

Olav Magnus Egeland

Produksjonssimuleringar av Tjørhom pumpekraftverk

Masteroppgåve i vassdragsteknikk
Rettleiar: Kaspar Vereide
Medretteiar: Leif Lia
Juni 2022

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

MASTEROPPGAVE I VANNKRAFT- OG VASSDRAGSTEKNIKK

Kandidat: Mr. Olav Magnus Egeland

Tittel: Økonomisk optimalisering av Tjørhom pumpekraftverk

1. Bakgrunn

Pågående forskning på NTNU viser at ombygging av eksisterende vannkraftverk til pumpekraftverk er teknisk mulig og økonomisk kostnadseffektivt. Sira-Kvina kraftselskap vurderer derfor å bygge om Tjørhom kraftverk ved å installere et nytt reversible pumpeaggregat i det eksisterende kraftverket. Det nye aggregatet vil kreve en ny kraftstasjon og tilkobling til den eksisterende vannveien. Flere alternativ har blitt vurdert. Hovedutfordringen i de teknisk-økonomiske vurderingene er å estimere inntektene, ettersom Sira-Kvina systemet er komplekst og ombygging av Tjørhom kraftverk vil påvirke kjøring av både oppstrøms og nedstrøms kraftverk.

2. Oppgavens innhold

Oppgaven skal omfatte, men ikke begrenses til oppgavene beskrevet under.

2.1 *Literatur- og skrivebordsstudie*

Kandidaten skal gjennomføre en litteraturstudie av økonomisk optimalisering av pumpekraftverk. Kandidaten skal samle kart, tegninger og dokumentasjon om det eksisterende kraftverket, hydrologi og drift av Tjørhom kraftverk.

2.2 *Hovedoppgaver*

Basert på det innsamlede materialet skal følgende utføres:

- 1 Foreslå tre designalternativer for ombyggingen til pumpekraftverk.
- 2 Beregn estimerte byggekostnader for de tre alternativene.
- 3 Lag en produksjonssimuleringsmodell i MS Excel.
- 4 Simuler kraftverksdriften og inntektspotensialet for de tre alternativene.
- 5 Basert på resultatene, foreslå anbefalt design av Tjørhom pumpekraftverk.
- 6 Skriv rapport og gi forslag til videre arbeid.
- 7 Lag en power-point presentasjon og presenter for Sira-Kvina kraftselskap (og andre interessenter).

3 Veiledning og formelle rammer

Førsteamanuensis II Kaspar Vereide er hovedveileder og Professor Leif Lia vil være medveileder. Faglige spørsmål og diskusjoner med fagansvarlige hos Sira-Kvina kraftselskap er anbefalt. Bidrag og informasjon mottatt fra andre en kandidaten selv skal refereres. Forskning og ingeniørarbeid utført av kandidaten som en del av oppgaven gjøres innenfor en akademisk kontekst. Kandidaten og veilederne står fritt til å introdusere antagelser og forutsetninger som kan anses som urealistisk eller ukorrekt i en industriell eller kommersiell kontekst.

4 Rapportformat og referanser

Rapporten skal skrives med et egnet tekstredigeringsprogramvare, og figurer og tabeller skal være av høy kvalitet. Rapporten skal inneholde sammendrag, innholdsfortegnelse, og referanseliste. Rapporten skal leveres elektronisk som PDF i B5-format. Sammendraget skal ikke overstige 450 ord. Rapporten skal leveres innen 11. juni 2022.

Trondheim, 10. januar 2022



Kasper Vereide
Førsteamanuensis
Fakultet for Ingeniørvitenskap
NTNU

Samandrag

Tjørhom og Tonstad kraftverk er to kraftverk eigd av Sira-Kvina. Låg installert effekt i Tjørhom, gjer at kraftverket produserar samanhengande vinterstid for å levere nok vatn til Tonstad. Låg magasinkapasitet, kombinert med stort lokaltilsig, gjer at Tonstad tvangskøyrast mykje på lokaltilsiget. Ved å utvide Tjørhom kraftverk med eit reversibelt aggregat, kan Tjørhom produsere meir prisoptimalt, og delar av tvangskøyringa i Tonstad kan fjernast. Målet for oppgåva er å utvikle ein metodikk for å modellere drifta av Tonstad og Tjørhom kraftverk. Modellinga skal kunne sjå på endringa ei utviding av Tjørhom kraftverk til eit pumpekraftverk på 240 MW, gjer med drifta av begge kraftverka.

Det vart utvikla ein produksjonsmodelleringsmodell for produksjonen i Tjørhom og Tonstad kraftverk. Både eksisterande Tjørhom kraftverk og tre alternative utbyggingar av Tjørhom pumpekraftverk, vart modellert på historiske data, for tiårsperioden 2010-2019. Den teoretiske maksimale inntektsauka i dei to kraftverka, er rundt 190 millionar kroner årleg, basert på historiske prisar og produksjon.

Utvidinga av Tjørhom kraftverk ga auka inntekt og redusert produksjon. Modellen kunne berre optimalisere innanfor ei veke, som avgrensa inntekta i modellen. Manglande langsiktig planlegging gjorde, saman med inndata som ikkje var nøyaktige nok, at den modellerte produksjonen og inntekta i Tonstad vart lågare enn historisk.

Den største potensielle inntektsauka frå bygging av Tjørhom pumpekraftverk, er optimalisert drift i Tonstad. Etter ei utbygging vil enkelte av avgrensingane til kraftverka betrast, særleg knytt til tvangskøyring av Tonstad. Andre avgrensingar, særleg kor mykje vatn som kjem til Tonstad frå Sira-strengen, vil framleis kunne hindre optimal drift i både Tjørhom og Tonstad. Forenklingar av avgrensingane i systemet kan overvurdere inntektspotensialet til ei utbygging. Manglande vurdering av dei eksisterande avgrensingane, kan òg overvurdere fleksibiliteten i dagens system. Auka i fleksibilitet som Tjørhom pumpekraftverk gir, vert då undervurdert, som kan gi for låg inntektsauke.

På bakgrunn av modelleringa, tilråast det at avløpstunnelen til det nye aggregatet i Tjørhom, drivast heilt til Ousdalsvatn. Det gir størst fleksibilitet, både i produksjon og pumping.

Abstract

Tjørhom and Tonstad are two hydropower plants owned by Sira-Kvina. Low installed capacity in Tjørhom forces the power plant to produce almost constantly during winter, in order to supply Tonstad with water. In Tonstad, low reservoir capacity, combined with large local discharge, forces the power plant to produce on low prices to prevent loss of water. By expanding Tjørhom with a reversible turbine, Tjørhom can produce more energy on the highest prices. It will also allow for pumping of the local discharge in Tonstad, thus reducing the forced production on low prizes. The assignment is to develop a methodology for modelling production in Tjørhom and Tonstad power plants. The modelling should be able to assess how an expansion of Tjørhom hydropower plant to a 240 MW pumped storage plant will change the production in both power plants.

A production simulation model was developed for Tjørhom and Tonstad power plants. Both the existing 120 MW Tjørhom hydropower plant, and three alternatives for the 240 MW expanded Tjørhom pumped storage plant, was modelled. The model was based on historical data for the period 2010-2019. The maximal theoretical increase in income, was approximately 190 MNOK per year, based historical prices and production.

The expansion of Tjørhom increased the income in Tjørhom, but reduced the production. The model could only optimise week by week, which limited the modelled income. Together with inadequate input data, the lack of long term planning in the model lead to lower production and income in Tonstad than historically.

The largest potential increase in income from expanding Tjørhom, is more optimized production i Tonstad. Some of the limitations in the existing system, especially in regards of forced production in Tonstad, will be reduced by an expansion. Other limitations, especially how much water Tonstad gets from each of its two reservoirs, can still limit the production in both power plants. Simplifications of the systems limitations can overestimate the potential income. On one hand, the increased flexibility from expanding Tjørhom can be exaggerated, giving to high potential income from an expansion. On the other, underestimating the limitations in the existing system will exaggerate the flexibility and modelled income of the existing system.

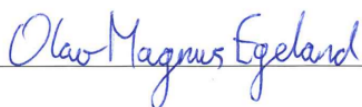
Based on the modelling, it is recommended that the tailrace tunnel of Tjørhom pumped storage plant should be built directly to Ousdalsvatn. This gives the largest flexibility, both during production and pumping.

Forord

Denne rapporten er skrive våren 2022 på Institutt for bygg- og miljøteknikk, IV, på Noregs teknisk-naturvitskapelege universitet, som avsluttinga av eit femårig studieløp innan bygg- og miljøteknikk. Problemstillinga i oppgåva vart funne i lag med Sira-Kvina kraftselskap og Kaspar Vereide.

Arbeidet med Tjørhom pumpekraftverk har vore omfangsrikt og spennande. Kompleksiteten i prosjektet har gjort arbeidet krevande, men òg veldig lærerikt. I sum har arbeidet auka forståinga mi av både pumpekraftverk og vanleg kraftverk.

Eg vil gjerne takke rettleiaren min, førsteamanuensis II Kaspar Vereide, for god og tett oppfølging gjennom heile våren. Eg vil òg takke medrettleiar professor Leif Lia, for hjelp med utforming av rapporten.



Olav Magnus Egeland
Trondheim, 11. juni 2022

Innhold

Samandrag	i
Abstract	iii
Forord	v
Innhold	viii
Forkortingar	ix
Symbol	xi
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Prosjektskildring	2
1.3 Tjørhom og Tonstad kraftverk	3
1.4 Utforming av rapporten	7
2 Teori	9
2.1 Kraftverk	9
2.2 Pumpekraftverk	13
2.3 Modellspesifikk teori	15
2.4 Omgrep	17
3 Metode	19
3.1 Alternative utbyggingar	19
3.2 Inndata	26
3.3 Kontroll av oppgitte data	36
3.4 Forutsetningar og avgrensingar	41
3.5 Parametrisering av Tonstad kraftverk	45
3.6 Parametrisering av Tjørhom pumpekraftverk	48
3.7 Simulering i modellen	58
3.8 Inntekter	63
3.9 Sensitivitetsanalyse	64
4 Resultat	66
4.1 Fysiske avgrensingar	66
4.2 Utbyggingskostnad	68
4.3 Modellresultat	68
4.4 Magasinutvikling	76
4.5 Produksjon og inntekt	80
4.6 Fysiske avgrensingar	88
4.7 Utforming av Tjørhom pumpekraftverk	90
5 Diskusjon	93

INNHALD

5.1	Avgrensingar i modelleringa	93
5.2	Avgrensingar i systemet	93
5.3	Gyldigheit til resultata	94
6	Konklusjon	95
6.1	Framtidig arbeid	95
	Referansar	98
	Appendiks	99

Forkortingar

GWh	Gigawatttime
HRV	Høgste regulerte vasstand
LRV	Lågaste regulerte vasstand
MNOK	Millionar norske kroner
MW	Megawatt
MWh	Megawatttime
NOK	Norske kroner
NTNU	Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
kV	Kilovolt
moh.	Meter over havet

Symbol

Symbol	Eining	Skildring
A	m^2	Areal
D	m	Diameter
E	MWh, GWh, TWh	Energi
H	m	Hydrostatisk trykk
L	m	Lengd
M	$m^{1/3}/s$	Manningstal
P	W	Effekt
Q	m^3/s	Vassføring, slukeevne
R_h	m	Hydraulisk radius
T	time, dag, veke, månad, år	Tid
V	m^3	Volum
W	W	Watt
f	-	Darcy-Weisbach-friksjonsfaktoren
g	m/s^2	Tyngdeaksellerasjonen
h_f	m	Falltap
k_f	m^5/s^2	Falltapskoeffisient
p	NOK/MWh	Pris
η	-	Verknadsgrad
ρ	kg/m^3	Tettleik

1 Introduksjon

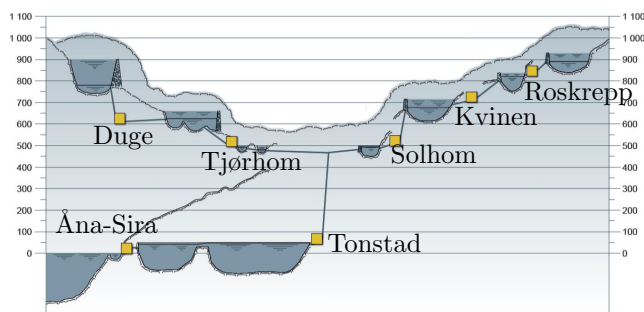
1.1 Bakgrunn

Tjørhom kraftverk er ein av i alt 8 kraftstasjonar eigd av Sira-Kvina kraftselskap. Sira-Kvina nyttar vatnet frå vassdraga Sira og Kvina i ei samla utbygging. Tjørhom kraftverk er eit av kraftverka i Sira-strengen, og nyttar fallet mellom magasinane Gravvatn/Valevatn/Kilen og Tjørhomsvatn. Kraftverket vart ferdigstilt i 1973, og har ein installert effekt på rundt 126 MW, etter ei nyleg oppjustering. Det svarar til ei slukeevne på rundt $88 \text{ m}^3/\text{s}$, som gir kraftverket ei brukstid på over 4700 timar. Heilt sidan prosjekteringa av dagens kraftverk, har det eksistert planar for å setje inn eit tredje aggregat.

1.1.1 Bakgrunn for utviding

Den høge brukstida til Tjørhom kraftverk avgrensar moglegheita for prisoptimalisert køyring. Om ein aukar den installert effekten, kan kraftverket produsere straum når prisen er høgast. Historisk sett samantsett høg pris med stor etterspurnad (Bruland mfl., 2021).

Saman med Solhom kraftverk i Kvina-strengen av Sira-Kvina, leverer Tjørhom kraftverk vatn til Tonstad kraftverk. Tonstad er Noregs største kraftverk målt i produksjon, og har større slukeevne enn Tjørhom og Solhom kraftverk til saman. For å levere nok vatn til Tonstad, produserar Tjørhom kraftverk ofte samanhengande i lengre periodar. Ved å auke slukeevna i Tjørhom til over $160 \text{ m}^3/\text{s}$, vil dei to kraftverka i sum ha større slukeevne enn Tonstad.



Figur 1.1: Oversikt over kraftverka i Sira-Kvina. Modifisert frå Sira-Kvina (2015)

Restfeltet til Tonstad har ei gjennomsnittleg avrenning på 1030 millionar m³ årleg (NVE, 2022b). I sum har magasina til Tonstad ein reguleringsgrad på under 7 %. For å hindre tap av vatn, tvangskøyrast Tonstad ofte på lokaltilsiget. Eit reversibelt pumpeaggregat i Tjørhom kan pumpe dette vatnet opp til Gravvatn, og slik flytte delar av produksjonen i Tonstad til meir prisgunstige tidspunkt.

1.2 Prosjektskildring

Tre utbyggingsalternativ for Tjørhom pumpekraftverk skal foreslåast, og utbyggingskostnaden estimerast. Deretter skal det lagast ein produksjonssimuleringsmodell i MS Excel, som skal simulere kraftverksdrifta og inntekspotensialet for dei tre alternativa. Basert på resultatane, skal tilrådd utforming av Tjørhom pumpekraftverk foreslåast.

1.2.1 Tidlegare produksjonssimulering

Statkraft modellerte inntekta frå Tjørhom pumpekraftverk i 2021. Simuleringsresultata vart ikkje gode nok. Mellom anna klarte ikkje simuleringa å finne noko særleg gevinst i dei tilstøytande kraftverka. Produksjonssimuleringa baserte seg på fleire forenklingar. Mellom anna vart magasina til Tonstad, Ousdalsvatn og Homstølvatn, slått saman i modelleringa. Overføringstunnelen mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn vart ikkje inkludert (Eggen, 2021).

1.2.2 Avgrensingar

Det er to hovudavgrensingar i oppgåva:

1. Kva alternative utbyggingar av Tjørhom kraftverk som modellerast, og
2. Kva kraftverk som inkluderast i modellen

Utforming av Tjørhom pumpekraftverk

Ved modellering av Tjørhom pumpekraftverk, må ein bestemme

- Slukeevne og installert effekt
- Utforming på stasjon
- Løysing for ny avløpstunnel

I rapporten undersøkast kun ulike alternativ for ny avløpstunnel. Alle simulerte

alternativ har eitt nytt reversibelt aggregat, med installert effekt på 120 MW.

Kraftverk i produksjonssimulering

Sira-Kvina er eit intrikat system av magasinkraftverk i serie. Utviding av Tjørhom kraftverk vil endre driftsmønsteret både der og i alle tilstøytande kraftverk. Hovudsakleg vil drifta i Duge, Tonstad og Solhom kraftverk endrast. Meir optimalisert drift dei tilstøytande kraftverka er truleg ein stor del av inntektsauka ved bygging av Tjørhom pumpekraftverk.

For å redusere kompleksiteten, endrar modellen kun køyremønsteret i Tjørhom og Tonstad kraftverk. Produksjonen i dei resterande kraftverka vert sett lik historisk produksjon. Om vasstanden i Gravatn vert for låg, kan ikkje Duge pumpekraftverk pumpe vatn. Dette er sett vekk ifrå i modellen, slik at historisk pumping i Duge ikje endrast.

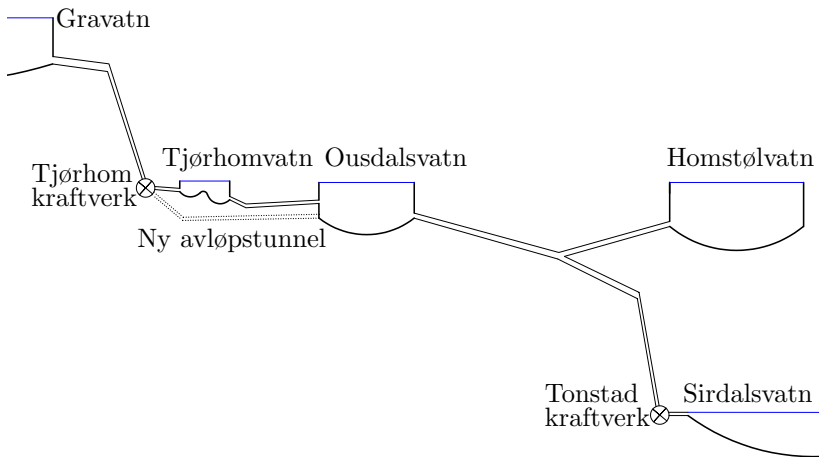
1.3 Tjørhom og Tonstad kraftverk

Nøkkeltal for dei to modellerte kraftverka, Tjørhom og Tonstad kraftverk, er vist i tabell 1.1

	Tjørhom kraftverk	Tonstad kraftverk
Installert effekt [MW]	126	960
Slukeevne [m ³ /s]	88	265
Turbintype	Francis	Francis
Tal på aggregat	2 (2*63 MW)	5 (4*160 MW, 1*320 MW)
Største bruttohøgde [m]	165	450
Årsproduksjon [GWh]	540	3990
Brukstid [timar/år]	ca. 4700	ca. 4200
Satt i drift	1973	1968/1971/1988

Tabell 1.1: Nøkkeltal for eksisterande Tjørhom og Tonstad kraftverk (Sira-Kvina (2015, 2022))

Tjørhom kraftverk produserar under 1/6 av Tonstad, og leverer oppimot 40 % av produksjonsvatnet til Tonstad. Medrekna lokaltilsiget i restfeltet, kjem rundt 50 % av produksjonsvatnet til Tonstad frå Tjørhomvatn. Drifta av Tjørhom kraftverk er difor tett knytta opp mot drifta av Tonstad kraftverk.



Figur 1.2: Det modellerte systemet. Eit alternativ til ny avløpstunnel er stipla

1.3.1 Magasin

Øvre magasin for Tjørhom kraftverk er Gravvatn/Valevatn/Kilen, heretter kalla Gravvatn. Dette er nedstraums magasin for Duge pumpekraftverk. Dagens Tjørhom kraftverk har avløpstunnel direkte ut i Tjørhomvatn. Frå Tjørhomvatn går vatnet gjennom ein 2,5 km lang overføringstunnel til Ousdalsvatn. Ousdalsvatn er, i lag med Homstølvatn, inntaksmagasin for Tonstad kraftverk. Nedstraums magasin til Tonstad er Sirdalsvatn. Nøkkeltal for magasinane er oppgitt i tabell 1.2. Med unntak av Sirdalsvatn, er reguleringsgraden oppgitt frå Sira-Kvina, og rekna utifrå uregulert restfelt til magasinet. Reguleringsgraden til Sirdalsvatn er basert på kor mykje vatn som drenerar dit årleg.

	HRV [moh.]	LRV [moh.]	Magasinvolum [mill. m ³]	Regulerings- grad [%]
Gravatn	660	625*	312	39
Tjørhomvatn	497,6	495/492	3	1
Ousdalsvatn	497,6	482	12	4
Homstølvatn	497,6	471*	55	21
Sirdalsvatn	51,0 **	49,5	32	<1

Tabell 1.2: Magasina til Tjørhom og Tonstad kraftverk (Sira-Kvina, 2022), (NVE, 2022b)

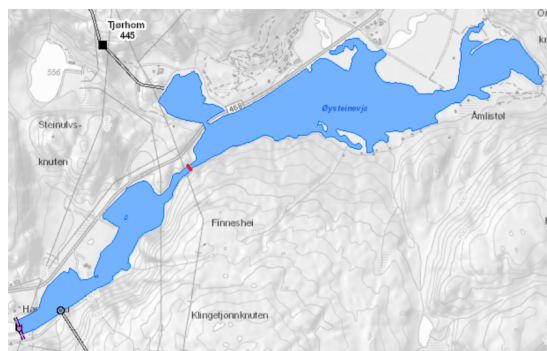
* Lågaste registrerte vasstand i Gravvatn og Homstølvatn i perioden 2010-2019, er 633 og 474 moh., i rekkefølge.

** I konsensjonen til Sira-Kvina er det ikkje oppgitt HRV for Sirdalsvatn. Den historiske 98-persentilen for vasstanden, er 51,0 moh.

Gravatn, Ousdalsvatn og Homstølvatn har enkelte særigenheit. Særleg gjeld det Gravvatn, som ved låg vasstand består av fleire delmagasin. I modelleringa vert det antatt at desse magasinane ikkje har hydrauliske avgrensingar. Tjørhomvatn kan utgjere ei større avgrensing i systemet, og gåast gjennom under.

Tjørhomvatn

Tjørhomvatn er minste magasinet i Sira-Kvina, og kan delast inn i to: Øysteinevja og Handelandsmagasinet. Øysteinevja er den øvste delen av magasinet, med LRV på 495 moh. Handelandsmagasinet er delen nedstraums, og har LRV på 492 moh. Luker på Handeland sørger for at vasstanden ikkje går over HRV, 497,6 moh., i nedre del av magasinet. Dagens avløpstunnel til Tjørhom kraftverk går ut i Øysteinevja, og overføringstunnelen til Ousdalsvatn går frå Handelandmagasinet. Eit kartutsnitt av Tjørhomvatn er vist i figur 1.3.

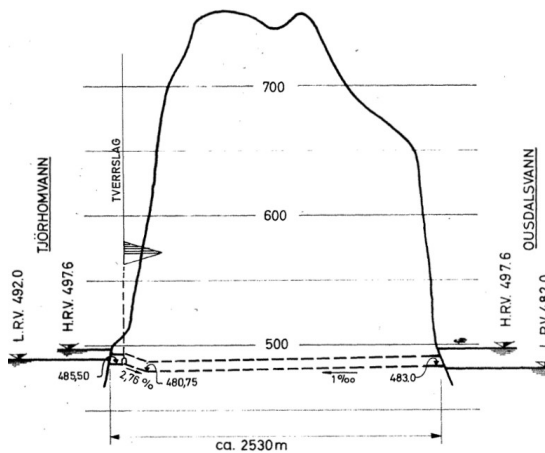


Figur 1.3: Oversikt over Tjørhomvatn, med terskel markert i raudt (NVE, 2022b)

For å halde LRV, er det bygd to faste tersklar i magasinet. Den første er plassert i overgangen mellom Øysteinevja og Handelandmagasinet med kronehøgde 495 moh., og er markert i raudt i figur 1.3. Den andre er i innløpet til overføringstunnelen, med kronehøgde 492 moh. (Guddal, 2021). Fylkesveg 468 krysser delar av Øysteinevja i ei fylling. Desse tre hydrauliske barrierane gir falltap gjennom Tjørhomvatn.

1.3.2 Overføringstunnelen Handlandsmagasinet-Ousdalsvatn

Overføringstunnelen går frå Handlandsmagasinet til Ousdalsvatn, og koplar saman nedstraums magasin til Tjørhom kraftverk, Tjørhomvatn, med oppstraums magasin til Tonstad kraftverk, Ousdalsvatn. I rapporten vert den stort sett kalla overføringstunnelen. Grunna liten magasinkapasitet i Tjørhomvatn, må produksjonsvatnet frå Tjørhom kraftverk overførast til Ousdalsvatn fortløpande. Kapasiteten i overføringstunnelen er difor ein avgrensande faktor for turbinvassføringa i Tjørhom kraftverk.



Figur 1.4: Overføringstunnelen mellom Tjørhomsvatn og Ousdalsvatn (Sira-Kvina, 1967)

1.3.3 Kort introduksjon av dei ulike utbyggingsalternativa

Det skal modellerast tre ulike utbyggingsalternativ, vidare kalla alternativ, for Tjørhom pumpekraftverk. Hovudtrekka vert gjennomgått under.

Effekt og slukeevne

Effekten i det nye aggregatet er sett lik for alle tre alternativ. Alternativ har ulikt undervatn, som gir litt endra slukeevne. I modelleringa er slukeevna lik for alle alternativ. Tabell 1.3 oppgir effekt og slukeevne for dei tre altrnativa.

Ny effekt [MW]	120
Q_{Turbin} [m ³ /s]	80
Q_{Pumpe} [m ³ /s]	70

Tabell 1.3: Modellert effekt og slukeevne i den nye kraftstasjonen

Teoretisk maksimal slukeevne i eit nytt Tjørhom kraftverk er 168 m³/s. Av grunnar som vert gått igjennom i teorikapittelet, setjast den maksimale slukeevna i Tjørhom lik 166 m³/s i modellen. Produksjonsvatnet fordelar seg med 86 m³/s i eksisterande aggregat, og 80 m³/s i det nye aggregatet.

Avløpstunnel

Alternativ 1

Den eksisterande avløpstunnel ut i Øysteinevja, brukast som avløpstunnel for det nye aggregatet òg. Falltapet mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn vert ikkje redusert. Kun lokaltilsiget til Tjørhomvatn er tilgjengeleg for pumping.

Alternativ 2

Det drivast ein ny avløpstunnel under Tjørhomvatn, som koblast på den eksisterande overføringstunnelen til Ousdalsvatn. Dette reduserar falltapet gjennom Tjørhomvatn, men endrar ikkje falltapet i overføringstunnelen til Ousdalsvatn. Hovudskilnaden frå alternativ 1, er at Tjørhom kan pumpe vatn frå Ousdalsvatn, heilt ned til 487 moh.

Alternativ 3

Det drivast ein ny avløpstunnel heilt til Ousdalsvatn. Falltapet reduserast heile vegen, som gjer det mogleg å halde høgare vasstand i Ousdalsvatn. Ousdalsvatn kan pumpast heilt ned til LRV, 482 moh.

For både alternativ 1 og 2, må det gjerast endringar i tersklane i Tjørhomvatn. Dette vil redusere falltapet gjennom magasinet. Ei slik ombygging er truleg ikkje nødvendig for alternativ 3.

1.4 Utforming av rapporten

I introduksjonen vart bakgrunnen for oppgåva presentert. Teorikapittelet gir bakgrunnsteori, i tillegg til forklaring av omgrep i rapporten. Metodekapittelet gir ein grundig gjennomgang av både eksisterande kraftverk og dei alternative utbyggingane. Oppbygging av modellen, som kravde mest arbeid, presenterast òg her. Modelloppbygginga er tett knytt opp til både foreløpige og endelige resultat. Diskusjonen av modellen avheng av både metode- og resultatdelen,

og kjem fortløpande i metodekapittelet. Resultatkapittelet presenterer resultata frå modellen, i tillegg til utbyggingskostnad, og ein meir generell analyse av systemet. Diskusjonskapittelet diskuterar gyldigheita av resultata, og konklusjonkapittelet oppsummerar og gir forslag til vidare arbeid.

2 Teori

I denne delen vert grunnleggande teori og likningar for kraftverk og pumpe-kraftverk introdusert, i tillegg vert enkelte modellparameter. Til slutt forklarast enkelte av omgrepa bruka i rapporten.

2.1 Kraftverk

Energiproduksjon

I eit vasskraftverk produserast energi ved å føre vatn gjennom ei turbin. Effekten P er då bestemt av likning 2.1

$$P = \eta * \rho * g * H_{netto} * Q [W] \quad (2.1)$$

η er verknadsgraden, ρ er tettleiken til vatn, g er tyngdeaksellerasjonen, H_{netto} er netto trykkehøgde på turbina, og Q er turbinvassføringa. Energien er bestemt av å gonge opp effekten med talet på timar, ΔT :

$$E = P * \Delta T = \eta * \rho * g * H_{netto} * Q * \Delta T [Wh] \quad (2.2)$$

Modellen har tidsoppløysing på ein time. ΔT i formel 2.2 er difor ein time, og produksjonen i wattimar svarar til produsert effekt i watt. Inntekta får ein ved å gonge produksjonen med straumprisen ved produksjonstidspunktet, p :

$$Inntekt = P * \Delta T * p = E * p \quad (2.3)$$

Verknadsgrad

Uttrykket for P inneheld verknadsgraden η , og eit tap i trykkehøgde, innbakt i H_{netto} . Verknadsgraden η er produktet av verknadsgradane til alle komponentane i kraftverket:

$$\eta = \eta_{total} = \eta_{turbin} * \eta_{generator} * \eta_{transformator} \quad (2.4)$$

Dei to siste ledda vert ofte sett konstante. η_{turbin} er ein funksjon av turbinvassføringa Q , og varierar med turbintype. Både Tjørhom og Tonstad kraftverk brukar francisturbinar. Reversible pumpeturbinar er òg ein type francisturbin, med litt lågare verknadsgrad enn ei vanleg francisturbin. Francisturbinar har ei spissare verknadsgradskurve enn pelton- og kaplanturbinar. Om eit kraftverk har fleire francisturbinar, kan dei kombinerast, slik at den totale verknadsgradskurva for turbinane vert ganske flat. Då vert η_{turbin} og η_{total} tilnærma konstant (Guttormsen, 2013)

Trykkehøgde og falltap

Det effektive trykket på turbina, H_{netto} , er bestemt av høgdeskilnaden mellom vasspegelen i inntaket og utløpet til kraftverket, og trykktapet i vassvegen. Trykktapet kallast falltap, h_f . For å rekne ut falltapa, er det vanleg å bruke Mannings formel eller Darcy-Weisbachs formel, som er vist i rekkefølge under.

$$h_f = \frac{L}{M^2 * A^2 * R_h^{4/3}} * Q^2 \quad (2.5)$$

$$h_f = \frac{f * L}{2g * D * A^2} * Q^2 = \frac{8 * f * L}{g * \pi^2 * D^5} * Q^2 \quad (2.6)$$

L er lengda på vassvegen, A er tverrsnittsarealet, M er Manningstalet, R_h er hydraulisk radius, Q er vassføringa, f er Darcy-Weisbach-friksjonsfaktoren, og D er diameter. I rapporten vert R_h rekna ut som $0,265 * \sqrt{A_{tunnel}}$. Det er uttrykket for eit standard tunnelprofil, definert i Guttormsen (2013). Sidan vassføringa er einaste variabel, kan begge likningane forenklast til

$$h_f = k_f * Q^2 \quad (2.7)$$

der k_f er falltapskoeffisienten, med eining [s^2/m^5]. I rapporten vert i regelen k_f oppgitt i promille, utan eining. Netto trykkehøgde kan då forenklast til

$$H_{netto} = H_{Inntak} - H_{Utløp} - k_f * Q^2 = H_{brutto} - k_f * Q^2 \quad (2.8)$$

For å forenkle ytterlegare, kan netto trykkehøgde setjast lik ein faktor gongar brutto trykkehøgde:

$$H_{netto} = H_{brutto} * \eta_{falltap}, \quad \eta_{falltap} = f(Q^2) \quad (2.9)$$

Sidan både $\eta_{turbine}$ og $\eta_{falltap}$ er funksjonar av vassføringa Q, kan dei kombinertast til ein samla η_Q . Det er ikkje gjort i rapporten.

Parallele vassvegar

Når vassvegen består av fleire parallelle vassvegar, kan det forenklast til ein vassveg. n er talet på parallelle vassvegar, indeksert i . Forutsetninga er at falltapa er like stor for alle dei parallelle vassvegane, og at forholdet $\frac{Q_i}{Q_{total}}$ heldast konstant for dei ulike vassvegane. Uttrykket for den forenkla falltapsfaktoren, er gitt i likning 2.10.

$$h_f = k_{f,total} * Q_{total}^2 = k_{f,i} * Q_i^2 \Rightarrow k_{f,total} = \frac{Q_i^2}{Q_{total}^2} * \overline{k_{f,i}} \quad (2.10)$$

$\overline{k_{f,i}}$ er gjennomsnittleg falltapsfaktor for vassvegane, vekta for vassføringa Q_i . Om Q_i for dei ulike vassvegane er tilnærma like, kan det forenklast til $\frac{Q_{total}}{n}$. Formel 2.10 forenklast då til

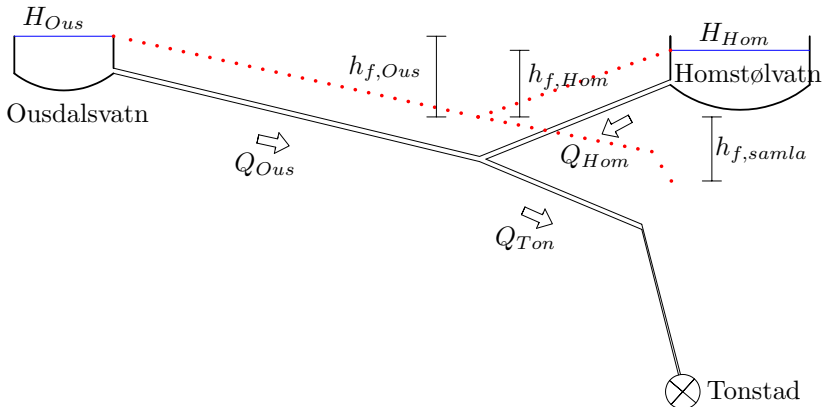
$$k_{f,total} = \frac{(\frac{Q_{total}}{n})^2}{Q_{total}^2} * \overline{k_{f,i}} = \frac{1}{n^2} * \overline{k_{f,i}} \quad (2.11)$$

I rapporten er denne framgangsmåten bruka for å rekne falltap i trykksjakter. Dei ulike trykksjaktene i eit kraftverk er koplta til spesifikke aggregat. Når enkelte aggregat står, kan fordelinga av vatnet mellom trykksjaktene endre seg. Endra Q_i , og med det endra $\frac{Q_i}{Q}$, vil i tillegg auke $\overline{k_{f,i}}$. Det reelle falltaped, vert difor større enn det $k_{f,total}$ tilseier. For store turbinvassføringar, vil i regelen alle trykksjaktene vere i drift. Då gir $k_{f,total}$ eit godt anslag på falltaped.

Falltap i Tonstad kraftverk

Tonstad

Tonstad kraftverk har to inntaksmagasin, og ulik falltapsfaktor på tilløpstunnelen frå dei ulike magasinane. For å finne turbinvassføringa, og kor mykje vatn som kjem frå kvart av magasinane, må falltaped reknast i detalj.



Figur 2.1: Fordeling av falltap i tilløpstunnelen til Tonstad kraftverk

I utrekningane under er P_{Ton} effekten i Tonstad, $k_{f,x}$, $x=[Ous, Hom, samla]$ er falltapskoeffisientane for dei tre delane av tilløpstunnelen til Tonstad. Q_{Mag} er andelen vatn som kjem frå magasinane, gitt ved $Q_{Ton} - Q_{Bekk}$, der Q_{Bekk}

er tilsiget i bekkeinntaka. ΔH_{Mag} er høgdeskilnaden mellom Ousdalsvatn og Homstølvatn; $H_{Ous} - H_{Hom}$. Resten av variablane er definert i figur 2.1.

Vasstanden i Homstølvatn og Ousdalsvatn stort sett ulik. I Josdal møtast tilløpstunnelane, og trykkhøgda er like stor. Frå Josdal går vatnet vidare, med samla falltap fram til Tonstad. Langs tilløpstunnelen er det fire bekkeinntak. I tillegg kjem Øksendaloverføringa inn, rundt 1,5 km før sandfanga i Tonstad. I utrekninga vart desse forenkla til eitt bekkeinntak. Dette modellerte bekkeinntaket er plassert ved tunnelkrysset i Josdal, og får alt tilsiget samla. Ved tunnelkrysset i Josdal vert trykkhøgda

$$H_{Jos} = H_{Ous} - k_{f,Ous} * Q_{Ous}^2 = H_{Hom} - k_{f,Hom} * Q_{Hom}^2 \quad (2.12)$$

Turbinvassføringa i Tonstad reknast ut frå formel 2.1. Inkludert falltap, vert uttrykket:

$$\begin{aligned} Q_{Ton} &= \frac{P_{Ton}}{\eta * \rho * g * H_{netto}} = \frac{P_{Ton}}{\eta * \rho * g * (H_{Ous} - h_{f,Ous} - h_{f,samla})} \\ &= \frac{P_{Ton}}{\eta * \rho * g * (H_{Ous} - k_{f,Ous} * Q_{Ous}^2 - k_{f,samla} * Q_{Ton}^2)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Falltapat frå Ousdalsvatn og Homstølvatn må gi same trykkhøgda i tunnelkrysset i Josdal. Frå dette kan Q_{Ous} bestemmast, som ein funksjon av Q_{Hom} :

$$\begin{aligned} k_{f,Ous} * Q_{Ous}^2 &= k_{f,Hom} * Q_{Hom}^2 + \Delta H_{Mag} \\ \Rightarrow Q_{Ous} &= \sqrt{\frac{\Delta H_{Mag} + k_{f,Hom} * Q_{Hom}^2}{k_{f,Ous}}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Q_{Hom} kan igjen bestemmast ut frå vassbalansen:

$$Q_{Hom} = Q_{Mag} - Q_{Ous} \quad (2.15)$$

Ved iterasjon gir likningane 2.13-2.15 turbinvassføringa i Tonstad, Q_{Ton} .

Andel vatn frå dei ulike strengane

Når verdiane av Q_{Ton} og Q_{Bekk} er kjent, kan verdiane av Q_{Ous} og Q_{Hom} finnast. Uttrykket er gitt i formel 2.16.

$$Q_{Ous} = \frac{-Q_{Mag} * k_{Hom} + \sqrt{Q_{Mag}^2 * k_{Hom}^2 - (k_{f,Ous} - k_{f,Hom}) * (-\Delta H_{mag} - Q_{Mag}^2 * k_{f,Hom})}}{k_{f,Ous} - k_{f,Hom}} \quad (2.16)$$

Overføring mellom Ousdalsvatn og Homstølvatn

Om turbinvassføring i Tonstad er låg, og Ousdalsvatn og Homstølvatn har ulik vasstand, vert vatn overført mellom dei to magasina. Kor mykje som overførast, reknast ut ved formel 2.17.

$$Q_{Overføring\ OH} = \sqrt{\frac{|\Delta H_{Mag}|}{k_{f,O-H}}} \quad (2.17)$$

$k_{f,O-H}$ er den totale falltapsfaktoren mellom magasina. Om ΔH_{Mag} er negativ, vert vatn overført til Ousdalsvatn.

2.2 Pumpekraftverk

Systemverknadsgrad

Eit pumpekraftverk produserar mindre energi enn det brukar på pumping, grunna alle energitapa. Forholdet kallast systemverknadsgraden til pumpekraftverket, og er lik produktet av alle verknadsgradene, inkludert falltap. For lønsam pumping, må skilnaden i pris mellom pumpe- og produksjonstidspunkt, vere større enn systemverknadsgraden. Produksjonsmodus har subscriptet *turbin*.

$$\eta_{system} > \frac{p_{pumping}}{p_{turbin}} \quad (2.18)$$

Priskriteria kan reknast utifrå ein satt pris, her kalla p_0 . Framgangsmåten er vist i formel 2.19. Straumprisen må vere meir enn $\Delta Pris$ i % under p_0 for å forsvare pumping, og meir enn $\Delta Pris$ i % over p_0 for å forsvare produksjon av det same vatnet.

$$\eta_{system} > \frac{p_0 * (1 + \Delta Pris)}{p_0 * (1 - \Delta Pris)} \Rightarrow \Delta Pris \geq \frac{1 - \eta_{system}}{1 + \eta_{system}} * 100\% \quad (2.19)$$

Systemverknadsgraden for eit pumpekraftverk, er lik forholdet mellom produsert og forbrukt energi for same vassvolum. Likninga for systemverknadsgrad er gitt under. Vassvolumet ΔV , reknast ut som produktet $Q_x * \Delta T_x, x = [turbin, pumpe]$. Q_{turbin} og Q_{pumpe} er sjeldan den same. For at volumet ΔV skal vere den same, vert ΔT , lengda på produksjonen, ulik for produksjon og pumping.

$$\begin{aligned}\eta_{system} &= \frac{E_{turbin}}{E_{pumpe}} \\ &= \frac{\eta_{turbin} * (Q_{turbin} * \Delta T_{turbin}) * \rho * g * H_{Netto,turbin}}{\frac{1}{\eta_{pumpe}} * (Q_{pumpe} * \Delta T_{pumpe}) * \rho * g * H_{Netto,pumpe}}\end{aligned}\quad (2.20)$$

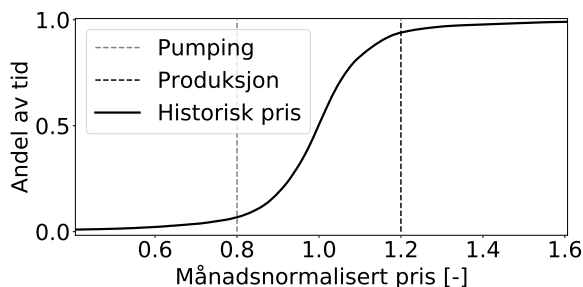
H_{netto} består av magasinvasstand og falltap. Falltapet er ei friksjonskraft, som alltid jobbar mot strøymingsretninga. Det gir

$$\begin{aligned}\eta_{system} &= \frac{\eta_{turbin} * H_{Netto,turbin}}{\frac{1}{\eta_{pumpe}} * H_{Netto,pumpe}} \\ &= \eta_{turbin} * \eta_{pumpe} * \frac{H_{\text{\textit{Øvre, turbin}}} - H_{\text{\textit{Nedre,turbin}}} - h_{f,turbin}}{H_{\text{\textit{Øvre, pumpe}}} - H_{\text{\textit{Nedre,pumpe}}} + h_{f,pumpe}}\end{aligned}\quad (2.21)$$

$H_{\text{\textit{Øvre}}}$ og $H_{\text{\textit{Nedre}}}$ er vasstanden i øvre og nedre magasin, i rekkefølge. Både vassføringa og vassvegen kan vere ulik i pumpe- og produksjonmodus. Då vert falltapet ulikt i absoluttverdi for pumping og produksjon.

Køyring av pumpekraftverk

Varigheitskurva til straumprisen i prisområde NO2 for perioden 2010-2019, er vist i figur 2.2. Figuren viser òg kriteriet for pumping og produksjon, gitt ein Δ Pris på 20 %. Det svarar til ein systemverknadsgrad på 67 %, rekna ut ved formel 2.19. Alle tidspunkt der den normaliserte prisen er over 1,2, kan vatnet som er pumpa, produserast med gevinst. Tilsvarande kan kraftverket pumpe med gevinst, alle tidspunkta der den normaliserte prisen er under 0,8.



Figur 2.2: Varigheitskurve over pris perioden 2010-2019

Δ Pris lik 20 %, svarar til ein absoluttverdi i prisskilnad på 50 %. Det vil seie at pumping på $0,6*\bar{p}$, og produksjon av det same vatnet på $0,9*\bar{p}$, vil gi gevinst. \bar{p} er gjennomsnittsprisen, tilsvarende normalisert pris lik 1,0 i figur 2.2. Tilsvarende kan kraftverket pumpe på $1,0*\bar{p}$, for å produsere på $1,5*\bar{p}$, med gevinst. Grunnen til at dette i praksis ikkje gjerast, er at dei mest lønnsame prisane vert bruka først. Kraftverket vil først pumpe på $0,6*\bar{p}$ og produsere på $1,5*\bar{p}$, sidan det gir størst gevinst. Deretter pumpast og produserast det på gradvis mindre lønnsame prisar. Til slutt endar drifta opp på ein prisskilnad som svarar til systemverknadsgraden η_{system} . Pumpekraftverksdrifta går frå dei mest lønnsame til dei marginalt lønnsame timane.

For modellering av eit reint pumpekraftverk, går utrekninga av pumpetidspunkt i prinsippet føre seg på denne måten: finn timane med høgast og lågast pris, og vel ut pumpetidspunkt til drifta er på marginalt lønnsam pumping. Kor stor prisvariasjonen er, og kor lang periode som nyttast når pumpinga og produksjonen vert bestemt, vil i stor grad bestemme drifta.

2.3 Modellsesifikk teori

Framgangsmåte for optimalisering

Produksjon av historisk produksjonsvatn vert modellert, i tillegg til pumpekraftverksdrift. Vanleg kraftverksdrift og pumpekraftverksdrift er gjensidig avhengig av kvarandre, men vert optimalisert uavhengig av kvarandre. Optimalisering av pumping gjennomgåast i detalj seinare.

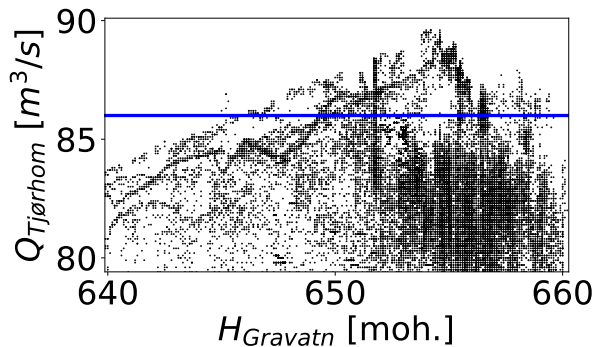
Den valgte optimaliseringsmetoden brukar faste tidsintervall for optimalisering. Innanfor ein optimaliseringsperiode ΔT haldast produksjonen lik, men vert

flytta til dei tidspunkta med høgast pris. Kraftverka køyrast på den største tilgjengelege effekten.

Perioden ΔT kan ha ulik lengd. I rapporten vart ΔT sett lik eitt år, éin månad, og éi veke. Historisk produksjon i perioden vert rekna om til timar med maksimal effekt eller slukeevne, og produksjonen flyttast til dei timane med høgast pris. Generelt aukar variasjonen i pris når perioden ΔT aukar. Val av ΔT avgrensar difor kor mykje inntekta kan auke.

Slukeevne i eksisterande Tjørhom kraftverk

Produsert effekt avheng av produksjonvassføring og netto trykkehøgda. Om trykkehøgda går ned, kan turbinvassføringa aukast, for å oppnå same produserte effekt. Tilsvarende endrast produsert effekt, om trykkehøgda endrast og turbinvassføringa haldast konstant. Både slukeevna og effekten til eit aggregat, har fysiske avgrensingar. Kva som er avgrensande til ei kvar tid, vil avhenge av mellom anna trykkehøgda.



Figur 2.3: Historisk turbinvassføring i Tjørhom kraftverk, gitt vasstand i Gravvatn

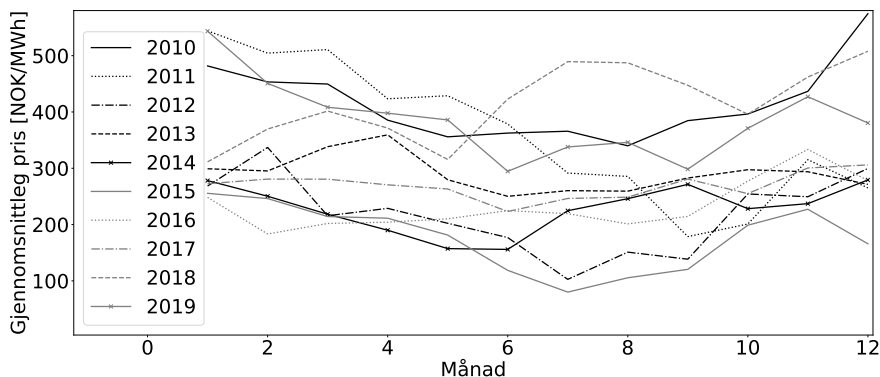
I perioden 2010-2019 produserte Tjørhom kraftverk på trykkehøgder mellom 142 og 166 meter. Figur 2.3 viser historisk turbinvassføring i Tjørhom, med $Q=86$ m^3/s plotta i blått. Den maksimale vassføringa er rundt 89 m^3/s . Slukeevna er i modellen sett til å vere konstant for alle fallhøgder i Tjørhom kraftverk. Slukeevna i dei eksisterande aggregata vart sett lik 86 m^3/s , som er oppnåeleg i Tjørhom kraftverk for alle vasstander i Gravvatn over 645 moh.

Månadsnormalisert pris

Kraftprisen i perioden 2010-2019 varierar. Kva som er høg og låg pris, endrar seg frå delperiode til delperiode. Ved å bruke normalisert pris, kan variasjonen i kraftpris innan kvar periode, direkte samanliknast med andre periodar. Kraftprisen kan normaliserast for ulike periodar. I rapporten vert kraftprisen stort sett oppgitt som månadsnormalisert pris. Uttrykket for månadsnormalisert pris, er gitt i likning 2.22

$$p_{mnd.norm,i}[-] = \frac{p_i[NOK]}{\overline{p_{månad}}[NOK]} \quad (2.22)$$

$\overline{p_{månad}}$ er gjennomsnittsprisen for månaden, p_i er kraftprisen på eit gitt tidspunkt, og $p_{mnd.norm,i}$ er den månadsnormaliserte prisen for det same tidspunktet. Figur 2.4 viser utviklinga av gjennomsnittleg månadspris, $\overline{p_{månad}}$, i perioden 2010-2019.



Figur 2.4: Gjennomsnittleg månadspris i perioden 2010-2019

2.4 Omgrep

Brukstid og driftstimar

Brukstida til eit kraftverk er definert som totalproduksjonen i kraftverket, delt på total installert effekt: brukstimar = $\frac{E_{Total}}{P_{Maks}}$.

Driftstimane er talet på timane kraftverket produserar. Driftstimane er difor alltid større enn eller lik brukstimane.

Produsert pris

I rapporten er produsert pris definert som kraftprisen dei tidspunkta kraftverket produserar straum. Tidspunkta der kraftverka står stille reknast ikkje med i produsert pris.

Kraftverk og pumpekraftverk

I modelleringa skiljast kraftverk og pumpekraftverk. Kraftverksdrift er definert som all produksjon av tilsig. Pumpekraftverkssdrift vert sett på separat, og inneber pumping og produksjon av pumpa vatn.

I Tjørhom inkluderar modelleringa av kraftverket både eksisterande og nytt aggregat. Modelleringa av pumpekraftverket inkluderar pumping i det nye aggregatet, og produksjon av pumpa vatn i alle tre aggregata. Skilnaden mellom kraftverk- og pumpekraftverksdrift er utelukkande kvar vatnet kjem ifrå.

Slukeevne, turbinvassføring og produksjonsvatn

I rapporten, er slukeevne definert som kor mykje vatn som teoretisk kan gå gjennom eit aggregat eller eit kraftverk. Turbinvassføring er bruka om kor mykje vatn som faktisk går gjennom turbinane på eit gitt tidspunkt. Turbinvassføringa er difor alltid mindre enn eller lik slukeevna. Produksjonsvatn er volumet av produsert vatn over tid.

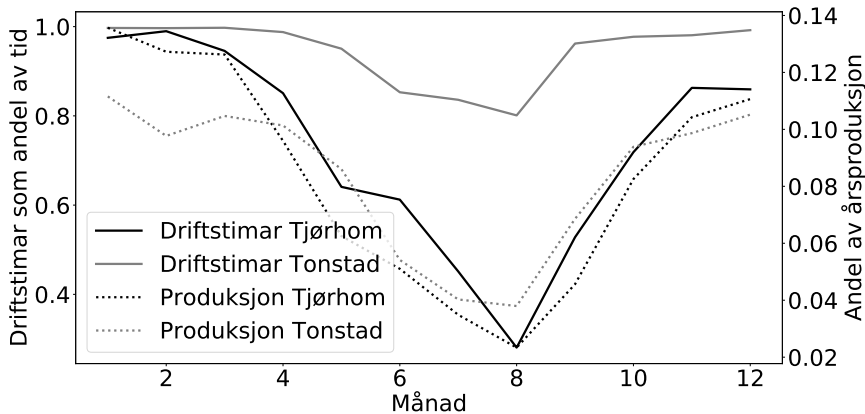
3 Metode

I dette kapittelet vert utbyggingsalternativa presentert, i tillegg til oppbygginga av produksjonssimuleringsmodellen. Modellen er basert på historiske data for åra 2010-2019.

3.1 Alternative utbyggingar

3.1.1 Dagens køyring

Figur 3.1 viser gjennomsnittleg tal på driftstimar, og andel av årsproduksjon per måned, for Tjørhom og Tonstad kraftverk. Tjørhom både produserar mest, og har flest driftstimar, vinterhalvåret. Tonstad produserar òg mest vinterstid, men har høg andel driftstimar heile året.

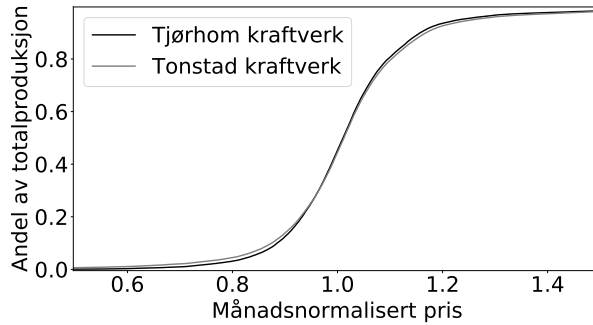


Figur 3.1: Andel av timar kvar månad kraftverka produserar, og månedleg produksjon som andel av årsproduksjon. Gjennomsnittsverdiar for perioden 2010-2019

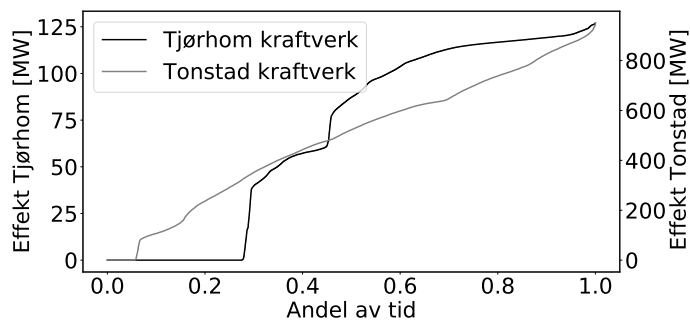
Figur 3.2 og 3.3 viser historisk varigheit av produsert kraftpris, og historisk varigheit av effekt for dei to kraftverka. Figur 3.3 viser at Tjørhom kraftverk har høg driftstid, og produserar jamnt over på høg effekt. Kurva har eit opphald ved rundt 60 MW, som er dei timane der kun eitt aggregat er i drift. Figur 3.3

3.1 Alternative utbyggingar

viser mange driftstimar i Tonstad, i tillegg til mange timar ved låg effekt. Dette kjem òg fram frå figur 3.1, og vitnar om mykje tvangskøyring av lokaltilsig.



Figur 3.2: Varigheitskurve for produsert pris i Tjørhom og Tonstad kraftverk



Figur 3.3: Brukstid for effekt for Tonstad og Tjørhom. Gjennomsnittsverdiar for perioden 2010-2019

3.1.2 Modellerte alternativ

Under vert dei tre modellerte utbyggingsalternativa gått gjennom. Gjennomgangen legg vekt på kva som skil alternativa i kraftverks- og pumpekraftverksdrift.

Alternativ 1: Koble seg på eksisterende avløpstunnel

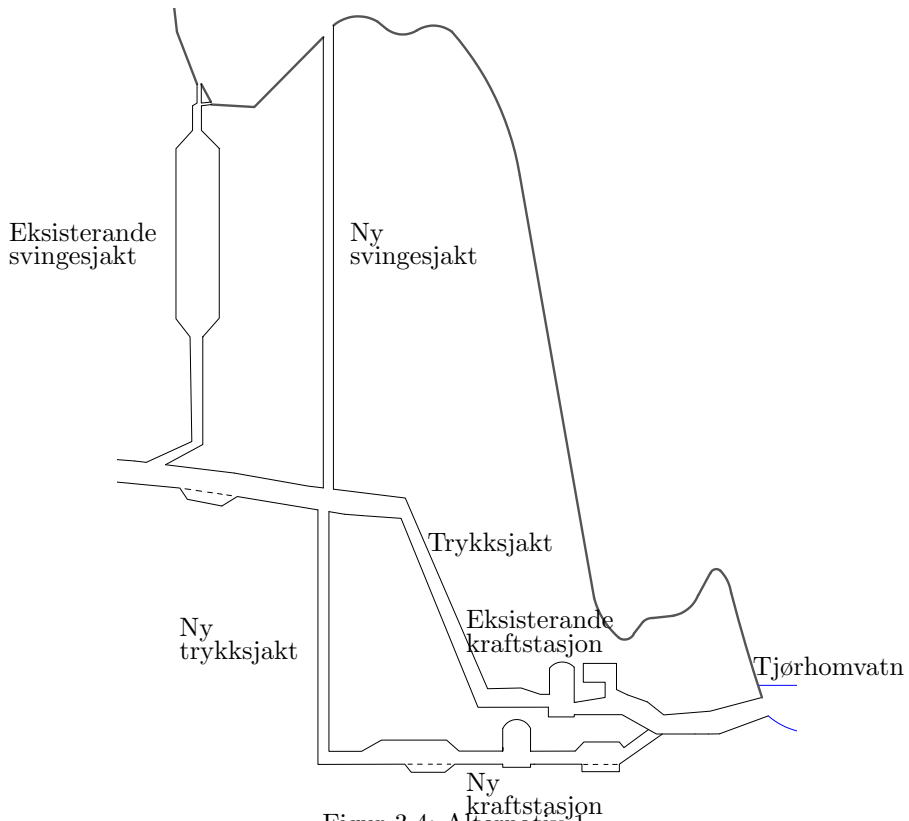
Dette alternativet krev minst tunneldriving. Den installerte effekten aukar, og alt produksjonsvatnet går ut i eksisterende avløpstunnel til Øysteinevja.

Kraftverksdrift

Flaskehalsane i vassvegen nedstraums kraftstasjonen vert ikkje utbetra. Vasstanden kan ikkje gå over HRV i Handelandsmagasinet, som vert avgrensande for turbinvassføringa.

Pumping

Alternativet kan kun pumpe det uregulerte lokaltilsiget til Tjørhomvatn. Dette er rundt 360 millionar m^3 årleg, som svarar til om lag 42 % av lokaltilsiget i restfeltet til Tonstad (NVE, 2022b). LRV i Øysteinevja er 495 moh. Tilgjengeleg volum for pumping er 2,3 millionar m^3 , forutsatt at det vert installert luker i Tjørhomsvatn til magasinerings av vatn. Det er ikkje inkludert i modellen.



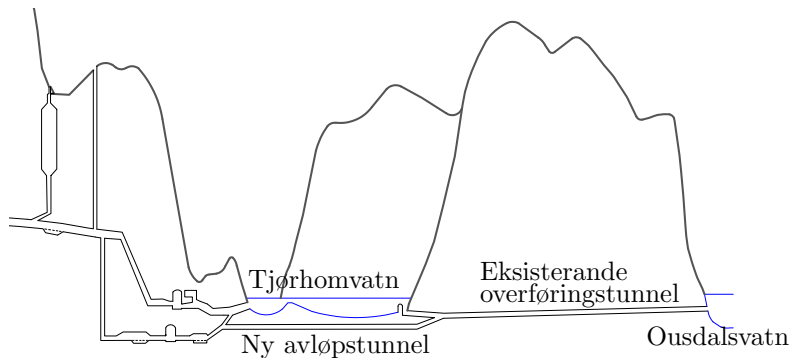
Alternativ 2: Ny avløpstunnel påkobla eksisterande overføringstunnel

Kraftverksdrift

Falltaptet gjennom Tjørhomvatn reduserast, men vasstanden i Handelandsmagasinet vil framleis avgrense turbinvassføringa i kraftverket.

Pumping

Ved å koble seg på overføringstunnelen nedstrøms Tjørhomvatn, kan ein pumpe vatn frå Ousdalsvatn. Då vert heile lokaltilsiget til Tonstad tilgjengeleg for pumping. Grunna høgbrekk i overføringstunnelen, kan Ousdalsvatn kun pumpast ned til 487 moh. (Richter, 2021).



Figur 3.5: Alternativ 2

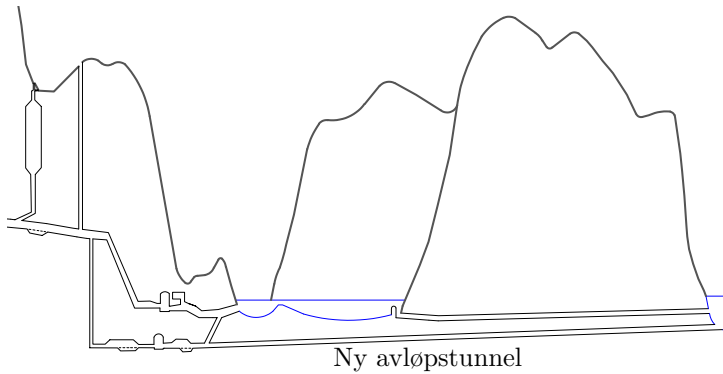
Alternativ 3: Ny avløpstunnel til Ousdalsvatn

Kraftverksdrift

Ved å redusere falltaptet heile vegen til Ousdalsvatn, kan Tjørhom køyrast på full effekt utan like store avgrensingar frå Handelandsmagasinet. Vasstanden i Ousdalsvatn vert jamnt over høgare enn for alternativ 1 og 2, som er positivt for produksjonen i Tonstad.

Pumping

Ved å lage ein ny tunnel heilt til Ousdalsvatn, kan Ousdalsvatn pumpast heilt ned til LRV, 482 moh. Kraftverket får då tilgang på 2,7 millionar m³ ekstra i Ousdalsvatn, samanlikna med alternativ 2. I tillegg kan større delar av Homstølvatn pumpast, gjennom tilløpstunnelen til Tonstad.



Figur 3.6: Alternativ 3

Fellestrekk

I alle tre alternativa er det teikna inn nye sandfang opp- og nedstraums den nye kraftstasjonen. Dagens kraftverk har eit oppstraums sandfang. Om kapasiteten på dette er tilstrekkeleg for det utvida kraftverket, trengs ikkje nytt sandfang oppstraums.

Alle alternativa har teikna inn ei ny svingesjakt oppstraums. Denne er nødvendig for ikkje å overstige dimensjonerande trykk på eksisterande aggregat, ved eit avslag på det utvida kraftverket (Egeland, 2021). Løysinga som er teikna, ei ny svingesjakt, er ein av fleire moglege løysingar.

Alternativ 2 og 3 er teikna med ei forgreining til dagens avløpstunnel ut i Øysteinevja. Dette vert i rapporten kalla open løysing. Gitt open løysing, kan ein pumpe vatn direkte frå Øysteinevja. For å hindre at vasspegelen senkast lågare enn 495 moh., trengs ein terskel eller ei luke i denne forgreininga. Det er forutsett, men ikkje tatt med i teikningane.

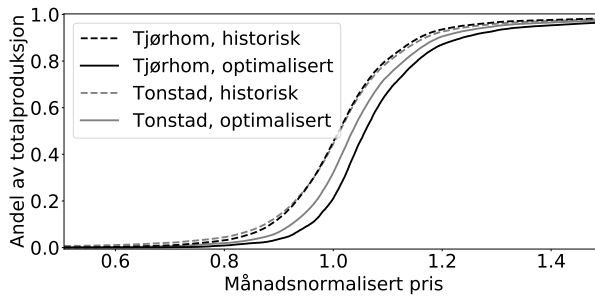
Gitt open løysing, vil vatnet strøyme minste motstands veg. Under produksjon, vil vatnet fordele seg mellom eksisterande og ny vassveg. Det minimerar fallet gjennom Tjørhomvatn for alternativ 2, og frå Øysteinevja til Ousdalsvatn for alternativ 3.

I alternativ 1 og 2, ligg vasstanden i Tjørhomvatn ofte rundt HRV når Tjørhom produserar. For å hindre stor oppstuving i Øysteinevja, må Tjørhomsvatn kanaliserast i desse alternativa. Det vil truleg innebære ombygging av dei to tersklane i magasinet til senkbare tersklar, og tiltak rundt vegfyllinga over Øysteinevja.

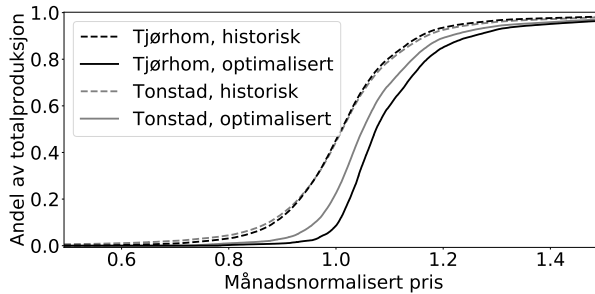
3.1.3 Teoretisk maksimal inntektsauke

Produksjonen og inntekta i Tjørhom og Tonstad er rekna ut, gitt uavgrensa effektkøyring. Det er antatt ingen avgrensingar for dei to kraftverka, korkje på vassvegar, magasin eller historisk tilgjengeleg effekt. Pumping av vatn i Tjørhom er ikkje inkludert i utrekninga. Med andre ord har begge kraftverka uendeleg magasinkapasitet, og same falltap som historisk.

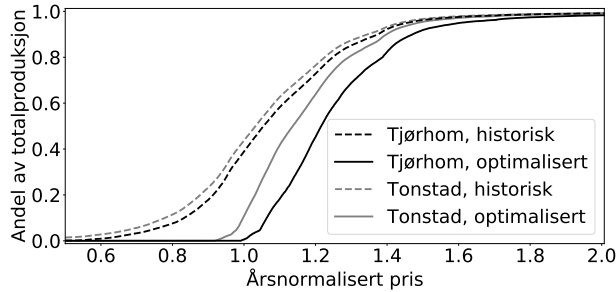
Figur 3.7 til 3.9 viser den potensielle auka i produsert pris for kraftverka for dei ulike optimaliseringsperiodane. Optimaliseringa er gjort på års-, månads- og vekesbasis; $\Delta T_{Kraftverk}$ = år, månad eller veke. Innad i kvart ΔT , er produksjonen i GWh den same.



Figur 3.7: Varigheitskurve for produsert pris, optimalisert på vekesbasis



Figur 3.8: Varigheitskurve for produsert pris, optimalisert på månadsbasis



Figur 3.9: Varigheitskurve for produsert pris, optimalisert på årsbasis

Gjennomsnittleg årsinntekt for perioden 2010-2019, er vist i tabell 3.1. Inntekta er rekna ut med tre ulike optimaliseringsintervall ΔT , gitt forutsetningane over. Det auka falltapet vil redusere totalproduksjonen i begge kraftverka. Verdiane er difor den maksimale inntektsauka eit utvida Tjørhom kraftverk kan generere, gitt historisk tilsig og pris.

	Inntekt Tjørhom	Inntekt Tonstad	Auka årsinntekt
Historisk	192	1316	
Vekesoptimalisert	203	1355	49
Månadsoptimalisert	209	1386	88
Årsoptimalisert	224	1477	193

Tabell 3.1: Gjennomsnittleg årsinntekt for kraftverka [MNOK]

Forenkla, kan Tonstad kraftverk få tilnærma uendeleg magasinkapasitet, ved koordinert pumping i Tjørhom og Duge pumpekraftverk. Tilsiget til Tonstad vert då magasinert i Svartevatn, oppstraums magasin til Duge. For å optimalisere Tonstad over lengre periodar, forutsetter difor utrekninga av tabell 4.9, auka pumping i Tjørhom og Duge pumpekraftverk. Produksjonen er antatt å vere den same som historisk, altså at vatn kan pumpast og produserast med 100 % verknadsgrad. I ein reell situasjon, må difor nettoproduksjonen i systemet reduserast. Det vil redusere inntekta i tabell 3.1.

3.1.4 Utbyggingskostnad

Alle alternativa omfattar ny kraftstasjon med ny trykksjakt og nytt sandfang nedstraums. Vassvegen oppstraums eksisterande sandfang er uendra. Det er forutsett ny øvre svingesjakt i parallell, for alle tre alternativa. Trykksjakt er ufora. Dei kostnadsdrivande skilnadane mellom alternativa er

1. Ulik trykkehøgde på stasjonen, og
2. Ulik lengd på ny avløpstunnel

For alternativ 1 og 2 er det medrekna ei kanalisering av Tjørhomsvatn, som er anslått til å koste 50 millionar kroner 2022-kroner (Netlandsnes, 2022). For alternativ 3, er det forutsett at Ousdalsvatn kanalisert. Grunna usikre grunnforhold, er dette anslått til å koste like mykje. Alle tre alternativa inkluderar frekvensomformar på 120 MW. Anslått kostnad er 120 millionar 2022-kroner.

Nedstraums svingekammer har tilstrekkeleg kapasitet for opp- og nedsving (Ege-land, 2021). Sidan alternativ 1 går ut på same høgde som eksisterande kraftverk, er nytt nedstraums svingekammer ikkje inkludert i dette alternativet. Alternativ 2 og 3 senkar nedre svingegrense, og inkluderar ny nedstraums svingesjakt.

Nytt oppstraums sandfang, eller ulike lukeløysingar i avløpstunnelen, er ikkje tatt med i utrekna kostnad. Topografien gjer at tverrslaga til avløpstunnelane til alternativ 2 og 3 må drivast på synk. Plugging av desse er difor ikkje nødvendig. Kostnadsgrunnlaget til NVE innheld ikkje prisen på bora sjakter med diameter større enn 3 meter. For trykksjakt og oppstraums svingesjakt, er kostnaden ein gjennomsnittsverdi av ekstrapolert kostnad for bora sjakt, og kostnaden for sprengt sjakt. Kostnaden frå nedetid i Tjørhom kraftverk under bygginga, er ikkje tatt med.

Dei resterande prisane er funne frå Kostnadsgrunnlag for vannkraft frå NVE (Bruland mfl., 2016), og indeksjustert til prisar for 01.01.2022 (NVE, 2022a). Prisstiginga våren 2022 er ikkje tatt med.

3.2 Inndata

3.2.1 Forenklingar

I dei neste delkapitla vert parametera til det modellerte systemet og oppbygginga av modellen, gått gjennom. Forenklingane som er gjort, er lista opp i tabell 3.2. Konsekvensen av forenklingane er markert med ò til tre stjerner,

frå ingen/liten til stor konsekvens for modelleringa.

Nummer	Forenkling	Konsekvens
Falltap		
1	Samla falltapskoeffisient for trykksjaktene	*
2	Null falltap i Tjørhomvatn	**
3	Forenkla falltap i tilløpstunnelen til Tonstad	**
4	Ingen falltap i avløpet til Tonstad	*
Tilsig		
5	Usikre tilsigsdata	***
6	Usikker fordeling av lokaltilsiget til Tonstad	**
8	Minstevassføring er ikkje tatt med	*
9	Bekkeinntaka til Tonstad kjem inn samla	**
Verknadsgrad		
10	Verknadsgraden er sett konstant i kraftverka	**
11	Forenkla verknadsgrad i Tonstad	***
12	Energitapet i frekvensomformaren er ikkje med	*
Modellkøyning		
13	Uendra drift av øvrige kraftverk	***
14	Produksjon flyttast berre òi veke	***
15	Modellen baserar seg på vassbalanse	***
16	Kraftverka køyrer på full effekt	**
17	Vatn pumpast kun på lønsame prisar	***
18	Pumping og produksjon av tilsig vurderast separat	***

Tabell 3.2: Forenklingar i modellen

3.2.2 Historiske falltapskoeffisientar

Tjørhom kraftverk

Frå Solvik (1974) er dei ulike falltapskoeffisientane til det eksisterande Tjørhom kraftverk kjend. Falltapedet i avløpstunnelen vart sett lik hastighetshøgda ved sugerørsluka for eksisterande aggregat. For meir nøyaktige verdiar, bør falltapedet i avløpstunnelen analyserast på nytt. Samla verdiar er oppgitt i tabell 3.3.

	Tilløpstunnel (inkludert singulærtap)	Trykksjakt	Avløpstunnel
k_f [%o]	0,187	0,081	0,048

Tabell 3.3: Falltapskoeffisientar for eksisterande Tjørhom kraftverk

Vassvegen fram til oppstraums sandfang, endrast ikkje i det utvida pumpekraftverket. Dei tre alternative avløpstunnelane vert gjennomgått seinare. Alle alternativa inneheld ny trykksjakt til aggregat 3. Utforminga av denne, med tilhøyrande vassvegskonstruksjonar, er usikker. Det vart antatt same falltapskoeffisient for ny trykksjakt, som for eksisterande trykksjakt.

Ein samla falltapskoeffisient for dei to sjaktene vart rekna ut med likning 2.11. Gitt to trykksjakter med tilnærma lik vassføring, vert den samla falltapskoeffisienten $k_{f,samla} = \frac{k_f}{2^2} = \frac{k_f}{4}$. I pumpemodus går alt vatnet gjennom den nye trykksjakta, med tilhøyrande falltapskoeffisient. Falltapskoeffisientane er gitt i tabell 3.4.

	Produksjon	Pumping
$k_{f,trykksjakt}$ [%o]	0,02	0,081

Tabell 3.4: Samla falltapskoeffisient for trykksjaktene i Tjørhom pumpekraftverk

Tjørhomvatn

Det er tre hydrauliske flaskehalsar frå utløpet av Tjørhom kraftverk til overføringstunnelen til Ousdalsvatn:

1. Fylkesveg 468 går i fylling over delar av Øysteinsevja
2. Terskel i overgangen mellom Tjørhomsvatn og Handelandsmagasinet, kronehøgde 495 moh.
3. Terskel i inntaket til overføringstunnelen, kronehøgde 492 moh.

Dei to tersklane er bygd for å halde LRV i dei to delane av Tjørhomvatn. Kvantifisering av falltapet er vanskeleg, sidan Sira-Kvina kun har målingar av vasstanden i Handelandmagasinet. Under flaum kan det verte oppstuing av vatn i øvre del av Tjørhomsvatn, sjølv om vasstanden i Handeland ikkje går over HRV. Kvar gong det utvida kraftverket køyrer for fullt, gir i praksis ein mindre flaumsituasjon. For å hindre større oppstuing, må strøymingsforholda gjennom magasinet utbetrast. Dette gjeld alternativ 1 og 2, sidan vassføringa

ut i Tjørhomsvatn aukast. Falltaptet gjennom magasinet vert difor ikkje tatt omsyn til vidare.

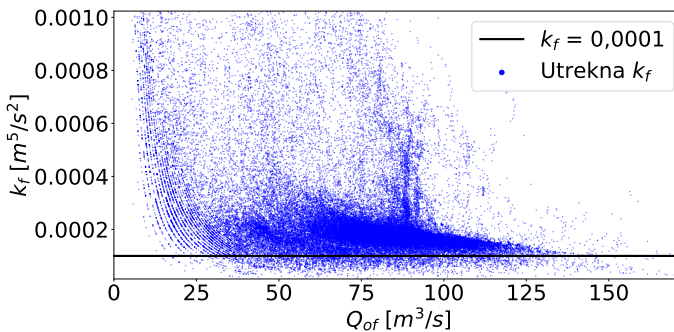
Overføringstunnelen Handelandsmagasinet-Ousdalsvatn

Frå Sira-Kvina er den historiske vasstanden i Handelandsmagasinet og i Ousdalsvatn, H_{Tjr} og H_{Ous} , oppgitt. Historisk falltapsfaktor k_f kan reknast ut som

$$k_f = \frac{H_{Tjr} - H_{Ous}}{(Q_{lokaltilsig} + Q_{Tjr} - \Delta V_{Tjørhomvatn})^2} = \frac{\Delta H_{Tjr-Ous}}{(Q_{of})^2} \quad (3.1)$$

der $Q_{lokaltilsig}$ er lokaltilsiget, Q_{Tjr} er turbinvassføringa i Tjørhom kraftverk, $\Delta V_{Tjørhomvatn}$ er volumendringa i Tjørhomvatn, og Q_{of} er vassføringa i overføringstunnelen. Formel 3.1 forutsetter dykking av heile overføringstunnelen, slik at trykklinja går opp til Handelandsmagasinet. Ved låge vasstander i Ousdalsvatn og låge vassføringar, ligg trykkehøgda i innløpet til overføringstunnelen under 492 moh. Forutsetningane for utrekninga er då ikkje oppfylt, som fører til for stort utrekna falltap, uttrykt som k_f .

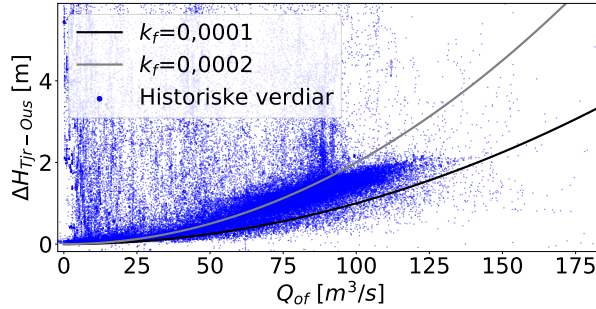
Lokaltilsiget er oppgitt i gjennomsnittleg døgnerverdi. Tilsiget varierar over døgnet, særleg under ei nedbørhending. Døgntilsiget underdriv lokaltilsiget dei timane med mest tilsig, og overdriv tilsiget dei timane med lågast tilsig. Utrekna Q_{of} har difor både timar med for høg og for låg verdi. Dei timane der Q_{of} er for stor, vil formel 3.1 gi for låg verdi av k_f



Figur 3.10: Historisk utrekna falltapskoeffisient k_f i overføringstunnelen

Figur 3.10 viser utrekna k_f mot vassføringa Q_{of} , rekna på timesbasis, som vist i formel 3.1. Grunna avgrensinga i utrekningmetoden for k_f , bør ikkje dei

lågaste eller dei høgaste verdiane brukast. I rapporten vart k_f sett lik 0,1 ‰. Det svarar til 5-persentilen av utrekna k_f .



Figur 3.11: Historisk og utrekna vassføring i overføringstunnelen

Overføringstunnelen er om lag 2,5 km lang. Det er antatt at tverrsnittsarealet er 65 m². Gitt Manningstal M mellom 32 og 35, gir formel 2.5 ein falltapsfaktor k_f på rundt 0,2 ‰. Overføringskapasiteten for k_f lik 0,1 og 0,2 ‰, er i figur 3.11 gitt som funksjon av trykkskilnaden $\Delta H_{Tjr-Ous}$. Kapasiteten for ein gitt vasstand, aukar når k_f minkar. Avgrensinga overføringskapasiteten utgjer, vert viktigare jo større k_f er. Om k_f er større enn modelleringsverdien 0,1 ‰, vil det gi større avgrensingar på køyring i Tjørhom kraftverk.

Gitt k_f lik 0,1 ‰, vert kapasiteten i overføringstunnelen mindre enn slukeevna til det utvida kraftverket når $\Delta H_{Tjr-Ous}$ går under 2,7 meter. Det svarar til HRV i Tjørhomvatn og Ousdalsvatn over 494,9 moh. Tjørhom kraftverk må då redusere produksjonen.

Vassvegen til Tonstad kraftverk

Tilløpstunnelen til Tonstad kraftverk er delt i to strengar, ein frå kvart av dei to magasina. Desse møtast i eit tunnelkryss i Josdal, og går samla vidare. Tverrsitt og lengd på dei ulike delane av tilløpstunnelen, visast i tabell 3.6 Dei tilhøyrande falltapskoeffisientane, er rekna ut gitt Manningstal M lik 32.

Manningstalet varierar mellom anna med tverrsnittsareal (Pettersen, 1986). Sidan tverrsnittsarealet i dei ulike delane av tilløpstunnelen er ulikt, vil Manningstalet truleg òg vere ulikt. Ved å bruke Darcy-Weisbach-friksjonsfaktor, som er dimensjonslaust, hadde ein unngått denne problematikken. Ulike delar av tilløpstunnelen har dessutan ulik tverrsnittsutforming, som gjev ulik hydr-

aulisk radius. I utrekninga av falltapskoeffisientane, er hydraulisk radius rekna ut for eit standard tunnelprofil.

Tonstad kraftverk har tre trykksjakter med tilhøyrande sandfang. Darcy-Weisbach-faktoren f er sett til 0,01, og lengda på trykksjaktene er 546 meter. Dei ulike trykksjaktene har ulik falltapsfaktor k_f , med påfølgjande ulikt falltap for dei ulike aggregata i Tonstad. Dette er vist i tabell 3.5.

	Trykksjakt 1 & 2	Trykksjakt 3
Diameter [m]	3,6	4,8
k_f [‰]	0,746	0,177
Q_{maks} [m ³ /s]	85	80
$h_{f,maks}$ [m]	5,4	1,1

Tabell 3.5: Falltap for trykksjaktene til Tonstad

Ein samla falltapsfaktor for trykksjaktene vart rekna ut med formel 2.11, og er vist i tabell 3.6. Sidan dei ulike trykksjaktene i Tonstad er koplå til sine spesifikke aggregat, vert falltapet lågare med ein samla falltapsfaktor enn det reelt sett er. For store turbinvassføringar, gir falltapskoeffisienten ein gjennomsnittsverdi av falltapet, som stemmer ganske godt med dei reelle verdiane.

Produksjonen i Tonstad er avgrensa av trykkehøgda i sandfanga. Avløpstunnelen, som har liten hydraulisk motstand samanlikna med dei andre delane av tunnel-systemet, har med det lite å seie for kva effekt Tonstad køyrer på. Avløpstunnelen til Tonstad er difor ikkje tatt med i modelleringa. Falltapet frå denne, vert i staden tatt med som ein del av den totale verknadsgraden til Tonstad.

	Ousdal- Josdal	Homstøl- Josdal	Josdal- trykksjakt	Samla trykksjakter
Areal [m ²]	66	57	100	10-18
Lengd[m]	15800	7600	6000	546
k_f [‰]	1,27	0,906	0,16	0,062
Antatt Q [m ³ /s]	114,5	135,5	250	250
h_f [m]	16,6	16,6	10,0	3,9

Tabell 3.6: Falltapsfaktorar for dei ulike delane av tilløpstunnelen til Tonstad

Val av Manningstal

Solvik (1974) oppga Manningstalet i tilløpstunnelen til Tjørhom kraftverk til å vere 33,3. Sidan alle tunnelane er bygd rundt same tid, vil truleg Manningsstalet vere rundt 33 for resten av dei eksisterande tunnelane. I modellen vart Manningstalet sett lik 32. Det er ein låg verdi, som gir høgt falltap.

3.2.3 Falltap etter nybygging

Dei tre utbyggingsalternativa i Tjørhom har to hovudskilnadar:

- Kva som kan pumpast, og
- Kor stort falltapet vert på strekninga Øysteinsevja-Ousdalsvatn

Basert på anslåtte verdiar, vart falltapet til avløpstunnelane til Tjørhom kraftverk rekna ut. Dette er vist i tabell 3.7.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
M [$\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$]	-	32	32
Lengd [m]	400	2200	4000
Areal [m^2]	ca. 65	65	65
k_f [‰]	0,048	0,185	0,336
Q [m^3/s]	164	80	80
h_f [m]	1,3	1,2	2,2

Tabell 3.7: Teoretiske falltapsfaktorar for avløpstunnelane til dei ulike utbyggingsalternativa

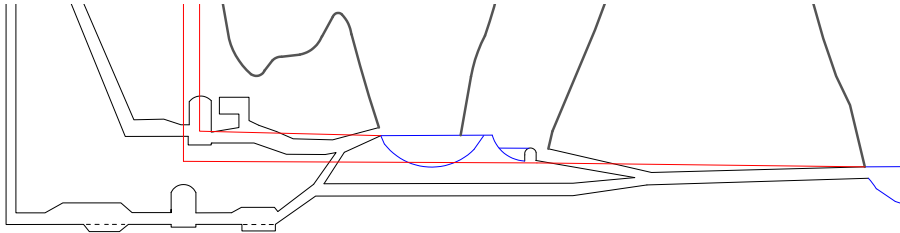
Dei tre alternative avløpstunnelane omfattar ulike delar av vassvegen nedstraums kraftstasjonen. Gitt open løysing, vil produksjonsvatnet alltid strøyme minste motstands veg ut av kraftverket. Difor vil alternativ 2 redusere falltapet gjennom Tjørhomvatn, og alternativ 3 redusere falltapet heilt fram til Ousdalsvatn.

I alternativ 3, har det nye aggregatet eit falltap på 2,2 meter til Ousdalsvatn gjennom den nye avløpstunnelen. For å forenkla modelleringa, vart den nye avløpstunnelen og den eksisterande overføringstunnelen modellert som éin vassveg. Falltapet sett lik 1,2 meter i den eksisterande overføringstunnelen, og 1,0 meter fram til denne for aggregat 3. Dei tilhøyrande falltapskoeffisientane er gitt i tabell 3.8

	Tunnel under Tjørhomvatn	Samla overføringstunnel
Falltap [m]	1,0	1,2
Vassføring [m ³ /s]	80	170
k_f [‰]	0,156	0,042

Tabell 3.8: Falltap i avløpstunnel alternativ 3

Figur 3.12 viser trykklinja for eksisterande og nytt aggregat i Tjørhom kraftverk, ved låg vasstand i Ousdalsvatn. Parametriseringa av alternativ 3, gjer at figuren både representerar alternativ 2 og 3. Dei eksisterande aggregata må ha dykking, og får ikkje utnytta undervatn lågare enn 495 moh. For å finne undervatnet på aggregat 3, reknast falltapet i tunnelen fram til eksisterande overføringstunnel.



Figur 3.12: Trykklinje (i raudt) i eksisterande og nytt aggregat i Tjørhom kraftverk under produksjon, gitt låg vasstand i Ousdalsvatn

Når trykkhøgda i den nye avløpstunnelen går over vasstanden i Øysteinevja, vil ikkje aggregat 3 ha større trykkhøgde enn dei eksisterande aggregata. Sidan modellen sett falltapet gjennom Tjørhomvatn lik null, vil alt vatnet strøyme gjennom Tjørhomvatn. I praksis setjast då falltapet i tunnelen under Tjørhomvatn lik null.

3.2.4 Tilsigsdata

For å modellere kraftproduksjon og magasinutvikling, trengs gode anslag av tilsiget til dei ulike delfelta. Formel 3.2 viser korleis den historiske magasinutviklinga kan brukast i modelleringa. Lokaltilsiget og produksjonsvatnet frå kraftverka oppstraums, vert automatisk med. Magasinkurvane og historiske

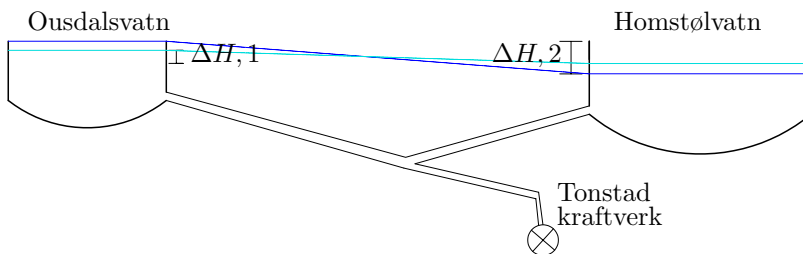
magasinvasstand var oppgitt frå Sira-Kvina. Frå dette vart historisk magasin-
volum bestemt.

$$Q_{\text{lokaltilsig},i} = \frac{V_{\text{magasin},i} - V_{\text{magasin},i-1}}{3600} - Q_{\text{Produksjon,historisk},i} \quad (3.2)$$

Framgangsmåten fungerte berre for Gravvatn. I Tjørhomvatn var metoden uak-
tuell, vassføringa frå Tjørhomsvatn til Ousdalsvatn ikkje lar seg talfeste direkte.
For Ousdalsvatn og Homstølvatn, var problema at

1. Metoden ikkje modellerar lokaltilsiget til bekkeinntaka langs tilløpstunne-
len til Tonstad, og
2. Når Tonstad står eller produserar på låg effekt, vil dei to magasin-
a overføre vatn mellom kvarandre for å jamne ut trykket.

Tilsiget i bekkeinntaka er viktig for å rekne falltapet i Tonstad. Grunna overfør-
inga mellom magasin-
a, inneheld dei historiske magasin-
voluma eit relativt lo-
kaltilsig. Historisk har Ousdalsvatn hatt høgast vasstand. Overføringa gir di-
for Ousdalsvatn eit negativt lokaltilsig, og Homstølvatn eit positivt lokaltilsig.
Sidan modellen endrar drifta av kraftverka, endrast både turbinvassføringa i
Tonstad, og vasstanden i dei to magasin-
a. Magasinoverføringa endrar seg frå
den historiske, som vert ei stor feilkjelde i modellen. Figur 3.13 illustrerar det-
te. Det er to ulike høgdeskilnadar ΔH mellom Ousdalsvatn og Homstølvatn,
som vil føre til ulik overføring av vatn mellom magasin-
a.



Figur 3.13: Illustrasjon av drivande trykk, for overføring av vatn mellom Ous-
dalsvatn og Homstølvatn

Av desse grunnane, brukast lokaltilsigsdataa frå Sira-Kvina i modellen. Desse
dataa har døgnopppløysing. Tilsiga er i modellen tatt med som fire verdiar:

1. Lokaltilsig til Tjørhomsvatn
2. Lokaltilsig til Ousdalsvatn

3. Lokaltilsig til samtlege bekkeinntak langs tilløpstunnelen til Tonstad kraftverk
4. Lokaltilsig til Homstølvatn, inkludert feltoverføring frå Ausdøla og produksjonsvatn frå Solhom kraftverk

3.2.5 Historisk produksjonsvatn

Frå Sira-Kvina er magasinvasstand, produksjon og lokaltilsig oppgitt. For å kunne samanlikne historisk produksjon med modellert, trengs produksjonsvatnet i Tjørhom og Tonstad. Turbinvassføringa, og med det produksjonsvatnet, vart rekna ut med formel 2.1 og 2.8

Tjørhom

Falltapskoeffisientane i det eksisterande Tjørhom kraftverk er gitt i tabell 3.3. Vasstanden i Tjørhomsvatn målast i Handelandsmagasinet, med LRV lik 492 moh. For vasstandar under 495 moh., er høgda på undervatnet til Tjørhom sett til 495 moh. Sidan modellen stort sett køyrer Tjørhom på høg effekt, vart det antatt konstant verknadsgrad for turbinane. Verknadsgrad på det elektromekaniske utstyret i Tjørhom kraftverk kraftstasjonen vart sett lik 93 %.

3.2.6 Magasinoverføring Ousdalsvatn-Homstølvatn

I starten vart det antatt at overføringa av vatn mellom magasinane kunne neglisjerast. Formel 2.16 viser at vassføringa til Tonstad frå Ousdalsvatn, sjeldan går over $125 \text{ m}^3/\text{s}$. Ved lik vasstand i Ousdalsvatn og Homstølvatn, vil berre om lag 46 % av produksjonsvatnet til Tonstad, kome frå Ousdalsvatn. Difor vart Homstølvatn liggande lågt i modellen, medan Ousdalsvatn låg høgt. I dei mest ekstreme tilfella, førte dette til at Tonstad sto, medan det var overløp Tjørhomvatn.

Overføringa mellom magasinane vart difor inkludert i modellen. Vasstanden i Homstølvatn vart jamnt over høgare, som bidrog positivt til produksjonen i Tonstad. Vasstanden i Ousdalsvatn vart lågare, som ga meir køyring på høgare effekt i Tjørhom kraftverk. Overføringa mellom magasinane gjer òg at Tjørhom kan pumpe vatn heit frå Homstølvatn, ved å senke Ousdalsvatn.

$$Q_{\text{Overføring } OH} = \sqrt{\frac{|H_{\text{Ousdal}} - H_{\text{Homstøl}}|}{k_{f,O-H}}} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{inn, overføring}} &= Q_{\text{Overføring } O-H} \\ Q_{\text{ut, overføring}} &= Q_{\text{Overføring } O-H} - Q_{\text{bekkeinntak}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Formel 3.3 og 3.4 viser korleis magasinoverføringa vert rekna ut i modellen. Den totale falltapsfaktoren mellom Ousdalsvatn og Homstølvatn, $k_{f,O-H}$, er 2,37 ‰. For ein høgdeskilnad på til dømes 10 meter, er overføringskapasiteten rundt $65 \text{ m}^3/\text{s}$. Tilsiget frå bekkeinntaka trekkast frå overføringa. Dette minskar magasinenskinga i det høgastliggande magasinet.

Om skilnaden i vasstand er under ein meter, vert ikkje overføringa modellert. Lokaltilsiget frå bekkeinntaka går då til det lågastliggande magasinet. Tilsvarande reknar ikkje modellen overføring når Tonstad produserar. Dette er konservative antakingar.

3.3 Kontroll av oppgitte data

Sira-Kvina oppga historisk magasinvasstand, produksjon, tilsig og turbinvassføring. Vasstandsdataa og produksjonsdata var antatt å vere utan vesentlege feil, medan tilsigsdataa og produksjonsdataa vart kontrollert. Oppsummert, viste kontrollen at oppgitt tilsig var feil. Dette er gjennomgått i detalj i Appendix A. Etter å ha kontakta Sira-Kvina, viste det seg at oppgitt produksjonsvatn òg var feil.

3.3.1 Rekonstruksjon av tilsigsdata

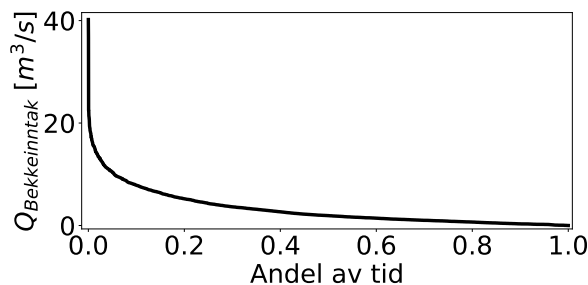
Nye tilsigsdata vart deretter gitt frå Sira-Kvina. Denne dataserien ga kun det totale tilsiget til Tonstad. For å finne fordelinga mellom dei ulike magasin og bekkeinntaka, vart tilsigsdataa frå NVE Atlas brukt. Totaltilsiget vart fordelt basert på årstilsig, med vektfaktorane vist i tabell 3.9. Øksendaloverføringa vart kobla på i slutten av august 2010, som er grunnen til to sett med vektfaktorar.

	Tjørhomvatn	Ousdalsvatn	Bekkeinntak	Homstølvatn
Før 23/8-2010	0,436	0,067	0,056	0,441
Etter 23/8-2010	0,416	0,064	0,10	0,40

Tabell 3.9: Vektfaktorar for lokaltilsiget til Tonstad

Fordeling av tilsiget basert på årstilsig, tar ikkje omsyn til at delfelta er av ulik type, og difor har ulik oppførsel. Dei lågareliggande felta har tidlegare snøsmelting enn høgfjellsfelta, og dei store felta har treigare respons på ei nedbørshending enn dei små felta. Sidan restfeltet spenner over eit stort geografisk område, har ikkje dei ulike delfelta nødvendigvis den same nedbørssituasjonen på eit gitt tidspunkt. For å få med seg variasjonane i tilsig, må felta modellerast, ikkje berre fordelast ved vektfaktorar.

Enkelte av bekkeinntaka har minstevassføringskrav. Særleg gjeld dette Øksendalsoverføringa, som ikkje overfører vatn i perioden juni-august (Sira-Kvina, 2015). Kvart enkelt bekkeinntak har avgrensa slukeevne, som kan gi flaumtap i delfelt. Minstevassføring eller flaumtap er ikkje trukke frå i total avrenning i tilsigsdataa frå NVE, og vert difor ikkje med i vektfaktorane. Dette kan gi både feil verdi av enkelte skaleringsfaktorar, og feil fordeling av skaleringsfaktorane over det hydrologiske året. Grunna tilsigsandelen frå bekkeinntaka, vil feil fordeling av tilsiget auke eller redusere falltapet i Tonstad, samanlikna med reell situasjon. Tilsiget til Tonstad er oppgitt utan minstevassføring eller flaumtap. Feil i vektfaktorane gir difor kun feil i fordelinga av lokaltilsiget mellom felta, ikkje i totalvolumet.



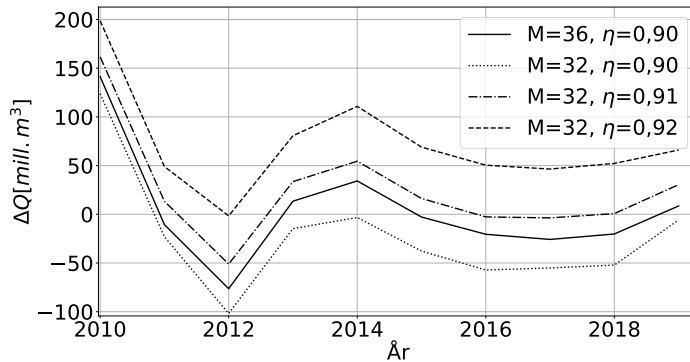
Figur 3.14: Varigheitskurve for døgnverdiar av tilsiget i bekkeinntaka til Tonstad, 2010-2019

3.3 Kontroll av oppgitte data

Figur 3.15 viser at avviket mellom utrekna produksjonsvatn og det oppdaterte tilsiget, varierar mellom åra. Det kan kome av at falltapet og verknadsgraden i Tonstad varierar og endrar seg, på måtar modelleringa ikkje fangar opp. Det kan òg kome av at totalvolumet av tilsig ikkje er rett, eller at feil fordeling gir feil falltap i Tonstad.

3.3.2 Rekonstruksjon av turbinvassføringa i Tonstad

På grunnlag av oppgitt tilsig, historisk effekt og historiske magasinvasstander, vart den historiske turbinvassføringa rekna ut. Kalibreringsparameterna var M og η . M endrar falltapet, som endrar nettohøgda på turbina for ei gitt vassføring. η endrar turbinvassføringa for ein gitt effekt. Tanken var å finne eit parametersett som ville gi vassbalanse i systemet.



Figur 3.15: Vassbalansen til Tonstad kraftverk for historisk tilsig og utrekna turbinvassføring. Positiv ΔQ vil seie større tilsig enn Q_{turbin}

Figur 3.15 viser skilnaden mellom utrekna turbinvassføring, og vassføring utrekna ved formel 3.5, for dei beste kalibreringane. For kvar enkelt kalibrering er det stort sprik i vassbalansen mellom åra. Dei beste verdiane var for $\eta=0,96$, $M=36$ og $\eta=0,91$, $M=32$. Sjølv for desse, var totalverdien av vassubalansen rundt 350 millionar m^3 over tiårsperioden. Dette svarar til rundt 0,9 % av total vassføring i Tonstad i perioden. Vassføringsdataa utrekna for $M=32$ og $\eta=0,91$, vart lagt til grunn for modelleringa.

$$\sum_{\text{År}} \text{Produksjonsvatn} = \sum_{\text{År}} \text{Tilsig} - \sum_{\text{År}} \text{Flaumtap} + \sum_{\text{Magasin}} \Delta V_{\text{Magasin}} \quad (3.5)$$

Det største avviket i utrekna ΔQ var i 2010, året Øksendalsoverføringa vart kobla inn. I utrekninga vart det antatt at bekkeinntaka til Tonstad kom samla inn i Josdal. Øksendalsoverføringa står for rundt 40 % av tilsiget i bekkeinntaka, og kjem inn 1,5 km før sandfanga i Tonstad. Øksendalsoverføringa reduserte falltapet i Tonstad, som igjen reduserte turbinvassføringa i Tonstad for ein gitt effekt. Avviket i 2010 tyder på at modelleringa av falltapet i Tonstad ikkje klarte å ta med betydninga av Øksendalsoverføringa. Turbinvassføring i månadane før august 2010 vart med det for låg, som ga stor ΔQ .

Gyldigheit av kalibrering

Både verknadsgraden η og Manningstal M er fysiske, talfestbare parameter. Konstant Manningstal i heile tilløpstunnelen er usannsynleg. Sidan modellen alltid held høg effekt i Tonstad, kan ein anta konstant turbinverknadsgrad, og med det konstant verknadsgrad for Tonstad.

Kalibreringa fann ein kombinasjon av M og η , som ga tilnærma vassbalanse for historisk køyring. Om til dømes M er for høg og gir for lite falltap, vart det kompensert for med ein lågare verknadsgrad, og motsett. Modellen endrar køyremønsteret i Tonstad, i retning høgare effekt og turbinvassføring. Tonstad fjernar seg med det frå kalibreringssituasjonen. Sidan verknadsgraden er sett konstant, er det kun falltapet som endrast ved endra turbinvassføring. Feil i parametersettet vil difor ikkje utjamne kvarandre, som dei gjorde i kalibreringa.

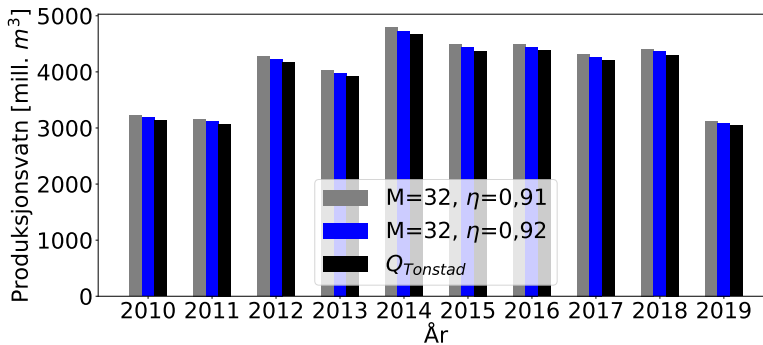
Dette har to moglege utfall: Om M er for høg, og η for låg, vert falltapet lågare enn det det η kompenserar for. Produksjonen vert difor høgare enn den ville vorte i fysiske systemet. Alternativt er den kalibrerte verdien av M for låg, og η er for høg. Falltapet fram til turbina vert høgare enn det η kompenserar for, og produksjonen vert lågare enn den ville vorte i fysiske systemet.

Kalibreringsverdien $M = 32 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ er truleg for låg. Auka i falltap som M gir, er difor truleg større enn det η og modelleringa av bekkeinntaka kompenserar for. Produksjonen i modellen vert då lågare enn i ein reell situasjon.

Resterande feil i modellering av tilsig

Etter at simuleringane og dataprosesseringa var ferdig, vart det oppdaga to modelleringsfeil i vassføringsdataa. For det første, hadde ikkje det historiske produksjonsvatnet i Tonstad vorte oppdatert i modellen. Tala som vart bruka i

staden, var ikkje basert på rett falltap i Tonstad, og var lågare enn dei kalibrerte verdiane. Den andre feilen var at η var sett lik 0,92 i Tonstad i modellen, ikkje kalibreringsverdien 0,91.



Figur 3.16: Utrekna produksjonsvatn i Tonstad for tre kalibreringar

Modellen prøver å balansere historisk produksjonsvatn. Sidan M er 32 og $\eta_{Tonstad}$ er 0,92 i modellen, treng modellen eit vassvolum tilsvarande $M=32$, $\eta=0,92$ i figur 3.16, for å produsere like mykje straum som historisk. Vassvolumet modellen prøver å balansere, er vist som $Q_{Tonstad}$ i figur 3.16. I snitt, er denne 58 millionar m³ lågare enn $M=32$, $\eta=0,92$, kvart år. Det svarar til ein produksjonsreduksjon på 1,5 %.

Det kalibrerte produksjonsvatnet er vist som $M=32$, $\eta=0,91$ i same figur. I snitt er avviket mellom denne og produksjonsvatnet i modellen, 105 millionar m³ årleg. Produksjonsvatnet i modellen er i snitt 130 millionar m³ lågare enn oppgitt tilsig. Ein får då eit overskot av vatn, som kan føre til store flaumtap i modellen. Feila har fjerna modellen frå kalibreringa. I praksis vert modellen over Tonstad mindre lik det fysiske systemet.

Tilsigsdataa er ikkje detaljerte nok for modellen. Dette gjeld både totalvolumet, og fordelinga mellom delfelta. Sidan modellen bruka ein annan turbinvassføring enn den som var kalibrert mot tilsigsdataa, er unøyaktigheitene i tilsigsdata mindre viktige for resultatata, enn om skilnaden mellom utrekna turbinvassføring og tilsigsdata hadde vore null.

3.4 Forutsetningar og avgrensingar

3.4.1 Effekt av utviding

Utvidinga av Tjørhom kraftverk vil auke slukeevna frå rundt 88 m³/s i dag til rundt 166 m³/s. Det reversible aggregatet vil kunne pumpe opptil 70 m³/s. Korleis dette påverkar dei to kraftverka, er gjennomgått under.

Køyring av Tjørhom pumpekraftverk

Tidleg i arbeidet var planen å modellere utvidinga av Tjørhom som eit reint pumpekraftverk. Det eksisterande kraftverket skulle køyrast som historisk. Dette både avgrensa pumpekraftverksdrifta, og reduserte den potenselle gevinsten av utvidinga. Appendiks B går gjennom dei planlagte forutsetningane, med tilhøyrande avgrensingar. Etter analysa, vart dei oppgitte kriteria forkasta. I modellen endrast køyremønsteret i aggregat 1 og 2 i Tjørhom, og pumpinga av vatn skjer uavhengig av historisk produksjon i Tonstad.

Produksjon i Tonstad

Auka effekt i Tjørhom gjer at kraftverket kan levere meir vatn til Ousdalsvatn på eit gitt tidspunkt. Ousdalsvatn kan haldast høgare, som igjen gjer det mogleg å halde høgare effekt i Tonstad. Installering av pumpeaggregat i Tjørhom gjer det mogleg å pumpe lokaltilsiget til Tjørhomvatn. For alternativ 2 og 3, kan lokaltilsiget til heile tilløpet til Tonstad pumpast. Delar av tvangskøyninga som skjer i Tonstad i dag, vil då kunne fjernast.

3.4.2 Straummarknad og nettilknytting

Modelleringa har forutsett at Tonstad ikkje har innverknad på straummarknaden. Tonstad er Noregs største kraftverk målt i produksjon, og det nest største målt i effekt. Denne forutsetninga bør difor vurderast nøgnare.

Nettilknyttinga til kraftverka, vart ikkje vurdert. For Tonstad er det kun køyremønsteret som endrast, som ikkje vil endre behovet for nettilknytting. Tjørhom vart nyleg kobla på ny 420 kV høgspenlinje, som erstatning for den tidlegare linja på 300 kV. Dette har auka kapasiteten og overføringskapasiteten, og er designa for ei potensiell framtidig utviding av Tjørhom kraftverk (Statnett, 2022a).

3.4.3 Avgrensingar

Avgrensingane kan delast inn i fysiske avgrensingar og modellavgrensingar. Sistnemnte kan igjen delast inn i avgrensing frå inndataa i modellen, og avgrensing i oppbygging av modellen. Under er dette gjennomgått.

Fysiske avgrensingar

Dei fysiske avgrensingane dreier seg i stor grad om falltap. Overføringskapasiteten mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn er den viktigaste avgrensinga, sidan den direkte avgrensar turbinvassføringa i Tjørhom kraftverk.

Falltapet i tilløpstunnelen til Tonstad avgrensar kor mykje av turbinvassføringa som kjem frå Ousdalsvatn. Sidan denne vassføringa er under $166 \text{ m}^3/\text{s}$, vil dette avgrense turbinvassføringa i Tjørhom. Overføringsavgrensinga gjer at Homstølvatn ofte vil ligge lågare enn Ousdalsvatn. Sidan turbinvassføringa i Tonstad er avgrensa av magasinvasstand, vil dette igjen avgrense slukeevna i Tonstad.

Inndata

Hovudparametera modellen treng, er

- Slukeevne og verknadsgrad for kraftverka
- Falltap i tunnelane
- Magasincurver
- Tilsigsdata, inkludert produksjonsvatn frå oppstraums kraftverk

Ein modell gir ikkje betre verdiar ut, enn verdiane den får inn. Usikkerheit i talgrunnlaget gjer difor modelleringa, og med det resultatet, usikkert.

Oppbygging av modellen

Modellen optimaliserar drifta av Tjørhom og Tonstad innanfor ein periode ΔT , ved å flytte historisk produksjon. Som vist i tabell 3.1, er den potensielle inntekta avgrensa av kva ΔT som brukast i modellen. Kva vasstanden er i Homstølvatn og Ousdalsvatn, følgjer som eit resultat av endra køyring i Tjørhom og Tonstad.

Drifta av dei andre kraftverka endrast ikkje. Om mykje produksjon flyttast innad i kvar ΔT , vil bruken av historiske produksjonsdata i oppstraums kraftverk, gi ubalanse i vassvolum. For kvar enkelt ΔT , kan kraftverka oppstraums køyre magasin til overløp i periodar med lågare pris. På same måte, kan nytt køyremønster i Tonstad tømme Ousdalsvatn og Homstølvatn i periodar med høgare pris. Modellen gir difor både lågare vasstand i Homstølvatn og Ousdals-

vatn enn historisk, og større flaumtap enn historisk.

Modellen pumpar vatn i Tjørhom, utan å sjå det i samanheng med produksjonen i Tonstad. Pumpinga i Tjørhom flyttar difor ikkje produksjon i Tonstad. Ei av dei antatte inntektskjeldene er nettopp denne flyttinga av produksjon i Tonstad.

Alle avgrensingane i oppbygging av modellane, er konservative. Den modellerte produksjonen og inntekta, er difor lågare enn det som kan ventast etter ei utbygging.

3.4.4 Utbyggingsalternativ som ikkje vart simulert

Systemverknadsgraden til pumpekraftverket avheng mykje av vasstanden i nedstraums magasin i pumpemodus. For alternativ 2 og 3 fungerer Tjørhomsvatn som eit bekkeinntak, der trykkhøgda kjem frå Ousdalsvatn. Samanlikna med pumping på låg magasinvasstand i Ousdalsvatn, kan pumping frå Tjørhomvatn auke systemverknadsgraden med opptil 6 %. For å skilje vatnet frå Tjørhomvatn og Ousdalsvatn under pumping, må ein kunne

- korttidsmagasinere vatn i Tjørhomvatn, og
- pumpe vatn kun frå Tjørhomvatn

Dette vil innebere luker i systemet, og mange potensielle konfigurasjonar. Ulike løysingar gir ulik fridom til å køyre på ulike magasin. Her delast løysingane inn i to variantar:

- I** Variantar som kan magasinere Tjørhomvatn, men som stoppar overføringa til Ousdalsvatn i perioden før
- II** Variantar som kan magasinere Tjørhomvatn, uavhengig av drifta av Tjørhom kraftverk

Variantar av alternativ 1

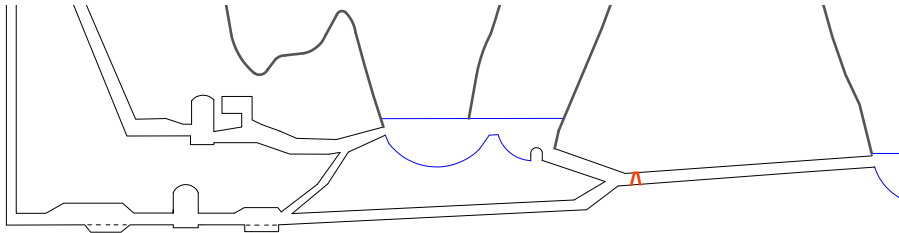
Alternativ 1 kan ikkje pumpe frå Ousdalsvatn. Korttidsmagasinering oppnåast ved å setje opp ei luke i Tjørhomvatn. Denne kan anten vere i overgangen mellom Øysteinevja og Handelandsmagasinet, eller i innløpet til overføringstunnelen. Lokaltilsiget vil då kunne magasinere opp vatn til pumping, så større volum kan pumpast. Sjølv om det ikkje er modellert, er det dette alternativet den mest aktuelle utforminga av alternativ 1.

Variantar av alternativ 2

I: For å magasinere vatn i Tjørhomsvatn, må vatnet hindrast i å strøyme gjennom den eksisterande overføringstunnelen. Dette kan oppnåast ved å setje inn ei

luke i overføringstunnelen, nedstraums påkoblingspunktet for ny avløpstunnel. Dette er vist i figur 3.17. Tjørhomvatn kan då magasinereast til pumpeformål. Når Tjørhomvatn er tømt, opnast luka, slik at ein kan pumpe frå Ousdalsvatn.

Om Ousdalsvatn ligg lågt, eller for pumping i lengre periodar, trengs to ekstra luker for å oppnå variant **II**. Det vil svare til løysinga vist i figur 3.19. Om Ousdalsvatn ligg høgt, vil Tjørhomvatn ligge ved HRV etter at det utvida kraftverket har køyrt. For dei fleste tilfelle der ein veksar mellom å produsere og pumpe, vil Tjørhomvatn vere fullt når kraftverket stoppar. Ein treng altså ikkje å magasinere opp Tjørhomvatn med lokaltilsiget. Variant **II** vert då lik variant **I**.

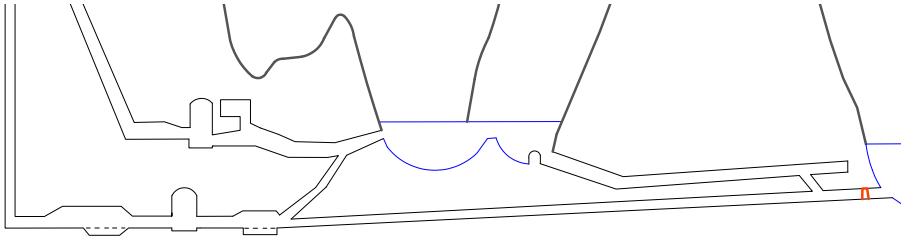


Figur 3.17: Utforming av Tjørhom pumpekraftverk, alternativ 2, for å kunne magasinere Tjørhomvatn. Luke er teikna i raudt

Variantar av alternativ 3

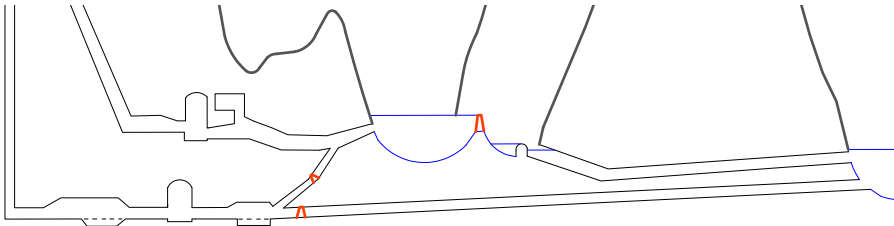
Dei prinsipielle skilnadane på alternativ 2 og 3, er kor langt ned Ousdalsvatn kan pumpast, og falltapet i overføringa. Utforming av variantane vert difor ganske like alternativ 2:

I: Ved å la utløpet av den nye avløpstunnelen koblast saman med eksisterande overføringstunnel, kan ein legge inn ei luke i utløpet til Ousdalsvatn. Det vil gi mogleheit for magasinering av Tjørhomvatn. Ein illustrasjon er gitt i figur 3.18, der eksisterande overføringstunnel går inn i felles lukekammer med ny avløpstunnel.



Figur 3.18: Utforming av Tjørhom pumpekraftverk, alternativ 3, for å kunne magasinere Tjørhomvatn. Luke er teikna i raudt

II: Sidan falltapet til Ousdalsvatn reduserast, er det større sannsyn for at Tjørhomvatn vil ligge under HRV i ein driftsituasjon. To luker i Tjørhomvatn, i tillegg til ei luke i den nye avløpstunnelen til Ousdalsvatn, vil vere nødvendig. Ei mogleg løysing er vist i figur 3.19. Luka i Tjørhomvatn er plassert i overgangen mellom Øysteinevja og Handelandsmagasinet. Om luka plasserast i utløpet av Tjørhomvatn i staden, startar magasineringa med å fylle Handelandsmagasinet opp til 495 moh. Det svarar til 1 million m^3 , som ikkje hadde vore tilgjengeleg for pumping frå Øysteinevja.



Figur 3.19: Utforming av Tjørhom pumpekraftverk, alternativ 3, med moglegheit for full fleksibilitet. Luker er teikna i raudt

3.5 Parametrisering av Tonstad kraftverk

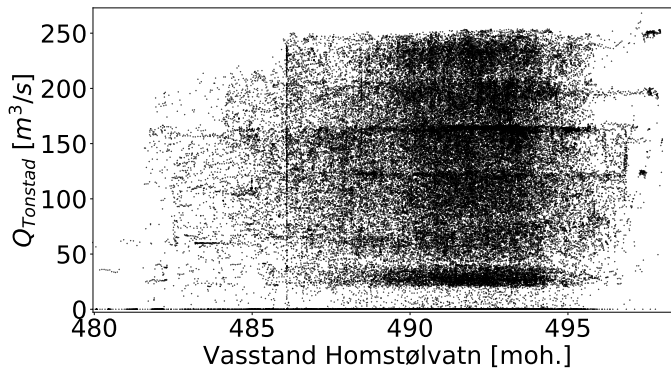
Modellen ser på inntektsauka frå endra produksjon i Tjørhom og Tonstad. Gitt same flaumtap i modellen som historisk, skal same vassvolum som køyrast gjennom turbinane. Produksjonen vert kun flytta på i tid. Auka falltap i systemet vil redusere totalproduksjonen noko.

3.5.1 Slukeevne

Tilløpstunnelen til Tonstad kraftverk har store falltap, som kan føre til problem i sandfanga. For å hindre dette, er det avgrensa kor stor effekt Tonstad kan køyre på for gitte vasstandar i magasina. Lokaltilsiget i bekkeinntaka til Tonstad reduserar falltapet, og aukar trykkhøgda i sandfanga. Kor stor effekt Tonstad kan køyre på, avheng difor av magasinvasstanden i Homstølvatn og Ousdalsvatn, i tillegg til lokaltilsiget.

Homstølvatn er det største av dei to magasina til Tonstad, og Kvina-strengen av tilløpstunnelen har lågast falltapskoeffisient. Vasstanden i Homstølvatn vart difor valt som avgrensing for Tonstad. Turbinvassføringsdataa til Tonstad er usikre, i motsetnad til historisk produsert effekt. Difor vart modellen i starten basert på samanhengen mellom effekt i Tonstad og vasstand i Homstølvatn. Ein gjennomgang av denne framgangsmåten, kalla effektekvivalent, er gitt i Appendiks C.

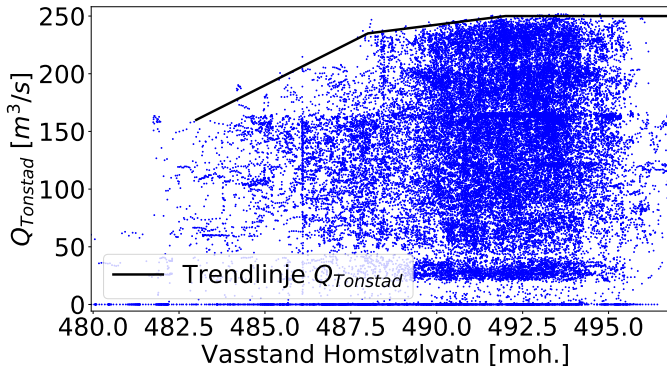
Effektekvivalenten fekk ikkje med korleis netto trykkhøgde i Tonstad, og med det produsert energi per m^3 , auka ved auka vasstand i Homstølvatn. Difor vart maksimal turbinvassføring bruka som avgrensing i staden. Turbinvassføringa i Tonstad er rekna ut, basert på metoden i kapittel 2.1. M er sett lik 32, og $\eta_{Tonstad}=0,91$.



Figur 3.20: Turbinvassføring i Tonstad mot vasstand i Homstølvatn

Figur 3.20 viser utrekna turbinvassføring i Tonstad mot historisk vasstand i Homstølvatn. Lokaltilsiget til bekkeinntaka reduserar falltapet i tilløpstunnelen,

og aukar tilgjengeleg slukeevne. Medianverdien for tilsiget i bekkeinntaka er $1,93 \text{ m}^3/\text{s}$, som vil seie at det er 50 % sannsyn for å ha større eller mindre lokaltilsig, på eit gitt tidspunkt. Figur 3.21 tar kun med tidspunkta der lokaltilsiget i bekkeinntaka er under medianverdien. Figuren har òg ei trendlinje for dei største turbinvassføringane, ved gitt vasstand i Homstølvatn. Denne trendlinja vart bruka som avgrensing på slukeevna til Tonstad i modellen.



Figur 3.21: Turbinvassføring i Tonstad mot vasstand i Homstølvatn, gitt $Q_{Bekk} > 1,93 \text{ m}^3/\text{s}$

3.5.2 Effekt

Effekten i Tonstad gitt $Q_{Tonstad}$, vart rekna ut som følgjer:

1. Trekk frå tilsiget til bekkeinntaka for å finne turbinvassføringa som kjem frå Ousdalsvatn og Homstølvatn
2. Frå likning 2.16, finn ut kor mykje vatn som kjem frå Homstølvatn
3. Rekn ut falltapet Homstølvatn-Josdal og Josdal-Tonstad
4. $P_{Tonstad} = Q_{Tonstad} * \eta * \rho * g * (H_{Homstøl} - H_{Sirdalsvatn} - h_{f, Homstøl-Tonstad})$

Denne framgangsmåten inkluderar det reduserte falltapet frå bekkeinntaka i den modellerte produksjonen. Over tiårsperioden 2010-2019, har det historisk vore mange stopp i Tonstad for vedlikehald av eitt eller fleire aggregat. Kor stor effekt som var tilgjengeleg, er vist i tabell 3.10. For å ikkje modellere større effekt enn det som var tilgjengeleg for eitkvart tidspunkt, er historisk maksimal tilgjengeleg effekt sett som avgrensing for slukeevna i Tonstad.

Tilgjengeleg effekt [MW]	0	320	480	640	800	960
Andel av tid [%]	1,1	0,9	10,8	21,4	24,7	41,1

Tabell 3.10: Historisk tilgjengeleg effekt i Tonstad som andel av tid

Modellen bruka $\eta=0,92$ for å rekne produksjon i Tonstad. $\eta=0,92$ hadde gitt lågare vassføringsverdiar i figur 3.20 og 3.21, og lågare trendlinje i figur 3.21. Modellen har difor høgare vassføring enn det den historiske avgrensinga tilseier. I praksis får Tonstad litt høgare produsert effekt på eit gitt tidspunkt. For totalproduksjonen har det lite å seie.

3.6 Parametrisering av Tjørhom pumpekraftverk

I modelleringa av Tjørhom pumpekraftverk, vert det mest lønsame modellert først. Deretter kjem det mindre lønsame. Produksjon av tilsig, her kalla kraftverksdrift, er det er mest lønsame i Tjørhom. Utvidinga av Tjørhom frå eit 120 MW kraftverk til eit 240 MW pumpekraftverk, er difor i første rekke ei effektutviding av det eksisterande kraftverket. Det naturlege tilsiget til Gravatn køyrast gjennom Tjørhom kraftverk på tidspunkta med høgast pris. Pumpinga modellerast *etter* at køyringa av det utvida 240 MW kraftverket er modellert.

3.6.1 Vanleg kraftverksdrift

Falltapet og verknadsgraden i det eksisterande Tjørhom kraftverk, er betre talfesta enn for Tonstad. Utrekna historisk turbinvassføring er difor meir truverdige enn for Tonstad. Vasstanden i Gravatn vert dessutan rekna ut frå formel 3.2, som kun ser på endra turbinvassføring. Om utrekna historisk vassføring inneheld feil, vil utrekna produksjon i modellen innehalde den same feilen. Feil i parametera vert i stor grad kansellert ut.

Tjørhom har òg hatt historiske stopp i kraftverket, vist i tabell 3.11. Det vert tatt med i modellen som ei avgrensing for aggregat 1 og 2. Det vart antatt at avgrensingane ikkje kom frå arbeid i vassvegen, som ville ført til at aggregat 3 òg hadde stått. Det nye aggregatet vart difor modellert utan avgrensingar i tilgjengeleg effekt.

Når tilgjengeleg effekt er kjend, kan den teoretisk største effekten i Tjørhom finnast. Det vert bestemt frå tilgjengeleg turbinvassføring. Tjørhomvatn har eit volum på 3,3 millionar m^3 . Før dette er fullt, har Tjørhom kraftverk ingen

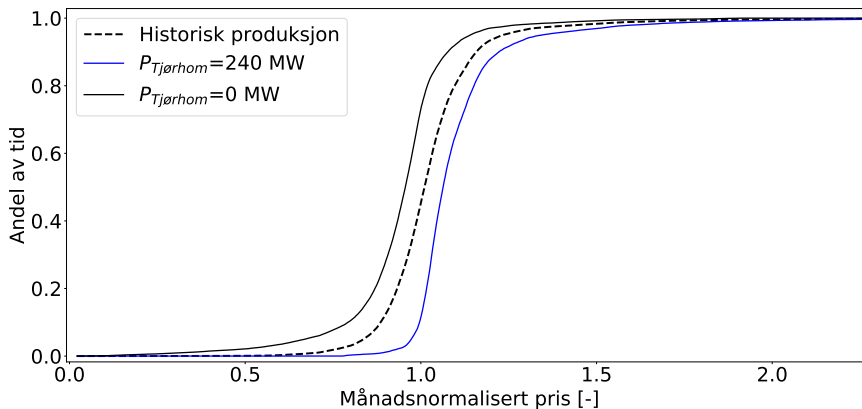
avgrensingar på turbinvassføring frå ytre forhold.

Tilgjengelege aggregat [#]	0	1	2
Andel av tid [%]	4,4	9,9	85,7

Tabell 3.11: Historisk tilgjengelege aggregat i Tjørhom som andel av tid

Vasstanden i nedre del av Tjørhomsvatn, Handelandsmagasinet, kan ikkje gå over HRV. Når vasstanden i Ousdalsvatn stig over 494,7 moh., får overføringstunnelen lågare kapasitet enn 166 m³/s. Den maksimale turbinvassføringa i Tjørhom, er difor den minste av slukeevna til kraftverket, og kapasiteten til overføringstunnelen minus lokaltilsig. Dette er vist i likning 3.6, og gjeld alle utbyggingsalternativa. Alternativ 3 har større overføringskapasitet, og vil i mindre grad vere avgrensa av dette.

$$Q_{Tjørhom,maks} = \text{MIN} \begin{cases} Q_{\text{overføringstunnel}} - Q_{\text{Lokaltilsig}} \\ Q_{\text{tilgjengeleg,historisk}} + Q_{\text{slukeevne,aggregat3}} \end{cases} \quad (3.6)$$



Figur 3.22: Varigheitskurve over produksjonstidspunkt i Tjørhom kraftverk, gitt $P_{Tjørhom}=240$ MW eller 0 MW, optimaliseringsperiode ΔT lik éin månad

Figur 3.22 viser varigheitskurva for kraftpris av eit hypotetisk tilfelle. Produksjonen i Tjørhom kraftverk er optimalisert med $\Delta T_{Kraftverk}$ lik éin månad,

utan ytre avgrensingar. Kurva for produsert pris flyttar seg mot høgare prisar. Dette er det venta resultatet av å auke effekten og redusere driftsimane i Tjørhom kraftverk.

3.6.2 Tjørhom pumpekraftverk som utvida kraftverk

Blå kurve i figur 3.22 viser dei hypotetiske tidspunkta der eit utvida 240 MW kraftverk ville vorte køyrt. Desse tidspunkta kan ikkje brukast i utrekning av drifta av pumpekraftverket. Tidspunkta utan kraftverksdrift er vist som $P_{Tjørhom}=0$ MW i same figur. Dette svarar til tilgjengelege tidspunkt for pumpekraftverksdrift. Kraftprisen er jamnt over lågare for desse tidspunkta. Grunnen til at kurvene for produksjon og stillstand overlappar kvarandre, er at optimaliseringsperioden ΔT bruka i figuren, er éin månad, ikkje heile perioden. Variasjonen i historisk produksjon mellom månadane, gir spreinga i produsert pris.

Modellen finn først timane det utvida kraftverket produserar, tilsvarande blå kurve i figur 3.22. Tidspunkta kraftverket ikkje produserar, tilsvarande svart kurve i same figur, er utgangspunktet for heile pumpekraftverksdrifta.

Skilnad frå konvensjonelle pumpekraftverk

Kapittel 2.2 introduserte framgangsmåten for å modellere eit konvensjonelt, frikobla pumpekraftverk. Då er alle tidspunkta tilgjengeleg for pumpekraftverksdrift. Måten pumpinga bestemmast i Tjørhom pumpekraftverk, gir færre timar til pumpekraftverksdrift. Vanleg kraftverksdrift tar dei fleste timane med høg pris. Dei timane som er tilgjengelege for pumpekraftverksdrift, vert prisvariasjonen difor lågare. Pumpekraftverksdrift avheng av stor variasjon i kraftprisen, ikkje høg eller låg kraftpris.

For å forsvare å pumpe opp vatn, må det vere tilgjengelege tidspunkt til å produsere vatnet på. Når dei høgaste straumprisane er utilgjengelege for pumpekraftverket, må utgangsprisen p_0 i likning 2.19 reduserast. Dette reduserar tilgjengelege timar for pumping.

3.6.3 Kvar vatnet kjem ifrå

Gitt at modelleringa tilseier pumping i Tjørhom, må modellen definere kvar vatnet kjem ifrå. Tjørhom pumpekraftverk har to magasin som kan definerast som nedstraums magasin: Tjørhomvatn og Ousdalsvatn. Dei ulike utbyggingsalternativa mogleggjer ulik utnytting av desse magasinane.

Alternativ 1

Det første alternativet kan berre pumpe lokaltilsiget i Tjørhomvatn. Ved å installere ei luke i Tjørhomvatn, vert eit volum på opptil 2,3 millionar m³ tilgjengeleg for korttidsmagasinerung. I periodar med lågt tilsig, kan desse lukene brukast for å lagre lokaltilsiget til tidspunkta med lågast pris. I modellen er dette ikkje inkludert. Kraftverket pumpar berre lokaltilsiget i sanntid, og magasinvolümet ned til 495 moh.

Alternativ 2 og 3

Med omsyn til pumping, er skilnaden mellom alternativ 2 og 3 at sistnemnte kan pumpe Ousdalsvatn heilt ned til LRV. Alternativ 2 kan berre pumpe Ousdalsvatn ned til 487 moh. Overføringa mellom Homstølvatn og Ousdalsvatn, gjer heile restfeltet til Tonstad tilgjengeleg for pumping, for begge alternativa.

Det er antatt open løysing i det nye kraftverket. I pumpemodus, kjem vatnet då frå både Ousdalsvatn og Tjørhomsvatn. Vatnet frå Tjørhomvatn har lågast hydraulisk motstand, og vert pumpa først. Vassvolumet som pumpast frå Ousdalsvatn, er den resterande slukeevna til pumpeturbina:

$$Q_{pumpe,Ousdal} = Q_{pumpe} - Q_{lokal,Tjørhomvatn} - \frac{V_{rest,Tjørhomsvatn}}{3600} \quad (3.7)$$

3.6.4 Effekt og slukeevne

For ei pumpeturbin med fast turtal, er effekt og slukeevne i pumpemodus eintydig bestemt av netto pumpehøgde. Basert på verknadsgradskurver oppgitt av Sira-Kvina, kombinert med utrekna falltap ved ulike vassføringar, vart denne samanhengen bestemt for det nye pumpeaggregatet i Tjørhom.

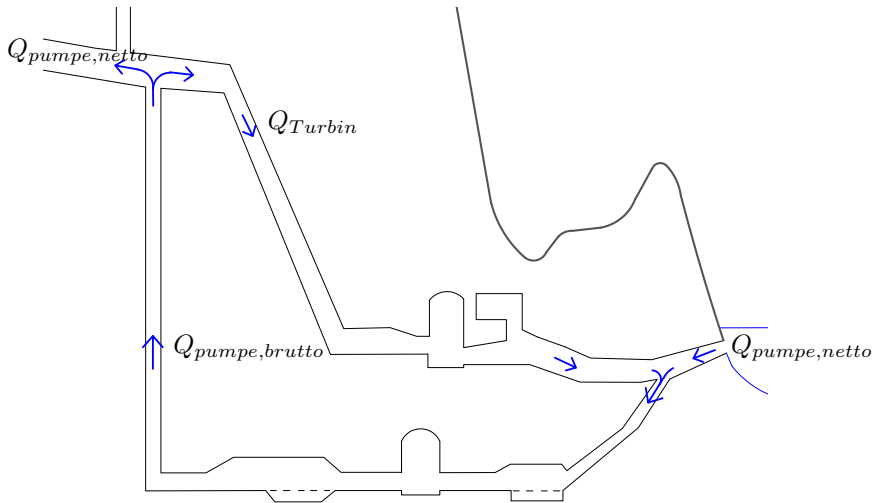
Regulering av pumpevassføring

Modellen ser kun på pumpekraftverksdrift som er lønsam i seg sjølv. Difor er det lønsamt å pumpe så mykje som mogleg. For alternativ 1, pumpast kun tilgjengeleg vatn i Tjørhomvatn, og pumpevassføringa må kunne regulerast. For alternativ 2 og 3, er pumpevassføringa i modellen alltid sett lik største tilgjengelege pumpevassføring.

Gevinsten i Tonstad kan vere stor nok til å forsvare pumping som er ulønsam i Tjørhom. Sannsynleg drift av Tjørhom pumpekraftverk inneber situasjonar der lokaltilsiget til Tonstad pumpast på prisar som ikkje er lønsame i Tjørhom. Regulert pumpekapasitet gjer det mogleg å ikkje pumpe meir enn nødvendig.

Hydraulisk kortslutting

Ei moglegheit for å oppnå regulerbar pumpevassføring, er hydraulisk kortslutting av Tjørhom pumpekraftverk. Dei eksisterande aggregata produserar, samtidig som det nye aggregatet pumpar. I sum vert ei regulerbar mengd vatn pumpa. Dette er illustrert i figur 3.23.



Figur 3.23: Illustrasjon av hydraulisk kortslutting i Tjørhom pumpekraftverk, alternativ 1

Hydraulisk kortslutting gir store energitap i systemet. Det lågaste undervatnet dei eksisterande aggregata nyttar, er 495 moh. Om Ousdalsvatn pumpast på ein vasstand under 495 moh., og vassføringa regulerast med hydraulisk kortslutting, går fallet mellom turbinene og pumpa tapt. Dette gjeld alternativ 2 og 3, og reduserar verknadsgraden ytterlegare.

Fullfrekvensomformar

Regulerbar vassføring i pumpemodus kan òg oppnåast med ein fullfrekvensomformar. Ein frekvensomformar endrar frekvensen på straumen i generatoren. Det endrar turtalet på aggregatet, som igjen endrar effekten og slukeevna. Ein fullfrekvensomformar har like stor installert effekt som generatoren den er kopla til, slik at heile driftsområdet til aggregatet kan regulerast. Fordelar og ulemper er lista opp i tabell 3.12.

Fordelar	Ulemper
<p>Ein frekvensomformar aukar verknadsgraden i ei pumpeturbin</p> <p>Ved å endre turtalet på aggregatet, kan vassføringa gjennom pumpa regulerast opp og ned</p> <p>Frekvensomformar mogleggjer mjuk oppstart av aggregatet, som minimerar slitasjen på komponentane. Dette er viktig ved mange start og stopp</p>	<p>Frekvensomformaren har tap i verknadsgrad</p> <p>Frekvensomformar er dyr i innkjøp</p>

Tabell 3.12: Fordelar og ulemper med fullfrekvensomformar (Dahlhaug, 2022)

Oppstartsfrekvensomformar

Driftsmønsteret i pumpekraftverket inneber mange korte periodar med pumping. Oppstart utan frekvensomformar, vil gi stor slitasje på aggregatet. Ein frekvensomformar med lågare installert effekt enn generatoren, her kalla oppstartsfrekvensomformar, vil redusere slitasjen under start og stopp av aggregatet. Den gir ikkje dei andre fordelane ein fullfrekvensomformar har.

Valgt løysing

Hydraulisk kortslutting har låg verknadsgrad, og ingen av fordelane frekvensomformar har utover regulerbar pumpevassføring. Ein oppstartsfrekvensomformar reduserar slitasjen i aggregatet, men gir ikkje regulerbar vassføring eller auka verknadsgrad. Fullfrekvensomformar, heretter kalla frekvensomformar, vart difor valgt som løysing i Tjørhom pumpekraftverk.

Verknadsgraden til frekvensomformaren er ukjend. Sidan frekvensomformar òg forbetrar verknadsgraden til ei pumpeturbin, er det antatt at dei to effektane kansellerar kvarandre ut. Verknadsgraden til frekvensomformaren er difor ikkje med i utrekningane.

3.6.5 Systemverknadsgrad

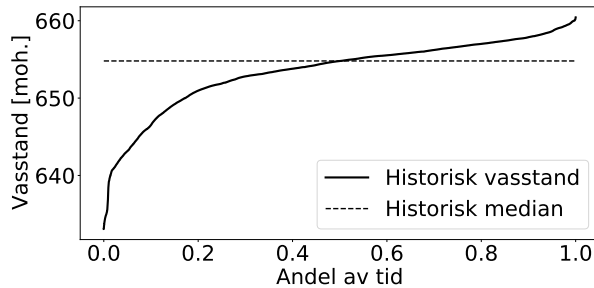
Likning 2.21 gir systemverknadsgraden til eit pumpekraftverk. Denne brukast i likning 2.19 til å finne pumpekriteriet til Tjørhom pumpekraftverk. Variablane som inngår er

- η_{turbin} og η_{pumpe} , samanfatta i kvar sin η_{ELMe}

- Falltap $h_{f,i}$, $i=[\text{produksjon, pumping}]$
- Magasinvasstandar H_{nedre} og $H_{\o vre}$

Øvre magasin, Gravatn

Vasstanden i øvre magasin, $H_{Gravatn}$, endrar seg over tid. For å få korrekt systemverknadsgrad, må endringa i vasstand takast med. Systemverknadsgraden vil då variere utifrå kva vasstanden er når ein pumpar og produserar. Figur 3.24 viser historisk vasstand i Gravatn som andel av tid. Vasstanden ligg mellom 650 og 660 moh 83 % av tida. Medianvasstanden er 654,8 moh.



Figur 3.24: Varigheit over historisk vasstand i Gravatn, perioden 2010-2019

$$\begin{aligned}
 H_{\text{Øvre magasin}} &= f(V) \\
 (1) \Delta V &= Q_{\text{pumpe}} - Q_{\text{turbin}} \\
 (2) \Delta V &= Q_{\text{pumpe}} - Q_{\text{turbin}} + Q_{\text{lokaltilsig}} \\
 (3) \Delta V &= Q_{\text{pumpe}} - Q_{\text{turbin}} + Q_{\text{lokaltilsig}} - Q_{\text{kraftverksdrift}}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

I eit pumpekraftverk der øvre magasin ikkje har lokaltilsig, vert gjennomsnittleg vasstand i dette magasinet den same i produksjon som i pumping. Dette er vist i likning 3.8.1. I eit reint pumpekraftverk med lokaltilsig til øvre magasin, aukar lokaltilsiget vasstanden i øvre magasin, i periodane mellom pumping og produksjon. Det gir noko høgare gjennomsnittleg magasinvasstand i produksjon enn i pumping. Likning 3.8.2 viser dette.

Gravatn har lokaltilsig, men lokaltilsiget køyrast gjennom kraftverket uavhengig av pumpekraftverksdrifta, som vist i likning 3.8.3. Utviklinga av magasinvasstanden er difor ikkje bestemt av pumpekraftverksdrifta. Skilnaden i magasinvasstand i Gravatn mellom pumpe- og produksjonstidspunkt, vil variere

frå tilfelle til tilfelle, og er vanskeleg å talfeste. I staden vart magasinvasstanden $H_{\emptysetvre} = H_{Gravatn}$ sett lik medianverdien av historisk magasinvasstand, 654,8 moh. For å hindre at Gravatn pumpast til overløp, pumpast kun vatn når vasstanden i Gravatn er under 658 moh.

Tilløpstunnel og kraftstasjon

Oppstraums kraftstasjonen i Tjørhom, er dei tre utbyggingsalternativa er like. Modellen køyrer alltid på maksimal tillatt turbinvassføring. Det gir ulik vassføring og falltap under produksjon- og pumping. Verdiane er vist i tabell 3.13. Skilnaden i falltapskoeffisient for pumping og produksjon, kjem av at pumpeaggregatet kun nyttar èi av trykksjaktene.

	Pumping	Produksjon
$k_{f,samlal}[\%o]$	0,268	0,208
$Q_{maks}[m^3/s]$	70	166
$h_f[m]$	1,3	5,8

Tabell 3.13: Falltap på strekninga Gravatn-Tjørhom kraftverk for Tjørhom pumpekraftverk

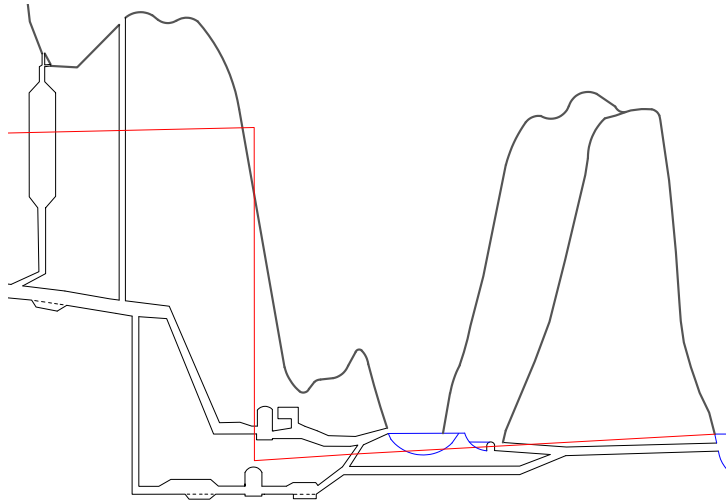
Sira-Kvina oppga antatte verdiar på verknadsgradene i Tjørhom pumpekraftverk. Desse er gjengitt i tabell 3.14, og er samleverdiar for alle elektromekaniske komponentar, inkludert transformatorar.

	Pumping	Turbinering
$\eta_{ElMek} [-]$	0,88	0,91

Tabell 3.14: Antatt verknadsgrad for elektromekanisk installasjon i Tjørhom pumpekraftverk

Nedstraums kraftstasjonen

Tabell 3.7 gir falltapskoeffisientane for dei ulike løysingane på avløpstunnel. I kraftverksdrift har dei to eksisterande aggregata lågaste undervatn lik 495 moh. For alternativ 2 og 3, er undervatnet til aggregat 3 gitt frå Ousdalsvatn. Sidan Tjørhom vil fylle opp Ousdalsvatn under produksjon, vil Ousdalsvatn, og med det undervatnet til aggregat 3, ligge høgt under produksjon. Som eit konservativt anslag, vart høgda på undervatnet under produksjon, $H_{Nedre,turbin}$, sett lik 497,6 moh. for alle tre aggregata.



Figur 3.25: Illustrasjon av trykklinja (i raudt) i tunnelsystemet til Tjørhom kraftverk i under pumping

Alternativ 1 kan berre pumpe frå Øysteinsevja, med LRV lik 495 moh. Om det ikkje er luker nedstraums kraftstasjonen, vil alternativ 2 og 3 pumpe frå Tjørhomsvatn og Ousdalsvatn samtidig. Tjørhomvatn fungerer berre som eit bekkeinntak for pumpinga. Falltapet på strekninga Ousdalsvatn-Øysteinsevja vert redusert om ein større andel av vatnet kjem frå Tjørhomvatn, men trykkehøgda på turbina kjem frå Ousdalsvatn. Dette er illustrert i figur 3.25, som viser trykklinja i pumpemodus.

I motsetning til under produksjon, der magasina vert fylt opp, tømmer pumpinga Ousdalsvatn. Fleire timar samanhengande pumping senkar magasinvolümet og -vasstanden. Vasstand i Ousdalsvatn under pumping vert difor låg.

Samla systemverknadsgrad

Dei kjente verdiane kan nå fyllast inn i likning 2.21:

$$\begin{aligned} \eta_{system} &= \eta_{turbin} * \eta_{pumpe} * \frac{H_{\text{\scriptsize{\mathit{Øvre,turbin}}} - H_{\text{\scriptsize{\mathit{Nedre,turbin}}} - h_{f,turbin}}}{H_{\text{\scriptsize{\mathit{Øvre,pumpe}}} - H_{\text{\scriptsize{\mathit{Nedre,pumpe}}} + h_{f,pumpe}}}} \\ &= 0.91 * 0.88 * \frac{654,8 - 497,6 - (5,8 + h_{f,a,turbin})}{654,8 - H_{\text{\scriptsize{\mathit{nedre,pumpe}}} + (1,3 + h_{f,a,pumpe})}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$h_{f,a}$ er falltapet i tunnelsystemet nedstraums kraftstasjonen. Under produksjon kan denne setjast konstant lik 1,4 meter, for alle alternativa. Dette er eit

konservativt anslag, som svarar til falltapet i avløpstunnelen til det eksisterande kraftverket, gitt $Q_{Turbin}=166 \text{ m}^3/\text{s}$. For dei minst gunstige verdiane, er systemverknadsgradane vist i tabell 3.15.

	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
$h_{f,a,pumpe} [\text{m}]$	0,2	1,4	1,4
$H_{nedre,pumpe} [\text{moh.}]$	495	487	482
$\eta_{system,min} [-]$	0,74	0,704	0,684

Tabell 3.15: Lågaste systemverknadsgrad for dei tre alternativa

Systemverknadsgraden brukast kun til å bestemme pumpetidspunkt. Om systemverknadsgraden er låg, modellerast færre timar med pumping. Sidan vasstanden i Ousdalsvatn stort sett vil vere høgare enn verdiane oppgitt i tabell 3.15, vil òg systemverknadsgraden stort sett vere høgare for alternativ 2 og 3. For å få fleire tidspunkt for pumping, vart systemverknadsgraden i modellen justert opp. Verdiane, med tilsvarande vasstand i Ousdalsvatn i pumpemodus, er vist i tabell 3.16.

	Alternativ 1	Alternativ 2 og 3
$\eta_{system} [-]$	0,74	0,71
Tilsvarande $H_{nedre,pumpe} [\text{moh.}]$	495	488,5
$\Delta Pr_{is} [\%]$	15,0	17,0

Tabell 3.16: Systemverknadsgrad til pumpekraftverket bruka for modellering

Gyldighet av systemverknadsgraden

Systemverknadsgraden vert lågare dess lågare Ousdalsvatn pumpast. Konstant systemverknadsgrad for pumping, tar ikkje med variasjonen i grensebetingelsar. Dei utrekna verdiane i tabell 3.15 og 3.16, er konservative. For å få fleire pumpetimar for alternativ 2 og 3, bør systemverknadsgraden i modelleringa, endre seg med vasstanden i Ousdalsvatn. Det vil gi fleire timar pumping ved høg vasstand i Ousdalsvatn, og færre timar dess lenger ned vasstanden her kjem.

3.7 Simulering i modellen

3.7.1 Flaum

Etter bygging av nytt pumpeaggregat i Tjørhom, vil Tjørhomvatn kun unntaksvis få flaumtap. For utbyggingsalternativ 2 og 3, vil flaumtapa i Homstølvatn òg reduserast til eit minimum. Flaumtapet i modellen er difor ei stor feilkjelde. For å hindre flaumtap i modellen, tvangskøyrast kraftverka om magasinerna overstig ein gitt vasstand:

- Tonstad tvangskøyrast når Tjørhomvatn, Ousdalsvatn og/eller Homstølvatn overstig 497,5 moh.
- Tjørhom tvangskøyrast når Gravvatn overstig 659,9 moh.

Likevel gir modellen store flaumtap i Tonstad, særleg i Tjørhomsvatn. Grunnen er at modellen ikkje planlegg drifta for å redusere flaumtap. Dei relevante forutsetningane er

1. Kraftverka køyrer når prisen er høg, og stoppar når prisen er låg
2. Tjørhom kraftverk køyrer til vasstanden i magasinerna hindrar vidare drift, altså fyllast magasinerna opp til nesten HRV
3. For å hindre flaumtap, tvangskøyrast kraftverka når magasinvasstanden vert for høg

Tilgjengeleg slukeevne i Tonstad er historisk sett avgrensa. I ein flaumsituasjon kan slukeevna vere for liten til å ta unna lokaltilsiget. Flaumtapet i Homstølvatn kjem av dette.

Når Tonstad står, fyllast Ousdalsvatn opp av lokaltilsiget. Difor ligg Ousdalsvatn ofte høgt i ein modellert flaumsituasjon. For å auke kapasiteten i overføringstunnelen til Ousdalsvatn, må vasstanden her senkast. Gitt full effekt i Tonstad, tar det rundt 3 timar å senke Ousdalsvatn frå 497 moh. til 496 moh. I timane før overføringskapasiteten er stor nok til å ta unna tilsiget, får Tjørhomvatn overløp. Sidan alternativ 3 aukar kapasiteten i overføringstunnelen, treng ikkje Ousdalsvatn senkast like mykje som alternativ 1 og 2 for å hindre flaum. Modellen gir difor mindre flaumtap i Tjørhomvatn for alternativ 3.

Produksjonssimuleringa til Statkraft hadde òg problem med store flaumtap i Tonstad, grunna overføringstunnelen mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn. For å unngå det, vart ikkje overføringstunnelen inkludert i simuleringa (Eggen, 2021).

Tvangspumping

Delar av flaumtapet i Tonstad kunne vore unngått ved å tvangspumpe lokaltilsiget opp i Gravatn. Modellen ser kun på pumping utifrå priskriterie, og har difor ikkje med tvangspumping. Om tvangspumping av flaumvatn vart implementert utan andre forutsetningar, ville modellen i ytste konsekvens pumpa Gravatn til overløp. Det ville ført til meir overløp i Tjørhomvatn, som vil føre til meir pumping, i ein tilbakevendande syklus.

3.7.2 Kraftverksdrift

Vassbalanse

Kraftverka i modellen produserar på tilsiget. Tilsig inkluderar her produksjonsvatn frå oppstraums kraftverk. For å bestemme produksjonen i Tjørhom og Tonstad, kunne modellen basert seg på å balansere tilsiget. Då måtte modellen bestemt kva utvikling den ville ha på magasin. Korkje Gravatn, Ousdalsvatn eller Homstølvatn brukast som sesongmagasin, og det er inga openberr måte å spå magasinutviklinga.

For å ikkje måtte manuelt kalibrere 10 år med magasinutvikling i modellen, vart modellen i staden basert på å balansere historisk produksjonsvatn. Den historiske produksjonen har alt balansert tilsiget, med ei magasinutvikling som var bestemt av produksjonsplanleggarane i Sira-Kvina. Ved å kalibrere kraftverksdrifta på dette, vert tilsiget i teorien balansert, og magasin vil ha ei utvikling som historisk.

Modellen prøver å produsere same produksjonsvatn som historisk, men balanse-erar magasin på historisk tilsig. Avvika mellom tilsig og produksjon som vart diskutert i kapittel 3.3, gir difor ubalanse i modellen, og har ikkje tilstrekkeleg nøyaktigheit.

Som vist under, baserar resten av modelleringa baserar seg på er historisk produksjonsvatn, direkte eller indirekte. Om produksjonsvatnet modellen kalibrerte for, hadde endra seg med modelleringa, måtte modellen iterert seg fram til grunnlaget for modelleringa. Modelleringa er alt iterativ, så MS Excel-modellen hadde ikkje klart å rekne ut dette på ein god måte. Produksjonsvatnet modellen balanse-erar, vart difor ikkje endra frå historisk produksjonsvatn. I praksis gjer det at volumet i pumpekraftverksdrifta i Tjørhom, ikkje vart sett i samanheng med den vanlege produksjonen i Tonstad og Tjørhom.

Produksjonstidspunkt

Modellen optimaliserer kraftproduksjonen innanfor ein periode $\Delta T_{\text{kraftverk}}$. For kvar periode haldast produksjonsvatnet lik det historiske. Tidspunkta kraftverket køyrast i modellen, bestemmast som følgjer:

1. Finn produksjonsvatnet i perioden, $\sum_{\Delta T} Q_{\text{historisk}}$
2. Finn gjennomsnittleg tilgjengelege turbinvassføring i perioden, \bar{Q}
3. Finn tilsvarende timar med produksjon: $n =$ timar med produksjon = $\frac{\sum_{\Delta T} Q_{\text{historisk}}}{\bar{Q}}$
4. Finn den nte lågaste prisen i perioden, som vert p_{min}
5. Når spotprisen er over eller lik p_{min} , produserer kraftverket. Når prisen er under, står kraftverket stille.

Tilgjengeleg turbinvassføring er direkte avhengig av historisk tilgjengeleg effekt. Grunna alle avgrensingane i systemet, er tilgjengeleg turbinvassføring òg avhengig av køyringa tidlegare tidssteg. Dette fører til at tilgjengeleg turbinvassføring varierar, potensielt frå time til time. Særleg gjeld dette Tjørhom kraftverk. For å finne kor mange timar kraftverket må køyre for å bruke like mykje vatn som historisk, baserer modellen seg på gjennomsnittlege verdiar av tilgjengeleg turbinvassføring for kvar periode. Produktet $\bar{Q} * n$ vert lik $\sum_{\Delta T} Q_{\text{historisk}}$, som gir vassbalanse i modellen.

Både Tonstad og Tjørhom kraftverk er modellert på denne måten. Sidan begge kraftverka er i prisområde NO2, og med det har same kraftpris, vil framgangsmåten til ein viss grad gi samkøyring.

3.7.3 Pumpekraftverksdrift

Først bestemmer modellen tidspunkta for vanleg kraftverksdrift. Deretter, gjer modellen følgjande, for kvar $\Delta T_{\text{pumping}}$:

1. Finn dei timane Tjørhom kraftverk står
2. Finn gjennomsnittsprisen for desse timane, $\overline{p_{\text{stillstand}}}$
3. Juster prisen til $p_0 = k * \overline{p_{\text{stillstand}}}$
4. Finn nødvendig avvik frå prisen, ΔPris
5. Finn dei timane der prisen er ΔPris under p_0 , som vert timane med pumping, n_{pumping}
6. Finn dei timane der prisen er ΔPris over p_0 , som vert tidspunkta for turbinering av pumpa vatn, n_{turbin}

ΔPris er oppgitt i tabell 3.16. Pumpekraftverksdrifta baserar seg på prisskilnad, ikkje historisk produksjonsvatn. Tjørhom pumpekraftverk har om lag 2,5 gongar så stor slukeevne i produksjon som under pumping. Difor treng Tjørhom kun 2 timar produksjon per 5 timar pumping.

3.7.4 Perioden ΔT

Kraftverksdrift

Når $\Delta T_{\text{kraftverk}}$ aukar, flyttast produksjonsvatnet i modellen over lengre periodar. Då vil ofte Homstølvatn og Ousdalsvatn fyllast opp til nesten-overløp når prisen er låg. Deretter vil magasina tømast heilt, når prisen stig over p_{min} . Ved å optimalisere med kortare $\Delta T_{\text{kraftverk}}$, akkumulerast mindre vassvolum kvar periode.

Tabell 3.1 viser den potensielle maksimale inntekta ved å flytte produksjonen. Denne aukar med auka $\Delta T_{\text{kraftverk}}$. For å få modellen til å køyre utan overløp i magasina, vart $\Delta T_{\text{Kraftverk}}$ sett lik *éi veke*. Det teoretiske maksimale inntektsauka er då 49 millionar kroner årleg.

Pumpekraftverk

Grenseverdien for kva som er lønsam pumping og produksjon, er ulik i ulike periodar. For at modellen skal kunne garantere at pumpinga er lønsam, er det difor viktig at vassbalansen går opp kvar periode.

Tidspunkta for både produksjon og pumping endrar seg ved endra $\Delta T_{\text{Pumping}}$. Til dømes, kan eit enkelt døgn ha høg nok prisvariasjon til pumpekraftverksdrift. Samtidig kan prisen heile dette døgnet vere låg eller høg nok til å forsvare pumping eller produksjon, om $\Delta T_{\text{Pumping}}$ setjast lik eitt år.

$\Delta T_{\text{Kraftverk}}$ er sett lik *éi veke*. Kraftverksdrifta brukar alle dei høge prisane kvar veke, som gir låg prisvariasjon i tidspunkta for stillstand. For å få tilstrekkeleg prisvariasjon, vart månad og år vurdert som optimaliseringsperiode for pumping. Variasjonen i pris auka ved auka periode. $\Delta T_{\text{Pumping}}$ lik ein månad ga berre ein tredjedel av dei teoretiske pumpetimane ein fekk ved å setje $\Delta T_{\text{Pumping}}$ lik eitt år.

Ved å setje $\Delta T_{\text{Pumping}}$ lik eitt år, vart vatnet pumpa sommarhalvåret, og produsert vinterhalvåret. Gravatn er historisk sett ganske fullt sommarstid. Sidan drifta i Duge pumpekraftverk ikkje endrast i modellen, førte sesongpumpinga til flaumtap i Gravatn, og tvangskøyring i Tjørhom kraftverk. For å hindre dette, vart $\Delta T_{\text{pumping}}$ sett lik *éin månad*. Ved produksjonsplanlegging kan Duge

pumpe vatnet vidare til Svartevatn, slik at sesongpumping ikkje gir flaumtap.

Iterativ løysing

Turbinvassføringa er avhengig av ytre forhold. Til dømes vil låg vasstand i Homstølvatn og Ousdalsvatn mogleggjere fleire timar på høg effekt i Tjørhom, men vil avgrense slukeevna i Tonstad. Pumpinga i Tjørhom endrar difor den vanlege drifta i begge kraftverka. For å få med desse avgrensingane, reknar modellen ut pumping og produksjon time for time. Den gjennomsnittlege tilgjengelege turbinvassføringa for kvar periode, $\overline{Q_{modell}}$, vert då endra samanlikna med kalibrerings situasjonen, og produktet $\overline{Q_{modell}} * n$ vert ulikt $\sum_{\Delta T} Q_{historisk}$.

Etter at modellen har køyrt, reknast difor \overline{Q} ut på nytt, basert på den modellerte turbinvassføringa kvar periode. Dette brukast til å rekne ut driftstidspunkta på nytt, før modellen køyrast igjen. Slik går modellen mot rett timetal n og turbinvassføring \overline{Q} , som gir vassbalanse i modellen.

3.7.5 Problem med vassbalanse

Pumping i Tjørhom endrar volumet i magasinane frå den historiske situasjonen. Samtidig baserar den vanlege kraftverksdrifta seg på å produsere like mykje vatn som historisk, og slik oppretthalde historisk magasinutvikling. Når eit vassvolum er pumpa i Tjørhom, senkast vasstanden i Ousdalsvatn og Homstølvatn. Sidan Tonstad ikkje held tilbake eit tilsvarande volum, men produserar utan å ta omsyn til dette, vert vasstanden i Ousdalsvatn og Homstølvatn heldt låg. Modellen gir difor lågare vasstand i dei to magasinane. Om vasstanden vert for låg i Homstølvatn, stoppar Tonstad, og historisk produksjons vert ikkje produsert.

Når vatnet som vart pumpa i Tjørhom, vert produsert, vil det først fylle opp Ousdalsvatn og Homstølvatn. Tonstad produserar ikkje meir enn historisk produksjonsvatn, og tar ikkje høgde for dette ekstra tilsiget. Om det då vert produsert meir vatn frå pumpekraftverksdrifta enn restvolumet i Ousdalsvatn og Homstølvatn, vil dette føre til tvangskøyting og flaumtap i Tonstad.

Framgangsmåten med vassbalanse i kraftverksdrift, og pumpekraftverksdrift frikobla frå vassbalansen i kraftverksdrifta, fører på den måten til redusert vasstand i Ousdalsvatn og Homstølvatn. I tillegg bidreg det til å auke flaumtapa i modellen.

3.8 Inntekter

Som gjennomgått under, endrar modelltilfelle C den historiske prisfordelinga. Ellers er alle inntektene er basert på historiske prisar for perioden 2010-2019.

3.8.1 Inntekter i modellen

Dei historiske produksjonsdata for Tonstad og Tjørhom er målt før transformatorane i stasjonane. For å ha samanliknbare tal på produksjon, er transformator tapet ikkje med i utrekna produksjon. Inntekta er rekna som modellert generatorproduksjon i MWh, gonga med spottprisen frå NordPool, og antatt verknadsgrad til transformatorane. Sistnemnte er sett konstant lik 99,6 %.

3.8.2 Tilleggsinntekter

Solhom kraftverk

Avløpstunnelen til Solhom kraftverk går ut på 489 moh, og all fallhøgde under 491 går tapt (Vereide, 2021). Etter ei utbygging kan vasstanden i Homstølvatn haldast høgare, og større delar av fallet vert nytta. For dei tidspunkta der historisk vasstand i Homstølvatn er under 491 moh, vert inntektsauka rekna som

$$\Delta_{inntekt} = \sum_{timar} \frac{491 - H_{Homstøl}}{H_{brutto,Solhom}} * P_{Solhom} * p \quad (3.10)$$

der $H_{brutto,Solhom} = H_{Kvifjorden} - 491$, Kvifjorden er oppstraums magasin til Solhom kraftverk, og P og p er historisk effekt og pris.

Tonstad kraftverk

Modellen gir låg vasstand i Homstølvatn og Ousdalsvatn. Inntektsauka frå høgare vasstand i magasin, vart difor vurdert separat. Dette vart gjort ved å setje ei minstevassstand i Homstølvatn, $H_{Homstøl,ny}$. Produksjonsauka vert

$$\Delta_{inntekt} = \sum_{timar} \frac{H_{Homstøl,ny} - H_{Homstøl,hist}}{H_{Homstøl,hist} - H_{Sirdalsvatn}} * P_{Tonstad} * p \quad (3.11)$$

for alle tidspunkt der historisk vasstand i Homstølvatn er mindre enn ny vasstand $H_{Homstøl,ny}$.

Gyldighet

Likning 3.10 og 3.11 baserar seg på forholdet $\frac{\Delta H}{H_{brutto}}$. Grunnen til at brutto

høgde vart bruka i staden for netto høgde, er at den historiske vassføringa er ukjend. Falltapet og netto høgde, er difor ukjend. Bruttohøgda er større enn nettohøgda, og forholdet $\frac{\Delta H}{H_{brutto}}$ er mindre enn $\frac{\Delta H}{H_{netto}}$. Likning 3.10 og 3.11 gir difor konservative anslag over inntektsauka.

Det same fallet kan ikkje produserast to gonger. Om $H_{Homstøl,ny}$ vert sett over 491 moh, må den redusert produksjon i Solhom reknast ut, for dei tidspunkta den historiske vasstanden var mellom 491 moh og $H_{Homstøl,ny}$.

3.8.3 Fleksibilitetstjenester

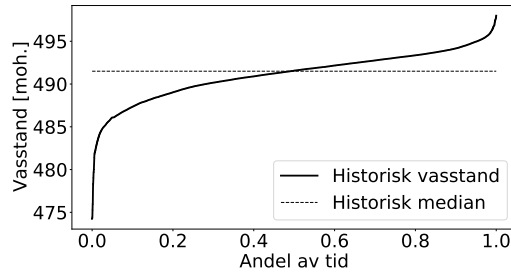
Når effekten dobblast i Tjørhom kraftverk, kan verdien av fleksibilitetstjenester for nettverksoperatøren bidra positivt til prosjektøkonomien. Her kan ulike utformingar med frekvensomformar gjere at kraftverket kan regulere straummarknaden i pumpemodus òg. Dette vert ikkje studert vidare. (Statnett, 2022b) (Vereide, 2021)

3.9 Sensitivitetsanalyse

Dei tre utbyggingsalternativa, i tillegg til dei eksisterande kraftverka, vart simulert. Eksisterande kraftverk er kalla alternativ 0, dei andre er nummerert som i resten av rapporten. Dei fire modellane vart køyrt for tre tilfelle, namngitt som følgjande:

- A Basistilfellet, med historisk pris og sjølvkalibrerande vasstand i magasina
- B Eit tilfelle der modellen tvingast til å ha høgare vasstand i Homstølvatn
- C Eit tilfelle der historisk pris er justert

Figur 3.26 viser historisk varigheit av vasstanden i Homstølvatn. For modelltilfelle B, stoppa Tonstad kraftverk når vasstanden i Homstølvatn gjekk under historisk medianvasstand; 491,5 moh.

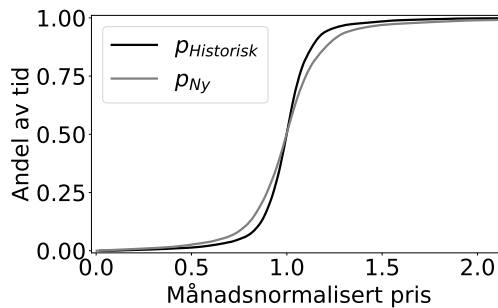


Figur 3.26: Varighet over historisk vasstand i Homstølvatn, perioden 2010-2019

Variasjonane i straumpris i framtida vil auke, både over året og for kortare periodar (Bruland mfl., 2021). For å ta med dette, vart straumprisen kvar måned fordelt ut som følgjer:

$$\begin{aligned} p_{mndnorm,ny} &= p_{mnd.norm}^{1,5} \\ p_{Ny} &= \overline{p_{mnd}} * p_{mnd.norm,ny} \end{aligned} \quad (3.12)$$

der $p_{mnd.norm}$ er månadsnormalisert pris, $\overline{p_{mnd}}$ er månedleg gjennomsnittspris, og p_{Ny} er ny pris. Figur 3.27 viser den nye fordelinga av månadsnormalisert pris. Denne prisfordelinga brukast i tilfelle C. Sjølv om prisen vil variere meir, er gjennomsnittsprisen den same som historisk, og modellen fjernar seg difor ikkje frå den historiske prissituasjonen.



Figur 3.27: Varighetskurve for månadsnormalisert pris, perioden 2010-2019

4 Resultat

I denne delen presenterast resultatata. Mange av resultatata har usikkerheit knytt til seg. For å få fram nyansane i skilnadane, er enkelte av resultatata oppgitt med større nøyaktigheit enn det gyldigheita til modellen tilseier.

4.1 Fysiske avgrensingar

4.1.1 Tjørhomvatn

Figur 4.1 viser øvre del av Tjørhomvatn før utbygging, med utløpet til dagens kraftverk markert i svart. Heile elveløpet ser ut til å vere fyllt opp av sediment. Dette viser at det må byggast eit nedstraums sandfang i Tjørhom pumpekraftverk.



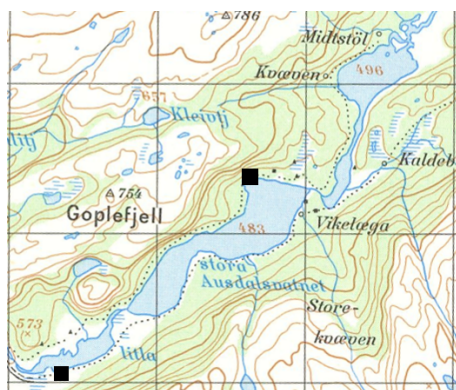
Figur 4.1: Flyfoto av Øysteinsevja i 1955 (Kartverket, 2022b)

4.1.2 Ousdalsvatn

Ousdalsvatn har HRV og LRV på 497,6 og 482 moh, i rekkefølge. Eit kartutsnitt frå det som seinare vart Ousdalsvatn, er vist i figur 4.2. Plassering for inn- og utløp er markert i svart, utløpet nedst til venstre.

Dagens overføringstunnel går ut i stora Ausdalsvatnet. Djubda på stora Ausdalsvatnet er usikker. Flyfoto frå 1955 tyder på at det kan vere forholdsvis

djupt, og kan fungere som nedre magasin for Tjørhom pumpekraftverk. Den nye avløpstunnelen vert om lag éin kilometer kortare om den kun går til stora Ausdalsvatn, samanlikna med å drive tunnel til nedre del av magasinet. Difor bør ny avløpstunnel for alternativ 3 drivast ut i stora Ausdalsvatnet, der den eksisterande avløpstunnelen òg går ut.



Figur 4.2: Kartutsnitt over Ausdalen frå 1967 (Kartverket, 2022a)

Figur 4.2 viser òg ein naturleg terskel i magasinet, i utløpet av stora Ausdalsvatn. Ingen i Sira-Kvina kunne hugse at denne terskelen har vorte kanalisert (Vereide, 2021). Terskelen endrar tilgjengeleg volum for pumping for alternativ 3: ny avløpstunnel til Ousdalsvatn. Når Ousdalsvatn er pumpa ned til kronehøgda på terskelen, vil ytterlegare pumping kun senke stora Ausdalsvatn, som har eit areal på rundt 0,4 km². Nedre del av Ousdalsvatn vert ikkje senka lenger ned enn terskelhøgda. Sidan tilløpstunnelen til Tonstad startar i nedre del av Ousdalsvatn, vert heller ikkje Homstølvatn senka lenger ned enn terskelhøgda. For å nytte heile magasinet ned til LRV, er kanalisering av Ousdalsvatn nødvendig.

Kartutsnittet i figur 4.2 har liten nøyaktigheit, og er ikkje nødvendigvis i høgdedatamet Sira-Kvina brukar. For å anslå historisk vasstand i stora Ausdalsvatnet, og med det kronehøgda på terskelen, vart magasininkurva til Ousdalsvatn studert. Den har ein knekk på 485 moh. Ein slik knekk kjem av utvida magasinoverflate ved denne høgda. Samanstilt med kartutsnittet, tyder dette på at tekselelen mellom litla og stora Ausdalsvatnet ligg på rundt 485 moh., i Sira-Kvina-datum.

4.2 Utbyggingskostnad

Utbyggingskostnadane for dei tre ulike alternativa er vist i tabell 4.1, fordelt på hovudkomponent. Skilnaden i kostnad kjem hovudsakleg frå ulik lengd på avløpstunnelen.

	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Tunnel	17	88	156
Svingekammer	11	12	12
Trykksjakt	15	16	17
Nedstraums sandfang	3	3	3
Kanalisering	50	50	50
Kraftstasjon bygg	76	77	78
Sum bygg	172	246	317
Maskin	128	123	118
Elektro	313	313	313
Sum ElMek	441	436	431
Uforutsett	122	136	149
Prosjektering	183	204	224
Totalkostnad	918	1022	1121

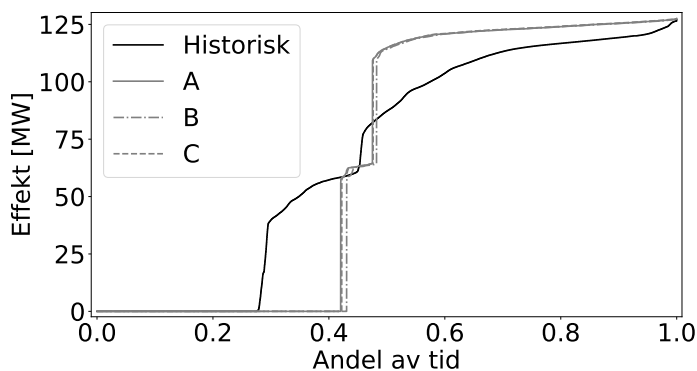
Tabell 4.1: Utbyggingskostnad for dei tre alternativa [millionar 2022-kroner]

Rundt rekna er kvart alternativ 100 millionar kroner dyrare enn det førre. Den største usikkerheita er knytt til kostnaden på kanalisering av Tjørhomvatn eller Ousdalsvatn, sett lik 50 millionar kroner i utrekninga. Kostnaden av ulike lukeløysinga er ikkje medrekna. Prisstiginga våren 2022 er ikkje tatt med.

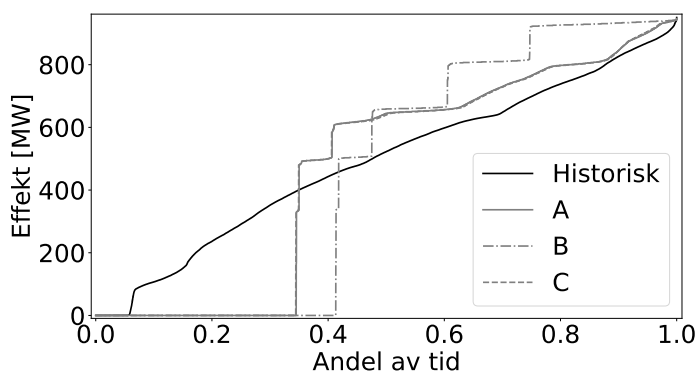
4.3 Modellresultat

4.3.1 Eksisterande kraftverk

Modellen endrar køyremønsteret i kraftverka. For å samanlikne alternativa på ein truverdig måte, må modellverdiar samanliknast med modellverdiar. Difor vart den historiske produksjonen modellert, for alle dei tre modelltilfella. Dei tre modelltilfella er definert i kapittel 3.9.

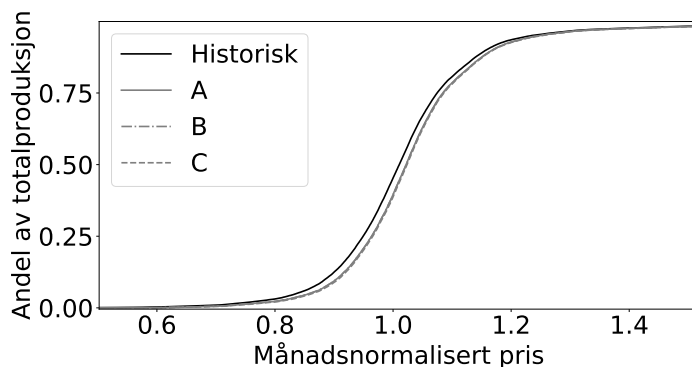


Figur 4.3: Varighetkurve for effekt i Tjørhom kraftverk, alternativ 0

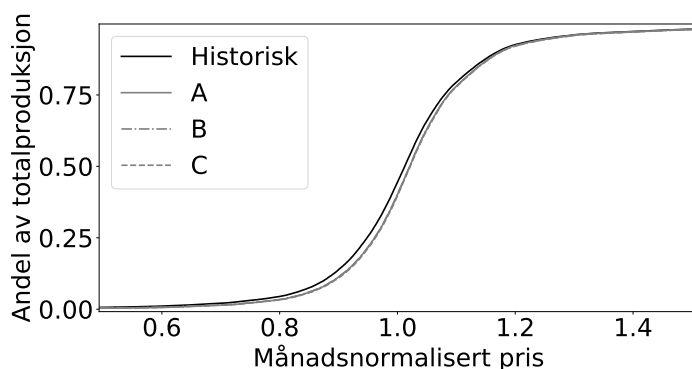


Figur 4.4: Varighetkurve effekt i Tonstad kraftverk, alternativ 0

Figur 4.3 og 4.4 viser varighetkurva for effekt før ei utbygging, for historisk produksjon og dei tre modellerte tilfella. Tilfelle A og C modellerar veldig likt, sidan alt anna enn prisen er det same. Effekten i Tonstad i tilfelle B, er kun avgrensa av tilgjengeleg effekt i aggregata. Modellert effekt i Tonstad er difor høgare enn for tilfelle A og C. Begge kraftverka køyrast i modellen på høgare effekt enn historisk.



Figur 4.5: Varigheitskurve for pris i Tjørhom kraftverk, alternativ 0



Figur 4.6: Varigheitskurve for pris i Tonstad kraftverk, alternativ 0

Figur 4.5 og 4.6 viser varigheitskurva for produsert pris i dei to kraftverka, før ei utbygging. Medianen av produksjonen, vert i modellen produsert på rundt 1,0-1,2 % høgare pris enn historisk, for begge kraftverka.

Gjennomsnittleg årsproduksjon og -inntekt i eksisterande Tjørhom kraftverk, er vist i tabell 4.2. Produksjonen er mindre enn historisk, hovudsakleg grunna auka falltap. Den auka produserte prisen, bidreg til at inntekta vert om lag den same i modellen som historisk. Tonstad vert gjennomgått i eit seinare delkapittel.

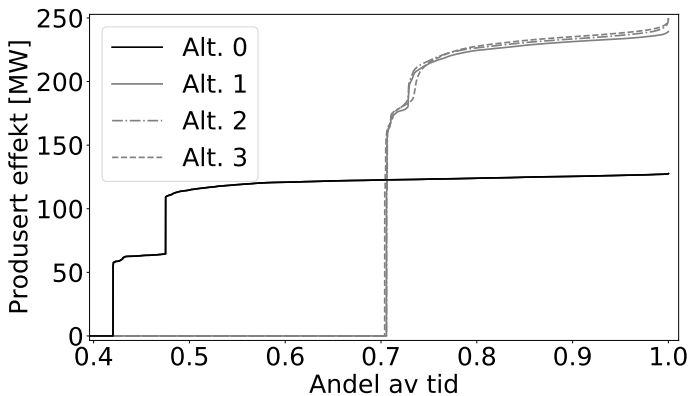
	Historisk	Tilfelle A	Tilfelle B	Tilfelle C
Produksjon [GWh]	600	593	584	593
Inntekt [MNOK]	192	192	188	196

Tabell 4.2: Gjennomsnittleg årsproduksjon og -inntekt i Tjørhom kraftverk før ei utbygging

4.3.2 Nye kraftverk, utan pumpekraftversdrift

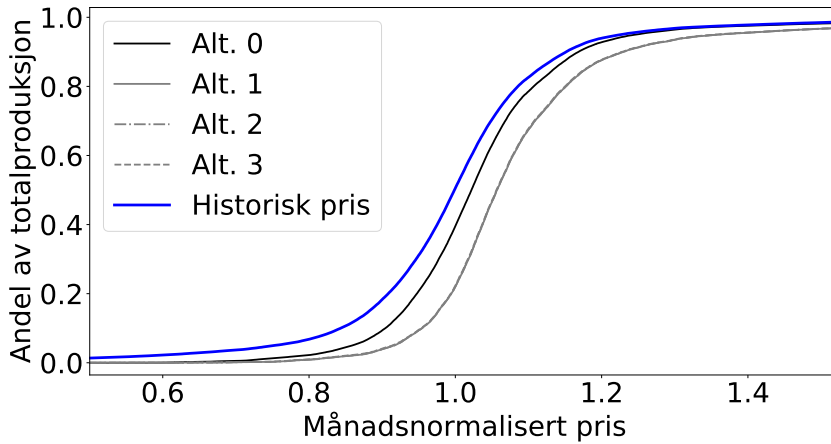
Vidare vert tilfelle A, basismodellen, studert. Varigheitskurvene for effekt er vist i figur 4.7 og 4.9, forstørtra for å vise skilnadane mellom dei alternative utbyggingane betre.

Tjørhom



Figur 4.7: Varigheitskurve for produsert effekt i Tjørhom, tilfelle A

Brukstida i Tjørhom vert kraftig redusert etter ei utbygging. Dei tre ulike alternativa har tilsynelatande liten skilnad i brukstid og effekt. Medianprisen for produksjon i Tjørhom aukar med rundt 35 %, som vist i figur 4.8. Skilnaden i varigheitskurva til produsert pris, er i regelen under 1 % for alternativ 1 til 3.



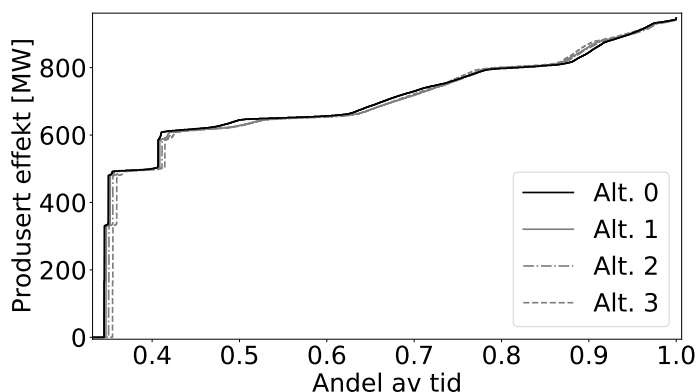
Figur 4.8: Varigheitskurve for produsert pris i Tjørhom, tilfelle A

Figur 4.8 viser varigheitskurva for pris for kraftverksdrifta i Tjørhom, for tilfelle A. Tabell 4.3 gir produksjon og inntekt for dei same tilfella. Det auka falltapet reduserar produksjonen i Tjørhom. Auka i produsert pris, gjer at inntekta likevel aukar.

	Historisk	Alternativ 0	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Produksjon [GWh]	600	593	575	581	583
Inntekt [MNOK]	192	192	196	197	198

Tabell 4.3: Gjennomsnittleg årsproduksjon og -inntekt i eksisterande Tjørhom kraftverk for dei ulike modellane

Tonstad



Figur 4.9: Varigheitskurve for produsert effekt i Tonstad, tilfelle A

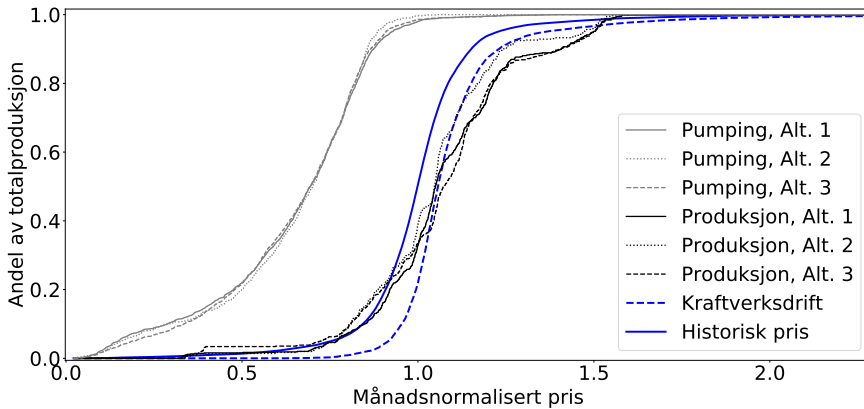
Som vist i figur 4.9, er det liten endring i produsert effekt i Tonstad for dei ulike alternativa. Følgjeleg endrar varigheitskurva for produsert pris seg lite frå kurve A i figur 4.4. Medianverdien av produsert pris for alternativ 1-3, aukar 0,8 % samanlikna med alternativ 0. Produksjon og inntekt for tilfelle A er oppgitt i tabell 4.4

	Historisk	Alternativ 0	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Produksjon [GWh]	4297	4114	4092	4069	4061
Inntekt [MNOK]	1310	1235	1227	1222	1222

Tabell 4.4: Gjennomsnittleg årsproduksjon og -inntekt i eksisterande Tonstad kraftverk for dei ulike modellane

4.3.3 Pumpekraftverksdrift

Figur 4.10 viser varigheitskurva over pris for pumping og produksjon av pumpevatn i Tjørhom pumpekraftverk. Blå stipla linje er varigheitskurva til den vanlege kraftverksdrifta, som òg er gitt i figur 4.8.



Figur 4.10: Varigheitskurve over pris for pumping og produksjon i Tjørhom pumpekraftverk, tilfelle A

Pumpekraftverksdrifta har tre avgrensingar:

1. $H_{Gravatn} < 658$ moh.
2. $H_{Ousdalsvatn} > 487$ moh. (alternativ 2) eller 482 moh. (alternativ 3)
3. $\frac{P_{pumpe}}{P_{turbin}} < \eta_{system}$

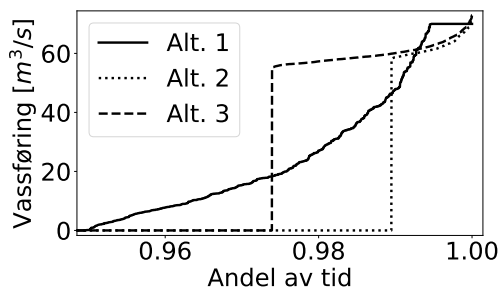
Drift av Solhom og Duge kraftverk endrast ikkje i modellen. Vatnet som vert pumpa opp i Gravatn, akkumulert der, i staden for å pumpast opp i Svartevatn.

Modellnr.	Teoretiske pumpetimar	Modellerte pumpetimar	Akkumulert pumping [mill m ³]	$\overline{Q_{Pumpe}}$ [m ³ /s]
A, Alternativ 1	4838	4412	432	27
A, Alternativ 2	4042	922	206	62
A, Alternativ 3	4029	2287	494	60

Tabell 4.5: Modellert pumpekraftverksdrift for tilfelle A. Akkumulerte verdier for 2010-2019.

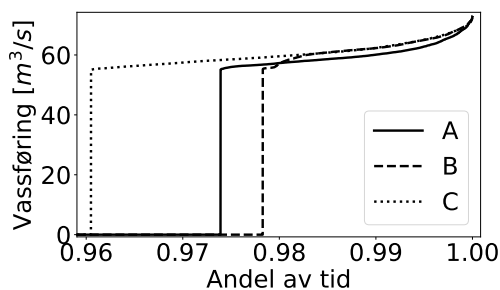
Perioden 2010-2019 består av i alt 87 648 timar. Tabell 4.5 viser teoretiske og modellerte pumpetimar i perioden for dei tre alternativa, for tilfelle A. Teoretiske pumpetimar er timane der priskriteriet tilseier at pumping i Tjørhom er lønsamt. Priskriteriet er bestemt av systemverknadsgraden. Alternativ 1 har

høgast systemverknadsgrad, og får flest teoretiske pumpetimar. Sidan alternativ 1 ikkje er avgrensa av magasinvasstanden i Ousdalsvatn, vert det modellert betydeleg fleire timar med pumping for dette alternativet.



Figur 4.11: Varigheitskurve for pumpevassføring i Tjørhom pumpekraftverk for tilfelle A. Forstørra for tydelegheit.

Figur 4.11 viser varigheitskurva for pumping for tilfelle A. Alternativ 2 og 3 følger same trend, men pumpinga i alternativ 2 avgrensast av å ikkje kunne pumpe lågare enn 487 moh. i Ousdalsvatn. Gjennomsnittleg turbinvassføring i pumpemodus er oppgitt i tabell 4.5. Figur 4.12 viser tilsvarende varigheitskurve for utbyggingsalternativ 3, for dei ulike tilfella A-C. Tilfelle C, som har større variasjon i pris, modellerar flest pumpetimar.



Figur 4.12: Varigheitskurve for pumping, for utbyggingsalternativ 3

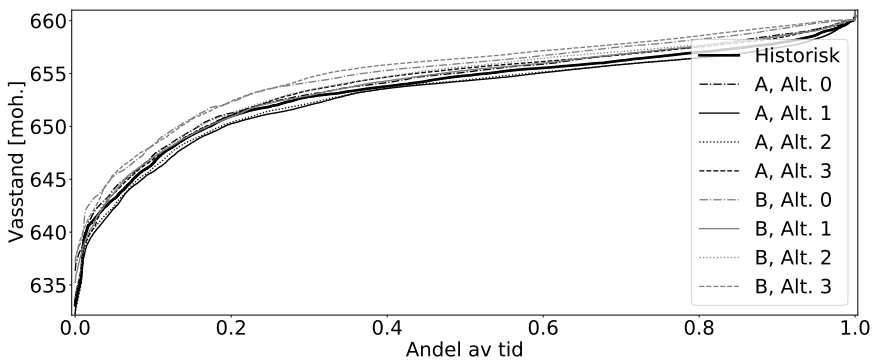
	A, Alternativ 2	A, Alternativ 3
Teoretiske timar	4042	4029
Modellerte timar	922	2287
$H_{Gravatn} > 658$ moh.	309	976
$H_{Ousdalsvatn} < H_{min}$	2908	784

Tabell 4.6: Pumpetimar med avgrensingar, for perioden 2010-2019

Tabell 4.6 viser kor mange timar dei ulike avgrensingane hindrar pumping i Tjørhom, for tilfelle A, alternativ 2 og 3. Avgrensingane for Gravatn og Ousdalsvatn samantsett rundt 120 timar for alternativ 2, og rundt 20 timar for alternativ 3. Avgrensinga på vasstand i Gravatn, kan for mange av tilfella fjernast ved å endre drifta i Duge pumpekraftverk. Om vasstanden i Homstølvatn og Ousdalsvatn haldast høgare, vil Tjørhom kunne pumpe i fleire av timane der drifta er avgrensa av nedstraums vasstand. Mange av timane der pumpinga vert avgrensa, vil Tjørhom kunne pumpe ved produksjonsplanlegging.

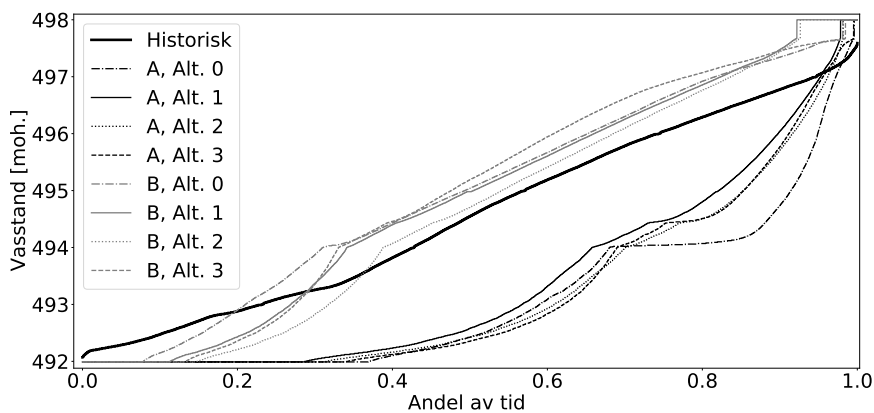
4.4 Magasinutvikling

Figur 4.13 til 4.16 viser varigheitskurva til vasstanden i dei fire magasinane i modellen. Historisk vasstand er plotta, i lag med modellerte vasstander for tilfelle A og B, for alternativ 0 til 3. Tilfelle C har tilnærma lik magasinutvikling som tilfelle A, og er ikkje vist.

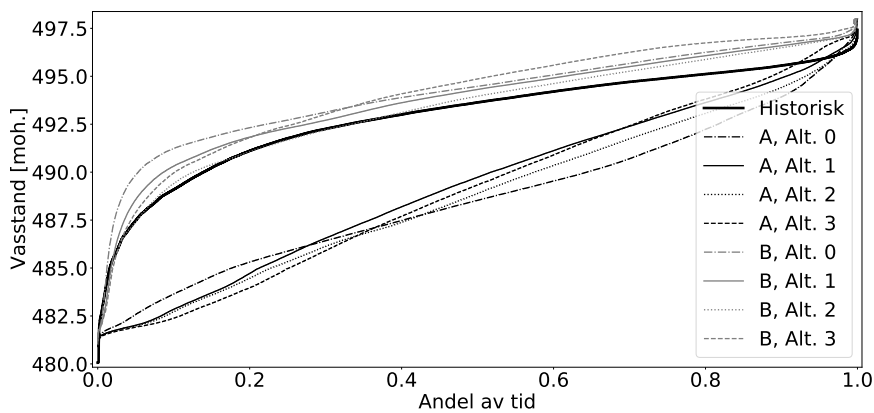


Figur 4.13: Varigheitskurve over modellert magasinvasstand i Gravatn

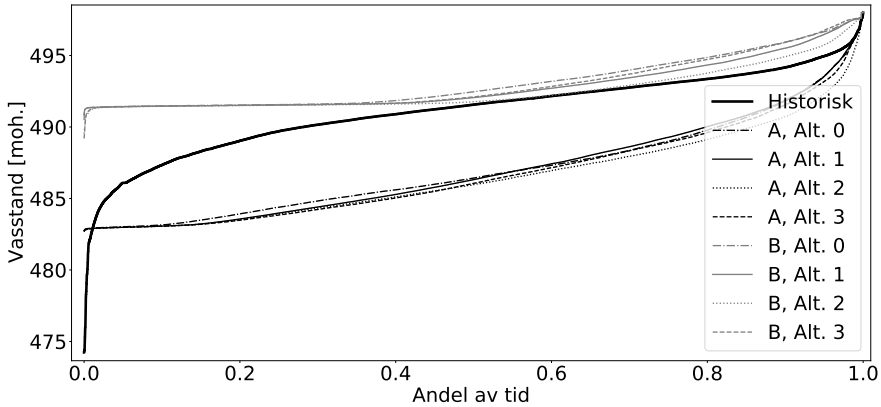
Gravatn er eit stort magasin. Sidan Duge kraftverk køyrast som historisk, og produksjonen flyttast maksimalt ei veke, er modellert vasstand i Gravatn ganske lik historisk vasstand. Resten av magasinane har lågare vasstand for tilfelle A og C, og litt høgare vasstand for tilfelle B.



Figur 4.14: Varigheitskurve over modellert magasinvasstand i Tjørhomvatn



Figur 4.15: Varigheitskurve over modellert magasinvasstand i Ousdalsvatn



Figur 4.16: Varigheitskurve over modellert magasinvasstand i Homstølvatn

Forenkla, utgjør éin meter vasstandsending i Ousdalsvatn eller Homstølvatn ei endring i produksjonen i Tonstad på $\frac{1}{490-50} \approx 0,23$ %. Medianverdien til vasstanden i Homstølvatn er rundt 486,2 moh. for tilfelle A, medan historisk medianverdi er 491,56 moh. Skilnaden svarar til ein reduksjon i produksjonen i Tonstad på 1,2 %. For tilfelle A og C, der Homstølvatn og Ousdalsvatn ikkje vart tvunge til å halde høg vasstand, vart vasstanden låg.

4.4.1 Flaum

Ei av dei antatte gevinstane av å bygge Tjørhom pumpekraftverk, er at både flaumtapet og tvangskøytinga i Tonstad reduserast. Konesjonsrevisjonen for Sira-Kvina (Sira-Kvina, 2015) oppga historisk flaumtap i Tjørhom og Tonstad, til og med 2014. Totalvoluma er gitt i tabell 4.7.

	Tjørhom	Tonstad
Flaumtap [mill. m ³]	14	48
Andel av tilsig [%]	0,2	0,2

Tabell 4.7: Totalt historisk flaumtap i Tjørhom og Tonstad i perioden 2010-2014

Grunna manglande langtidsplanlegging, ga modellen store flaumtap. Tabell 4.8

viser flaumtapa for dei ulike modellane, i lag med verdien av det tapte vatnet. Når det er flaumtap i Gravvatn/Tjørhom kraftverk, vil i regelen det same vatnet gå tapt i flaum i Tjørhomvatn/Tonstad kraftverk. Flaumtapet til Tonstad er fordelt mellom Tjørhomvatn og Homstølvatn.

Modellnr.	Tjørhom		Tonstad		
	Flaumtap [mill. m ³]	Kostnad [MNOK]	Flaumtap [mill. m ³]	Andel frå Tjørhomvatn [-]	Kostnad [MNOK]
A, Alt. 0	117	14,5	136	0,82	40
A, Alt. 1	34	3,8	373	0,93	126
A, Alt. 2	53	5,8	338	0,92	114
A, Alt. 3	125	16,5	147	0,81	44
B, Alt. 0	271	35	412	0,87	130
B, Alt. 1	101	11,1	1212	0,96	388
B, Alt. 2	129	16,1	1147	0,96	366
B, Alt. 3	440	57,8	398	0,84	122
C, Alt. 0	138	18	146	0,82	44
C, Alt. 1	41	4,8	402	0,93	137
C, Alt. 2	50	5,9	353	0,93	123
C, Alt. 3	135	18,6	162	0,83	50

Tabell 4.8: Modellert flaumtap i modellen, sum for perioden 2010-2019

Samtlege modellar ga store flaumtap, og at det meste av flaumtapet til Tonstad skjedde i Tjørhomvatn. Modellane som vart køyrt på høgare vasstand i Homstølvatn, ga høgare flaumtap. Produksjonssimuleringa til Statkraft ga òg store vasstap i Tjørhomvatn (Eggen, 2021).

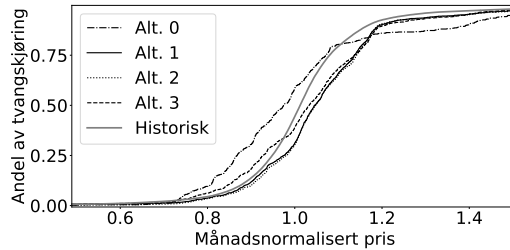
I tiårsperioden var historisk produksjonsvatn i Tjørhom og Tonstad kraftverk, 15 120 og 39 230 millionar m³, i rekkefølge. Historisk flaumtap er ikkje inkludert i desse verdiane. Flaumtapet i modellen utgjer mellom 0,2 og 3,1 % av totalt produksjonsvatn i dei to kraftverka. Medianverdien av modellert flaumtap i perioden 2010-2019, er rundt 120 millionar m³ i Tjørhom, og rundt 400 millionar m³ i Tonstad. Det svarar til 0,8 og 1 % produksjonstap i Tjørhom og Tonstad kraftverk, i rekkefølge.

Tvangskøyting

For å hindre flaumtap, vart kraftverka tvangskøyrt i modellen. I løpet av tiårsperioden vart Tjørhom kraftverk tvangskøyrt under 100 timar. Verkna den dette har på inntekta, er neglisjerbar.

For tilfelle A, vart Tonstad tvangskøyrt mellom 700 og 2200 timar i løpet av

tiårsperioden. Figur 4.17 gir varigheitskurva for pris dei timane Tonstad vart tvangskøyrd, og for historisk produksjon. For det minst optimale tilfellet, er den produserte prisen for tvangskøytinga i snitt 2,4 % lågare enn prisen for den modellerte produksjonen. Skilnaden i produsert pris er liten for alle modellane. Sidan tvangskøytinga utgjer ein prosentmessig liten del av produksjonstimane, har det neglisjerbar innverknad på totalinntekta i modellen.



Figur 4.17: Varigheit av pris for tvangskøyting i Tonstad, tilfelle A

Høgare vasstand i Homstølvatn

Pumpekapasiteten i Tjørhom gjer at flaumar kan pumpast opp i Gravatn. Det er difor antatt at Homstølvatn haldast høgare etter ei utbygging. Kor mykje høgare, er ikkje talfesta. Kapasiteten i pumpemodus i Tjørhom pumpekraftverk, er $70 \text{ m}^3/\text{s}$. For å overføre $60 \text{ m}^3/\text{s}$ frå Homstølvatn til Ousdalsvatn, trengs ein trykkskilnad på rundt 8,5 meter mellom magasina.

Om Ousdalsvatn ligg på 496 moh., vil det kreve 22 timar med pumping for senke magasinet ned til 490 moh. Er lokaltilsiget til Homstølvatn stort, må Tjørhom potensielt pumpe i lengre tid på førehand, for å hindre ein flaum. Magasina til Tonstad kraftverk har difor framleis avgrensingar etter ei utbygging. Større pumpekapasitet i Tjørhom vil auke fleksibiliteten, og minke desse avgrensingane. Dette talar for stor installert effekt i det nye aggregatet.

4.5 Produksjon og inntekt

4.5.1 Teoretisk maksimal inntekt

Tabell 3.1 er gjengitt under som tabell 4.9. Tabellen viser den teoretisk maksimale årsinntekta utbygginga av Tjørrom kraftverk kan gi, for historisk produksjon og kraftpris. Produksjonen vart optimalisert gitt uavgrensa køyting

Tonstad og Tjørhom kraftverk. Optimaliseringa forutsetter både høgare gjennomsnittleg effekt enn historisk, og ein god del pumping. Det vil redusere produksjonen, noko dei utrekna verdiane ikkje tar høgde for.

	Inntekt Tjørhom	Inntekt Tonstad	Auka årsinntekt
Historisk	192	1316	
Vekesoptimalisert	203	1355	49
Månadsoptimalisert	209	1386	88
Årsoptimalisert	224	1477	193

Tabell 4.9: Gjennomsnittleg årsinntekt for kraftverka [MNOK]

4.5.2 Produksjon og inntekter frå modellen

Tilfelle C endra den historiske kraftprisen. Tabell 4.9 er basert på historiske prisar, og er difor ikkje samanliknbar med tilfelle C.

Pumpekraftverksdrift i Tjørhom

Pumpevolum og inntekt av pumping i Tjørhom, varierar mykje mellom åra. Pumpekraftverksdrifta vart rekna ut slik at all pumpinga i modellen ga netto inntektsauke i Tjørhom kraftverk. Dette ga få teoretiske pumpetimar. For å få fram inntekta frå pumpekraftverksdrifta, er den vist separat frå den vanlege kraftverksdrifta. Samla pumpevolum for heile tiårperioden er oppgitt i tabell 4.10, saman med total inntekt frå pumpekraftverksdrifta.

Tilfelle	Pumpa vatn [mill. m ³]			Inntekt [MNOK]		
	A	B	C	A	B	C
Alternativ 1	432	451	621	2,2	4,0	9,3
Alternativ 2	206	576	332	4,3	4,8	6,8
Alternativ 3	494	428	753	5,0	5,2	9,0

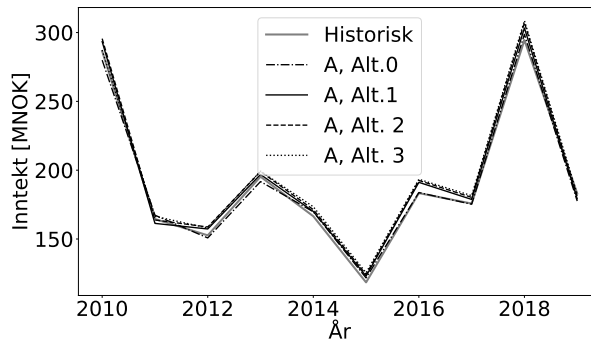
Tabell 4.10: Pumpevolum og -inntekt i Tjørhom pumpekraftverk, sum for perioden 2010-2019

Pumpinga i Tjørhom har både fysiske avgrensingar, og modellavgrensingar. Det siste bidrog til å redusere timane med pumping for alternativ 2 og 3, sa-

manlikna med teoretiske timar. Ein modell med korttidslagring i Tjørhomvatn, ville gitt større pumpevolum for alternativ 1 enn det som vart modellert. Alle dei tre alternativa pumpa difor mindre vatn enn dei ville gjort ved produksjonsplanlegging.

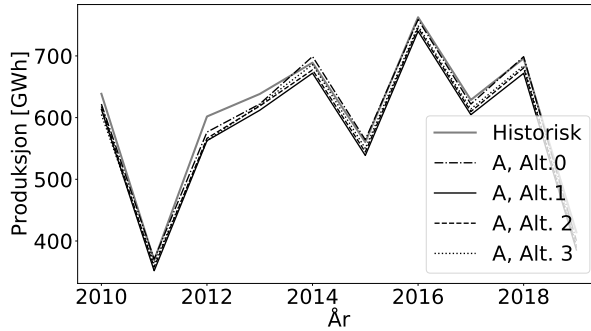
Etter ei utbygging vil pumpeaggregatet køyrast på prisar som er ulønsame i Tjørhom, fordi den auke inntekta i Tonstad er større enn inntektstapet i Tjørhom. Det vil auke driftstimane og totalinntekta. Den modellerte pumpevolumet, og inntektsauka det gir, er difor for lågt.

Kraftverksdrift i Tjørhom



Figur 4.18: Modellert årssinntekt i Tjørhom kraftverk, pumpekraftverksdrift ikkje inkludert

Inntekta og redusert totalproduksjon frå pumpekraftverksdrifta, er ikkje med i kraftverksdrifta. Figur 4.18 viser historisk inntekt i Tjørhom, saman med modellert inntekt av kraftverksdrifta for tilfelle A. Inntekta varierar mykje mellom åra, og det er tilsynelatande liten skilnad mellom dei ulike modellane og historisk. Figur 4.19 viser kraftproduksjonen for dei same modellane. Kraftproduksjonen er jamnt over lågare i modellen enn historisk. Dette kjem av falltapet, som er vist i tabell 4.11.



Figur 4.19: Modellert årsproduksjon i Tjørhom kraftverk

	Alternativ 0	Alternativ 1, 2 og 3
Falltap [m]	1,8	5,4

Tabell 4.11: Gjennomsnittleg falltap i oppstraums vassveg under kraftverksdrift, Tjørhom kraftverk

Modellen har ei gjennomsnittleg bruttohøgde på rundt 158 meter i Tjørhom kraftverk. Det auka falltaper svarar då til ein verknadsgradsreduksjon, og med det ein produksjonsreduksjon, på $\frac{5,4-1,8}{158} \approx 2,3\%$.

Tabell 4.13 viser modellert gjennomsnittleg årsproduksjon i Tjørhom kraftverk. Det auka falltaper reduserar produksjonen. I tilfelle A og C, har alternativ 2 og 3 noko større årsproduksjon enn alternativ 1. Det kjem av at alternativ 2 og 3 nyttar større delar av fallet til Ousdalsvatn. I tilfelle B haldast vasstanden i Ousdalsvatn høg, og produksjonen aukar difor ikkje.

	Tilfelle A	Tilfelle B	Tilfelle C	Gjennomstnittelleg inntektsauke [%]
Alternativ 0	192	188	196	
Alternativ 1	196	195	206	3,6
Alternativ 2	197	196	208	4,3
Alternativ 3	198	190	208	3,4

Tabell 4.12: Gjennomsnittleg årsinntekt i Tjørhom kraftverk, pumpekraftverksdrift ikkje inkludert [MNOK]

4.5 Produksjon og inntekt

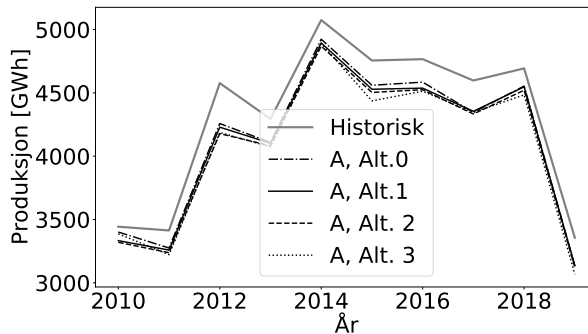
	Tilfelle A	Tilfelle B	Tilfelle C	Gjennomsnittleg produksjonssauke [%]
Alternativ 0	593	584	593	
Alternativ 1	575	573	577	-2,5
Alternativ 2	581	575	582	-1,8
Alternativ 3	583	565	582	-2,3

Tabell 4.13: Gjennomsnittleg årsproduksjon i Tjørhom kraftverk, pumpekraftverksdrift ikkje inkludert [GWh]

Historisk gjennomsnittsinntekt er 192 MNOK/år, og historisk gjennomsnittsproduksjon er 600 GWh. I modellen er gjennomsnittsinntekta 192 MNOK/år, og gjennomsnittsproduksjonen 590 GWh/år, for alternativ 0. Alle alternativene gir mindre produksjon enn historisk, men kun tilfelle B, alternativ 0 og 3, gir lågare gjennomsnittsinntekt. Samanlikna med modellert historisk drift, er inntekta i snitt 3,6 % høgare for utbyggingsalternativ 1-3. Dette sjølv om produksjonen i snitt er 2,2 % lågare.

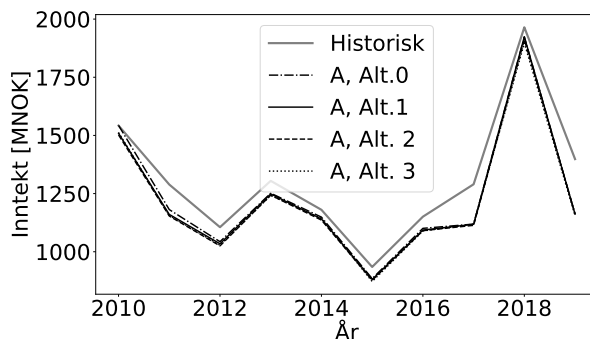
Den teoretiske maksimale inntektsauka er rundt 11 millionar kroner per år, gitt historisk pris og historisk produksjon i GWh. For tilfelle A og B, er inntektsauka mellom 2 og 8 millionar kroner. Desse verdiane inkluderar både avgrensingane i drifta, og produksjonsreduksjonen frå falltapet. Modellresultata ser difor ut til å samsvare godt med teoretisk optimalisering av Tjørhom kraftverk.

Tonstad kraftverk



Figur 4.20: Modellert årsproduksjon i Tonstad kraftverk

Tilsigsdataa til Tonstad kraftverk, er meir usikre enn til Tjørhom kraftverk. Modelleringa er òg meir usikker. Figur 4.20 og 4.21 viser produksjonen og inntekta i Tonstad for tilfelle A, i tillegg til historiske verdier.



Figur 4.21: Modellert årsinntekt i Tonstad kraftverk

	Tilfelle A	Tilfelle B	Tilfelle C	Gjennomsnittleg inntektsauke [%]
Alternativ 0	1235	1222	1262	
Alternativ 1	1227	1199	1255	-1
Alternativ 2	1222	1183	1247	-1,8
Alternativ 3	1222	1208	1245	-1,2

Tabell 4.14: Gjennomsnittleg årsinntekt i Tonstad kraftverk [MNOK]

	Tilfelle A	Tilfelle B	Tilfelle C	Gjennomsnittleg produksjonssauke [%]
Alternativ 0	4114	4090	4113	
Alternativ 1	4092	4009	4088	-1
Alternativ 2	4069	3945	4053	-2
Alternativ 3	4061	4039	4042	-1,4

Tabell 4.15: Gjennomsnittleg årsproduksjon i Tonstad kraftverk [GWh]

Tabell 4.14 og 4.15 viser gjennomsnittleg årsinntekt og årsproduksjon i Tonstad, for den modellerte perioden. Produksjons- og inntektstapet frå flaum, er

ikkje inkludert. Alternativ 0 og 3 produserar og tener difor meir enn alternativ 1 og 2, og tilfelle B produserar og tener mindre enn tilfelle A og C.

Alle tilfella ga høgast inntekt for alternativ 0, modelleringa av dagens kraftverk. Historisk inntekt er 1310 MNOK/år, 5,7 % høgare enn den modellerte inntekta for alternativ 0. Historisk gjennomsnittsproduksjon er 4297 GWh, 4,6 % høgare enn modellert produksjon for alternativ 0.

Tabell 4.16 viser gjennomsnittleg falltap i Tonstad kraftverk under produksjon. Falltapet er rekna ut for historisk køyring, og for tilfelle A, alternativ 0-4. Auka falltap i modellane, kjem av at modellen held jamnt over høgare effekt i Tonstad. Falltapet svarar til ein reduksjon i produksjon på rundt 1,7 %.

	Utrekna historisk køyring	Tilfelle A
Falltap [m]	10,2	17,8

Tabell 4.16: Gjennomsnittleg falltap frå Homstølvatn til Tonstad. Historisk køyring og modellkøyring, gitt $M=32$

Modellen balanserar historisk produksjonsvatn. Ved ein feil, vart vassvolumet til kalibreringa, lågare enn det teoretiske vassvolumet modellen treng for å produsere historisk energimengd. Dette bidreg til avviket mellom historisk og modellert produksjon i Tonstad kraftverk.

Både auka falltap, redusert vasstand i magasinane, og auka flaumtap, reduserar den modellerte produksjonen. Alle tilfella fekk totalproduksjonen redusert rundt 1,7 % grunna auka falltap. Lågare vasstand i Homstølvatn ga lågare produksjon i tilfelle A og C. Flaumtapet i Tonstad svarar til eit produksjonstap på mellom 1,0 og 3,1 % for dei ulike modellane. Verdiane av produksjonsreduksjonane for dei tre tilfella er gitt i tabell 4.17.

	Tilfelle A og C	Tilfelle B
Auka falltap	1,7	1,7
Redusert $H_{Homstølvatn}$	1,2	0
Auka flaumtap	0,2-1,0	1,0-3,1
Sum	3,1-3,9	2,7-4,8

Tabell 4.17: Redusert produksjon i Tonstad i modelleringa av eksisterande kraftverk [%]

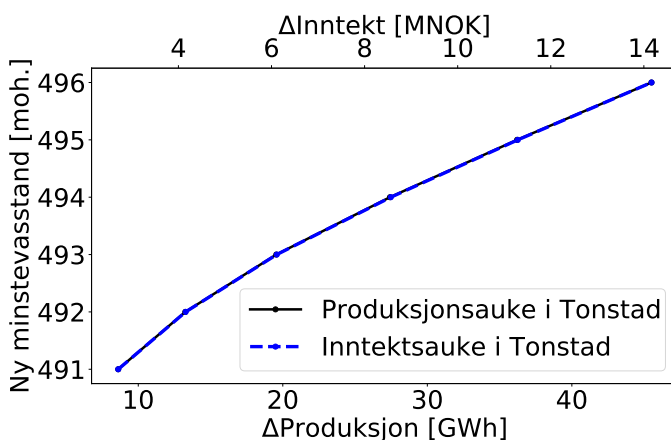
Om Tjørhom pumpekraftverk vert bygd, er det venta at vasstanden i Homstølvatn

jamnt over vil vere høgare enn historisk. Samtidig vil flaumtapet i Tonstad reduserast. Auka falltap er difor den einaste av verdiane i tabell 4.17 som vil kunne redusere produksjonen etter ei utviding av Tjørhom.

4.5.3 Inntekter modellen ikkje tar med

I løpet av tiårsperioden 2010-2019, har i gjennomsnitt 2,1 GWh årleg gått tapt i Solhom kraftverk, grunna lågare vasstand i Homstølvatn enn 491 moh. Dette svarar til eit årleg inntaktstap på 0,68 millionar kroner. Ved å halde Homstølvatn over 491 moh., går ikkje denne energien tapt.

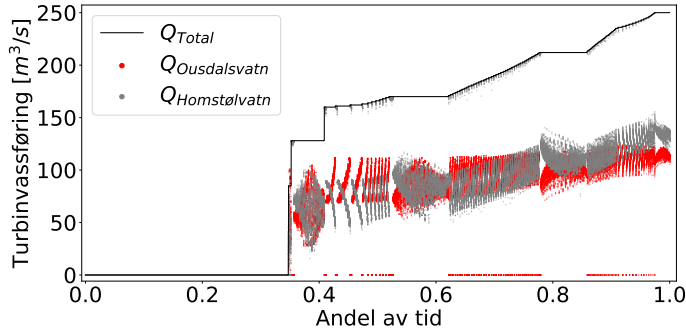
Figur 4.22 viser gjennomsnittleg årleg produksjons- og inntektsauke i Tonstad, om ein held Homstølvatn på ulike vasstander. For vasstand lik 491 moh., er gjennomsnittleg auka produksjon og inntekt 8,6 GWh og 2,7 millionar kroner, i rekkefølge. Om vasstanden setjast høgare enn 491 moh., reduserast fallet i Solhom kraftverk. Produksjon og inntektstapet dette medfører, er ikkje talfes- ta.



Figur 4.22: Gjennomsnittleg inntektsauke i Tonstad gitt historisk drift, og auka vasstand i Homstølvatn

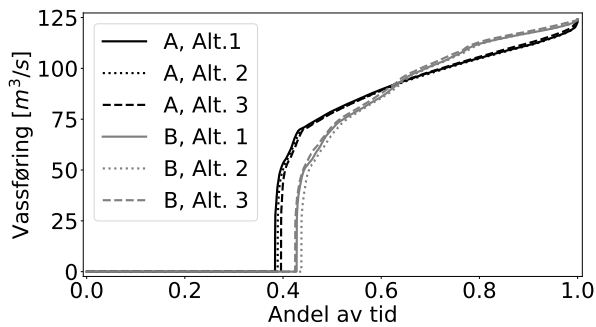
4.6 Fysiske avgrensingar

4.6.1 Vassføring til Tonstad



Figur 4.23: Varigheitskurve for historisk vassføring i Tonstad, med vassføringsandel frå dei to magasinane

Slukeevna til Tonstad er sett til $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Turbinvassføringa fordeler seg mellom bekkeinntaka og dei ulike magasinane. Figur 4.23 viser varigheitskurva til den rekonstruerte turbinvassføringa i Tonstad, med tilhøyrande vassføring frå Homstølvatn og Ousdalsvatn. Andelen vassføring frå kvart magasin er hovudsakleg bestemt av skilnaden i vasstand mellom magasinane. Når Ousdalsvatn er tømt, kjem alt produksjonsvatnet frå bekkeinntaka og Homstølvatn.



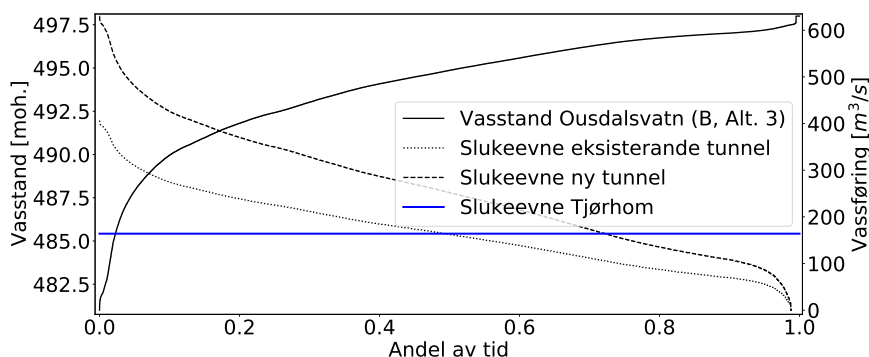
Figur 4.24: Modellert andel av vassføring til Tonstad frå Ousdalsvatn

Andelen vatn Tonstad får frå Ousdalsvatn, er avgrensande for drifta av Tjørhom kraftverk. Figur 4.24 viser at den maksimale utrekna vassføringsandelen frå Ousdalsvatn til Tonstad, er i underkant av $125 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.6.2 Overføringstunnelen Tjørhomvatn-Ousdalsvatn

Figur 4.15 viser at samtlege modellar ligg lågt i Ousdalsvatn. Om Tjørhom kraftverk vert utvida, er det venta at Ousdalsvatn kjem til å ligge høgare enn historisk (Netlandsnes, 2022). Høgare vasstand vil påverke overføringskapasiteten mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn negativt.

For å få fram avgrensingane, viser figur 4.25 varigheitskurva til vasstanden i Ousdalsvatn for modelleringa av tilfelle B, alternativ 3. Denne modellen hadde høgast vasstand i Ousdalsvatn, med ein medianvasstand på 494,8 moh. Overføringskapasiteten frå Tjørhomvatn til Ousdalsvatn er òg vist. Den rekna ut gitt vasstand i Tjørhomvatn lik 497,5 moh., og oppgittvasstand i Ousdalsvatn. Både eit tilfelle med eksisterande overføringstunnel, og eit tilfelle med ny tunnel i parallell, er vist i figuren.



Figur 4.25: Utrekna overføringskapasitet til Ousdal for eksisterande og ny tunnel, gitt utrekna vasstand frå tilfelle B, alternativ 3

For eksisterande overføringstunnel, med k_f lik $0,1 \text{ ‰}$, vert overføringskapasiteten mindre enn slukeevna til Tjørhom kraftverk når Ousdalsvatn overstig 494,8 moh. Gitt ein ny tunnel i parallell, er tilsvarande verdi 496,4 moh. Skilnaden i vasstand i Ousdalsvatn, svarar til $1,8 \text{ millionar m}^3$, eller tre timar kraftverksdrift i det utvida kraftverket.

Konsekvens for køyring

Når vasstanden i Ousdalsvatn haldast høgt, vert både overføringstunnelen Tjørhomvatn-Ousdalsvatn, og tilløpstunnelen til Tonstad, avgrensande for effekten i Tjørhom. køyringa kan då utvikle seg som følgjer:

1. Tonstad, Tjørhom og Solhom kraftverk startar, på full effekt. Turbinvassføringene er 250, 166 og 100 m³/s i Tonstad, Tjørhom og Solhom kraftverk, i rekkefølgje
2. Tonstad dreg 125 m³/s frå Ousdalsvatn, medan Tjørhom leverer 164 m³/s inn. Samtidig dreg Tonstad oppmot 130 m³/s frå Homstølvatn, medan Solhom leverer 100 m³/s. Som resultat fyllast Ousdalsvatn opp, medan Homstølvatn tømmast.
3. Ousdalsvatn stig til over grensa for overføringskapasiteten vist i figur 4.25, og Tjørhom må redusere slukeevna
4. Ousdalsvatn haldast stabilt når Q_{Tjr} vert lik $Q_{Ton,Ousdalsvatn} = 110-125$ m³/s
5. Når Tonstad stoppar, strøymar vatnet frå Ousdalsvatn til Homstølvatn. Det jamnar ut trykkskilnadane mellom magasina.

Dette køyremønsteret vert uttrykt i flaumtapet til Tonstad i tabell 4.8, der alternativ 1 og 2 har over dobbelt så stort flaumtap som alternativ 3, for alle tilfella.

4.7 Utforming av Tjørhom pumpekraftverk

Under er dei alternative utbyggingane gått gjennom. Kva for løysing som vil vere mest aktuell for kvart alternativ, vert vurdert.

Fellestrekk

Installert effekt

Rapporten har kun sett på ny slukeevne i Tjørhom lik 166 m³/s. Vassføringa vidare frå Ousdalsvatn til Tonstad, ligg i regelen under 125 m³/s. Dette kan tyde på at ein lågare installert effekt i det nye aggregatet, vil vere mest ideelt.

Lågare installert effekt i det nye aggregatet, vil gi fleire driftstimar i kraftverksdrift kvart år, som reduserar moglegheitene for lønsam pumpekraftverksdrift. Slukeevna i pumpemodus, avheng òg av installert effekt i det nye aggregatet. Om slukeevna vert større, vert større vassvolum pumpa, som igjen aukar fleksibiliteten i kraftsystemet. Dette gjeld særleg alternativ 2 og 3, der heile nedslagsfeltet til Tonstad er tilgjengeleg for pumping.

Auka installert effekt gir òg større falltap i tiløpstunnelen til Tjørhom kraftverk. For å finne optimal installert effekt på det nye aggregatet, må alle desse aspekta vegast opp mot kvarandre.

Frekvensomformar

Alternativ 1 må kunne regulere pumpevassføringa. Fullfrekvensomformar er den beste løysinga, sidan det har tilleggsfordelar i auka verknadsgrad og redusert slitasje.

Både alternativ 2 og 3 kan klare seg med ein mindre frekvensomformar til oppstart av pumpeaggregatet. Det er ei billigare løysing enn fullfrekvensomformar, men gir ikkje regulierbar pumpevassføring eller auke i verknadsgrad. For å bestemme løysing, må den ekstra verdien vurderast opp mot den ekstra kostnaden.

Ulikskapar

Alternativ 1

For å kunne auke pumpevassføring og -volum, bør Tjørhomvatn korttidsmagasinerast med luker. Den eksisterande overføringstunnelen til Ousdalsvatn vil avgrense turbinvassføringa. Det vil gi lågare fleksibilitet, men òg lågare vasstand i Ousdalsvatn. Å berre kunne pumpe lokaltilsiget til Tjørhomvatn, vil avgrense volumet av pumpinga. Dessutan vert kun 35 % av tilsiget til Tonstad tilgjengeleg for pumping, og ingen av magasinane til Tonstad lar seg senke av pumpinga. Alternativet gir difor mindre moglegheit til å flytte produksjon i Tonstad.

Alternativ 2

Pumping med trykkehøgde frå Tjørhomvatn har høgare systemverknadsgrad enn pumping med trykkehøgde frå Ousdalsvatn. Ulike løysingar med luker tilknytta Tjørhomvatn bør difor vurderast.

Tilsvarande som for alternativ 1, vil bruk av den eksisterande overføringstunnelen avgrense drifta, og med det inntekta, av eit utvida Tjørhom kraftverk. Alternativ 2 kan pumpe heile nedbørsfeltet til Tonstad. Sidan Ousdalsvatn kun kan senkast til 487 moh., vil truleg volumet av nedstraums magasin avgrense pumpinga ofte.

Alternativ 3

Ved å bygge ny avløpstunnel til Ousdalsvatn, kan ein bestemme kor langt ned

kraftverket kan pumpe Ousdalsvatn. Kanalisering av Ousdalsvatn og dykking av stasjonen, vil auke prosjektkostnaden. Om effekten heldast lik, men maksimal bruttohøgde aukast, vil turbina få redusert slukeevne i turbinmodus for ei gitt trykkehøgde.

Meir vatn frå Homstølvatn vert tilgjengeleg for pumping dess lenger ned ein pumpar Ousdalsvatn. Dette gjeld både volum i Homstølvatn, men òg kor mykje vatn ein kan få overført per time. Fleksibiliteten aukar difor dess lenger ned Tjørhom kan pumpe. Samtidig ønsker ein å halde både Ousdalsvatn og Homstølvatn høgt, for å få høgast produksjon og effekt i Tonstad. Kor langt ned det er realistisk å pumpe i ein vanleg driftssituasjon, er difor ei avveging. Systemverknadsgraden vert lågare jo lenger ned Ousdalsvatn pumpast, som òg vil avgrense pumpinga på låge vasstander.

Tilrådd utbyggingsalternativ

For å få utnytta den auka effekten i Tjørhom pumpekraftverk, må overføringa mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn vere stor nok. For å samtidig kunne halde høg vasstand i Ousdalsvatn, bør det drivast ein ny avløpstunnel til Ousdalsvatn. Alternativt kan den eksisterande overføringstunnelen strossast, men det hadde ført til stort tap av vatn i byggetida. Alternativ 3 anbefalast difor for vidare planlegging.

Ved bygging av ny avløpstunnel, står ein fritt til å bestemme kor langt ned det nye kraftverket kan pumpe Ousdalsvatn. Kor mykje ein må gjere med strøymingsforholda i Ousdalsvatn rundt LRV, bør vurderast før bestemmer lågaste undervatn for pumpedrift.

5 Diskusjon

5.1 Avgrensingar i modelleringa

I modellen vart det forutsett historisk drift av dei øvrige kraftverka i Sira-Kvina. For å hindre at desse fylte magasina til Tjørhom og Tonstad til overløp, vart ΔT sett lik ei veke. Den potensielle inntektsauka i Tjørhom og Tonstad, aukar med valgt ΔT i optimaliseringa. ΔT lik ei veke, avgrensa optimaliseringa av Tjørhom og Tonstad kraftverk, og reduserte den potensielle inntektsauka til under 50 millionar kroner per år. Uendra drift i Duge pumpekraftverk, hindra modellen i å lagre pumpa vatn over lengre periodar. Sesongpumping ville gitt større pumpevolum og høgare inntekter. Om Duge hadde pumpa vatnet vidare opp i Svartevatn, ville det vore mogleg å modellere sesongpumping.

Pumpinga i Tjørhom vart ikkje sett i samanheng med flytting av produksjon i Tonstad. Pumpinga i Tjørhom bidrog difor hovudsakleg til å senke Ousdalsvatn og Homstølvatn, og med det redusere produsert energi i Tonstad. Ved å modellere dei i samanheng, vil ikkje pumpinga i Tjørhom redusere produksjonen i Tonstad, men flytte produksjonen frå periodar med låg pris til periodar med høgare pris. Meirinntekta i Tonstad vil då òg spele inn på pumpeavgjerdsla, som vil gi fleire pumpetimar i Tjørhom enn når pumpinga må vere lønsam i Tjørhom.

For framtidig modellering av Tjørhom pumpekraftverk, bør difor fleire av kraftverka modellerast, slik at produksjonen kan flyttast over lengre periodar. Det er òg viktig at modelleringa får med seg samanhengen mellom pumping i Tjørhom og flytting av produksjon i Tonstad.

5.2 Avgrensingar i systemet

Då Statkraft i 2021 modellerte inntekta frå Tjørhom pumpekraftverk, vart Ousdalsvatn og Homstølvatn slått saman til eitt magasin. Overføringstunnelen mellom Tjørhomvatn og Ousdalsvatn vart ikkje inkludert. Desse forenklingane fjernar dei to største avgrensingane i systemet: kor mykje vatn Tjørhom kan levere til Ousdalsvatn, og kor mykje av produksjonsvatnet til Tonstad som kjem frå Ousdalsvatn. Følgeleg vert det modellerte systemet mykje meir fleksibelt enn det fysiske.

Etter ei utbygging, vil overføringstunnelen til Ousdal framleis avgrense vasstanden der, og Tonstad vil framleis kun trekke $125 \text{ m}^3/\text{s}$ frå Ousdalsvatn. Dette

er viktige systemavgrensingar, som vil redusere fleksibiliteten i systemet. For modellering av Tjørhom pumpekraftverk, vil det truleg seie at den potensielle inntekta reduserast, samanlikna med når avgrensingane utelatast.

Når avgrensingane utelatast, vert samtidig fleksibiliteten i det eksisterande systemet overdrive. Då vert ikkje nødvendigvis den auka i fleksibilitet som utbygginga av Tjørhom pumpekraftverk gir, rett verdsett. Manglande avgrensingar kan òg gi for stor modellert inntekt i dei eksisterande kraftverka. Inntekta etter ei utbygging, vert då samanlikna med for høge verdiar av inntekt før ei utbygging. Det kan gi for låge verdiar av inntektsauka.

Framgangsmåten i rapporten, der Tjørhomvatn, Ousdalsvatn og Homstølvatn vert modellert kvar for seg, og overføringa vert modellert i samtid, gir ein god representasjon av det faktiske systemet. For framtidig modellering av Tjørhom og Tonstad kraftverk, bør ein tilsarande metode nyttast.

5.3 Gyldigheit til resultatata

Avgrensingane til modellen er gjennomgått i kapittel 3.4. Med unntak av låg falltapskoeffisient i overføringstunnelen Tjørhomvatn-Ousdalsvatn, er alle modellavgrensingane konservative. Det vil seie at produksjonen og inntekta frå kraftverka, vil vere lik eller høgare enn dei modellerte verdiane. Den modellerte inntekta er difor ein minsteverdi. Resultata for Tjørhom kraftverk vart som venta: redusert produksjon og auka inntekt. Dei fleste parametera er betre talfesta for Tjørhom enn for Tonstad, som ga større samsvar mellom modell og eksisterande kraftverk.

Pumpekraftverksdrifta i Tjørhom ga ikkje store inntekter. Utrekninga i modellen ga færre pumpetimar enn det produksjonsplanlegging vil gi. Avgrensingar på både øvre og nedre magasin, avgrensa òg både pumpetimar og -volum i modellen. Sidan pumpinga ikkje vart knytt til flytting av produksjon i Tonstad, er ikkje meirverdien av pumpinga tatt med. Resultatet er difor for konservativt.

I Tonstad ga modellen lågare produksjon og inntekt enn historisk. Dette kom av feil volum av produksjonsvatnet som modellen kalibrerte for, i tillegg til auka flaumtap, og lågare vasstand i Ousdalsvatn og Homstølvatn. Etter ei utbygging, er auka falltap er det einaste som vil kunne redusere produksjonen i Tonstad. Det samsvarar ikkje med modelleringa, som reduserte både produksjonen og inntekta i Tonstad for alle de alternative utbyggingane, samanlikna med alternativ 0. Den modellerte inntekta i Tonstad, er difor ikkje truverdig.

6 Konklusjon

Tjørhom og Tonstad kraftverk vart modellert for perioden 2010-2019. Både eksisterande kraftverk, og tre ulike utbyggingsalternativ for Tjørhom pumpekraftverk vart modellert. Modellen bruka historiske tilsigsdata og historiske prisar. Dei siste åra har prisane utvikla seg i retning større prisvariasjon. Det vil gjere både pumpekraftverksdrift og utvida effekt, meir lønsamt

Modelleringa var eit forsøk på å få meir nøyaktige resultat enn Statkraft fekk i 2021. Modellen klarte ikkje å finne stor inntektsauke for utbyggingsalternativa. Tvert om, minka produksjonen og inntekta i Tonstad kraftverk for samtlege utbyggingsalternativ. Dette kjem både av avgrensingar i modellen, og unøyaktige inndata. Perioden ΔT vart sett éi veke, som avgrensa den teoretiske inntekta i kraftverksdrift.

Rapporten ser på Tjørhom pumpekraftverk som både ei utviding av effekt, og eit pumpekraftverk. I kraftverksdrifta, der rapporten kun ser på auka effekt i Tjørhom, vart produksjonen redusert for alle utbyggingsalternativa. Dette kom av auka falltap ved auka effekt. Inntekta frå kraftverket auka.

Drifta av pumpekraftverket inkluderar både pumping og produksjon av pumpa vatn. Framgangsmåten i modelleringa gjorde all pumpinga lønsam, som igjen ga netto inntektsauke. Modellavgrensingar og låg variasjon i pris, reduserte tilgjengelege timar til pumpekraftverksdrift. Inntekta var difor liten.

6.1 Framtidig arbeid

6.1.1 Modellering

MS Excel-modellering

Om ein legg same framgangsmåte som i rapporten til grunn for framtidig modellering, må dei usikre verdiane fastsettast. Om ein har rett falltap og verknadsgrad i Tonstad, modellerast produksjonen òg rett. Dessutan bør ein forbetre tilsigsdataa. Om ein har rett historisk tilsig, vil historisk produsert vassvolum vere rett. Modellen vil då i større grad representere det historiske systemet.

Den potensielle inntektsauka i Tjørhom og Tonstad, aukar med valgt ΔT i optimaliseringa. I rapporten vart det forutsett historisk drift av resten av kraftverka

i Sira-Kvina. Som ei følge av det, vart ΔT sett lik ei veke. Dette avgrensa optimaliseringa av Tjørhom og Tonstad kraftverk, og ga lågare potensiell inntektsauke. For framtidig modellering av Tjørhom kraftverk, bør fleire av kraftverka modellerast, slik at produksjonen kan flyttast over lengre periodar.

Pumping av vatn i Tjørhom har ein verdi utover den potensielle gevinsten i Tjørhom. Særleg gjeld dette driftsmønsteret i Tonstad. For modellering, bør denne verdien talfestast.

Generell modellering av Tjørhom pumpekraftverk

Arbeidet med rapporten har vist at det er nødvendig å modellere dei tre magasinane Tjørhomvatn, Ousdalsvatn og Homstølvatn kvar for seg, med dei relevante overføringstunnelane. Ellers vil systemet undervurdere viktige avgrensingar i systemet:

- Avgrensinga på kor mykje vatn som kan gå frå Tjørhom kraftverk til Ousdalsvatn, gitt ulik vasstand i Ousdalsvatn
- At det er avgrensa kor mykje vatn Tonstad kan trekke frå Ousdalsvatn i vanleg drift

Den avgrensa overføringskapasiteten ved dagens overføringstunnel, talar for ny avløpstunnel heilt til Ousdalsvatn. Den avgrensa overføringa vidare, gjer at det vert dratt ulike volum frå dei to magasinane når Tonstad produserar. Avgrensa overføring mellom Homstølvatn og Ousdalsvatn, avgrensar kor mykje vatn som er tilgjengeleg for pumping i Tjørhom. I sum verkar dette inn på drifta i både Solhom, Tonstad og Tjørhom kraftverk. Homstølvatn og Ousdalsvatn må modellerast kvar for seg for å få med dette. Strøymingsforholda gjennom Ousdalsvatn nær LRV må bestemmast.

6.1.2 Utforming av Tjørhom pumpekraftverk

Viktige aspekt for framtidig planlegging av Tjørhom pumpekraftverk er vist under. Desse aspekta bør òg takast med i framtidig modellering.

Frekvensomformar

Det er antatt det er nødvendig med frekvensomformar for å pumpe i Tjørhom kraftverk. For utbyggingalternativ 2 og 3, der ein kan pumpe frå Ousdalsvatn, bør verdien av reguleringa vurderast opp mot ekstrakostnaden ved å skaffe fullfrekvensomformar.

Avløpstunnel

Om effekten i Tjørhom dobbelst, vil overføringstunnelen mellom Tjørhomvatn

og Ousdalsvatn ofte avgrense drifta. For å få større fleksibilitet i drifta, i tillegg til å kunne ligge høgare i magasinerna, bør vidare planlegging basere seg på utbyggingsalternativ 3: ny avløpstunnel til Ousdalsvatn.

Luker i Tjørhomsvatn

Når ein pumpar frå Ousdalsvatn og Tjørhomsvatn samtidig, vil vasstanden i Ousdalsvatn bestemme systemverknadsgraden. Samanlikna med pumping frå kun Tjørhomvatn, reduserast systemverknadsgraden med opptil 4-6 %. Det gir færre timar med lønsam pumping. Korttidsmagasinering for pumping i Tjørhomsvatn bør difor vurderast. Då kan ein pumpe med trykkhøgda i Tjørhomvatn, som vil gi høgare systemverknadsgrad, og fleire pumpetimar.

Kanalisering i Ousdalsvatn

I utbyggingsalternativ 3, ny avløpstunnel til Ousdalsvatn, kan nedre grense for pumping av Ousdalsvatn bestemmast fritt, ned til LRV. Større senking av Ousdalsvatn gjer større volum i Homstølvatn tilgjengeleg for pumping. Samtidig vil ein minste verdifull trykkhøgde i Tonstad. Kor stor inntekta vil vere ved å kunne pumpe dei siste meterna i Ousdalsvatn, må difor vurderast opp mot den ekstra kostnaden.

Eit kostnadsdrivande aspekt, er kor mykje ein må gjere med strøymingsforholda i Ousdalsvatn ved LRV, 482 moh. Særleg kronehøgda og lengda på terskelen mellom stora og litla Ousdalsvatn, vil vere viktig her.

Referansar

- Bruland, A. og A. Thidemann (apr. 2016). *Kostnadsgrunnlag for vannkraft*. Tekn. rapp. (sjekka 27. mar. 2022). NVE.
- (okt. 2021). *Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021-2040*. Tekn. rapp. (sjekka 21. apr. 2022). NVE.
- Dahlhaug, O. G. (24. mai 2022). Personleg kommunikasjon.
- Egeland, O. M. (2021). «Numerical Modelling of Emergency Shut Down in Tjørhom Pumped Storage Plant». Prosjektoppgåve. NTNU.
- Eggen, S. (jun. 2021). *Tjørhom - Innstallering av reversibelt pumpeaggregat*. Tekn. rapp. Statkraft.
- Guddal, R. (11. nov. 2021). Personleg kommunikasjon.
- Guttormsen, O. (2013). *Vassdragsteknikk II*. Akademika forlag.
- Kartverket (2022a). *1312-1 Övre Sirdal*. (sjekka 28. mar. 2022).
- (2022b). *Norge i bilder*. URL: <https://norgebilder.no/>. (sjekka 2. mai 2022).
- Netlandsnes, S. (24. mar. 2022). Personleg kommunikasjon.
- NVE (2022a). *Kostnadsutvikling for vasskraftverk*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vannkraft/kostnadsgrunnlag-for-vasskraftverk/>. (sjekka 28. mar. 2022).
- (2022b). *NVE Atlas*. URL: <https://atlas.nve.no>. (sjekka 27. mar. 2022).
- Pettersen, S. (feb. 1986). *Falltap i kraftverkstunneler*. Tekn. rapp. Vassdragsregulantenenes forening.
- Richter, W. (2021). «Workshop – Tjørhom PSH - upgrade». Presentasjon frå møte om Tjørhom pumpekraftverk.
- Sira-Kvina (1967). *KT1.321.000.B02741 - Tilløpstunneler. Lengdeprofil*.
- (2015). *Revisjonsdokument Sira-Kvina reguleringen*. URL: <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201001316/1616591>. (sjekka 7. mai 2022).
- (2022). *Anlegg*. URL: <https://www.sirakvina.no/anlegg/category858.html>. (sjekka 27. mar. 2022).
- Solvik, Ø. (mar. 1974). *Falltapmålinger for Tjørhom kraftverk*. Tekn. rapp. SINTEF Vassdrags- og havnelaboratoriet.
- Statnett (2022a). *Ert Smyra–Tjørhom–Lyse*. URL: <https://www.statnett.no/vare-prosjekter/region-sor/vestre-korridor/ertsmyra-tjorhom-lyse/>. (sjekka 9. mai 2022).
- (2022b). *Kraftmarkedet*. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/>. (sjekka 2. mai 2022).
- Vereide, K. (30. aug. 2021). Personleg kommunikasjon (fleire tilfelle).

Appendiks

A Kontroll av oppgitt tilsig og produksjonsvatn i Tonstad

Basert på oppgitt produksjonsvatn og effekt i Tonstad, i tillegg til magasinvasstand, kan ein rekne ut historisk falltap. Dette gjerast med formel .1. Gitt verknadsgrad $\eta = 0,93$, vert falltapet mellom Homstølvatn og turbinane rundt 14 meter, gitt $P_{Tonstad} = 940$ MW. Dette er urealistisk lågt.

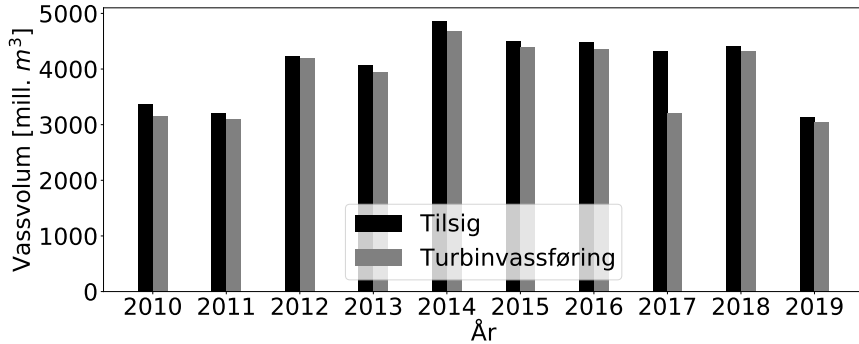
$$h_f = H - \frac{P}{Q * \eta * \rho * g} \quad (.1)$$

For å kontrtollere kvaliteten på oppgitte tilsigs- og turbinvassføringdata for Tonstad, vart vassbalansen i systemet sett opp. Vassvolumet gjennom Tonstad kraftverk i løpet av ein periode kan reknast ut på fire ulike måtar:

1. Oppgitt turbinvassføring i Tonstad frå Sira-Kvina
2. Oppgitt tilsig til Tonstad frå Sira-Kvina
 - Dette er summen av lokaltilsig, og turbinvassføring frå Tjørhom og Solhom kraftverk
 - Ved å trekke frå flaumtap og magasinendringar i Ousdalsvatn og Homstølvatn, finn ein årleg produksjonsvatn i Tonstad
3. Utrekna turbinvassføring i Tonstad basert på formlar
 - Innebakt i utrekninga, er lokaltilsiget i bekkeinntaka, som gjer dette delvis avhengig av oppgitt tilsigsdata
4. Tilsigsdata frå NVE
 - Kombinert med turbinvassføring frå Tjørhom og Solhom, svarar dette til punkt 2
 - Tilsigsdataa er gjennomsnittsverdiar for perioden 1961-1990, og kan vere utdatert

Figur .1 viser differansen mellom oppgitt tilsig og oppgitt produksjonsvatn til Tonstad, på årsbasis. Flaumtapa er trukke frå frå produksjonsvassføringa. Dei er henta frå (Sira-Kvina, 2015), som kun har oppgitte verdiar fram til 2014.

$$\sum_{\text{År}} \text{Produksjonsvatn}_{T\text{ilsig}} = \sum_{\text{År}} T\text{ilsig} - \sum_{\text{År}} F\text{laumtap} + \sum_{\text{Magasin}} \Delta V_{\text{Magasin}} \quad (.2)$$



Figur .1: Differansen mellom oppgitt tilsig og oppgitt produksjonsvatn i Tonstad

Figur .1 viser at differansen mellom tilsig og produksjonsvatn frå Sira-Kvina, er 3-500 millioner m^3 årleg, med unntak av 2017. Dette svarar til rundt 7-9 % av årleg tilsig til Tonstad. Den modellerte turbinvassføring i Tonstad er større enn den oppgitte turbinvassføringa, men Q_{tilsig} større enn Q_{turbin} her òg.

	Frå NVE (NVE, 2022b)	Frå Sira-Kvina (gjennomsnitt 2010-2019)
Tjørhomvatn	363	513
Ousdalsvatn	56	74
Bekkeinntak	113	48
Øksendal	85	ingen tal
Homstølvatn	368	376
Sum (utan Øksendal)	900	1011

Tabell .1: Årleg lokaltilsig til Tonstad frå restfelta [mill m^3]

Punkt 2 og 4, tilsigsdataa for perioden, er samanstilt i tabell .1. Tilsigsdataa frå NVE, er gjennomsnittstal frå mellom 20 og 60 år før den modellerte perioden. Dei kan difor innehalde feil, som følgje av endra tilsig. Likevel tyder samanstillinga i tabellen på feil i dei oppgitte tilsigsdataa. Dette gjeld særleg fordelinga på tilsiget:

- Tjørhomvatn og Ousdalsvatn har i sum om lag 40 % større tilsig frå restfeltet, enn det NVE oppgir

- Bekkeinntaka (utan Øksendaloverføringa) har berre 43 % av tilsiget NVE oppgir

Bekkeinntaka har, i delar av perioden, ikkje hatt vasstandsmåling. Feilen i fordeling her, kjem truleg av at tilsiget har blitt rekna som tilsig til magasinane i staden. I tillegg er det ei 12 % auke i totaltilsig til Tonstad.

B Kriterie for drift i Tjørhom pumpekraftverk

I starten vart det tenkt at modelleringa av Tjørhom pumpekraftverk skulle koblast opp mot historisk drift. Konsekvensen av dette, er gjennomgått under.

Kraftverksdrift

Inntekta til eit kraftverk er gitt ved likning 2.3. Gitt same produksjonstidspunkt i det eksisterande kraftverket, ville prisen vore den same, og produksjonen tilnærma lik. Totalinntekta ville vore så og seie uendra.

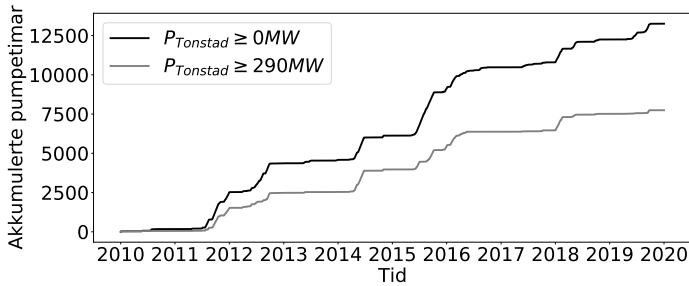
Om det eksisterande kraftverket hadde hatt veldig låg brukstid, kunne uendra produksjonsmønster vore ei rimeleg antaking. I eit slikt tilfelle produserar ein allereie på dei mest prisgunstige tidspunkta. Tjørhom kraftverk har høg brukstid. Det nye aggregatet vil difor først å fremst vere ei utviding av kraftverket. Det vil redusere brukstida, og flytte produksjonen frå tidspunkt med låg pris, til tidspunkt med høg pris.

Pumping i Tjørhom

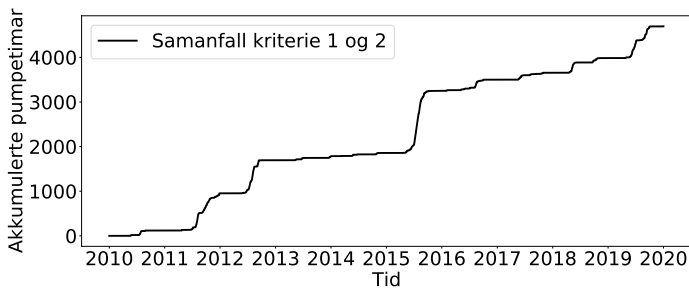
Den opphavlege ideen om å bruke det nye kraftverket som eit reint pumpekraftverk hadde to relevante forutsetningar: forutsetningar:

1. Aggregat 1 og 2 i Tjørhom skulle gå som normalt, og
2. Tonstad skulle produsere med meir enn $80 \text{ m}^3/\text{s}$, eller ca. 290 MW, på pumpetidspunkta

Tanken bak det siste punktet var at Tjørhom pumpekraftverk skulle flytte produksjon i Tonstad kraftverk, frå tidspunkt med låg pris, til tidspunkt med høg pris. Følgjeleg måtte det vere produksjon i Tonstad på dei gitte tidspunkta. Gitt ein systemverknadsgrad for pumpekraftverket på 73 %, vart tidspunkta der vi kunne forsvare pumping rekna ut. Priskriteriet vart funne ved formel 2.19, og p_0 vart endra for kvart år i perioden til den verdien som ga mest pumping.



Figur .2: Kummulative pumpetimar i Tjørhom, for kvart av kriteria



Figur .3: Kummulative pumpetimar i Tjørhom, gitt forutsette kriterie

Figur .2 viser kummulative timar der prisen tilseier pumping i Tjørhom. Talet på timar vert betydeleg redusert av kriterie 2, som gjev minsteverdi av effekten i Tonstad. Tilsvarende vart gjort for kriterie 1. Her vart òg talet på timar kraftig redusert. Figur .3 viser kor mange timar vi kan pumpe gitt både kriterie 1 og 2. I sum utgjer dette rundt 5000 timar over tiårsperioden.

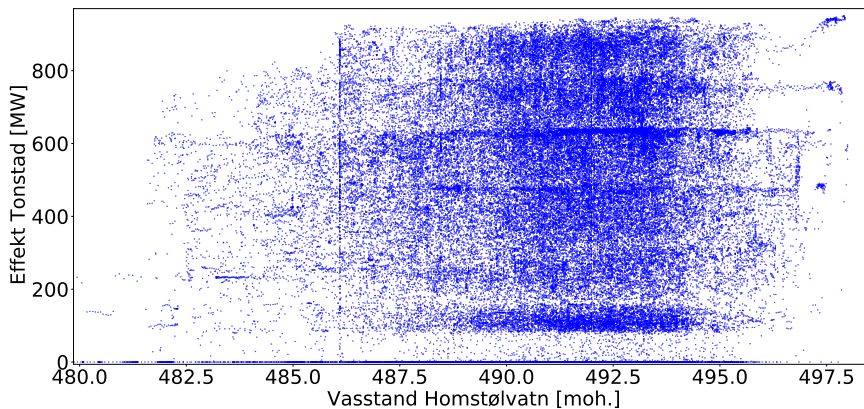
Dette er kun teoretisk pumping. Figur .3 har eit hopp i talet på pumpa timar i slutten av 2015, då ekstremværet Synne ga store flaumtap i mellom anna Gravatn. Under slike hendingar, vil pumping vere uaktuelt. Faktisk pumping vil difor vere endå lågare i timetal, enn det prisskiladen tilseier.

Dei oppgitte kriteria vart difor forkasta. Kjøremønsteret i aggregat 1 og 2 vert endra, og pumpinga av vatn skjer uavhengig av historisk produksjon i Tonstad.

C Kalibrering ved effektektivt

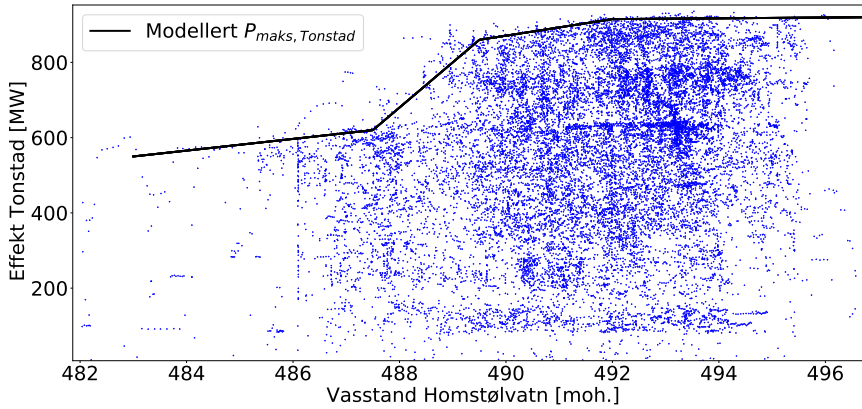
Kalibrering ved effekt

Homstølvatn er det største av dei to magasinerna til Tonstad, og Kvina-strengen har den minste falltapskoeffisienten. I starten vart maksimal effekt i Tonstad bestemt utifrå vasstanden i Homstølvatn. Figur .4 viser den historiske samanhengen.



Figur .4: Effekt i Tonstad mot vasstand i Homstølmagasinet, 2010-2019

Det er ingen openbar trend. For å fjerne usikkerheita knytt til bekkeinntaka, vart alle tidspunkt der lokaltilsiget i bekkeinntaka er over $1 \text{ m}^3/\text{s}$, fjerna. Det er vist i figur .5.



Figur .5: Effekt i Tonstad, gitt $Q_{lokaltilsig} < 1 \text{ m}^3/\text{s}$

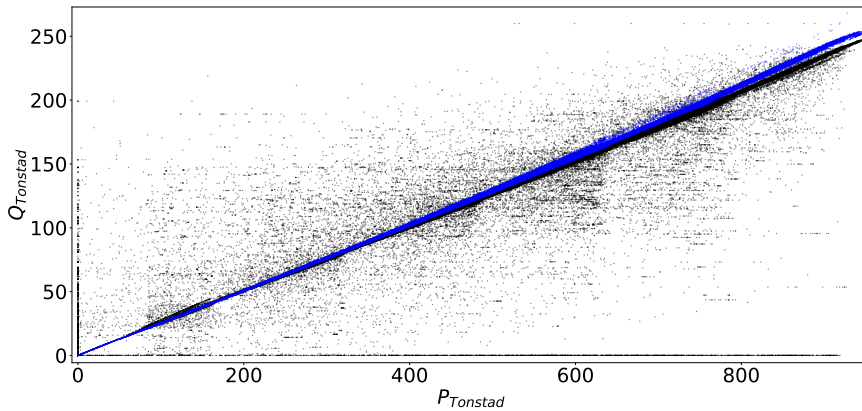
Basert på dette, vart maksimal effekt i Tonstad sett lik trendlinja i figuren. Ifølgje produksjonsplanleggarane i Sira-Kvina, er dette ei konservativ antaking (Netlandsnes, 2022). Når vasstanden i Homstølvatn går under 483 moh, stoppar all produksjon i Tonstad. Dette er ikkje ei fysisk avgrensing Tonstad kraftverk har, men vart gjort for at modellen ikkje skulle kjøre Homstølvatn for langt ned.

Turbinvassføringa i Tonstad vart bestemt utifrå effekten. Full iterasjonsmetode for turbinvassføring, vart bruka for å bestemme $Q_{Tonstad}$ i kapittel 2.1. Dette er veldig tungt utrekningsmessig, og ville ikkje fungert i modellen. I staden vart vassføringa bestemt utifrå **effektekvivalent**. Effektekvivalenten gir turbinvassføringa som funksjon av effekten i Tonstad. Tonstad har store falltap i tilløpstunnelen, som er funksjon av turbinvassføringa kvadrert. Vanleg energiekvivalent får ikkje med dette, og undervurderar turbinvassføringa ved høgare effekt. Effektekvivalenten er i praksis ein inkrementell energiekvivalent, som då får tatt med falltapet i utrekninga. Turbinvassføringa i Tonstad blir difor meir korrekt.

Figur .6 viser effekt mot turbinvassføring i Tonstad. Effektekvivalenten blir ein funksjon $Q_{Tonstad} = f(P_{Tonstad}^2)$. Denne interpolerar dei historiske dataa, og tek difor ikkje omsyn til ulike tilsig i bekkeinntaka.

Problem med effektekvivalent

Tilsigsdataa og produksjonsvatnet til Tonstad er usikre. Dei sikraste dataa er produksjonsdataa, som er målt før transformatorane i kraftstasjonane. Model-



Figur .6: Effektekvivalent for Tonstad. Blå verdier er utrekna verdier, svart er oppgitt frå Sira-Kvina

len kalibrerast til å produsere like mykje som historisk, og historisk effekt er då det sikraste målepunktet. Her er det to store problem:

1. Modellen kjører jamnt over med høgare effekt enn historisk kjøring, som gir høgare falltap. Ved å setje produksjonen lik, men auke effekten, vil ein difor bruke meir vatn enn historisk
2. Effektekvivalenten gir eintydig samanheng mellom effekt og turbinvassføring, uavhengig av brutto høgde i Tonstad

Punkt 1 seier at det er enklare å oppnå vassbalanse i modellen når den kalibrerast med vassføringsdata. Som vist, er det stort sprik mellom teoretisk turbinvassføring, og oppgitt tilsig. Ein av dei antatte gevinstane av utbygginga er å kunne ligge høgare i Homstølvatn. Dette vil gi større brutto høgde i Tonstad, som gir høgare effekt i Tonstad. Punkt 2 seier at effektekvivalent ikkje får med denne effekten: Om Homstølvatn ligg 483 moh eller 497.5 moh, vil effektekvivalenten gi same effekt for ein gitt turbinvassføring. Brutto trykkehøgde kan altså variere med nesten 15 meter, som svarar til om lag 3 % av totalt fall, utan at produksjonen blir endra.

skriv om modelldrift gitt effekt som parameter

Modellen var først balansert på effekt. Framgangsmåten for modelleringa var då:

1. Finn total produksjon i perioden, E_{total}
2. Finn den tilgjengelege effekten i perioden
 - Dette kan vere avgrensa av magasinvasstand opp- eller nedstraums, eller av kor mange aggregat som er tilgjengelege
3. Finn tilsvarande timar med produksjon
 - $n =$ timar med produksjon $= \frac{E_{total}}{P}$
4. Finn dei n timane med høgast pris i perioden
 - Den lågaste prisen i desse timane er grenseprisen, p_{min}
5. Når spotprisen er over eller lik p_{min} , produserar vi. Når prisen er under, står kraftverket stille.

Punkt 2, tilgjengeleg effekt, vil ofte vere avhengig av historisk kjøring. Når modellen har kjørt, kan ein rekne ut gjennomsnittleg effekt i kvar periode, og bruke dette som tilgjengeleg effekt. Slik går ein inkrementelt mot rett løysing

Ved auka turbinvassføring vil falltapet auke, og effektekvivalenten går ned. Om vi set produksjonen lik, $E_{historisk} = E_{modell}$, vil vi difor overforbruke vatn. Eg gjekk difor bort frå effekt, og såg på vassføring som parameter. Vassføringa er bruka i modellen

Fordelen med å balansere modellen basert på produksjonsvatn, er at effekten av endring av falltap blir tatt med automatisk. Særleg for Tjørhom vil det auka falltapet gi mindre energiproduksjon totalt sett, medan summen av produksjonsvatn vil vere den same. Dette gjeld når vi ser vekk ifrå pumping og turbinering av pumpa vatn, som kjem i tillegg.

D Vedlegg

Appendiks D er lagt ved som ei zip-fil. Vedlegga er delt i tre. Den første delen, vedlegg D.1, inneheld produksjonssimuleringsmodellane for alternativ 0 til 3. Vasstanden i dei fire magasinane er sensurert. Makroane som bestemmer vasstanden i modellen, er òg forenkla.

Vedlegg D.2 er lysbileta til ein presentasjon av masterppgåva. Vedlegg D.3 gir utrekninga av utbyggingskostnaden for dei tre alternativa.

