

Frekvensresponsmålinger ved Svartisen Kraftverk

Morten Høigaard

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Januar 2011

Hovedveileder: Ole Gunnar Dahlhaug, EPT

Biveileder(e): Eve Cathrin Walseth, EPT

Oppgavetekst

Bakgrunn

Svartisen Kraftverk i Nordland ble satt i drift i 1993. Kraftverket ble opprinnelig bygget for to 350 MW Francis turbiner, men kun ett aggregat ble installert grunnet markedssituasjonen.

Kraftverket har et komplekst vannveisystem. Hovedmagasinet er Storglomvatn, i tillegg får kraftverket vann fra mange små reservoar tilknyttet isbreen.

På grunn av terrenget under isbreen var det ikke mulig å bygge en vanlig svingesjakt og et luftputekammer ble for kostnadskrevende. Dette resulterte i et kompromiss der en noe spesiell svingesjakt ble bygget. Denne løsningen førte til et spesielt fenomen der turbinen er opphav til elastiske svingninger mellom magasin og svingesjakt. Dynamiske simuleringer både før og etter bygging av kraftverket har vist at dette fenomenet gir stabilitetsproblemer når turbinen går på isolert nett.

Rainpower og Statkraft skal i september 2010 utføre frekvens respons målinger på Svartisen Kraftverk. Målet med målingene er å undersøke ustabilitetsfenomenet og kartlegge den virkelige transiente oppførselen til systemet. Resultatene vil i tillegg bli benyttet til å forbedre simuleringer i LVTrans.

Oppgaven gjøres i samarbeid med PhD kandidat Eve Cathrin Walseth.

Mål

Simulere Svartisen Kraftverk i LVTrans og sammenligne med frekvensresponsmålinger.

Oppgaven skal bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Kandidaten skal sette seg inn i teorien bak og metoder for frekvens respons målinger
2. Kandidaten skal delta i planlegging og utføring av målinger
3. Analysere data fra målingene
4. Modellere kraftverket i LVTrans
5. Utføre transiente simuleringer
6. Sammenligne resultat fra målinger og simuleringer, og identifisere og begrunne eventuelle avvik

Oppgaven gitt: 23. august 2010

Hovedveileder: Ole Gunnar Dahlhaug, EPT

Masteroppgave

Bakgrunn

Svartisen Kraftverk i Nordland ble satt i drift i 1993. Kraftverket ble opprinnelig bygget for to 350 MW Francis turbiner, men kun ett aggregat ble installert grunnet markedssituasjonen. Kraftverket har et komplekst vannveisystem. Hovedmagasinet er Storglomvatn, i tillegg får kraftverket vann fra mange små reservoar tilknyttet isbreen. På grunn av terrenget under isbreen var det ikke mulig å bygge en vanlig svingesjakt og et luftputekammer ble for kostnadskrevenende. Dette resulterte i et kompromiss der en noe spesiell svingesjakt ble bygget. Denne løsningen førte til et spesielt fenomen der turbinen er opphav til elastiske svingninger mellom magasin og svingesjakt. Dynamiske simuleringer både før og etter bygging av kraftverket har vist at dette fenomenet gir stabilitetsproblemer når turbinen går på isolert nett. Rainpower og Statkraft skal i september 2010 utføre frekvens respons målinger på Svartisen Kraftverk. Målet med målingene er å undersøke ustabilitetsfenomenet og kartlegge den virkelige transiente oppførselen til systemet. Resultatene vil i tillegg bli benyttet til å forbedre simuleringer i LVTrans.

Opgaven gjøres i samarbeid med PhD kandidat Eve Cathrin Walseth.

Mål

Simulere Svartisen kraftverk i LVTrans og sammenligne med frekvensresponsmålinger.

Opgaven skal bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Kandidaten skal sette seg inn i teorien bak og metoder for frekvensresponsmålinger
2. Kandidaten skal delta i planlegging og utføring av målinger
3. Analysere data fra målingene
4. Modellere kraftverket i LVTrans og utføre transiente simuleringer.
5. Sammenligne resultat fra målinger og simuleringer, og identifisere og begrunne eventuelle avvik

Forord

Denne Masteroppgaven ble gjennomført ved Vannkraftlaboratoriet på NTNU. Oppgaven omfatter frekvensresponsmålinger på Svartisen kraftverk, modellering og simulering i programmet LVTrans og analyse og sammenligning av resultatene fra måling og simulering. Det har vært en høyest lærerik og interessant oppgave med bratt læringskurve. Selve målingene ble utført av Rainpower på oppdrag fra Statkraft, og jeg er veldig glad for at jeg fikk muligheten til å være med på målingene og arbeide videre med måledataen.

Jeg vil gjerne takke Ole Gunnar Dahlhaug som har vært min veileder på denne oppgaven. Jeg vil også takke Eve Cathrin Walseth som har vært biveileder og støttet og hjulpet meg gjennom hele oppgaven. Jeg vil takke Rainpower og Bjørnar Svingen spesielt for at jeg fikk være med å utføre målinger og for hjelp når jeg har spurt. Takk til Halvard Luraas for bidrag med tegninger og skisser av Svartisen. Takk til alle studentene på vannkraftlaben, da spesielt veteranene i hjørnet, for motivasjon, diskusjoner og ikke minst morsomme stunder og lange kvelder på vannkraftlaboratoriet.

Morten Høigaard

22.12.2010

Sammendrag

I denne oppgaven ble det gjennomført trykkresponsmålinger, som er en type frekvensresponsmålinger, på Svartisen kraftverk. I tillegg er dataene fra målingene blitt analysert, med spesielt fokus på hvor i systemet de forskjellige resonansfrekvensene oppstår. Det er da observert en U-rørssvingning mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen. Det er også observert en trykkstøtsfrekvens nær kryssfrequensen. Denne ble funnet å være en elastisk U-rørssvingning mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen.

En modell av kraftverket for simulering i programmet LVTrans er utviklet. Denne er laget utifra den dynamiske oppførselen som er observert ved hjelp av måledataene. Den skal da kunne representere dynamikken til systemet bra, men er en meget forenklet modell i forhold til den faktiske vannveien på Svartisen. Blant annet er "vannrenna" i denne modellen representert som ett bekkeinntak. "Vannrenna" strekker seg i virkeligheten nordover og sydover og samler flere bekkeinntak i en renne, som så samles i et punkt. Den forenklede modellen skal være nyttig for videre stabilitetsanalyser av Svartisen.

Denne modellen representerer de mest kritiske egenfrekvensene rundt kryssfrequensen meget bra, mens de høyere frekvensene avviker noe mer i forhold til målingene. Den uvanlige U-rørssvingningen passer bra i forhold til overslagsformelen $a/2L$, hvor lengdene og trykkforplantningshastigheten fra modellen i LVTrans er brukt.

Svakheter ved LVTrans ligger først og fremst i dempmodellen, som er en form for Rayleigh demping. Denne virker bra på de høyere frekvensene, men på lave frekvenser slik som U-rørssvingninger har den ingen virkning. En annen svakhet her er at man ikke har hatt tilgang på eksakte designdata for turbinen og har måttet bruke Alab data for denne.

Trykkresponsmålinger er en nyttig metode for å få "fasiten" til hvordan den dynamiske oppførselen til et vannkraftsystem vil være. Man vil avdekke kritiske egenfrekvenser og kunne forbedre regulatorinnstillingene. Ved å i tillegg modellere kraftverket med programvare som LVTrans, vil man kunne studere systemet mer inngående. Man kan da studere effekten av eventuelle utvidelser av systemet ved for eksempel ny turbin som man er i gang med å installere på Svartisen. Man vil også kunne studere effekten av å introdusere svingekammer eller luftpute i systemet.

Abstract

In this thesis, pressure response measurements were conducted at Svartisen hydro power plant. In retrospect, the data from the measurements have been analyzed, with special focus on where in the system the various resonant frequencies occur. It is observed a U-tube oscillation between Storglomvatn and the stream intake near the turbine. It is also observed a water hammer frequency near the cross-over frequency. This was found to be an elastic U-tube oscillation between Storglomvatn and stream intake near the turbine.

A model of the power plant for simulation in the program LVTrans was developed. This is made based on the dynamic behavior that is observed by the measurement data. It should then be able to represent the dynamics of the system well, but is a very simplified model compared to the actual waterway system on Svartisen. Among other, the "water channel" is simplified to be a stream intake. The "water channel" in reality, is a north- and south-bound channel gathering multiple stream intakes into one point. This basic model will be useful for further stability analysis of the Svartisen.

This model accurately represents the most critical resonant frequencies, which is located around the cross-over frequency. While the higher frequencies, differ more from the measured. The unusual U-tube oscillation fits well by use of the formula $a/2L$, where lengths and pressure propagation speed from the LVTrans model is used.

The weak point of LVTrans is primarily the damping model, which is a form of Rayleigh damping. This works well at the higher frequencies, but at low frequencies, such as U-tube oscillations, it has no effect. Another weakness here is the lack of accurate turbine design data, and Alab data have therefore been used.

Pressure Response Measurements is a useful method to get the "dynamic footprint" of a hydropower system. One will reveal the critical resonant frequencies and be able to improve the governor settings. By subsequently modelling the plant with software such as LVTrans, one will be able to study the system more thoroughly. One can then study the effect of extending the system. For example by implementing a new turbine, which is in the process of being installed at Svartisen. One can also study the effect of introducing a surge shaft or air cushion in the system.

Innhold

Project Definition	i
Innhold	ix
Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Introduksjon	1
2 Bakgrunnsstudie	3
2.1 Modell for frekvensavhengig dempning	3
2.2 Stabilitetssimuleringer av Svartisen	5
2.3 Reguleringsstabilitet	6
3 Teori	7
3.1 Utledning av Allievis ligninger	7
3.2 Karakteristikkmetoden	9
3.3 AFF-diagram	11
3.4 Frekvenser i vannkraftsystem	13
3.5 Trykkrespons	14
3.6 Fast Fourier Transform	14
3.7 Spektumsanalyse og spektrumslekkasje	15
3.8 Aliasing	15
4 Målinger	17
4.1 Instrumentering	17
4.2 Måleoppsett	18
4.3 Programvare	20
4.3.1 Loggeprogram	20
4.3.2 Databehandlingsprogram	20
4.4 Kalibrering	20
4.5 Kjøreplan	20
4.6 Resultater	21

4.7	Feilkilder	25
5	Simuleringer	27
5.1	Introduksjon av LVTrans	27
5.2	Teori bak LVTrans	27
5.2.1	Rørkarakteristikk	27
5.2.2	Turbinmodell	29
5.3	Svartisen kraftverk i LVTrans	30
5.4	Simuleringsresultat	31
6	Diskusjon	37
6.1	Frekvens	37
6.2	Amplituder	38
6.3	Validering	39
7	Konklusjon	41
8	Videre arbeid	43
	Bibliografi	45
	Appendices	
A	Transienter	I
A.1	U-rørssvingninger	I
A.2	Trykkstøt	I
B	Kalibreringsdata	V
C	Formler for turbindata	VII

Figurer

3.1	Kraftbalanse på væskeelement.	8
3.2	Karakteristikkmetoden.	11
3.3	Eksempel på AFF-diagram.	12
4.1	Montering av trykktransducer.	19
4.2	Måleoppsett for frekvensrespons.	19
4.3	AFF diagram fra måling ved 320MW.	23
4.4	AFF diagram fra måling ved 220MW.	24
5.1	Modell brukt som utgangspunkt for simuleringer.	31
5.2	AFF diagram fra simulering ved 320MW.	32
5.3	AFF diagram fra simulering ved 220MW.	33
5.4	Ferdig modell som er satt inn i LVTrans.	34
5.5	Modellen slik den blir seende ut i LVTrans.	35
A.1	Eksempel på kraftverk med svingekammer.	II
A.2	Starttilstand.	II
A.3	Ventilen lukkes men det vet ikke vannet i starten av røret. Trykket foran turbinen økte øyeblikkelig ved stengning	III
A.4	Trykkfronten har nådd reservoiret og vannhastigheten er lik null. . .	III
A.5	Vannet begynner å strømme ut av røret da det er overtrykk i røret. Ved ventilen vet ikke vannet dette og står i ro.	III
A.6	Prosessen gjentas og man får et trykkforløp som dette.	IV
A.7	Dersom lukketiden er kortere enn refleksjonstiden blir trykkforløpet slik og trykktoppene blir redusert.	IV
B.1	Kalibreringskurve for potensiometer.	V
B.2	Kalibreringskurve for trykktransducer.	VI

Tabeller

1	Liste over symboler brukt i oppgaven	xv
4.1	Kjøreplan for frekvensrespons målingene på Svartisen	21
4.2	Steglengde ved målingene rundt frekvenstoppene	21
4.3	Resonanstopper fra måling	22
5.1	Resonanstopper fra simulering og avvik fra målingsdata.	34

Symbolliste

Symbol	Beskrivelse	Enhet
a	Trykkforplantningshastigheten i tunnel	m/s
A	Tunneltverrsnitt	m^2
A_{th}	Thoma tverrsnittet	m^2
C_m	Middel vannhastighetsamplitude	m/s
D	Diameter, tunneldiameter	m
D_h	Hydraulisk diameter	m
f	Frekvens	Hz
f_d	Dynamisk dempekoeffisient	–
f_s	Stasjonær falltapskoeffisient	–
g	Tyngdens akselerasjon	m/s^2
H	Meter vannsøyle	m
k	Friksjonskonstant for frekvensavhengig dempning	$1/s$
K_r	Fiktiv ruhetsfaktor	m
L	Lengde	m
M	Manningstall	$m^{1/3}/s$
P	Antall poler i generator	–
t	Tid	s
Q	Volumstrøm	m^3/s
Q_0	Middel volumstrøm	m^3/s
Q_m	Middel volumstrømsamplitude	m^3/s
v	Hastighet	m/s
V	Volum	m^3
κ	Åpningsgraden til turbinen	–
λ	Moody's friksjonsfaktor	–
ω	Vinkelfrekvens	rad/s
Ω	Fartstall	–
ρ	Tetthet	kg/m^3

Tabell 1: Liste over symboler brukt i oppgaven

Kapittel 1

Introduksjon

I samarbeid med veileder Ole Gunnar Dahlhaug ble det tidlig funnet at det ikke var hensynsmessig å gjøre de analysene som er gitt i oppgaveteksten på Fennefoss. Det ville blitt en svært begrenset oppgave ettersom kraftverket er planlagt med åpen kanalløsning. Dersom kanalene ville blitt lagt i rør ville det heller ikke vært hensiktsmessig å gjøre transientanalyser ettersom rørene ville vært relativt korte.

Det ble derfor utarbeidet en ny oppgave som omhandler Svartisen kraftverk. Her var det planlagt å gjøre frekvensresponsmålinger for å studere dynamikken i den komplekse vannveien før utvidelsen med en ekstra turbin.

Svartisen kraftverk ligger ved Glomfjord i Nordland, som er omtrent to og en halv times kjøretur fra Bodø lufthavn. Kraftverket ble planlagt og tilrettelagt for to francisturbiner på 350MW, men bare en ble installert da det ble satt i drift i 1993. Det skal nå installeres en andre turbin på 250MW i tillegg til regulatorer på både ny og gammel maskin. Svartisen har en meget komplisert vannvei med over 40 bekkeinntak under breen. Dette gjør det vanskelig å få en oversikt over hvordan vannveien vil oppføre seg i drift og vanskeliggjør reguleringen. Det ble derfor gjort frekvensresponsmålinger for å kartlegge oppførselen til det dynamiske systemet. Basert på resultatene kan man forandre regulatorparametrene hvis det viser seg å være nødvendig. Vannveien er konstruert med en uvanlig vannrennekonstruksjon. Denne har både en sørgående og en nordgående kanal, som samler flere av bekkeinntakene på ett punkt hvor de føres ned til trykksjakten.

Denne oppgaven gir da en gjennomgang av teorien bak trykkresponsmålinger, som er den type frekvensresponsmåling som ble utført, og teori som er nødvendig for å gi en forståelse for målingene og resultatene. Det blir også gitt en gjennomgang av hvordan målingene ble gjennomført og måleoppsettet som ble brukt. Programmet LVTrans vil bli gjennomgått, både hvordan det brukes til trykkrespons simuleringer og hva programmet gjør. Deretter presenteres en modell av Svartisen laget i LVTrans, og trykkrespons simuleringer av Svartisen kraftverk. Resultatene fra målingene og simuleringene analyseres og sammenlignes, og eventuelle avvik

identifiseres og begrunnes. Det blir så vurdert hvor god modellen er og hvordan den kan være til nytte ved stabilitetsanalyser.

Resultater og avvik er presentert i tabeller og grafer. Modellen er representert både som skisse og hvordan den vil bli seende ut i LVTrans.

Kapittel 2

Bakgrunnsstudie

2.1 Modell for frekvensavhengig dempning

Hermod Brekke leverte i 1984 sin doktorgradsavhandling hvor han hadde jobbet med å forbedre den teoretiske modellen for frekvensavhengig dempning i tunnelsystemer. Det ble i denne oppgaven jobbet ut ifra fire punkter:

1. Påvirkning fra turbinkarakteristikk
2. Dempning av oscillasjoner påvirket av friksjon som virker å være større enn hva som er funnet gjennom linearisering av stasjonær strømning, spesielt ved lave gjennomsnittshastigheter.
3. Spesielt hensyn til sjakter med null gjennomsnittlig strømning som er tilkoblet hovedtunnelen.
4. Måling av oscillerende strømning i tunneler for å bygge empirisk modell for friksjonsavhengig dempning i tunnelsystemer.

Under arbeidet med doktorgradsavhandlingen ble det gjennomført frekvensresponsmålinger på seks kraftverk med tunnelsystemer fra 7,5 til nesten 20 km. Dette er i følge Brekke den største samlingen av frekvensresponsmålinger som er publisert [1]. Målingene ble gjennomført for å opparbeide en tilstrekkelig datamengde til å lage en empirisk modell for friksjonsavhengig dempning. I beskrivelsen av målingene vises det til viktigheten av å måle eksitasjonen direkte på ledeskovlene og ikke bare utslaget til servoen. Dette fordi amplituden og fasen vil være forskjellig fra servoarm til ledeskovlen på grunn av hysteresetap og slark. Det vil derfor bli noe ekstra usikkerhet dersom man ikke måler eksitasjonen direkte på ledeskovlen. Dersom man utfører denne type målinger på et kraftverk med peltonturbiner er det bevegelsen i nålen som måles, da det er denne som varierer pådraget.

Hermod Brekke tok blant annet utgangspunkt i arbeidet til Ivar G. Jonsson, som hadde studert dempningen til bølger over ru sjøbunn. Jonsson baserte seg igjen på tidligere arbeid gjort av Dirk H. Swart. Brekke har også sett på arbeidet til Jürgen Kongeter, som utførte modelltester av turbulent oscillerende strømning i glatte rør.

Hermod Brekke tar utgangspunkt i formler for dynamisk friksjon, f_d som tidligere er utviklet av Swart og brukt i Jonssons arbeid:

$$f_d = e^{-5,977} + 5,213 \left(\frac{C_m}{K_r \omega} \right)^{-0,194} \quad \text{for} \quad \frac{C_m}{K_r \omega} \geq 1,57 \quad (2.1)$$

$$f_d = 0,3 \quad \text{for} \quad \frac{C_m}{K_r \omega} < 1,57 \quad (2.2)$$

Her har vi at:

- $\frac{C_m}{K_r \omega} = \frac{Q_0 |q|}{AK_r \omega}$.
- ω = frekvensen til oscillasjonene.
- K_r = Nikuradses ruhetsfaktor for ru sjøbunn.
- C_m = amplituden til vannhastigheten.

Basert på målingene gjort ved Tafjord kraftverk utviklet Brekke følgende formel for tilfellet $\frac{C_m}{K_r \omega} < 1,57$ framfor å anta at $f_d = 0,3$ slik som Jonsson gjorde.

$$f_d = \frac{0,4725}{C_m / K_r \omega} \quad (2.3)$$

Brekke har valgt å bruke empiriske data for å finne verdier for K_r , framfor Nikuradses ruhetsfaktor som er brukt av Jonsson. K_r viste seg å være en fiktiv ruhet som er basert på stasjonært falltap og tverrsnitt. De empiriske dataene er hentet ut av måledata fra frekvensresponsmålinger med tilhørende falltapsmålinger utført ved seks norske kraftverk med stor fallhøyde og lange tunneler. En antakelse som er brukt for å utvikle en ligning for K_r , er at det finnes en grense for vannføringsamplituden delt på frekvensen, der dynamisk friksjon er lik den stasjonære falltapskoeffisienten. Ligning 2.4 viser hvordan man finner den fiktive ruheten K_r .

$$K_r = \frac{400}{A} \left(\frac{\ln f_s + 5,977}{5,213} \right)^{5,155} \quad (2.4)$$

Dersom man har Manningstallet, M , kan man finne f_s ved:

$$\lambda = \frac{119,7}{M^2 A^{1/6}} \quad (2.5)$$

Hvor man har at $f_s = \lambda/4$, λ er Moodys friksjonsfaktor.

Til slutt har man formelen for friksjonsfaktoren for oscillerende strømning som var målet for Hermod Brekkes doktoravhandling:

$$k = \frac{2gQt}{M^2 R_h^{4/3} A} + \frac{8f_d}{\pi D^3} Q_0 |q_{n-1}| \cos(\pi/8) + i \frac{8f_d}{\pi D^3} Q_0 |q_{n-1}| \sin(\pi/8) \quad (2.6)$$

Hvor man bruker ligning 2.1 til å finne f_d og ligning 2.4 for å finne K_r .

2.2 Stabilitetssimuleringer av Svartisen

I 2004 ble det installert et system for å måle vitale data for generatoren og turbinen ved Svartisen. Dette inneholdt 27 målepunkter med en målefrekvens på 1kHz. Systemet foretok kontinuerlige målinger i to år og ble laget og installert av SINTEF Energiforskning. Vannkraftlaboratoriet ved NTNU fikk så en forespørsel om å analysere den enorme datamengden som var samlet inn, med spesielt fokus på hydrauliske transienter ved start og stopp av anlegget. Det ble da foretatt sammenligninger mellom måledata og tidligere simuleringer, hvor det var noen operasjonspunkt som var av spesiell interesse. Resultatene fra disse analysene ble presentert av Torbjørn K. Nielsen og Morten Kjeldsen på 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems [2].

Under simuleringer av regulatorstabiliteten var det fokus på å finne det mest problematiske punktet. I dette tilfellet ble det funnet at det største problemet oppstår ved lav vannføring i form av trykkstøt. Årsaken til dette er at trykkstøtsfrekvensen ligger svært nær kryssfrekvensen og dermed påvirker regulatorytelsen. Trykkstøtsfrekvensen som er problematisk, oppstår mellom reservoaret (Storglomvatn) og den noe spesielle samlerennen for bekkeinntak som finnes på Svartisen. Dette er uvanlig ettersom det vanligvis er trykkstøt mellom turbinen og nærmeste vannspeil som er dominerende.

Et annet interessant funn som ble gjort var angående U-rørsfrekvenser i systemet. En U-rørsfrekvens med samme periode $T = 660$ s før og etter nedstengning ble observert. Dette tyder på at en av de frie overflatene i systemet ligger tett opp til Thoma tverrsnittet og kan føre til ustabile U-rørssvingninger.

Det er så vidt undertegnede vet, ikke gjort noen fullstendig dynamisk analyse av disse måledataene. En slik analyse vil kunne gi verdifull informasjon og kunne brukes for å validere metodene som er brukt ved systemdynamikkanalyser.

2.3 Reguleringsstabilitet

På oppdrag fra Statkraft ble det utarbeidet en Sintef rapport som så på reguleringsstabiliteten ved Svartisen kraftverk [3]. Rapporten undersøker flere alternative vannveier da reguleringsstabiliteten, slik den var planlagt (1989), ikke var akseptabel etter Statkrafts standard. Grunnen til dette var elastiske trykksvingninger mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen. For å oppnå tilfredsstillende reguleringskvalitet ble det foreslått to alternative løsninger. Den ene var å innføre en luftpute i systemet med luftvolum på $30\,000\text{ m}^3$. Den andre løsningen var å utvikle en ny type turbinregulator med trykktilbakekopling. Løsningene ble vurdert sammen med Statkraft sine representanter og man kom fram til at det ville være mer økonomisk å utvikle den nye regulatoren framfor å bygge luftpute. Dette ble derfor valgt og denne typen regulator er i drift ved Svartisen i dag.

Kapittel 3

Teori

I dette kapitlet gis det en gjennomgang av den teorien som er nødvendig for de analysene som gjøres senere i oppgaven. For grundigere forklaringer vil det noen steder bli henvist til vedlegg.

3.1 Utledning av Allievis ligninger

Kontinuitetsligningen [4]:

Kontinuitetsligningen brukt på en rørstreng sier at: volumstrøm inn i et kontrollvolum \div volumstrømmen ut = akkumulert masse. Formulert matematisk blir dette som i ligning 3.1.

$$Q - [Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx] = \frac{dV}{dt} \quad (3.1)$$

Ved å benytte kjerneregelen her får man:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{dV}{dt} = v \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Dersom man antar at røret er stivt og ikke beveger seg i x-retning, får man følgende:

$$\div \frac{\partial Q}{\partial x} dx = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.2)$$

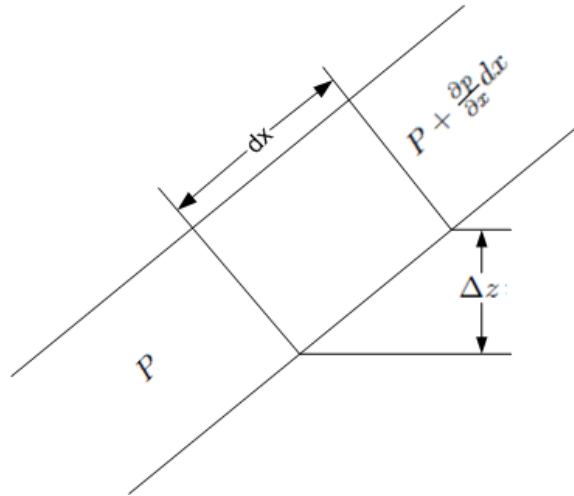
Ved så å inkludere kompressibilitet slik det er gitt av Hooks lov og bruker trykkenheten mVs hvor $h = \frac{P}{\rho g}$ og $H = h + z$ får man uttrykket gitt i ligning 3.3

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

Som ved å bruke $Q = vA$ blir:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

Bevegelsesligningen [4]:



Figur 3.1: Kraftbalanse på væskeelement.

Ved å bruke Newtons 2. lov på en rørstreng, som vist i figur 3.1, får man følgende:

$$\overbrace{pA - A\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) - \rho g A \frac{\partial z}{\partial x} dx}^F = \overbrace{\rho g A dx}^m \overbrace{\frac{dv}{dt}}^a \quad (3.5)$$

Ved å benytte kjernerregelen som vist tidligere samt å redusere ved å dele hele uttrykket på $A dx$ får man:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (3.6)$$

For å tilpasse denne ligningen til vannkraftsammenheng innfører man at $h = \frac{p}{\rho g}$ og $H = h + z$ for slik å kunne operere med enheten mVs. I tillegg innføres friksjonstap i

følge Darcy-Weisbach: $\Delta h = \lambda \frac{v|v|}{2gD_h}$ hvor D_h er hydraulisk diameter og λ er moody friksjonsfaktoren.

Man får da:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \frac{v|v|}{2gD_h} = 0 \quad (3.7)$$

Man kan forenkle denne ligningen videre ved å skrive om tapsleddet. Man innfører da konstanten $k = \frac{\lambda}{2gD_h A^2}$ og bruker at $Q = vA$ og får:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + kQ|Q| = 0 \quad (3.8)$$

3.2 Karakteristikkmetoden

Karakteristikkmetoden er et verktøy for å løse hyperbolske differensiallikninger. Det er den mest brukte metoden ved undersøkelse av rørstrømninger for beregninger i tidsplanet. Bevegelses- og kontinuitetsligningene brukes for å beskrive rørstrømninger og består av to kvasilineære hyperbolske differensiallikninger. Likningene må i systemer bestående av flere rørdeler løses for hver rørdel, hvor grensebetingelsene blir gitt av naborørdelene [4].

$$L_1 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + kQ|Q| = 0 \quad (3.10)$$

Man innfører så en ukjent multiplikator M og kombinerer de to ligningene på følgende måte:

$$ML_1 + L_2 = 0 \quad (3.11)$$

og får:

$$M \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} \right] + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + kQ|Q| = 0 \quad (3.12)$$

Som kan skrives om for å skille trykkhøyde og hastighet:

$$M \left[\frac{\partial H}{\partial x} \frac{g}{M} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[M \frac{a^2}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + kQ|Q| = 0 \quad (3.13)$$

Ved å bruke kjernerregelen har vi at:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial t}$$

For å få en ordinær differensialligning setter man at:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{M} = M \frac{a^2}{g} \quad (3.14)$$

Og får at $M = \pm \frac{g}{a}$ og $\frac{dx}{dt} = \pm a$.

Ligningen blir så:

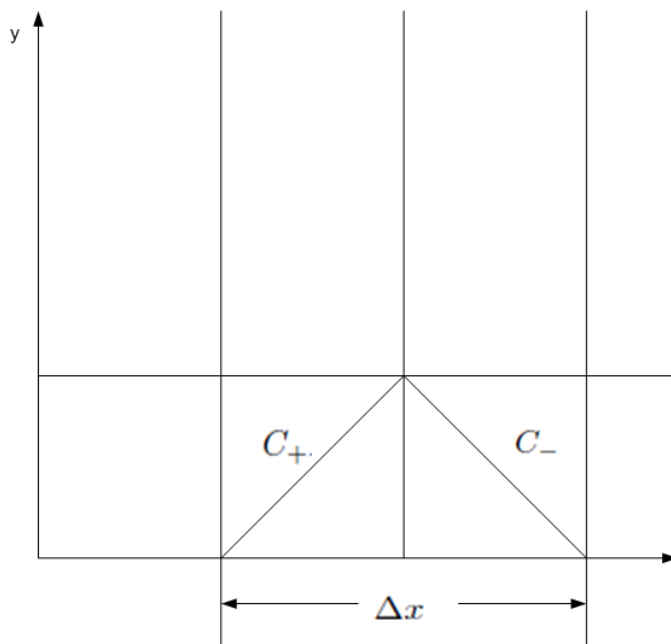
$$M \frac{dH}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + kQ|Q| = 0 \quad (3.15)$$

Man ender da opp med to ligningssett for å løse:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + kQ|Q| = 0 \\ \text{for } \frac{dx}{dt} = a \end{array} \right\} C_+ \quad (3.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} \div \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + kQ|Q| = 0 \\ \text{for } \frac{dx}{dt} = \div a \end{array} \right\} C_- \quad (3.17)$$

Ved hjelp av disse ligningssettene finner man Q og H for neste tidsskritt og regner seg slik videre som vist i figur 3.2.



Figur 3.2: Karakteristikkmetoden.

3.3 AFF-diagram

Teorien her er hentet fra Nielsen [5]. Amplitude–Fase–Frekvens–diagram er vanlig å bruke for å studere stabiliteten til blant annet vannkraftverk. Ved å presentere amplitude og fasevinkel ved forskjellige frekvenser slik kan man raskt gjøre en enkel analyse av stabiliteten. AFF er en vanlig måte for å finne regulatorkonstantene, da disse kan leses utifra diagrammet. Det benyttes logaritmiske akser i et AFF-diagram med frekvens langs x-aksen og amplituden i dB og fase i grader langs y-aksen. For å tegne et asymptotisk AFF-diagram for et vannkraftverk utifra systemets transferfunksjon må man vite at:

- Poler i venstre halvplan gir en vinkelkoeffisient -1 på amplitudekurven og -90^0 fasedreining.
- Nullpunkt i venstre halvplan gir vinkelkoeffisient $+1$ på amplitudekurven og $+90^0$ fasedreining.
- Nullpunkt i høyre halvplan gir vinkelkoeffisient $+1$ på amplitudekurven og -90^0 fasedreining.

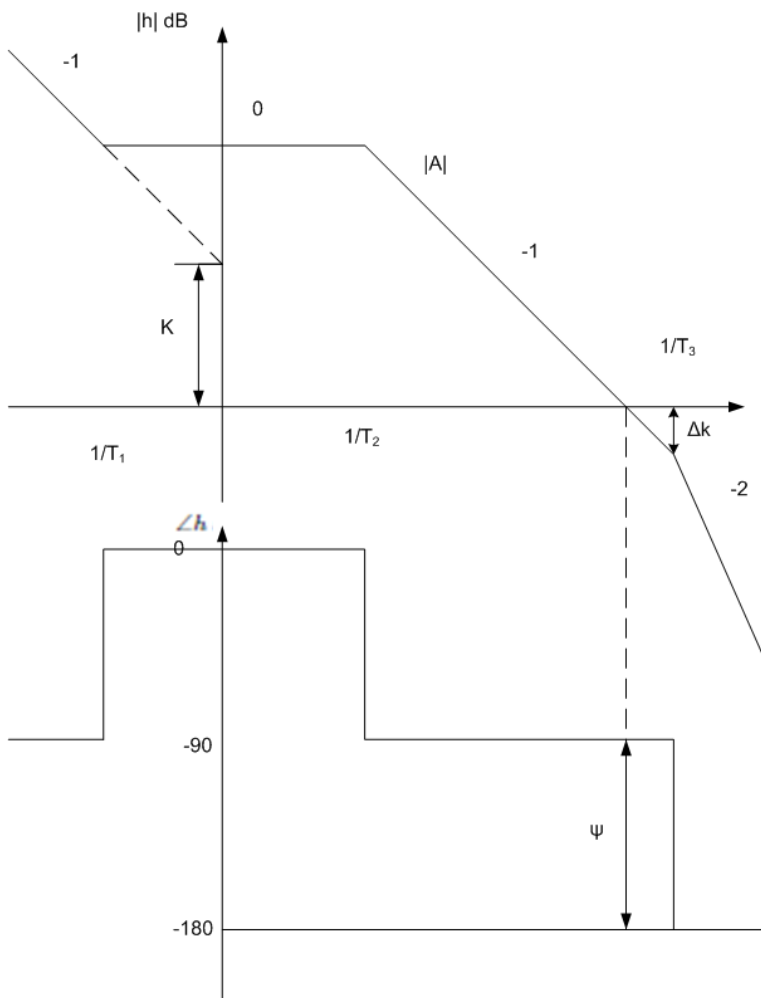
Viktige punkter i et AFF-diagram er:

- Kryssfrekvensen, ω_c , er frekvensen hvor amplitudekurven krysser 0 dB linjen, altså har et amplitudeforhold lik 1.

- Forsterkningen, K , er avstanden mellom 0 dB linjen og skjæringspunktet mellom asymptoten fra polen $s = 0$ og $\omega = 1$ aksen.
- Forsterkningsmarginen, Δk , er avstanden mellom 0dB linjen og amplitudekurven i punktet der fasekurven krysser -180°
- Fasemarginen, ψ , sier hvor langt over -180° fasekurven er ved kryssfrequensen

I figur 3.3 er det vist et eksempel på et enkelt AFF-diagram. Her er forsterkningsmarginen, fasemarginen og forsterkning tegnet inn. Eksempelet er tegnet utifra følgende

generelle transferfunksjon: $H(s) = \frac{k(1+T_1s)}{s(1+T_2s)(1+T_3s)}$



Figur 3.3: Eksempel på AFF-diagram.

Man har i følge Nyquists stabilitetskriterium at et system er absolutt stabilt dersom $\angle h(j\omega) > -180$ deg når $|h(j\omega)| < 1$. Det vil si at fasekurven ligger over -180 deg ved kryssfrekvensen. Vanlige kriterier i vannkraftsammenheng er ofte: $\psi > 45$ deg og $\Delta k > 2 = 6dB$.

3.4 Frekvenser i vannkraftsystem

Det er i hovedsak frekvensen til to typer trykktransienter man er ute etter når man gjennomfører frekvensresponsmålinger i et vannkraftsystem. Den første er såkalte U-rørssvingninger som oppstår mellom to vannspeil i systemet ved varierende pådrag. Disse har relativt lav frekvens og vil ligge før kryssfrekvensen i AFF diagrammet og er derfor innenfor reguleringsgrensen. Ligning 3.18 gir frekvensen til en U-rørssvingning i rad/s [5]. En grundigere gjennomgang av U-rørssvingninger kan sees i vedlegg A.1.

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A_s \sum \frac{L}{A}}} \quad (3.18)$$

Her er A_s tverrsnittet i svingesjakten og $\sum L/A$ lengde og tverrsnitt til tunnelsystemet mellom svingesjakten og magasinet.

En viktig faktor ved U-rørssvingninger er nettopp tverrsnittet i svingesjakten. For å sikre stabile U-rørssvingninger må tverrsnittet være større enn Thoma-tverrsnittet gitt av ligning 3.19[5]. Vanlig standard er at svingesjakten skal være halvannen ganger Thoma tverrsnittet, for å være på den sikre siden. Det er alltid stor usikkerhet knyttet til den faktiske friksjonen i tunnelen, noe som påvirker tverrsnittet i stor grad og gir grunn til å være forsiktig.

$$A_{th} = 0,0085 \frac{M^2 A^{5/3}}{H_0} \quad (3.19)$$

Den andre frekvensen er trykkstøtsfrekvensen. Denne oppstår også ved varierende pådrag og er desidert kraftigst ved full stans eller oppstart. Trykkstøt forekommer på grunn av elastisitet i vann og rør/tunnel, og en grundigere gjennomgang kan finnes i vedlegg A.2. Frekvensen til trykkstøtene kan finnes av ligning 3.20

$$f = \frac{a}{4L} \quad (3.20)$$

Her er a trykkforplantningshastigheten i m/s.

Trykkstøt er høyfrekvente og absolutt ustabile. Man skal derfor påse at disse alltid ligger over kryssfrekvensen og ikke blir forsøkt regulert.

3.5 Trykkrespons

Trykkrespons er en form for frekvensrespons som brukes i vannkraftsammenheng og er en metode for å finne ut hvordan systemet oppfører seg dynamisk. Det vil si hvordan systemet reagerer på lastvariasjoner på turbinen. En trykkresponsmåling gjennomføres ved å overstyre regulatoren og påtvinge en sinusvingning på servoen/ledeskovlene. Trykket før turbinen blir så målt ved hjelp av en trykktransducer og logget. Man kan da se hvordan påvirkningen fra sinusvingningen på ledeskovlene har forplantet seg gjennom vannveien, altså systemets respons. Dette gjøres for flere frekvenser ω og man måler responsen for hver frekvens. Responsen representeres så ved en forsterkning $|H(j\omega)|$ og faseforskyvning $\psi = \angle h(j\omega)$. Man kan da tegne opp et AFF (Amplitude Fase Frekvens) diagram for systemet.

3.6 Fast Fourier Transform

Fast Fourier Transform(FFT) er en algoritme for å løse Diskrete Fourier Transformasjoner(DFT) mye raskere enn andre algoritmer. Ved vanlig DFT vil man trenge N^2 multiplikasjoner for å gjøre en Fouriertransformasjon av et signal med N målepunkter. Ved bruk av FFT algoritmen er dette redusert til $N \log_2 N$ multiplikasjoner hvor 2^N må være et heltall.

En Fourier serie på kompleks eksponensiell form kan som kjent skrives som [6]:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.21)$$

Hvor hver c_n koeffisient er et komplekst tall med reell og imaginær del og finnes av:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3.22)$$

En funksjon trenger ikke være periodisk for å kunne fouriertransformeres. Man kan fouriertransformere en del av funksjonen med lengde T ved å gjenta denne periodisk. Vinkelfrekvensen, ω_0 , bestemmes da fra denne delen av funksjonen. Hvis en høyere verdi av T enn en periode blir valgt, så vil den laveste frekvensen bli redusert. Denne effekten kan forsterkes ved å la T nærme seg uendelig og slik få den laveste frekvensen til å nærme seg null. Dette er konseptet bak Fouriertransformasjon. Fouriertransformasjonen av en funksjon $f(t)$ er definert som [6]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.23)$$

For målinger blir et signal er målt over en bestemt tidsperiode med et gitt antall målepunkter, altså ikke kontinuerlig. Ved slike målinger må man bruke en annen metode enn for kontinuerlig Fourier transformering. Dette er kalt diskret Fourier transform og er definert som [6]:

$$F(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t)e^{-j(2\pi k\Delta f)(n\Delta t)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.24)$$

Her er N antall målepunkter tatt i løpet av en tidsperiode T . Δf er ekvivalent med $1/T$ og Δt ekvivalent med T/N . Hver F er her komplekse koeffisienter i en serie sinusoider med frekvensene $0, \Delta f, 2\Delta f, \dots, (N-1)\Delta f$. Amplituden til F for den gitte frekvensen representerer så bidraget frekvensen gir til det originale signalet. I følge Nyquist-Shannons Sampling teorem har man at $f_s > 2f_m$ hvor f_s er loggefrequensen og f_m er frekvensen man er ute etter. Det vil si at for å finne en frekvens på 1Hz, må loggefrequensen være større enn 2Hz.

Ved direkte numerisk integrasjon vil man trenge datatid proporsjonalt med N^2 . Hvis man derimot bruker FFT algoritmen kan denne tiden reduseres til å være proporsjonal med $N \log_2 N$ som nevnt ovenfor. FFT gir intensiteten til de forskjellige frekvensene som er representert i signalet. Altså det relative bidraget til det originale signalet. For å finne tilbake til amplituden må man da dele intensiteten på $N/2$ som følge av Nyquist-Shannons Sampling teorem.

3.7 Spektumsanalyse og spektrumslekkasje

FFT algoritmen blir brukt i spektrumsanalyse for å gjenkjenne de forskjellige frekvensene i et signal. Gjennom spektrumsanalyse av et signal får man en representasjon av hvor dominerende de forskjellige frekvensene i et signal er. Et problem man kommer bort i ved spektralanalyse er at man vil se bidrag fra frekvenser rundt de som egentlig er til stede. Dette problemet kommer fordi man ikke har uendelig mange loggepunkter. Når man bruker FFT i LVTrans, som blir omtalt i kapittel 5, vil man ikke få problemene med spektrallekkasje. Dette er fordi man bruker at $respons = FFT(H)/FFT(Y)$, hvor H er trykk og Y er eksitasjon. Det man da får er et forholdstall på amplitudeendringen som vil være likt både med og uten spektrallekkasje, ettersom man har likt antall loggepunkter og spektrallekkasjen vil være lik både for ledeskavlssignalet og trykkmålingssignalet.

3.8 Aliasing

Ved få målepunkter av et signal kan man få uønskede resultater. Når antall målefrekvenser er lik frekvensen man vil måle, eller en helt allsbrøk av frekvensen, vil resultatet fremstå som et konstant signal og ikke tidsvarierende. Dette er fordi man

måler signalet i samme punkt hver gang. Hvis man ikke følger Nyquist-Shannons Sampling teorem og, har målefrekvens som er lavere enn to ganger frekvensen man vil måle, kan man finne såkalte aliasfrekvenser. Dette skjer ved at man måler et signal med en gitt frekvens, og målepunktene treffer signalet slik at det ser ut som et signal med lavere frekvens. Når man følger sampling teoremet, vil man ikke få noen frekvenser lavere enn halve målefrekvensen som stemmer overens med måledataene, men høyere frekvenser vil derimot kunne stemme overens. Men siden man skal måle med en frekvens høyere enn det dobbelte av den høyeste frekvensen i signalet man måler, vil man kunne utelukke disse høyere frekvensene.

Kapittel 4

Målinger

Svartisen har en meget komplisert vannvei med over 40 bekkeinntak under breen. Dette gjør det vanskelig å få en oversikt over hvordan vannveien vil oppføre seg i drift, og dette vanskeliggjør reguleringen. Det ble derfor utført trykkresponsmålinger for å kartlegge den dynamiske oppførselen til systemet. Basert på resultatene kan man forandre regulatorparametrene hvis det viser seg å være nødvendig.

4.1 Instrumentering

Ved Svartisen ble det målt trykk og servo/ledeskovlsutslag. Til dette ble det brukt trykktransducer og trådpotensiometre, plassering av disse blir omtalt i kapittel 4.2. I tillegg ble en frekvensresponsanalysator benyttet som signalgenerator. Målingene ble utført av Rainpower på oppdrag fra Statkraft.

Måleutstyr

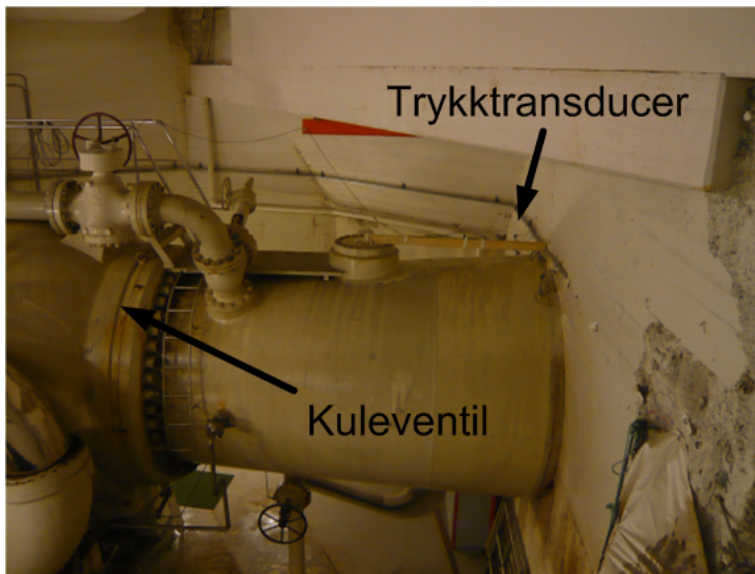
- 1253 Gain-Phase Analyzer
 - Bølgeform: Sinusbølge
 - Frekvensspekter: 1mHz til 20kHz
 - Amplitudespekter: 10mV til 10,23V rms
 - Usikkerhet amplitude:
 - * Driverkrets: $\pm 1\% \pm 10mV$
 - * Fordreining: ($@3V \leq 10MHz$ @1V>10MHz) <2%
 - Integraltid: 0,1 s til 10^5 s
- LabView terminalboks NI-DAQ 6211

- Omgjør 4–20mA signal til 2–10V signal ved hjelp av en dropmotstand på 500Ω (0,1%)
- Loggehastighet 250 kS/s
- 16 analoge innganger og 2 analoge utganger hver med 16 bits oppløsning
- Input/Output: 0–20mA og $\pm 10V$
- Potensiometer Modell WS17KT
 - Utgangssignal: 4–20mA
 - Rekkevidde: 0–2000mm
 - $\pm 10\%$ linearitet
- Trykktransducer DRUCK PTX 1400
 - Utgangssignal: 4–20mA
 - Rekkevidde: 0–100 bar absolutt
 - Usikkerhet på grunn av temperatur: $\pm 2\%$ fra $-20^{\circ}C$ til $+80^{\circ}C$

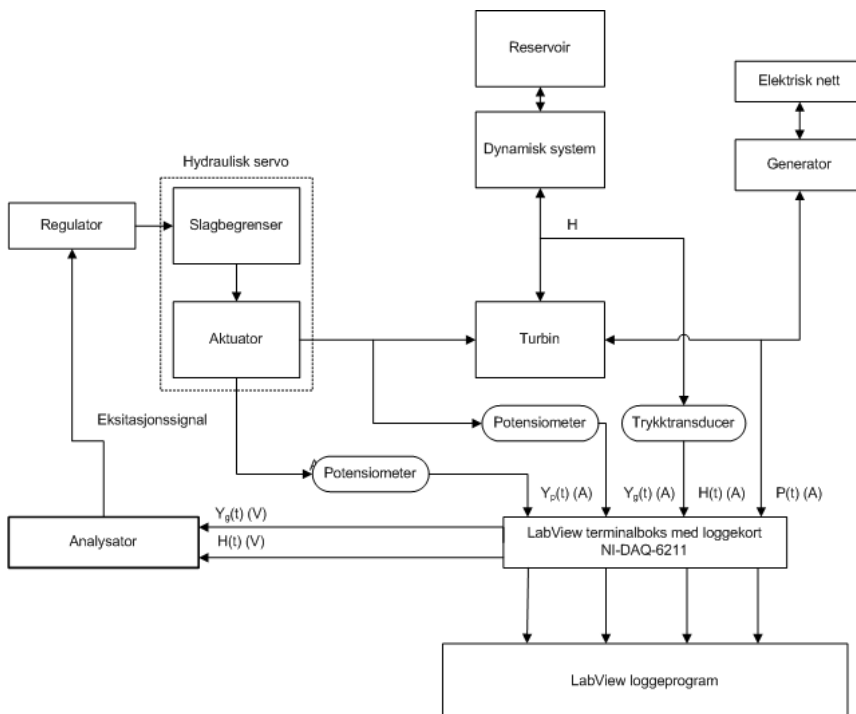
4.2 Måleoppsett

Det ble montert en 100 bars trykktransducer i trykksjakten rett før kuleventilen som vist i figur 4.1. På aktuatoren og direkte på en av ledeskovlakslingene, ble det montert potensiometer for å måle nøyaktig utsving/bevegelse. Under målingene ble regulatoren overstyrt av frekvensresponsanalysatoren. Denne fungerer som en signalgenerator som sender et sinussignal for å styre aktuatorbevegelsen, basert på dets frekvens og amplitude. Slagbegrenseren stilles også inn slik at denne ikke begrenser eksitasjonen i måleområdet.

Trykktransducere og potensiometrene sender så et ampersignal, som må gjennom en dropmotstand for å få et voltsignal som analysatoren kan lese. Fra motstanden sendes så signalet til analysatoren, som viser faseforskyvning og amplitude samt beregner signalets reelle og imaginære verdier. Signalene sendes også til en datamaskin som kjører et loggeprogram laget i LabView. En skjematisk tegning av måleoppsettet er vist i figur 4.2.



Figur 4.1: Montering av trykktransducer.



Figur 4.2: Måleoppsett for frekvensrespons.

4.3 Programvare

4.3.1 Loggeprogram

Under målingene ble det brukt et loggeprogram laget i LabView. Programmet er laget av PhD Håkon Hjort Francke og modifisert for målingene på Svartisen. Programmet har en loggehastighet på 1000Hz med antall målinger per kanal på 900. Målingene blir lagret i tekstfiler hvor man får tid, analysator, ledeskavl, trykk og servoutslog. Dette blir så behandlet i et databehandlingsprogram for å få resultatene på den ønskede formen.

4.3.2 Databehandlingsprogram

For å behandle dataen etter at målingene er gjennomført brukes et LabView program. De viktigste funksjonene i dette programmet er de to Viene Frequency Responce Function(FRF) og Extract Single Tone Information(ESTI). FRF tar inn tidssignalene x og y , som er henholdsvis det målte signalet og det påtrykte signalet fra analysatoren. Blokken gjennomfører FFT på signalene og gir amplituden i dB og faseforskyvningen i grader til responsen ut. ESTI tar inn tidssignalet fra målingen og returnerer frekvensen til signalet i Hz.

4.4 Kalibrering

Kalibreringen av potensiometeret ble gjort ved å gradvis kjøre opp ledeskavlåpningen. Man leste så av direkte på linjalen på aktuatoren og registrerte måleverdien for potensiometeret. Før avreise ble også trykktransduceren kalibrert. Det ble gjort ved hjelp av et dødvektsmånerometer type DRUCK Pressurements P3223-1, av stipendiat Eve Walseth, og kalibreringsdataen er vist i vedlegg B.

4.5 Kjøreplan

Målingene ble gjort fra 13. – 16. september, hvor den første dagen ble brukt til å sette opp og kalibrere utstyr. Tirsdag 14. september ble det kjørt eksitasjon rundt 320MW i frekvensområdet 0,003Hz – 0,5Hz. Onsdag 15. september ble det kjørt eksitasjon rundt 220MW i frekvensområdet 0,005Hz – 0,5Hz. Torsdag 16. september ble brukt til å kjøre eksitasjon i området rundt 0,09Hz med mindre steg, Δf , både på 320MW og 220MW. Dette var for å få større nøyaktighet i dette området da resultatene her viste en uventet frekvenstop. Resultatene ble da som forventet med en frekvenstop på rundt 0,09Hz. Alle dataene ble logget med loggeprogrammet beskrevet i kapittel 4.3.1 og etterpå behandlet med programmet beskrevet i kapittel 4.3.2.

Skjematisk oppsett av hvordan målingene ble utført kan sees i tabell 4.1. For det meste ble det brukt skrittleder på $\Delta f = 0,01\text{Hz}$. Der det krevdes mest nøyaktighet, rundt $0,09\text{ Hz}$, ble det brukt skrittlengder på $\Delta f = 0,0025\text{Hz}$.

14. Sept. 320MW	
Frekvenser [Hz]	Amplituder [V]
0,03 – 0,09	0,3
0,1 – 0,2	0,2
0,085 – 0,5	0,2
15. Sept. 220MW	
Frekvenser [Hz]	Amplituder [V]
0,01 – 0,16	0,2
0,17 – 0,5	0,15
0,009	0,5
0,008 – 0,005	0,4
16. Sept. 320MW	
Frekvenser [Hz]	Amplituder [V]
0,03 – 0,14	0,2
16. Sept. 220MW	
Frekvenser [Hz]	Amplituder [V]
0,07 – 0,13	0,2
0,165	0,51

Tabell 4.1: Kjøreplan for frekvensrespons målingene på Svartisen

Her er amplituden i volt spenningsutslaget på det elektriske signalet.

Videre kan man se måletettheten rundt frekvenstoppene i tabell 4.2.

Frekvens 320MW[Hz]	Δf[Hz]	Frekvens 220MW[Hz]	Δf[Hz]
0,006	0,01	0,006	0,01
0,0925	0,0025	0,0925	0,0025
0,17	0,012	0,1725	0,005
0,255	0,005	0,255	0,005
0,37	0,01	0,38	0,01
0,45	0,01	0,46	0,01
0,49	0,01	–	–

Tabell 4.2: Steglengde ved målingene rundt frekvenstoppene

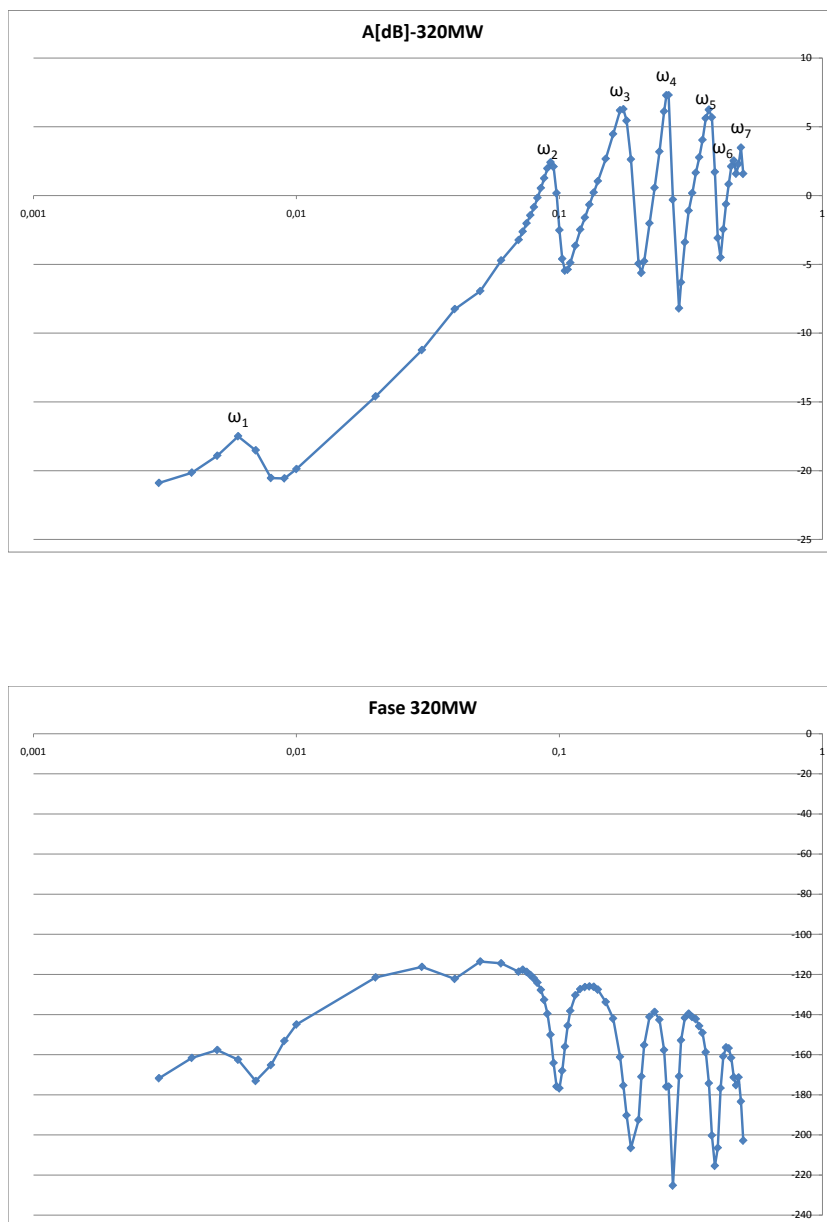
4.6 Resultater

Resultatene fra målingene ble lagt inn i Excel for enkelt å få oversikt og presenteres grafisk ved AFF diagram. Ved å observere AFF diagrammet, så gjenkjennes først

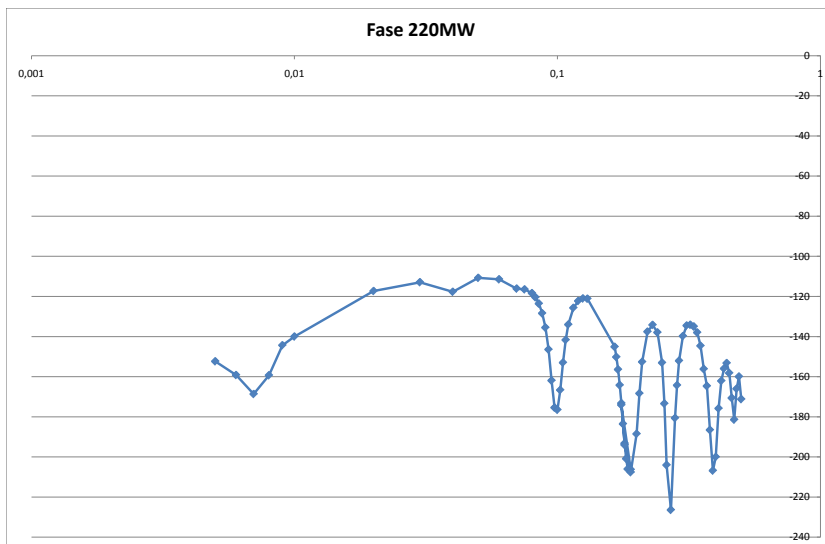
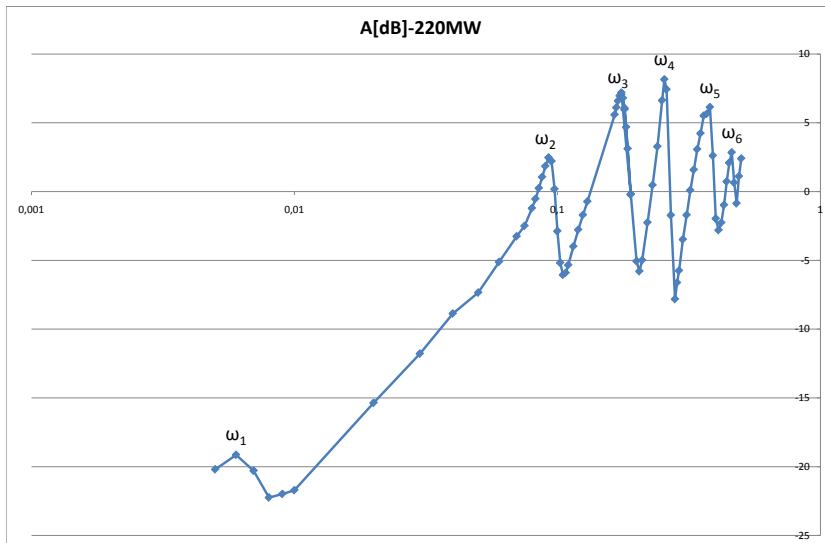
	Eigenfrekvenser 320MW	Eigenfrekvenser 220MW
ω_1	0,006Hz	0,006Hz
ω_2	0,0925Hz	0,0925Hz
ω_3	0,17Hz	0,1725Hz
ω_4	0,255Hz	0,255Hz
ω_5	0,37Hz	0,375Hz
ω_6	0,45Hz	0,46Hz
ω_7	0,49Hz	Utenfor måleområde

Tabell 4.3: Resonanstopper fra måling

en lavere frekvens, ω_1 , som er en u-rørsfrekvens. Deretter har vi en frekvens, ω_2 som ligger rett over, og farlig nær, kryssfrequensen. Denne frekvensen vil skape forstyrrelser i reguleringen og gi stående svingninger i systemet. Denne frekvensen er ganske uvanlig og er omtalt som en elastisk trykksvingning mellom Storglomvatn og vannspeilet i bekkeinntaket nærmest turbinen[7]. I tabell 4.3 kan man se hvor frekvenstoppene fra målingene, som er vist i figur 4.3 og 4.4, befinner seg. I figur 4.3 og 4.4 har man frekvens i Hz langs x-aksen, og langs y-aksen har man amplituden i dB og fasen i grader.



Figur 4.3: AFF diagram fra måling ved 320MW.



Figur 4.4: AFF diagram fra måling ved 220MW.

4.7 Feilkilder

Ved målingene viste det seg at potensiometeret tilkoblet ledeskovlakslingen ikke fungerte tilfredstillende. Man kunne observere at tråden var slakk og at målingene ble tydelig påvirket av dette. Derfor fikk man ikke målt det faktiske utslaget på ledeskovlen og må regne med slark mellom aktuator og ledeskovlene som feilkilde. Ellers har man også systematisk usikkerhet i måleutstyret som vist i instrumenteringsdelen.

Kapittel 5

Simuleringer

5.1 Introduksjon av LVTrans

LVTrans er et program laget for gjøre fulltransiente beregninger for væskefylte rørsystemer. Programmet er skrevet i LabView og bruker samme brukergrensesnitt og oppbygning med Virtual Instrument (VI). Det benytter seg av karakteristikkmotoden for å løse de partielle differensialligningene som beskriver kompressible strømninger. Programmet inneholder også en AFF funksjon for å tegn opp et AFF diagram for systemet. Dette gjør at programmet fungerer bra for å gjøre frekvensanalyser på rørsystemene. LVTrans er objektbasert hvor man benytter seg av flere elementer, Vler, for å sette sammen et rørsystem. LVTrans er utviklet spesielt for vannkraft, noe som medfører at man har elementer som turbin, svingesjakt og PID.

5.2 Teori bak LVTrans

5.2.1 Rørkarakteristikk

LVTrans bruker karakteristikkmotoden for å beregne transientene i rørsystemet. Grensebetingelsene er da ytterdelene av systemet som resevoir, bekkeinntak og utløpsmagasin. For hver rørdel blir det så beregnet C+ og C- verdier som brukes som grensebetingelser for de nærliggende rørelementene. For å få informasjonen fra tidsplanet og over i frekvensplanet, og slik kunne lage et AFF-diagram, brukes det FFT. LVTrans bruker FFT på både eksitasjonssignalet og på trykket foran turbinen. Ved å dele $FFT(H)/FFT(Y)$ får man så responsen til systemet. LVTrans finner så amplituden og fasen til responsen av systemet med samme frekvens som eksitasjonssignalet. Dette blir så plottet i AFF-diagrammet.

Ved bruk av karakteristikkmetoden må Δt og da også Δx være lik i alle rørdelene. Dette kan løses med interpolasjon, men dette vil være en dårlig løsning ettersom det vil gi en hel del numerisk dempning. Måten det er valgt løst på er ved å justere trykkforplantningshastigheten slik at Δt og Δx stemmer overens i alle rør. Valget av å justere trykkforplantningshastigheten er gjort fordi dette er den variabelen det er knyttet høyest usikkerhet til, da den sjeldent kan bestemmes med større nøyaktighet enn $\pm 10\%$. Den eneste parameteren brukeren av LVTrans kan justere med hensyn på å få Δx til å stemme i alle rør er Δt . Metoden LVTrans bruker for å beregne Δx er gitt i ligning 5.1, hvor vi ser at N , som er antall elementer må være et heltall.

$$\begin{aligned} N &= \max \left(\text{int} \left(\frac{L}{\Delta t \sqrt{a^2 + \frac{\lambda_f}{\rho \Delta t}}} \right), 1 \right) \\ a_m &= \sqrt{\left(\frac{L}{N \Delta t} \right)^2 + \frac{\lambda_f}{\rho \Delta t}} \\ \Delta x &= \frac{L}{N} \end{aligned} \quad (5.1)$$

I LVTrans er det brukt en eksperimentell metode for transient friksjon som er lett å implementere i karakteristikkmetoden. Den har erfaringsmessig gitt meget gode resultater ved høye frekvenser, men fungerer dårlig ved lave frekvenser som U-rørssvingninger[8]. Man får da de karakteristiske ligningene som vist i ligning 5.2.

$$\begin{aligned} C^+ : H_i &= C_P - B_p Q_i + dyn \\ C^- : H_i &= C_M - B_M Q_i + dyn \end{aligned} \quad (5.2)$$

Her er:

$$dyn = \lambda(Q_{i-1} - Q_{i+1}) \quad (5.3)$$

Den dynamiske friksjonsfaktoren λ er gitt av $\lambda = \frac{\lambda_f}{2\Delta x \rho g A}$ hvor λ_f er den dynamiske dempeparameteren. Trykkforplantningshastigheten, a_m , og Δx blitt modifisert på følgende måte:

$$a_m = \sqrt{a^2 + \frac{\lambda_f}{\rho \Delta t}} \quad (5.4)$$

$$\Delta x = \Delta t \sqrt{a^2 + \frac{\lambda_f}{\rho \Delta t}} \quad (5.5)$$

5.2.2 Turbinmodell

For å finne parametrene til turbinen er det brukt et Excel ark som følger med programmet. Her er det satt inn Alab parameterene til turbinen, da designdata ikke var tilgjengelig. Verdier som skal inn i LVTrans blir så regnet ut ved bruk av kjente formler for francisdesign [9], som kan finnes i vedlegg C.

For å modellere turbinen i LVTrans har Professor Torbjørn K. Niensens modell for høytrykks francisturbiner blitt benyttet [10]. Denne modellen bygger på Eulers turbinligning og beskriver karakteristikken til turbinen. I LVTrans er Niensens turbinmodell løst ved hjelp av Newton-Rhasons metode og kan sees i ligning 5.6 og 5.7.

$$F1 = \overbrace{(1 + \sigma)h}^1 - \overbrace{|q|\frac{q}{\kappa^2}}^2 - \overbrace{\sigma\omega^2}^3 - \overbrace{R_{qk}}^4 - \overbrace{\frac{T_{wt}(q - q_0)}{dt}}^5 \quad (5.6)$$

F1 er hydraulikklikningen.

1. Her er σ en selvreguleringsparameter for turbinen. En francisturbin med høy fallhøyde har en positiv selvregulering, som vil si at en turtallsøkning vil medføre at volumstrømmen går ned [5].
2. κ er åpningsgraden til turbinen og leddet representerer således volumstrøm i forhold til åpningsgrad.
3. Leddet beskriver reduksjon som følge av selvregulering ved høyere omdreinings-hastighet.
4. R_{qk} er en faktor som forandrer turbindiagrammet for å passe pumpeturbiner og vil ved en vanlig francisturbin være lik 0.
5. T_{wt} er vannmassenes treghet mellom innløp og utløp i turbinen og leddet beskriver forandringen i volumstrømmen over tid.

$$F2 = \overbrace{|q|(m_{sa}q - \psi\omega)\eta_h}^1 - \overbrace{R_m\omega^2}^2 - \overbrace{T_a\frac{\omega - \omega_0}{dt}}^3 - \underbrace{\frac{E_r \frac{\sin \delta}{\sin \delta_r} + D_{nett}(0,5 * Poler * \omega\omega_r - \omega_{nett}\omega_{rnett}}{T_r}}^4 \quad (5.7)$$

F2 er momentlikningen som funksjon av ω og q .

1. m_{sa} er dimensjonsløst moment og er en funksjon av geometri, ledeskovlåsning, fallhøyde og rotasjonshastighet. ψ er trykkallet og gir forholdet mellom trykket ved innløp og utløp av turbinen.

2. R_m er mekanisk friksjonsfaktor. Leddet beskriver mekanisk tap som følge av rotasjonshastighet.
3. T_a er treghetskonstanten for de roterende massene. Leddet beskriver forandringen i rotasjonshastighet over tid.
4. Dette leddet beskriver påvirkningen fra nett og generator. E_r er Generatorens elektriske moment, δ er generatorens elektriske vinkel, D_{nett} er et dempeledd for generatoren og er normalt lik 1, ω er vinkelhastighet hvor ω_r , ω_{nett} og ω_{rnett} er henholdsvis rated(bestpunkt) og nettets vinkelhastighet og rated. T_r er dreiemomentet.

$$F3 = \frac{\delta - \delta_0}{dt} - (0,5 * Poler * \omega\omega_r - \omega_{nett}\omega_{rnett}) \quad (5.8)$$

Ligning F3 er generatorligningen hvor δ er den elektriske vinkelen i generatoren. De resterende leddene er forklart under momentligningen da de er inkludert der.

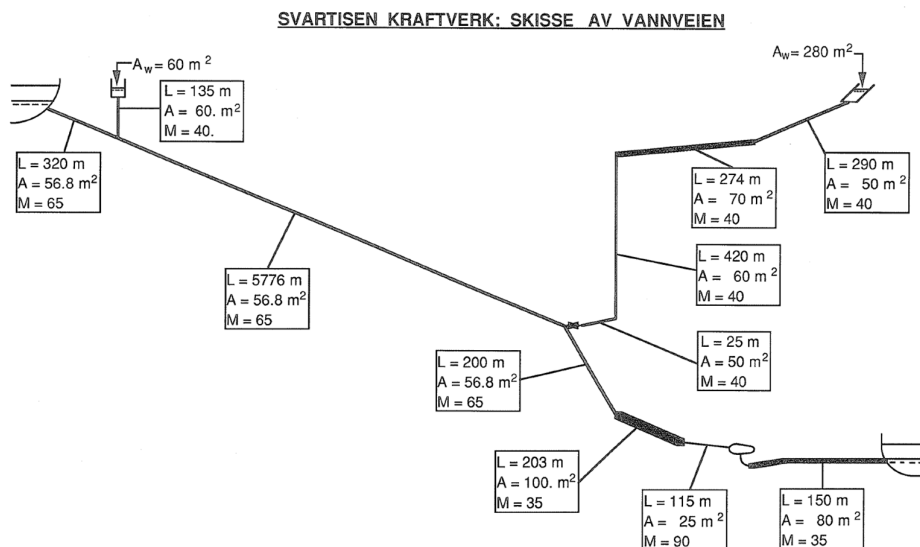
5.3 Svartisen kraftverk i LVTrans

I simuleringene er det tatt utgangspunkt i en skjematisk modell av kraftverket laget av Halvard Luraas, som vist i figur 5.1 [11]. Dette er en meget forenklet modell, men skal være tilstrekkelig til å representere den dynamiske responsen til systemet. Der hvor det virkelige systemet har mer enn 40 bekkeinntak har denne modellen to. Grunnen til at den likevel er representativ er at bekkeinntaket nærmest turbinen i virkeligheten er et oppsamlingspunkt for flere bekkeinntak. Disse samles her fra en syd- og en nordgående kanal. Modellen er lagt inn i programmet LVTrans med de gjeldene parametrene som utgangspunkt. For å kunne legge denne inn i LVTrans er alle Manningstall konvertert til Moodys friksjonsfaktor ved hjelp av formel 5.9 [12].

$$M = \left(\frac{119,7}{\lambda A^{1/6}}\right)^{0,5} \quad (5.9)$$

Når man har resultatet fra frekvensrespons målingene, og dermed har ”fasiten” til hvordan det dynamiske systemet oppfører seg, kan man forbedre modellen i 5.1. Det gjøres ved å forandre de tunnallengdene man er usikre på, samt friksjonsfaktorene og trykkforplantningshastigheten i de forskjellige seksjonene. Arealet i tunnelene er antatt å være korrekt ettersom de er boret med Tunnelboringsmaskin (TBM).

Når man skal utføre stabilitetsanalyser må man benytte seg av PID AFF V1en. Denne gir deg mulighetene til å kjøre eksitasjoner og plote resultatene i et AFF-diagram ved hjelp av AFF V1en. For å kontrollere stabiliteten i drift må man tune PIDen. Dette er grundig forklart i manualen som følger med programmet [13]. En enkel forklaring er at man starter med å sette inn en veldig høy integralkonstant, T_i , setter derivasjonkonstanten, T_d , lik null og proporsjonalkonstanten, P, lik 1.



Figur 5.1: Modell brukt som utgangspunkt for simuleringer.

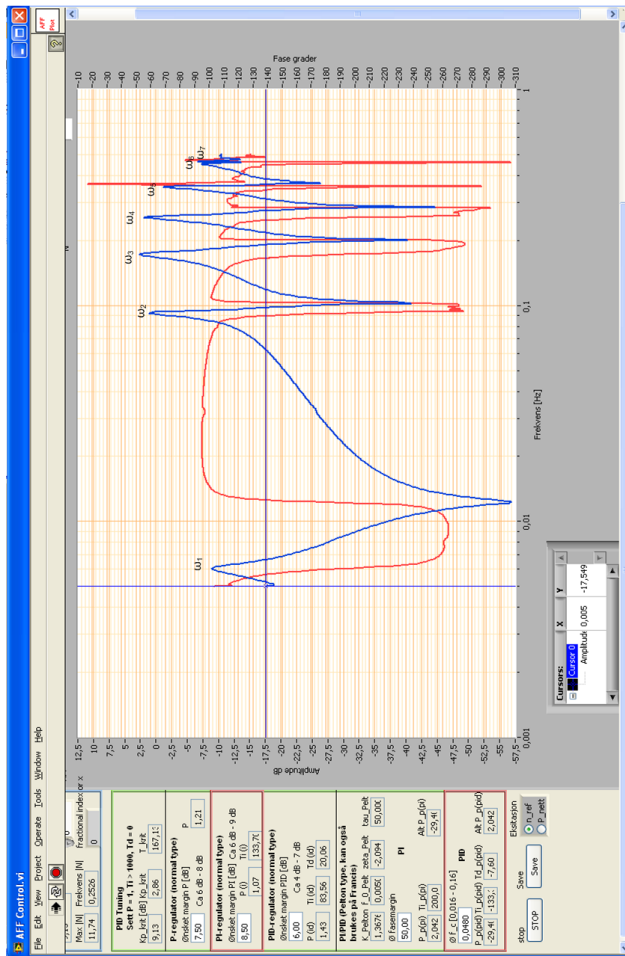
Ved å kjøre frekvensrespons analyse vil man i AFF V1en finne optimale verdier for T_i og T_d utifra andre ordens approksimasjon. Ved å sette inn forskjellige verdier for kryssfrequensen finner man øvre og nedre grense for P . Denne må så velges slik at får en akseptabel verdi for $\max|N|$ i stabilitetsanalysen. $|N|$ er avviksforholdet og angir reguleringsavviket når systemet utsettes for dynamiske påvirkninger [14]. $\max|N|$ bør være mindre enn 6 [13].

Ved trykkrespons vil man kjøre eksitasjon på ledeskovlene. Man overkjører da regulatoren, og tuningen er derfor ikke så viktig i dette tilfellet. Man velger å kjøre eksitasjon på ledeskovlsåpningen, κ , og stiller inn denne slik at man kjører i ønsket driftsområde, her 320MW og 220MW. Man stiller inn f_0 og f-slutt til det frekvensområde man vil studere. Antall målepunkter er også viktig for å treffe toppene nøyaktig. Disse kan stilles inn for hver dekade, men ved stort antall målepunkter tar også simuleringene lang tid, og det kan være lurt å grovjustere først for så å kjøre med høyere oppløsning etterhvert. Ved hjelp av disse målepunktene velger man altså Δf som er avstanden mellom frekvensene som måles. For trykkrespons i LVTrans benytter man også AFF control V1en for å vise resultatet.

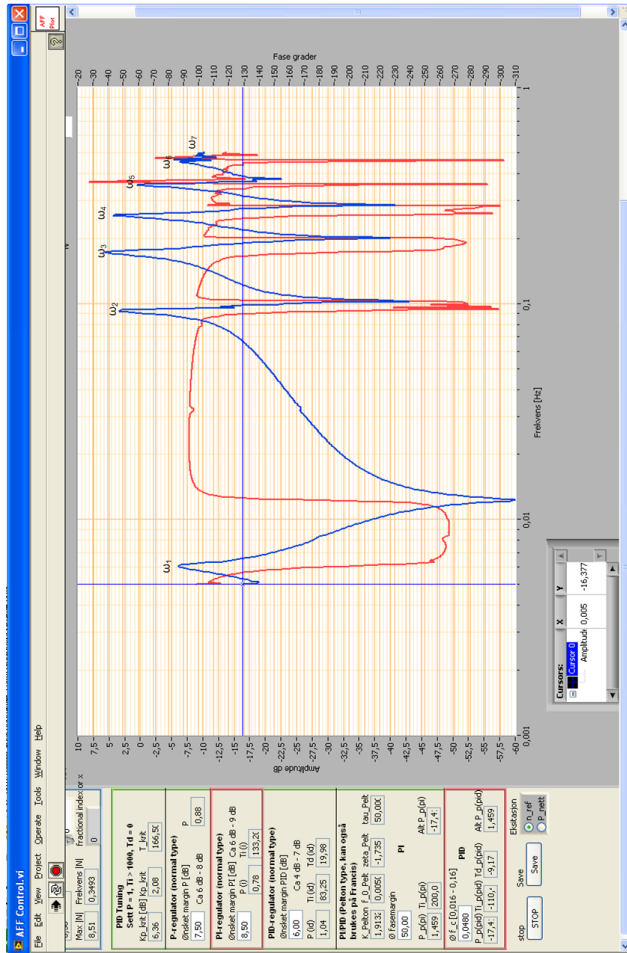
5.4 Simuleringsresultat

Ved simuleringene i LVTrans har det vært spesielt fokus på å få frekvenstoppene nærmest kryssfrequensen til å stemme overens med målingene. Dette er de

viktigste egenfrekvensene ettersom de er nærmest kryssfrequensen og dermed kan en forskyvning av disse føre til at de nærmer seg reguleringsområdet.



Figur 5.2: AFF diagram fra simulering ved 320MW.



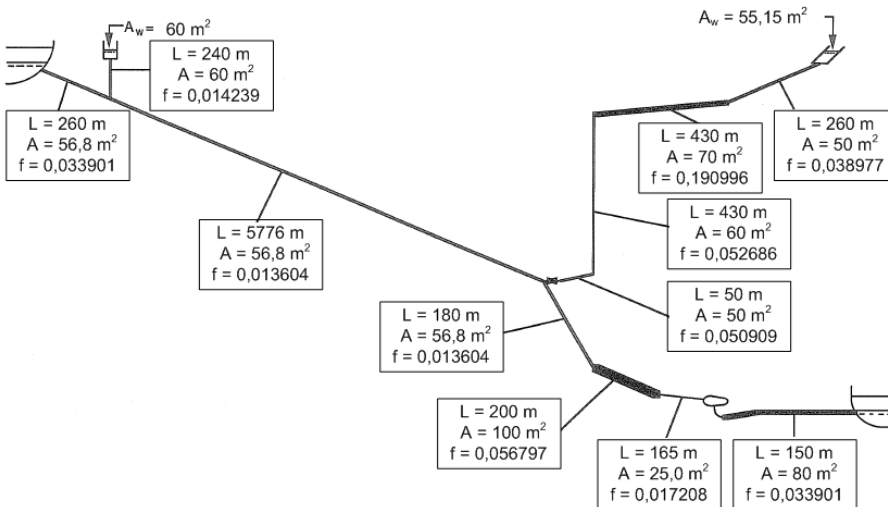
Figur 5.3: AFF diagram fra simulering ved 220MW.

	Eigenfrekvenser 320MW	Avvik	Eigenfrekvenser 220MW	Avvik
ω_1	0,0060Hz	0,0%	0,0060Hz	0,0%
ω_2	0,0922Hz	0,4%	0,0923Hz	0,2%
ω_3	0,1722Hz	1,3%	0,1724Hz	0,0%
ω_4	0,2551Hz	0,1%	0,2556Hz	0,2%
ω_5	0,3528Hz	4,7%	0,3534Hz	7,0%
ω_6	0,4657Hz	3,5%	0,4665Hz	1,4%
ω_7	0,4878Hz	0,5%	0,4825Hz	–

Tabell 5.1: Resonanstopper fra simulering og avvik fra målingsdata.

I tabell 5.1 kan man se egenfrekvensene som er markert i figur 5.2 og 5.3, samt avviket i prosent fra målingene.

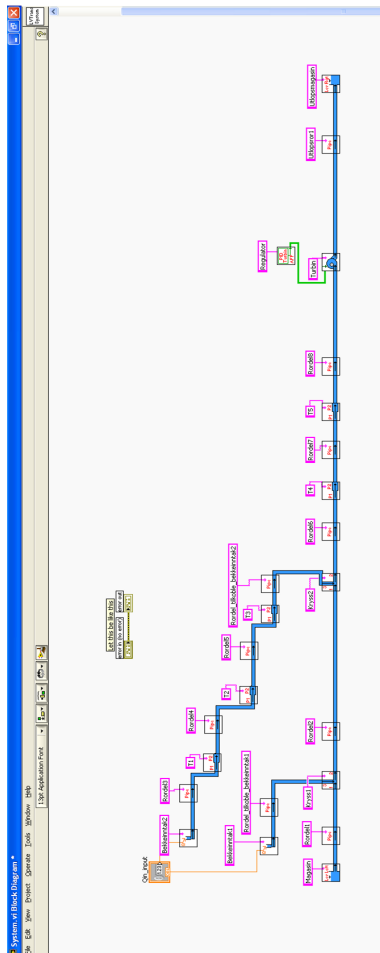
Den ferdig modifiserte modellen er vist i figur 5.4 og implementert i LVTrans i figur 5.5.



Figur 5.4: Ferdig modell som er satt inn i LVTrans.

Videre er den dynamiske friksjonsfaktoren, λ , satt til 500 000 og trykkforplantnings-hastigheten, a , satt til 1300 m/s for alle rørdelene. Trykkforplantningshastigheten vil bli tilpasset av programmet som vist i ligning 5.4 og den dynamiske friksjonsfaktoren er vist i ligning 5.3.

Utifra lengdene og arealene fra den ferdig modifiserte modellen kan man finne Thoma tverrsnittet, utifra ligning 3.19, til bekkeinntaket nærmest Storglomvatn, A_1 , og nærmest turbinen, A_2 :



Figur 5.5: Modellen slik den blir sendt ut i LVTrans.

$$A_{th1} = 0,0085 \frac{58,34^{5/3} 53^2}{560} = 37,42 m^2$$

$$A_{th2} = 0,0085 \frac{57,49^{5/3} 60,94^2}{560} = 48,27 m^2$$

Vi ser da at tverrsnittet til begge bekkeinntakene i følge modellen er høyere enn Thoma tverrsnittet. Det er vanlig å kreve tverrsnitt høyere enn halvannen ganger Thoma tverrsnittet. Med dette kravet må $A_1 > 56,13 m^2$, og $A_2 > 72,4 m^2$. Bekkeinntaket nærmest turbinen er derimot mye mindre enn dette med et tverrsnitt på $55,15 m^2$.

Kapittel 6

Diskusjon

6.1 Frekvens

LVTrans er et godt program for å avdekke kritiske egenfrekvenser i et dynamisk system. Den mest kritiske egenfrekvensen i dette systemet er den elastiske U-rørssvingningen mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen. Det viktigste kriteriet for å verifisere modellen vil være hvorvidt den klarer å representere frekvensene nærmest kryssfrekvensen. I tabell 5.1 ser vi at avviket for den kritiske egenfrekvensen på 0,0925 Hz er gjengitt i simuleringene med et avvik på 0,4%. Avviket fra simulering til måling var på 0,00037 Hz, hvilket er mindre enn Δf som ble brukt i målingene rundt dette punktet, som var på 0,0025 Hz. Dermed er avviket mindre enn nøyaktigheten på målingene rundt denne frekvensen.

Hvis man ser på de høyeste frekvenstopperne har man her et større avvik. På det høyeste er avviket på 7%, som kan sees i tabell 5.1, mellom måling og simulering rundt 220MW. Dette tilsvarer likevel bare 0,027Hz. Δf som ble brukt i dette området var på 0,01Hz, se tabell 4.2. Både andreharmoniske til trykkstøtet mellom turbinen og nærmeste bekkeinntak, samt fjerdeharmoniske til den elastiske U-rørssvingningen ligger i dette området. Det er derfor vanskelig å skille ut hvilken frekvens det faktisk er, noe som vanskeliggjorde simuleringen.

En annen frekvenstopp som varierer mye mellom simulering og måling er den rundt 0,45 Hz, som vist i tabell 5.1. Disse to frekvensene er også de med størst avvik mellom målingene rundt 220MW og 320MW. Man ser av simuleringens resultat at det rundt 0,45 Hz er flere tette frekvenstopper. Dette kan ha vært forbigått i målingene på grunn av stegavstanden mellom frekvensene som ble kjørt. Stegavstanden i simuleringene er betydelig lavere og ligger på 0,005 Hz.

Ved å bruke de kjente ligningene 3.18 og 3.20 og lengdene, arealene og trykkforplantningshastigheten brukt i simuleringene, kan man gjenkjenne de fleste egenfrekvensene:

- U-rørsfrekvensen på 0,006 Hz går mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen
- Den elastiske U-rørssvingningen på 0,09 Hz går mellom bekkeinntaket nærmest turbinen og Storglomvatn.
- Egenfrekvensen til trykkstøtet rundt 0,17 Hz ser ut til å gå mellom det nærmeste bekkeinntaket til turbinen og turbinen. Det stemmer også bra overens med den andreharmoniske til den elastiske U-rørssvingningen. Det kan derfor tenkes at det er en kombinasjon av disse man ser i målingene.
- Frekvensen på 0,255 Hz er tilnærmet lik tredjeharmoniske til den elastiske U-rørssvingningen. Den stemmer også relativt godt overens med trykkstøt induisert av arealendring. Da mellom bekkeinntaket nærmest turbinen og sandfanget, Rørdel7 i LVTrans modellen i figur 5.5.
- Den femte frekvenstoppen ligger rundt 0,37 Hz. Denne stemmer relativt bra overens med den andreharmoniske til trykkstøtsfrekvensen mellom bekkeinntaket nærmest turbinen og turbinen. Det passer også med fjerdeharmoniske til den elastiske U-rørssvingningen.
- Den sjettede frekvenstoppen ligger rundt 0,45 Hz. Denne er vanskelig å finne utifra lengdene. Den vises også ganske diffus på simuleringene, da det ser ut til å være flere frekvenstopper i området. Også her sprikte det mellom målingene på 220MW og 320MW, noe som kan tyde på at det faktisk er mer enn en topp i området som man muligens ville funnet dersom målingene i området hadde blitt gjort tettere. Man kan likevel observere at både femteharmoniske til den elastiske U-rørssvingningen og andreharmoniske til trykkstøtet mellom bekkeinntaket nærmest turbinen og sandfanget, induisert av arealendring, ligger i dette området.
- Den siste frekvenstoppen på 0,49 Hz ble bare funnet på målingen rundt 320MW og var da utenfor måleområdet ved 220MW. Dette kan også være andreharmoniske til trykkstøtet induisert av arealendring, mellom bekkeinntaket nærmest turbinen og sandfanget.

6.2 Amplituder

Amplitudene som framkommer i AFF diagrammet i LVTrans er ikke det faktiske trykket, men et forholdstall for trykkøkning i forhold til eksitasjon. Dette er framkommet gjennom $respons = FFT(H)/FFT(Y)$. Det er brukt den samme FRF V1en som er omtalt under målinger. Ved hjelp av denne får man amplituden i dB og fasen i grader og AFF diagrammet kan tegnes opp. Den viktigste faktoren for at amplitudene er forskjellige mellom målingene og LVTrans, er mangelen av frekvensavhengig demping. Hadde man brukt Stabana, som bygger på Hermod Brekkes modell som er gjennomgått i kapittel 2.1, ville amplitudene blitt mer realistiske.

I LVTrans er det derimot brukt Rayleigh dempning. Denne modellen er en proporsjonal dempemodell og har vist å stemme godt overens med eksperimenter [8]. Fordelen med denne modellen, er at den enkelt kan implementeres i karakteristikkmetoden. Siden dette er en eksperimentell metode, knytter det seg en del usikkerhet til denne som kan være årsak til noe av amplitudeforskjellen mellom måling og simulering. En annen faktor som kan være med å forklare forskjellen er de forenklingene som er gjort i forhold til det fysiske systemet på Svartisen. Det kan for eksempel være forhold ved ”vannrenna” på Svartisen som ikke blir gjengitt i simuleringene.

En annen svakhet kan være mangelen på eksakte designdata for turbinen da dette ikke har vært tilgjengelig. Det er istedet brukt Alab data for turbinen, noe som kan gjøre at turbinkarakteristikken kan variere noe fra det simulerte. Da turbinkarakteristikken påvirker vannføringen gjennom turbinen kan dette også være en kilde til feil. Det er da spesielt selvreguleringsparameteren som vil påvirke vannføringen, og da også simuleringen.

6.3 Validering

Det viktigste kriteriet for å validere modellen er hvorvidt den klarer å representere den dynsmiske oppførselen til systemet. Det klarer den bra ettersom avviket mellom frekvenstoppene i simuleringsresultatene og målingene er relativt lite, se tabell 5.1. Avviket er også minst nær og under kryssfrekvensen, hvilket er de mest kritiske frekvensene. At man kan gjenkjenne de forskjellige frekvensene ved hjelp av overslagsformler bidrar også til å styrke modellen.

Thoma tverrsnittet til bekkeinntaket nærmest turbinen ligger i følge modellen relativt nært Thoma tverrsnittet, og ikke over den vanlige sikkerhetsmarginen på $1,5A_{th}$. Dette ble også observert av Torbjørn Nielsen og Morten Kjeldsen som vist i kapittel 2.2. At resultatet også finnes av modellen styrker modellens troverdighet.

Kapittel 7

Konklusjon

Trykkresponsmålinger er veldig nyttig med tanke på å studere den dynamiske oppførselen til et vannkraftsystem. Ved å studere trykkresponsmålinger finner man kritiske frekvenser i systemet og kan forandre regulatorinnstillingene i forhold til dette. Andre løsninger som svingesjakt og luftputekammer er ofte dyre løsninger som man kan unngå med bruk av avanserte regulatorer med for eksempel trykktilbakekobling.

LVTrans er et bra verktøy med enkelt brukergrensenitt som passer veldig bra for stabilitetsberegninger. Modellen som her er utarbeidet for å modellere Svartisen kraftverk i LVTrans gir en god pekepinn på den dynamiske oppførselen til systemet. Det jobbes for tiden med å sette i drift turbin nummer to på Svartisen. Ved å implementere den nye turbinen i modellen vil man ha et godt verktøy for å studere stabiliteten ved den nye driftssituasjonen. Det man må huske er å være kritisk til resultatene man får. Spesielt amplitudene er her vist å være et svakt punkt i LVTrans.

Frekvenstoppene i simuleringen stemmer bra overens med målingene, og best for de kritiske frekvensene rundt kryssfrekvensen. Dette tyder på at modellen klarer å gjenskape den dynamiske oppførselen på Svartisen rimelig bra, da det er egenfrekvensene som er den viktigste informasjonen vil ha, ikke amplitudene.

Analysen av målingene avdekker også det man på forhånd hadde antatt. Nemlig at det finnes en elastisk U-rørsfrekvens mellom Storglomvatn og bekkeinntaket nærmest turbinen. Denne ligger også svært nærme kryssfrekvensen, noe som kan skape problemer med reguleringen. Dette ble løst med en trykktilbakekopling, noe som enda ikke er benyttet på de nye regulatorene som installeres [15].

De største usikkerhetsmomentene ved denne modellen i LVTrans er dempmodellen og turbinkarakteristikk. Ved implementering av faktisk turbindingesign vil man kunne redusere usikkerheten noe. En annen måte å få ned usikkerheten på er å simulere i STABANA i tillegg, da dette programmet benytter seg av Hermod

Brekke sin dempmodell. Denne dempmodellen er bygd på empirisk data fra frekvensresponsmålinger på flere store kraftverk, men kan ikke implementeres i karakteristikmetoden slik som Rayleigh modellen. Dette er også hovedgrunnen til at Rayleig modellen er brukt i LVTrans.

Kapittel 8

Videre arbeid

Det anbefales å gjøre simuleringer også i STABANA, og sammenligne resultatene fra de to simuleringsverktøyene, samt målingene. Man vil da kunne få en enda bedre oversikt over det dynamiske systemet, samt kunne bekrefte antakelser som er gjort i modellen i LVTrans. Det bør også vurderes å se på muligheter for å skalere amplitudene i LVTrans slik at disse stemmer overens med målingene og STABANA. Dersom man kan finne en god skaleringsfaktor, gjerne basert på frekvensen, vil LVTrans kunne bli enda bedre verktøy.

Det bør også vurderes å kjøre simuleringer med faktiske designdata på turbinen for å se påvirkningen dette vil ha.

Bibliografi

- [1] Hermod Brekke, “Samtale med Hermod Brekke angående doktorgradsavhandlingen hans og oppgaven 3. desember 2010,” 2010.
- [2] Torbjørn K. Nielsen and Morten Kjeldsen, eds., *Governor Stability Simulations of Svartisen Power Plant verified by the installed monitoring system on site*, 2010.
- [3] Torbjørn K. Nielsen and L. Xin Xin, “Svartisen kraftverk reguleringsstabilitet nr. 2,” tech. rep., SINTEF, 1989.
- [4] E. Benjamin Wylie and Victor L. Streeter, *Fluid Transients in Systems*. Prentice–Hall, Inc, 1993.
- [5] Torbjørn Nielsen, *Dynamisk dimensjonering av vannkraftverk*. Vannkraftlaboratoriet, 1990.
- [6] Anthony J. Wheeler and Ahmad R. Ganji, *Introduction to Engineering Experimentation*. Pearson Education, Inc., 2004.
- [7] Torbjørn K. Nielsen, “Svartisen kraftverk – reguleringsstabilitet,” tech. rep., Norges teknisk–naturvitenskapelige universitet, 2007.
- [8] Bjørnar Svingen, *Fluid structure interaction in piping systems*. PhD thesis, Norges teknisk–naturvitenskapelige universitet, 1996.
- [9] Professor Hermod Brekke, *Pumper og Turbiner*. Vannkraftlaboratoriet, 2003.
- [10] Torbjørn Kristian Nielsen, *Transient characteristics of high head francis turbines*. PhD thesis, Norges Tekniske Høgskole, 1990.
- [11] Halvard Luraas, “Svartisen kraftverk: Skisse av vannveien.” Fått på mail og benyttet med godkjennelse.
- [12] Hermod Brekke, *A stability study on hydro power plant governing including the influence from a quasi nonlinear damping of oscillatory flow and from the turbine characteristics*. PhD thesis, The University of Trondheim, 1984.
- [13] Bjørnar Svingen, “Manual LVTrans,” tech. rep., SINTEF Energiforskning AS, 2007.

- [14] Jens G. Balchen, Trond Andresen, and Bjarne A. Foss, *Reguleringsteknikk*. Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU, 2003.
- [15] Bjørnar Svingen, “Frekvens-respons-målinger. Svartisen som eksempel.” Maskinteknisk forum 26. oktober 2010, 2010.

Tillegg A

Transienter

A.1 U-rørssvingninger

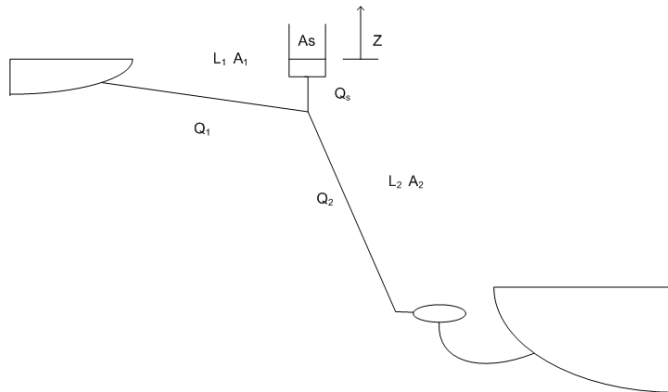
U-rørssvingninger oppstår ved forandringer i volumstrømmen i systemet. Det er enklest å forklare hva som skjer ved å ta utgangspunkt i full stans av et system som vist i figur A.1. Ved full stans vil volumstrømmen til turbinen stoppe opp. Vannet som kommer fra magasinet vil da gå opp i svingesjakta da det ikke lenger kan strømme ned til turbinen. Dette får nivået i svingesjakta til å øke inntil trykket blir høyt nok til at volumstrømmen stoppes. Da vil vannstanden i svingesjakten være høyere enn i magasinet, og for å oppnå trykklikevekt vil vannet da strømme tilbake fra svingesjakta til magasinet. Det vil på grunn av treghet i vannmassene bli stående å oscillere slik en stund inntil det er fullstendig dempet. En brukbar overslagsformel for å finne oppsvinget i sjakten er gitt av ligning A.1[5].

$$\Delta z = \Delta Q \sqrt{\frac{L/A_T}{gA_s}} \quad (\text{A.1})$$

Her er A_T arealet til overføringstunnelen og A_s arealet i svingesjakta.

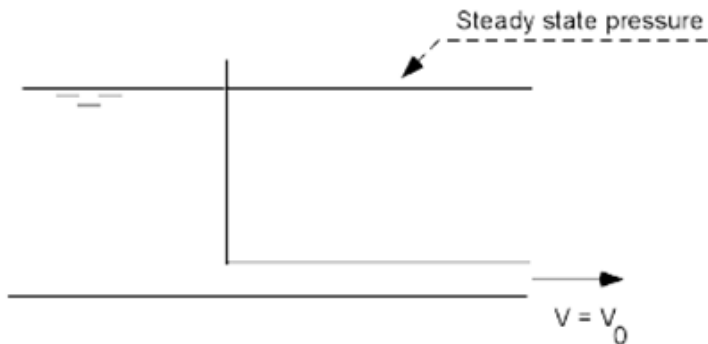
A.2 Trykkstøt

Dersom systemet hadde vært fullstendig uelastisk ville trykkstøtet ha vært en impuls istedet for en svingning. For å forklare hvordan trykkstøtet forekommer, er det enklest å ta utgangspunkt i et enkelt system med en ventil som stenges. Teorien er uansett det samme for trykkstøt som forekommer ved forandring i pådraget til en turbin. Ved et gitt tidspunkt stenges ventilen og vannføringen gjennom denne går fra en gitt verdi, Q , til null. Vannmassene lenger unna ventilen, har derimot

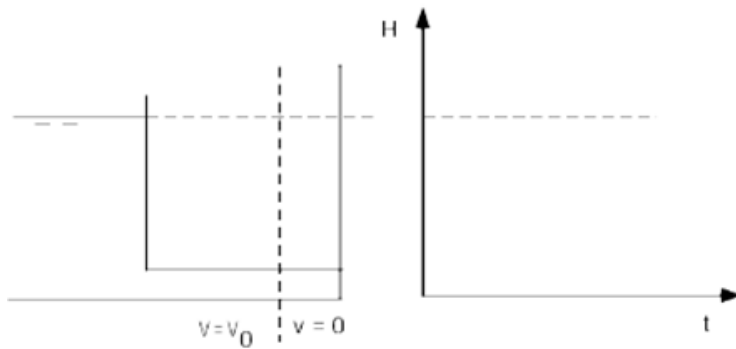


Figur A.1: Eksempel på kraftverk med svingekammer.

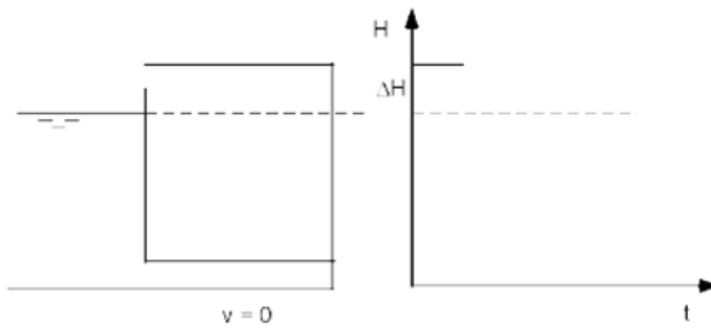
ikke fått noen informasjon om at ventilen er stengt og fortsetter med samme hastighet. Dermed komprimeres vannet nær ventilen og skaper en trykkøkning her. Trykkbølgene beveger seg da med lydhastigheten i vann til nærmeste vannspeil, og vannføringen blir etterhvert null i hele rørledningen. Når trykkbølgene er kommet hit, vil det være overtrykk i hele rørledningen i forhold til vannspeilet. Dette fører til en vannføring $-Q$ i motsatt retning som også forplanter seg med lydhastigheten inn mot ventilen. Når den når ventilen vil det da være undertrykk her, og vannet vil strømme inn mot turbinen igjen. Prosessen gjentas helt til den er fullstendig dempet og vannmassene står i ro. Prosessen er vist i figurene A.2– A.7 under som er hentet i sin helhet fra Nielsen [5].



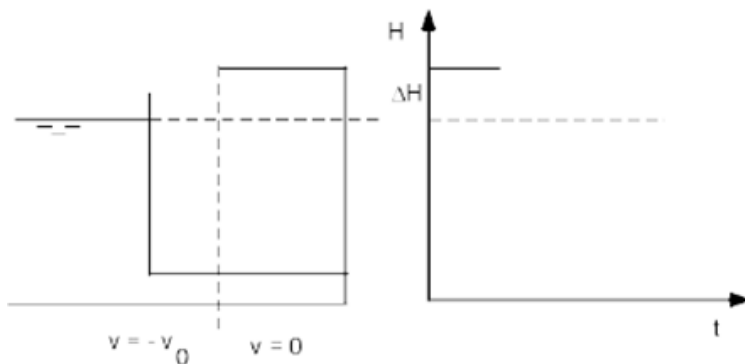
Figur A.2: Starttilstand.



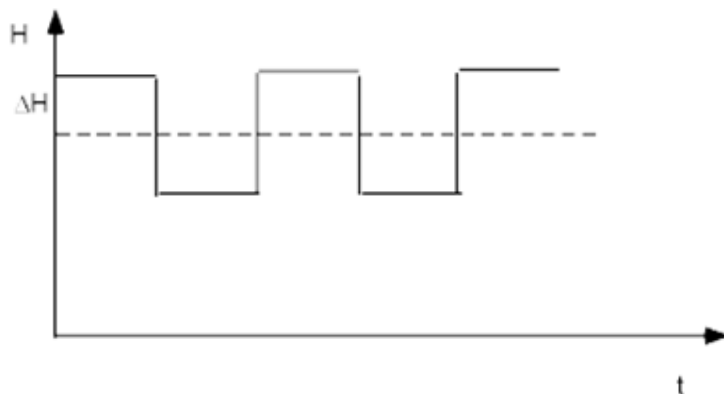
Figur A.3: Ventilen lukkes men det vet ikke vannet i starten av røret. Trykket foran turbinen økte øyeblikkelig ved stengning



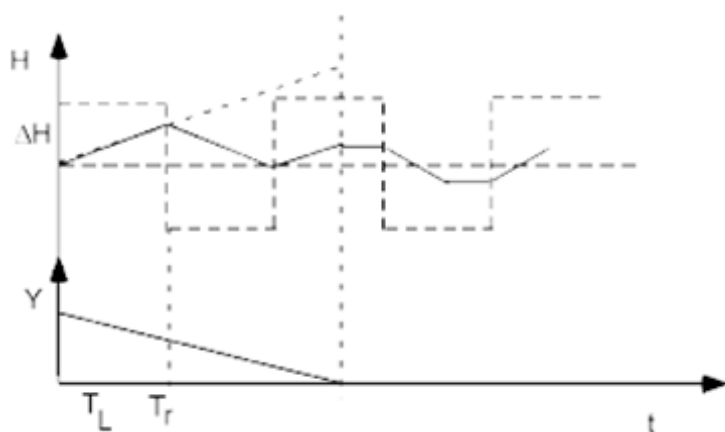
Figur A.4: Trykkfronten har nådd reservoiret og vannhastigheten er lik null.



Figur A.5: Vannet begynner å strømme ut av røret da det er overtrykk i røret. Ved ventilen vet ikke vannet dette og står i ro.



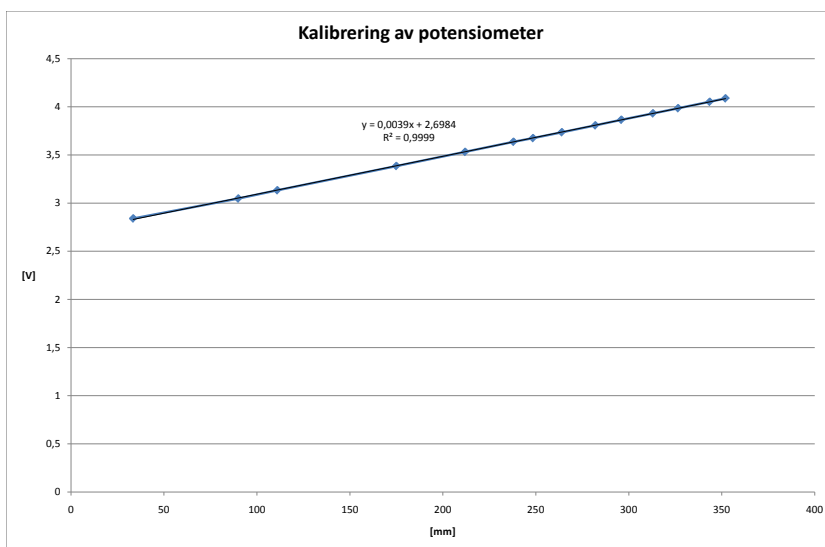
Figur A.6: Prosessen gjentas og man får et trykkforløp som dette.



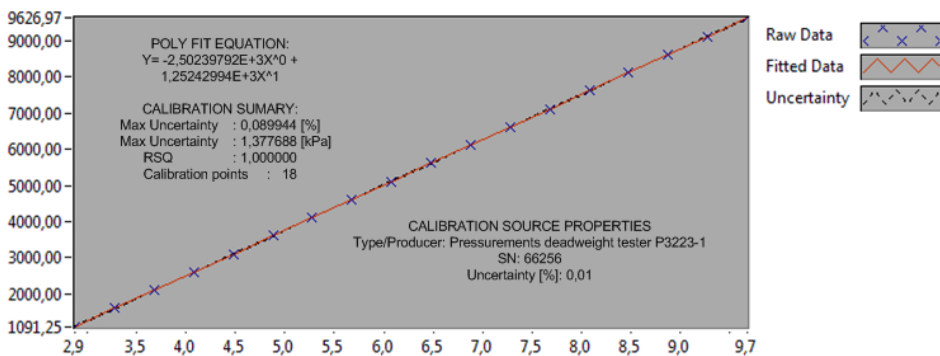
Figur A.7: Dersom lukketiden er kortere enn refleksjonstiden blir trykkforløpet slik og trykktoppene blir redusert.

Tillegg B

Kalibreringsdata



Figur B.1: Kalibreringskurve for potensiometer.



Figur B.2: Kalibreringskurve for trykktransducer.

Tillegg C

Formler for turbindata

For å finne fartstallet til turbinen brukes:

$${}^*\Omega = \omega \sqrt{\frac{{}^*Q}{\sqrt{2g^*H_n}}} \quad (\text{C.1})$$

Omdreiningstallet:

$$n = \frac{f_{nett} * 60}{Polpar} \quad (\text{C.2})$$

Antall poler finnes av:

$$Poler = 2 \frac{f_{nett} \cdot 60}{n} \quad (\text{C.3})$$

Vinkelen mellom C_{u1} og C_1 i

$$\alpha_1 = atan\left(\frac{C_{m1}}{C_{u1}}\right) \frac{180}{\pi} \quad (\text{C.4})$$

Effekten:

$$P = \rho g Q H \eta \quad (\text{C.5})$$

En mer utfyllende utledning av disse formlene finnes i Brekke [9].