Bacheloroppgave

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Even Østerhaug
Hanna Midtsundstad

Analyse av kraftproduksjonen og vannføringen I Glomma, Sør for Øyeren

En gjennomgang av hvordan vannet kan utnyttes best mulig

Bacheloroppgave i Fornybar energi, Ingeniør
Veileder: Shiplu Sarker
Mai 2021

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Hafslund Eco

Even Østerhaug
Hanna Midtsundstad

Analyse av kraftproduksjonen og vannføringen I Glomma, Sør for Øyeren

En gjennomgang av hvordan vannet kan utnyttes best mulig

Bacheloroppgave i Fornybar energi, Ingeniør
Veileder: Shiplu Sarker
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU
Institutt for vareproduksjon
og byggteknikk

Oppgavens tittel:	Dato: 20.05.2021
Analyse av kraftproduksjon og vannføring i Glomma, sør for Øyeren	Antall sider: 50 Antall sider vedlegg: 20
	Masteroppgave: ☐ Bacheloroppgave x

Navn:
Even Wålen Østerhaug og Hanna Midtsundstad

Veileder:
Shiplu Sarker

Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere:
Tord Wethelund og Bertil Ekern

Sammendrag:
Denne oppgaven tar for seg vannføringen og produksjonen i fire vannkraftkraftverk, eid av Hafslund Eco, sør i Glomma. Problemstillingen er «Hvordan kan Hafslund Eco utnytte vannføringen i Glomma, sør for Øyeren, best mulig med tanke på produksjon og økonomi?». I oppgaven blir det brukt data tilsendt fra oppdragsgiver Hafslund Eco. Dataene blir gjennomgått og analysert i Excel før de er simulert, forbedret og igjen illustrert i en selvlaget modell i SHOP. Resultatene presenteres i grafer og tabeller laget i disse to programmene. Resultatene viser at Hafslund Eco styrer produksjonen sin nokså bra, men det er rom for forbedring både på produksjon og økonomi. Produksjonen kan økes på to måter, enten ved å benytte bedre kombinasjoner av forskjellige aggregater som viser seg å produsere med høyere virkningsgrad, og/eller ved i den grad det er mulig, å produsere på vannføringer som viser seg å være mer gunstige med tanke på virkningsgrad. Det er også mulig å øke inntjeningen betydelig ved å tilpasse produksjonen etter strømprisene. Dette viser seg å kunne være gunstig også fra et globalt perspektiv der målet er å skaffe nok ren energi til alle.

Stikkord:

Fornybar energi
Vannkraft
Kraftproduksjon

(sign.)

(sign.)

Forord

Denne oppgaven er vår avsluttende bacheloroppgave i Fornybar energi, ingeniør ved NTNU Gjøvik etter tre lærerike år. Oppgaven handler om vannkraft og hvordan vannet kan utnyttes best mulig i vannkraftverk. Oppgaven tar for seg noen konkrete kraftverk i Glomma, og vil gi en pekepinn på hva som lønner seg generelt for elvekraftverk. Det har vært morsomt og lærerikt å arbeide med denne oppgaven, sette oss inn i nye temaer og programvarer, samarbeide underveis og ta avgjørelser rundt oppgaven.

En stor takk til Hafslund Eco som har gitt oss denne oppgaven og til Tord Wethelund og Bertil Ekern for hyggelige møter, enestående hjelp og gode svar på spørsmål underveis i prosessen med oppgaven. Også takk til Tor Halvor Bolkesjø og Geir Jevnaker som steppet inn da Bertil hadde pappapermisjon.

Videre en stor takk til vår veileder ved NTNU, Shiplu Sarker, for god veiledning, tett oppfølging og hjelp både med metodedelen og skriveprosessen.

Også en stor takk til studieansvarlig Alemayehu Gebremedhin, samt andre fagansvarlige vi har hatt i enkeltemner, for tett oppfølging, god veiledning og hjelp og mye kunnskap gjennom tre år på NTNU.

Takk til Hans Ivar Skjelbred som har gitt oss tilgang til programmet SHOP og bistått med veiledning.

Stor takk til studievenner for godt samarbeid og et godt læringsmiljø i tre år.

Sist, men ikke minst en takk til venner og familie for hjelp og oppfølging gjennom alle år med læring og gjennom arbeidsprosessen med bacheloroppgaven.

Even Wålen Østerhaug og Hanna Midtsundstad

Abstract

This study looks at what improvements can be made in regards to efficiency and water management in Hafslund ECO´s four hydropower plants located south of Glomma. We are investigating what produces the largest amount of electricity; what flow rates utilize the water in the best way, how different combinations of aggregates can produce the most and how to manage the flow rate over a period of time with and without considering electricity price. To solve this, we are using Excel and SHOP, which is software suitable for this task. The data is sorted and illustrated in graphs using Excel. These results are used to build the SHOP model, and later compared with the optimized scenarios from SHOP. The results show that Hafslund Eco is operating the powerplants pretty well, but that there are some improvements to note. It is possible to utilize the water more efficiently and increase the energy production in two ways; with the aggregate combination or by controlling the water flow to optimize net head. It is also possible to utilize the water better by adjusting the production according to the energy price.

Innholdsfortegnelse

Forord ii
Abstract iii
Innholdsfortegnelse iv
Tabelliste ix
1 Innledning 1
2 Teori 2
2.1 Vannkraft 2
2.1.1 Hvordan fungerer vannkraft? 3
2.1.2 Teoretisk potensial 3
2.1.3 Energipotensial 4
2.1.4 Virkningsgrad 4
2.1.5 Energiekvivalent 5
2.1.6 Magasinkraftverk og elvekraftverk 5
2.1.7 Overvann og undervann 6
2.2 De viktigste komponentene i et kraftverk 6
2.2.1 Turbin 6
2.2.2 Generator 7
2.2.3 Aggregat 8
2.3 Hydrologi 8
2.3.1 Skyer og nedbør 8
2.3.2 Tilsig og avrenning 9
2.4 Strømpriser 9
2.5 Statistikk 10
2.5.1 Regresjonsanalyse 10
2.5.2 R-kvadrat 10
3 Case 12
3.1 Hafslund Eco 12
3.2 Kraftverkene i denne oppgaven 12
3.2.1 Solbergfoss 13
3.2.2 Fellesanlegget Kykkelsrud-Fossumfoss (FKF) 14

3.2.3 Vamma 15
3.2.4 Hafslund og Sarp 16
4 Metode 18
4.1 Programvarer benyttet i oppgaven 18
4.1.1 Excel 18
4.1.2 SHOP 18
4.2 Sortering av dataserier 19
4.2.1 Tidsperspektiv 19
4.2.2 Flom 19
4.2.3 Feil grunnet upresise endringer 19
4.2.4 Uønskede aggregatkombinasjoner 20
4.2.5 Opplagte feil 20
4.3 Produksjon, virkningsgrad og energiekvivalent 21
4.4 Aggregatkombinasjoner 21
4.5 SHOP-modellen 21
4.5.1 Optimalisering med strømpris 22
4.5.2 Optimalisering uten strømpris 22
5 Resultater 23
5.1 Vannføring 23
5.1.1 Solbergfoss 23
5.1.2 FKF 25
5.1.3 Vamma 27
5.1.4 Hafslund og Sarp 29
5.2 Aggregatkombinasjoner 31
5.2.1 FKF 32
5.2.2 Vamma 33
5.3 SHOP-modellen 34
5.3.1 Optimalisering med strømpris 34
5.3.2 Optimalisering uten strømpris 35
6 Diskusjon og analyse 37
6.1 Mulige usikkerheter i oppgaven 37
6.1.1 Nedbørsfelt 37
6.1.2 Sortering av data 37

6.2 Produksjon, virkningsgrad og energiekvivalent 38
6.2.1 Produksjon 38
6.2.2 Energiekvivalent 38
6.2.3 Virkningsgrad 38
6.2.4 Hafslund og Sarp 39
6.3 Aggregatkombinasjoner 40
6.3.1 FKF 40
6.3.2 Vamma 41
6.3.3 Forbedring av aggregatkombinasjoner 41
6.4 SHOP-modellen 42
6.4.1 Optimalisering med strømpris 43
6.4.2 Optimalisering uten strømpris 43
6.4.3 Forbedring av SHOP-modellen 45
6.5 Innvirkningen av våre funn 45
7 Konklusjon 46
Litteraturliste 47
Vedlegg 51

Figurliste

Figur 2.1: Figuren viser virkingsgradkurvene til noen forskjellige turbiner.....4
Figur 2.2: Illustrasjon av en Francisturbin.....7
Figur 2.3: Illustrasjon av en Kaplanturbin.....7
Figur 2.4: Illustrasjon av en generator (med Kaplanturbin) med noen av de forskjellige komponentene.....8
Figur 2.5: Oversikt over R-kvadrat utregning.....11
Figur 3.1: Kartet viser hvor langs Glomma Solbergfoss kraftverk er lokalisert.....13
Figur 3.2: Bilde av Solbergfoss kraftverk.....13
Figur 3.3: Kartet viser hvor langs Glomma FKF er lokalisert.....14
Figur 3.4: Bilde av FKF kraftverk.....14
Figur 3.5: Kartet viser hvor langs Glomma Vamma kraftverk er lokalisert.....15
Figur 3.6: Bilde av Vamma kraftverk.....15
Figur 3.7: Kartet viser hvor langs Glomma Hafslund og Sarp kraftverk er lokalisert.....16
*Figur 3.8: Bilde av Hafslund kraftverk.....*16
Figur 5.1: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss..... 24
Figur 5.2: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss.....24
Figur 5.3: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss.....25
Figur 5.4: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i FKF.....26
Figur 5.5: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i FKF.....26
Figur 5.6: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i FKF.....27
Figur 5.7: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Vamma.....28
Figur 5.8: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Vamma.....28
Figur 5.9: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Vamma.....29
Figur 5.10: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.....30
Figur 5.11: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.....30
Figur 5.12: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.....31
Figur 5.13: Figuren viser produksjonen ved forskjellige aggregatkombinasjoner i FKF. Rosa viser at alle aggregater er på, rød viser at aggregat 1 + 2 er på, gul viser at aggregat 3 er på, oransje viser at aggregat 1 + 2 og 3 er på, lilla viser at aggregat 1 + 2 og 4 er på. Øvrige kombinasjoner var det for lite datagrunnlag til å inkludere, dvs. disse kombinasjonene er sjelden i bruk.....32

Figur 5.14: Figuren viser produksjonen ved forskjellige aggregatkombinasjoner i Vamma. Rød er aggregat 1–10, oransje er aggregat 1–10 og 11, lilla er aggregat 1–10 og 12, grønn er aggregat 11 og 12 og rosa er alle aggregatene. Øvrige kombinasjoner var det for lite datagrunnlag til å inkludere, dvs. disse kombinasjonene er sjelden i bruk.....33
Figur 5.15: Grafen viser variasjonen i produksjon og pris over en tilfeldig tidsperiode.....34
Figur 5.16: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i Solbergfoss.....34
Figur 5.17: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i FKF.....34
Figur 5.18: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i Vamma.....35
Figur 5.19: Grafen viser variasjonen i produksjon og pris over en tilfeldig tidsperiode.....35
Figur 5.20: Grafen viser optimal vannføring og produksjon i Solbergfoss.....35
Figur 5.21: Grafen viser optimal vannføring og produksjon i FKF.....36
Figur 5.22: Grafen viser optimal vannføring og produksjon i Vamma.....36
Figur 6.1: Figuren viser forskjellene i inntekt når produksjonen skjer konstant sammenlignet med når produksjonen er optimaliser etter strømprisene. Økningen i inntjeningen for de respektive ukene er: 1: 261 510 kr, 2: 4078 kr, 3: 408 808 kr og 4: 128 31 kr.....43
Figur 6.2: Figuren viser forskjellene i produksjon ved forskjellige vannføringer når produksjonen går konstant sammenlignet med når produksjonen er optimalisert.....44

Tabelliste

Tabell 3.1: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Solbergfoss.....14
Tabell 3.2: viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i FKF.....15
Tabell 3.3: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Vamma.....16
Tabell 3.4: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Hafslund og Sarp.....17
Tabell 6.1: Tabellen viser data fra SHOP og de virkelige dataene fra kraftverkene. sammenlignet med når produksjonen er optimalisert.....42
Tabell 6.2: Tabellen viser forskjellene i produksjon ved forskjellige vannføringer når produksjonen går konstant sammenlignet med når produksjonen er optimalisert.....44

1 Innledning

FNs bærekraftsmål ble vedtatt i 2015 som en felles arbeidsplan for verden der målet blant annet er å stoppe klimaendringene innen 2030. Målene er demokratisk utarbeidet der nesten 10 millioner mennesker fra land over hele verden fikk være med å påvirke (FN, 2021a). FNs bærekraftsmål nummer 7 er ren energi til alle. Dette vil si «sikre tilgang til pålitelig, bærekraftig og moderne energi til en overkommelig pris for alle». I dag er kun 17,3 % av energien på verdensbasis fornybar, og samtidig er verdens energibehov økende. I Norge er denne andelen på sterke 69 %. Det er forventet at Norge oppnår alle delmålene i bærekraftsmål nummer 7 innen 2030, og en del av delmålene er allerede oppnådd. (FN, 2021b).

Ettersom ressursene rundt om i verden er forskjellige, vil måten energien produseres på også være forskjellig verden over. Uansett er det viktigste at de tilgjengelige ressursene blir utnyttet bærekraftig og best mulig for å sikre tilgangen til energi verden over. Det er derfor viktig at virkningsgraden i kraftproduksjonsanlegg er så høy som mulig slik at man får mest mulig ut av de inngrepene som er gjort, og dette er noe av bakgrunnen for denne oppgaven. Oppgaven er etter ønske fra Hafslund Eco å se på hvordan de kan utnyttet vannet i sine kraftverk best mulig for å produsere mest mulig elektrisitet. Senere ble det også valgt å trekke inn det økonomiske perspektivet i oppgaven.

Problemstillingen oppgaven bygger på er dermed som følger:

Hvordan kan Hafslund Eco utnytte vannføringen i Glomma, sør for Øyeren, best mulig med tanke på produksjon og økonomi?

Det er i oppgaven valgt å se på hvordan vannføringen kan utnyttes best mulig til energiproduksjon, samt hvilke aggregatkombinasjoner som gir best produksjon. Det er også sett på hvor mye denne optimaliseringen av produksjonen kan øke inntektene til Hafslund Eco. Videre er det sett på hvordan produksjonen kan optimaliseres i forhold til strømprisvariasjoner. Det er sett både på hva som er mest optimalt for hvert enkelt av kraftverkene, og hva som er best totalt sett.

2 Teori

2.1 Vannkraft

Tall fra SSB viser at vannkraft stod for 91,8 % av den totale kraftproduksjonen i Norge med 154,2 TWh i 2020 (Aanesen, 2021). Det totale teoretiske vannkraftpotensialet er, ifølge NVE, på over 600 TWh dersom hvert eneste vannfall bygges ut. Av det er det ca. 216 TWh som det er teknisk-økonomisk gunstig å utnytte. Dette vil si at 64 % allerede er bygget ut, mens 23 % er vernet. NVE anslår derfor at det kun er et potensial på 23 TWh igjen å bygge ut (Henriksen, Østenby, Skau, 2020).

Tallene til NVE viser at mye av potensialet allerede er utnyttet, og det er nå viktig å utnytte det som er bygd ut, enda bedre. Dette er viktig også for å unngå enda mer utbygging, og dermed flere inngrep i naturen. Vannkraft gir også billig energi fra lokale ressurser, og er dermed en svært viktig ressurs å utnytte for å dekke verdens energibehov. Vannkraft er en fornybar energikilde og har de laveste utslippene av drivhusgasser av alle energiteknologier (Statnett, u.å.).

Vannkraft har også den høyeste Energy Payback Ratioen av alle typer kraftverk med hele 5–500 ganger mer energi. Energy Payback Ratio (EPR) er hvor mange ganger mer energi et anlegg kan utvinne enn det gikk med for å bygge det. I tillegg viser forskning at det aller mest energilønnsomme er å modernisere eldre kraftverk (Abelsen, 2012).

Vannkraft er en forutsigbar energikilde og i mange tilfeller også mer eller mindre fleksibel dersom det er magasiner tilknyttet kraftverket. Gjennom magasiner er vannkraft en av de beste mulighetene for å lagre energi til det er behov for den. Dette gjør at produksjonen av vannkraft kan tilpasses etter tider det er stor etterspørsel eller i forhold til produksjonen av mer uforutsigbare energikilder, som vindkraft og solkraft (Statnett, u.å.).

2.1.1 Hvordan fungerer vannkraft?

Vannkraft bygger på prinsippet om å utnytte den potensielle energien i vannet. Den potensielle energien kommer av fallhøyden, og er gitt av formelen:

$$E_p = mgh \tag{1}$$

der m er massen til vannet, g er gravitasjonskonstanten (ca. 9,807 m/s^2) og h er høyden på fallet. I en kraftstasjon vil energien i vannet drive en turbin som produserer mekanisk energi. Denne energien omdannes så til elektrisk energi i en generator (Statnett, u.å.).

Massen av vannet kan videre utrykkes som

$$m = \rho \cdot V \tag{2}$$

der ρ er vannets tetthet er ca. 1000 kg/m3 (varierer med trykk og temperatur) og V er volumet av vannet (Frisk og Brimi, 2004).

2.1.2 Teoretisk potensial

Det teoretiske potensialet er den energien det er teoretisk mulig å produsere. Det tas ikke hensyn til tekniske begrensinger og antas derfor en 100% virkningsgrad og ingen tap i produksjonen. Dette er i praksis umulig, men likevel interessant å regne på for å benytte i andre beregninger, slik som virkningsgrad (Henriksen, Østenby, Skau, 2020). Det teoretiske potensialet er gitt

$$E_{teoretisk} = vannføring \cdot \rho \cdot g \cdot h \tag{3}$$

Der ρ er vannets spesifikke vekt (1000 kg/m^3), g er tyngekraftakselerasjonen (9,807 m/s^2) og H er fallhøyden til vannet.

2.1.3 Energipotensial

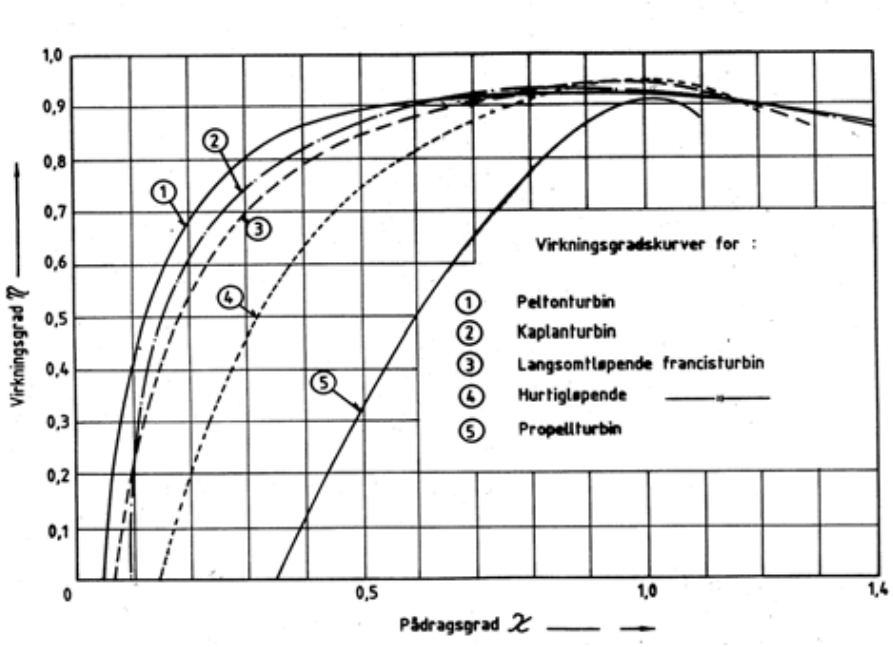
Energipotensial er definert som den mengden energi en kan få ut av et vassdrag når det trekkes fra tap fra flom, minstevannføring, forbitapping når det er under turbinens minste slukeevne, eller pga. vedlikehold (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010). Dette kan regnes ut

$$E_{potensial} = E_{teoretisk} - \ flomtap - minstevannføring - andre\ tap \qquad (4)$$

2.1.4 Virkningsgrad

For å finne virkningsgraden deles den faktiske produksjonen på energipotenisalet (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010).

$$\eta = \frac{E_{produsert}}{E_{potensial}} \qquad (5)$$



Figur 2.1: Figuren viser virkingsgradkurvene til noen forskjellige turbiner ved forskjellige vannføringer. (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010) Gjengitt med tillatelse.

2.1.5 Energiekvivalent

Definisjonen på energiekvivalenten er hvor mye energi som kan produseres per kubikkenhet vann som går gjennom turbinen. Enheten for energiekvivalent er KWh/m^3.
Energiekvivalenten *e* kan regnes ut med følgende formel:

$$e = \frac{\rho \cdot g \cdot \eta \cdot H_n}{3600} \tag{6}$$

der ρ er vannets spesifikke vekt (1000 kg/m^3), g er tyngekraftakselerasjonen (9,807 m/s^2), η er virkningsgraden til aggregatet og H_n er netto fallhøyde til vannet (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010).

Fordi virkningsgraden og netto fallhøyde varierer med vannføringen, som illustrert i figur 2.1, vil energien som produseres per kubikkenhet også variere med vannføringen. En annen måte å utrykke energiekvivalenten på er dermed:

$$Energiekvialent = \frac{Energi\ produsert}{Antall\ kubikkenheter} \tag{7}$$

2.1.6 Magasinkraftverk og elvekraftverk

Vi skiller mellom magasinkraftverk og elvekraftverk.

I et magasinkraftverk er det oppdemte magasiner som kan brukes til å regulere tilførsel av vann til kraftstasjonen. Magasinkraftverk har ofte større fallhøyde enn elvekraftverk, og de kan dermed ha stor produksjon tross mindre vannføring enn elvekraftverk. Magasinkraftverk kan også styre produksjonen avhengig av etterspørselen i kraftmarkedet og strømprisen (wikipedia, 2020a).

I et elvekraftverk er det den kontinuerlige vanntilføringen som blir utnyttet i kraftstasjonen. Det er i hovedsak kraften fra gjennomstrømming av store mengder vann som driver turbinene. I noen tilfeller kan vannføringen reguleres med et reguleringsmagasin i tilknytning til kraftstasjonen, men dette er gjerne i ubetydelig grad, sammenlignet med i et magasinkraftverk. Produksjonen i et elvekraftverk varierer mye ettersom produksjonen må skje med det vannet som er tilgjengelig til enhver tid. Dette fører til noen perioder med lav

produksjon og andre perioder med svært høy produksjon, avhengig av nedbøren og tilsiget (Wikipedia, 2017).

2.1.7 Overvann og undervann

Overvann er høyden på vannstanden ovenfor kraftverket. Undervann er høyden på vannstanden nedenfor kraftverket. Brutto fallhøyde er høydeforskjellen mellom overvann og undervann.

Høyden på overvannet og undervannet bestemmes av vannføringen. Ved stor vannføring vil vannstanden over kraftverket blir høy, og fordi vannet på nedsiden av kraftverket ikke klarer å renne bort, vil den være høyere enn normalt der også. Høyden på undervannet vil øke mer enn høyden på overvannet, og derfor vil fallhøyden være lavere enn normalt ved flom og store vannføringer. Ved mindre vannføring vil det være lavere vannstand ved både overvann og undervann fordi vannet kan rennet vekk. Den totale fallhøyden er større ved mindre vannføringer (Frisk og Brimi, 2004).

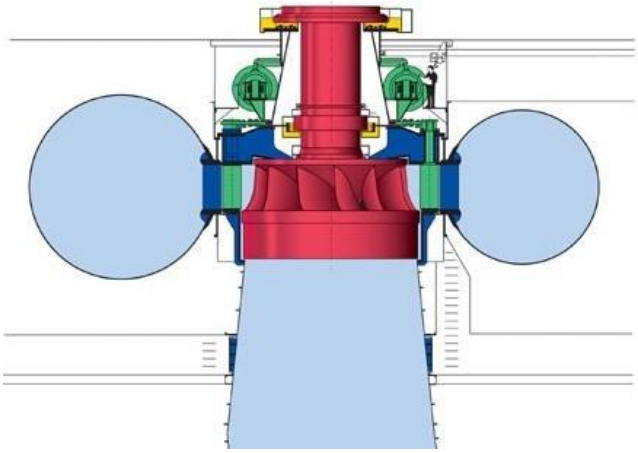
2.2 De viktigste komponentene i et kraftverk

2.2.1 Turbin

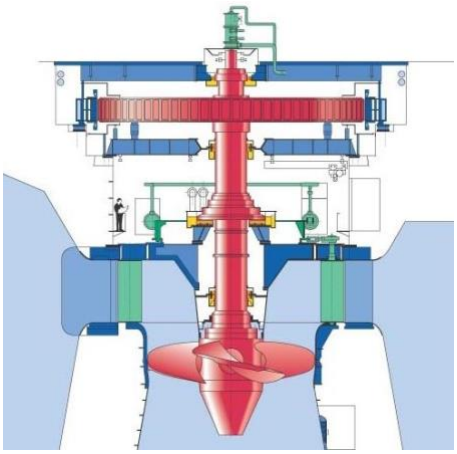
En turbin i et vannkraftverk omdanner energien i vannet til mekanisk energi på en roterende aksling. Riktig valg av turbin er viktig for å få best mulig virkningsgrad og få utnyttet vannet så godt som mulig.

Det skilles mellom fristråleturbin og fullturbin. I en fristråleturbin går vannet gjennom en dyse og videre ut i fri luft før det treffer skålene i turbinen. Et eksempel på en fristråleturbin er Peltonturbin. I en fullturbin drives løpehjulet på hele omkretsen og alle kanaler er fylt med vann til enhver tid. Dette gjør at hele fallhøyden blir utnyttet. Eksempler på fullturbiner er Francisturbin og Peltonturbin. Fullturbiner har høyere virkningsgrad enn fristråleturbiner, og kan komme helt opp i en virkningsgrad på over 0,95. I fullturbiner er turtallet avhengig av både vannføring, fallhøyde og trykknivået inne i turbinen (Olsen, 2018a).

Francisturbiner er den mest brukte turbintypen i Norge og brukes ved middels høy fallhøyde (ca. 40–600 m). Kaplanturbiner brukes ved lavere fallhøyde, fra ca. 50 m og nedover. Francis og Kaplan turbinene er ganske likt bygget opp, men Kaplanturbiner har noe større løpehjul med færre skovler (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010). I tillegg kan de fleste større Kaplanturbiner regulere vinkel på skovlene, noe som gir en mer gunstig virkningsgrad.



Figur 2.2: Illustrasjon av en Francisturbin (Olsen, 2018c) CC BY-SA



Figur 2.3: Illustrasjon av en Kaplanturbin (Olsen, 2018d) CC BY-SA

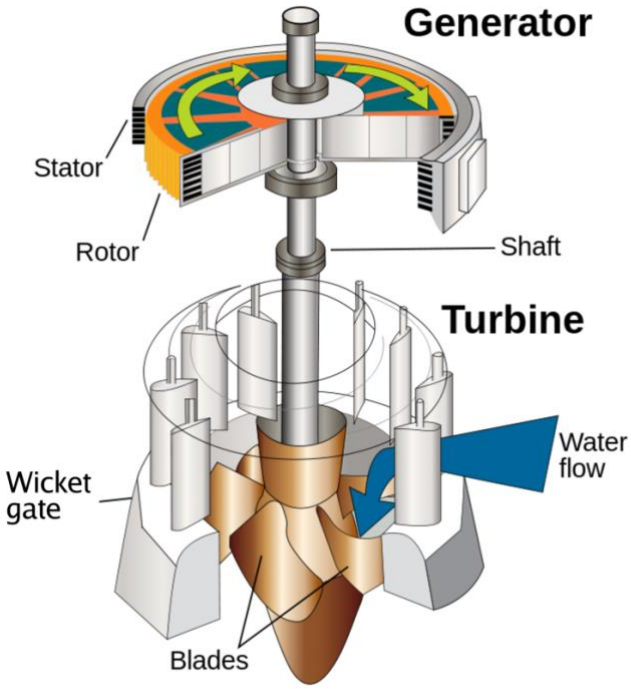
2.2.2 Generator

En generator er en maskin som ved hjelp av elektromagnetisk induksjon omdanner mekanisk energi til elektrisk energi. Dette skjer ved at det er festet en magnet på akslingen som roterer mellom elektriske ledere. Magneten kalles for rotor og de elektriske lederne for stator. Lederne er utformet som en spole, slik at de kan generere høy spenning ut til transformatoren (Olsen, 2018b).

I kraftanlegg leverer alltid generatorene vekselstrøm (Wikipedia, 2021a). Generatorens ytelse må være dimensjonert for å tåle turbinens maksimale ytelse og turbinens maksimale turtall. De fleste generatorer har en virkningsgrad på rundt 90 % (Fladen, Holmqvist og Bachke, 2010).

2.2.3 Aggregat

Et aggregat er en kombinasjon av flere enkeltmaskiner som sammen tjener et bestemt formål. I dette tilfellet er aggregatet en turbin og en generator som sammen produserer elektrisk energi (Bolstad, 2021).



Figur 2.4: Illustrasjon av en generator (med Kaplanturbin) med noen av de forskjellige komponentene (Wikipedia, 2012) CC BY-SA

2.3 Hydrologi

2.3.1 Skyer og nedbør

Nedbør er samlebetegnelsen for alle former for vann som faller mot jordoverflaten. Størrelsen, formen og fallhastigheten på vannpartiklene bestemmer hvilken kategori nedbøren havner i. Det kan være for eksempel være regn, yr eller snø. Det er slik sett intet klart skille mellom nedbør og skyer (Dannevig og Holm, 2019).

Skyer kommer av vanndamp som kondenserer. Varm, fuktig luft stiger opp i atmosfæren der det er mindre trykk. Dette fører til at denne luften utvider seg og avkjøles, dermed

kondenserer vannet. Den varme fuktige luften kommer av vann som fordamper fra jordoverflaten ved hjelp av solen (Meteorologisk institutt og Velle, 2019).

Mengden nedbør i løpet av et år er syklisk og sesongbasert. Dette er på grunn av de forskjellige årstidenes værkarakteristikk. Det påvirker hvor mye fordamping det er, samt hvor nedbøren har størst sannsynlighet for å ende opp (Foss, 2014).

2.3.2 Tilsig og avrenning

Tilsig er den mengden vann som ender opp i nedbørsfeltet. Dette varierer en del med årstidene og værkarakteristikk, samt at noe av nedbøren lagres i form av snø. Det er typisk stort tilsig om våren under snøsmeltingen og under de våte periodene om høsten. Tilsiget er også veldig avhengig hvor nedbørsfeltet befinner seg (Rosvold og Halleraker, 2020).

Det er en sterk korrelasjon mellom tilsig og avrenning, forskjellen er at avrenning er den mengden vann som faktisk ender opp i vassdraget. Avrenningen er derfor også sesongavhengig av samme grunner som tilsiget. Avrenning måles ofte i m^3/s (Rosvold, Bakken og Halleraker, 2020).

2.4 Strømpriser

Strømprisene i Norge bestemmes i det nordiske og nordeuropeiske kraftmarkedet, kaldt Nord Pool. I tillegg til å bestemme prisen er også Nord Pool ansvarlig for å regulere markedet. Tidligere strømpriser og utvikling over strømpriser kan finnes på Nordpool.no (Nord Pool, u.å.).

Prisene er bestemt av tilbudet og etterspørselen. Dette er påvirket av flere faktorer som produksjonen og strømforbruket i Norge og samarbeidende land, eksport av strøm til utlandet, dollarkurs, pris på CO_2-avgift ol. Også produksjon og strømpris i land utenfor vårt kraftmarked har innvirkning på vårt marked. Strømprisene blir også påvirket av været og klimaet ettersom dette er med på å påvirke produksjonen av de fleste fornybare energikilder. I tillegg reguleres også prisene opp på tider av døgnet der forbruket er størst. Dette er for å bidra til å redusere effektbelastningen på nettet (Mjønerud, 2019).

Enkelt forklart blir strømprisene høyere når etterspørselen (forbruket) er stort, for eksempel om vinteren når det er stort behov for romoppvarming. Motsatt blir prisene lavere om sommeren når behovet for strøm er mindre. Ved mye nedbør, eller mye vann i magasinene, blir strømprisen lav fordi vannkraft er lett tilgjengelig, og motsatt blir strømprisen ofte høy etter en tørr periode, selv om dette delvis utlignes med import fra sørligere land som da har hatt økt produksjon av solenergi. I andre land kan forbruket være størst i tørre og varme perioder da det går med mye elektrisitet til kjøling.

2.5 Statistikk

2.5.1 Regresjonsanalyse

Regresjonsanalyse er en statistisk analysemetode for å beskrive sammenhengen mellom en eller flere uavhengige variabler og en avhengig variabel. Den gir en matematisk funksjon som tilnærmer det virkelige forholdet mellom variablene. Det finnes flere typer regresjonsanalyse som lineær, polynom og eksponentiell. Disse benyttes i forskjellige scenarioer avhengig av hva som passer den virkelige modellen best (Braut, Dahlum, 2018).

2.5.2 R-kvadrat

R-kvadrat er en koeffisient i statistikk som sier noe om hvor mye de virkelige dataene avviker fra regresjonsmodellen. Det er et tall mellom 0 og 1, hvor en verdi på 1 vil si at regresjonsmodellen passer dataene perfekt, altså ingen varians. Den noteres ofte som R^2. (Wikipedia, 2021b)

Datasettet inneholder punktene $[y_1 \dots y_n] = y_i$, og verdier fra regresjonslinjen $[f_1 \dots f_n] = f_i$. Den tar én og trekker fra forholdet mellom variansen fra regresjonslinjen og variansen fra gjennomsnittet. En generell formel for R-kvadrat er:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{regresjon}}{SS_{totalt}} \tag{8}$$

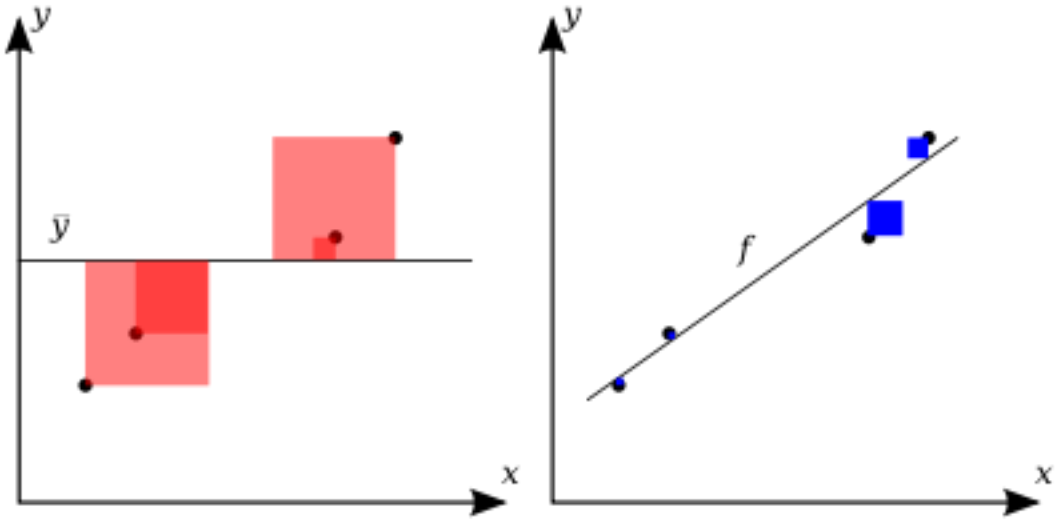
Der

$$SS_{regresjon} = \sum_{y_i}(y_i - f_i)^2 \tag{9}$$

og

$$SS_{totalt} = \sum_{y_i}(y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (10)$$

SS står for «sum og squares», ettersom verdiene kvadreres.



Figur 2.5: Oversikt over R-kvadrat utregning (Wikipedia, 2021c) CC BY-SA

3 Case

3.1 Hafslund Eco

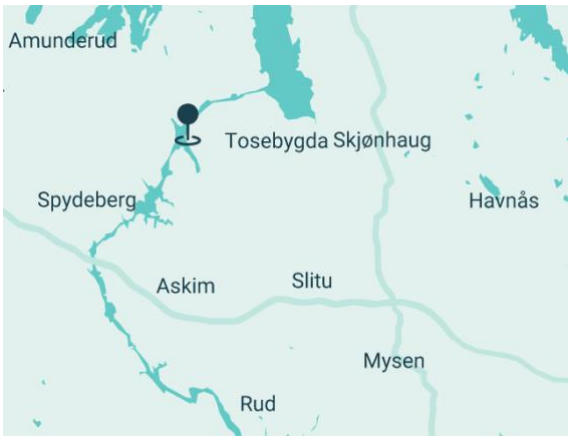
Hafslund Eco er Nordens største kraftselskap som utelukkende driver med fornybar energi. Total produksjon er på 21 TWh i året, der 18 TWh er vannkraft. Hafslund Eco eier 57,2 % av Hafslund Eco Vannkraft (tidligere Eco energi og Eidsiva Vannkraft), og drifter vannkraftverk over store deler av landet. (Hafslund Eco, u.å. a)

3.2 Kraftverkene i denne oppgaven

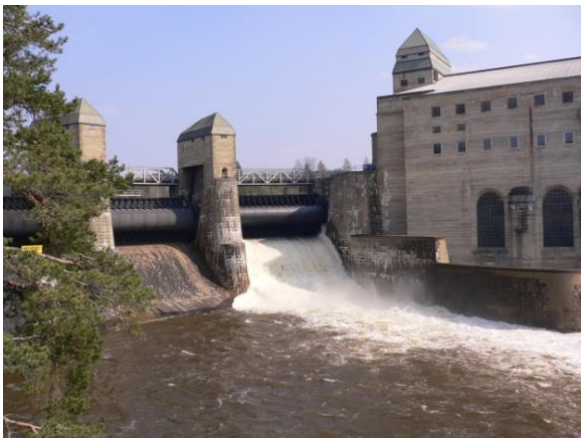
Området oppgaven tar for seg er nedre Glomma, og nærmere bestemt området sør for innsjøen Øyeren. Her befinner det seg fire ulike kraftverk eid av Hafslund ECO med andre parter involvert. Disse er klassifisert som elvekraftverk og har dermed i svært liten grad noen form for reguleringsevne. Dette fører til at kraftverkene er ganske avhengige av været og hverandre.

3.2.1 Solbergfoss

Solbergfoss er det øverste kraftverket i området. Årsproduksjonen er 1055 GWh. Fallhøyden i kraftverket er 20 meter.



Figur 3.1: Kartet viser hvor langs Glomma Solbergfoss kraftverk er lokalisert
Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse.



Figur 3.2: Bildet viser Solbergfoss kraftverk (Wikipedia, 2020b) CC BY-S.

Kraftverket består av en eldre del og en nyere del. Den eldre delen (Solbergfoss I) ble ferdigstilt i 1924 med sju aggregater, og var i sin tid et enormt kraftverksprosjekt. Senere ble det utvidet med 6 aggregater i 1959. Den nyere delen (Solbergfoss II), bestående av et aggregat med samme kapasitet som alle de 13 aggregatene i den gamle delen, sto ferdig i 1985 og har en egen kraftstasjon i fjell øst for Solbergfoss I. I dag benyttes Solbergfoss I først og fremst ved flom (NVE, 2016).

Fra 2003 til 2020 ble det gjennomført en del oppgraderinger på det gamle anlegget. Dette var for å optimalisere det etter et tap av fallhøyde som kom etter at FKF ble bygget ut. Da ble 12 av 13 løpehjul byttet ut, noe som førte til en økning i produksjonen på 2,7 % (Hafslund Eco, u.å. b).

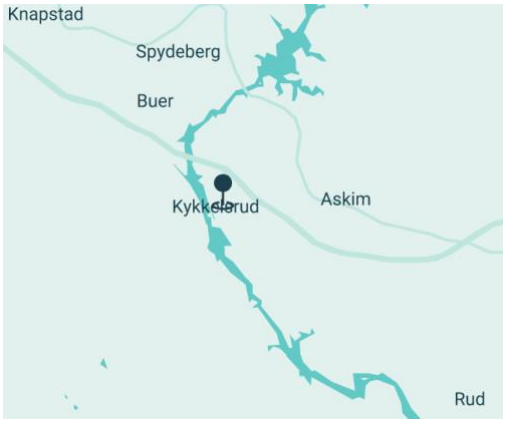
Solbergfoss er også det vannkraftverket hvor vannføringen styres fra. Vannføringen herfra dikterer hvor mye som er tilgjengelig for de andre kraftverkene fordi de ligger i samme vassdrag.

Tabell 3.1: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Solbergfoss.

Solbergfoss	Slukeevne m³/s	Effekt MW	Turbintype
G1–G9 og G11–G13	50	9	Francis
G10	60	11	Francis
G14	630	94	Kaplan
Totalt	1290	213	

3.2.2 Fellesanlegget Kykkelsrud-Fossumfoss (FKF)

FKF er det andre kraftverket i rekken av kraftverkene i denne oppgaven. Årsproduksjonen er på 1324 GWh. Fallhøyden i kraftverket er 26,5 m. Tidsforskyvningen, tiden det tar for vannet å renne fra Solbergfoss til FKF er ca. 1,5 time.



Figur 3.3: Kartet viser hvor langs Glomma FKF er lokalisert.
Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse

Figur 3.4: Bilde av FKF kraftverk
Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse

Det originale kraftverket begynte sin utbygging i 1900, men aggregatene fra det originale kraftverket benyttes ikke i dag da de siste ble tatt ut av drift i 2008. Det ble bygget to nye aggregater i 1962 og et tredje i 1982. Det siste aggregatet ble ferdigstilt i august 2011 og ligger i et eget bygg i den samme inntakskanalen. Alle kraftstasjonene ligger i dagen (Hafslund Eco, u.å. b)

Tabell 3.2: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i FKF

FKF	Slukeevne m³/s	Effekt MW	Turbintype
G1-G2	240	75	Kaplan
G3	360	81	Kaplan
G4	170	39	Kaplan
Totalt	1010	270	

3.2.3 Vamma

Vamma er nummer tre i rekken av kraftverkene i denne oppgaven. Årsproduksjon på 1580 MWh, og er med det Norges største elvekraftverk. Fallhøyden i kraftverket er 28,5 meter. Tidsforskyvningen fra FKF er ca. 2 timer.

Figur 3.5: Kartet viser hvor langs Glomma Vamma kraftverk er lokalisert.
Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse

Figur 3.6: Bildet viser Vamma kraftverk
Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse

Kraftverket består av tre forskjellige deler bygget på forskjellige tidspunkter. Den gamle delen av kraftverket var ferdig i 1944 og består av 10 aggregater. I 1971 sto aggregat 11 klart til bruk, med omtrent lik kapasitet som de gamle aggregatene samlet. Aggregat nummer 12, som består av Norges største Kaplanturbin, er den foreløpig siste endingen gjort i Vamma. Den begynte i 2015 og aggregatet ble åpnet i 2019. Dette aggregatet ligger i et eget bygg på vestsiden av elva, og er slik sett en egen kraftstasjon ved den opprinnelige kraftstasjonen. Alle kraftstasjonene ligger i dagen (Hafslund Eco, u.å. b).

Kraftverket har et lite inntaksmagasin som kan brukes til kortvarig regulering.

Tabell 3.3: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Vamma.

Vamma	Slukeevne m^3/s	Effekt MW	Turbintype
G1–G6	53	11	Francis
G7–G8	52	12	Francis
G9–G10	53	13	Francis
G11	455	110	Kaplan
G12	500	130	Kaplan
Totalt	1450	357	

3.2.4 Hafslund og Sarp

Hafslund og Sarp er det fjerde og nederste av kraftverkene i denne oppgaven. Årsproduksjonen er på 188 GWh. Fallhøyden er på 20,5 meter. Tidsforskyvningen fra Vamma er ca. 8,5 time.

Figur 3.7: Kartet viser hvor langs Glomma Hafslund og Sarp kraftverk er lokalisert. Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse.

Figur 3.8: Bildet viser et bilde av Hafslund kraftverk Foto: Hafslund Eco, gjengitt med tillatelse.

Hafslund og Sarp er to forskjellige kraftverk som begge utnytter fallet i Sarpfossen, og befinner seg i samme område. Hafslund Produksjon AS og Orkla AS eier 50 % hver av Sarp kraftverk, mens Hafslund Eco eier 90 % av Hafslund kraftverk.

Utbyggingen med Hafslund kraftverk ble startet i 1896 og kraftverket ble satt i gang i 1899. dermed er kraftverket et av Norges eldste vannkraftverk. Hafslund består i dag av fire aggregater som ble rehabilitert imellom 1999 og 2002. Sarp består av et aggregat som begynte bygging i 1978. Det er også en pågående oppgradering, som startet vinteren 2019/2020 av to av aggregatene i kraftverket. Dette skal øke produksjonen med 7,5 GWh og effekten med 3,6 MW. Kostanden på oppgraderingen er beregnet til å være 44 millioner kroner (Hafslund Eco, u.å. b).

Hafslund og Sarp befinner seg mye lengre ned elva enn de andre kraftverkene, og avstanden er stor i forhold til avstanden mellom de andre kraftverkene. Dette vil si at også nedbørsfeltet er en del større. Det er også et naturlig magasin i denne delen av elva, uten noen form for reguleringsevne. Dette fylles og tømmes avhengig av vannstanden i elva.

Tabell 3.4: Tabellen viser en oversikt over slukeevne, effekt og turbintype i Hafslund og Sarp.

Hafslund/Sarp	Slukeevne m^3/s	Effekt MW	Turbintype
Hafslund G1-G4	50	8	Francis
Sarp	445	74	Kaplan
Totalt	645	106	

4 Metode

4.1 Programvarer benyttet i oppgaven

4.1.1 Excel

Det er benyttet Microsoft Excel for Mac, versjon 16.48.

Excel er et velkjent og brukervennlig program som har gode muligheter for sortering og grafisk fremstilling av data, regresjonsanalyse og mye mer. I tillegg kan dokumentene deles så flere kan jobbe med dem samtidig, noe som gjør det enkelt å samarbeide om jobben. (microsoft.com, u.å.). Dette var nyttige funksjoner for bearbeidelse av dataseriene i denne oppgaven, og dermed ble Excel benyttet som program. I tillegg var produksjonsdataene til Hafslund ECO i et Excel-dokument fra før.

4.1.2 SHOP

Det er benyttet SHOP versjon 13.5.4.d.

SHOP er et programverktøy for korttids produksjonsplanlegging for vannkraftverk. Programmet fokuserer spesielt på optimal bruk av vannkraftressurser (Sintef, u.å.). Dette programmet var derfor godt egnet til den delen av oppgaven som går på optimalisering av vannføringen og økonomi. Det er et program som benyttes av flere store kraftprodusenter i Norge.

SHOP kjøres i jupyterlab som er et open-source prosjekt som benyttes til utvikling av programmer. Det benytter blant annet kodespråket Python. I SHOP kodes det en egen modell av vannkraftverk ved hjelp av de over 600 forskjellige funksjonene som er tilgjengelige. Dette gjør det veldig fleksibelt, og man kan tilpasse modellen til mange forskjellige scenarioer.

4.2 Sortering av dataserier

Det originale dokumentet over produksjonsdata var i timeoppløsning og inneholdt data fra 01.01.2008 til 31.12.2020. Dette dokumentet inneholdt en del feil som måtte sorteres bort. Med over 100 000 rader var dette en krevende jobb. Det ble valgt å bruke en del kommandoer, men også å se over manuelt. Dette ble gjort på følgende måte:

4.2.1 Tidsperspektiv

Data fra før siste endring ble fjernet, siden det er irrelevante data for dagens produksjon i kraftverkene. Dataene ble beholdt i et eget dokument slik at de kunne brukes til å sammenlignes med nyere data, men ble ikke brukt i beregninger av produksjon.

For alle kraftverkene er data fra 11.05.2019 tatt med i produksjonsberegninger, ettersom det er da Vamma 12 ble satt i produksjon.

4.2.2 Flom

Vannføring ut over maksimal slukeevne ble også fjernet fra dataseriene. Dette ble gjort fordi alle aggregater da går for fullt uansett, og det er dermed ikke noe å forbedre i måten aggregatene styres på. I tillegg ville det blitt misvisende å inkludere denne vannføringen fordi det ville gitt veldig lav energiekvivalent. Dette var dermed irrelevant i denne oppgaven. Det ble valgt å fjerne alt over høyeste slukeevne, som er på 1025 m^3/s i FKF, fordi dette er det totale systemets maksimale slukeevne.

Dette ble gjort med kommandoen:

=HVIS(ELLER(ABS(‘Ark1’!$B3)<1;ABS(‘Ark1’!$B3)>1025);IT();’Ark1’$B3)

4.2.3 Feil grunnet upresise endringer

Om et aggregat endres midt i en time, vil endringen bidra med produksjon bare deler av timen, noe som vil resultere i lavere timesverdier enn forventet. Dette blir dermed misvisende data som ikke er ønskelig å ha med i beregningene. Det ble derfor fjernet dataserier der det

var endringer mellom to timer enn på mer enn 2 MWh. Dette ga stabile og relevante produksjonsdata.

Dette ble gjort med kommandoen:

=HVIS(ELLER(ABS('Ark1'!$N3-'Ark1'!$N2)>T2;ABS('Ark1'!$N3-'Ark1'!$N4)>T2;Ark1'!$N3<1);IT();Ark1'!$N3

4.2.4 Uønskede aggregatkombinasjoner

De forskjellige aggregatkombinasjonene gir forskjellige produksjoner og virkningsgrad, og noen er bedre enn andre. Det vil ved normale forhold aldri være ønskelig å kjøre anlegget under mindre enn optimal virkningsgrad, derfor ble de kombinasjoner som vanligvis ikke kjøres, fjernet fra modellen. Disse skilte seg en del ut fra grafene og ble dermed fjernet manuelt.

4.2.5 Opplagte feil

Alle rader der det manglet data for vannføring eller produksjon, ble fjernet ettersom dette ville påvirket gjennomsnittsverdiene og resultatene om de var med i utregningen. Dette ble gjort ved å søke opp verdiene deretter fjerne raden fra dataserien.

Andre datarader der et var synlige feil, som for eksempel at produksjon på hvert enkelt aggregat og total produksjon ikke stemte overens, ble også fjernet for å ikke påvirke resultatene.

Dette ble gjort ved å søke opp verdiene manuelt ettersom det var vanskelig å finne en kommando som dekker alle typer feil. Dermed sikret vi å få vekk alle ulogiske data ved å se over manuelt.

Verdier der vannføringen er 0, er opplagte feil. De verdiene ble fjernet i samme kommando som flomvannføring.

4.3 Produksjon, virkningsgrad og energiekvivalent

Først ble virkningsgraden og energiekvivalenten regnet ut. Dette ble gjort med henholdsvis formel 5 og formel 6 fra teorikapittelet.

Videre ble det laget grafer over produksjonen som en funksjon av vannføringen, virkningsgraden som en funksjon av vannføringen og energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen. Her ble det brukt de ferdig sorterte dataene for å unngå misvisende data. Det ble brukt punktdiagram med trendlinje. Til slutt ble det satt inn R^2, som er regnet ut av Excel.

4.4 Aggregatkombinasjoner

For å se på aggregatkombinasjoner ble dataene markert og sortert etter hvilke aggregater som var påskrudd og ikke til enhver tid. Dette ble gjort gjennom å sortere dataene med fargekoder etter hvilke aggregater som stod på. Hver mulig kombinasjon for påskrudde aggregater hadde en bestemt fargekode.

For å forenkle litt ble lignende aggregater sett under ett. Dette betyr at i FKF ble aggregat 1–2 sett under ett, mens aggregat 3 og 4 ble sett hver for seg. I Vamma ble aggregatene 1–10 sett under ett, mens aggregat 11 og 12 ble sett hver for seg. Dette vil si at hver av kraftverkene har åtte mulige aggregatkombinasjoner.

Videre ble dataene sortert etter fargene før det ble laget punktdiagrammer med trendlinje for hver farge.

4.5 SHOP-modellen

SHOP-modellen ble kodet med nødvendig data. Data for strømpris og reservoar i Øyeren ble funnet på nettet, mens resterende data ble tilsendt av Hafslund Eco. Det settes opp magasiner, kraftverk, generatorer, vannføring og begrensinger, som senere ble simulert og optimalisert i henhold til modellen. En nøyaktig gjennomgang av modellen finnes i vedlegg A.

4.5.1 Optimalisering med strømpris

Her ble det valgt noen tilfeldige uker med stabil vannføring og funnet strømprisene for de aktuelle ukene. Prisene ble hentet fra Nord Pool.

I modellen settes det bare inn verdiene for vannføring og begrensninger for regulering samt strømprisen for perioden. Videre simuleres det og optimaliseres.

4.5.2 Optimalisering uten strømpris

Det ble valgt å se på vannføringer mellom 400 og 1000 m^3/s. Dette er fordi det er ved vannføringer i dette området man kan påvirke mest hvordan man styrer produksjonen. Her settes strømprisen konstant til 100, slik at det kun er produksjonen som spiller inn i optimaliseringen.

5 Resultater

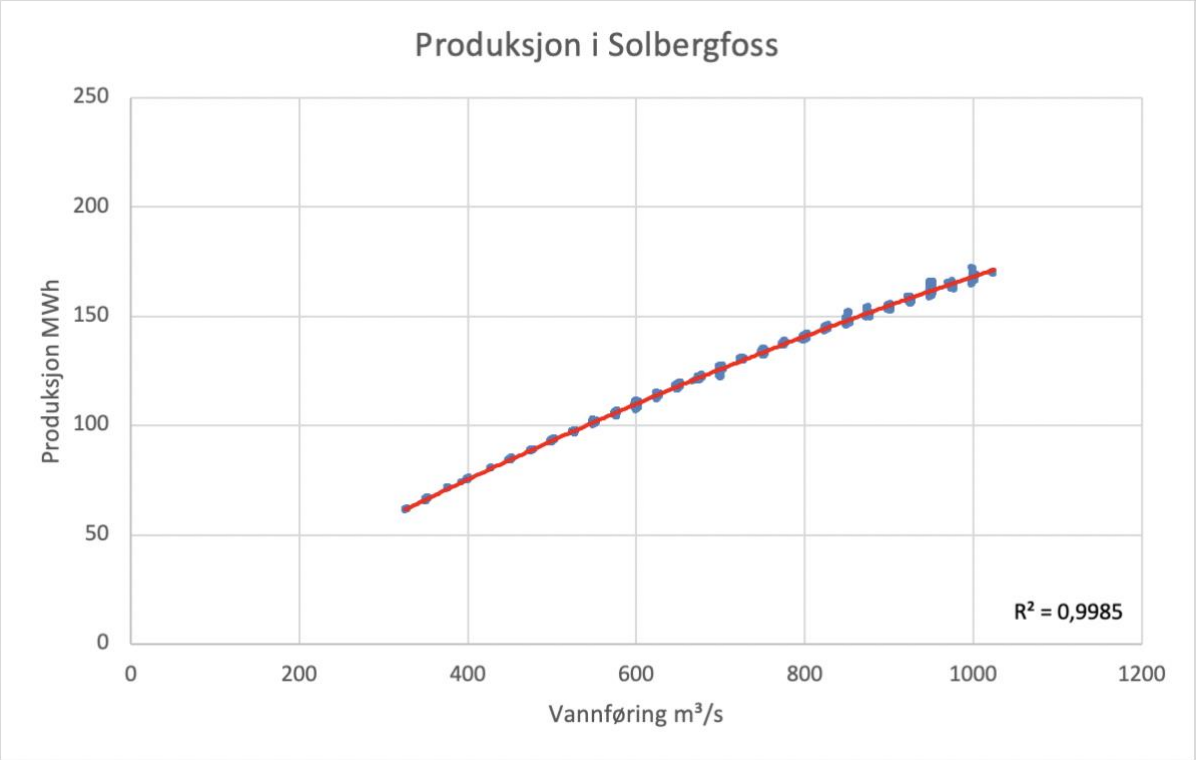
5.1 Vannføring

Dette kapittelet viser resultater av produksjonen, energiekvivalenten og virkningsgradene ved forskjellige vannføringer. Alt er grafisk fremstilt.

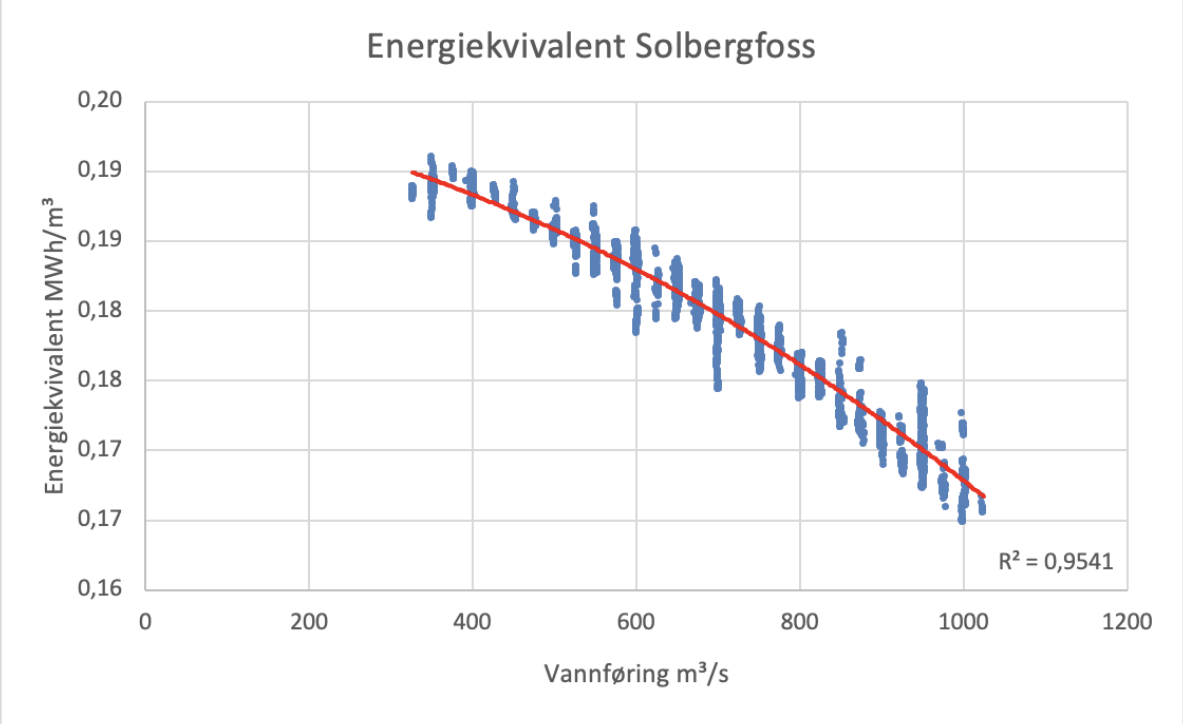
De blå punktene er datapunkter, mens de røde linjene er regresjonslinjene til datapunktene. Nederst i høyre hjørnet står R-kvadratet (R^2) til grafene.

5.1.1 Solbergfoss

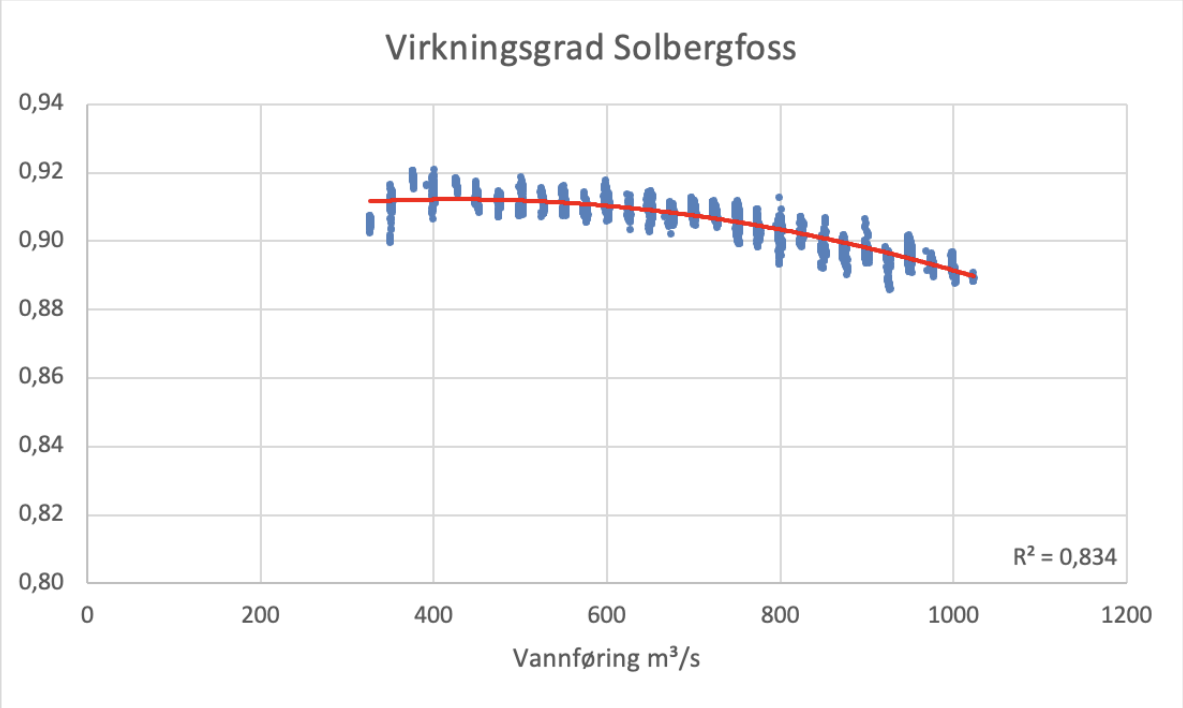
Produksjonen i Solbergfoss, som er illustrert i figur 5.1, er jevnt økede i takt med vannføringen, men ikke lineært. R-kvadratet ligger nært 1, så regresjonslinjen passer bra til datapunktene. Energiekvialenten, som er illustrert i figur 5.2, er jevnt synkende ettersom vannføringen stiger, men synker ikke lineært. R-kvadratet er bra, selv om det er noe variasjon fra regresjonslinjen til datapunktene. Virkningsgraden, illustrert i figur 5.3, er svakt synkende ettersom vannføringen øker. Den synker minst i begynnelsen, og mer og mer etter hvert når vannføringen passerer ca. 600 m^3/s. R-kvadratet er bra, men tyder på noe variasjon fra regresjonslinja til datapunktene.



Figur 5.1: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss.



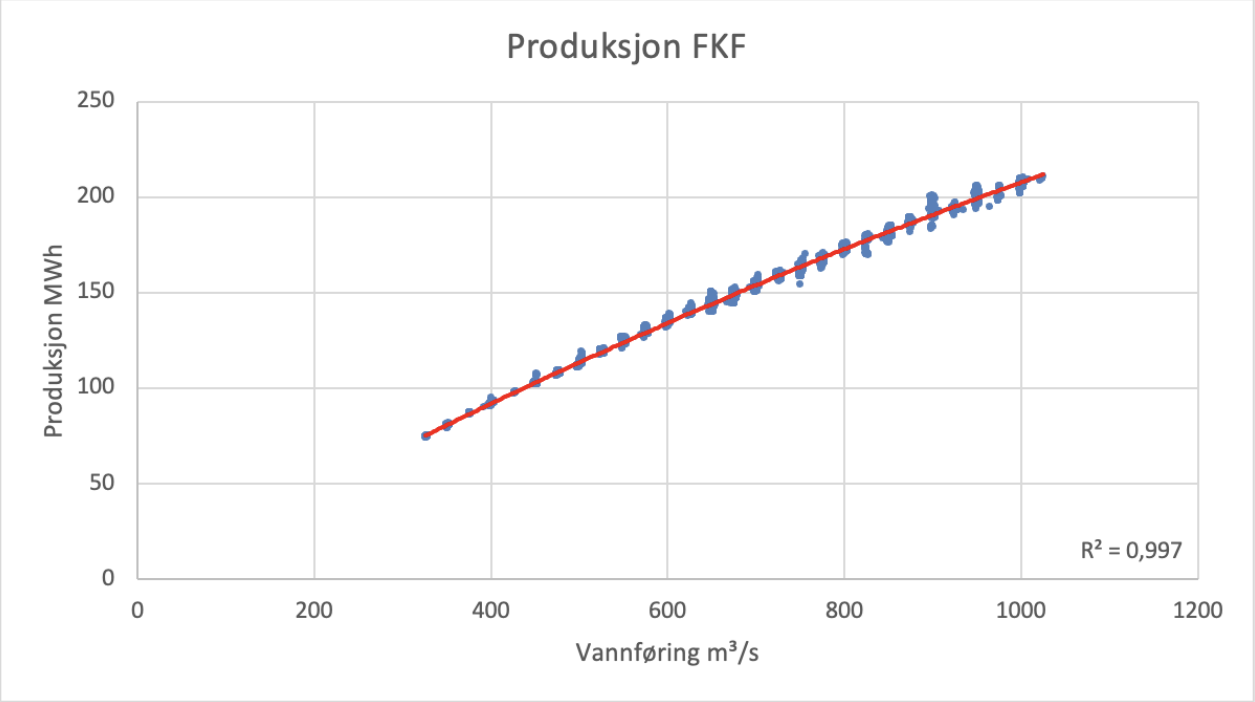
Figur 5.2: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss.



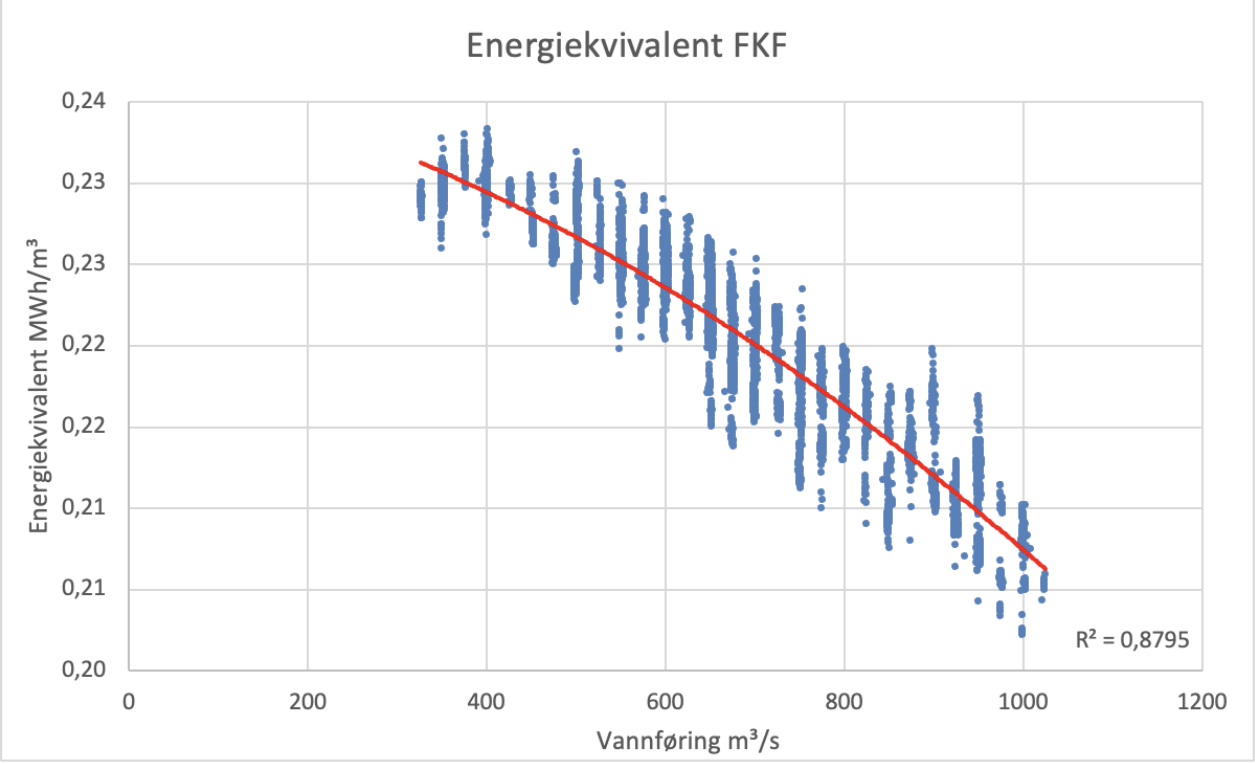
Figur 5.3: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Solbergfoss.

5.1.2 FKF

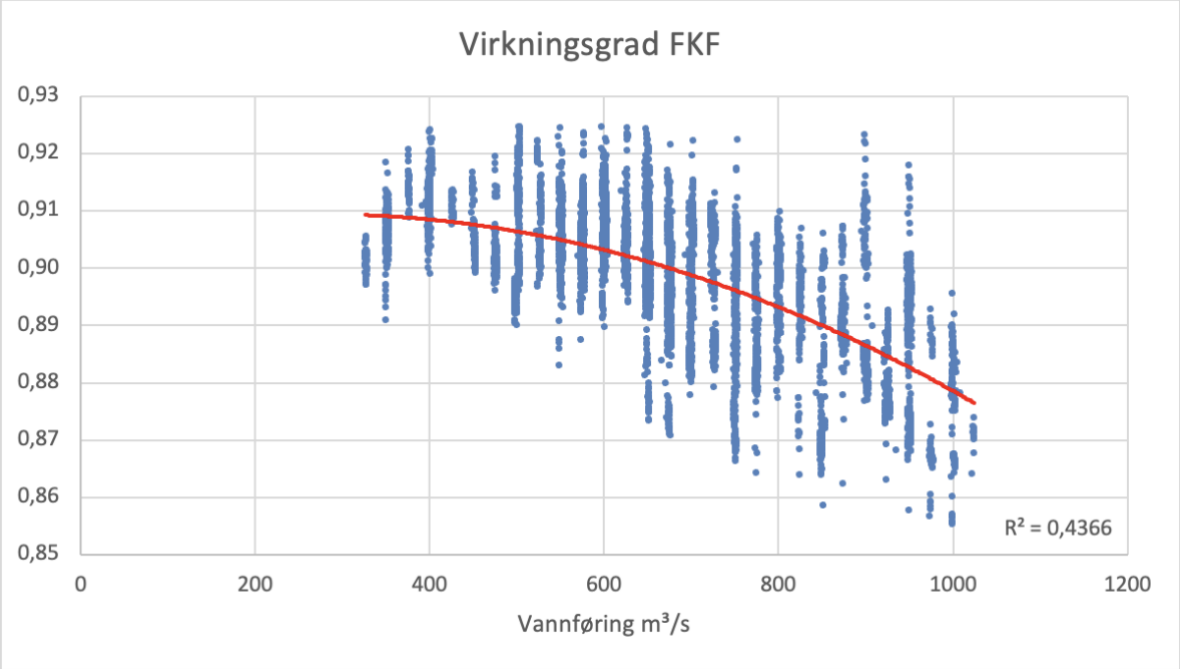
Produksjonen, illustrert i figur 5.4, er jevnt økede i takt med vannføringen, men ikke helt lineært. R-kvadratet ligger nært 1, så regresjonslinjen passer bra til datapunktene. Energiekvialenten, illustrert i figur 5.5, er jevnt synkende ettersom vannføringen stiger, men synker ikke lineært. R-kvadratet er nokså bra, selv om det er noe variasjon fra regresjonslinjen til datapunktene. Virkningsgraden, illustrert i figur 5.6, er svakt synkende ettersom vannføringen øker. Den synker minst i begynnelsen, og mer og mer etter hvert. R-kvadratet er på bare 0,4366. Dette viser at det er stor variasjon mellom regresjonslinja og datapunktene.



Figur 5.4: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i FKF.



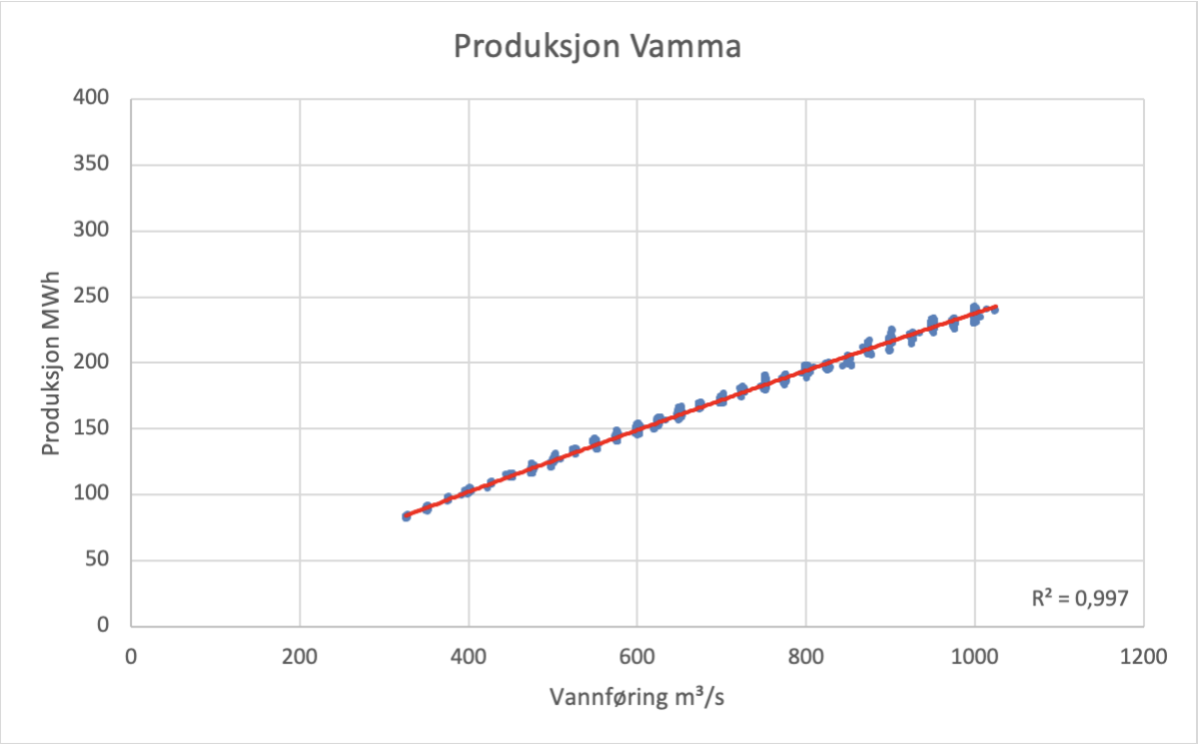
Figur 5.5: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i FKF.



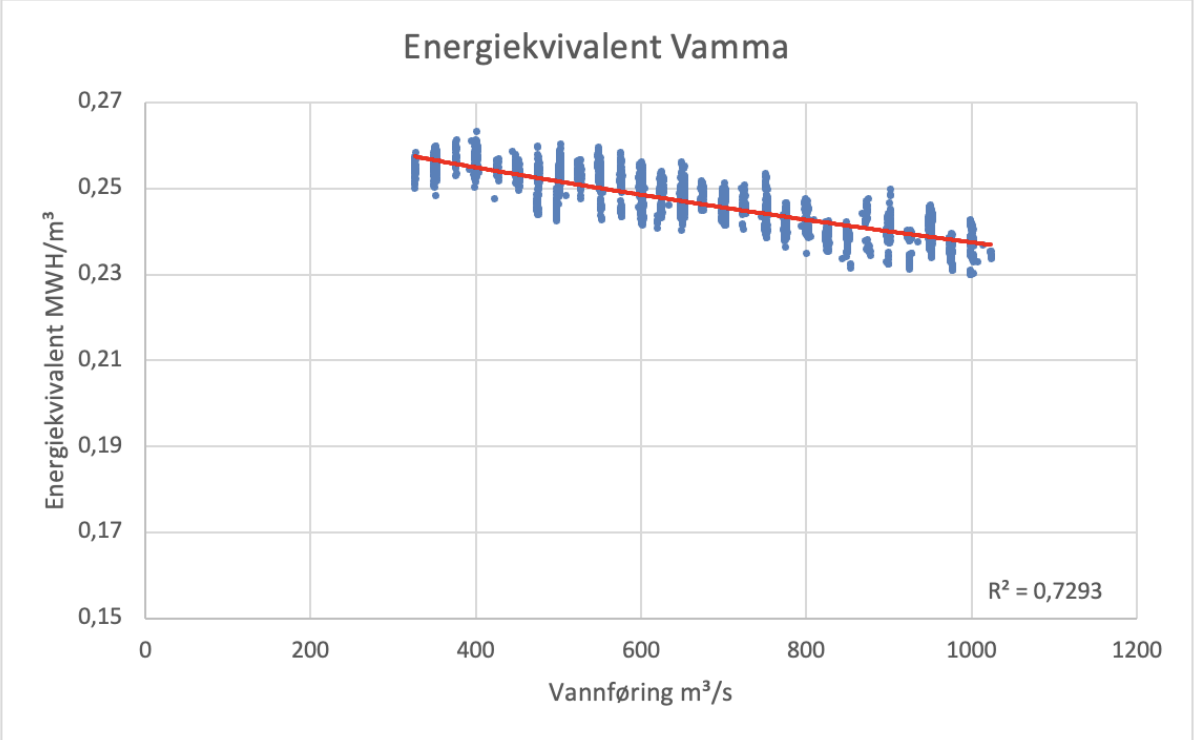
Figur 5.6: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i FKF.

5.1.3 Vamma

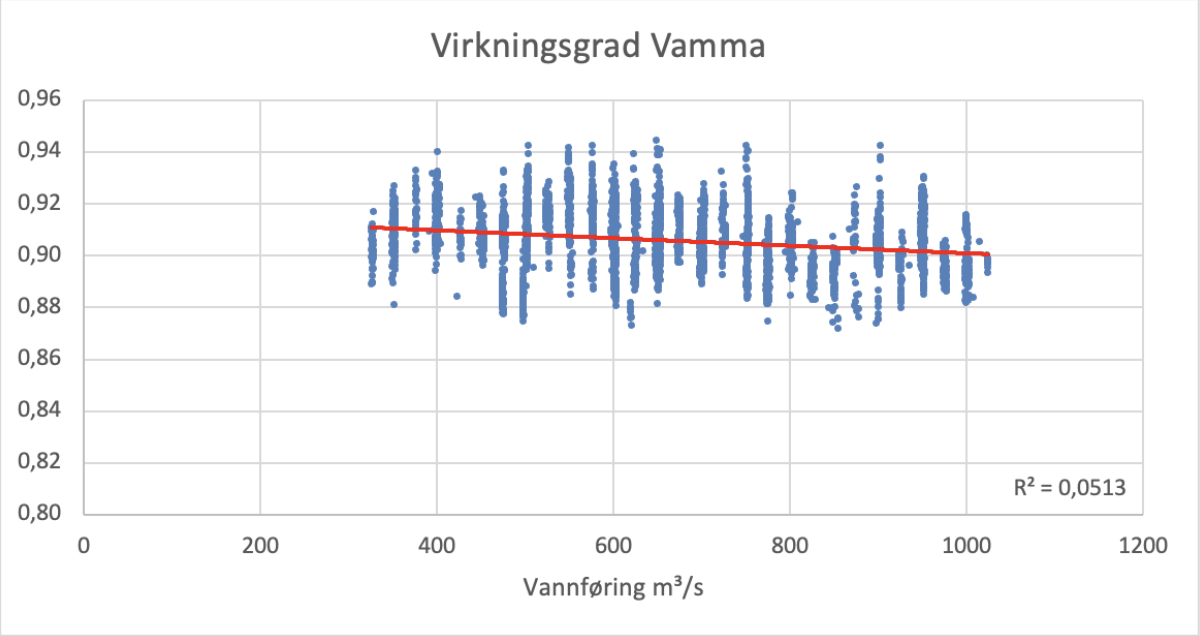
Grafen i figur 5.7 viser at produksjonen i Vamma er jevnt økede i takt med vannføringen, men ikke lineært. R-kvadratet ligger nært 1, så regresjonslinjen passer bra til datapunktene. Energiekvialenten, illustrert i figur 5.8, er jevnt synkende ettersom vannføringen stiger, men synker ikke lineært. R-kvadratet er bra, selv om det er noe variasjon fra regresjonslinjen til datapunktene. Virkningsgraden, illustrert i figur 5.9, er svakt synkende ettersom vannføringen øker. Den synker minst i begynnelsen, og mer og mer etter hvert. R-kvadratet er på bare 0,4366. Dette viser at det er stor variasjon mellom regresjonslinja og datapunktene.



Figur 5.7: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Vamma.



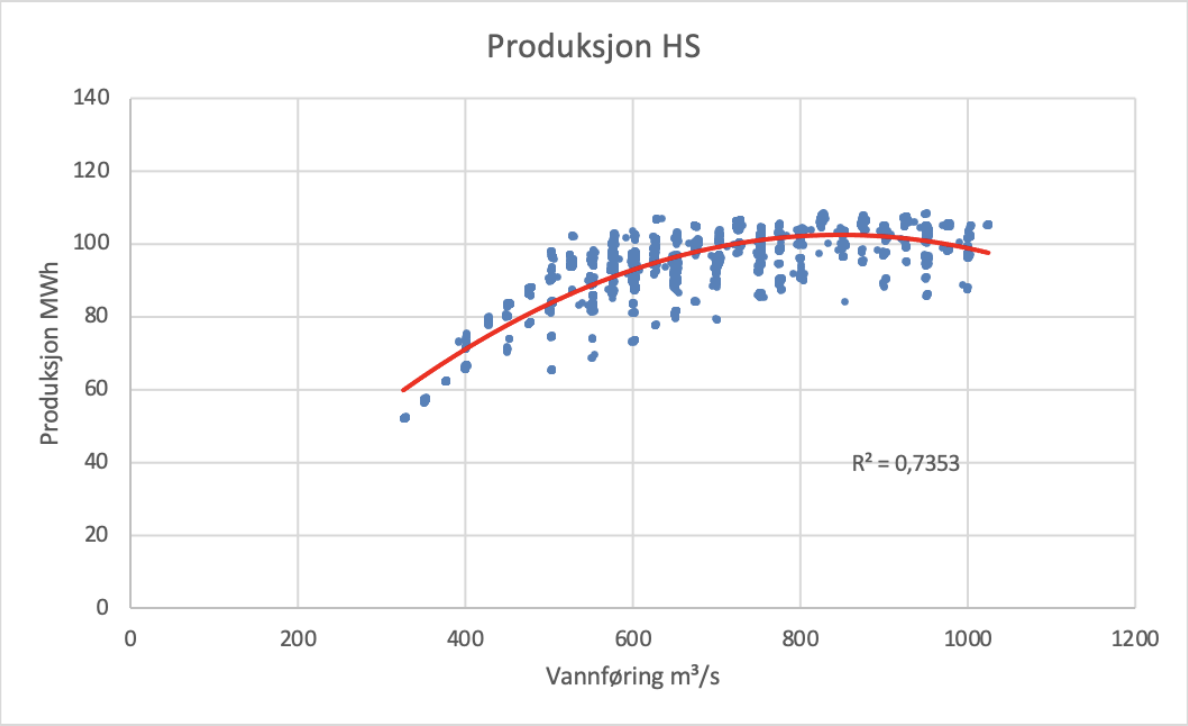
Figur 5.8: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Vamma.



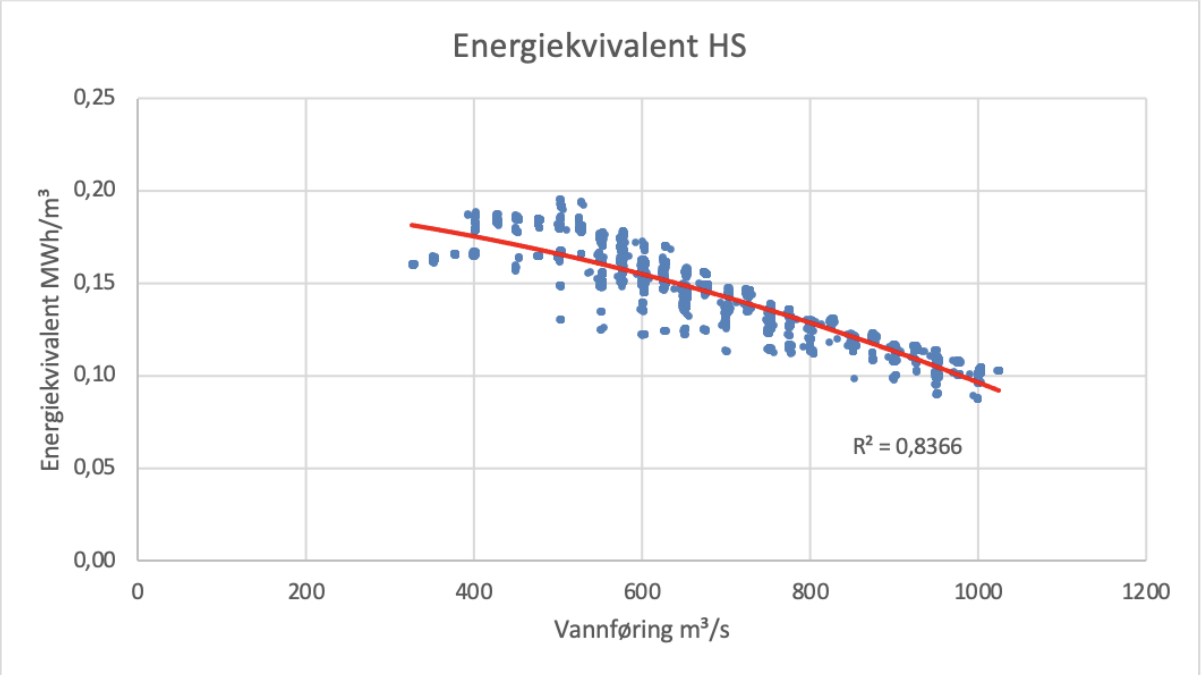
Figur 5.9: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Vamma

5.1.4 Hafslund og Sarp

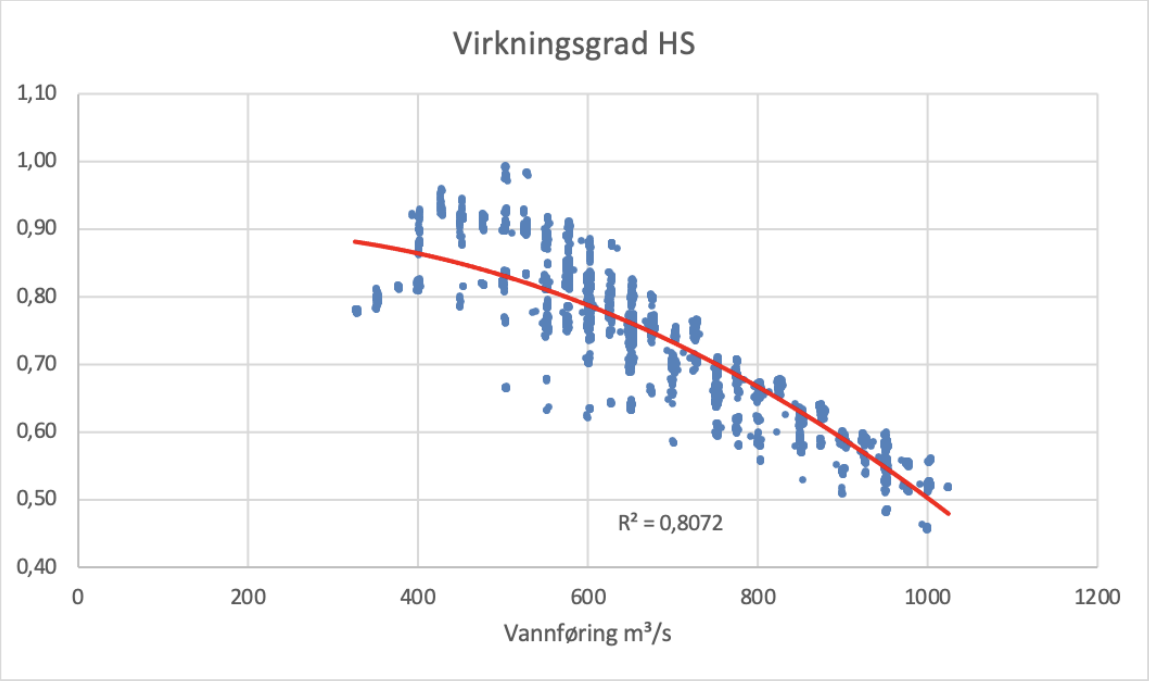
Grafen i figur 5.10 viser at produksjonen i Hafslund og Sarp er jevnt økede i takt med vannføringen, men ikke lineært. R-kvadratet er nokså bra. Regresjonslinja for energiekvialenten, illustrert i figur 5.11, er jevnt synkende ettersom vannføringen stiger, men synker ikke lineært. R-kvadratet er bra, selv om det er noe variasjon fra regresjonslinjen til datapunktene. Virkningsgraden synker ettersom vannføringen øker. Den synker minst i begynnelsen, og mer og mer etter hvert. R-kvadratet er nokså bra. Virkningsgraden til Hafslund og Sarp er illustrert i figur 5.12.



Figur 5.10: Figuren viser en grafisk fremstilling av produksjonen som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.



Figur 5.11: Figuren viser en grafisk fremstilling av energiekvivalenten som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.

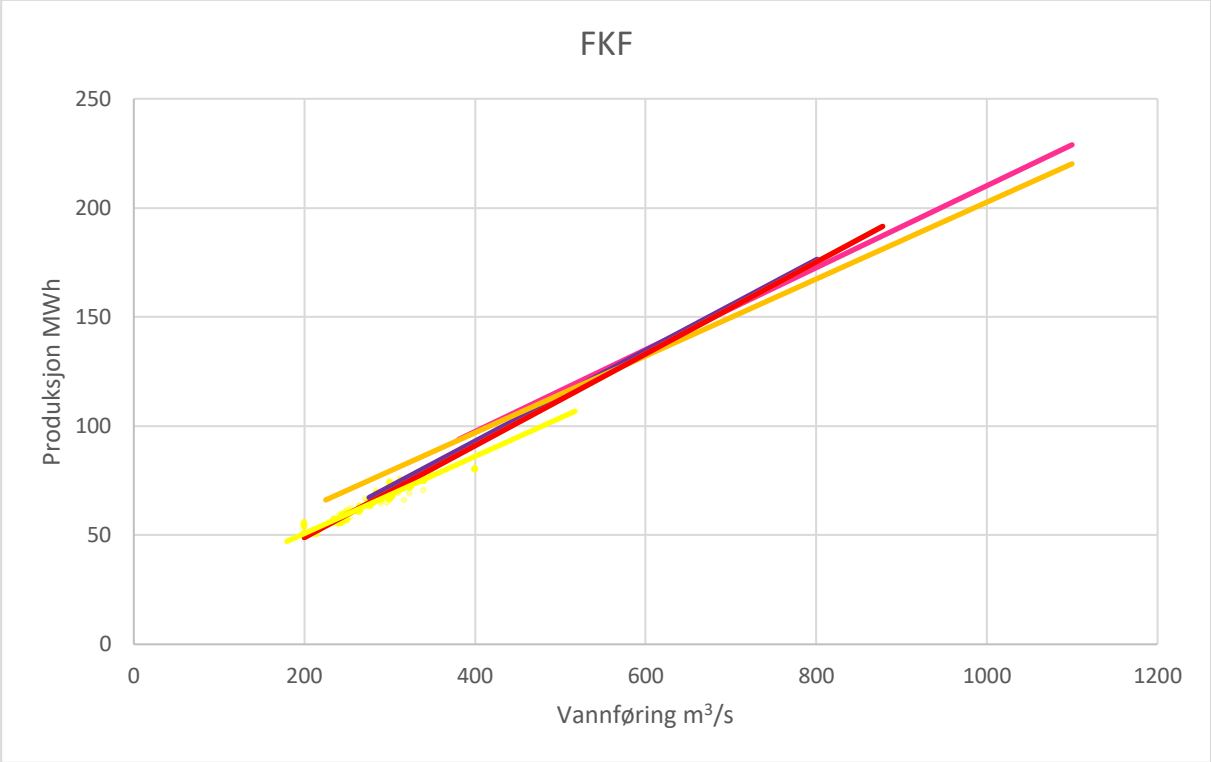


Figur 5.12: Figuren viser en grafisk fremstilling av virkningsgraden som en funksjon av vannføringen i Hafslund og Sarp.

5.2 Aggregatkombinasjoner

Dette kapittelet viser resultatene av analysene som er gjort av de forskjellige aggregatkombinasjonene. Alle resultatene er grafisk fremstilt, der man ser produksjonen med de forskjellige aggregatkombinasjonene i forskjellige farger.

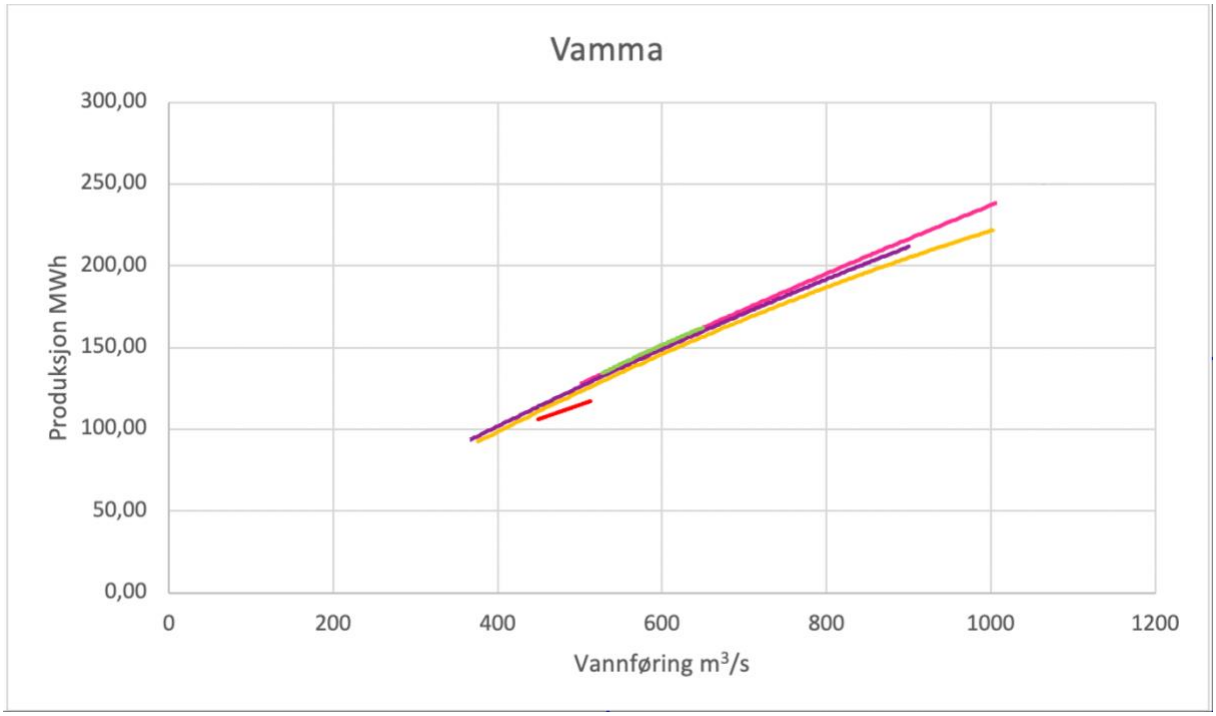
5.2.1 FKF



F*igur 5.13: Figuren viser produksjonen ved forskjellige* aggregatkombinasjoner i FKF. Rosa viser at alle aggregater er på, rød viser at aggregat 1 + 2 er på, gul viser at aggregat 3 er på, oransje viser at aggregat 1 + 2 og 3 er på, lilla viser at aggregat 1 + 2 og 4 er på. Øvrige kombinasjoner var det for lite datagrunnlag til å inkludere, dvs. disse kombinasjonene er sjelden i bruk.

For vannføringer over 800 m^3/s er produksjonen størst når alle aggregatene produserer. Dette er betydelig mer effektivt enn å bare kjøre 1+2 og 3, og jo forskjellen er større jo større vannføringen er. Ved vannføringer mellom 600 m^3/s og 800 m^3/s ser det ut til at å kjøre alle aggregater og aggregatkombinasjonen 1+2 og 3 er omtrent like gode. Ved vannføring mellom 400 m^3/s og 600 m^3/s er det små forskjeller, men kombinasjonene 1+2 og 4 og 1+2 og 3 er litt bedre enn kombinasjonene 1+2 alene og 3 og 4. For vannføringer lavere enn 400 m^3/s ser det ut til at kombinasjonen 1+2 alene er beste.

5.2.2 Vamma

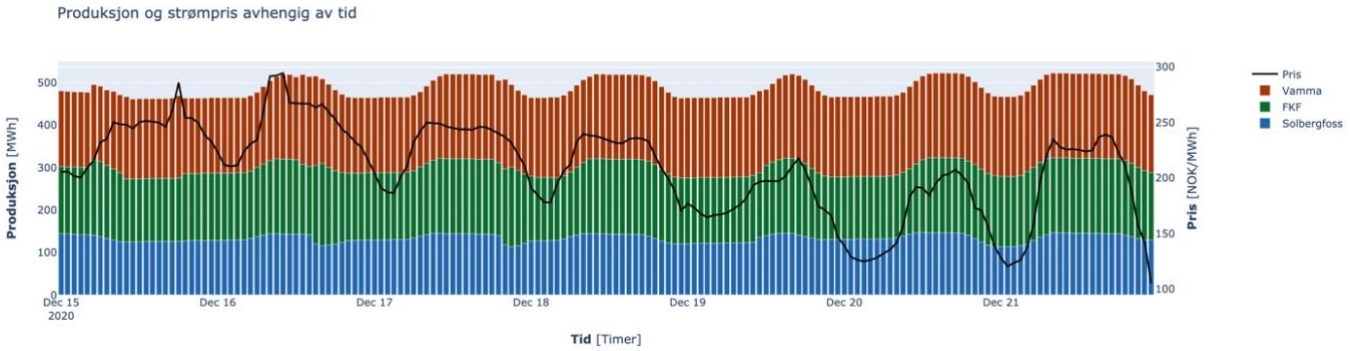


Figur 5.14: Figuren viser produksjonen ved forskjellige aggregatkombinasjoner i Vamma. Rød er aggregat 1–10, oransje er aggregat 1–10 og 11, lilla er aggregat 1–10 og 12, grønn er aggregat 11 og 12 og rosa er alle aggregatene. Øvrige kombinasjoner var det for lite datagrunnlag til å inkludere, dvs. disse kombinasjonene er sjelden i bruk.

Produksjonen er størst når alle aggregatene går når vannføringen er større enn 700 m^3. Ved lavere vannføringer, 500–700 m^3, ser det ut til at aggregat 11 og 12 er omtrent like effektivt som å kjøre alle samlet. Det minst effektive er å kjøre aggregat 1–10 ved de lavere vannføringene, og kjøre aggregat 1–10 og 11 ved de større vannføringene.

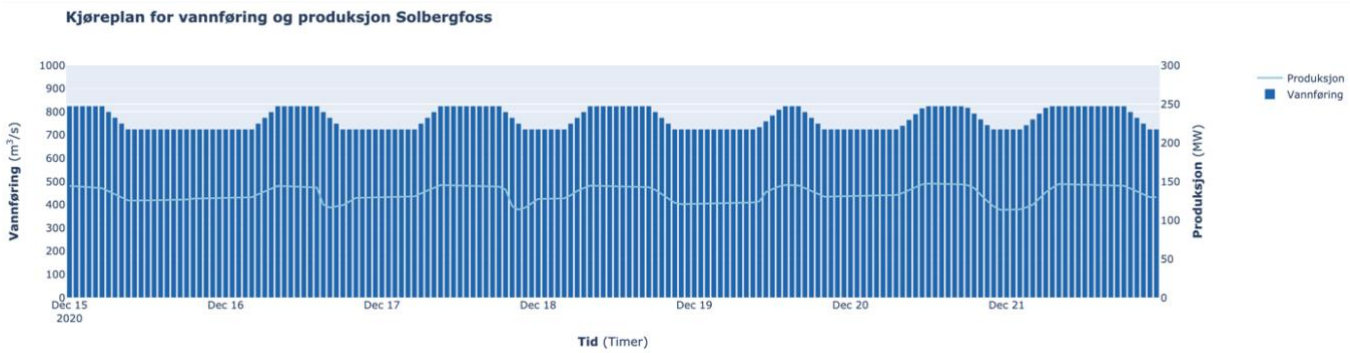
5.3 SHOP-modellen

5.3.1 Optimalisering med strømpris

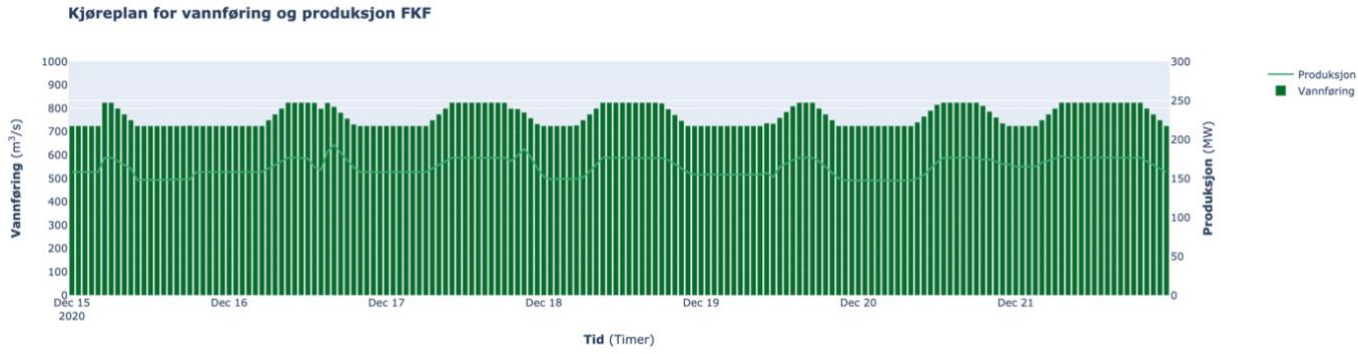


Figur 5.15: Grafen viser variasjonen i produksjon og pris over en tilfeldig tidsperiode.

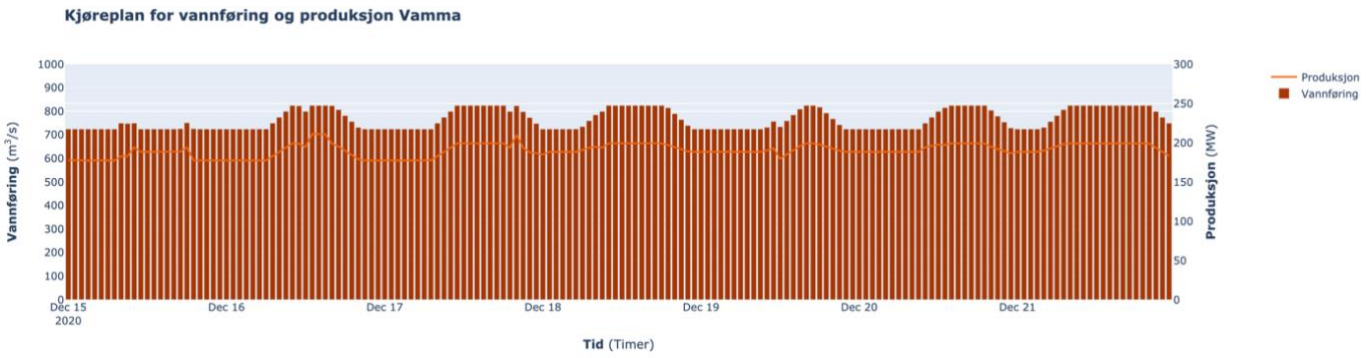
SHOP foreslår en kjøreplan der det produseres mest, i alle kraftverkene, når prisen er høy. Dette er illustrert totalt for alle kraftverkene samlet i figur 5.15. I figurene 5.16, 5.17 og 5.18 er det illustrert en kjøreplan for vannføringen i hvert enkelt av kraftverkene.



Figur 5.16: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i Solbergfoss.



Figur 5.17: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i FKF.

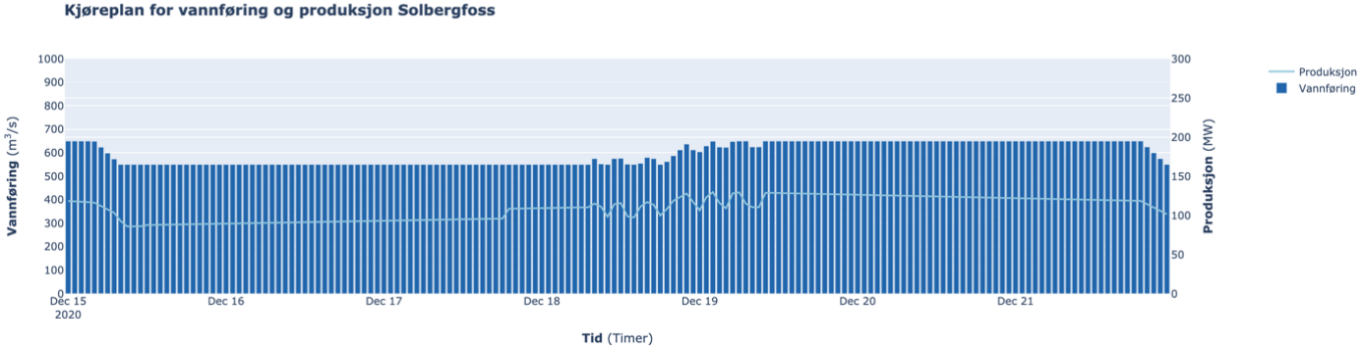


Figur 5.18: Grafen viser optimal produksjon i forhold til vannføringen i Vamma.

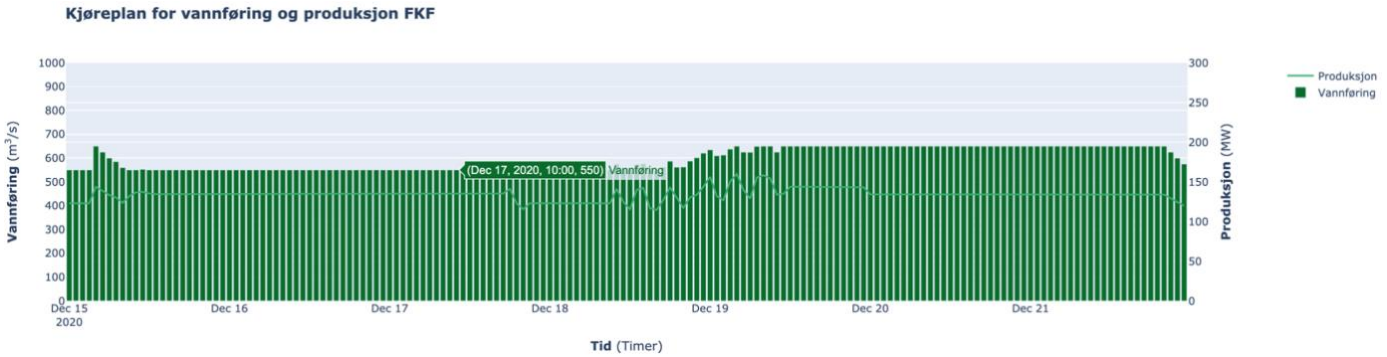
5.3.2 Optimalisering uten strømpris

Figur 5.19: Grafen viser variasjonen i produksjon og pris over en tilfeldig tidsperiode.

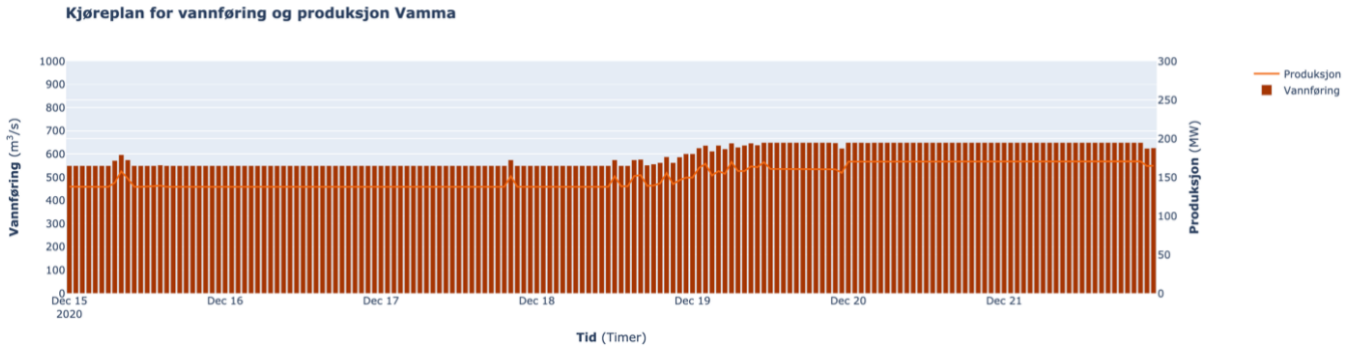
Her er prisen satt konstant slik at det kun er hva som er optimal vannføring som blir resultatet. Kjøreforslaget i SHOP viser at det lønner seg å starte med jevnt lavere produksjon, for så å halvveis skru opp produksjonen. Dette viser seg å totalt sett produsere mer enn å holde konstant, jevn produksjon. Dette lønner seg også for hvert enkelt kraftverk, vist i figurene 5.20, 5.21, 5.22.



Figur 5.20: Grafen viser optimal vannføring og produksjon i Solbergfoss.



Figur 5.21: Grafen viser optimal vannføring og produksjon i FKF.



Figur 5.22: Grafen viser optimal vannføring i Vamma.

Grafen fra SHOP i figurene 5.20, 5.21 og 5.22 viser hvordan vannføringen bør kjøres. Grafene viser at det lønner seg først ha litt mindre vannføring og deretter øke vannføringer for å produsere med høyest mulig virkningsgrad. Dette er felles for alle kraftverkene.

6 Diskusjon og analyse

6.1 Mulige usikkerheter i oppgaven

6.1.1 Nedbørsfelt

Fordi kraftverkene ligger nedenfor hverandre, vil vannføringen renne fra det ene kraftverket til det neste innen kort tid. Kraftverkene lenger ned vil i tillegg ha tilsig fra et større nedbørsfelt. Dermed vil kraftverkene ha et større tilsig jo lenger ned de ligger.

Vi valgte likevel å neglisjere dette ekstra nedbørsfeltet. Solbergfoss, FKF og Vamma ligger tett nok til å ha tilnærmet samme vannføring uansett. Vi vurderte å legge til tilsiget fra det ekstra nedbørsfeltet til Hafslund og Sarp, men vurderte det til at jobben med å samle data til dette, og ikke minst få presise nok tall til at de kunne brukes, var for stor. Likevel kan nok dette ekstra nedbørsfeltet være noe av grunnen til de store variasjonene i Hafslund og Sarp sammenlignet med de andre kraftverkene.

6.1.2 Sortering av data

Ettersom det var store datamengder, har det vært en utfordrende jobb å sortere. Vi valgte å bruke kommandoer for å gjøre store deler av sorteringen. Dette gjorde at vi er sikre på at vi ikke overså noen feil. Samtidig kan dette føre til at unødvendig mye data har blitt fjernet. Likevel har vi nok data til at det er bedre å sortere vekk noe for mye data enn for lite.

Til slutt ble dataene også gått over manuelt for å fjerne feil og unøyaktighet som kommandoer ikke kunne fjerne. Ettersom det var utrolig mye data vi bladde igjennom og leste, er det ikke utenkelig at vi har oversett noen feil. Likevel tror vi det er såpass få feil i en veldig stor mengde data at det ikke påvirker resultatet i nevneverdig grad.

6.2 Produksjon, virkningsgrad og energiekvivalent

Data i denne analysen er hentet fra 11.05.2019 ettersom det er da siste ending i Vamma sto ferdig. Vi kunne valgt å benytte data lenger tilbake i tid i Solbergfoss, FKF og Hafslund og Sarp i disse beregningene hvor vi ser på ett og ett kraftverk, men valgte å ikke gjøre det ettersom vi må benytte data fra samme tidsperspektiv i de senere beregningene der vi ser på alle kraftverkene samlet. Om vi hadde tatt med lenger dataserier der det er mulig, ville vi fått enda sikrere resultat. Likevel mener vi datagrunnlaget vi nå har med er mer enn godt nok til å få et sikkert resultat, og denne forenklingen sparte oss for mye arbeid.

6.2.1 Produksjon

Våre resultater viser at produksjonen øker i takt med vannføringen. Om man hadde hatt ubegrenset tilgang på vann, ville det vært best å produsere på maks slukeevne til enhver tid. Men, man ønsker ikke å bevege seg over maksimal slukeevne fordi undervannet da stiger og produksjonen faktisk kan synke som en følge av lavere fallhøyde.

6.2.2 Energiekvivalent

Energiekvivalenten blir større desto lavere vannføringen er. Dette er på grunn av at fallhøyden minsker ved høyere vannføringer, og det blir dermed mindre produksjon per kubikkenhet med vann. Utregningen av energiekvivalenten tar ikke hensyn til endringene i fallhøyde, og grafen synker derfor i tråd med brutto fallhøyde. Teoretisk betyr dette at om man ser bort fra tid, men kun har en gitt mengde vann som skal kjøres gjennom kraftverket, er det best å slippe gjennom vannet ved så lav vannføring som mulig. Dette er likevel vanskelig å gjennomføre i praksis ettersom gevinsten ved å ha høy utnyttelsesgrad ikke gir lønnsomt økt produksjon. Det er heller ikke mulig å styre over tid med tanke på lav reguleringsevne i elvekraftverkene.

6.2.3 Virkningsgrad

Virkningsgradskruvene fra kraftverkene synker i likhet med energiekvivalenten ved økende vannføring, men er i motsetning til energiekvivalenten avhengig av den momentane fallhøyden. Det at virkningsgraden synker, skyldes at de enkelte aggregatene når maksimal

slukeevne, og ifølge teorien blir virkningsgraden da litt mindre. Dette er grunnen til at Vamma har en mye flatere virkningsgradskurve enn de andre kraftverkene. Vamma har mye høyere slukeevne enn de andre kraftverkene, og derfor synker heller ikke virkningsgraden så mye.

Virkningsgradskurvene har en mye lavere R-kvadrat enn de andre grafene, noe som tyder på at det er mye variasjon. Det er en veldig jevn fordeling av punktene som grafen prøver å følge, som fører til at den ifølge R-kvadratet «passer dårlig». Vi velger fortsatt å benytte oss av tallene ettersom spredningen ikke er så stor, mellom 1 og 2 % fra regresjonslinjen, og de stemmer godt overens med typiske virkningsgrader for turbintypene.

Noe av usikkerhetene kan stamme fra at Solbergfoss og Vamma har to utløp, der nedre utløp renner ut litt lavere. For Solbergfoss har vi målinger på dette, og forskjellen er maksimalt 40 cm, som er en usikkerhet under 2 %. Vanligvis er forskjellen også lavere. I Vamma finnes det ingen høydemålinger på dette og det er derfor umulig å anslå noen tall på hvor stor innvirkning det har her. Dette kan være årsaken til at R-kvadratet er betydelig dårligere i Vamma enn i de andre kraftverkene.

6.2.4 Hafslund og Sarp

Grafene fra Hafslund og Sarp viser gode R-kvadrat verdier, men har større spredning enn de andre kraftverkene. Spredningen er helt opp mot 9 % på virkningsgradskurven. Vi vet om en del naturlige årsaker som kan føre til denne spredningen, og det gjør det vanskelig å vite hvor kurven egentlig skal ligge. Det er også mye lavere slukeevne enn de andre kraftverkene. Siden flomvannføringer er data vi uansett fjerner fra de andre kraftverkene vil det gi modellen lite og ha med Hafslund og Sarp da kraftverket nesten alltid må kjøre for fullt. Vi har derfor valgt å utelatte Hafslund og Sarp fra andre beregninger der vi ser på totalen i alle kraftverkene og samspillet mellom dem.

Årsakene til den store usikkerheten i Hafslund og Sarp er kjente. En av grunnene er, som nevnt, avstanden mellom Hafslund og Sarp og de andre kraftverkene. På denne elvestrekningen er det et naturlig magasin som fylles og tømmes avhengig av vannstanden i elva. Det er helt uten regulering, og det finnes heller ingen data på området. En annen grunn er isdannelsene som ofte oppstår rundt kraftverkene om vinteren. Dette kan begrense

vannføringen som er mulig å kjøre. Vi er veldig sikre på at dette er det som bidrar til usikkerhetene rundt Hafslund og Sarp.

6.3 Aggregatkombinasjoner

Forenklingen som ble gjort her med at noen aggregater ble slått sammen og sett under ett, gjør at vi ikke har fått sett på alle virkelige aggregatkombinasjoner slik de er i praksis. De som er slått sammen, er av samme type og vil dermed produsere tilnærmet likt. Dette er grunnene til at vi har kunnet slå dem sammen. Dette vil gi en god pekepinn på aggregatkombinasjonene i praksis, men det vil likevel være noe usikkerhet knyttet til hvordan det påvirker produksjonen å fordele produksjonen over flere av de like aggregatene kontra å bare produsere på ett eller få av dem.

Solbergfoss og Hafslund og Sarp ble ikke tatt med i aggregatkombinasjonsanalysen ettersom det ikke var tilstrekkelige eller detaljerte nok data til å kunne gi en god indikator på hvordan produksjonen er på forskjellige aggregatkombinasjoner.

6.3.1 FKF

Resultatene her er veldig logisk ettersom det ved store vannstander er lønnsomt å kjøre flest mulig aggregater.

Vi kan derfor si at det alltid er lurt å kjøre aggregat 1 + 2, og ved middels vannføring er det lurt å skru på enten aggregat 3 eller 4 i tillegg. Ved stor vannføring er det best å la alle fire aggregatene gå.

Vi stusser litt på at aggregat 4 ikke er kjørt mer alene ettersom dette er det nyeste og antatt beste aggregatet. I tillegg ser vi at 1 + 2 og 4 er bedre enn 1 + 2 og 3, og dermed er det naturlig å anta at aggregat 4 er et bedre aggregat enn aggregat 3 også i produksjon alene. Ettersom datagrunnlaget går helt tilbake til 2011, burde det vært nok datapunkter også for aggregat 4. Vi har ikke klart å finne noen årsak til at aggregat 4 er tatt i bruk så lite, og vi tror derfor at det her har skjedd en uoppdaget feil enten i vår behandling av dataen eller i dataen tilsendt av Hafslund Eco.

Det store datagrunnlaget for dette kraftverket er stort, og vi anser derfor resultatet som veldig pålitelig til tross for den mulige feilen med aggregat 4. I tillegg er det i utgangspunktet færre aggregater, noe som vil si at forenklingene vi har gjort med å se på flere aggregater under ett vil ha mindre innvirkning i dette kraftverket. Dette er dermed et godt resultat som gir en god indikator på hva som er best. Resultatet er også mulig å benytte praktisk.

6.3.2 Vamma

Ettersom det siste aggregatet i Vamma åpnet i 2019, er ikke datapunktene dette er basert på så veldig mange. Dette skaper litt usikkerhet, men resultatene her har samme tendenser som i FKF. Dette er med på å underbygge at resultatene er riktig.

Resultatene tyder på at det er lurt å inkludere det nyeste aggregatet i produksjonen uansett hvor stor vannføringen er, og, i likhet med i FKF, er det lurt å kjøre alle aggregatene ved store vannføringer.

Det er mange datapunkter fra de «gode» seriene, få av de fleste dårligere. Dette tyder på at det allerede kjøres mye på de gode aggregatkombinasjonene. Likevel er det en del punkter på linje som viser 1–10 og 11, så de kan med fordel kjøre mer 11 og 12, 1–10 og 12 eller alle i stedet.

Aggregatkombinasjoner 11 + 12 er kjørt lite, til tross for at dette viser seg å være en god kombinasjon ved middels store vannføringer. Dette kan skyldes at aggregat 12 er nokså nytt og dermed kjørt i kortere tidsperiode.

6.3.3 Forbedring av aggregatkombinasjoner

Som en forbedret analyse av aggregatkombinasjonene kunne vi laget en modell med alle aggregatene i SHOP. På denne måten kunne SHOP ha tatt seg av optimaliseringen av aggregatene og gitt et mer nøyaktig bilde på hvordan de skal styres. Dette hadde blitt mer nøyaktig og vi kunne fått en kjøreplan på aggregatene. Dette ble ikke gjort på grunn av begrenset tid og kunnskap om SHOP, men skulle vi gjort oppgaven om igjen ville vi vurdert å benytte SHOP også til analyse av aggregatene.

6.4 SHOP-modellen

Vi kunne svært lite koding fra før, så utgangspunktet for å bruke SHOP i oppgaven var ikke det beste. Heldigvis var det med eksempler og grove skisser som gjorde at vi fikk lagt mye av grunnarbeidet selv. Vi lette oss frem til kommandoer som ikke var med i eksemplene, ellers fikk vi veiledning av Hans Ivar Skjelbred. Selv om det går an å lage en enda mer nøyaktig modell, har vi fått til en modell som simulerer kraftverkene i oppgaven godt nok, men vi utelukker ikke at ting kunne vært forbedret. Uansett sammenligner vi dataene relatert til andre resultater fra SHOP, så det vil fortsatt være overførbart til virkeligheten.

Dette underbygges også av resultatene, som er veldig like dataene fra Excel. Det er maksimalt 3,35 % avvik fra de oppgitte dataene. En sammenligning av disse dataene er vist i tabellen under.

Tabell 6.1: Tabellen viser data fra SHOP og de virkelige dataene fra kraftverkene.

Vannføring	Prod. Solbergfoss		Prod. FKF		Prod. Vamma		Total Forskjell	
m^3/s	SHOP	Oppgitt	SHOP	Oppgitt	SHOP	Oppgitt	MWh	%
400	73,78	75,72	90,79	92,10	101,77	102,50	3,98	1,47
450	82,34	84,72	101,97	103,10	112,90	114,90	4,81	1,59
500	90,68	93,65	112,49	116,20	125,96	126,20	6,92	2,06
550	98,63	101,31	123,05	126,91	137,67	138,30	7,17	1,96
600	106,37	109,42	133,50	136,92	149,34	150,09	7,22	1,82
650	113,89	117,92	143,79	146,52	160,78	162,12	8,10	1,90
700	121,05	125,54	154,48	156,39	171,92	173,98	8,46	1,86
750	127,80	133,60	162,88	164,98	182,88	184,67	9,69	2,01
800	134,42	140,92	172,08	175,65	193,68	194,89	11,28	2,21
850	140,01	148,52	181,20	183,47	204,39	205,15	11,24	2,09
900	145,39	154,30	190,12	196,20	215,58	219,42	18,83	3,30
950	150,09	162,19	198,75	201,35	226,43	231,68	19,96	3,35

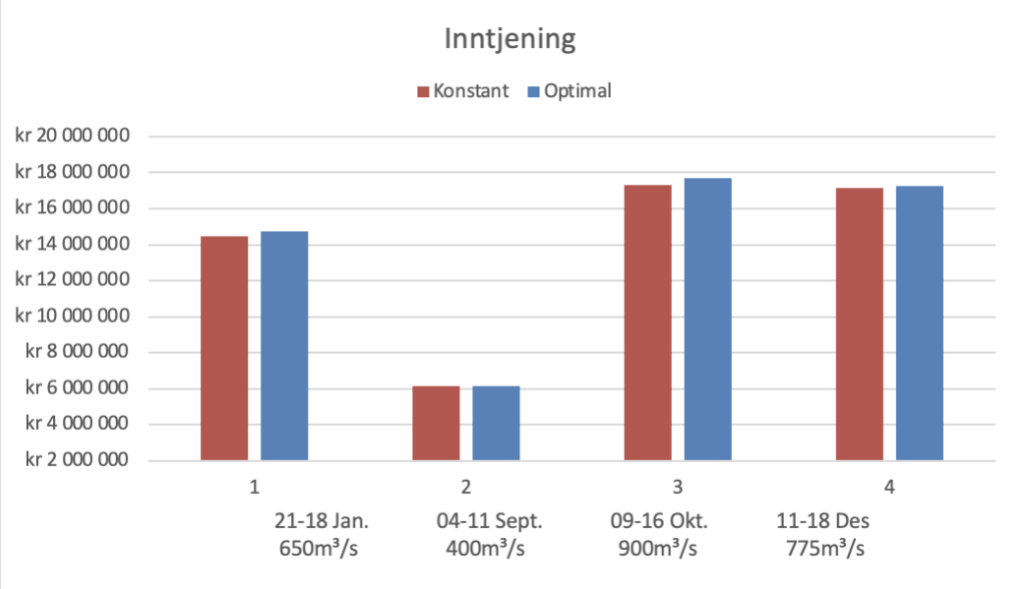
Vi valgte å presentere data i sesongbaserte kjøreforslag. Å lage en fasit på hvordan vannføringen til enhver tid skal kjøres er vanskelig fordi vi ikke vet hva verken strømprisen eller vannføringen blir. Det blir derfor veldig teoretisk og vanskelig og settes ut i praksis.

Vi valgte å se på perspektiver på en uke i modellene våre. Dette fordi en uke er lang nok tid til å gi god innsikt, men kort nok til at vi ikke trenger å se på andre faktorer som har påvirkning over tid, f.eks. vannstanden i Mjøsa, is om vinteren osv.

Tidsforskyvningen mellom kraftverkene er inkludert i SHOP, så det er ikke noe usikkerhet knyttet til dette.

6.4.1 Optimalisering med strømpris

Vi har sett på hvor mye større inntekt Hafslund Eco kunne fått om de hadde kjørt optimalt vurdert ut fra strømprisen i forhold til det de faktisk gjorde disse ukene. Her følger vannføringen naturligvis strømprisen ganske tett, og det gir bedre gevinst enn konstant vannføring. Det er vanskelig å forutsi nøyaktig hvor mye mer man kan tjene, men opp mot 400 000 kr pr. uke er den største gevinsten vi fant.



Figur 6.1: Figuren viser forskjellene i inntekt når produksjonen skjer konstant sammenlignet med når produksjonen er optimaliser etter strømprisene. Økningen i inntjeningen for de respektive ukene er: 1: 261 510 kr, 2: 4078 kr, 3: 408 887 808 kr og 4: 128 312 kr.

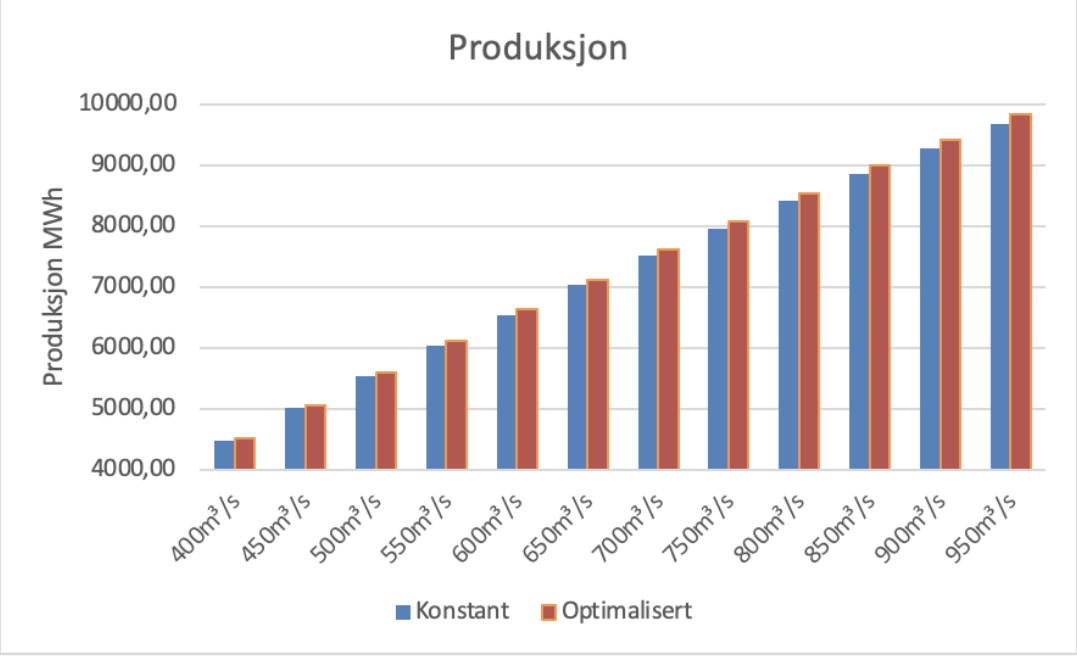
6.4.2 Optimalisering uten strømpris

Det skulle også undersøkes hva det optimale kjøremønsteret er for å få mest produksjon innenfor gitte vannføringsintervaller. Noe som går igjen, er at det kjøres så lav vannføring som mulig i den første perioden, og etter halve tiden trappes vannføringen opp. Vi går ut fra

at dette er for å optimalisere fallhøyden, og at man da får mest ut av vannet. Dette underbygger også funnene fra energiekvivalentene som viste at vannet blir bedre utnyttet når det kjøres så lite vann som mulig.

Tabell 6.2: Tabellen viser forskjellene i produksjon ved forskjellige vannføringer når produksjonen går konstant sammenlignet med når produksjonen er optimalisert.

Vannføring m³/s	Optimal MWh	Konstant MWh	Forskjell MWh	Prosent %
400	4522,67	4474,98	47,69	1,07
450	5058,65	5006,49	52,16	1,04
500	5592,07	5529,20	62,87	1,14
550	6109,07	6038,97	70,10	1,16
600	6622,65	6541,00	81,65	1,25
650	7117,74	7033,34	84,40	1,20
700	7608,11	7504,32	103,79	1,38
750	8074,96	7961,05	113,91	1,43
800	8536,91	8409,07	127,84	1,52
850	8981,10	8842,30	138,80	1,57
900	9426,38	9266,80	149,58	1,61
950	9823,97	9672,90	151,07	1,56



Figur 6.2: Figuren viser forskjellene i produksjon ved forskjellige vannføringer når produksjonen går konstant sammenlignet med når produksjonen er optimalisert.

6.4.3 Forbedring av SHOP-modellen

Det er ting vi vet kunne vært gjort bedre i modellen, men som ble besluttet å ikke gjøre. Dette var på grunn av tidsbruk eller som ville ha krevet mer hjelp enn vi kunne be om av Hans Ivar da han frivillig har hjulpet oss i et trangt tidskjema. Det kunne blitt lagt inn både overvann og undervann i modellen, noe som også ble forsøkt, men dette ga feil produksjonsverdier. Det kunne også da blitt satt bedre startbetingelser for de enkelte tilfellene.

Individuelle generatorer kunne også blitt lagt til som tidligere nevnt. Det kunne også blitt satt flere begrensninger i hvordan kraftverket har lov til å bli kjørt, ettersom det er ganske strengt hvordan Hafslund Eco får regulere vannstand og vannføring.

6.5 Innvirkningen av våre funn

Vi har i denne oppgaven funnet gode måter å produsere på, både i forhold til økt produksjon og økt inntjening. Men spørsmålet vi da må stille, er hvor nyttig det er å produsere med tanke på inntjening i et globalt perspektiv. For å nå FNs bærekraftsmål nr. 7 om ren energi til alle er det beste å kjøre produksjonen etter å oppnå så stor produksjon som mulig, og regulere i forhold til etterspørsel og produksjon av andre energikilder.

Heldigvis vil i stor grad strømprisen være høy når produksjonen fra andre energikilder er lav i forhold til etterspørselen. Dette gjør at det er gunstig å produsere ved høy strømpris med tanke på inntjening, men også med tanke på å produsere nok energi i forhold til behovet. Denne muligheten for regulering er en av de store og unike fordelene vannkraft har, sammenlignet med andre fornybare energikilder.

Likevel må vi huske at det i denne oppgaven er snakk om elvekraftverk med begrenset reguleringsmuligheter. Produksjonen må i stor grad derfor skje med det vannet som er tilgjengelig på det aktuelle tidspunktet.

7 Konklusjon

Det gjøres mye riktig, og vi kan bekrefte mye av det Hafslund Eco har antatt og jobbet ut fra ved sine kraftverk.

Best utnyttelse av vannet ved lav vannføring er teoretisk interessant, men det er umulig å kjøre produksjonen på lav vannføring året rundt. Det kan likevel være lurt å være bevisst på hva vannføringen gjør med undervannet og dermed virkningsgraden ved forskjellige vannføringer. Simuleringen i SHOP er med på å underbygge dette og viser hvordan produksjonen kan påvirke virkningsgraden positivt. Denne simuleringen viser at Hafslund Eco kan øke produksjonen, og dermed også inntjeningen, ved å etterstrebe en høyere virkningsgrad i produksjonen.

Hafslund Eco kan også øke inntjeningen ved å optimalisere produksjonen etter strømprisene.

Av å optimalisere mot virkningsgrad eller mot strømpris ser det ut til at å optimalisere etter strømpris er det mest gunstige. Denne typen optimalisering går heller ikke på bekostning av Norges og verdens strømforsyning, tvert imot vil å optimalisere etter pris være synonymt med å optimalisere etter behovet for energi.

Aggregatkombinasjonene er stort sett kjørt bra, og det er ikke veldig mye å hente her. Likevel kan produksjonen bli enda høyere ved å bruke de nyeste aggregatene i produksjonen så stor grad som mulig.

Selv om forskjellige aggregatkombinasjoner er det som kanskje gir minst innvirkning, kan det likevel være det som er enklest å gjøre noe med i disse kraftverkene ettersom det er elvekraftverk med begrensete reguleringsmuligheter til å styre produksjonen etter pris og virkningsgrad.

Både å optimalisere aggragatkombinasjoner, virkningsgrad og produksjon etter strømpriser er en god måte å øke produksjonen på, helt kostands- og inngrepsfritt. Dette er med på å bidra til FNs bærekraftsmål nr. 7 om ren energi til alle.

Litteraturliste

Aansen, T. (2021) *Vindkraften fortsetter å stige*. Tilgjengelig fra: https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/vindkraften-fortsetter-a-stige (Hentet: 29.03.2021)

Abelsen, A. (2012) *Mest igjen for vannkraft*. Tilgjengelig fra: https://forskning.no/miljoteknologi-norsk-institutt-for-naturforskning-energi/mest-igjen-for-vannkraft/703127 (Hentet: 05.04.2021)

Bakken, T. (2019) *Hydrologi.* Tilgjengelig fra: https://snl.no/hydrologi (Hentet: 27.03.2021)

Bolstad, E. (2021) *Aggregat (maskinteknikk).* Tilgjengelig fra: https://snl.no/aggregat_-_maskinteknikk (Hentet: 09.04.2021)

Braut, G. og Dahlum, S. (2018) *Regresjonsanalyse.* Tilgjengelig fra: https://snl.no/regresjonsanalyse (Hentet: 27.03.2021)

Dannevig, P. og Holm, A. (2019) *Nedbør*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/nedbør (Hentet: 27.03.2021)

Fladen, B., Holmqvist, E. og Bachke, D. (2010) *Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk.* NVE-rapport: 100. Norge: Norges Vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/veileder/2010/veileder2010_01.pdf (Hentet: 04.04.2021)

FN (2021a) *FNs bærekraftsmål.* Tilgjengelig fra: https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal (Hentet: 24.03.2021)

FN (2021b) *Ren energi til alle*. Tilgjengelig fra: https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle (Hentet: 24.03.2021)

Foss, M. (2014) *Når regner det minst og mest.* Tilgjengelig fra: https://www.yr.no/artikkel/nar-regner-det-minst-og-mest_-1.11977477 (Hentet: 27.03.2021)

Frisk, O. og Brimi, A. (2004) *Vannkraft.* Tilgjengelig fra: http://web.phys.ntnu.no/~stovneng/FY1303NY/prosjekt/vannkraft.pdf (Hentet: 14.04.2021)

Hafslund Eco (u.å. a) *Om oss*. Tilgjengelig fra: https://hafslundeco.no/om-hafslund-eco/om-oss (Hentet: 06.04.2021)

Hafslund Eco (u.å. b) *Våre kraftverk.* Tilgengelig fra: https://hafslundeco.no/kraftverk (Hentet 14.04.20221)

Meteorologisk institutt og Velle, M. (2019) *Skyer*, Tilgjengelig fra: https://snl.no/skyer (Hentet: 12.04.2021)

Microsoft (u.å.) *Excel.* Tilgjengelig fra: https://www.microsoft.com/nb-no/microsoft-365/excel (Hentet 12.04.2021)

Mjønerud, I. (2019) *Slik bestemmes dagens strømpris.* Tilgjengelig fra: https://strøm.no/dagens-strømpris (Hentet 28.04.2021)

Nord Pool (u.å) *Market data*. Tilgjengelig fra: https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table (Hentet 30.04.2021)

NVE (2016) *Solbergfoss*. Tilgjengelig fra: https://www.nve.no/vann-vassdrag-og-miljo/nves-utvalgte-kulturminner/kraftverk/solbergfoss/ (Hentet 15.04.2021)

Henriksen, Ø., Østenby, A.M., Skau, S. (2020) *Hva er egentlig potensialet for opprusting og utvidelse av norske vannkraftverk?* Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_06.pdf (Hentet 12.05.2021)

Olsen, S. (2018a) *Turbin.* Tilgjengelig fra: https://ndla.no/subject:16/topic:f58be147-7d25-4313-9171-2e5e4d8ad5c6/topic:1:50975/topic:1:50931/resource:1:54026?filters=urn:filter:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7 (Hentet 15.04.2021)

Olsen, S. (2018b) *Generator.* Tilgjengelig fra: https://ndla.no/subject:16/topic:f58be147-7d25-4313-9171-2e5e4d8ad5c6/topic:1:50975/topic:1:50931/resource:1:54832?filters=urn:filter:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7 (Henet 15.04.2021)

Olsen, S. (2018c) *Francisturbin*. (digitalt fotografi) https://ndla.no/subject:16/topic:f58be147-7d25-4313-9171-

2e5e4d8ad5c6/topic:1:50975/topic:1:50931/resource:1:54026?filters=urn:filter:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7 (Henet 15.04.2021)

Olsen, S. (2018d) *Kaplanturbin*. (digitalt fotografi) https://ndla.no/subject:16/topic:f58be147-7d25-4313-9171-2e5e4d8ad5c6/topic:1:50975/topic:1:50931/resource:1:54026?filters=urn:filter:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7 (Henet 15.04.2021)

Rosvold, K., Bakken, T.H. og Halleraker, J.H (2020) *Avrenning*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/avrenning (Hentet: 29.03.2021)

Rosvold, K og Halleraker, J.H (2020) *Tilsig*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/tilsig (Hentet: 12.04.2021)

Sintef (u.å.) *SHOP*. Tilgjengelig fra: https://www.sintef.no/programvare/shop/ (Hentet: 12.04.2021)

Statnett (u.å.) *Vannkraft*. Tilgjengelig fra: https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vannkraft/?gclid=EAIaIQobChMIlN_nwLrQ7wIVBm8YCh0ttQUOEAAYASAAEgL2S_D_BwE (Hentet: 27.03.2021)

Thorsnæs, G. (2021) *Glomma.* Tilgjengelig fra: https://snl.no/Glomma (Hentet: 27.03.2021)

Wikipedia (2012) *Vannturbin* (Digitalt fotografi) Tilgjengelig fra: https://no.wikipedia.org/wiki/Vannturbin#/media/Fil:Water_turbine_(en_2).svg (Hentet 15.04.2021)

Wikipedia (2017) *Elvekraftverk.* Tilgjengelig fra: https://no.wikipedia.org/wiki/Elvekraftverk (Hentet: 29.03.2021)

Wikipedia (2020a) *Magasinkraftverk.* Tilgjengelig fra: https://no.wikipedia.org/wiki/Magasinkraftverk (Hentet: 29.03.2021)

Wikipedia (2020b) *Solbergfoss kraftstasjon* (Digitalt fotografi). Tilgjengelig fra: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solbergfoss_kraftstasjon_1.JPG

Wikipedia (2021a) *Generator*. Tilgjengelig fra: https://no.wikipedia.org/wiki/Generator (Hentet: 09.04.2021)

Wikipedia (2021b) *Coefficient of determination.* Tilgjengelig fra: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination (Hentet: 12.04.2021)

Wikipedia (2021c) *Bestemmelseskofeffisient* (Digitalt fotografi). Tilgjengelig fra: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coefficient_of_Determination.svg (Hentet 12.04.2021)

Vedlegg

Vedlegg A: Vedlegget viser modellen i SHOP.

Modell over vannkraftverk

Først importeres nødvendige pakker og det startes en økt i SHOP

In [1]:

```
# Importer pakker
import pandas as pd
import cufflinks as cf
from cufflinks import tools
import plotly.offline as py
import plotly.graph_objs as go
import plotly.express as px
from plotly.subplots import make_subplots
from pyshop import ShopSession

#
cf.go_offline()
py.offline.init_notebook_mode(connected=True)
```

In [2]:

```
# Navngir SHOP økt

shop = ShopSession(license_path='', silent=False, log_file='log.file')
```

Tidsforløp

Det settes et tidforløp for simuleringen, som er hvor lenge SHOP skal optimalisere vannføringen.

In [3]:

```
# Setter periode

starttime = pd.Timestamp('2020-01-21 00:00:00')
endtime = pd.Timestamp('2020-01-28')
shop.set_time_resolution(starttime=starttime, endtime=endtime, timeunit="hour",
timeresolution=pd.Series(index=[starttime],data=[1]))
```

Reservoar

Her legges Øyeren inn, og elvestrekkene mellom kraftverkene.

In [4]:

```
# Setter opp reservoarer

øyeren = shop.model.reservoir.add_object('øyeren')
solbergfossfkf = shop.model.reservoir.add_object('solbergfossfkf')
fkfvamma = shop.model.reservoir.add_object('fkfvamma')

shop.model.reservoir.get_object_names()
```

Out[4]:

```
['øyeren', 'solbergfossfkf', 'fkfvamma']
```

In [5]:

```
# Volum for reservoar MM3

øyeren.max_vol.set(157)
solbergfossfkf.max_vol.set(0.1)
fkfvamma.max_vol.set(0.1)

#LRL

øyeren.lrl.set(100.5)
solbergfossfkf.lrl.set(79.2)
fkfvamma.lrl.set(53.3)

#HRL

øyeren.hrl.set(102.9)
solbergfossfkf.hrl.set(81.5)
fkfvamma.hrl.set(54.9)
```

In [6]:

```
#Avrenning (M3/s)

øyeren.inflow.set(pd.Series([650], [starttime]))
```

In [7]:

```
# Nedtømmningsforhold

øyeren.vol_head.set(pd.Series([76, 103] , index=[0, 157], name=0))
solbergfossfkf.vol_head.set(pd.Series([79.2, 82] , index=[0, 0.1], name=0))
fkfvamma.vol_head.set(pd.Series([53.3, 55] , index=[0, 0.1], name=0))
```

In [8]:

```
# Oversvømmelsesforhold (M3/s)/MOH, ender der nedtømmingsgrafen ender

øyeren.flow_descr.set(pd.Series([0, 157 ], index=[102, 103], name=0))
solbergfossfkf.flow_descr.set(pd.Series([0, 0.01], index=[81, 82], name=0))
fkfvamma.flow_descr.set(pd.Series([0, 0.01], index=[54, 55], name=0))
```

In [9]:

```
# Starthøyde

øyeren.start_head.set(100.55)
solbergfossfkf.start_head.set(79.25)
fkfvamma.start_head.set(53.35)
```

In [10]:

```
from scipy.interpolate import interp1d

#Setter minimum sluttvolum lik startvolumet for alle magasin
for rsv in shop.model.reservoir:
    vol_head=rsv.vol_head.get()
    #f blir her funksjonen som interpolerer mellom høyde og volum
    f = interp1d(vol_head.values, vol_head.index)
    #siden startmagasinet er gitt i m.o.h. må vi konvertere til Mm3
    end_vol=f(rsv.start_head.get())
    #det holder å sette minimum sluttvolum for å hindre SHOP i å tømme magasinene, min_vol settes til 0 i alle andre timer
    min_vol=pd.Series(index=[starttime + pd.Timedelta(hours=i) for i in range(0,168)], dtype="float64")
    min_vol[:]=0
    min_vol[-1]=end_vol
    rsv.min_vol_constr.set(min_vol)
    #utskrift for å sjekke at resultatet er fornuftig
    print(f"{rsv.get_name()} end_vol {end_vol}")
```

```
øyeren end_vol 142.75370370370368
solbergfossfkf end_vol 0.0017857142857141861
fkfvamma end_vol 0.002941176470588481
```

In [11]:

```
#Plotte nedtømmingsforhold

solbergfossfkf.vol_head.get().iplot(title="Volum/MOH", xaxis_title="Mm3", yaxis_
title="MOH", color="blue")
```

Kraftverk

Videre dimensjoneres kraftverkene

In [12]:

```
# Setter opp kraftverk

solbergfoss = shop.model.plant.add_object('Solbergfoss')
fkf = shop.model.plant.add_object('FKF')
vamma = shop.model.plant.add_object('Vamma')

shop.model.plant.get_object_names()
```

Out [12]:

['Solbergfoss', 'FKF', 'Vamma']

In [13]:

```
# Høyde på utgang

solbergfoss.outlet_line.set(79.2)
fkf.outlet_line.set(53.3)
vamma.outlet_line.set(24.6)
```

In [14]:

```
# Tap settes til 0 ettersom dette er inkludert i virkningsgraden

solbergfoss.main_loss.set([0])
fkf.main_loss.set([0])
vamma.main_loss.set([0])
```

In [15]:

```
# Legger til antall trykksjakter og tap

solbergfoss.penstock_loss.set([0])
fkf.penstock_loss.set([0])
vamma.penstock_loss.set([0])
```

Her legger vi inn generatorer og deres spesifikasjoner

In [16]:

```
# Legger til generatorer

solbergfossgen = shop.model.generator.add_object('Solbergfoss_Generator')
fkfgen = shop.model.generator.add_object('FKF_Generator')
vammagen = shop.model.generator.add_object('Vamma_Generator')

# Kobler de til sine respektive kraftverk

solbergfoss.connect().generator.Solbergfoss_Generator.add()
fkf.connect().generator.FKF_Generator.add()
vamma.connect().generator.Vamma_Generator.add()

shop.model.generator.get_object_names()
```

Out[16]:

```
['Solbergfoss_Generator', 'FKF_Generator', 'Vamma_Generator']
```

In [17]:

```
# Setter opp antall trykksjakter

solbergfossgen.penstock.set(1)
fkfgen.penstock.set(1)
vammagen.penstock.set(1)
```

In [18]:

```
# Setter maksimal og minimal produksjon

solbergfossgen.p_min.set(60)
fkfgen.p_min.set(75)
vammagen.p_min.set(80)

solbergfossgen.p_max.set(170)
fkfgen.p_max.set(210)
vammagen.p_max.set(240)
```

In [19]:

```
# Nominell produksjon

solbergfossgen.p_nom.set(170)
fkfgen.p_nom.set(210)
vammagen.p_nom.set(240)
```

In [20]:

```
# Startkostnad

solbergfossgen.startcost.set(0)
fkfgen.startcost.set(0)
vammagen.startcost.set(0)
```

In [21]:

```
# Setter opp max og min vannføring

solbergfoss.max_q_constr.set(700)
fkf.max_q_constr.set(700)
vamma.max_q_constr.set(700)

solbergfoss.min_q_constr.set(600)
fkf.min_q_constr.set(600)
vamma.min_q_constr.set(600)
```

In [22]:

```
# Maks endring per time

solbergfoss.discharge_ramping_up.set(25)
fkf.discharge_ramping_up.set(25)
vamma.discharge_ramping_up.set(25)

solbergfoss.discharge_ramping_down.set(25)
fkf.discharge_ramping_down.set(25)
vamma.discharge_ramping_down.set(25)
```

In [23]:

```
# Legger inn tidsforskyvning

solbergfoss.time_delay.set(1.5)
fkf.time_delay.set(1.5)
```

Det legges inn virkningsgradkurver til kraftverkene

In [24]:

```
# Setter generatorytelsen til 100%

solbergfossgen.gen_eff_curve.set(pd.Series([100, 100], index=[60, 170]))
fkfgen.gen_eff_curve.set(pd.Series([100, 100], index=[75, 210]))
vammagen.gen_eff_curve.set(pd.Series([100, 100], index=[80, 240]))
```

In [25]:

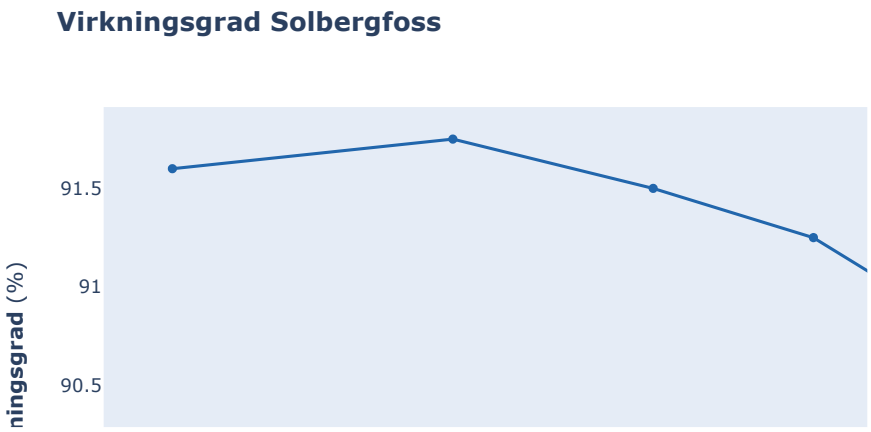
```
# Setter tap av fallhøyde

solbergfoss.tailrace_loss.set([pd.Series([79.2, 79.5, 80, 80.5, 81.5], index=[0,
475, 650, 800, 1000], name=0)-solbergfoss.outlet_line.get()])
fkf.tailrace_loss.set([pd.Series([53.3, 53.6, 53.9, 54.4, 54.9], index=[0, 475,
650, 800, 1000], name=0)-fkf.outlet_line.get()])
vamma.tailrace_loss.set([pd.Series([24.6, 25, 25.5, 26, 26.4], index=[0, 475, 65
0, 800, 1000], name=0)-vamma.outlet_line.get()])
```

In [26]:

```
# Setter opp virkningsgradskurven

solbergfossgen.turb_eff_curves.set([pd.Series([91.6, 91.75, 91.5, 91.25, 90.75,
90.3, 89.4], index=[300, 475, 600, 700, 800, 900, 1000], name=0)])
fkfgen.turb_eff_curves.set([pd.Series([91, 90.8, 90.4, 90, 89.5, 88.8, 88], inde
x=[300, 500, 600, 700, 800, 900, 1000], name=0)])
vammagen.turb_eff_curves.set([pd.Series([91.1, 90.8, 90.4, 89.8], index=[300, 60
0, 800, 1000], name=0)])
```

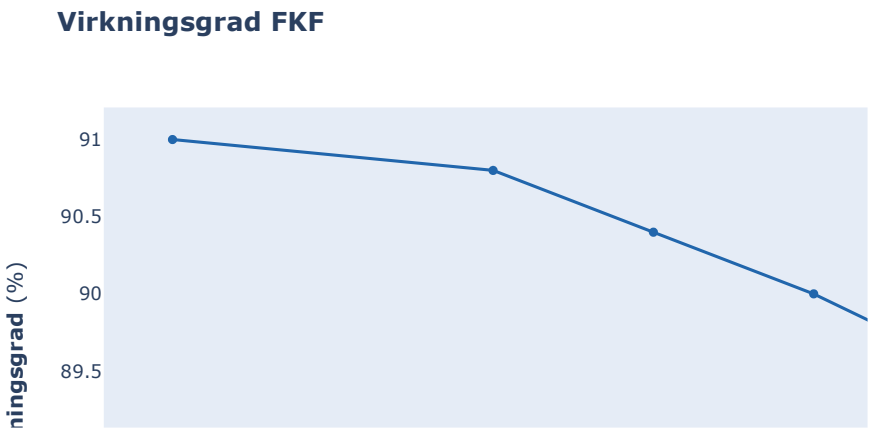
In [27]:

```
# Oversikt over grafene

turb_eff_curves=shop.model.generator.Solbergfoss_Generator.turb_eff_curves.get()

fig = go.Figure()
colorscale = px.colors.sequential.RdBu_r
color = 0
for curve in turb_eff_curves:
    color+=1
    curve_name="Net Head="+str(curve.name)
    fig.add_trace(go.Scatter(x=curve.index, y=curve.values, marker_color = color
scale[color], name=curve_name, mode="lines+markers", line=dict(width=2)))

fig.update_layout(title="<b>Virkningsgrad Solbergfoss</b>", xaxis_title="<b>Vann
føring</b> (m<sup>3</sup>/s)", yaxis_title="<b>Virkningsgrad</b> (%)")

fig.show()
```



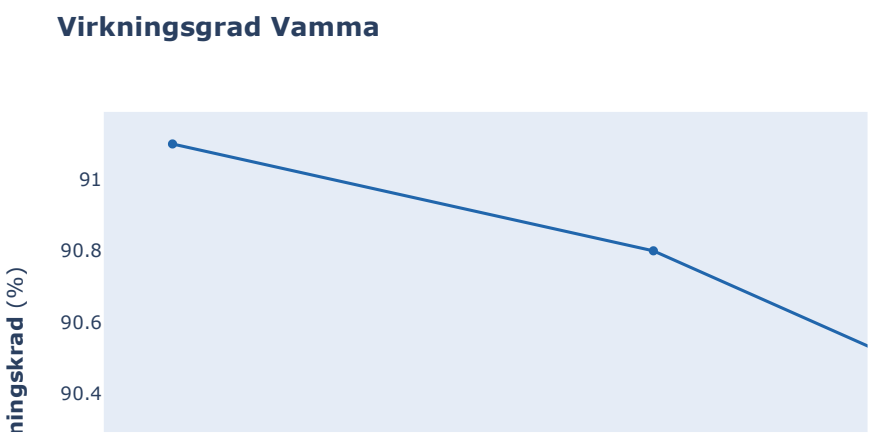
In [28]:

```
turb_eff_curves=shop.model.generator.FKF_Generator.turb_eff_curves.get()

fig = go.Figure()
colorscale = px.colors.sequential.RdBu_r
color = 0
for curve in turb_eff_curves:
    color+=1
    curve_name="Net Head="+str(curve.name)
    fig.add_trace(go.Scatter(x=curve.index, y=curve.values, marker_color = color
scale[color], name=curve_name, mode="lines+markers", line=dict(width=2)))

fig.update_layout(title="<b>Virkningsgrad FKF</b>", xaxis_title="<b>Vannføring</
b> (m<sup>3</sup>/s)", yaxis_title="<b>Virkningsgrad</b> (%)")

fig.show()
```



In [29]:

```
turb_eff_curves=shop.model.generator.Vamma_Generator.turb_eff_curves.get()

fig = go.Figure()
colorscale = px.colors.sequential.RdBu_r
color = 0
for curve in turb_eff_curves:
    color+=1
    curve_name="Net Head="+str(curve.name)
    fig.add_trace(go.Scatter(x=curve.index, y=curve.values, marker_color = color
scale[color], name=curve_name, mode="lines+markers", line=dict(width=2)))

fig.update_layout(title="<b>Virkningsgrad Vamma</b>", xaxis_title="<b>Vannføring
</b> (m<sup>3</sup>/s)", yaxis_title="<b>Virkningskrad</b> (%)")

fig.show()
```



Vannvei

In [30]:

```
# Legger til flomveier

b_øyeren_fkf = shop.model.gate.add_object('b_øyeren_fkf')
b_solbergfoss_vamma = shop.model.gate.add_object('b_solbergfoss_vamma')
b_fkf_havet = shop.model.gate.add_object('b_fkf_havet')

shop.model.gate.get_object_names()
```

Out[30]:

```
['b_øyeren_fkf', 'b_solbergfoss_vamma', 'b_fkf_havet']
```

Alle elementene kobles så sammen

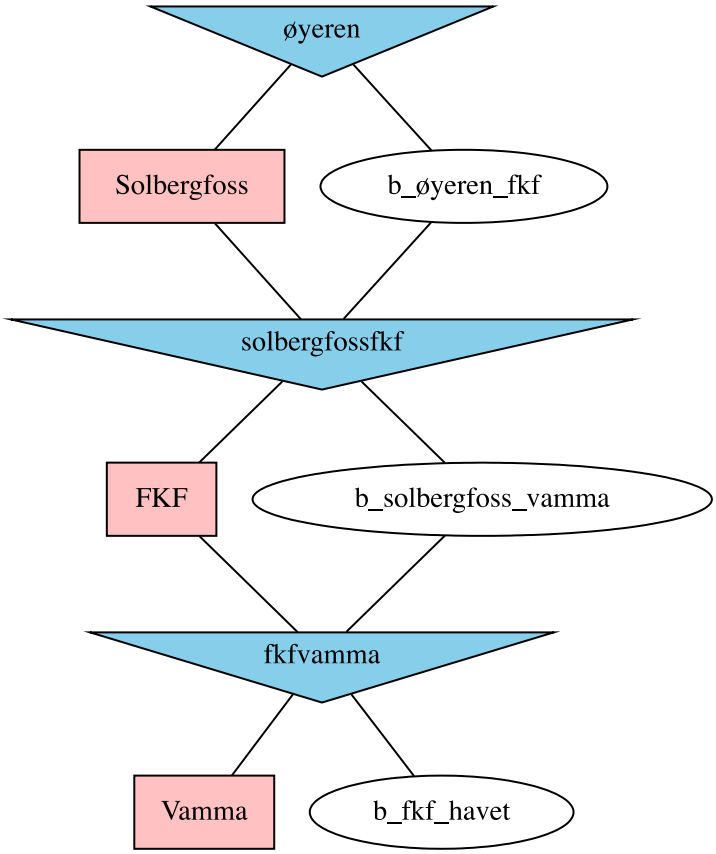
In [31]:

```
øyeren.connect().plant.Solbergfoss.add()

øyeren.connect().gate.b_øyeren_fkf.add()

solbergfoss.connect().reservoir.solbergfossfkf.add()

b_øyeren_fkf.connect().reservoir.solbergfossfkf.add()

solbergfossfkf.connect().plant.FKF.add()

solbergfossfkf.connect().gate.b_solbergfoss_vamma.add()

fkf.connect().reservoir.fkfvamma.add()

b_solbergfoss_vamma.connect().reservoir.fkfvamma.add()

fkfvamma.connect().plant.Vamma.add()

fkfvamma.connect().gate.b_fkf_havet.add()
```

Her er en grafisk fremstilling av modellen

In [32]:

```
# Modell

bilde = shop.model.build_connection_tree()
display(bilde)
```



Marked

In [33]:

```
# Legger til marked

shop.model.market.add_object('Marked')
ma = shop.model.market.Marked

# Prisgraf

ma.sale_price.set(pd.DataFrame([187.71, 189.69, 187.81, 187.81, 191.76, 194.33,
205.4, 214.5, 217.96, 217.16, 216.87, 216.28, 217.36, 217.16, 217.46, 218.65, 22
4.58, 228.43, 225.76, 217.46, 208.96, 206.49, 200.16, 189.69, 199.05, 197.36, 19
4.29, 193.19, 192.99, 198.56, 204.52, 212.76, 215.24, 215.64, 216.73, 215.74, 21
5.64, 215.94, 217.93, 223.19, 236.6, 247.13, 242.16, 239.88, 227.36, 226.17, 21
5.64, 212.26, 206.5, 204.61, 203.41, 203.61, 207.69, 207.69, 210.67, 227.48, 23
7.03, 225.79, 217.93, 209.18, 206.2, 204.61, 204.8, 204.41, 208.19, 208.88, 204.
9, 203.01, 199.33, 196.85, 183.72, 168.5, 176.85, 176.45, 173.96, 174.65, 178.94
, 189.7, 198.57, 208.33, 213.61, 213.21, 213.21, 210.32, 207.93, 206.74, 205.14,
205.54, 210.72, 217.4, 213.81, 208.03, 199.76, 195.08, 190.5, 185.32, 191.81, 19
1.81, 191.51, 191.71, 193.4, 196.67, 199.36, 201.14, 205.81, 207.5, 208.39, 210.
88, 210.98, 208.89, 208.59, 209.98, 214.06, 215.55, 214.06, 208.49, 206.51, 204.
12, 202.24, 198.36, 192.77, 189.97, 186.56, 184.05, 188.56, 187.76, 188.96, 192.
77, 195.98, 200.1, 203.41, 204.41, 204.61, 205.01, 205.81, 208.62, 212.23, 213.9
4, 213.14, 211.03, 207.22, 203.51, 201.3, 198.99, 195.98, 194.18, 193.08, 194.08
, 198.19, 201.1, 207.72, 212.23, 213.74, 213.54, 213.74, 213.64,  213.74, 213.74
, 214.44, 214.94, 215.44, 215.4, 215.24, 215.04, 212.13, 211.13, 207.02, 203.61
],
                                index=[starttime + pd.Timedelta(hours=i) for i in
range(0,168)]))

# Hvor mye som kan selges (MW)

ma.max_sale.set(pd.Series([9999], [starttime]))

# Hva som må forsynes

ma.load.set(pd.Series([0], [starttime]))
```

In [34]:

```
# Oversikt over pris

p = ma.sale_price.get()
print(p)
```

```
2020-01-21 00:00:00    187.71
2020-01-21 01:00:00    189.69
2020-01-21 02:00:00    187.81
2020-01-21 03:00:00    187.81
2020-01-21 04:00:00    191.76
                         ...
2020-01-27 19:00:00    215.04
2020-01-27 20:00:00    212.13
2020-01-27 21:00:00    211.13
2020-01-27 22:00:00    207.02
2020-01-27 23:00:00    203.61
Name: sale_price, Length: 168, dtype: float64
```

Simulere

In [35]:

```
# Setting a full flag, telling SHOP the upcomming iterations should be full
shop.set_code(['full'], [])

# Starting SHOP and running five (full) iterations
shop.start_sim([], ['5'])

# Setting an incremental flag, telling SHOP the next iterations should be increm
ental
shop.set_code(['incremental'], [])

# Running three more (incremental) iterations
shop.start_sim([], ['3'])
```

Out[35]:

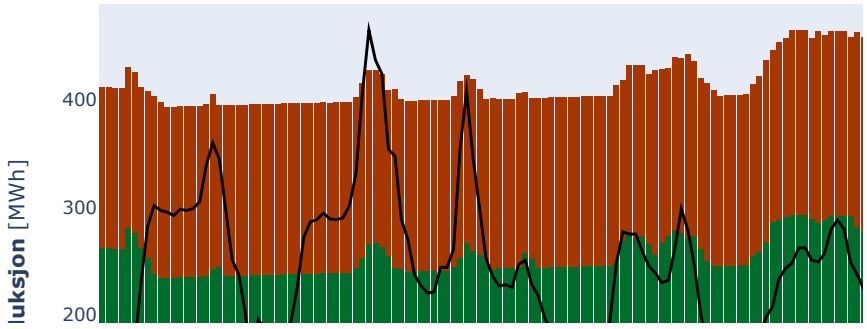
```
True
```

Resultater

In [43]:

```
# Lager diagram

fig = go.Figure()
Solbergfoss_Farge = px.colors.sequential.RdBu_r
FKF_Farge = px.colors.sequential.BuGn_r
Vamma_Farge = px.colors.sequential.Oranges_r

#Sekundær Y-Akse

fig = make_subplots(specs=[[{"secondary_y": True}]])

# Data

fig.add_trace(go.Bar(x=shop.model.plant.Solbergfoss.production.get().index, y=sh
op.model.plant.Solbergfoss.production.get().values, name="Solbergfoss", marker_c
olor=Solbergfoss_Farge[1]))
fig.add_trace(go.Bar(x=shop.model.plant.FKF.production.get().index, y=shop.model
.plant.FKF.production.get().values, name="FKF", marker_color=FKF_Farge[1]))
fig.add_trace(go.Bar(x=shop.model.plant.Vamma.production.get().index, y=shop.mod
el.plant.Vamma.production.get().values, name="Vamma", marker_color=Vamma_Farge[1
]))

#Titler, div
fig.update_layout(barmode='stack')
fig.add_trace(go.Scatter(x=shop.model.market.Marked.sale_price.get().index, y=sh
op.model.market.Marked.sale_price.get().values, name="Pris", line_color='black'
),secondary_y=True)
fig.update_layout(title_text='Produksjon og strømpris avhengig av tid')
fig.update_yaxes(title_text="<b>Produksjon</b> [MWh]", secondary_y=False)
fig.update_yaxes(title_text="<b>Pris</b> [NOK/MWh]", secondary_y=True)
fig.update_xaxes(title_text="<b>Tid</b> [Timer]")

fig.show()
```

Produksjon og strømpris avhengig av tid

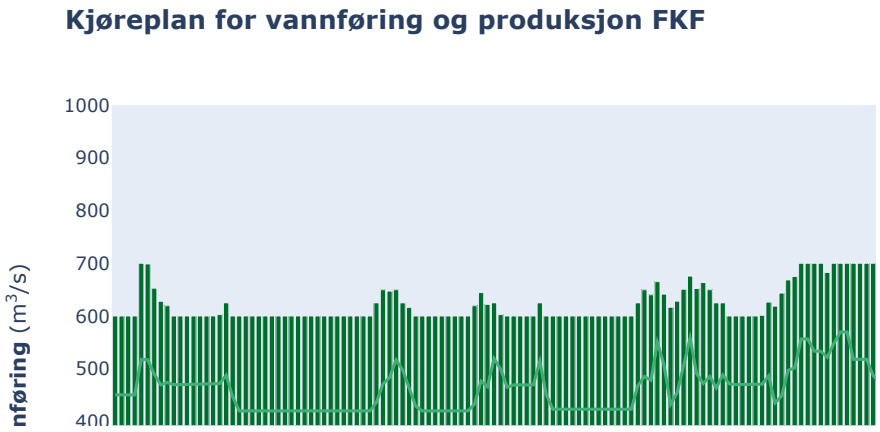


In [37]:

```
# Nedtapping

Solbergfoss_Vannføring=shop.model.generator.Solbergfoss_Generator.discharge.get()
Solbergfoss_Produksjon=shop.model.generator.Solbergfoss_Generator.production.get()

coloraxis = px.colors.sequential.RdBu_r

fig = make_subplots(specs=[[{"secondary_y": True}]])
fig.add_trace(go.Bar(x=Solbergfoss_Vannføring.index, y=Solbergfoss_Vannføring.values, name="Vannføring", marker_color=coloraxis[1]), secondary_y=False)

fig.add_trace(go.Scatter(x=Solbergfoss_Produksjon.index, y=Solbergfoss_Produksjon.values, name="Produksjon", marker_color=coloraxis[3]), secondary_y=True)

fig.update_layout(title_text="<b>Kjøreplan for vannføring og produksjon Solbergfoss</b>", barmode="stack")
fig.update_xaxes(title_text="<b>Tid</b> (Timer)")
fig.update_yaxes(title_text="<b>Vannføring</b> (m<sup>3</sup>/s)", secondary_y=False, range=[0, 1000], tick0=100, dtick=100)
fig.update_yaxes(title_text="<b>Produksjon</b> (MW)", secondary_y=True, range=[0, 300], tick0=50, dtick=50)

fig.show()
```

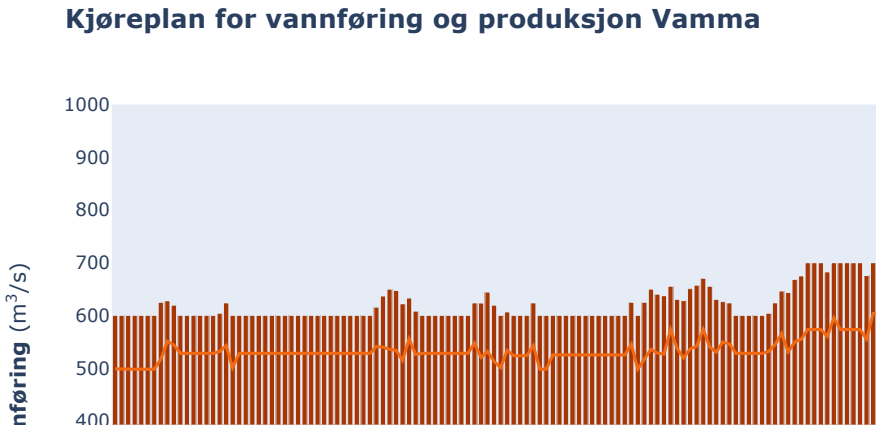
In [45]:

```
# Nedtapping

FKF_Vannføring=shop.model.generator.FKF_Generator.discharge.get()

FKF_Produksjon=shop.model.generator.FKF_Generator.production.get()

fig = make_subplots(specs=[[{"secondary_y": True}]])
fig.add_trace(go.Bar(x=FKF_Vannføring.index, y=FKF_Vannføring.values, name="Vannføring", marker_color=FKF_Farge[1]), secondary_y=False)

fig.add_trace(go.Scatter(x=FKF_Produksjon.index, y=FKF_Produksjon.values, name="Produksjon", marker_color=FKF_Farge[3]), secondary_y=True)

fig.update_layout(title_text="<b>Kjøreplan for vannføring og produksjon FKF</b>", barmode="stack")
fig.update_xaxes(title_text="<b>Tid</b> (Timer)")
fig.update_yaxes(title_text="<b>Vannføring</b> (m<sup>3</sup>/s)", secondary_y=False, range=[0, 1000], tick0=100, dtick=100)
fig.update_yaxes(title_text="<b>Produksjon</b> (MW)", secondary_y=True, range=[0, 300], tick0=50, dtick=50)

fig.show()
```



In [46]:

```
# Nedtapping

Vamma_Vannføring=shop.model.generator.Vamma_Generator.discharge.get()

Vamma_Produksjon=shop.model.generator.Vamma_Generator.production.get()

fig = make_subplots(specs=[[{"secondary_y": True}]])
fig.add_trace(go.Bar(x=Vamma_Vannføring.index, y=Vamma_Vannføring.values, name="Vannføring", marker_color=Vamma_Farge[1]), secondary_y=False)

fig.add_trace(go.Scatter(x=Vamma_Produksjon.index, y=Vamma_Produksjon.values, name="Produksjon", marker_color=Vamma_Farge[3]), secondary_y=True)

fig.update_layout(title_text="<b>Kjøreplan for vannføring og produksjon Vamma</b>", barmode="stack")
fig.update_xaxes(title_text="<b>Tid</b> (Timer)")
fig.update_yaxes(title_text="<b>Vannføring</b> (m<sup>3</sup>/s)", secondary_y=False, range=[0, 1000], tick0=100, dtick=100)
fig.update_yaxes(title_text="<b>Produksjon</b> (MW)", secondary_y=True, range=[0, 300], tick0=50, dtick=50)

fig.show()
```



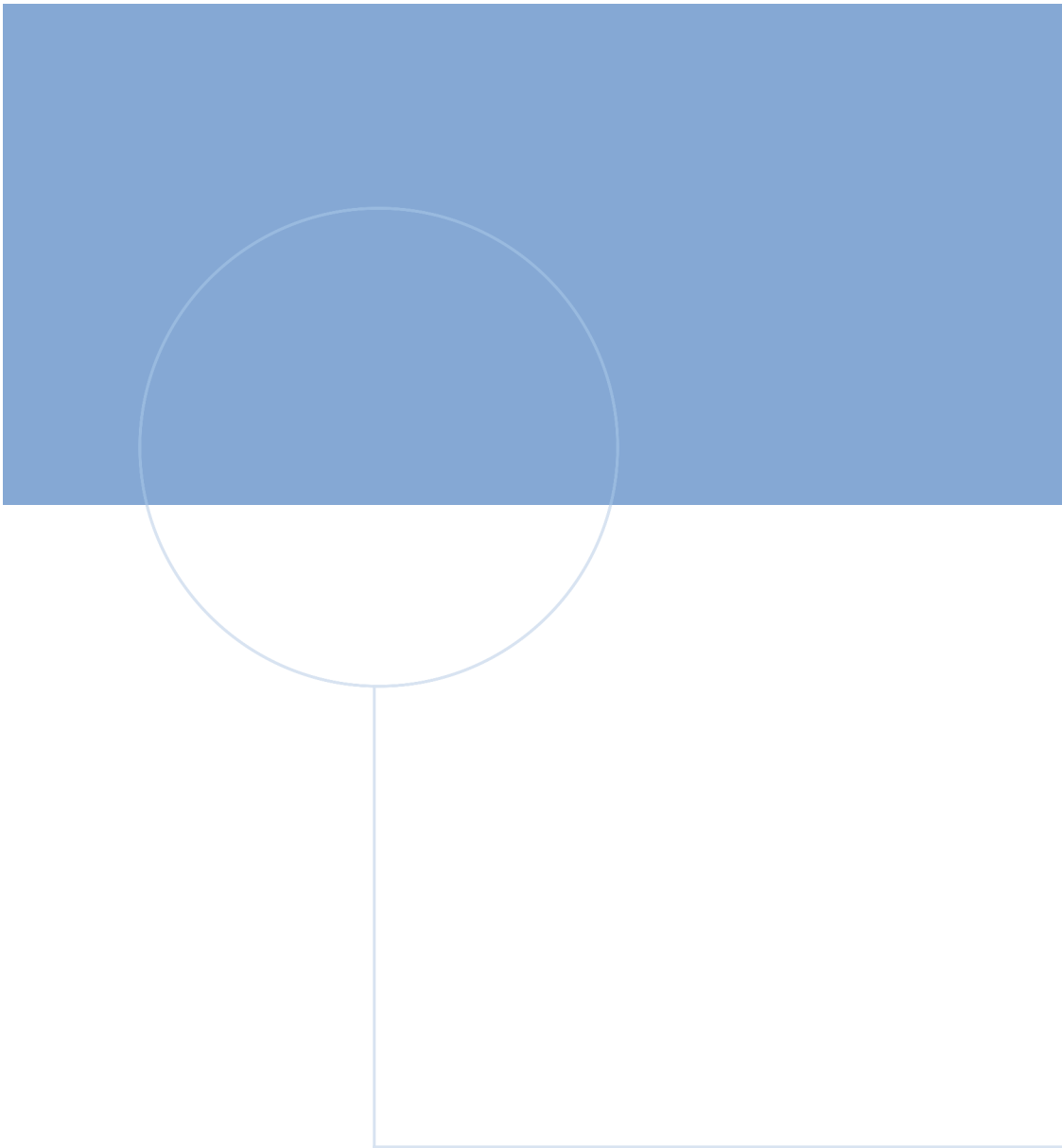
In [47]:

```
# Nedtapping av reservoarene
water_storage_øyeren=shop.model.reservoir.øyeren.storage.get()
water_storage_solbergfossfkf=shop.model.reservoir.solbergfossfkf.storage.get()
water_storage_fkfvamma=shop.model.reservoir.fkfvamma.storage.get()
fig = go.Figure()

fig.add_trace(go.Scatter(x=water_storage_øyeren.index, y=water_storage_øyeren.values, name="Øyeren-Solbergfosf", marker_color=Solbergfoss_Farge[1]))
fig.add_trace(go.Scatter(x=water_storage_solbergfossfkf.index, y=water_storage_solbergfossfkf.values, name="Solbergfoss-FKF", marker_color=FKF_Farge[1]))
fig.add_trace(go.Scatter(x=water_storage_fkfvamma.index, y=water_storage_fkfvamma.values, name="FKF-Vamma", marker_color=Vamma_Farge[1]))
fig.update_layout(title="<b>Nedtapping av resrevoarer</b>", xaxis_title="<b>Tid</b> (Timer)", yaxis_title="<b>Volum</b> (Mm<sup>3</sup>)")
fig.show()
```

In [42]:

```
# Innkjøring

print("Innkjøring:", shop.model.objective.scen_1.market_sale_buy.get())
```

Innkjøring: -14746456.420402966



NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Hafslund Eco