel B med nuværende klima samt 5 mio. m ³ /år i indvinding.	53

Figur 6-12	Modelberegnet vandstandsforløb ved lave vandstande ved indvinding på 5 mio. m ³ /år og ingen reduktion (blå kurve), 5 mio. m ³ /år og fuld reduktion (rød kurve), 7 mio. m ³ /år og ingen reduktion (sort kurve), 7 mio. m ³ /år og fuld reduktion (grøn kurve)	55
Figur 6-13	Årlig variation af søvandstanden for årene 2000-2017 for styringsmodel B med en indvinding på 5 mio. m ³ /år. De tre zonegrænser er også afbilledet.	56
Figur 6-14	Søvandstand og koter for tørlægning og oversvømmelse af fugløer (styringsmodel B).	57

Tabeller

Tabel 2-1	Samlet oversigt over interessenter og deres interesser.	15
Tabel 2-2	Prioriterede kriterier for Lokal Styringsmodel 1.	18
Tabel 2-3	Kriterier for styring ved lav vandstand (lokal styringsmodel 1).	18
Tabel 2-4	Prioriterede kriterier for Lokal Styringsmodel 1.	20
Tabel 2-5	Kriterier for styring ved lav vandstand (lokal styringsmodel 1).	21
Tabel 4-1	Delta faktorer, emissionsscenario A1B, år 2070, middel af klimamodeller.	31
Tabel 5-1	Sammenligning af beregnet og målt overholdelse af kriterier for søvandstand, minimumsvandføring samt indvinding.	35
Tabel 5-2	Evaluering af kriterier for nuværende situation sammenlignet med en situation, hvor stemmeværket er fjernet.	37
Tabel 5-3	Evaluering af kriterier for nuværende situation sammenlignet med en situation, hvor minimumsvandføringen søges sikret ved øgede indvindinger.	38
Tabel 6-1	Oversigt over hyppigheden af manglende overholdelse af kriterier for de forskellige scenarier.	50
Tabel 6-2	Indvinding i forhold	53
Tabel 6-3	Oversigt over effekt af indvinding med hensyn til manglende overholdelse af kriterier (procentdel af tid for perioden 2000-2017 hvor kriterier ikke opfyldes)	54

Indledning

Kalundborg Forsyning leverer vand fra Tissø til industrier og virksomheder i Kalundborg. Vandindvindingstilladelsen skal fornys, hvilket giver anledning til at se på mulighederne for at forbedre den nuværende regulering af udløbet og vandstanden i Tissø ud fra stemmeværkets styring. Der er en række interesser knyttet til Tissø samt Øvre og Nedre Halleby Å, og det ønskes derfor belyst, hvordan en ændret styring af stemmeværket vil fungere i forhold til indvundet vandmængde, søvandstand, vandføring m.m.

Tissø og de tilstødende vandområder er alle udpeget som beskyttede Natura 2000 områder, hvor der er en særlig forpligtigelse til at forbedre naturforholdene. Der har derfor været fokus på naturtilstanden nu, og hvordan den kan forbedres i forbindelse med en indvindingstilladelse.

Tissø Forum: Sideløbende har Kalundborg Kommune og Kalundborg Forsyning nedsat "Tissø Forum", med repræsentanter fra en række interessenter omkring søen. Interessenter har bidraget med lokal viden og kvalificeret de forskellige og indimellem modsatrettede interesser. Forskellige udfordringer, muligheder og løsninger har været drøftet i Tissø Forum, og dette har været med til at kvalificere resultater og kommende styringsprincipper.

Arbejdet med en styringsmodel for stemmeværket har vist, at det er vanskeligt at forbedre forholdene ved både højvandssituationer om vinteren og lav søvandstandsstand om sommeren, da det eksisterende anlæg, betående af stemmeværk og omløb, har begrænsninger i begge tilfælde. Analyser peger desuden på, at kapaciteten i Nedre Halleby Å har indflydelse på især højvandssituationen, idet vandføringsevnen ikke er tilstrækkelig til at forhindre høje søvandstandsstande. Resultaterne peger på, at overløbskant, omløbsstryg og stemmeværksporte ikke er indrettet til at kunne opretholde den ønskede minimumsvandføring, når vandstanden bliver lav i sommerperioden. Modelanalysen viser, at den ønskede årstidsvarierende minimumsvandføring kan opnås en større del af tiden, hvis en af de fire stemmeværksporte styres efter vandføring i stedet for som nu ud fra den eksisterende sigtepunktsskurve. Den endelige styringsmodel antager, at stemmeværksporten styres aktivt i forhold til at opretholde vandføringen igennem porten frem for via overløbskant og omløbsstryg. Den nuværende situation er sammenlignet med den nye styringsmodel, og desuden er konsekvenser af indvindingsmængde, klimaændringer og klimavariabilitet belyst.

Denne rapport bygger på et notat fra projektets første fase, hvor lokale forhold omkring Tissø er behandlet. Modellen dækker opstrøms fra Øvre Halleby Å ved Bromølle inklusive Tissø og stemmeværket og er senere udvidet nedstrøms med hele Nedre Halleby Å til Storebælt udløb. Resultater af foreløbige og det endelige forslag til ny styringsmodel er præsenteret. Arbejdet afspejler en proces, hvor Kalundborg Forsyning, Kalundborg Kommune og DHI ud fra løbende resultater og delkonklusioner har afdækket årsager og begrænsninger, hvilket har ført til formulering af den endelige styringsmodel. En erkendelse undervejs i projektet har været, at det nuværende stemmeværk og omløb med den nuværende styring vha. sigtepunktsskurven hverken er i stand til effektivt at sænke høje søvandstandsstande i vinterhalvåret eller at sikre den ønskede minimumsvandføring om sommeren. Det betyder bl.a., at opstillede ønsker og kriterier for maksimal søvandstandsstand og minimal vandføring i Nedre Halleby Å i dag ikke overholdes en stor del af tiden. Manglende opfyldelse er kun i begrænset grad relateret til indvindingsmængde. Der er set på muligheder for at forbedre dette. Samtidig har møder, herunder i Tissø Forum, bidraget til at diskutere og fokusere indsatsen.

Formål

Jævnfør udbud for projektet er formålet at opnå en styring af vandstanden i Tissø, så der nu og i fremtiden kan leveres overfladevand til Kalundborgs Industri med en høj grad af forsyningssikkerhed. Regulering af vandstanden skal derudover ske på en bæredygtig måde, der tager hensyn til landbrug, natur, rekreative interesser og risikoen for oversvømmelser. Desuden skal de ændrede forhold som følge af klimaforandringer med f.eks. øgede nedbørsmængder, tørrere somre, stigning i grundvandsstand og havniveau tages i betragtning.

Fremgangsmåde

I projektet opstilles og aftestes styringsmodeller ved hjælp af en model af sø, vandløb og stemmeværk. Modellen beskriver :

- Det eksisterende stemmeværk og den eksisterende styring som funktion af Tissøs vandstand. Modellen kalibreres og køres over en årrække med en indvinding svarende til den nuværende på 3,5 mio. m³/år. Indvindingens betydning for vandstand og vandføring til Nedre Halleby Å vurderes.
- I Tissø Forum etableres en samlet forståelse af de kriterier, der vil tilfredsstille de forskellige interessenters behov og ønsker.
- I projektets første del formuleres og aftestes 3 lokale styringsmodeller baseret på lokale forhold, dvs. vandstand og vandføring i Tissø og dens udløb til Nedre Halleby Å. Her ses på øget indvinding svarende til 5-7 mio. m³/år.
- I projektets anden del udvikles en holistisk styringsmodel, som bygger på erfaringerne fra de lokale modeller og inddrager forholdene i de øvrige dele af oplandet, herunder Nedre Halleby Å, fra Tissøs udløb til Storebæltskysten.

Styringsmodellerne aftestes for at belyse, i hvilken grad de kan opfylde kriterier, herunder miljøkrav, forsyningssikkerhed m.m. opstillet i samarbejde med interessenter. Aftestningen inkluderer klimavariation og klimaændring. Styringens performance måles bl.a. på den samlede manglende periodevise opfyldelse af de enkelte kriterier.

1 Beskrivelse af Tissø stemmeværk

Tissø stemmeværks nuværende udformning, dimensioner og styring er beskrevet i det følgende

1.1 Beskrivelse

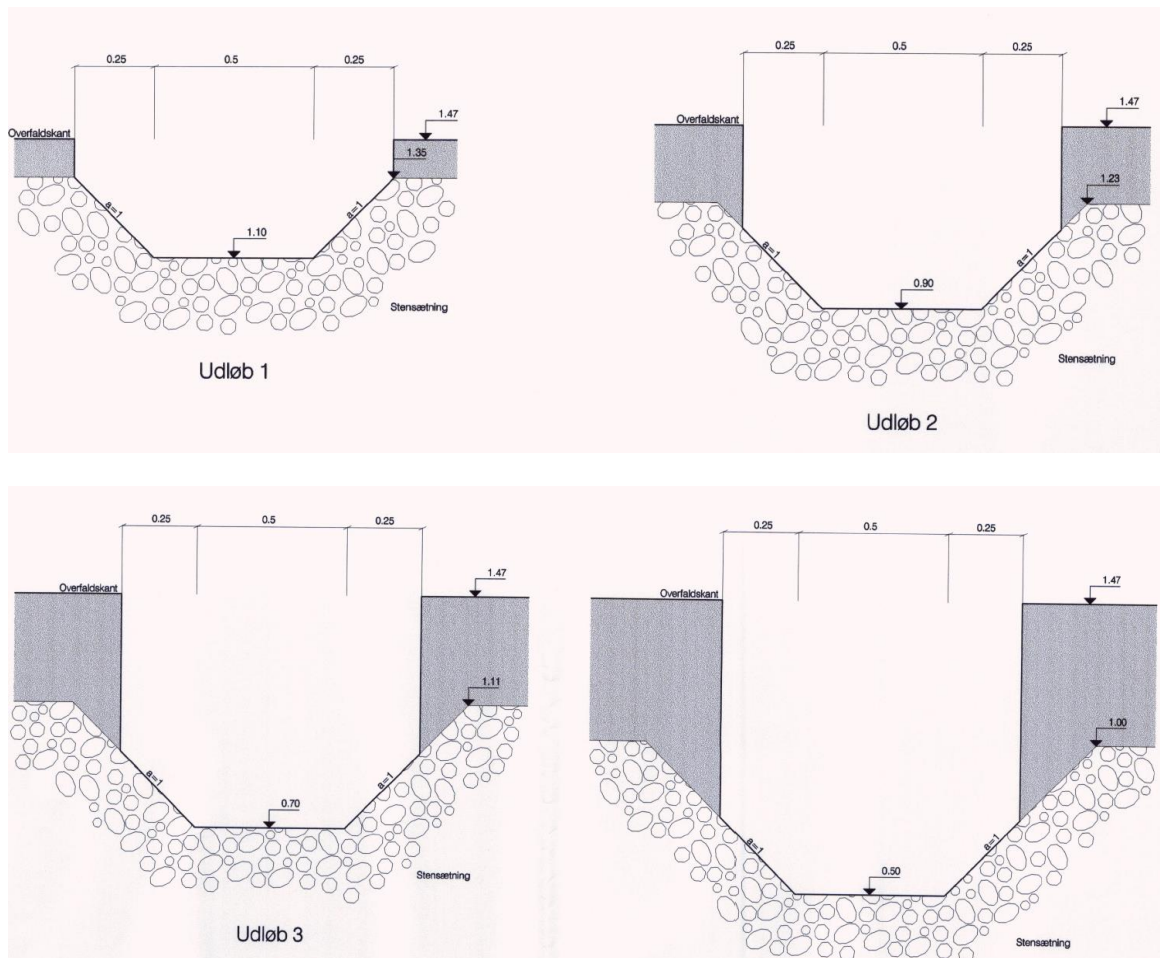
Stemmeværket, der styrer udstrømningen fra Tissø, består af 3 manuelle slug, en automatisk port samt et omløbsstryg. De tre manuelle slug er besværlige at justere, og i praksis bruges de kun ved meget høje vandstande. De tre manuelle slug har hver en bredde på ca. 2,25 meter og en maksimal højde på 1,47 meter. Den automatiske port søger at holde vandstanden på det ønskede niveau. Det sker ved, at der hver sjette time beregnes en gennemsnitsvandstand i søen. Er denne under det ønskede niveau, sænkes porten 6 centimeter. Er vandstanden over det ønskede niveau, løftes porten 6 centimeter. Selve porten er ca. 2,25 meter bred med en maksimal kote for portens underkant på 1,64 meter.

Omløbsstryget er ca. 60 meter langt med en langsgående overfaldskant i kote 1,47 meter. Kanten har fordybninger med sænket overløbskote. Omløbet skal sikre en minimumsledestrøm, således at havørred kan vandre opstrøms.

Stemmeværket er vist på Figur 1-1 . Overløbet ved omløbsstryget ses på Figur 1-3.



Figur 1-1 Stemmeværket med tre manuelle slug samt en automatisk port. Omløbsstryget ses i baggrunden.



Figur 1-2 Tegning af overløbskant med udsparring (koter i DNN), Hedeselskabet 2002.

Figur 1-2 er en tegning fra 2002 med angivelse af de koter og dimensioner, som stemmeværk, porte og overfaldskant er konstrueret efter.



Figur 1-3 Overløbskant ved omløbsstryget. Der ses flow ved to udskæringer i spunsvæggen.

Formålet med stemmeværket er at regulere vandstanden i Tissø således, at den følger en nærmere specificeret styrekurve. Det vides ikke præcist, hvorledes denne styrekurve er fremkommet, men den angiver et gradvist fald i Tissøs vandstand i forårs- og sommermånederne, som tilstræber at tilgodese de forskellige interesser. Af disse kan nævnes mulighed for vandindvinding, sikring af, at vandstanden ikke overstiger hensynet til omkringliggende landbrug samt sikring af en minimumsvandføring nedstrøms stemmeværket.

2 Lokale styringsmodeller

De lokale styringsmodeller ser på forholdene ved Tissø

2.1 Beskrivelse

Igennem Tissø Forum initiativet er en proces til dialog og kortlægning af forskellige hensyn og interesser vedrørende Tissø igangsat. Det er målet at omsætte de formulerede hensyn til kvantitative kriterier i form af krav om målsætninger for vandstande og vandføringer igennem Halleby Å og Tissø-systemet. Styringsmodeller for Tissø Stemmeværk inddrager prioriterede kriterier og søger ud fra de aktuelle forhold og stemmeværkets fysiske indretning løbende at regulere afløbet til Nedre Halleby Å, så flest mulige kriterier samtidig kan opfyldes.

2.2 Styringskriterier

Det har været målet at kortlægge hensyn, der knytter sig til styringen af stemmeværket, og som kan omsættes i kvantitative kriterier for vandstand og vandføringer.

2.2.1 Vandindvinding

Af hensyn til sikring af vandforsyningen nu og i fremtiden til erhvervsliv og industri i Kalundborg søges om en ny og evt. øget vandindvindingstilladelse for Tissø. Vandet fra Tissø anvendes efter rensning som procesvand i virksomhedernes produktion og erstatter dermed indvinding fra grundvand. Den gamle indvindingstilladelse på 5 mio. m³/år skal fornyes, og effekten af en evt. øget indvindingstilladelse på 7 mio. m³/år skal undersøges.

Derudover er der krav om reduktion af indvindingen, hvis vandstanden falder til under 0,8 m.

2.2.2 Fugle

Øer og holme i Tissøs sydøstlige del udgør ifølge DOF vigtige ynglepladser for dværgterne, fjordterne og klyde. Området er fuglebeskyttelsesområde med Natura 2000 status. I fuglenes yngleperiode skal øer i Tissø være tørlagte, men ikke landfaste. Det betyder, at Tissøs vandspejlskote i perioden fra april til juli ikke må overstige 1,6 m. I vinterperioden bør øerne være vanddækkede for bl.a. at undgå tilgroning. GPS-målinger udført af Kalundborg Kommune i december 2018 viser, at den maksimale kote på øerne er omkring 1,9 m. Det betyder, at der er formuleret et krav om, at vandspejlskoten i perioden november-marts bør ligge på minimum 1,9 m. Desuden vil det være ønskeligt, at vandspejlskoten udenfor yngleperioden er mindst 1,6 m. For en fremtidig situation vil det sandsynligvis, om nødvendigt, være muligt at hæve øernes koter ved at udlægge sand eller grus på dem.



Figur 2-1 Tissø fugleøer.

2.2.3 Fisk

Af hensyn til havørredens opvækst og vandring er der krav til at opretholde minimumsvandføringen i Nedre Halleby Å. Vandføringen må for hele året ikke falde under $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. September til januar er opgangs- og yngleperiode for laksefisk. Her er en vandføring på $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ideel med et minimum på $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figur 2-2 Nedre Halleby Å nedstrøms stemmeværk.

2.2.4 Flora

Søvandstanden og dens variation har betydning for vegetationen langs bredden af Tissø. Etårige planter når ikke at udvikle sig, hvis vandstanden er for høj for længe. Derfor skal det

tilstræbes, at vandstandsforholdene ikke ændres markant, dvs. samme maksimum, minimum og årstidsvariation som i dag. Til kontrol af ændringer i vandstandsforhold foreslås foretaget en sammenligning af vandstandsvarighedskurve for Tissø under nuværende forhold og ved ændret styring.



Figur 2-3 Overdrev langs Tissøs nordvestlige søbred.

2.2.5 Landbrug

Markarbejde og dyrkning på landbrugsarealer langs Tissø kan være påvirket af høj søvandstand. Det drejer sig om våde marker, højt jordvandindhold og utilstrækkelig dræning, især ved jordbearbejdning i forårs månederne. Det skal generelt tilstræbes, at søvandstanden ligger under 1,47 m, men særligt i perioden marts-maj er det kritisk og et krav i.f.t. landbrugsdrift. Generelt er lavere vandstand at foretrække ud fra en landbrugssynsvinkel og en ny styring bør i lighed med sigtepunktetskurven sikre at vandstanden neddrøles i forår-sommerperioden.

For Nedre Halleby Å, nedstrøms Tissø, kan perioder med høj afstrømning, primært i vinterhalvåret, medføre forhøjet vandstand, der kan forhindre dræning og afvanding samt skabe oversvømmelser langs vandløbet. Der er ikke fastlagt en maksimumvandføring, der afspejler vandløbets nuværende kapacitet. En maksimal vandspejlskote på 1,4 m ved Bøstrups Ås tilløb til Nedre Halleby Å (Gørlev landevej) benyttes som mål for, hvornår oversvømmelse langs Nedre Halleby å indtræffer. Forholdene nedstrøms Tissø inddrages ikke i første omgang i forbindelse med en lokal styringsmodel men i det efterfølgende arbejde.

2.2.6 Rekreative formål

Der er rekreative interesser i forhold til Tissø, herunder roning. Roerne kan være generet af høje søvandstande med risiko for oversvømmelse af roklubbens anlæg. Af hensyn hertil bør søens vandstand ikke overstige 2,4 m på noget tidspunkt. Det samme gør sig gældende for havnen Lille Fuglede.

En samlet oversigt over interessenter og interesser er samlet i Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Samlet oversigt over interessenter og deres interesser.

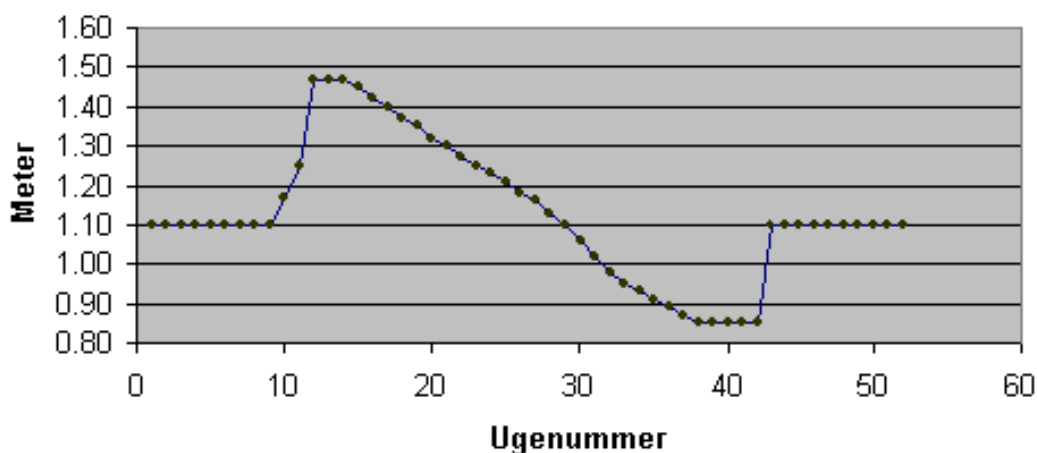
Interessent	Interesse
Indvinding	Ønsker 3,5-5,0 mio m ³ /år (på længere sigt 7,0 mio m ³ /år)
Bredejere/landbrug	Ønsker ikke vandstande over 1,47 m Ønsker lav vandstand i sommerhalvåret ifht adgang på jorde
Vand økosystem (ørred) Sportsfiskeri	Mindst 0,5 m ³ /s året rundt i NHÅ Mindst 0,7 m ³ /s i sept – jan i NHÅ Helst 1,5 m ³ /s i sept – jan i NHÅ
Roklubben + Havnen Lille Fuglede	Under 2,4 m vandstand for at beskytte klubhus og havnens huse
Fugle	Frie øer om sommeren (apr til oktober, ca. 1,2-1,4 m) og oversvømmet i løbet af vinteren (mindst 1,6 m i løbet nov-marts)
Botanik	En variation i vandstanden som ligner den nuværende

2.3 Kravkurver

2.3.1 Sigtepunktskurven

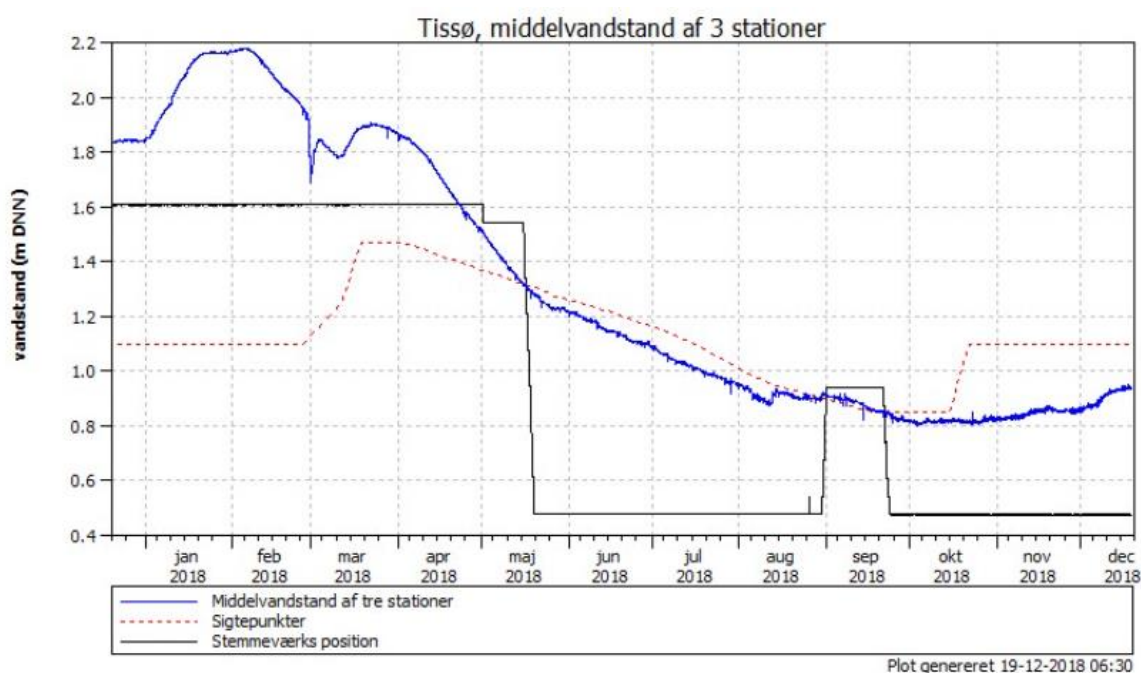
Det nuværende Tissø Stemmeværk og dets styring daterer sig tilbage til 2002. Hvor styringen tidligere var manuel, blev der indført en delvist automatiseret og delvist manuel styring af bygværkets 4 slug. Det betyder, at gennemstrømningen af 3 slug i dag reguleres manuelt ved brædder. Desuden er der etableret et omløb med en overfaldskant, og for 1 slug reguleres stemmeværksporten automatisk ud fra observeret realtidsvandstand i Tissø. Søvandstanden neddrøles over forår og sommer ud fra en sigtepunktskurve. Sænkningen forløber langsommere end tidligere, og ved at tilbageholde mere vand i søen er det hensigten at reducere en eventuel effekt af indvinding.

Sigtepunkter Tissø



Figur 2-4 Sigtepunktskurven (jf. Kalundborg Kommunes hjemmeside, "Vandstanden i Tissø").

Figur 2-5 viser den målte vandstand i Tissø, sigtepunktskurven og positionen af den automatiske port igennem 2018. Figuren viser to problemer med den eksisterende styring: For det første er vandstanden langt over sigtepunktskurven i vinterperioden og udenfor stemmeværkets styringsinterval (ca. 0,85-1,50 m). Dette kan skyldes manglende reguleringsmulighed i det foregående efterår. Stemmeværket har kun én automatisk port, og reguleringen af de manuelle slug sker ikke regelmæssigt. For det andet er der situationer i efteråret, hvor vandstanden er for lav, hvilket betyder, at den automatiske port lukker helt i. Dette medfører, at kravet til minimumsvandføringen nedstrøms stemmeværket ikke altid kan opfyldes hverken via automatport eller omløbsstryg. Endelig bemærkes den usædvanligt langsomme genopfyldning af Tissø i sidste del af året efter en tør sommer med lav søvandstand. Billedet fra 2018 med høj vintervandstand og lav sommervandstand ses også for tidligere år.



Figur 2-5 Styrekurven for Tissø, målt vandstand samt positionen af stemmeværkets automatiske port i 2018 (fuldt åben januar-april og lukket om sommeren).

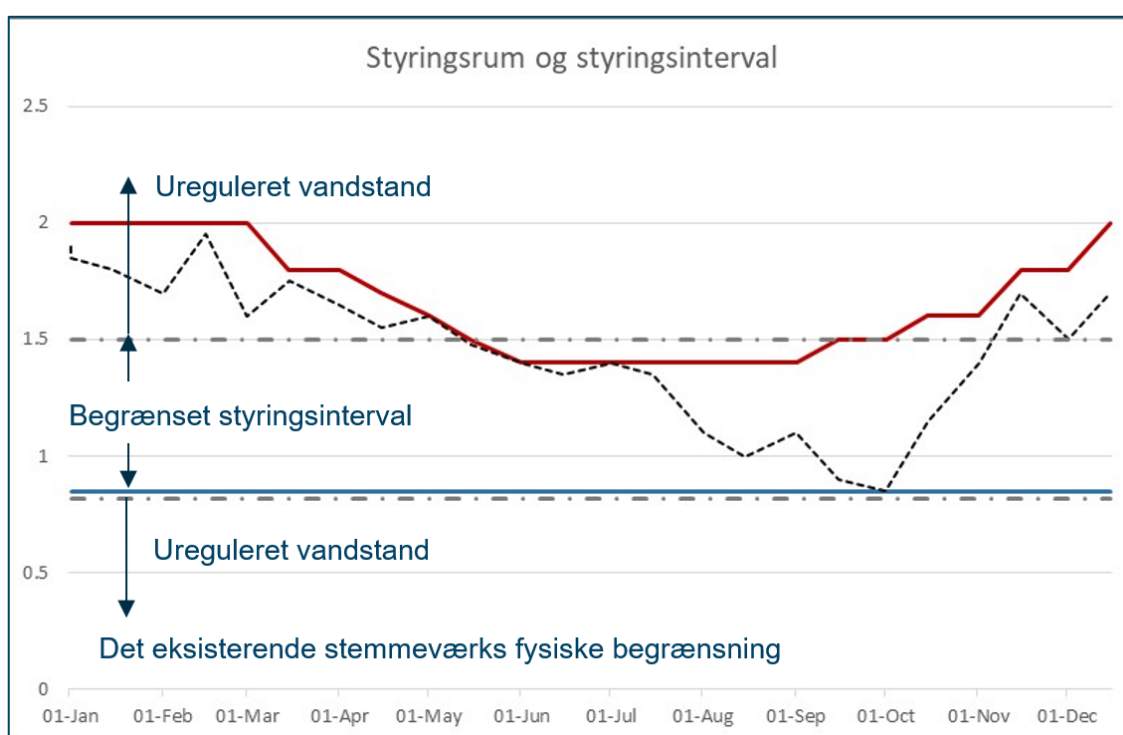
Set over flere år kan der i sensommeren optræde lave vandstande ved stemmeværket, hvor det kan være vanskeligt samtidigt at opretholde indvinding og minimumsvandføring. Det taler for at tilbageholde vand i Tissø og dermed starte neddroslingen af vandstand fra et højere udgangspunkt i foråret. Derfor kan det være hensigtsmæssigt ikke at følge en sigtepunktskurve men i stedet sikre et forløb, hvor en højere vandstand, udtrykt ved en øvre kravkurve, ikke overskrides.

Den øvre kravkurve kan være sammensat af flere kriterier dækkende hele året, hvor der angives en maksimalt acceptabel vandstand på givne datoer. Styringen skal sikre, at den aktuelle vandstand opstrøms stemmeværket sænkes tilstrækkeligt til at ligge på eller under den øvre kravkurve.

Figur 2-6 viser en illustration af kravkurveprincippet (værdierne afspejler ikke den styringsmodel, der benyttes i den videre analyse). Den øvre kravkurve (rød linje) angiver den tilstræbte maksimale vandstand, og den nedre kravkurve (blå linje) viser den tilstræbte minimale vandstand. De stiplede vandrette linjer viser det vandstandsinterval, som det

nuværende stemmeværk kan dække. Udenfor intervallet kan stemmeværket ikke regulere vandføring og vandstand. Den stiplede linje viser et fiktivt forløb af vandstand for et givet år. Da vandstanden i dette tilfælde holder sig indenfor et styringsrum defineret af nedre og øvre kravkurve, vil styringen i dette tilfælde fungere tilfredsstillende. Samtidig skal den sikre, at krav til indvinding og minimumsvandføring løbende er opfyldt. Helt overordnet vil en styring, der lægger sig tæt op ad den øvre kravkurve, øge opmagasineringen, minimere risikoen for kritisk lave vandstande og øge forsyningssikkerheden.

Princippet med kravkurver relateret til vandstand var udgangspunkt for formulering af lokale styringsmodeller. I projektføreløbet blev det klart, at vandstandskrav ikke nødvendigvis sikrer vandføringskrav, hovedsageligt på grund af, at det eksisterende stemmeværk ikke kan sikre de påkrævede vandføringer ved lave vandstande. Derfor bygger den senere formulerede, endelige styringsmodel specifikt på vandføring og vandføringskrav indenfor givne zoner (afsnit **Error! Reference source not found.**).



Figur 2-6 Principskitse: Øvre og nedre kravkurve til styring af Tissø Stemmeværk.

2.4 Styringsmodeller

I styringsmodellerne indgår ovenfor nævnte kriterier. Kravene til vandstand for de enkelte kriterier er omsat i en nedre og øvre vandstandskravkurve som beskrevet i det følgende. Der skelnes imellem krav og ønsker, hvor sidstnævnte ikke indgår direkte i styringsmodellen, men det evalueres ud fra modelresultaterne, hvorvidt styringen kan tilgodese ønsker.

Prioritering spiller en rolle, f.eks. ved konflikt imellem krav til indvinding og krav til minimumsvandføring. Dette kan ske, hvis der optræder meget lave vandstande og vandføringer, f.eks. i forbindelse med en tør sommer. Konsekvenser ved henholdsvis prioritering af indvinding over øvrige interesser eller omvendt kan illustreres igennem forskellige styringsmodeller, hvor vand

tildeles i forskellig rækkefølge. Nedprioritering af et givet kriterium betyder øget risiko for udfald og manglende opfyldelse.

Modellering af de tre lokale styringsmodeller er gennemført for at få en generel forståelse af dynamikker og muligheder i Tissøs vandsystem i forhold til forskellige prioriteringer. De forskellige styringsmodeller skal således ikke forstås som konkrete forslag.

2.5 Lokal styringsmodel 1: Ny nedre og øvre kravkurve, indvinding opprioriteret

Styringsmodel 1 favoriserer indvinding. Det vil sige, at der tillades høje vandstande i Tissø i vinterperioden for at sikre tilstrækkeligt med vand senere på året, og ved lave vandstande fortsætter indvindingen på trods af, at det potentielt kan konflikte med kravet om at opretholde minimumsvandføring til Nedre Halleby Å. Det skal bemærkes, at stemmeverket som nævnt ikke nødvendigvis kan regulere forholdene ved vandstande udenfor intervallet (0,85-1,5 m). Styringsmodel 1 inkluderer kriterierne i Tabel 2-2. Vandstandskrav (H) relaterer sig til Tissøs vandspejlkote og vandføringskrav (Q) til Nedre Halleby Å.

Tabel 2-2 Prioriterede kriterier for Lokal Styringsmodel 1.

Lokal 1	Hensyn	Prioritet	Målsætning/krav
Kriterium 1	Indvinding	1	Nuværende 3,5 mio. m ³ /år Øges til 5,0-7,0 mio. m ³ /år
Kriterium 2	Fugle, yngleperiode	2	Hmax : 1,60 m, april-juli, tørlagte fugleøer (krav)
			Hmin: 1,90 m, november-marts, oversvømmede øer (krav)
			Hmax: 1,6 m, august-oktober, (ønske)
Kriterium 3	Fisk, gydning, opvækst og opgang	2	Qmin: 0,5 m ³ /s (krav hele året)
			Qmin: sep-jan, 0,7 m ³ /s (krav)
			Qmin: sep-jan, 1,5 m ³ /s (ønske)
Kriterium 4	Flora	2	Hmin-Hmax, uændrede vandstandsforhold, sæsonvariation (ønske)
Kriterium 5	Tørlagt landbrugsjord, Tissø bredejere	2	Hmax: 1,47 m, marts-maj (krav)
			Hmax: 1,47 m maj-marts (generelt ønskes lavere vandstande i perioden)
Kriterium 6	Undgå oversvømmelse af roklub og Havnen Lille Fuglede	2	Hmax: 2,4 m, hele året (krav)

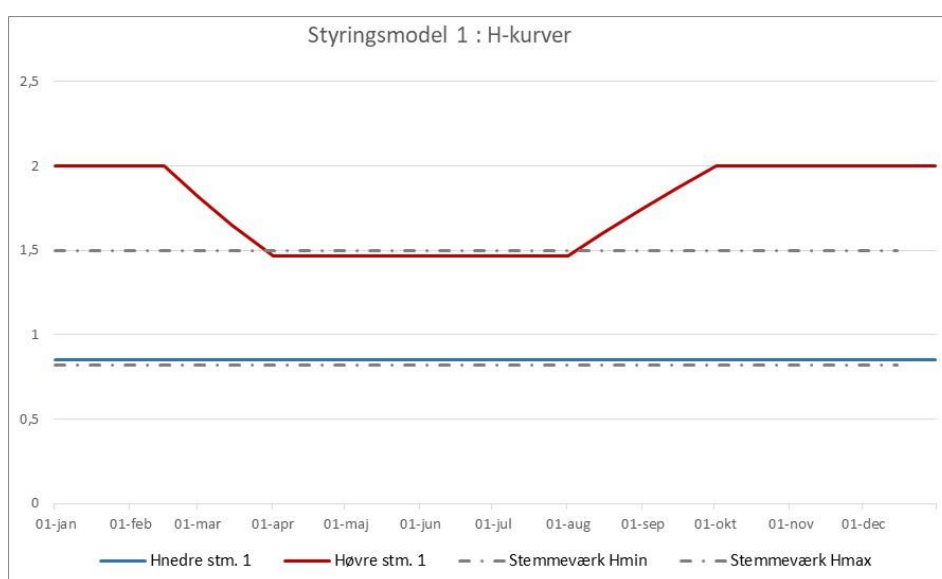
Prioriteringen imellem indvinding og minimumsvandføring ved lave vandstande formuleres ud fra:

Tabel 2-3 Kriterier for styring ved lav vandstand (lokal styringsmodel 1).

Vandspejlskote(m)	Indvinding	Min. vandføring
$H < 0,5$ m	0	100 %
$0,5$ m $< H < 0,8$ m	100 %	100 %
$0,8$ m $< H$	100 %	100 %

Stemmeværket forudsættes konstruktionsmæssigt uændret, svarende til det nuværende og dermed også vandstandsintervallet, der kan styres indenfor. Det vil sige, at stemmeværket ikke forventes at kunne regulere under 0,8 m og over 1,47 m.

På baggrund af krav til vandstand er en øvre og nedre kravkurve defineret (Figur 2-7). Den øvre kravkurve er sammensat af de givne kriterier for maksimal vandstand indenfor de angivne perioder (farvemarkeret) samt overgange, der kan understøtte en passende gradvis tilpasning af vandstand.



Figur 2-7 Kravkurver for Lokal Styringsmodel 1.

I modelberegningen trækkes en indvindingsmængde på 5-7 mio. m³/år ud af Tissø. og der frigives minimum 0,5-0,7 m³/s til Nedre Halleby Å. Samtidig styres stemmeværket som i dag, ikke i forhold til sigtepunktsskurven, men efter at holde vandstanden tæt på den øvre kravkurve og over den nedre kravkurve. Variationen i Tissøs tilstrømning og til dels fordampningen over tid er en vigtig forudsætning for, hvilket vandstands niveau styringen kan medvirke til at opretholde.

2.6 Lokal styringsmodel 2: Ny nedre og øvre kravkurve, indvinding nedprioriteret

Styringsmodel 2 favoriserer andre hensyn end indvinding. Det vil sige, at der indføres en maksimal vandstand på 2,0 m i Tissø i vinterperioden for at tilgodese afvanding, og ved lave vandstande går kravet om at opretholde minimumsvandføring til Nedre Halleby Å forud for indvinding.

Kriterier for lokal styringsmodel 2 er identiske med lokal styringsmodel 1, men med ændret prioritet imellem kriterierne.

Tabel 2-4 Prioriterede kriterier for Lokal Styringsmodel 1.

Lokal 1	Hensyn	Prioritet	Målsætning/krav
Kriterium 1	Indvinding	2	Nuværende 3,5 mio. m ³ /år Øges til 5,0-7,0 mio. m ³ /år
Kriterium 2	Fugle, yngleperiode	1	Hmax : 1.60 m, april-juli, tørlagte fugleøer (krav)
			Hmin: 1,90 m, november-marts, oversvømmede øer (krav)
			Hmax: 1,6 m, juli-november, (ønske)
Kriterium 3	Fisk, gydning, opvækst og opgang	1	Qmin: 0,5 m ³ /s (krav hele året),
			Qmin: sep-jan, 0,7 m ³ /s (krav)
			Qmin: sep-jan, 1,5 m ³ /s (krav)
Kriterium 4	Flora	1	Hmin-Hmax, uændrede vandstandsforhold, sæsonvariation (ønske)
Kriterium 5	Tørlagt landbrugsjord, Tissø bredejere	1	Hmax: 1,47 m marts-maj (krav)
			Hmax: 1,47 m maj-marts (ønske)
Kriterium 6	Undgå oversvømmelse af roklub	1	Hmax: 2,0 m, hele året (krav)

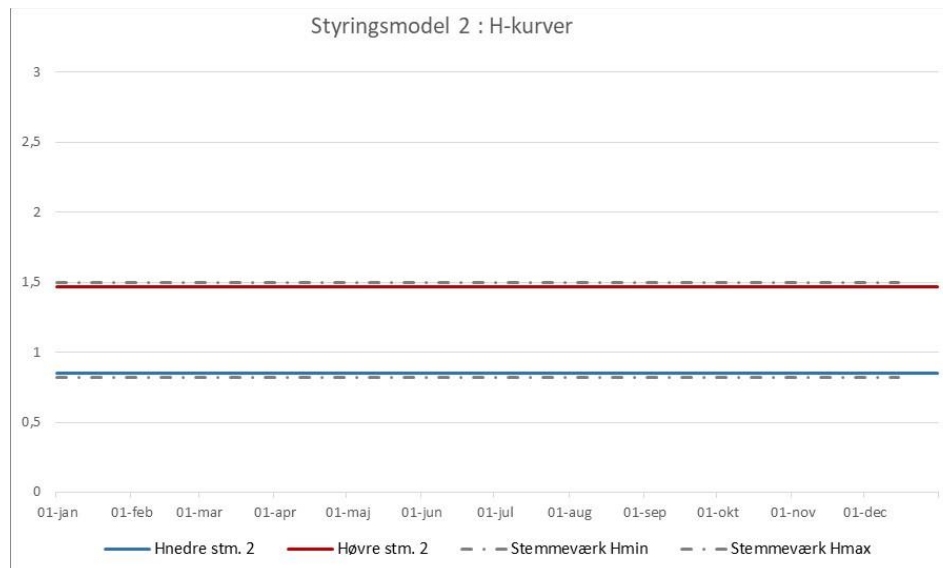
Prioriteringen imellem indvinding og minimumsvandføring ved lave vandstande formuleres ud fra:

Tabel 2-5 Kriterier for styring ved lav vandstand (lokal styringsmodel 1).

Vandspejlskote(m)	Indvinding	Min. vandføring
H < 0,80 m	65 % 3,2 mio. m ³ /år ud af 5,0 mio. m ³ /år (Max. 360 m ³ /time)	100 %
0,8 m < H < 0,85 m	100 % 5,0 mio. m ³ /år ud af 5,0 mio. m ³ /år (Max 192.000 m ³ /14 dage)	100 %
0,85 m < H	100 % 5,0 mio. m ³ /år ud af 5,0 mio. m ³ /år (Max 269.000 m ³ /14 dage)	100 %

Tallene i Tabel 2-5 er hentet fra "Tilladelse til øget vandindvinding af vand fra Tissø, vilkår for tilladelse til øget indvinding af vand fra Tissø", 2001.

Ud fra vandstandsmålinger på station 55.04 og 55.08 ses det, at siden 2001 har vandstanden 4 gange været under 0,8 m (i alle tilfælde i september eller oktober). Den laveste målte værdi er 0,75 m.



Figur 2-8 Kravkurver for lokal styringsmodel 2.

2.7 Lokal styringsmodel 3: Ombygning og automatisering af stemmeværket

Begrænsningen i forholdene langs Nedre Halleby Å og det nuværende stemmeværk bevirker, at styring ikke er mulig ved vandstande under 0,8 m eller over 1,5 m. For høje vandstande kan nedstrøms kapacitet i Nedre Halleby Å være begrænsende for, hvor stort afløbet fra Tissø kan

være. Vandstande over 1,5 m forekommer ofte i vinterperioden. Den manglende evne til at regulere mindsker mulighederne for samlet at tilgodese kriterierne.

Lokal styringsmodel 3 antager, at stemmeværket kan modificeres, erstattes eller fjernes. Der er i den forbindelse foretaget modelkørsler til at belyse effekten.

Stemmeværket styres i dag delvist automatisk og delvist manuelt. At kun et slug kan reguleres ved en automatisk styret stemmeværksport begrænser muligheden for at sænke søvandstanden. Den manuelle isætning eller fjernelse af brædder i de 3 øvrige slug sker af praktiske årsager sjældent og oftest kun ved meget høje vandstande. Det antages først, at stemmeværket kan udbygges til fuld automatisering ved samtidig regulering af alle 4 slug.

Efterfølgende er det undersøgt, om stemmeværket overhovedet har effekt på høje og lave vandstande og evne til at opfylde kriterierne. Det sker ved at fjerne stemmeværket fra modelopsætningen og derefter genkøre modellen. Denne situation tilnærmer den naturlige, uregulerede tilstand.

2.8 Resultater af lokale styringsmodeller

De tre lokale styringsmodeller beskrevet i det ovenstående er implementeret i modellen (beskrevet i afsnit 0), og hovedresultater samt delkonklusioner kan ses i afsnit 5.

3 Modelværktøj

En dynamisk model af sø, vandløb og udløbsstruktur er udviklet til at foretage konsekvensberegninger og afteste alternative styringsmodeller

3.1 Formål

Der er udviklet et dynamisk modelværktøj til afestning af opstillede styringsmodeller. Modellen inkluderer Nedre Åmose Å, Øvre Halleby Å fra Bromølle (Slagelsevej) og nedstrøms herfor, Tissø, Tissø stemmewærk, Bøstrup Å, Nedre Halleby Å, samt udløbene til Storebælt via Sukkerkanalen og Flasken.

3.2 2001-model

Modellen baserer sig på en model udviklet af DHI i 2001 for Vestsjællands Amt. Modelområdet er vist i Figur 3-1.



Figur 3-1 Oversigt over sø og vandløb medtaget i modellen.

Yderligere indeholder modelværktøjet en nedbørsafstrømningsmodel dækkende det topografiske opland opstrøms og nedstrøms Tissø.

3.3 Opdatering

Modellen fra 2001 beskrevet ovenfor er opdateret på tre punkter.

- 1) For hele Nedre Halleby Å er der inkluderet nye tværsnit opmålt i 2015.
- 2) Yderligere er hele udformningen omkring udløbet fra Tissø opdateret, så det afspejler det faktiske stemmeværk samt omløbet, se Figur 3-2.
- 3) Klimadata, vandføringsdata og vandstandsdata er opdaterede for periode 2000-2018.



Figur 3-2 Skematisk repræsentation af omløbet samt stemmeværk.

I beskrivelse af stemmeværket er de tre faste slug beskrevet som ét fast overløb med en bredde på 6,75 meter (2,25 for hvert af slugene) og en overløbskote på 1,47 meter. Den automatiske port har ligeledes en bredde på 2,25 meter. Bundniveauet er 0,48 meter, svarende til laveste niveau af porten, hvis underkant kan hæves til maksimalt 1,64 meter. Disse værdier er i god overensstemmelse med målinger af portens position. Ved selve kalibreringen af modellen er anvendt målinger af portens position. I alle andre situationer er der sat regler op for, hvornår, med hvilken frekvens, og hvor meget porten opereres.

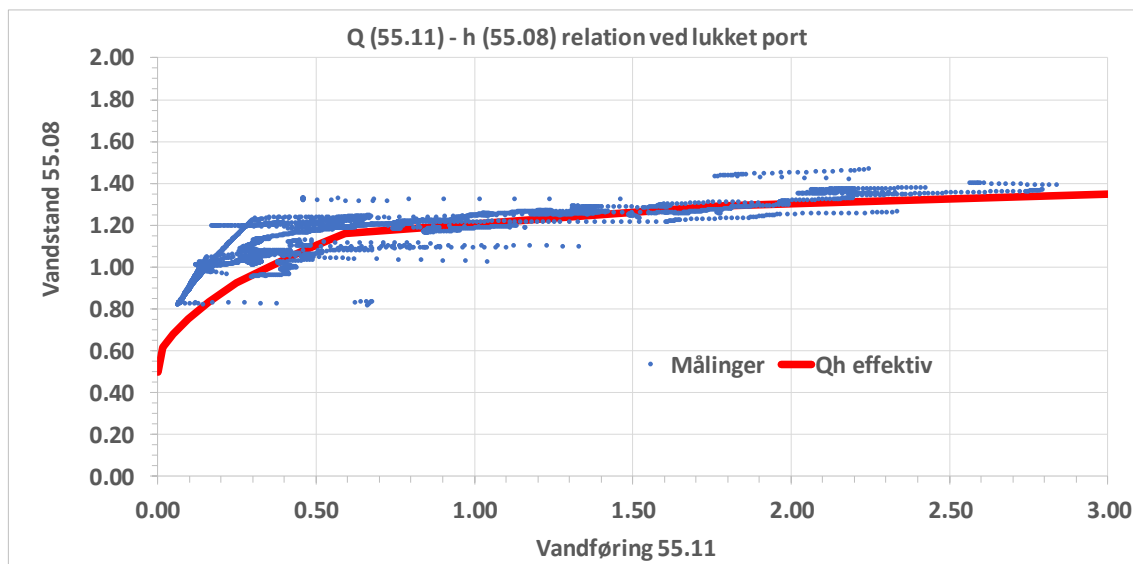
Overfaldskanten i forbindelse med omløbet er i modellen beskrevet som en såkaldt link-kanal med en kote-breddeprofil baseret på tegningen i Figur 1-2. Det bliver således en overløbsformel, der bestemmer afstrømningen til omløbskanalen.

3.4 Kalibrering

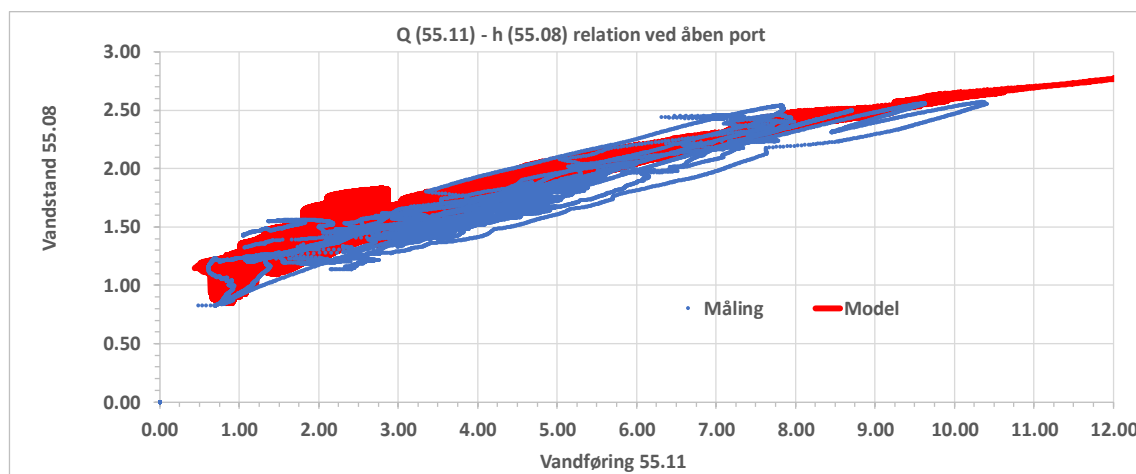
Modellen er kalibreret for perioden 2004-2017 mod vandstanden i søen (station 55.08) og for perioden 2007-2017 for vandføring gennem stemmeværk og vandstand nedstrøms stemmeværk (station 55.11). Ved kalibrering af modellen er der benyttet tidsserie af målinger af stemmeværkets position.

Ved selve beskrivelsen af omløbet er der anvendt en effektiv bredde af dette. Dette skyldes, at omløbet fungerer som et sideoverløb placeret ved vandløbets brink, og det vil derfor ikke være lige så effektivt som et overløb placeret på tværs af strømningsretningen. Figur 3-3 viser vandføringen plottet mod vandstanden i søen i tilfælde, hvor stemmeværket er lukket, og vandstanden er under 1,47 m. Dette sikrer, at de målte vandføringer kan tages som udtryk for omløbets vandføringsevne. Qh-relationen for omløbet, som den beregnes af modellen, er også vist. Specielt for vandføring er der glimrende overensstemmelse mellem model og målinger, når

vandstanden er knap 0,5 m og højere. Et tilsvarende plot for situationer, hvor porten er fuldt åben, er vist i Figur 3-4. Også her er der en fin overensstemmelse mellem målinger og modelresultater. Det betyder, at modellen giver en pålidelig beskrivelse af situationerne med lav vandføring og vandstand i de situationer, hvor minimumsvandføringen bliver kritisk

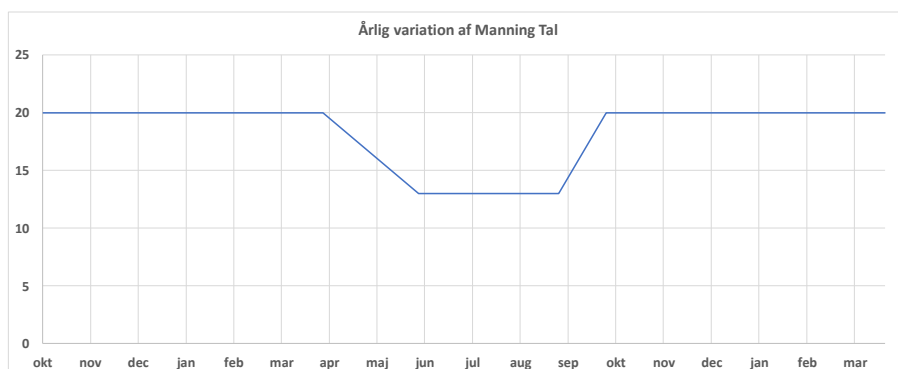


Figur 3-3 Plot af målt og modelberegnet søvandstand (st. 55.08) mod vandføring (st.55.11) i situationer, hvor stemmeværket er lukket.



Figur 3-4 Plot af målt og modelberegnet søvandstand (st. 55.08) mod vandføring (st.55.11) i situationer, hvor stemmeværket er åbent.

Den hydrauliske model er blevet kørt under anvendelse af de målte stemmeværkspositioner. Indstrømning til modelområdet er bestemt af tidsserie for målt vandføring ved Bromølle station, samt hvad der genereres fra nedbør-afstrømningsmodellen for områderne nedstrøms Bromølle. Da vandløbene er grødepåvirkede, er der anvendt en årlig variation af modstandstallet. Der er benyttet den samme variation for samtlige år, se Figur 3-5.

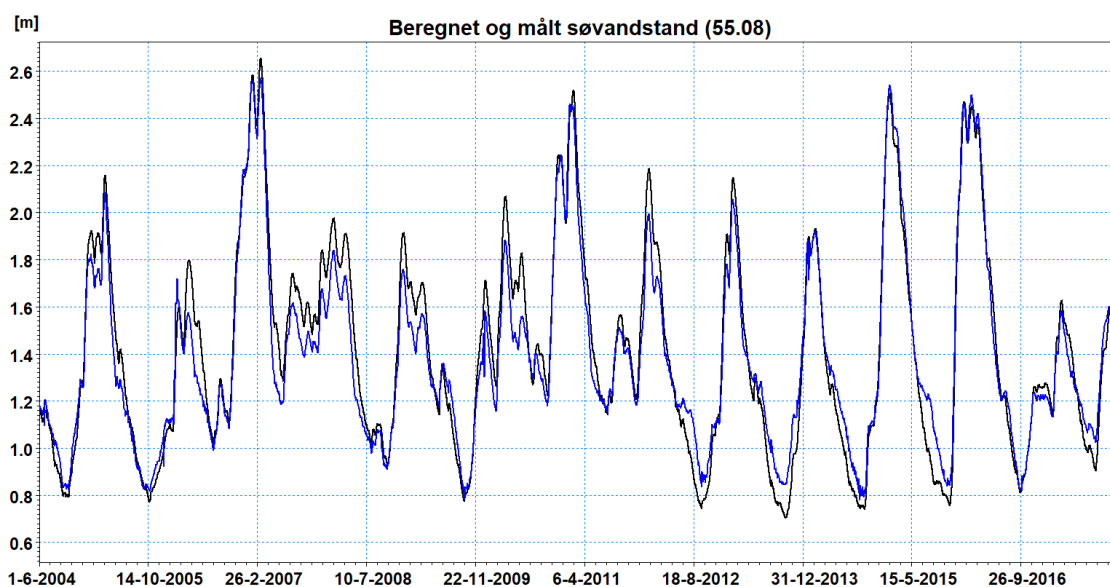


Figur 3-5 Den årlige variation af Manning tallet som er anvendt under kalibreringen.

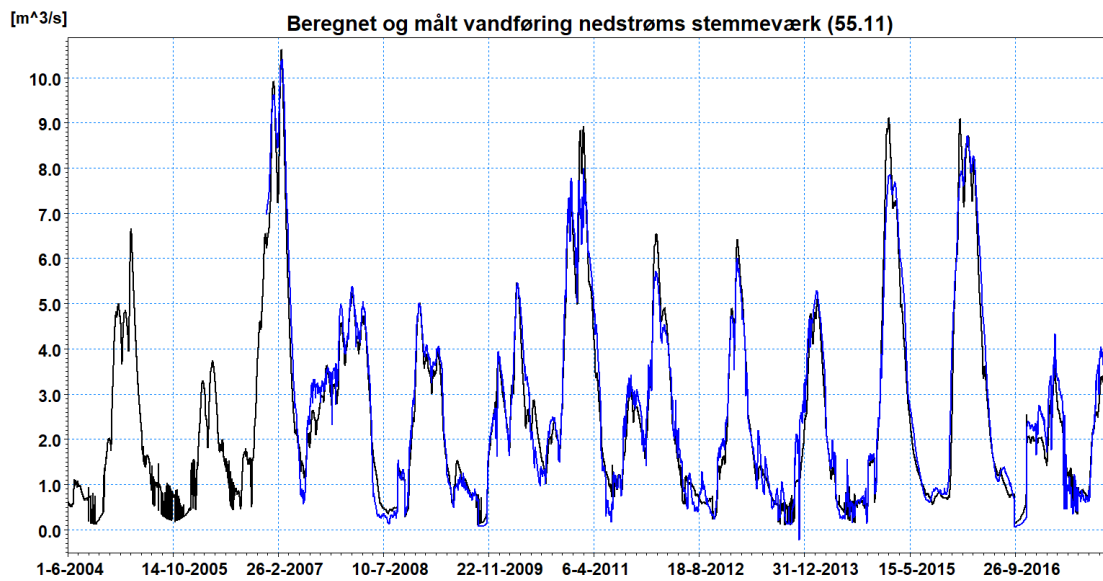
Modelresultaterne for søvandstanden, samt for vandføring og vandstand nedstrøms stemmeværket, er vist i hhv. Figur 3-6, Figur 3-7 og Figur 3-8. Selve kalibreringen er foretaget på årene 2015 og fremefter, da der lægges størst vægt på de mest nutidige observationer. Vandstandsdata modtaget senere i projektet har gjort det muligt at tjekke kalibrering for en længere periode før 2015.

Betragtes søvandstanden (Figur 3-6), ses, at der for årene 2015–2017 er tale om en vellykket kalibrering. Både maksimum, minimum og selve ændringstakten beskrives yderst tilfredsstillende. Dette gør sig gældende for flere af de tidligere år også. For årene 2007-2009 har modellen dog tendens til at overestimere høje vintervandstande. Dette må tilskrives en usikkerhed i indstrømningen til modellen. Vandføringen nedstrøms stemmeværket er også beskrevet tilfredsstillende (Figur 3-7). Igen er der god overensstemmelse mellem målte maksimums- og minimumsværdier. Tilsvarende gør sig gældende for vandstanden nedstrøms stemmeværket (Figur 3-8).

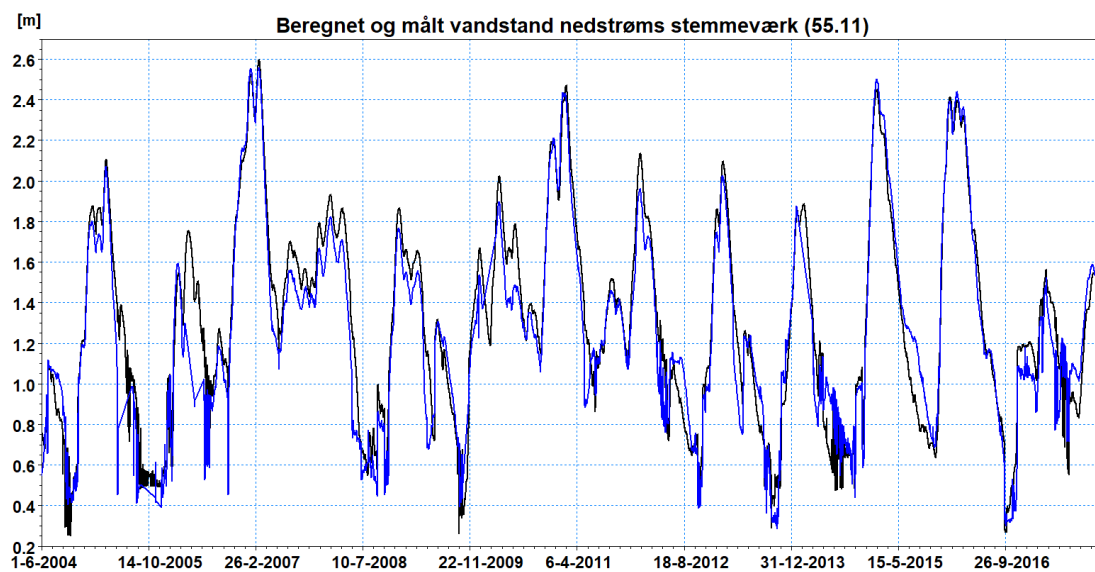
På denne baggrund kan modellen betegnes som fuldt ud anvendelig til at beskrive både indstrømning, oplagingskapaciteten i Tissø, stemmeværkets kontrollerende effekt på udløbet fra Tissø, samt den samlede hydrauliske modstand i Nedre Halleby Å.



Figur 3-6 Modelberegnet (sort) og målt (blå) søvandstand ved station 55.08.



Figur 3-7 Modelberegnet (sort) og målt (blå) vandføring nedstrøms stemmeværk ved station 55.11.



Figur 3-8 Modelberegnet (sort) og målt (blå) vandstand nedstrøms stemmeværk ved station 55.11.

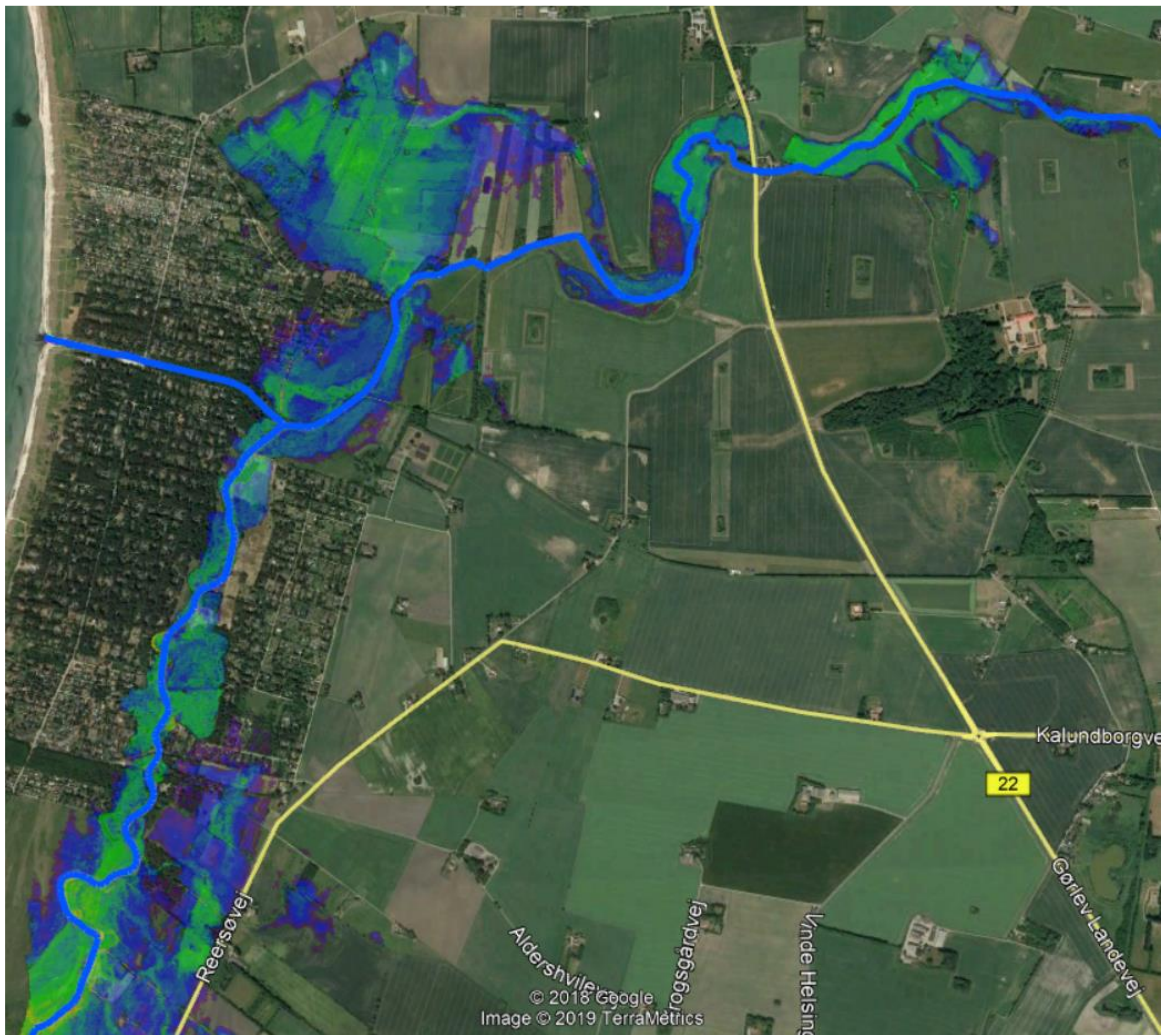
3.5 Udbygning af nedstrøms model

Styringsmodellen for Tissø stemmeværk fokuserer primært på stemmeværket og forholdene umiddelbart opstrøms og nedstrøms. Kriterierne er i høj grad knyttet til Tissø søvandstand og vandføring igennem stemmeværket til Nedre Halleby Å.

Det er dog principielt muligt at inddrage forhold længere nedstrøms, ikke mindst at regulere stemmeværket i forhold til oversvømmelsesrisikoen langs Nedre Halleby Å og Sukkerkanalen til udløbene i Storebælt. Af den grund er modellen i projektet udbygget til at kunne beskrive vandløbene nedstrøms stemmeværket inklusive udstrækningen af oversvømmelser ved høj vandstand, forårsaget enten af høj vandføring i vandløbene, høj vandstand i Storebælt eller en kombination af disse. Det kan være relevant at se på dette i relation til bl.a. ekstremhændelser, stormflod og klimatilpasning. Nedstrøms forhold indgår dog ikke eksplicit i den endelige styringsmodel for stemmeværket.

Til vurdering af nedstrøms oversvømmelse er de opmålte åtværnsnit kombineret med information fra seneste topografiske model downloadet fra kortforsyningen, således at også ådalen og andre nærliggende områder er inkluderet i den topografiske beskrivelse. Adskillige steder har det på grund inddæmning af selve åtværnsnittet været nødvendigt at lave en kvasi 2-dimensionel beskrivelse af området. Dette betyder, at selve åløbet er topografisk afskåret fra selve ådalen. I modellen er disse to områder så forbundet, hvilket sikrer, at vandet først løber over og ind i ådalen, når vandstanden i åen når koten for inddæmningen. Returløb fra de oversvømmede områder tilbage til selve åen er modelleret ved brug af drænrør i MIKE 11 modellen. I alt er der i modellen inkluderet 9 grene yderligere for at beskrive delområder topografisk isoleret fra selve åen. Til udveksling af vand mellem åen og disse områder er der indført 53 forbindelsespunkter i vandløbsnetværket til beskrivelse af returløb til åen.

Et eksempel på, hvorledes et oversvømmelseskort ser ud, er vist i Figur 3-9. Kortet viser oversvømmelse langs Nedre Halleby Å og Sukkerkanalen ved en højvandssituation i Storebælt med en vandspejlskote omkring 1,70 m. Farveskalaen beskriver varierende oversvømmelsesdybde som funktion af vandstand og topografi, dvs. generelt dybest ved selve åen og aftagende med afstand derfra.



Figur 3-9 Oversigt over udbredelse af oversvømmelse langs Nedre Halleby Å ved højvandsituation i Storebælt.

4 Aftestning af styringsmodeller

Hver styringsmodel er aftestet i 3 etaper ud fra behovet for at beskrive forsyningssikkerhed og robusthed for nuværende og fremtidigt klima

Hvor vidt de opstillede styringsmodeller er i stand til at opfylde de opstillede kriterier, afhænger i høj grad af den klimatiske variation. Tilstrømningen til Tissø er en funktion af nedbør og fordampning i oplandet. Derfor aftesttes styringsmodellen på 3 niveauer:

- 1) Niveau 1 testdatasæt vil bestå i historiske data.
- 2) Niveau 2 testdata opstilles ved at korrigere historiske tidsserier for klimaændringer (2070).
- 3) Niveau 3 testdata bygger på klimaændring og klimavariabilitet i form af sekvenser af tørre/våde år.

4.1 Klimavariation ud fra historiske data

Modellen opstillet i 2001 baserede sig på et klimadatasæt fra DMIs daværende station i Svinninge. Datasættet dækker ca. 12 år (1985-1997). DMI har fra år 2000 og fremefter genereret klimagrid-produkter (10 km og 20 km), hvorfra dagværdier for klimavariabler kan hentes. Endelig foreligger ukorrigerede stationsdata for 2018, som endnu ikke er indarbejdet i klimagrid. Kombineres de tre datasæt, er det muligt at dække en ca. 30 års periode.

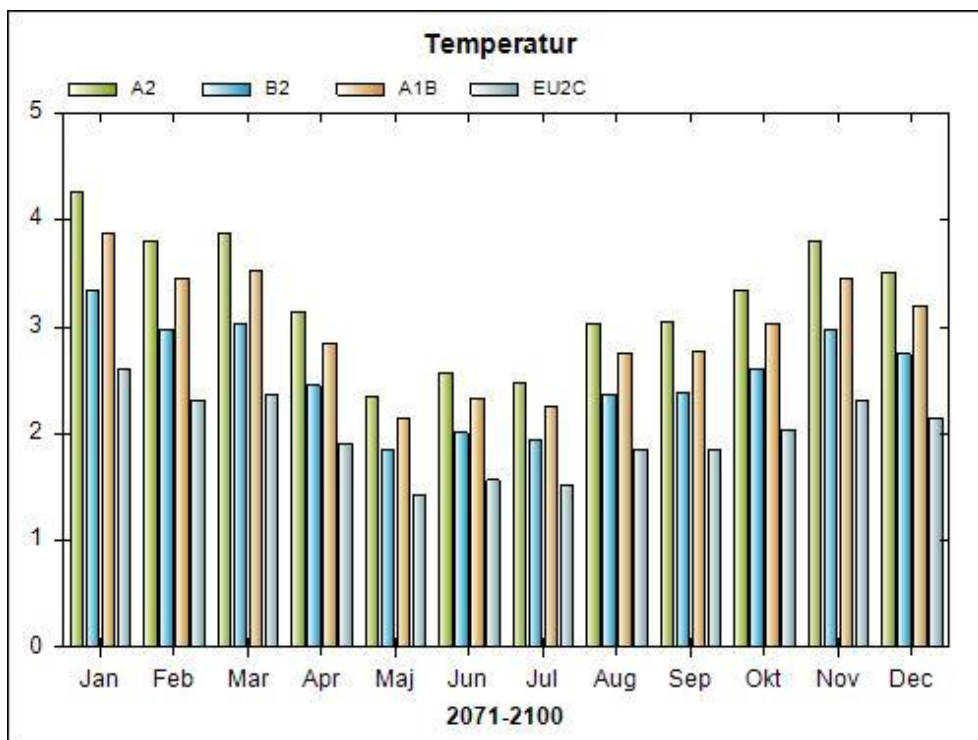
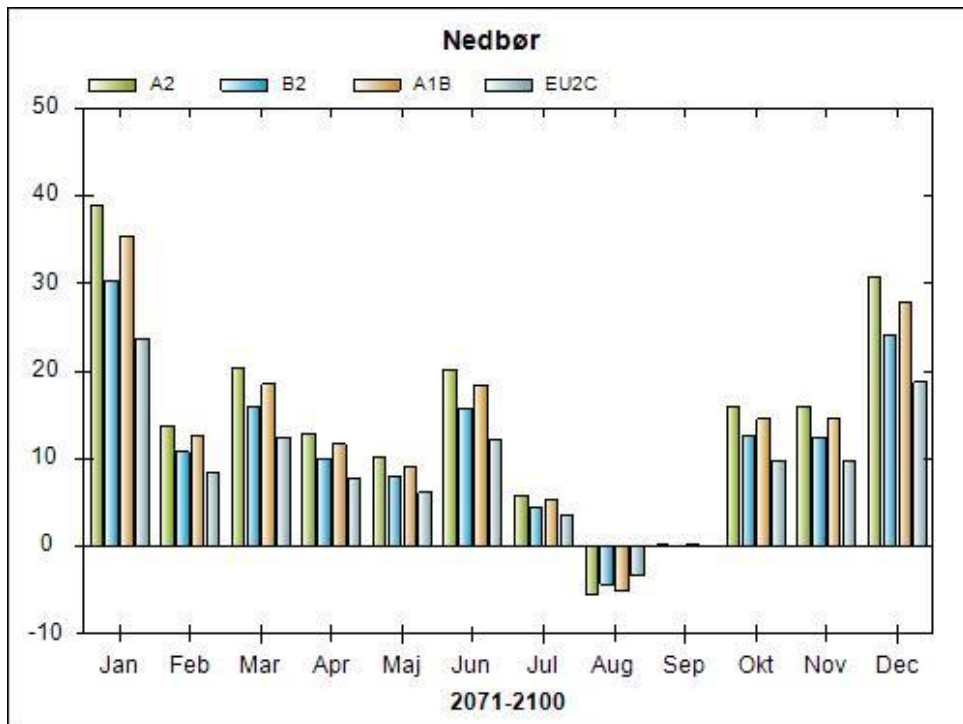
4.2 Historisk klimavariation med klimaændringer

Ifølge Vejledning til Klimatilpasning anbefales A1B scenariet benyttet ved klimafremskrivning i Danmark. Der er beregnet delta faktorer på månedsbasis, der beskriver den relative klimaændring i forhold til perioden 1960-1990. Det vil sige, at delta faktorer svarende til år 2070 måned for måned multipliceres med værdier i den historiske tidsserie. Derved opnås en ca. 30 års tidsserie med klimadata inklusive klimaændringer. De vil udgøre input tidsserier til modelberegninger i lighed med niveau 1 data.

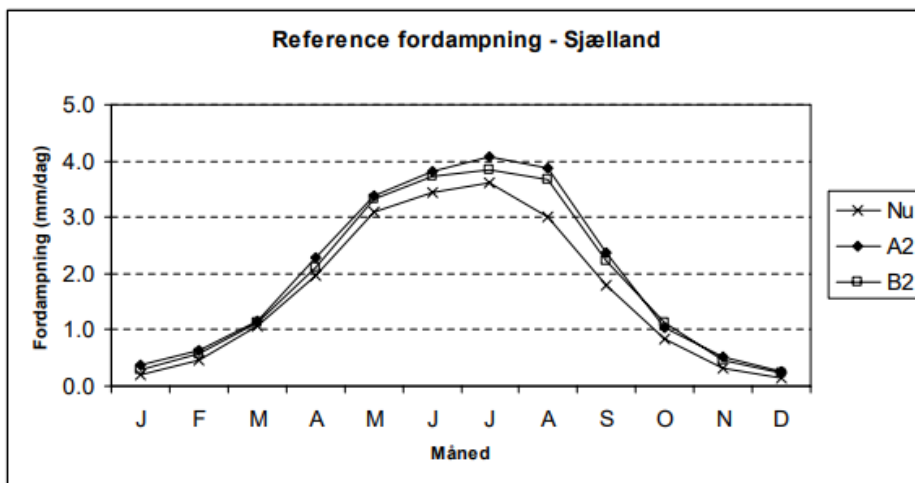
Tabel 4-1 viser forventede klimaændringer i form af klimafaktorer. Tallene er forbundet med stor usikkerhed afspejlet i forskellige mulige emissionsscenarier og betydelige forskelle i klimamodeller, men er det typiske udgangspunkt ved klimatilpasning i Danmark. Nedbøren vil generelt øges over året med undtagelse af august-september. Potentielt fordampning vil ligeledes øges, mest i vinterhalvåret og mindst i sommerhalvåret. Det samme gør sig gældende for temperaturen, der dog i afstrømningsmodellen alene påvirker, hvornår sne og afsmeltning sker, afhængigt af om den ligger under eller over frysepunktet. Samlet set peger klimaændringer i retning af stigende afstrømning, især vinterafstrømning, men potentielt også lavere afstrømning og vandføring i sensommeren. Vådere vintre med højere afstrømning vil potentielt betyde højere vandstand i Tissø og højere vandføring i Halleby Å. Tørrere somre vil omvendt betyde, at der oftere vil forekomme lave vandstande og eventuelt i længere perioder. Klimaændringer (niveau 2 testdata) kan forstærke problemer ved både høje og lave vandstande og udgør derfor et skærpet aftestningsgrundlag for styringsmodellen, der må forventes at øge risikoen for ikke at opfylde de opstillede kriterier.

Tabel 4-1 Delta faktorer, emissionsscenario A1B, år 2070, middel af klimamodeller.

Måned	Nedbør (faktor)	Temperatur (C)	Potentiel fordampning (faktor)
Januar	1,36	3,9	1,20
Februar	1,12	3,4	1,17
Marts	1,19	3,5	1,00
April	1,11	2,9	1,05
Maj	1,10	2,1	1,05
Juni	1,19	2,3	1,13
Juli	1,05	2,2	1,11
August	0,95	2,8	1,27
September	1,00	2,8	1,13
Oktober	1,14	3,0	1,05
November	1,14	3,3	1,07
December	1,27	3,2	1,19



Figur 4-1 Delta change faktorer for klimaændring, Tissø området (www.klimatilpasning.dk).



Figur 4-2 Ændring i referencefordampning på Sjælland ved klimaændringer.

Der beregnes en effekt af klimaændringer (2070-2100) ved at benytte delta faktorer til at modificere klimatidsserierne for nuværende forhold (2000-2018) (Tabel 4-1). Resultatet er en 18 års tidsserie med klimaændring, der gælder for den fremtidige tilstand. De ændrede klimaforhold påvirker afstrømningsforholdene. Her benyttes den opstillede nedbørs-afstrømningsmodel (NAM) til at estimere effekten. Effekten påvirker både tilstrømningen til modellens øvre rand ved Bromølle og tilstrømningen indenfor modelområder fra Bromølle til Storebælt.

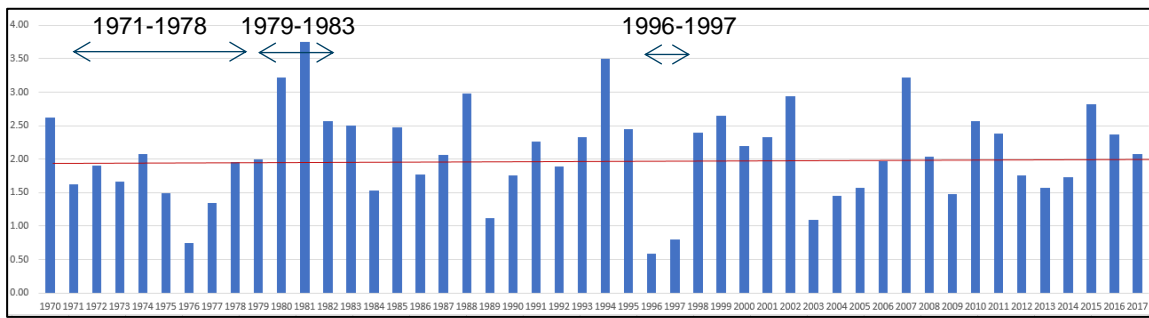
4.3 Klimaændring og serie af tørre/våde år

Ud over effekt af klimaændringer kan klimavariabilitet bevirke, at der optræder flere på hinanden følgende tørre eller våde år. Flere tørre år vil lægge ekstra pres på vandressourcen, og flere våde år kan forstærke problemer med høj søvandstand og vandføring.

Den historiske tidsserie (2000-2018) indeholder kombinationer af henholdsvis tørre og våde år eller vintre/somre. De har betydning for, hvor kritiske situationer der vil opstå og varigheden af perioder, hvor kriterier ikke kan opfyldes. Den historiske tidsserie indeholder ikke nødvendigvis de mest kritiske kombinationer.

Klimaets variabilitet er overordnet beskrevet i klimarapporter (f.eks. DMI Report 18-19, Climatological Standard Normals 1981-2010 in Denmark, The Faroe Islands and Greenland). Materialet og det tilhørende tilgængelige datagrundlag er ikke særligt velegnet til at beskrive serier af tørre og våde år for Vestsjælland. Et mere direkte mål foreligger i form af den lange målte vandføringstidsserie fra Åmose Å ved Bromølle (55.01). Beregnes den årlige afstrømning for stationen i perioden 1970-2018 (Figur 4-3), kan der identificeres årrækker med afstrømning henholdsvis under og over normalen. Perioden 1971-1978 udgør den længste flerårige periode med vandføring på eller under normalen. De to år med laveste vandføring er 1996-1997. Perioden 1979-1983 er den længste med afstrømning på eller over normalen.

Som illustreret ud fra afstrømningsforholdene er klimavariabiliteten forskellig i perioden 1971-1997 versus 2000-2018. 1971-1997 indeholder flere på hinanden følgende tørre år, de absolut tørreste år og de vådeste år. Derfor vil test niveau 3 med indregnet klimaændring for perioden 1971-1997 udgøre et yderligere skærpet aftestningsgrundlag i forhold til testniveau 2.



Figur 4-3 Årsmiddel afstrømning ved 55.11 Bromølle (1970-2018).

5 Modelresultater

Den hydrauliske model er benyttet til at undersøge, hvorvidt en ændret styring af stemmeværket kan bidrage til at mindske problemer i forhold til for høj vandstand i Tissø og for lille vandføring i Nedre Halleby Å.

Måden, hvorpå nye styringsmodeller af stemmeværket evalueres, er ved at opgøre, i hvor stor en procentdel af tiden de forskellige krav *ikke* overholdes. En sådan opgørelse er vist i Tabel 5-1. Det ses bl.a. ved, at det med den nuværende styring efter sigtepunktetskurven er muligt at opretholde den nuværende indvinding stort set hele tiden. Bemærk, at der ikke er målt reduktion i indvinding, udfald er baseret på underskridelse af en søvandstand på 0,8 meter. Vandstande over 1,47 m forekommer i 37 % af tiden ifølge målinger og i 43 % af tiden ifølge modellen. Minimumsvandføringen kan ikke opfyldes i 11-33 % af tiden ifølge målinger og i 11-35 % af tiden ifølge modellen, afhængigt af de valgte kriterier.

Det ses, at modellen giver tæt på identiske resultater, som svarer til målingerne. Dette bestyrker den tidligere konklusion om, at modellen er et velegnet værktøj til undersøgelse af effekten af forskellige ændringer i operationen af stemmeværket. I det følgende vil effekten blive vurderet på modelberegninger alene, da dette giver mulighed for sammenligning af resultater over en længere periode (2000-2017 i stedet for 2007-2017).

Tabel 5-1 Sammenligning af beregnet og målt overholdelse af kriterier for søvandstand, minimumsvandføring samt indvinding.

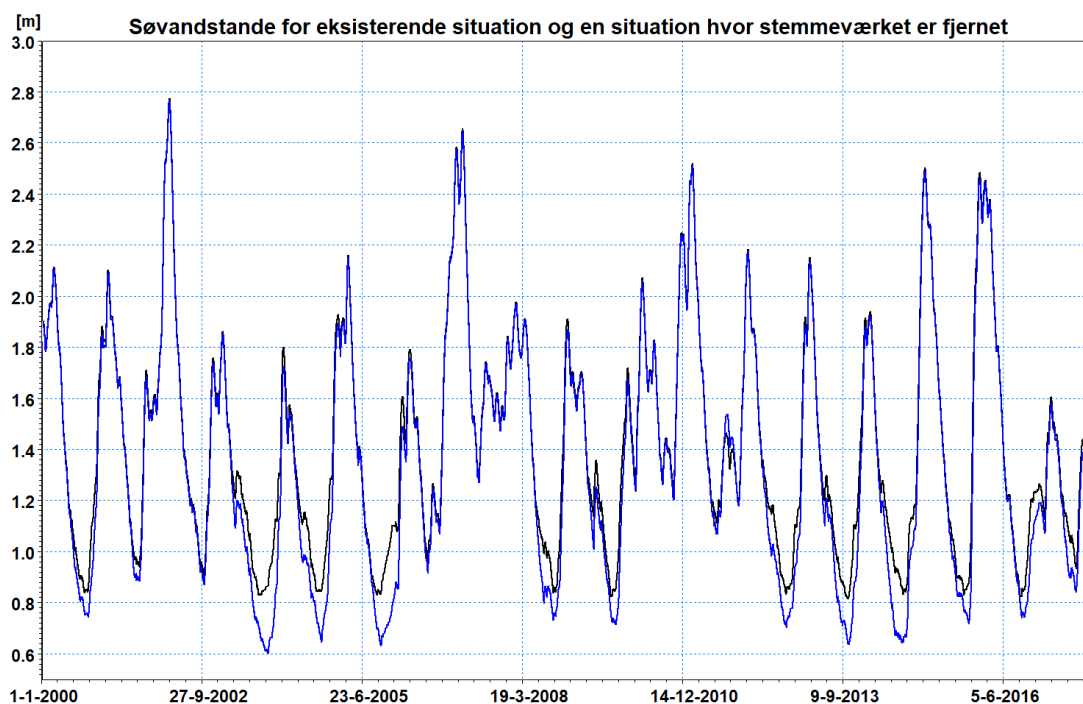
Procent af tiden hvor kriteriet/ønsket ikke er opfyldt			
		Målinger 2007-2017	Modelberegninger 2007-2017
Indvinding	3.5 mill/år	0.2	0
Max søvandstand	1.47 meter	37	43
Søvandstand	Styrekurve må ikke overskrides	82	79
Fisk	Qmin = 0.5, hele året	11	11
	Qmin = 0.7, Sep-Jan	18	17
	Qmin = 1.5, Sep-Jan (ønske)	33	35

5.1 Ændringer med det formål at sænke høj søvandstand

Det er blevet undersøgt, om man ved en ændret styring kan reducere vandstanden i søen for at reducere situationer med oversvømmelse. Flere forskellige ændringer for stemmeværket har været forsøgt, blandt andet om det ville have en effekt at indføre fire automatiske porte i stedet for som nu kun én port og tre faste slug. Ingen af disse forsøg har nogen signifikant effekt på de høje vandstande i søen. Det er derfor forsøgt at afklare, hvor stor forskellen ville være, hvis stemmeværket fjernes helt, svarende til en ureguleret naturlig tilstand.

At stemmeværket i praksis ikke er bestemmende for den høje søvandstand, kan bedst illustreres med resultater, hvor stemmeværket er fjernet helt. Dette ses af Figur 5-1, hvor beregnede vandstande for den eksisterende situation er sammenlignet med beregnede vandstande i en situation, hvor stemmeværket er helt fjernet. Når stemmeværket er fjernet, fås lavere vandstande

i de tørre perioder, men de høje vandstande er nærmest identiske. Den udtørring af søen, der finder sted hen over sommer og efterår, giver altså ikke anledning til, at den ekstra kapacitet i søen har nogen praktisk betydning. Dette kan også aflæses i Tabel 5-2, hvor det ses, at effekten af en overskridelse af den maksimalt ønskelige vandstand kun reduceres fra 43 procent af tiden til 41 procent af tiden. Effekten på indvinding og minimumsvandføringen er derimod mærkbart negativ, hvis stemmeværket fjernes. Det ville kræve en reduktion af indvindingen i 12 procent af tiden mod ingen reduktion i den nuværende situation. Også ønsket om sikring af en vandføring på $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ fra september til januar er negativt påvirket, mens kravet om en mindstevandføring på $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ i praksis er upåvirket af stemmeværket. På baggrund af analyserne af beregningerne uden stemmeværk må det konkluderes, at der i den naturlige tilstand ikke er basis for at overholde de opstillede kriterier for minimumsvandføringen. Der er ganske enkelt ikke et godt nok afløb fra søen ved de naturligt forekommende søvandstande.



Figur 5-1 Beregnet søvandstande for den eksisterende situation (sort) og en situation, hvor stemmeværket er fjernet (blå).

Tabel 5-2 Evaluering af kriterier for nuværende situation sammenlignet med en situation, hvor stemmeværket er fjernet.

Procent af tiden hvor kriteriet/ønsket ikke er opfyldt			
		Nuværende situation 2000-2017	Stemmeværket er fjernet 2000-2017
Indvinding	3.5 mill/år	0	12
Max søvandstand	1.47 meter	43	41
Søvandstand	Styrekurve må ikke overskride	79	63
Fisk	Qmin = 0.5, hele året	11	1
	Qmin = 0.7, Sep-Jan	17	18
	Qmin = 1.5, Sep-Jan (ønske)	35	48

Det ses af simuleringseresultatet, at en fjernelse af stemmeværket ville medføre, at indvindingen skal reduceres oftere (12 % af tiden). Hvad angår minimumsvandføringerne betyder det en forbedring for Qmin 0,5 m³/s-kriteriet, men en forværring for Qmin = 1,5 m³/s-kriteriet.

5.2 Ændringer i indvinding og effekt på minimumsvandføringen

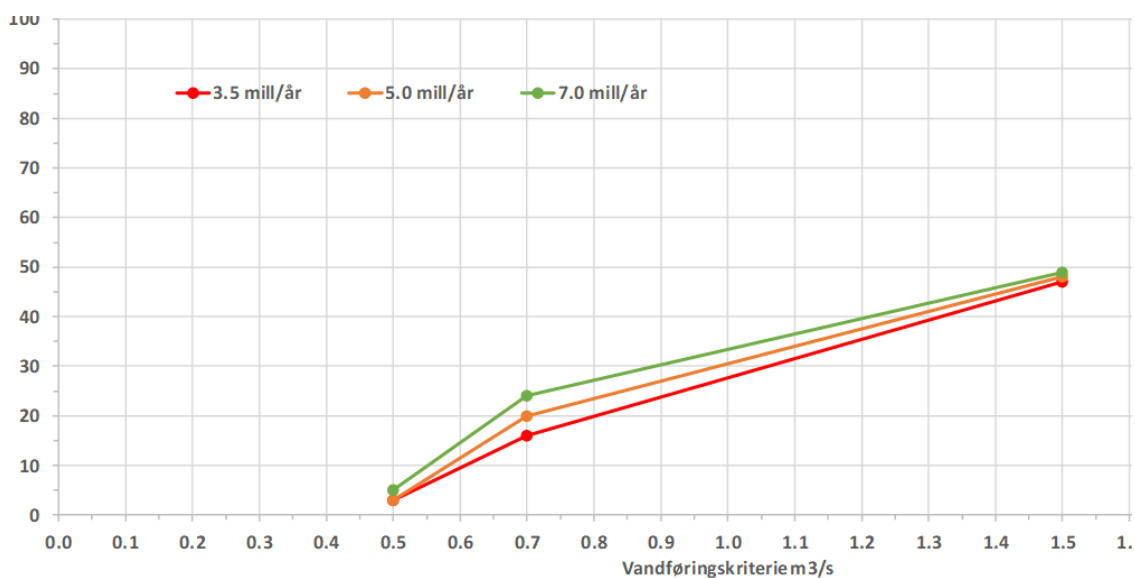
Det er undersøgt, om man kan tilføje en ændring til styringen af den automatiske port, så den tager hensyn til opretholdelse af den ønskede minimumsvandføring. Det svarer til, at man prioriterer minimumsvandføringen over indvindingen. Dette er gjort ved at bibeholde den nuværende styring med den tilføjelse, at porten ikke vil lukke, hvis vandføringen dermed kommer under minimumsvandføringen. Disse beregninger er foretaget med årlige indvindinger på 3,5, 5,0 og 7,0 millioner m³/år. Tabel 5-3 giver et overblik over de enkelte kriterier for de enkelte beregninger. Kigger man på vandstandskriterierne, er der ikke uventet tale om forbedringer. Alt andet lige vil der også fjernes mere vand fra søen, når porten holdes åben af hensyn til minimumsvandføringen med risiko for reduktion af indvindingen.

Ser man på effekten på forskellige kriterier for minimumsvandføringen, er det et blandet billede. For det absolutte minimum 0,5 m³/s er der tale om en klar forbedring i forhold til den nuværende situation, hvorimod der med hensyn til 1,5 m³/s fra september til januar sker en mærkbar forværring. For kriteriet på 0,7 m³/s er situationen nærmest uændret, men negativt påvirket af en øget indvinding.

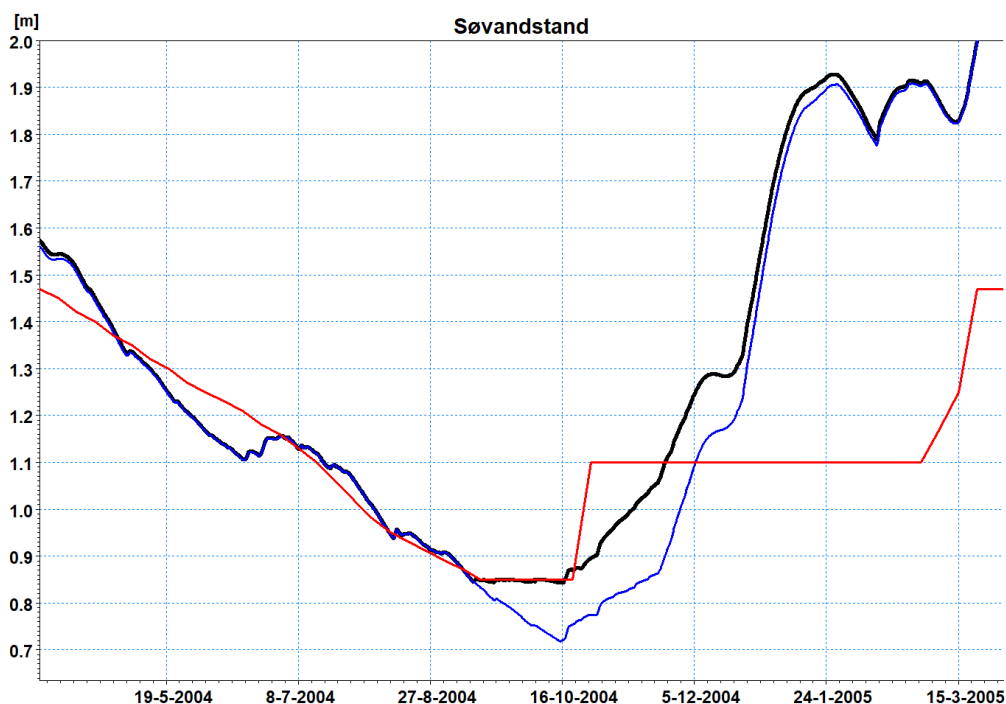
Resultatet kan forklares ved at betragte, hvad der sker i 2004 sidst på året. Søvandstand og vandføring for den nuværende situation og situationen med styringen, hvor der tages hensyn til minimumsvandføringen, er vist i henholdsvis Figur 5-3 og Figur 5-4. Man kan se, at vandstanden i den nuværende situation fra ca. midt september følger sigtepunktetskurven, mens den ændrede styring giver en lavere vandstand. At vandstanden følger sigtepunktetskurven, er resultatet af den gældende styring, hvor den automatiske port lukkes, hvilket resulterer i en meget lav vandføring (under 0,5 m³/s). Den ændrede styring sikrer en højere vandføring, dog uden at kunne matche minimumsvandføringen på 1,5 m³/s. Der ses en forbedring vedrørende kriteriet med de 0,5 m³/s ved ændret styring. At porten lukkes i den nuværende situation, resulterer i, at vandstanden hurtigere når 1,1 m, som er den vandstand, ved hvilken stemmeværkets kapacitet er 1,5 m³/s, se Figur 3-4.

Tabel 5-3 Evaluering af kriterier for nuværende situation sammenlignet med en situation, hvor minimumsvandføringen søges sikret ved øgede indvindinger.

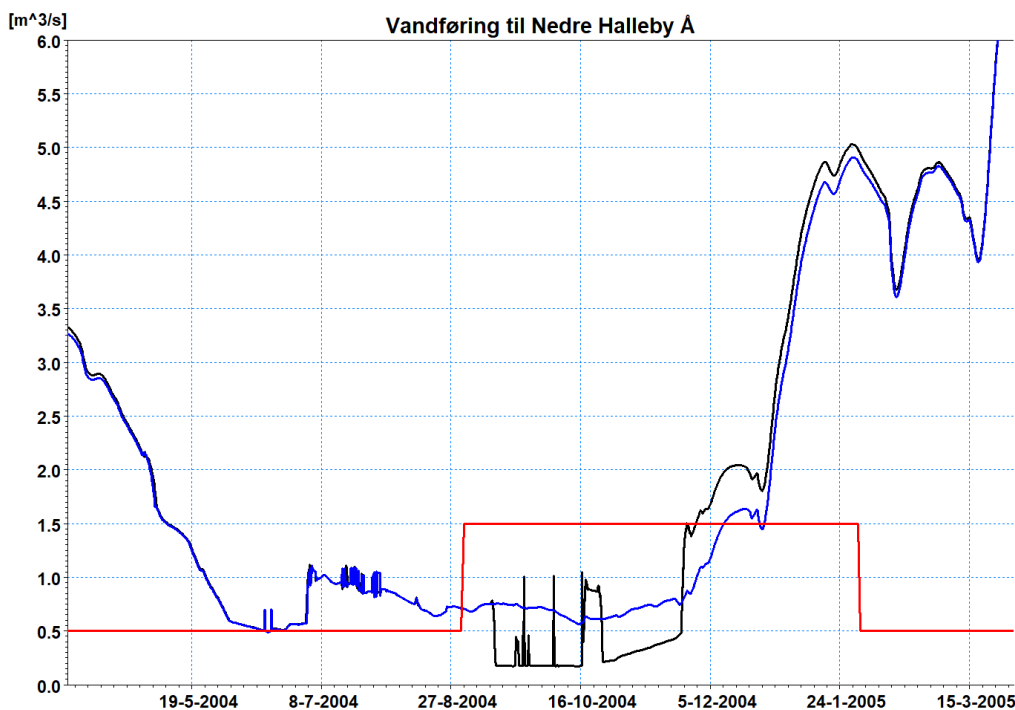
Procent af tiden hvor kriteriet/ønsket ikke er opfyldt					
		Nuværende situation 2000-2017	Ny styring indvinding på 3.5 mill/år	Ny styring indvinding på 5.0 mill/år	Ny styring indvinding på 7.0 mill/år
Indvinding	3.5-7.0 mill/år	0	6	7	9
Max søvandstand	1.47 meter	43	41	41	40
Søvandstand	Styrekurve	79	72	70	67
Fisk	Qmin = 0.5, hele året	11	3	3	5
	Qmin = 0.7, Sep-Jan	17	16	20	24
	Qmin = 1.5, Sep-Jan (ønske)	35	47	48	49



Figur 5-2 Procent af tid (y-akse), hvor minimumsvandføringskriterier (hhv. 0,5, 0,7 og 1,5 m³/s) ikke overholdes ved øget indvinding (hhv. 3,5, 5,0 og 7,0 mio. m³/år).



Figur 5-3 Søvandstand for den nuværende situation (sort) sammenlignet med den, hvor der styres efter minimumsvandføring (blå), med sigtepunktskurve (rød).



Figur 5-4 Vandføring til Nedre Halleby Å for den nuværende situation (sort) sammenlignet med den, hvor der styres efter minimumsvandføringen (blå) med krav til minimumsvandføring (rød).

Der synes ikke rigtig at være en sammenhæng mellem den nuværende sigtepunktskurve, krav til minimumsvandføring og afløbskapaciteten fra Tissø, hverken med eller uden stemmeværk. For

en periode frem til slut oktober er sigtepunktskurven så lav, at der ikke er mulighed for at opfylde kravet på 1,5 m³/s i minimumsvandføring grundet stemmeværkets og omløbets kapacitet. Først fra november og frem er sigtepunktskurven på et niveau (1,1 meter), hvor der er chance for at opfylde dette krav.

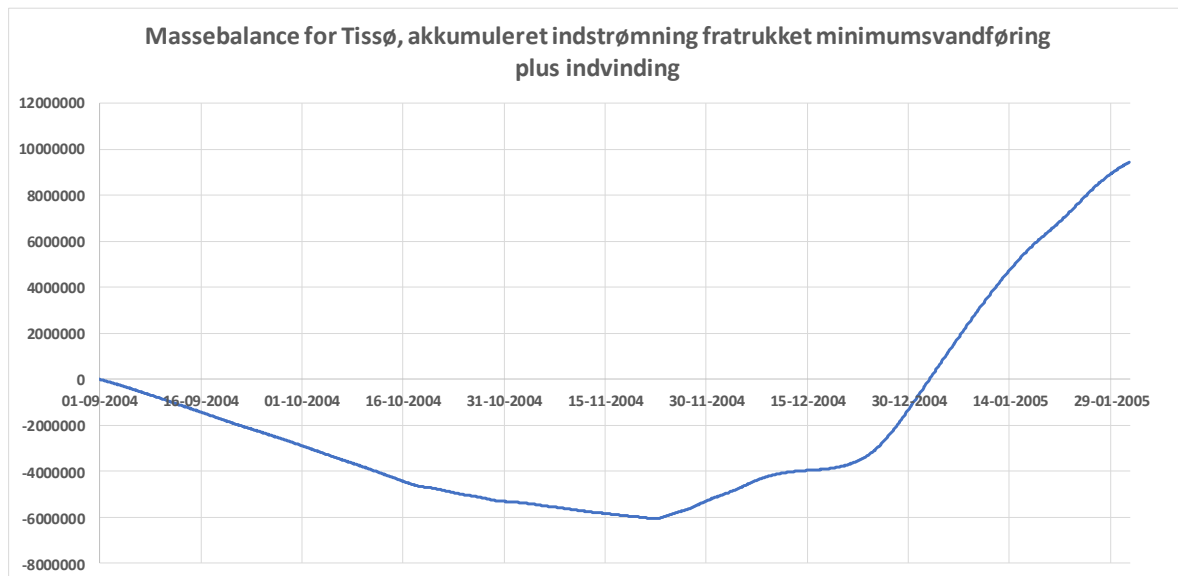
For at opfylde minimumsvandføringen skal vandføringen til Tissø være tilstrækkeligt høj. Dette er ikke altid tilfældet, som kan ses i Figur 5-5, der viser en akkumuleret vandbalance for Tissø fra 1. september 2004 til 1. februar 2005. Perioden fra september starter med et underskud (negative værdier), og at dette varer helt frem til sidst i november. Underskuddet er på ca. 6 mio. m³, svarende til en højde på ca. 0,5 meter, når søens areal sættes til 13 km². Skulle minimumsvandføringen have været opfyldt i 2004-2005 sæsonen, skulle vandstanden 1. september have været mindst 1,6 meter (mindst 1,1 meter, for at stemmeværket kan lade 1,5 m³/s passere plus 0,5 meter i reserve, indtil tilstrømningen matcher forbruget). Dette er ikke et særtilfælde, og i mange af årene vil det være nødvendigt med et vandmagasin i størrelsesordenen 0,4 meter. Ofte vil indstrømningen til Tissø først overstige summen af fordampning, indvinding og afløb sidst i oktober eller senere.

Det må således konstateres, at kravet til minimumsvandføring på 1,5 m³/s fra start september til slut januar ikke kan opfyldes i flertallet af årene. Dette skyldes:

- Den gældende sigtepunktskurve forhindrer, at stemmeværk/omløb har den nødvendige gennemstrømning i starten af perioden og kun lige sikrer noget, der minder om minimumsvandføringen for resten af perioden.
- Vandbalance for Tissø gør, at der for den gældende periode ofte vil være et indstrømningsunderskud, der skal opvejes af opmagasinering for at undgå vandmangel.
- Den nødvendige opmagasinering vil resultere i, at vandstanden vil overskride den maksimalt tilladelige vandstand ifølge sigtepunktskurven.

På denne baggrund må det anbefales, at man genovervejer følgende:

- Om minimumsvandføringen skal være 1,5 m³/s allerede fra start september og til slut januar.
- Ændret styring eller revideret sigtepunktskurve, da den kun går op til maksimalværdien på 1,47 meter og desuden foreskriver, at vandstanden sænkes til 0,85 meter, hvor minimumsvandføring ikke kan opretholdes og er tæt på grænsen for reduktion i indvinding.



Figur 5-5 Akkumuleret indstrømning til Tissø fratrukket minimumsvandføringen samt indvindingen (2004-2005).

5.3 Delkonklusioner for lokale modeller

De lokale styringsmodeller har givet anledning til en bedre forståelse af både selve stemmeværket og det samlede vandløbs- og søsystem, hvilket har givet et godt grundlag for formulering af den endelige styringsstrategi.

Hvad angår stemmeværkets funktion gælder, at:

- 4) Det eksisterende stemmeværk og omløb ikke er i stand til at levere tilstrækkelig vandføring til Nedre Halleby Å ved lave vandstande, < 1,0 m.
- 5) Det eksisterende stemmeværk og omløb ikke er i stand til at afhjælpe høje vandstande i Tissø
- 6) Styring efter sigtepunktskurven er medvirkende årsag til, at kriterier for vandføring i visse år ikke kan opfyldes i sommer-efterårsperioden
- 7) Omløbet giver ringe mulighed for styring af gennemstrømningen i modsætning til automatisk regulerede porte.

Hvad angår mulighederne for at forbedre forholdene m.h.t. til opfyldelse af kriterier:

- 1) En mulig konflikt imellem indvinding og opretholdelse af minimumsvandføring i Nedre Halleby kan formodentlig forebygges ved en bedre styring.
- 2) Højvandssituationen vurderes primært styret af forholdene i Nedre Halleby Å og kan ikke forebygges ved stemmeværk og styring.
- 3) Opbygning af en reserve ved at tillade højere søvandstand i sommerperioden kan sandsynligvis gavne både minimumsvandføring og forsyningssikkerhed i august-oktober, hvor manglende opfyldelse af kriterier typisk forekommer.

6 Nye styringsmodeller

På baggrund af ovenstående resultater blev der fra Kalundborg Forsynings side udarbejdet en ny styringsstrategi. Ud over indvinding er det også et formål at forbedre øvrige kriterier, herunder naturtilstanden og forholdene for ørred. Denne strategi opererer ikke med en sigtepunktskurve eller styringskurve, men med zoner, der afhænger af søvandstanden samt af tiden på året. Den eksisterende styring, der er baseret på regulering i forhold til vandstand, leverer ved lave vandstande ikke den påkrævede minimumsvandføring. Vandføringen i den nye styring er i stedet for konkret styret af stemmeværket, så vandet ikke frigives via omløbet, men på styret vis gennem en af portene, hvorved der opnås bedre styrbarhed. Ud fra zonenummer samt tidspunktet for året bestemmes minimumsvandføringen. Yderligere forudsættes det, at der nu er 4 automatiske porte i stedet for én som tidligere. Alle fire porte kan løftes helt op af vandet. Udsparingerne i omløbet forudsættes fjernet, så vandet ledes igennem den styrede port og ikke via omløb ved lav vandstand.

Der er undersøgt to styringsmodeller (Styringsmodel A og Styringsmodel B), som er beskrevet i det følgende.

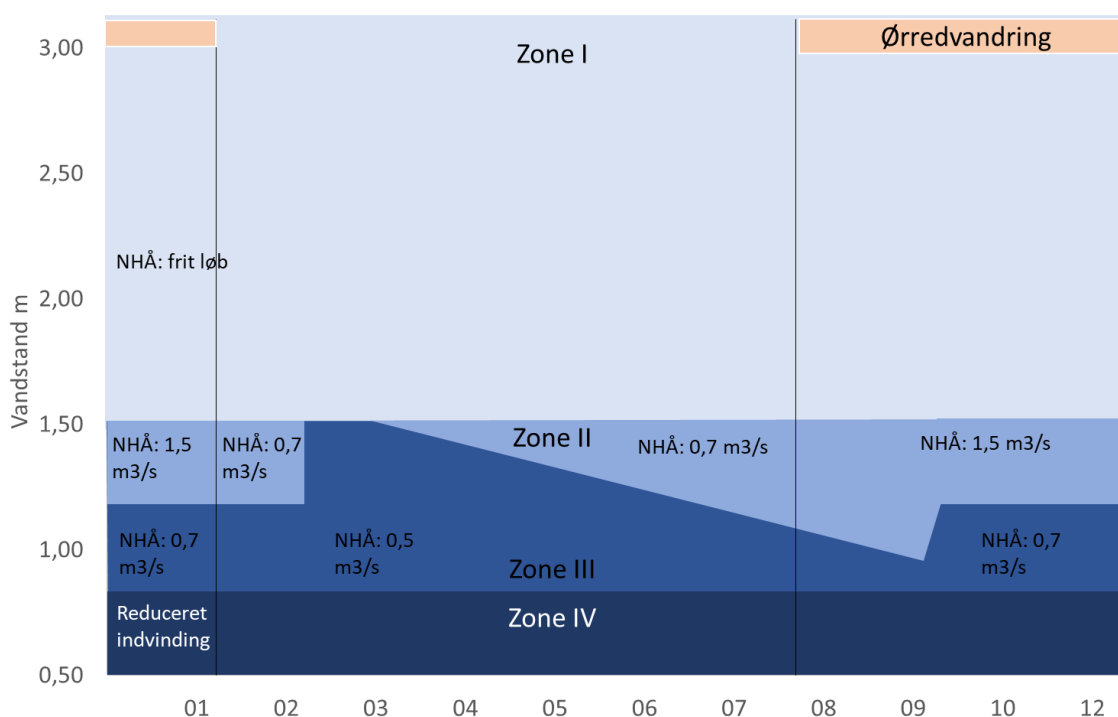
Styringsmodel A:

Overordnet styres efter at lukke så meget vand ud som muligt, når vandstanden er over 1,47 meter (zone I). Dette skal ske ved, at samtlige fire porte åbnes. Er der tale om et højere zonennummer, vil man kun operere én af portene, således at minimumsvandføringen holdes. Det aktuelle zonennummer evalueres på nedenstående måde i prioriteret rækkefølge for hvert tidskridt i simuleringen:

- 1) Zone I (højvande, vandstand over 1,47 m): Alle fire slug åbnes, maksimal afledning af vand for at forebygge risiko for oversvømmelse.
- 2) Zone II: Vandføring styres efter henholdsvis 0,7 m³/s og 1,5 m³/s for at opfylde krav til ørredvandring.
- 3) Zone III: Vandføring styres efter henholdsvis 0,5 og 0,7 m³/s for at opfylde krav til ørredopvækst og ophold.
- 4) Zone IV (lavvande, vandstand under 0,8 m): Indvindingen reduceres af miljøhensyn (vandføring er som i zone 3).

Ved at basere styringsmodellen på 6 timers intervaller sikres, at der ikke sker højfrekvente zoneskift, hvor vandstanden i modellen svinger i forbindelse med zoneovergange. Styringsmodellen forudsætter, at det er muligt at styre forholdsvis nøjagtigt på vandføring, f.eks. ud fra pålidelig online vandføringsmåling.

Figur 6-1 giver et overblik over styringsstrategien for styringsmodel A.

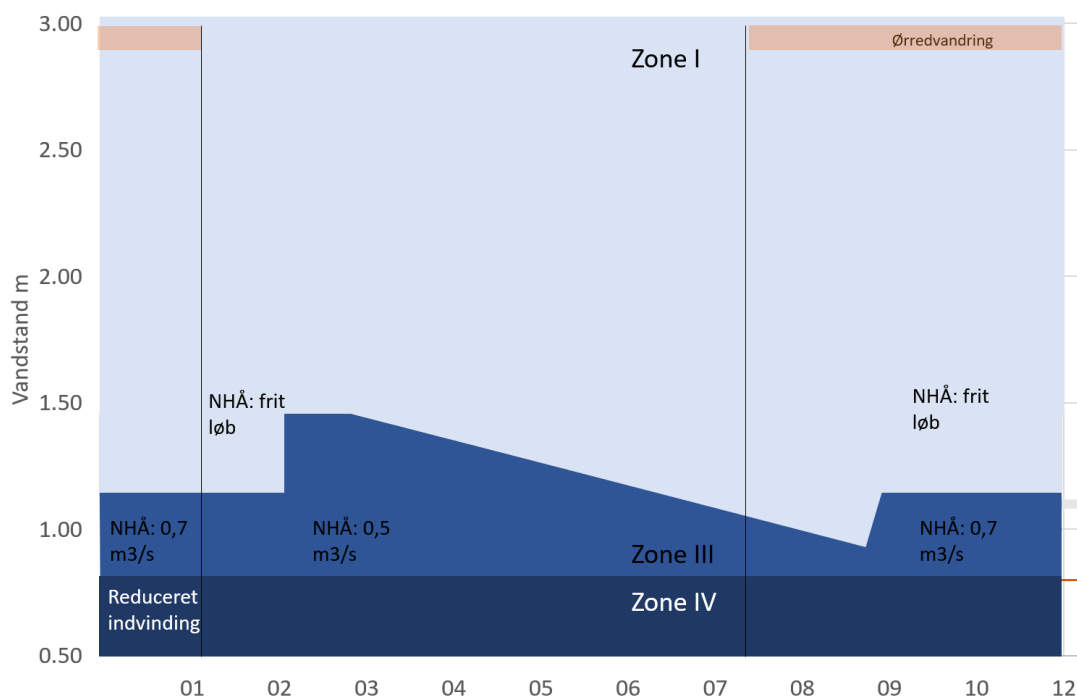


Figur 6-1 Styringsmodel A: Zoneoversigt for vandstand og vandføring over året.
Minimumsvandføringen for de enkelte zoner varierer alt efter krav til ophold og vandring af fisk i Nedre Halleby Å.

Styringsmodel B:

Styringsmodel B bygger i lighed med styringsmodel A på en zoneinddeling, men adskiller sig ved at operere med kun 3 zoner idet Zone 1 og Zone 2 fra styringsmodel A her er slået sammen. Det betyder at alle porte åbnes, når grænsen mellem zone II og III overskrides. Dette indebærer, at stemmeværket ikke styres efter en minimumsvandføringen på 1,5 m³/s. Denne vandføring vil kun opstå, når samtlige porte er åbne og de hydrauliske betingelser, såsom søvandstand og tilstrømning, muliggør vandføringer af denne størrelse. Styringsmodel Bs zoneinddeling er:

- 1) Zone I (højvande, vandstand over 1,47 m): Alle fire slug åbnes, maksimal afledning af vand for at forebygge risiko for oversvømmelse.
- 2) Zone III: Vandføring styres efter henholdsvis 0,5 og 0,7 m³/s for at opfylde krav til ørredopvækst og ophold.
- 3) Zone IV (lavvande, vandstand under 0,8 m): Indvindingen reduceres af miljøhensyn (vandføring er som i zone 3).



Figur 6-2 Styringsmodel B: Zoneoversigt for vandstand og vandføring over året.

6.1 Modelberegning med nye styringsmodeller

Der er lavet i alt 9 beregninger med de nye styringsmodeller. Disse ni beregninger fremkommer ved at kombinere tre forskellige indvindinger (3,5, 5,0 og 7,0 Mio m³/år) med tre klimabeskrivelser: Det nuværende klima for perioden 2000-2017, et klimaændrings-scenarie for perioden 2000-2017 og et klimaændrings- og klimavariabilitetsscenario for referenceperioden 1971-1997. For klimaændrings-scenariet og klimavariabilitetsscenarioet er der anvendt en nedstrøms vandstand på 0,3 meter, svarende til den forventede havvandspejlsstigning i Storebælt i 2050.

En oversigt over, hvor tit de forskellige kriterier ikke er overholdt, er givet i Tabel 6-1. Denne tabel viser også, hvor tit kriterierne overskrides for den nuværende situation samt for situationen, hvor stemmeværket fjernes (tilnærmet naturlige forhold).

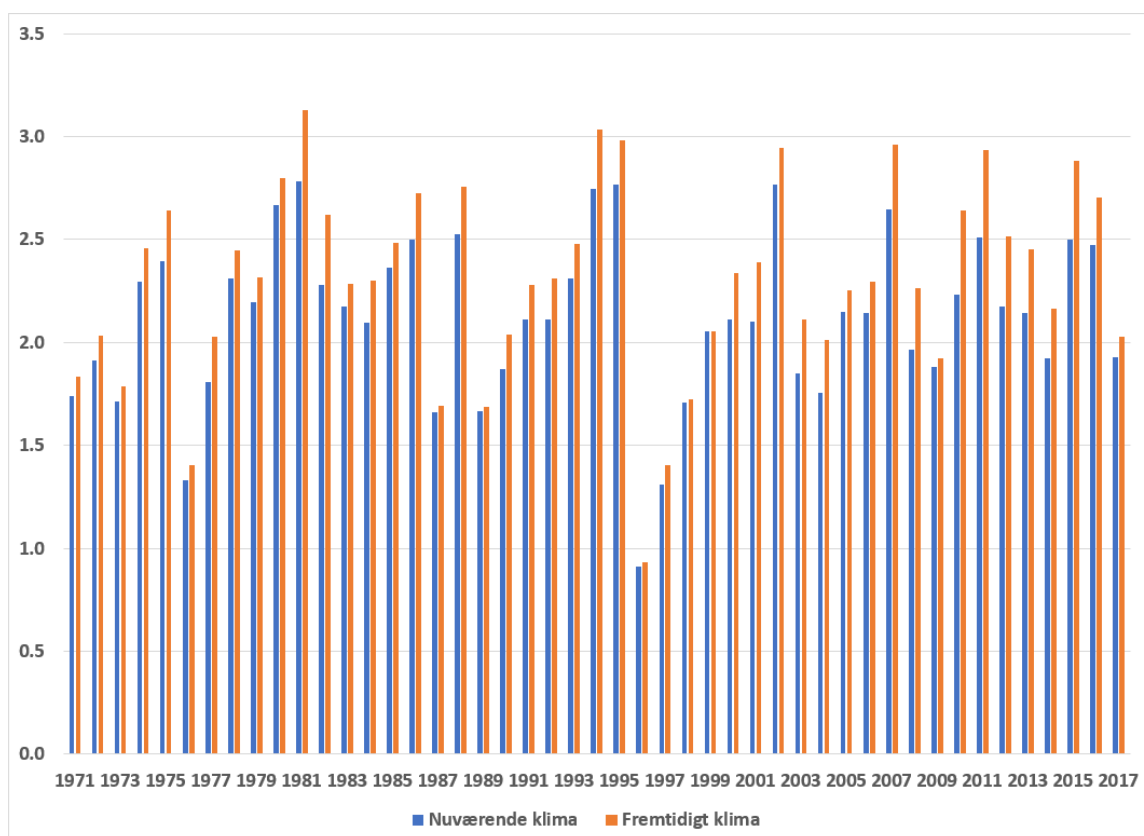
Betragter man tallene for overskridelse af en søvandstand på 1,47 meter, ses, at der med den nye styring er en marginal forværring. Dette er dog kun ved de laveste indvindinger. Ved de høje indvindinger er der en marginal forbedring.

Hvad de årlige maksima angår, er der en tendens til, at de undersøgte styringsmodeller giver højere årsværdier, se Figur 6-9. For simuleringsperiode 2000-20017 er den målte maksimale vandstand på knap 2,68 meter, mens den beregnede er på knap 2,77 meter. Dette gør sig også gældende for styringsmodel B. Denne tendens forstærkes, når klimascenariet tages i anvendelse. Her er den maksimale vandstand for perioden på ca. 2,88 meter. Betragter man den gennemsnitlige vandstand for sommerhalvåret (Tabel 6-1), ser man, at der for både Styring A og Styring B er tale om en forøgelse af vandstanden i forhold til den nuværende situation. Dette overrasker ikke, da der styres efter en kurve, der er højere end den eksisterende sigtepunktskurve.

En anden indikator er, hvor ofte indvindingen skal reduceres, fordi vandstanden kommer under 0,8 meter. Det skal bemærkes, at når indikatoren siger f.eks. to procent, svarer det ikke til to procent af den ønskede indvindingsmængde. Det er to procent af tiden, hvor indvindingen er reduceret til 3,1 mio. m³/år. Som eksempel kan tages resultater for Styringsmodel B med nuværende klima og 5,0 mio. m³/år i indvinding. Indvindingen bliver her reduceret to gange. Perioden med den længstvarende reduktion forløber fra 1. november 2003 til 18. december 2003, svarende til, at der reduceres med en mængde svarende til 250.000 m³. Dette resultat skal vurderes i forhold til forsyningssikkerhed og behov for backup i perioder med nedsat indvinding. Det vil være relevant at foretage en videre analyse i forhold til gentagelsesperioder, altså hyppighed og varighed af vandstande under 0,8 m.

6.2 Effekt af klimaændring og klimavariabilitet

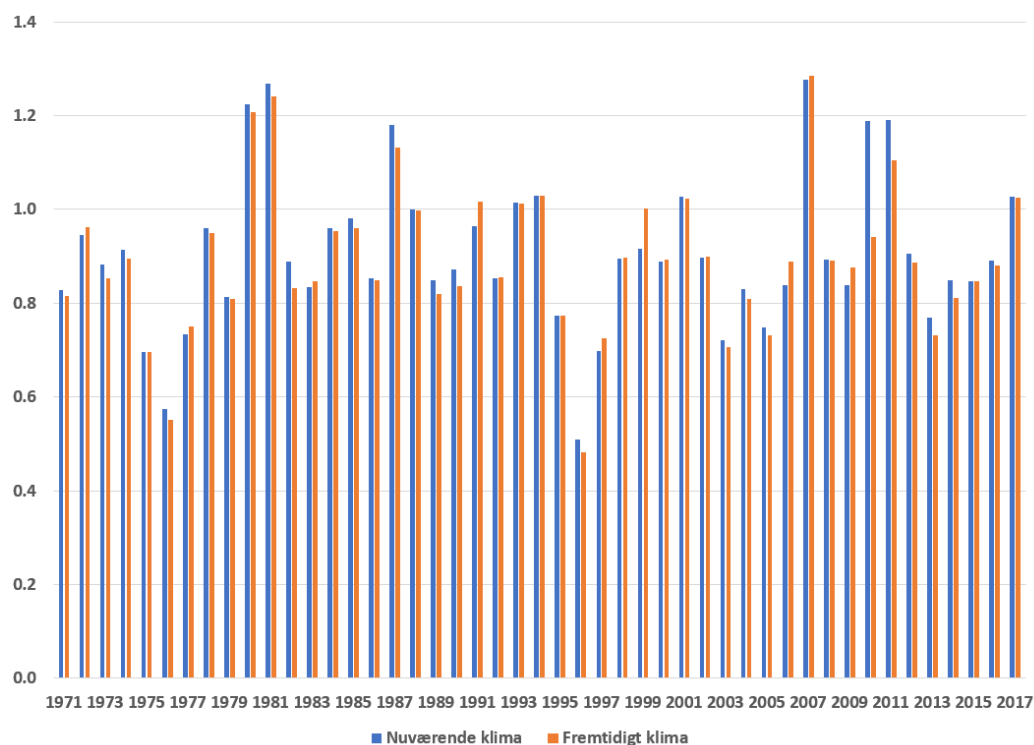
For at belyse effekten af klimaændringer er der kørt simuleringer med nuværende og fremtidigt klima for hele perioden 1971 til 2017 for styringsmodel B. Figur 6-3 viser de årlige maksimale søvandstande for en indvinding på 5 mio. m³. For samtlige år fås en højere årlig maksimal vandstand ved det fremtidige klimascenarie.



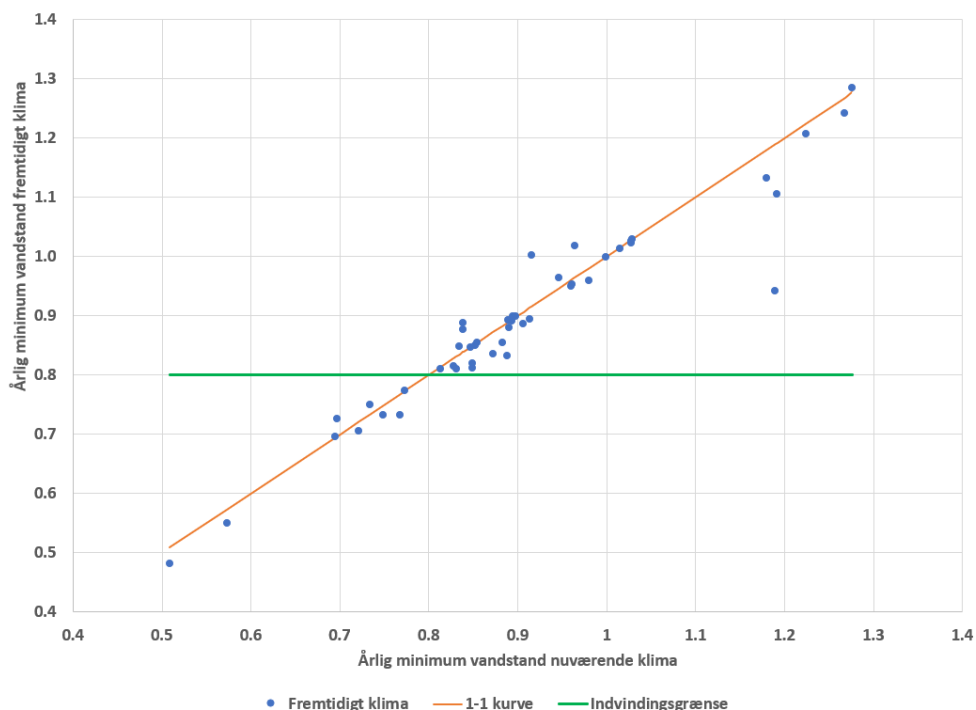
Figur 6-3 Årlige maksimale søvandstande for det nuværende og det fremtidige klima. Resultaterne er vist med en årlig indvinding på 5 mio. m³, (Styringsmodel B).

Betragter man de årlige minimumsvandstande for nuværende og fremtidigt klima med en indvinding på 5 mio. m³/år og styring ifølge styringsmodel B, er billedet mindre entydigt, se Figur 6-4. Det ses, at minimumsvandstanden ved det fremtidige klima kan ligge både over og under vandstanden, der fås med det nuværende klima. Betragter man Figur 6-5, ses en tendens til, at minimumsvandstandene i fremtiden oftest vil ligge under den minimumsvandstand, man får med

det nuværende klima (den orange '1-1 kurve'). Dette indikerer, at hyppigheden af situationer, hvor det bliver nødvendigt at reducere i indvindingen, kan øges.

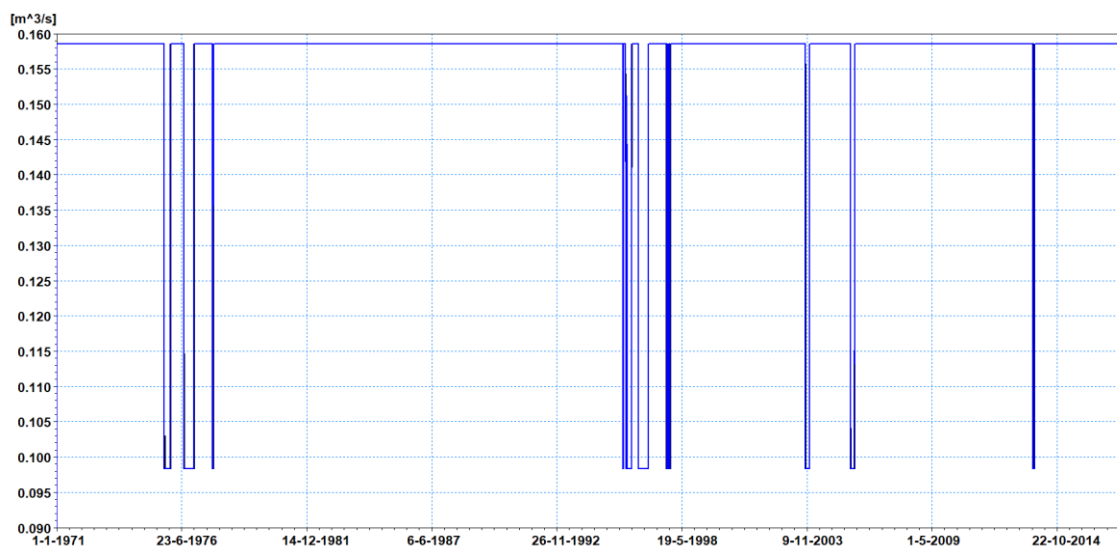


Figur 6-4 Årlige minimumssøvandstande for det nuværende og det fremtidige klima. Resultaterne er vist med en årlig indvinding på 5 millioner m³, (Styringsmodel B).



Figur 6-5 Årlig minimumsvandstand ved fremtidigt klima plottet imod det nuværende klima. Punkter under den orange linje indikerer, at den fremtidige minimumsvandstand ligger under den nuværende. Grænse for reduktion i indvinding er indtegnet (grøn), (Styringsmodel B)

I Figur 6-6 er indvindingen for både nuværende og fremtidigt klima vist ved en årlig indvinding på 5 millioner m^3 . Det fremgår, at der de fleste år ikke vil ske en reduktion i indvindingen. Det ses også, at der for årene 1975-1977 og 1996-1997 optræder perioder med reduktion i indvindingen. Disse to perioder er karakteriseret ved flere på hinanden følgende tørre år. Det peger på, at styringen er robust med hensyn til indvinding også for enkelte tørre år. Desværre har data for det meget tørre år, 2018, ikke været til rådighed i analysen. For flerårige forløb med afstrømning under normalen kan det betyde vandstande under 0,8 m og reduktion i indvinding.

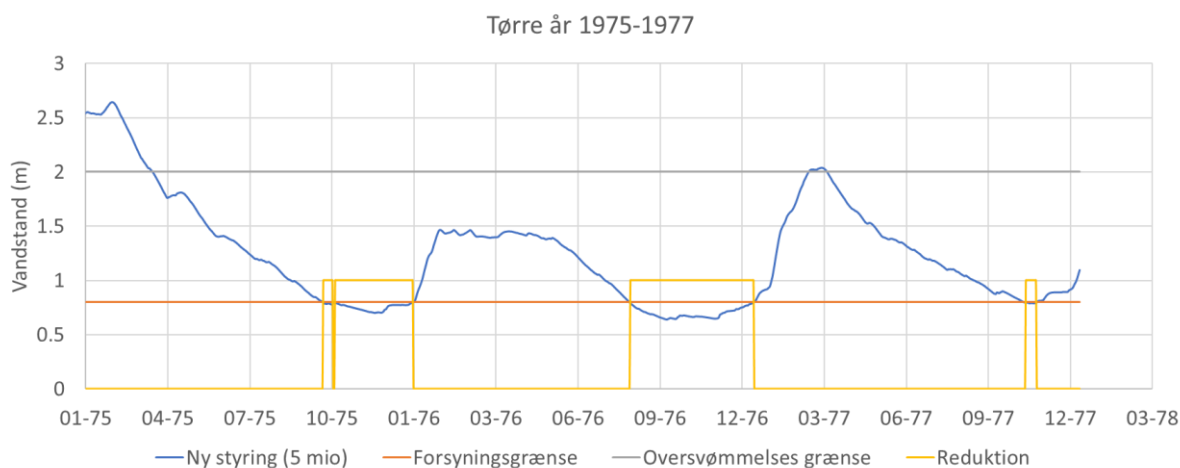


Figur 6-6 Indvinding for perioden 1971 til 2017 for både nuværende og fremtidigt klima. Indvindingen svarer til 5 millioner m^3 om året. (Styringsmodel B)

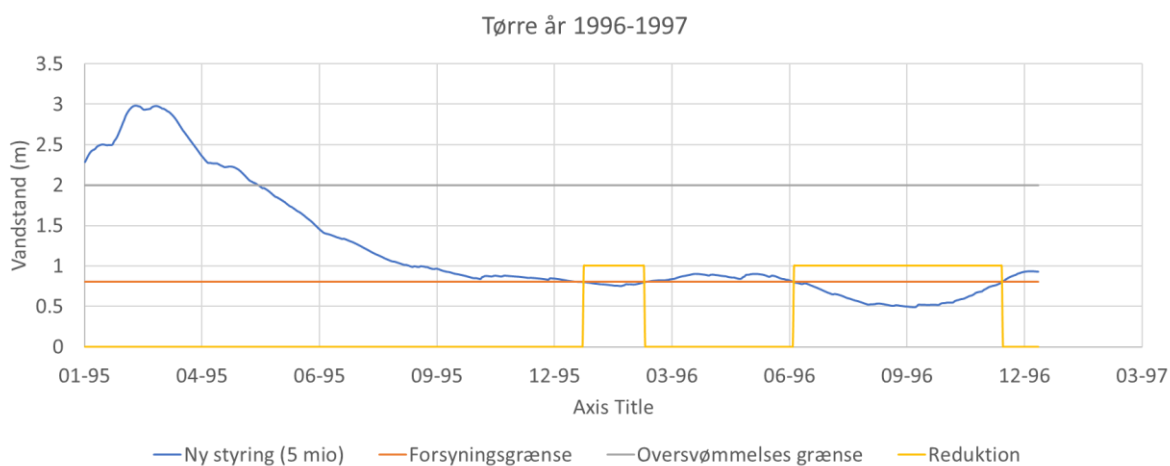
Modelkørsler med begge styringsmodeller, klimaændring og klimavariabilitet viser, at der kan opstå perioder med vandstand under 0,8 m på op til 6 måneder (f.eks. ved to på hinanden følgende tørre år). Dette vil stille skærpede krav til en supplerende ressource for at opretholde vandforsyningen. Hvor vandstande under 0,8 m er forekommet historisk, må det i fremtiden forventes at ske oftere på grund af reduceret vandføring i sommerhalvåret.

Figur 6-7 viser den simulerede vandstand i Tissø ved slutningen af en flerårig tør periode med afstrømning på eller under middel. I tre på hinanden følgende år falder vandstanden under 0,8 m i sommerperioden, hvilket betyder reduktion i indvindingen. For de første år er varigheden op til 3-4 måneder, hvilket er betydeligt længere end for nuværende forhold. Figur 6-8 viser vandstandsforløbet igennem to meget tørre år (1996-1997). Effekten af klimaændring kombineret med klimavariabilitet er i dette tilfælde, at vandstanden ligger under 0,8 m i ca. 6 måneder. Resultatet peger i retning af længere perioder med nedsat indvinding, hvilket indebærer, at der af hensyn til forsyningssikkerhed skal forventes behov for en backup reserve eller anden ressource. Et løst overslag indikerer, at en reduktion fra 5,0 til 3,1 mio. m³/år ved lav vandstand over et halvt år vil svare til ca. 1,0 mio. m³.

Klimaændring med vådere vintre og tørrere somre vil påvirke afstrømning og vandstand, men samtidig viser den historiske tidsserie, at klimavariabilitet kan betyde længere tørre perioder sammenlignet med de seneste 20 år. Derfor er det vigtigt i forbindelse med forsyningssikkerhed ved en ny styring og eventuelt ændret indvindingsmængde at indregne klimaeffekter, f.eks. frem til 2050.



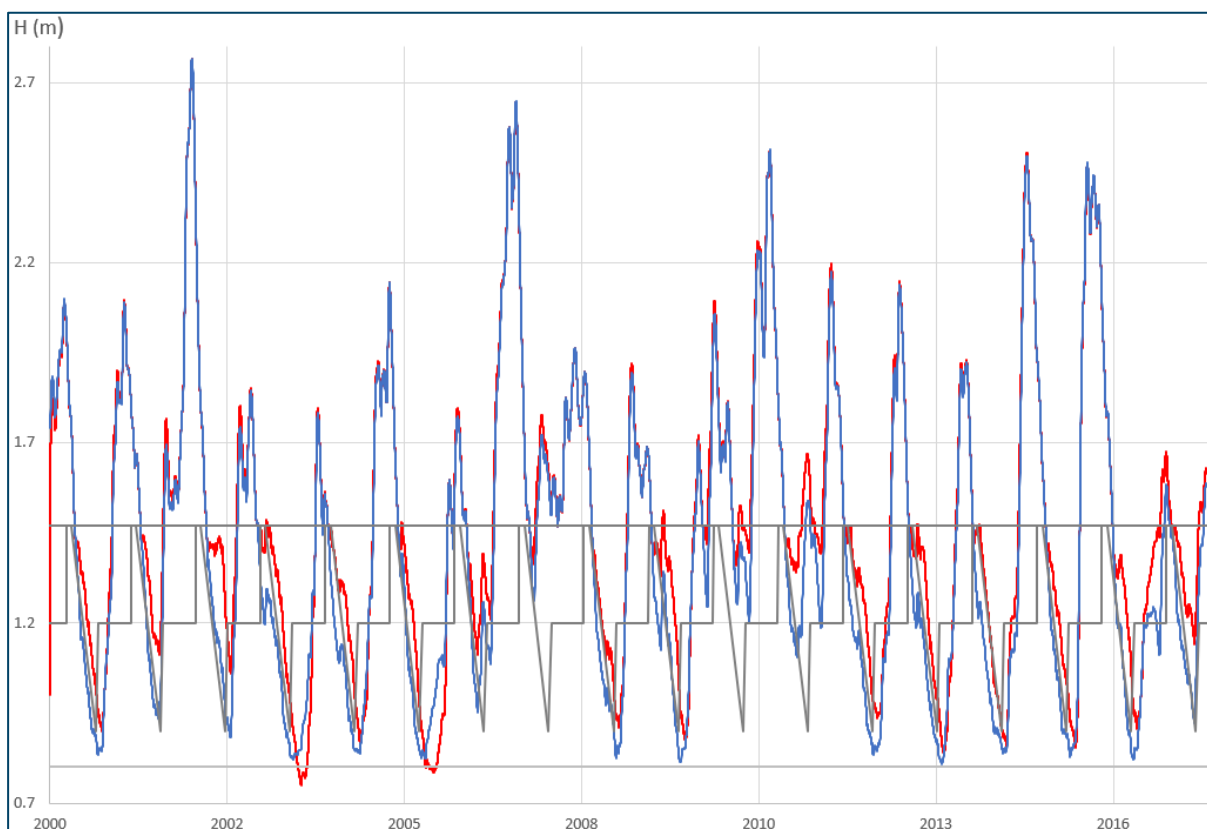
Figur 6-7 Simuleret søvandstand (blå), forsyningsgrænse ved 0,8 m (orange) og perioder med reduceret indvinding (gul) iberegnet klimaændringer og klimavariabilitet, 1975-1977, (Styringsmodel B).



Figur 6-8 Simuleret søvandstand (blå), forsyningsgrænse ved 0,8 m (orange) og perioder med reduceret indvinding (gul) iberegnet klimaændringer og klimavariabilitet, 1996-1997, (Styringsmodel B).

Tabel 6-1 Oversigt over hyppigheden af manglende overholdelse af kriterier for de forskellige scenarier.

Variable			Procent af tiden hvor kriteriet ikke er opfyldt						Middel vandstand april-september [meter]
Klima	Styring	Indvindings mængde m ³ /år	Indvinding	Max. H, 1.47 meter	Qmin, ny styring	Qmin = 0.5 m ³ /s, hele året	Qmin = 0.7 m ³ /s, Sep-Jan	Qmin = 1.5 m/s, Sep-Jan	
Nuværende	Sigtepunktskurve	3.5	0	43		11	17	35	1.28
Nuværende	Intet stemmeværk	3.5	12	41		1	18	48	1.22
Nuværende	A	3.5	0	46	6	0	0	17	1.40
Nuværende	A	5.0	1	45	5	0	1	17	1.39
Nuværende	A	7.0	2	43	5	0	2	18	1.37
Nuværende	B	3.5	2	42	4	0	1	18	1.34
Nuværende	B	5.0	2	41	4	0	2	18	1.34
Nuværende	B	7.0	3	40	4	0	3	19	1.32
Klimaændring 2050	A	3.5	0	45	6	0	0	18	1.41
Klimaændring 2050	A	5.0	2	44	7	0	1	18	1.40
Klimaændring 2050	A	7.0	3	44	7	0	3	19	1.38
Klima-variabilitet	A	3.5	4	43	8	2	3	20	1.41
Klima-variabilitet	A	5.0	5	42	8	2	3	21	1.39
Klima-variabilitet	A	7.0	6	41	9	3	5	22	1.38
Klimaændring 2050	B	3.5	2	43	5	0	2	19	1.35
Klimaændring 2050	B	5.0	3	42	4	0	3	19	1.34
Klimaændring 2050	B	7.0	4	41	5	0	4	20	1.33
Klima-variabilitet	B	3.5	5	39	7	2	3	22	1.36
Klima-variabilitet	B	5.0	6	39	8	3	4	22	1.35
Klima-variabilitet	B	7.0	8	38	9	3	6	23	1.33



Figur 6-9 Sammenligning af modelberegnet Tissø vandstand med eksisterende styring i forhold til sigtepunktskurven (blå kurve), med styringsmodel B (rød kurve) og med zoner (grå kurver) for nuværende klima samt en indvinding på 5 mio. m³/år.

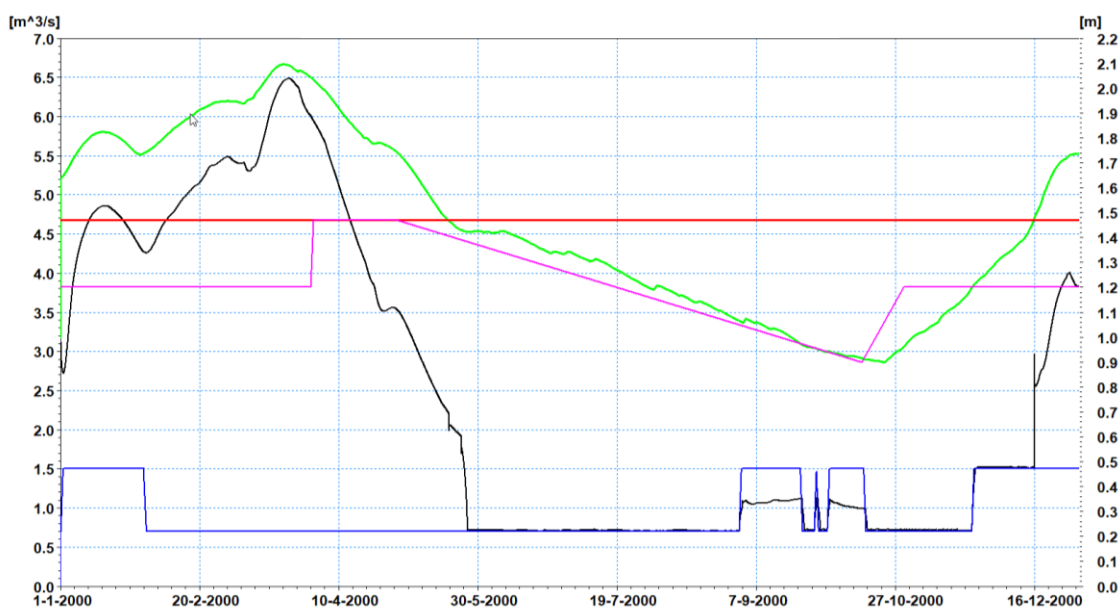
Idet kriterierne for beregning af minimumsvandføringen er ændret med de nye styringsmodeller, er det ikke muligt at foretage en direkte sammenligning med den nuværende stemmeværkspraksis. Der er derfor lavet en sammenligning af, hvor godt den nye styring overholder de nuværende kriterier til minimumsvandføringen. Tabel 6-1 giver et overblik over, hvor godt scenarierne overholder gældende krav til minimumsvandføring. Det fremgår, at den nye styring giver en markant forbedring ved samtlige kombinationer af indvindinger og klimabetingelser. Kigger man på, hvor tit minimumsvandføringen, beregnet ved brug af den nye styringsmodel, ikke overholdes, ligger det fra mellem 5 til 11 % af tiden. Højest for scenariet med høj indvinding, klimaændring og klimavariabilitet.

Der er dog en enkelt ting, der springer i øjnene: For de nye styringsmodeller med det nuværende klima falder tiden, hvor minimumsvandføringen ikke er overholdt med øget indvinding. Dette er i modsætning til, hvad der umiddelbart kunne forventes. Det hænger sammen med, at ved lav indvinding vil vandstanden blive højere og i perioder så høje, at søvandstanden lander i zone II i stedet for zone III. Dette giver anledning til et krav om højere minimumsvandføringer på 1,5 m³/s i stedet for 0,7 m³/s (Figur 6-1), som ikke kan honoreres, hvorfor opfyldelsen af minimumsvandføringen ikke længere kan finde sted. Denne manglende opfyldelse af minimumsvandføringen forekommer ofte i september måned, hvor en minimumsvandføring på 1,5 m³/s ikke kan opfyldes uanset styringsmodel og stemmeværk.

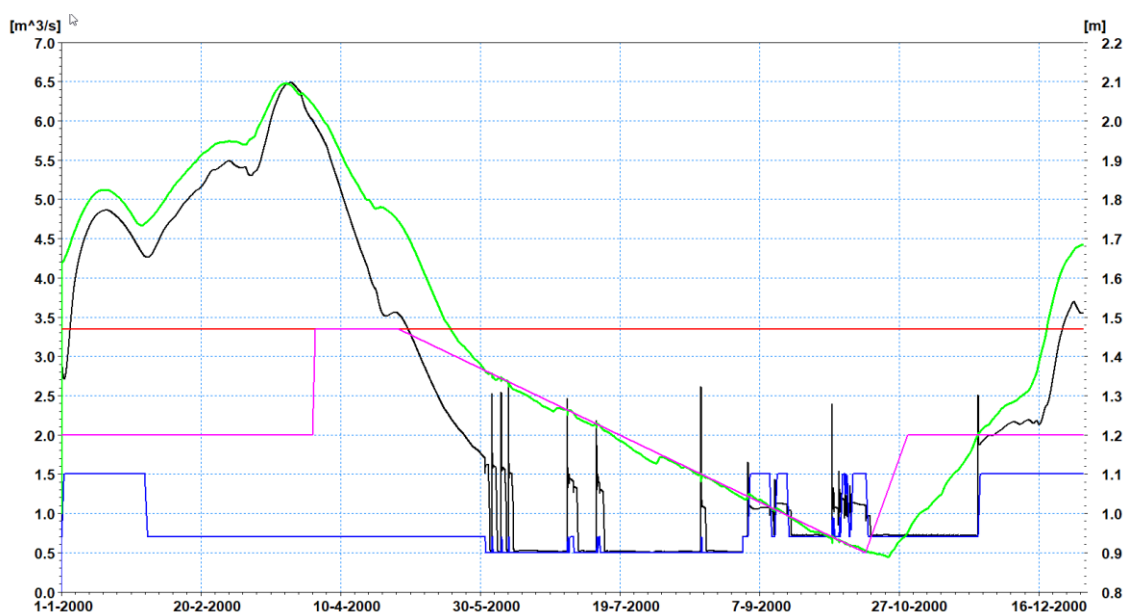
I Figur 6-9 viser simuleret vandstand for den eksisterende og den nye styringsmodel B over perioden 2000-2017. Som det fremgår, er forskellen for høje vandstande ikke særlig stor, men i forår-sommer vil vandstande være højere med den nye styringsmodel, dog undtaget to år hvor

vandstanden falder under 0,85 m og den nye styring i modsætning til den eksisterende forsat frigiver minimumsvandføringen på 0,5 m³/år til Nedre Halleby Å.

I Figur 6-10 er vandføringen for et typisk år vist sammen med den beregnede minimumsvandføring. Også vandstanden samt grænsen mellem zone I og II og grænsen mellem zone II og III er vist. Det fremgår, at når vandstanden falder til under 1,47 m omkring start juni, vil minimumsvandføringen blive holdt på 0,7 m³/s. Første september stiger den ønskede minimumsvandføring til 1,5 m³/s, men det er ikke muligt at opretholde den. Vandstanden er for lav, hvilket er i overensstemmelse med tidligere konklusioner. Det må konstateres, at den foreslåede styringsmodel ikke fuldt ud kan kompensere for begrænsning i vandføringsevne ved lave vandstande. Til sammenligning er der i Figur 6-11 den samme situation nu blot med styringsmodel B styringen, dvs. at alle porte nu åbnes, når vandstanden overskrider grænsen mellem zone II og III. I vinterhalvåret giver de to måder at styre på ikke anledning til væsentlige forskelle. For sommerhalvåret giver styringsmodel B anledning til flere situationer, hvor samtlige porte åbnes. Dette skyldes, at dette nu sker, når vandstanden når grænsen mellem zone II og III, som er noget lavere end de 1,47 meter, der tidligere blev anvendt. Skiftene mellem zone II og III giver også anledning til, at minimumsvandføringen nu svinger mellem 0,5 og 0,7 m³/s.



Figur 6-10 Simuleret vandføring (sort kurve), simuleret vandstand (grøn kurve), overgang zone II-III (lyserød) og krav til minimumsvandføring (blå kurve) for styringsmodel A med nuværende klima samt 5 mio. m³/år i indvinding.



Figur 6-11 Simuleret vandføring (sort kurve), simuleret vandstand (grøn kurve), overgang zone II-III (lyserød) og krav til minimumsvandføring (blå kurve) for styringsmodel B med nuværende klima samt 5 mio. m³/år i indvinding.

6.3 Effekt af reduceret indvinding ved lav søvandstand

Den eksisterende vandindvindingstilladelse foreskriver reduktion af indvinding når søvandstanden falder under 0,8 m. For at belyse hvor stor effekt indvindingen har under 0,8 m er den dels sammenlignet i forhold til en vandbalance og dels er der med den ny styringsmodel (styringsmodel B) beregnet vandstande hvor indvindingen henholdsvis fortsætter fuldt under 0,8 m og hvor den ophører.

Indvinding opgjort efter en årsvandbalance er vist i Tabel 6-2. Tallene er dels vist som flow ækvivalent, dvs. i vandføringsenheder der tillader sammenligning med vandføringskriterier og i dybde (mm) for Tissø med et antaget søoverfladeareal på 13 km². Det ses at en øget indvinding fra 3,5 til 7,0 mio. m³/år svarer til 111-222 l/s eller 269-538 mm/år ved opmagasinering på søfladen (uden afløb). Indvindingen i dette interval udgør 4-9 % af middelvandføringen ved udløbet, 22-44 % af 0,5 m³/s minimumsvandføringskriteriet og 46-92 % af den potentielle fordampning (her anslået i middel til 1,6 mm/dag).

Tabel 6-2 Indvinding i forhold til Tissø vandbalance

	Flow ækvivalent (l/s)	Sødybde ækvivalent (mm/år)
Middel vandføring, 55.08 Tissø udløb	2500	6065
Minimumsvandføring, fisk ophold: 0,5 m ³ /s	500	1213
Minimumsvandføring, fisk vandring: 0,7 m ³ /s	700	1698
Minimumsvandføring, fisk vandring: 1,5 m ³ /s	1500	3639
Middel pot. Fordampning: 1,6 mm/dag	241	584
Indvinding: 3,5 mill. m ³ /år	111	269
Indvinding: 5,0 mill. m ³ /år	159	385
Indvinding: 7,0 mill. m ³ /år	222	538

Det er ikke tilstrækkeligt at vurdere indvindingens effekt på baggrund af gennemsnits årsværdier for vandbalance og ved hjælp af den dynamiske model er effekten beregnet med den nye styringsmodel B, nuværende klima og indvinding på henholdsvis 5,0 og 7,0 mio. m³/år. Tabel 6-3 viser modelresultaterne. Ved en indvinding på 5,0 mio m³/år ligger søvandstanden under de 0,8 m imellem 2,2 og 2,5 % af tiden. I kortest tid ved ophør af indvinding under 0,8 m og i længst tid ved fuld indvinding under 0,8 m. Ved indvinding på 7,0 mio. m³/år er de tilsvarende tal 2,8 og 3,4 %. I alle tilfælde er perioder med søvandstand over 1,47 m stort set upåvirket af om indvindingen ophører eller fortsætter under 0,8 m. Der er en svag tendens til at 0,5 m³/s minimumsvandføringskriteriet fra fuld opfyldelse ved 5,0 mio. m³/år ikke opfyldes fuldstændigt (udfald i 0,3 % af tiden) når der øges til 7,0 mio. m³/år med fuld indvinding under de 0,8 m. Lidt større effekt kan ses med hensyn til 0,7 mio. m³/år kriteriet gældende for september-januar. Forskellen imellem indvinding eller ingen indvinding under 0,8 m er manglende opfyldelse i yderligere ca. 1 % af tiden.

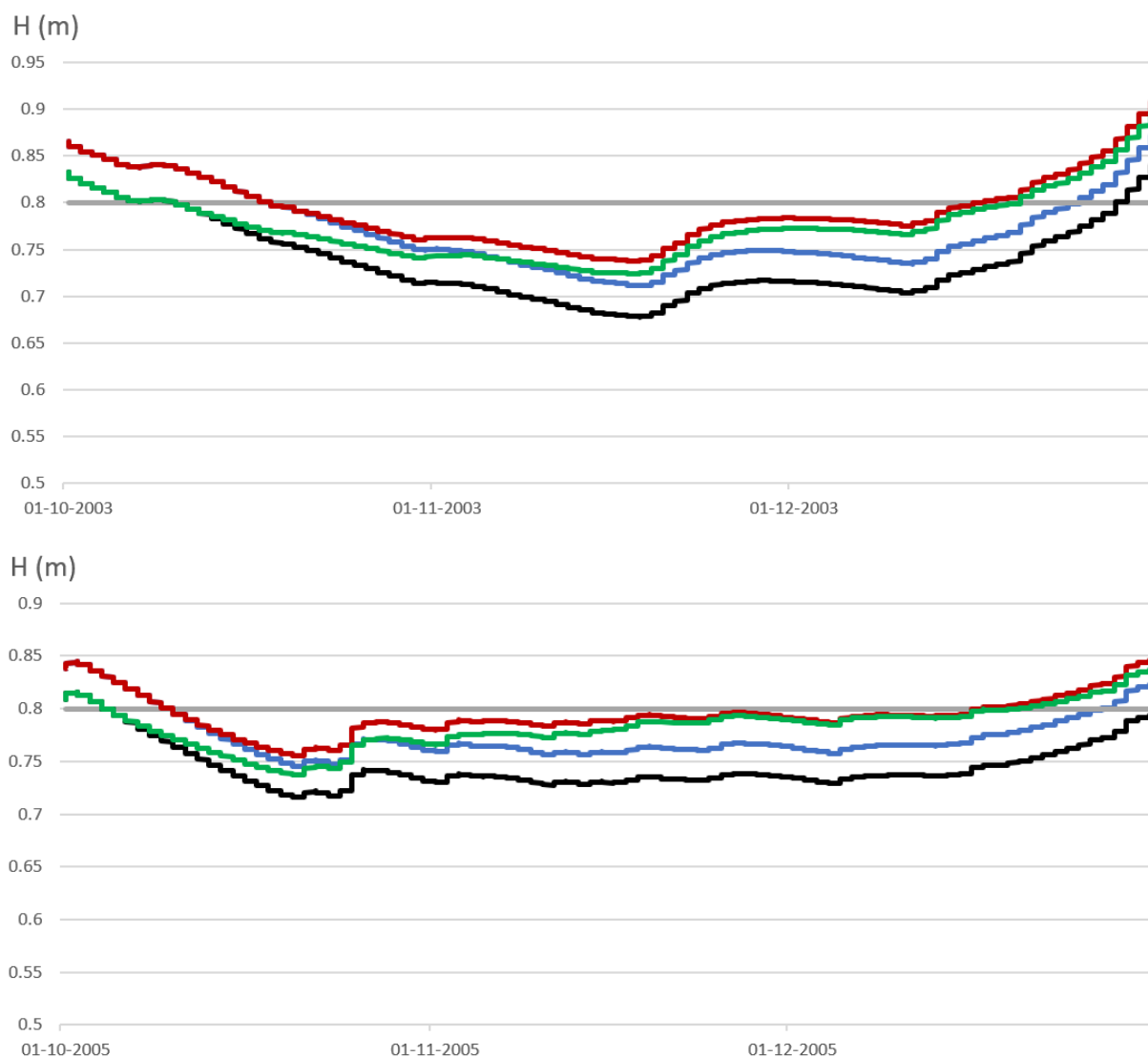
Tabel 6-3 Oversigt over effekt af indvinding med hensyn til manglende overholdelse af kriterier (procentdel af tid for perioden 2000-2017 hvor kriterier ikke opfyldes), styringsmodel B.

Procent af tid hvor kriteriet ikke er opfyldt					
		Indvinding 5,0 mio. m ³ /år, ingen reduktion	Indvinding 5,0 mio. m ³ /år, fuld reduktion	Indvinding 7,0 mio. m ³ /år, ingen reduktion	Indvinding 7,0 mio. m ³ /år, fuld reduktion
Min. søvandstand	0,80 m	2.5	2.2	3.4	2.8
Maks. søvandstand	1,47 m	41.3	41.4	40.0	40.1
Fisk	Qmin = 0.5 m ³ /s, hele året	0.0	0.0	0.3	0.1
	Qmin = 0.7 m ³ /s, Sep-Jan	2.4	1.3	3.2	2.2
	Qmin = 1.5 m ³ /s, Sep-Jan	18.3	18.3	19.0	18.8

Det er muligt at se på indvindingens effekt på lave søvandstande i yderligere detalje ved at sammenligne de modelsimulerede vandstandsforløb i perioder hvor vandstanden falder under de 0,8 m. Figur 6-12 viser udvikling i vandstand i to perioder hvor vandstanden falder under 0,8 m, henholdsvis oktober-december 2003 (øverst) og oktober-december 2005 (nederst). Der ses fire forskellige forløb afhængig af indvinding. Øverste kurve (rød) svarer til en indvinding på 5 mio. m³/år hvor indvinding ophører under 0,8 m og nederste kurve (sort) svarer til en indvinding på 7 mio. m³/år hvor indvinding fortsætter under 0,8 m. Den maksimale forskel i vandstand afhængig af om indvindingen enten fortsætter eller ophører under 0,8 m svarer til 4-6 cm ved en indvinding på 5 mio. m³/år og 6-8 cm ved en indvinding på 7 mio. m³/år.

Indvindingen har også betydning for hvor lang tid vandstanden ligger under 0,8 m. I de udvalgte tørre perioder falder vandstanden under 0,8 m i 2-3 måneder. Fortsættes indvinding under 0,8 m ved 5 mio. m³/år forlænges perioden under 0,8 m med ca. en uge. Ved 7 mio. m³/år vil en fortsat indvinding under 0,8 m betyde at perioden forlænges med ca. 14 dage.

Det skal bemærkes at de nye styringsmodeller vil prioritere at opfylde minimumsvandføringskravet på 0,5 m³/s også når vandstanden falder under 0,8 m.



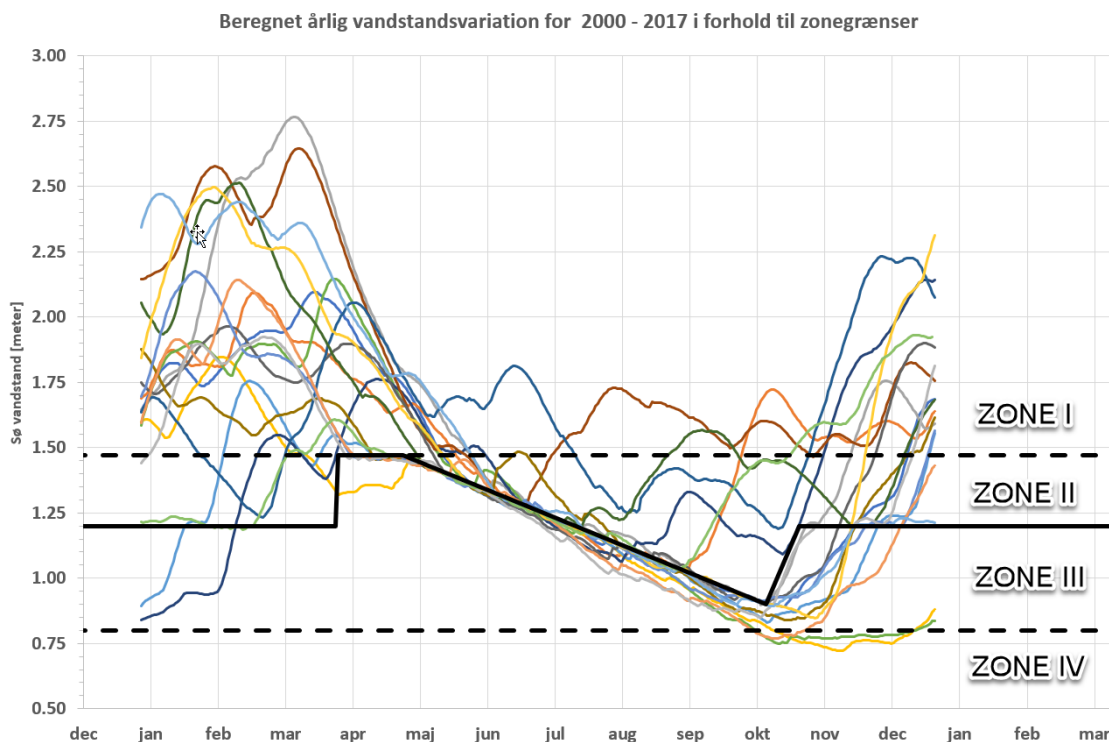
Figur 6-12 Modelberegnet vandstandsforløb ved lave vandstande ved indvinding på 5 mio. m³/år og ingen reduktion (blå kurve), 5 mio. m³/år og fuld reduktion (rød kurve), 7 mio. m³/år og ingen reduktion (sort kurve), 7 mio. m³/år og fuld reduktion (grøn kurve)

6.4 Tidsvariation med nye styringsmodeller

Styringsmodellerne er indbyrdes målt imod %-vis tid med overskridelse af kriterier, hvilket giver mulighed for evaluering og sammenligning. Det er vist, at det er muligt at definere en styring, der langt bedre end i dag tilgodeser de forskellige ønsker til indvinding, søvandstand og vandføring i Nedre Halleby Å.

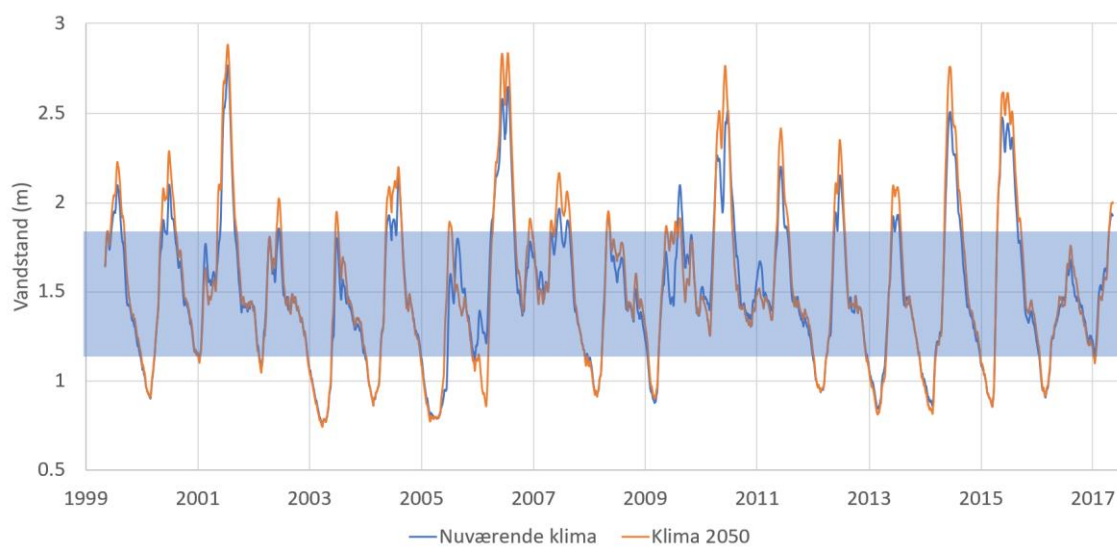
Det er dog vigtigt at fremhæve, at indikatorer dækker over store variationer, når man sammenligner vandstandsforløb for de enkelte år. I Figur 6-13 er den beregnede årlige vandstandsvariation afbilledet for styringsmodel B med en indvinding på 5 mio. m³/år. Hver kurve repræsenterer forløbet for de enkelte år, 2000-2017. Der kan være stor forskel på vandstandene om vinteren. Maximum varierer mellem ca. 1,6 meter til næsten 2,8 meter. I visse somre kan det være umuligt at holde vandstanden nede på 1,47 meter, selv om alle porte åbnes. I andre år er vandstandene så lave helt hen i oktober, at det ikke er muligt at opretholde den ønskede minimumsvandføring. Disse store variationer må tilskrives variationer i nedbørsmængder og

variation i, på hvilket tidspunkt af året denne nedbør falder. Det kan således ikke forventes, at en forbedret styring vil sikre, at de forskellige kriterier vil blive overholdt til hvert eneste år. Styringen kan ikke fastholde vandstande tæt på styrekurven hvert år, og den kan ikke kompensere for normalt forekommende variationer forårsaget af klimaet.



Figur 6-13 Årlig variation af søvandstanden for årene 2000-2017 for styringsmodel B med en indvinding på 5 mio. m³/år. De tre zonegrænser er også afbilledet.

Ser man specifikt på kriterier i forhold til den ønskede årlige cyklus på oversvømmelse og tørlægning af fuglørerne (Figur 6-14) med ny styring og henholdsvis nuværende og 2050 klima, ses betydelig år-til-år variation. Der ses en tendens til, at den maksimale søvandstand vil stige, men forholdene bliver ikke ringere. Ud fra samme figur ses det, at kriteriet om at undgå vandstande over 2,4 m af hensyn til oversvømmelser ved roklubben ikke ændres markant, men klimænderinger har tendens til at øge hyppigheden af oversvømmelser.



Figur 6-14 Søvandstand og koter for tørlægning og oversvømmelse af fugleøer (styringsmodel B).

7 Konklusioner

Aftestningen af styringsmodellerne giver grundlag for konklusioner om potentiale og begrænsninger

7.1 Konklusioner

I forbindelse med indvindingstilladelse er der opstillet en model af Tissø, Tissø stemmeværk samt Øvre og Nedre Halleby Å. Model for Øvre Halleby Å (fra Bromølle) og Tissø inklusive stemmeværk er opdateret og efterfølgende udbygget for Nedre Halleby Å til Storebæltskysten, bl.a. med mulighed for at vurdere oversvømmelseskonsekvenser. Modellen beskriver afstrømningsforhold, fordampning og vandbalance i opland, sø og vandløb. Selve stemmeværket og omløbet er beskrevet som del af den hydrauliske model ved de fysiske karakteristika og dimensioner, samt styringen af stemmeværksporte. Modellen er tilfredsstillende kalibreret, og det er vist, at procentdelen af tid, hvor kriterier overskrides, er tilnærmelsesvis den samme for hhv. målinger og model. Dette viser, at modellen kan bruges til at evaluere, i hvor høj grad de givne kriterier kan opfyldes.

Modellen benyttes som værktøj til at belyse konsekvenser af ændret styring af Tissø Stemmeværk ved forskellige indvindingsmængder og mulige konflikter i forhold til miljø, landbrug, natur og rekreative interesser. Der er opstillet kriterier, der ønskes tilgodeset og opfyldt ved styring af Tissø Stemmeværk. Et af fokusområderne i arbejdet med styringsmodellerne har været at forbedre naturforholdene i og omkring Tissø, bl.a. ved at se på, om forholdene for ørred kan forbedres. På baggrund heraf er der formuleret styringsmodeller, der hver især udtrykker forskellige styringsprincipper og forskellig prioritet imellem indvinding, minimumsvandføring og øvrige kriterier.

7.1.1 Indledende analyser

På baggrund af indledende analyser af styringsmodeller er det tydeligt, at det eksisterende stemmeværk og omløb ikke kan kontrollere høje vandstande i Tissø eller sikre minimumsvandføring til Nedre Halleby Å ved lave vandstande, hvilket i begge tilfælde medfører overskridelse af kriterier. Resultatet peger dels på, at udformningen af stemmeværket og omløbet ikke er målrettet sikring af nævnte kriterier, dels på at den eksisterende sigtepunktsskurve ikke er velegnet og endelig, at de fysiske forhold langs Nedre Halleby Å spiller en afgørende rolle. Sigtepunktsskurven foreskriver bl.a. en vandstandssænkning i sommerperioden til et niveau, der ikke sikrer minimumsvandføring med det nuværende stemmeværk.

Det er blevet undersøgt, hvorvidt man ved at ændre på styringen af stemmeværket ved Tissøs udløb vil kunne afhjælpe høje vandstande i søen. Hvis man går fra 1 til 4 automatporte, har det ringe effekt. Selv ved helt at fjerne stemmeværket, svarende til en ureguleret, naturlig tilstand, vil den maksimale vandstand i Tissø kun blive sænket marginalt. Det peger i retning af, at forholdene langs Nedre Halleby Å, fra søens udløb til åens udløb i Storebælt, er bestemmende for maksimal vandføring og dermed det tempo, søvandstand kan sænkes i.

De indledende resultater indikerer desuden, at man hverken med det eksisterende stemmeværk eller uden stemmeværk kan opfylde krav til minimumsvandføring varierende imellem 0,5 – 1,5 m³/s over året. Ved lave vandstande, dvs. under 1,1 m, ledes der ikke tilstrækkeligt vand via udsparinger i overløbskant og omløb. Årsagen til dette resultat skal findes i fysiske begrænsninger, dels i stemmeværk og omløb ved lave vandstande, dels i den måde sigtepunktsskurven er konstrueret og dels i krav til minimumsvandføring (især 1,5 m³/s for

september). Det er uhensigtsmæssigt, at den nuværende styring (sigtepunktsskurven) foreskriver en vandstand ned til 0,85 meter, og som senere holdes konstant på 1,1 meter. Det opstillede modelværktøj kan bruges til vurdering af vandføringen i en tilnærmet naturlig tilstand (intet stemmeværk) og derigennem være med til at danne en reference for, hvad man kan forvente af vandføringen i Nedre Halleby Å hen over året.

Yderligere viser beregningerne, at indstrømningen til Tissø for de fleste år er lavere i starten af perioden, hvor en høj minimumsvandføring kræves (sensommer og efterår). For at udligne dette og for fortsat at kunne opretholde minimumsvandføring, kræves en opmagasinerings af vand i Tissø, som sigtepunktsskurven ikke tillader. Det vurderes, at en opmagasinerings, svarende til 0,3-0,4 m højere vandstand hen over forår-sommer, vil øge muligheden for at opfylde minimumsvandføringskrav og øge forsyningssikkerhed for indvinding i langt de fleste år.

De indledende resultater har dannet basis for formulering af to nye styringsmodeller.

7.1.2 Nye styringsmodeller

De nye styringsmodeller bygger på at tillade opmagasinerings og samtidig at levere tilstrækkelig minimumsvandføring hen over året. Styringsmodellerne bygger på at regulere vandføring og vandstande indenfor 4 styringszoner. Samtidig antages stemmeværket modificeret, så det vil bestå af 4 styrbare porte, hvor minimumsvandføringen ledes igennem en af portene i stedet for som nu via overløbskant og omløb. Det øger muligheden for at styre og regulere ved både lave og høje vandstande. Det forudsættes, at porten kan styres, så der netop kan frigives de foreskrevne minimumsvandføringer.

Hvad angår muligheden for at forbedre stemmeværksstyringen, således at minimumsvandføringen i højere grad overholdes, kan det konkluderes, at dette kan lade sig gøre for perioder med minimumsvandføringskrav på hhv. 0,5 m³/s og 0,7 m³/s, hvorimod især kravet om 1,5 m³/s i september ikke altid kan opfyldes. Dog opfyldes krav til minimumsvandføringen i perioden, hvor fisk vandrer samlet set bedre (september-januar). Med den nuværende stemmeværk og sigtepunktsskurven beregner modellen, at minimumsvandføringskriterier ikke vil kunne opfyldes i 11-35 % af tiden, men at det kan reduceres til 0-17 % af tiden ved ny styringsmodel og stemmeværk. Øges indvindingen fra 3,5 til 7 mio. m³/år med ny styringsmodel, øges perioden uden opfyldelse af minimumsvandføringskriterier marginalt til 0-18 % af tiden. Høje vandstande over 1,47 m vil optræde i 41-46 % af tiden og påvirkes kun i ringe grad af ændret styringsmodel eller indvinding.

Klimaændringer og klimavariabilitet kombineret med de nye styringsmodeller vil ikke væsentligt ændre, hvor ofte høje vandstande optræder, men evnen til at opretholde minimumsvandføringskravene. Under den nuværende klima vil den nye styringsmodel og en indvinding på 5 mio. m³/år indebære, at minimumsvandføringskravet ikke er opfyldt i 1-17 % af tiden, hvilket med klimaændring og klimavariabilitet øges til 2-21 %. Tallene bliver en anelse højere ved indvinding på hhv. 5 og 7 mio. m³/år. Uanset den forbedrede styring vil våde og tørre perioder forekomme med overskridelse af kriterier som funktion af klima, klimaændringer og klimavariabilitet. Det skal bemærkes, at fra den nuværende situation, hvor vandstanden kun sjældent når under 0,8 m og giver problemer i forhold til både indvinding og miljø, vil klimaændring og især klimavariabilitet øge hyppigheden af perioder med lav vandstand. Det betyder, at der skal tages højde for den forventede udvikling ved planlægning af backup- alternativer, der kan sikre forsyningen ved midlertidig reduktion eller udfald af Tissø ressourcen.

Resultaterne af modelkørsler med den nye styringsmodel viser, at skønt øget indvinding principielt kan øge presset på vandressourcen i sensommeren er den ikke hovedårsag til den manglende opfyldelse af kriteriet om minimumsvandføring. Derimod kan styringen af stemmeværket

forbedres betydeligt og væsentligt forbedre mulighederne for at opfylde kriterierne, især hvad angår opfyldelse af krav til minimumsvandføring. Ved ikke at følge sigtepunktsskurven, men styre direkte imod at opfylde minimumsvandføringskrav, opnås først og fremmest positive forbedringer for fisk og indvinding. Styringen er desuden forbedret med henblik på kun at reducere den øgede vandstand i sommerhalvåret marginalt. Der er arbejdet meget med mulighederne for at forbedre forholdene for opgang af ørred, og det har vist, at der kan skabes bedre forhold for ørred ved at styre stemmeværket efter vandføring, og at forholdene i forhold til vandføring er bedre end de forhold, ørred vil have i en situation uden stemmeværk og indvinding. Der kan opnås markante forbedringer med et modificeret stemmeværk og en ny styringsmodel, men forskellen i resultater imellem styringsmodel A og B er lille.

Forbedringen i forhold til fisk skal dog ses i forhold til øvrige interessenter og kriterier. Det kan kort sammenfattes ved:

- 1) Med hensyn til landbrug vil middelvandstanden øges (5-6 cm), hvilket vil forekomme i sommerhalvåret, mens perioden med vandstand over 1,47 m, dvs. primært i vinterhalvåret, er stort set uforandret.
- 2) Den nye styring påvirker kun i ringe grad det årlige mønster med oversvømmelse og tørlægning af fugleøerne og dermed perioden til rådighed for ynglefugle i forår-sommerperioden. Det vil være muligt at udlægge materiale til at justere øernes kote, hvis der imod forventning skal kompenseres for den nye styringsmodel.
- 3) Af hensyn til vegetationen ønskes vandspejlsvariationer som for nuværende forhold. Yderpunkterne i vandstand vil forblive som nu med en ny styring, men dog med en tendens til at vandstanden i intervallet 1,0 – 1,5 m vil ligge ca. 10 cm højere.
- 4) Vandstande over 2,4 m, der kan betyde oversvømmelse ved roklub, vil med hensyn til varighed og hyppighed være stort set som i dag.
- 5) Indvindingsmængden på mellem 3,5 – 7,0 mio. m³/år påvirker kun i begrænset grad opfyldelsen af de øvrige kriterier, men en ny styring vil kunne reducere forsyningssikkerheden målt på den samlede periode med vandstand under 0,8 m fra nuværende ca. 0 % af tiden til ca. 2 % af tiden.

Det gælder for alle af de ovennævnte kriterier og interessenter, at der skal tages højde for effekt af klimaændringer og klimavariabilitet, uanset hvilken styringsmodel der vælges.

Hovedformålet med projektet har været at analysere styringen af stemmeværket og opfyldelsen af de opstillede kriterier på baggrund af ny indvindingstilladelse. Der er opstillet styringsmodeller, og de er aftestet ved hjælp af modellen for at belyse, om der kan opnås en mærkbar forbedring i forhold til de opstillede kriterier. Konklusionen er entydigt, at modifikation af stemmeværket samt en ny styringsmodel i højere grad vil kunne opfylde de kriterier, interessenterne har opstillet. Der er tale om markante forbedringer og kun marginale forringelser. På det grundlag må det anbefales, at der tages skridt til at modificere stemmeværk og implementere den nye styringsmodel.

Mulighederne for styring og regulering er påvirket af nedstrøms forhold. Det vil sige, at vandføringskapacitet, vandstandsforhold og risiko for oversvømmelse langs Nedre Halleby Å er begrænsende faktorer med hensyn til at aflede tilstrækkeligt vand fra Tissø og sænke søvandspejlet. Det betyder, at der skal større fokus på de fysiske forhold fra stemmeværket, igennem Nedre Halleby Å og til udløbene ved Storebælt, før det kan vurderes, om styringen også kan reducere oversvømmelsesrisikoen generelt og i forbindelse med stormflod og stigende havvandstand.

BILAG

BILAG A – Resumé

Resumé af projektet - Ny styringsmodel for Tissø
stemmeværk

Kalundborg Forsyning leverer vand fra Tissø til industrier og virksomheder i Kalundborg. I forbindelse med at vandindvindingstilladelsen skal fornyes, har Kalundborg Forsyning iværksat en bredere analyse af konsekvenser og mulighed for at forbedre styringen af Tissø Stemmeværk i forhold til en række interesser knyttet til vandstand i Tissø og vandføring i Halleby Å.

Tissø og de tilstødende vandområder er alle udpeget som beskyttede Natura 2000 områder, hvor der er en særlig forpligtigelse til at forbedre naturforholdene. Der har derfor været fokus på naturtilstanden nu, og hvordan den kan forbedres i forbindelse med en indvindingstilladelse.

Interesser og kriterier kortlagt i Tissø Forum

Kalundborg Kommune og Kalundborg Forsyning har dannet "Tissø Forum" der igennem møderække og dialog med repræsentanter fra en række interessenter omkring søen har kortlagt de lokale forhold der berøres ved regulering af vandstand og vandføring ved Tissø. Desuden har resultater af arbejdet med styringsmodel været præsenteret undervejs. Det har bl.a. bidraget med at definere kvantitative kriterier som den nye styringsmodel er målt op imod og hvor mulige interessekonflikter kan opstå.

Kort opsummeret har Tissø Forum medvirket til at kortlægge følgende interesser:

- Landbruget ønsker at holde vandstanden under 1,47 m af hensyn til afvanding og dyrkning, særligt i forårsmåned, og desuden ønskes lav søvandstand i sommerperioden af hensyn til adgang og græsning på bredejerens arealer.
- Lystfiskere ønsker at sikre gode forhold for ophold og vandring af ørred ved at opretholde en minimumsvandføring i Nedre Halleby Å på 0,5 m³/s hele året, dog øget til 0,7-1,5 m³/s i perioden september-januar
- Fuglelivet afhænger af at øer i Tissø er henholdsvis oversvømmede (vandstand på mindst 1,6 m) om vinteren og tørre i yngleperioden (vandstand på højst 1,2-1,4 m i perioden april-oktober)
- Plantelivet afhænger af at den nuværende årstidsvariation i vandstand fastholdes, herunder vinter maksimum og sommer minimum.
- Roklub og Fuglede havn ønsker af hensyn til oversvømmelsesrisiko at vandstanden holdes under 2,4 m.
- Kalundborg Forsyning ønsker indvindingstilladelse på 3,5 mio. m³/år øget til 5,0 mio. m³/år eller på længere sigt 7,0 mio. m³/år

I arbejdet med en ny styringsmodel indgår ovennævnte kriterier og det er beregnet hvor stor en del af tiden, over en mangeårig periode, at de vil kunne opfyldes. Det giver et mål for hvor godt styringen fungerer i forhold til at sikre de forskellige interesser.

Tissø stemmeværk og styring i dag

Tissø Forum har sat ord på de problemer der opleves omkring Tissø og opfattelsen af hvordan den nuværende styring af stemmeværket fungerer. På den baggrund har projektet indledende set nærmere på måledata og årsager til periodevis utilfredsstillende forhold. Overordnet kan problemstillingen opdeles i en høj søvandstand om vinteren og en lav søvandstand i sommer- og efterårsmåned. Det har som udgangspunkt været forventningen blandt interessenter af stemmeværket ved Tissøs udløb kan reguleres til at afhjælpe både høje og lave vandstande.

Stemmeværket består af fire porte og et omløb, hvoraf en port reguleres af hensyn til at følge en sigtepunktskurve for vandstand. Den beskriver et vandstandsfald fra 1,47 m i april til 0,85 m i september. Den aktuelle søvandstand måles og bruges til automatisk at styre

stemmeværksporten og frigive eller tilbageholde vand fra Tissø til Nedre Halleby Å, så sigtekurven løbende følges.

Ud fra gennemgang af målte tidsserier og en hydraulisk model af vandløbssystem og sø (fra Øvre Halleby Å ved Bromølle til Nedre Halleby ås udløb til Storebælt) kan det for det nuværende stemmeværk konkluderes at:

- Maksimal søvandstand på 1,47 m overskrides i mere end 40 % af tiden, den ønskede minimumsvandføring (0,5–1,5 m³/s) kan ikke opretholdes i 11-35 % af tiden og indvinding (3,5 mio. m³/år) må reduceres 0 % af tiden.
- Regulering af stemmeværk og omløb kan ikke afhjælpe høje vandstande i Tissø, men er samtidig ikke hovedårsag hertil.
- Det eksisterende stemmeværk og omløb ikke er i stand til at levere tilstrækkelig vandføring til Nedre Halleby Å ved lave vandstande, dvs. under 1,0 m.
- Styling efter sigtepunktskurven er medvirkende årsag til, at kriterier for vandføring i visse år ikke kan opfyldes i sommer-efterårsperioden
- Omløbet giver ringe mulighed for styling af gennemstrømningen i modsætning til automatisk regulerede porte.

Ser man på en vandbalance for Tissø er det i mange år ikke muligt både at sænke vandspejlet til 0,85 m i september og samtidig opretholde den ønskede minimumsvandføring, da der ikke er tilstrækkelig tilstrømning til Tissø i perioden. Det taler for at tilbageholde en større andel i Tissø og øge vandstanden for derved at opmagasinere vand og bedre sikre indvinding og minimumsvandføring i sensommeren.

Nye styringsmodeller – fordele og ulemper

Med afsæt i analysen af de nuværende forhold er en række forbedringsmuligheder indarbejdet i de nye styringsmodeller.

Først og fremmest forudsættes stemmeværkets fysiske udformning ændret ved at hele vandføringen passerer igennem fire regulerbare porte og ikke som nu at en del løber via omløb. Dernæst styres der ikke efter en fast vandstandskurve, men efter en målt on-line vandføring umiddelbart nedstrøms stemmeværket. Endelig defineres zoner i forhold til de kriterier der søges opfyldt i den aktuelle situation og på den pågældende årstid :

Styringsmodel A:

- 1) Zone I (højvande, vandstand over 1,47 m): Alle fire slug åbnes, maksimal afledning af vand for at forebygge risiko for oversvømmelse.
- 2) Zone II: Vandføring styres efter henholdsvis 0,7 m³/s og 1,5 m³/s for at opfylde krav til ørredvandring.
- 3) Zone III: Vandføring styres efter henholdsvis 0,5 og 0,7 m³/s for at opfylde krav til ørredopvækst og ophold.
- 4) Zone IV (lavvande, vandstand under 0,8 m): Indvindingen reduceres af miljøhensyn (vandføring er som i zone 3).

Det vil i praksis sige at der ud over højvandsituationen hvor stemmeværkets porte åbnes helt kun lukkes den mængde vand ud der kræves af hensyn til minimumsvandføringen, hvilket medfører at der kan forekomme vandstande i sommerhalvåret der ligger over den nuværende sigtepunktskurve.

Styringsmodel B afviger fra Styringsmodel A ved at Zone I og Zone II slås sammen hvilket betyder at stemmeværkets porte ikke styres efter en minimumsvandføring på 1,5 m³/s, men at den naturgivne tilstrømning det pågældende år istedet er afgørende for udstrømningen fra Tissø til Nedre Halleby Å.

På baggrund af resultater af modelberegninger med de nye styringsmodeller (A og B) for Tissø stemmeværk konkluderes at:

- Maksimal søvandstand på 1,47 m overskrides fortsat i mere end 40 % af tiden, men den ønskede minimumsvandføring (0,5–1,5 m³/s) kan opretholdes i væsentligt længere tid (udfald i 0-18 % af tiden) og indvinding (3,5 mio. m³/år) må reduceres 0 % af tiden.
- Middelvandstanden over sommerperioden øges med 12 cm i forhold til den nuværende styring efter sigtepunktetskurven.
- Resultatet forudsætter at den målte on-line vandføring er præcis og at portene kan reguleres tilstrækkeligt præcist til netop at ramme de ønskede niveauer for minimumsvandføring

Klimaændring og klimavariabilitet

En ny indvindingstilladelse vil gælde årtier ud i fremtiden og effekter af klimaændringer må forventes at indtræffe indenfor denne tidshorisont. Samtidig viser de historiske målte vandføringstidsserier at variabiliteten med det nuværende klima har resulteret i sekvenser af år med tørre eller våde forhold. Det vil sandsynligvis også kunne forekomme i fremtiden og vil kunne lægge yderligere pres på vandressource og afvandingsforhold. Derfor har det været formålet at se på både nuværende forhold, historisk klimavariabilitet og klimaændringer som de forventes at indtræffe frem til 2050. For Danmark og Vestsjælland forudsiger klimaprognoser at temperaturen stiger, vinterperioden bliver vådere, sommeren tørrere og fordampningen stiger. Ved at indregne klimaforhold i beregning af afstrømning kan en ny styringsmodel testes i forhold til hvor robust og bæredygtig den vil være samt i hvor høj grad forsyningsikkerheden kan opretholdes.

Når de nye styringsmodeller testes imod klimaændringer og klimavariabilitet svarer det til vanskeligere forhold end de nuværende både med hensyn til højvandssituationen om vinteren og lav vandføring i sensommer og efterår. Det øgede pres giver sig udtryk i at der ved en indvinding svarende til den nuværende (3,5 mill m³/år) optræder marginale ændringer i forhold til høje vandstande hvor de stadig overskrider de 1,47 m i ca. 40 % af tiden. Derimod øges den tid hvor minimumsvandføring ikke kan opretholdes til 3-20 % og indvindingen vil skulle reduceres i 4 % af tiden.

Den modelberegnete vandstand falder under 0,8 m i flere på hinanden følgende tørre år og i perioder der kan vare 3-6 måneder. Resultatet peger i retning af udfordringer med at opretholde forsyningsikkerhed og behov for en supplerende reserve.

Beskrivelse af fremtidige klimaændringer og klimavariabilitet er behæftet med usikkerhed, men resultaterne peger i retning af at den største udfordring i forhold til at opfylde de forskellige kriterier i fremtiden ligger netop her.

Indvindingens rolle nu og i fremtiden

Kalundborg Forsyning har i dag en indvindingstilladelse på 3,5 mio. m³/år og det er ved hjælp af model og den nye styringsmodel (styringsmodel B) undersøgt hvad en øget indvindingdmængde til 5,0 og 7,0 mio. m³/år kan betyde i forhold til både de opstillede kriterier og forsyningsikkerhed. Det er undersøgt både ved det nuværende klima og med de forventede klimaændringer.

Desuden er det undersøgt hvilken effekt det har at reducere indvindingen når søvandstanden falder under 0,8 m.

- Med de nye styringsmodeller og højere søvandstand i sommerhalvåret er et muligt at øge indvindingen og alligevel opnå en markant bedre opfyldelse af krav til minimumsvandføring end det er tilfældet med det nuværende stemmeværk styret efter sigtepunktskurven.
- Fordobles indvindingen fra 3,5 mio. m³/år til 7,0 mio. m³/år med det nuværende klima vil det medføre, dels at søvandstanden oftere ligger under 0,8 m og dels at minimumvandføringskravet på 0,5 m³/s ikke kan opfyldes i samme grad. Der er tale om manglende opfyldelse svarende til yderligere 1 % af tiden.
- Indregnes klimaændring og klimavariabilitet vil der ifølge modelberegning optræde længere perioder hvor vandstanden falder under 0,8 m hvilket indikerer problemer i forhold til samtidig at opretholde minimumsvandføring og fuld indvinding. Når indvinding øges fra 3,5 mio. m³/år til 7,0 mio. m³/år vil perioden med vandstand under 0,8 m øges fra 5 til 8 % af tiden. I forhold til forsyningsikkerhed må der derfor påregnes behov for en reserve eller back-up ressource.
- Det er undersøgt hvor stor en rolle reduktion af indvinding ved søvandstande under 0,8 m spiller. Derfor er der for nuværende forhold beregnet vandstand med fuld eller ingen reduktion af indvinding under 0,8 m ved indvinding på hhv. 5,0 og 7,0 mio m³/år. Ved fuld indvinding i forhold til ingen indvinding under 0,8 m bliver minimumsvandstanden 4-8 cm lavere og varigheden af perioder under 0,8 m (ca. 2 måneder i oktober-december) øges med 1-2 uger.

Konklusion

Det har været projektets formål at undersøge og belyse konsekvenser af en ny styring af Tissø stemmeværk. Det eksisterende stemmeværk, omløb og styring efter sigtepunktskurven tilfredstiller ikke de opstillede kriterier i særlig høj grad. Med et moderat ændret stemmeværk og nye styringsmodeller (A og B) baseret på opfyldelse af vandføringskrav opnås en klar forbedring især med hensyn til opfyldelse af minimumsvandføringskrav og uden mærkbare negative konsekvenser for øvrige interesser. Modelresultaterne viser at stemmeværket ikke kan afhjælpe de høje vandstande om vinteren uanset styring.

Styringsmodel B (3 zoner) repræsenterer en forenkling i forhold til styringsmodel A (4 zoner) og den tager hensyn til det faktum at styring efter et minimumsvandføringskriterie på 1,5 m³/s fra september måned ikke er hensigtsmæssigt. I langt de fleste år vil det ikke kunne opnås da tilstrømningen til Tissø i denne periode er for lav. I forhold til de eksisterende forhold er der markante forbedringer i målopfyldelse ved de undersøgte ændringer m.h.t modificeret stemmeværk og nye styringsmodeller (A og B), men forskellen imellem hhv. styringsmodel A og B er dog forholdsvis beskeden.

Projektets resultater peger også på at klimaændringer og klimavariabilitet uanset indvindingsmængde kan forringe mulighederne for opfylde de forskellige interesser og kriterier da hyppigere og længerevarende tørre perioder må forventes. Af hensyn til forsyningsikkerhed vil der være behov for i perioder at supplere med andre vandressourcer.

Mulighederne for styring og regulering er påvirket af nedstrøms forhold. Det vil sige, at vandføringskapacitet, vandstandsforhold og risiko for oversvømmelse langs Nedre Halleby Å er begrænsende faktorer med hensyn til at aflede tilstrækkeligt vand fra Tissø og sænke søvandspejlet. Det betyder, at der skal større fokus på de fysiske forhold fra stemmeværket, igennem Nedre Halleby Å og til udløbene ved Storebælt, før det kan vurderes, om styringen også kan reducere høje vandstand i vinterhalvåret, både nu, og med forventet havvandspejlstigning i Storebælt forårsaget af klimaændringer.