

# Trykkpulsasjonsmålinger på høytrykkskraftverk

**Jo Magnus Solberg**

Master i energi og miljø  
Oppgaven levert: Juni 2008  
Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT  
Biveileder(e): Morten Kjeldsen, EPT



# Oppgavetekst

## Bakgrunn

I forbindelse med et pågående doktorgradsarbeid, skal det gjøres trykkpulsasjonsmålinger på det eksisterende løpehjulet på Tokke kraftverk. En datalogger skal monteres inne i en vanntett beholder, som plasseres inne i løpehjulskonusen. Det skal limes miniatyr-trykktransducere på utløpet av løpehjulsskivene, og disse kobles til dataloggeren.

Testen gjennomføres for å sjekke at måleoppsettet virker, samt å skaffe måledata fra det eksisterende løpehjulet. Disse dataene skal senere sammenlignes med data fra et nytt løpehjul som installeres høsten 2008.

## Mål

Målet med oppgaven vil være å klargjøre måleutstyr, gjennomføre målinger, og kartlegge trykkpulsasjonsnivåene ved forskjellige driftsområder. Resultatene fra dette arbeidet vil danne grunnlag for senere sammenligninger av modell- og fullskalamålinger.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Sette seg inn i måleoppsettet og ferdigstille dette. Tilpasse et eksisterende LabView-program som skal styre dataloggeren. Alt utstyr er tilgjengelig på Vannkraftlaboratoriet, men trenger sammenstilling.
2. Delta på gjennomføring av måling på Tokke (April 2008). Denne målingen gjennomføres sammen med Einar Kobro.
3. Analysere måledata. Dette gjøres ved hjelp av såkalt Fast Fourier Transform i LabView eller MatLab.

Oppgaven gitt: 21. januar 2008

Hovedveileder: Torbjørn Kristian Nielsen, EPT





POSTADRESSE

NTNU  
INSTITUTT FOR ENERGI OG  
PROSESSTEKNIKK  
Kolbjørn Hejes vei 1A  
N-7491 Trondheim - NTNU

TELEFONER

Sentralbord NTNU: 73 59 40 00  
Instituttkontor: 73 59 27 00  
Vannkraftlaboratoriet: 73 59 38 57

TELEFAX

Instituttkontor: 73 59 83 90  
Vannkraftlaboratoriet: 73 59 38 54

Rapportens tittel <b>Trykkpulsasjoner på høytrykkskraftverk</b>	Dato <b>11/06-08</b>
	Antall sider og bilag <b>32/28</b>
Saksbehandler / forfatter <b>Jo Magnus Solberg</b>	Ansv. sign.
Avdeling	Prosjektnummer <b>EPT-M-2008-Nr 42</b>
ISBN nr.	Prisgruppe

Oppdragsgiver <b>NTNU Vannkraftlaboratoriet</b>	Oppdragsgivers ref. <b>Torbjørn Nielsen</b>
----------------------------------------------------	------------------------------------------------

Ekstrakt

Denne masteroppgaven er skrevet i forbindelse med et pågående doktorgradsarbeid der det blant annet skal gjøres trykkpulsasjonsmålinger på det eksisterende løpehulet ved Tokke kraftverk. Hensikten med denne trykkpulsasjonsmålingen vil være å teste om det foreslåtte måleoppsettet virker, og å skaffe måledata av eksisterende turbin. Disse dataene vil brukes som sammenligningsgrunnlag når det skal måles på det nye løpehulet som skal installeres på et senere tidspunkt. Resultatene fra arbeidet vil også bli brukt som et grunnlag for senere sammenligning av modell- og fullskalamålinger.

Under måling vil det brukes en frittstående datalogger, (CompactRIO) som vil være plassert inne i løpehulskonusen. Fra dataloggeren vil det gå ledninger ut til miniatyr-trykktransducere som vil være limt fast til løpehulsskovlene. I forbindelse med dette har måleoppsettet blitt ferdigstilt slik at det kan fungere under testkjøring av turbinen. I hovedsak har dette arbeidet gått ut på å lage praktiske løsninger som gjør det mulig å montere måleoppsettet, samt å forhindre vannlekkasje inn til det elektriske utstyret.

I oppgaveteksten var det planlagt gjennomføring av målinger ved Tokke Kraftverk under masterperioden. Dette ble det dessverre ikke gitt mulighet til, grunnet økonomiske årsaker. I stedet ble det, etter samtaler med veileder, valgt å fokusere på å ferdigstille måleoppsettet samt å lage all nødvendig programvare. I tillegg er det kjørt tester for å verifisere at måleoppsettet virker.

Siden det viste seg vanskelig å bruke et eksisterende LabView-program, har all nødvendig programvare blitt programmert fra bunnen av. Den programmerte CompactRIO-kontrolleren fungerer på den måten at den ved gitte tidspunkt, som samsvarer med en på forhånd bestemt kjøreplan, vil logge data fra sensorene. Ved de samme tidspunktene vil det bli logget ledeskovlåsning og trykkforhold i sugerørskonusen. Det er også blitt laget verktøy for frekvensanalyse, som vil brukes til frekvensanalyse av de ulike måledataene.

I oppgaven er det også gjort tester på programvaren og måleoppsettet. Det største problemet som dukket opp, var begrensninger ved hardwaren på CompactRIOen. Dette medfører at det ved jevne mellomrom må overføres data, og i disse periodene blir det ikke logget data fra sensorene. Rådataene skal frekvensanalyseres, og det er derfor laget et program som tar hensyn til loggepausene ved å legge inn kunstige loggpunkter, basert på snittverdier til hver sensor.

	Stikkord på norsk	Indexing Terms English
Gruppe 1	Francisturbin	Francis turbines
Gruppe 2	Trykkpulsasjoner målinger	Pressurs pulsations measurement
Egenvalgte stikkord	LabView	LabView

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved NTNU, fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, institutt for energi- og prosesseteknikk, Vannkraftlaboratoriet. Oppgaven er skrevet i forbindelse med pågående doktorgradsarbeid av Einar Kobro.

Opgaven ble prøvd gjort i følge oppgaveteksten, men på grunn av økonomiske vurderinger fra Statkraft sin side, fikk vi ikke lov til å gjøre de planlagte målingen på Tokke i uke 17. Disse målingene blir i stede gjennomført i uke 27, noe som er etter fristen for levering av oppgaven.

Etter samtaler med veileder Torbjørn Nielsen ble det enighet om å heller fokusere på den delen av oppgaveteksten som var gjennomførbar. Denne delen viste seg også større enn antatt, siden det eksisterende LabView-programmet ikke kunne brukes og all programvaren måtte programmeres fra bunnen av. Det har også blitt brukt mye tid på å lære seg å bruke LabView og Real – Time, siden jeg ikke hadde noen forkunnskaper om dette.

Jeg vil takke min veileder Torbjørn Nielsen, samt resten av de ansatte ved Vannkraftlaboratoriet som alltid er like behjelpelige. I tillegg vil jeg rette en stor takk til doktorgradstudent Einar Kobro for et godt samarbeid, og for motivasjon og veiledning.

---

Jo Magnus Solberg  
15.06.08, Trondheim

## Sammendrag

Denne masteroppgaven er skrevet i forbindelse med et pågående doktorgradsarbeid der det blant annet skal gjøres trykkpulsasjonsmålinger på det eksisterende løpehulet ved Tokke kraftverk. Hensikten med denne trykkpulsasjonsmålingen vil være å teste om det foreslåtte måleoppsettet virker, og å skaffe måledata av eksisterende turbin. Disse dataene vil brukes som sammenligningsgrunnlag når det skal måles på det nye løpehulet som skal installeres på et senere tidspunkt. Resultatene fra arbeidet vil også bli brukt som et grunnlag for senere sammenligning av modell- og fullskalamålinger.

Under måling vil det brukes en frittstående datalogger (CompactRIO), som vil være plassert inne i løpehulskonusen. Fra dataloggeren vil det gå ledninger ut til miniatyrtrykktransducere som vil være limt fast til løpehulsskovelene. I forbindelse med dette har måleoppsettet blitt ferdigstilt slik at det kan fungere under testkjøring av turbinen. I hovedsak har dette arbeidet gått ut på å lage praktiske løsninger som gjør det mulig å montere måleoppsettet, samt å forhindre vannlekkasje inn til det elektriske utstyret.

I oppgaveteksten var det planlagt gjennomføring av målinger ved Tokke Kraftverk under masterperioden. Dette ble det dessverre ikke gitt mulighet til, grunnet økonomiske årsaker. I stedet ble det, etter samtaler med veileder, valgt å fokusere på å ferdigstille måleoppsettet samt å lage all nødvendig programvare. I tillegg er det kjørt tester for å verifisere at måleoppsettet virker.

Siden det viste seg vanskelig å bruke et eksisterende LabView-program, har all nødvendig programvare blitt programmert fra bunnen av. Den programmerte CompactRIO-kontrolleren fungerer på den måten at den ved gitte tidspunkt, som samsvarer med en på forhånd bestemt kjøreplan, vil logge data fra sensorene. Ved de samme tidspunktene vil det bli logget ledeskovlåsning og trykkforhold i sugerørskonusen. Det er også blitt laget verktøy for frekvensanalyse, som vil brukes til frekvensanalyse av de ulike måledataene.

I oppgaven er det også gjort tester på programvaren og måleoppsettet. Det største problemet som dukket opp, var begrensninger ved hardwaren på CompactRIOen. Dette medfører at det ved jevne mellomrom må overføres data, og i disse periodene blir det ikke logget data fra sensorene. Rådataene skal frekvensanalyseres, og det er derfor laget et program som tar hensyn til loggepausene ved å legge inn kunstige loggpunkter, basert på snittverdier til hver sensor.

## Abstract

This master thesis is written in connection with an on going PhD thesis. Amongst others, pressure fluctuation measurement on Tokke hydro power plant will be conducted during this PhD project. The intension with the pressure fluctuation measurements is to test suggested measurement set-up, and to acquire measurement data on the existing runner. This data will later be used as a foundation of a comparison between model and prototype measurements.

During the measurements there will be used an independent data logger, (CompactRIO) which will be located inside the runner cone. From the data logger, the wiring goes to the miniature piezo-resistive pressure transducers, which are glued to the runner blade. In this connection, the measurement set-up has been completed and made able to operate under existing conditions. The main task has been to make practical solutions that enables easy mounting, and also prevents water leakage in the electrical equipment.

In the original commission, it was planed that this measurement would be performed within the time constraints of the master thesis. Unfortunately this turned out to be impossible due to economical issues. Instead it was chosen to focus on the completion of the measurement set-up and the necessary software in agreement with the supervisor. Preliminary tests were conducted to verify the set-up.

It turned out to be difficult to use an existing LabView-program, and instead the software was programmed from scratch. The CompactRIO starts measuring at given points in time; witch coincides with a predetermined schedule. At the same instant, the guide vane opening and the pressure in the draft tube are logged. It has also been created a tool to perform frequency analysis of the data measurements.

In this master thesis, preliminary tests have been performed on the software and the measurement set-up. The main problem was hardware limitations on the CompactRIO. This brought along transmitting of data at regular intervals, and in this transmission period the data will not be logged. In the post processing, Frequency analysis will be used. Therefore, a program which takes the transmission intervals into considerations has been created. The program replaces the logging pauses with artificial data, based on mean values for each sensor.



# Innholdsfortegnelse

<b>1. INNLEDNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TRYKKPULSASJONER I FRANCISTURBINER.....</b>	<b>2</b>
2.1 LØPEHJULFREKVENS .....	2
2.2 LØPESKOVLFREKVENS .....	2
2.3 BLADPASSERINGSFREKVENSEN .....	3
2.4 SUGERØRSVIRVELFREKVENSEN .....	4
2.5 SYSTEMDYNAMIKK .....	4
2.5.1. <i>Vannhammerfrekvens</i> .....	5
2.5.2. <i>U-rørsvingninger</i> .....	5
2.6 LØSNINGER FOR Å BEGRENSE TRYKKPULSASJONER.....	6
2.7 TIDLIGERE ARBEIDER MED TRYKKMÅLINGER PÅ LØPESKOVLENE .....	6
<b>3. FORBEREDELSE OG PRAKTISK GJENNOMFØRING AV MÅLINGER.....</b>	<b>8</b>
3.1 TOKKE KRAFTVERK.....	8
3.2 MÅLEOPPSETT .....	8
3.2.1. <i>Plassering av sensorer på skovlbladene</i> .....	9
3.2.2. <i>Sensor i sugerør og snorposisjonsangiver for ledeskovlene</i> .....	10
3.3 TEORI OM MÅLEUTSTYR FOR MÅLINGER I SKOVLEKANALEN .....	10
3.3.1. <i>NI cRIO-9012</i> .....	10
3.3.2. <i>NI 9237</i> .....	11
3.3.3. <i>Trykksensor LL-080 3,5 bar</i> .....	11
3.4 KALIBRERING.....	12
3.5 FREKVENSPANALYSE .....	13
3.5.1. <i>Overlappende vinduer</i> .....	13
3.5.2. <i>Spektral lekkasje</i> .....	14
3.5.3. <i>Harmonier</i> .....	14
3.6 FORVENTEDE FREKVENSER .....	14
3.7 PROGRAMVARE I LABVIEW.....	16
3.7.1. <i>Loggeprogram på cRIO</i> .....	16
3.7.2. <i>Loggeprogram for PTX og snorsensor</i> .....	17
3.8 FORBEREDELSE TIL MÅLINGER .....	17
3.8.1. <i>Utbedring av utstyr</i> .....	18
3.9 PRAKTISK GJENNOMFØRING .....	19
3.9.1. <i>Plan for gjennomføring</i> .....	19
<b>4. TEST AV UTSTYR.....</b>	<b>20</b>
4.1 TESTRESULTATER .....	20
<b>5. DISKUSJON .....</b>	<b>23</b>
5.1 KALIBRERING.....	23
5.2 SENSORENES PÅVIRKNING PÅ SIGNALET.....	23
5.3 SENSOR MED NAVNET ”NY”.....	24
5.4 MULIGE FEILKILDER UNDER MÅLING .....	24
5.4.1. <i>Feil på sensor</i> .....	24
5.4.2. <i>Påvirkning fra de andre maskinene</i> .....	24
5.4.3. <i>Endring av driftspunkt</i> .....	24
5.4.4. <i>Påvirkning fra omgivelsene</i> .....	25
5.5 KUNSTIGE DATA FOR LOGGEPÅUSENE .....	26
5.6 BATTERIPAKKE .....	28
5.7 TRIGGER.....	28
<b>6. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID .....</b>	<b>29</b>

7. REFERANSER.....30  
8. VEDLEGG.....32

## Figurliste

FIGUR 2-1: TRYKKPULSASJON PÅ GRUNN AV EN VAKE .....3  
FIGUR 2-2: SUGERØRSVIRVEL VED LAV, NORMAL, OG HØY DELLAST SAMT VED FULLAST .....4  
FIGUR 3-1: OVERSIKT MÅLEOPPSETT .....9  
FIGUR 3-2: SENSORPLASSERING PÅ SKOVLBLADENE .....10  
FIGUR 3-3: BILDE AV MÅLEUTSTYR, FRA VENSTRE: COMPACTRIO, NI 9237, OG TRYKKSSENSOR .....11  
FIGUR 3-4: SKISSE OVER KALIBRERINGSOPPSETT .....12  
FIGUR 3-5: KALIBRERINGSOPPSETT.....13  
FIGUR 3-6:AMPLITUDER OG FREKVENSER FOR DRIFTSPUNKTENE 16.7MW, 31.1MW, 46.7MW, 54.6MW, 62.4MW (21,5%, 40%, 60,1%, 70,3%, OG 80,3% AV BEP). (KOBRO 2006).....15  
FIGUR 3-7:MONTASJE I VANNTETT BOKS, FRA VENSTRE; RIO, BATTERIPAKKE, ROXTEC, PLASTSLANGE FOR BESKYTTELSE. ....18  
FIGUR 3-8: FRA VENSTRE; SENSOR MED OG UTEN KRYMPESTRØMPE, SILIKONPLUGG, RJ-50 PLUGGER, KOBLING RJ-50 TIL SENSORKABEL. ....18  
FIGUR 4-1: TESTKJØRING AV COMPACTRIO .....20  
FIGUR 4-2:TRYKKLUFTSIMPULSER DER PISTOLEN BLE FØRT FREM OG TILBAKE .....21  
FIGUR 4-3:TRYKKLUFTSIMPULSER DER LUFT FRA PISTOLEN BLIR SENDT STØTVIS .....21  
FIGUR 4-4: FREKVENSANALYSE FRA TESTKJØRING DER LUFT FRA PISTOLEN BLIR SENDT STØTVIS .....22  
FIGUR 5-1: FESTING AV SENSOR MED EPOKSY .....23  
FIGUR 5-2: TESTSIGNAL PLOTTET I FORHOLD TIL TIDEN .....26  
FIGUR 5-3: FREKVENSANALYSE AV TESTSIGNAL .....27

## Forkortelser

Ah	Amper timer	
BEP	Bestpunkt	=det optimale driftspunktet for turbinen
cRIO	CompactRIO	
DFT	Discret Fourier Transform	
FFT	Fast Fourier Transformer	
FIFO	First inn, first out	
GWh	Gigawatttimer	= 1 000 000 Wattimer
kHz	kilohertz	= 1 000 Hz
MAX	Measurement & Automation Explorer	
mV	millivolt	= 0,001 volt
MB	megabyte	
MW	Megawatt	= 1 000 Watt
NI	National Instruments	
V	Volt	
VDC	Volt Direct Current	

## 1. Innledning

På starten av 90-tallet fikk vi en ny energilov i Norge som endret produksjonsmønsteret i den norske kraftverksbransjen. Den nye loven ga eierne av vannkraftverkene muligheten til selv å avgjøre når de skal produsere kraft. Dette medførte mer økonomisk spekulasjon i kraftmarkedet, og denne måten å produsere etter pris og etterspørsel kalles effektkjøring.

I Norge er det tradisjonelt vanlig å designe et vannkraftverk i henhold til strømningsforholdene som er ved bestpunktet til turbinen. Kjøring av turbinen i andre driftspunkt vil over tid medføre større slitasje på maskinen, med mulig fare for havari. Ettersom det har blitt mer vanlig med effektkjøring av vannkraftverkene, har dette også medført større driftstekniske problemer som vibrasjon, støy og utmattingsproblemer. Dette kommer av at maskinene opererer mer på andre driftspunkt enn bestpunkt som følge av hyppigere start og stopp. Som følge av de driftstekniske problemene blir det også større vedlikeholdskostnader og mer nedetid på kraftverkene enn tidligere.

En av årsakene til større slitasje ved å operere utenfor bestpunkt, kommer av trykkpulsasjoner. I forbindelse med et doktorgradsarbeid skal det gjøres trykkpulsasjonsmålinger på modell og prototyp på det nye løpehjulet som skal installeres ved Tokke kraftverk. Som en forberedelse til disse målingene skal det gjøres en likedan test på det eksisterende løpehjulet for å sjekke om måleoppsettet virker. I tillegg skaffes det til veie måledata av eksisterende turbin som kan brukes som sammenligningsgrunnlag for den nye turbinen som blir installert. Resultatene fra denne målingen vil danne et grunnlag for senere sammenligning av modell- og fullskalamålinger.

Under målinger vil det være plassert en datalogger i løpehjulskonusen, som vil logge signal fra sensorer plassert i løpeskovlkanalen. Det var opprinnelig tenkt å gjennomføre målinger, samt å gjøre frekvensanalyse av disse, innenfor tidsperioden til denne masteroppgaven. Dessverre ble det ikke gitt tilgang til å gjøre disse målingene fra eier av kraftverket i det gitte tidsrommet. Det ble derfor valgt å prioritere ferdigstilling av måleoppsettet som skal brukes under testen. I tillegg programmeres det et LabView-program som skal styre dataloggeren og annet loggeutstyr, samt analyseverktøy til frekvensanalyse av resultatene i ettertid.

## 2. Trykkpulsasjoner i Francisturbiner

I reaksjonsturbiner som Francis- og Kaplan-turbiner er det en rekke driftstekniske problemer som over tid kan medføre tap av virkningsgrad og i verste fall ødeleggelser. I hovedsak kommer disse problemene som følge av sanderosjon, kavitasjon eller vibrasjoner. Det kan være mange ulike årsaker til vibrasjoner i et aggregat, og disse kan stamme fra generator, lager, aksling eller fra løpehjulet. I denne oppgaven ses det på vibrasjoner grunnet trykkpulsasjoner, som er en av de vanligste årsakene til driftstekniske problemer i Francisturbiner. Trykkpulsasjoner er et hydraulisk fenomen som oppstår i vannveien. Problemet er i hovedsak størst i driftspunkt utenfor bestpunkt, og over tid kan trykkpulsasjonene føre til utmattingsbrudd i løpehjulsskivene. Årsakene til trykkpulsasjoner med høy amplitude kommer av kjøring av turbin utenfor bestpunkt og kan i hovedsak deles inn i fire frekvenser (Haugen 1994);

### 2.1 Løpehjulfrekvens

Løpehjulfrekvensen er definert som antall omdreininger løpehjulet gjør i sekundet. Siden den er lik turtallet til maskinen betegnes den også som *turtallsfrekvensen*. Denne frekvensen har en lav amplitude så lenge løpehjulet er symmetrisk om rotasjonsaksen. Hvis det oppstår en skade på løpehjulet, for eksempel at en del av en løpeskiv faller av, vil dette føre til at hjulet blir usymmetrisk. Når hjulet er usymmetrisk vil dette kunne gi en impuls som gir høye amplituder ved løpehjulfrekvensen.

$$f_n = \frac{n}{60} \quad [\text{Hz}]$$

**Ligning 1**

$$\begin{array}{ll} f_n = \text{løpehjulfrekvens} & [\text{Hz}] \\ n = \text{turtall} & [\text{o/min}] \end{array}$$

### 2.2 Løpeskivfrekvens

Hver gang en løpeskiv passerer den samme ledeskivlen, dannes en impuls. Denne impulsen er årsaken til løpeskivfrekvensen eller *produktfrekvensen* som den også kalles. Amplituden på løpeskivfrekvensen er avhengig av omdreiningsvolumet, som er området mellom ledeskivlene og løpehjulet (se Figur 3-1). Amplituden er høyest i stabile driftsområder, og skader i ledeapparatet vil forsterke impulsen. Høye impulser ved denne frekvensen kan skape mye støy i turbinen, noe som er beskrevet nærmere hos Oftebro og Lønning (1967).

$$f_{l0} = f_n * z_{l0} \quad [\text{Hz}]$$

**Ligning 2**

$$\begin{aligned} f_{l0} &= \text{løpeskovlfrekvensen} && [\text{Hz}] \\ f_n &= \text{løpehjulfrekvens} && [\text{Hz}] \\ z_{l0} &= \text{antall løpeskovler} && [\text{Hz}] \end{aligned}$$

### 2.3 Bladpasseringsfrekvensen

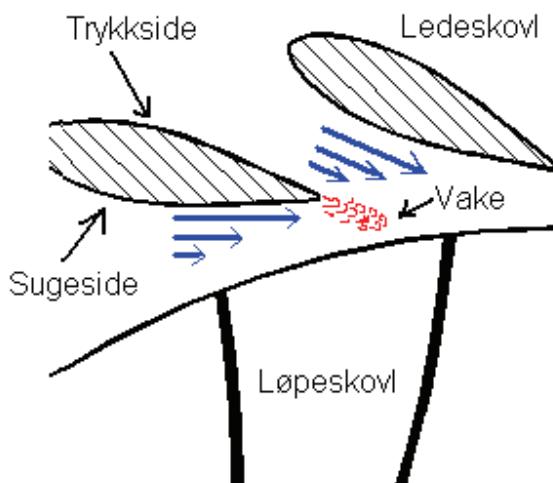
Bladpasseringsfrekvensen oppstår når løpeskovlene passerer ledeskovlene. Denne frekvensen kalles også *ledeskovlfrekvens*. I enden av hver ledeskovl vil det på grunn av trykkforskjellen mellom trykk- og sugeside, oppstå en hastighets- og trykkgradient i omdreiningshulrommet som kalles en "vake" (Figur 2-1). Figuren viser strømningsbilde ved dellast, mens ved overlast vil trykk- og sugeside bytte plass. Når løpeskovlen passerer en slik vake, vil den oppleve en impuls fordi den passerer et inhomogent strømningsfelt. Denne frekvensen er gitt som:

$$f_{le} = f_n * z_{le} \quad [\text{Hz}]$$

**Ligning 3**

$$\begin{aligned} f_b &= \text{bladpasseringsfrekvensen} && [\text{Hz}] \\ f_n &= \text{løpehjulfrekvens} && [\text{Hz}] \\ z_{le} &= \text{antall ledeskovler} && [\text{Hz}] \end{aligned}$$

Størrelsen på amplituden vil være avhengig av avstanden mellom lede- og løpeskovler og av geometrien på ledeskovlene (Antonsen 2007). Turbinens driftspunkt påvirker også amplituden; Høy amplitude ved lave driftspunkt og lav amplitude ved bestpunkt.



**Figur 2-1: Trykkpulsasjon på grunn av en vake**

## 2.4 Sugerørsvirvelfrekvensen

Virvler i sugerøret kan oppstå når turbinen opererer utenfor bestpunkt(Figur 2-2), og disse virvlene er årsaken til sugerørsvirvelfrekvensen, eller *Rheingangs-frekvensen* som den også betegnes som. Dette er massesvingninger som forplanter seg i vannveien, og selv om disse er størst i sugerøret kan de også måles før turbinen(omdreiningshulrommet). Selv om virvelen finnes i sugerøret, vil den ikke være virtuell synlig før trykket enkelte steder i sugerørsvirvelen blir så lavt at vannet kommer under damptrykk. Når trykket kommer under damptrykk vil virvelen fylles med bobler der vannet er i gassform. Ved dette tidspunktet har også amplituden økt, og amplituden er størst ved drift ved normal dellast (50-70% volumstrøm i forhold til bestpunktet for turbinen). Trykkpulsasjoner ved sugerørsvirvelfrekvensen kan være en årsak til effektsvingninger ut fra generator (Rheingangs 1940). Store effektsvingninger er uheldige siden disse når ut til nettet, og kan i ekstreme tilfeller påvirke nettfrekvensen til svake nett.

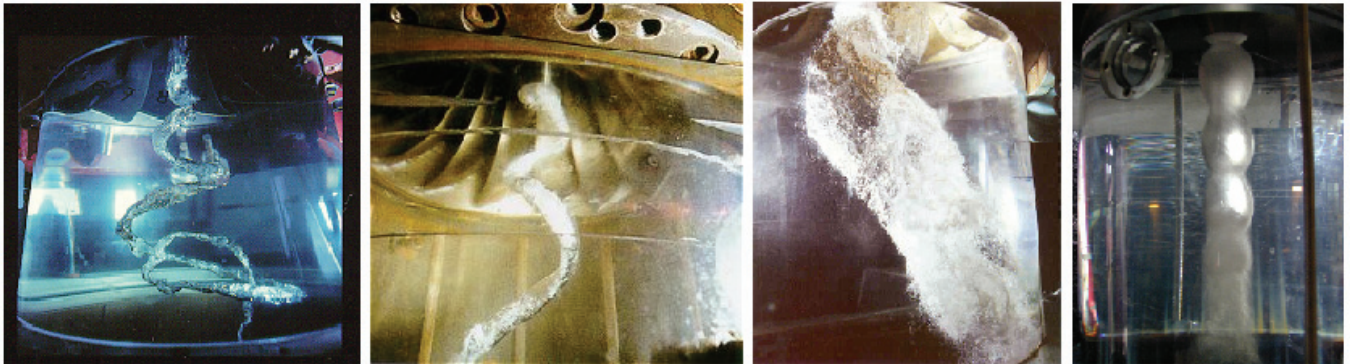
Sugerørsvirvelfrekvensen ligger i område:

$$\frac{f_n}{3,6} < f_r < \frac{f_n}{3} \quad [\text{Hz}]$$

**Ligning 4**

$f_n$  = løpehjulfrekvens [Hz]

$f_r$  = sugerørsvirvelfrekvens [Hz]



**Figur 2-2: Sugerørsvirvel ved lav, normal, og høy dellast samt ved fullast**

## 2.5 Systemdynamikk

En hver forandring av volumstrømmen gjennom turbinen vil gi en dynamisk trykkendring på grunn av retardasjon/akselerasjon av vannmassene (Nielsen 1990). Disse trykkendringene, som kommer av dynamikken til system, kan sette opp frekvenser i vannveien.

### 2.5.1. Vannhammerfrekvens

Vannhammerfrekvensen kommer av trykkendringer skapt av endring i volumstrøm. Eksempelvis kan dette skje ved rask lukking av kuleventilen som vil gi trykkstøt mellom ventil og nærmeste frie vannspeil. Signalet om en trykkendring forplanter seg i vannstrengen med lydens hastighet. I tunneler har det vist seg at lydhastigheten er rundt 1200 m/s, men denne kan variere mye i forhold til fjellkvalitet og luftinnhold i vannet.

Refleksjonstiden er tiden det tar for en trykkbølge skapt av ventilen å bevege seg til nærmeste frie vannspeil og tilbake. Hvis man stenger ventilen til en turbin raskere enn refleksjonstiden, vil man sette opp elastiske svingninger som har stor amplitude. Refleksjonstiden er gitt som:

$$T_r = \frac{2L}{a} \quad [\text{s}] \quad \text{Ligning 5}$$

Normalt er et vannkraftverk designet slik at lukketiden er langsommere enn refleksjonstiden. Ved lange tunneler gjøres dette vanligvis ved å lage svingekammer. Dette medfører at man blant annet får vannhammerfrekvenser mellom turbin og svingekammer, der amplituden er sterkt avhengig av lukketiden. Perioden og frekvensen til vannhammerfrekvenser er gitt som:

$$T_r = \frac{4L}{a} \quad [\text{s}] \quad \text{Ligning 6}$$

$$f_{el} = \frac{1}{T_r} = \frac{a}{2L} \quad [\text{Hz}] \quad \text{Ligning 7}$$

$T_r$  = periode

$L$  = avstanden mellom to frie vannspeil

$a$  = lydhastigheten

$f_{el}$  = vannhammerfrekvens

### 2.5.2. U-rørsvingninger

For å begrense problemet med vannhammerfrekvenser er det vanlig å bruke svingekammer, fordi svingekammer reduserer  $L$  i ligning 5 kraftig, og dermed også lukketiden. Endring av driftspunkt medfører også en endring av volumstrømmen gjennom turbinen, og denne volumstrømsendringen blir tatt opp av svingekamrene. Dette kan sette opp svingninger mellom de ulike vannspeilene, og disse svingningene kalles u-rørsvingninger. U-rørsvingningene har en lav frekvens i forhold til trykkpulsasjonene.

## **2.6 Løsninger for å begrense trykkpulsasjoner**

Så lenge Francisturbiner har eksistert har det også vært problemer med trykkpulsasjoner. Det har blitt gjort mye arbeid for å forhindre eller dempe pulsasjonene, og det finnes mange ulike metoder som er brukt. De vanligste løsningen er forskjellige varianter av luftinjeksjon, eller ulike geometriendringer i sugerøret som bryter opp virvlene. Metodene har til hensikt å redusere sugerørsvirvelen ved å redusere den tangentielle hastighetskomponenten.

Ved å etablere virveldempere i sugerøret kan man i følge Rheingangs (1940) redusere amplituden med opp mot 75 %, men slike installasjoner kan også medføre kavitasjon og støy. Dette vil også være faste installasjoner som vil være til stede under alle driftspunkt. Ved bestpunkt vil ikke en slik installasjon ha noen fordeler og medfører et tap i virkningsgrad.

Vanninjeksjon via løpehjulskonusen eller via dyser montert i sugerørskonusen er også løsninger for å begrense trykkpulsasjoner. I følge Kjeldsen, Olsen, Nielsen og Dahlhaug (2006) kan mye av energien i sugerørsvirvlene drepes ved vanninjeksjon i sugerøret. Vannet tas fra trykksjakta og injiseres tangentielt og i motsatt retning av spinnretningen til virvelen. En mer detaljert gjennomgang av ulike virkemidler for reduksjon av trykkpulsasjoner kan finnes hos Haugan 2007.

## **2.7 Tidligere arbeider med trykkmålinger på løpeskovlene**

Gjennom tidene er det gjort mange ulike forsøk og målinger for å forstå trykkpulsasjoner i Francisturbiner (Rheingangs, 1940, Oftebro og Lønning, 1967). I senere tid er det også gjort målinger for å finne trykkpulsasjoner ved å feste sensorer direkte på skovlene. Dette arbeidet er blant annet gjort av Farhat, Natal, Avellan, Paquet, Lowys, Couston (2002) som ved bruk av trykktransdusere(strekklapper) nedfelt i skovlbladene på en modellturbin, avdekket trykkpulsasjoner. Disse modelltestene er gjort på modeller av lavtrykks Francisturbiner.

Avellan, Etter, Gummer og Seidel gjorde i 2000 en modelltest med strekkklapper på en stor Francisturbin med stor variasjon i fallhøyde. Der ble det gjort trykkmålinger over skovlbladene, og etter frekvensanalyse viste det seg at sugerørsvirvelen var den mest dominerende frekvensen ved drift på lav og på høy last.

Det er også gjort forskning på en prototyp Kaplan turbin i Luleå, Sverige av Janson I. og Cervantes (2007). Disse målingene vil bli gjort med strekkklapper nedfelt i skovlbladene og med en lignende måleinstrumentering som er planlagt i denne oppgaven.

En artikkel av Z. Wang og Zhou L. (2006) omhandler trykkpulsasjoner fra sugerørsvirvelen. Der ble simulering i skovlkanalen og sugerør sammenlignet med et trykkforløp målt i sugerørskonusen på en prototyp lavtrykks Francis. Disse beregningene viste at trykkfluktuasjonene i sugerøret også brer seg motstrøms opp i løpehjulskanalene. Pulsasjonene er sterkest ved utløpet og avtar videre oppover mot innløpet til løpehjulet.



Fluktuasjonene hadde også en tendens til å være større på sugesiden enn på trykksiden av bladet.

Alle disse forskningsrapportene omhandler trykkpulsasjoner, men målingene er i hovedsak gjort på lavtrykks Francis og på modellturbiner. Einar Kobros doktoroppgave omhandler trykkmålinger på løpeskivene i høytrykks Francisturbiner. Det skal både gjøres tester på prototyp og modell for samme turbin. Dette for å prøve å finne en generell sammenheng mellom trykkpulsasjoner for modellturbiner og prototyper.

### **3. Forberedelse og praktisk gjennomføring av målinger**

#### ***3.1 Tokke kraftverk***

Tokke kraftverk ligger i Dalen i Telemark og ble satt i drift i 1961. Det utnytter et fall på 377 meter fra Vinjevatn og ned til innsjøen Bandak. I Tokke er det installert fire identiske Francisturbiner med bestpunkt på 82,5 MW per turbin og en makslast på 110,3 MW (Kobro 2006). På grunn av at utløpet fra kraftverket er underdimensjonert ligger bestpunkt for hele anlegget ved drift på alle fire aggregatene på 77,7 MW per turbin. Turtallet for turbinene ligger på 375 o/min og fartstallet er  $\Omega = 0,274$  ved en volumstrøm på  $31\text{m}^3/\text{s}$  (fullast). Normal årsproduksjon ved Tokke ligger på 2140 GWh.

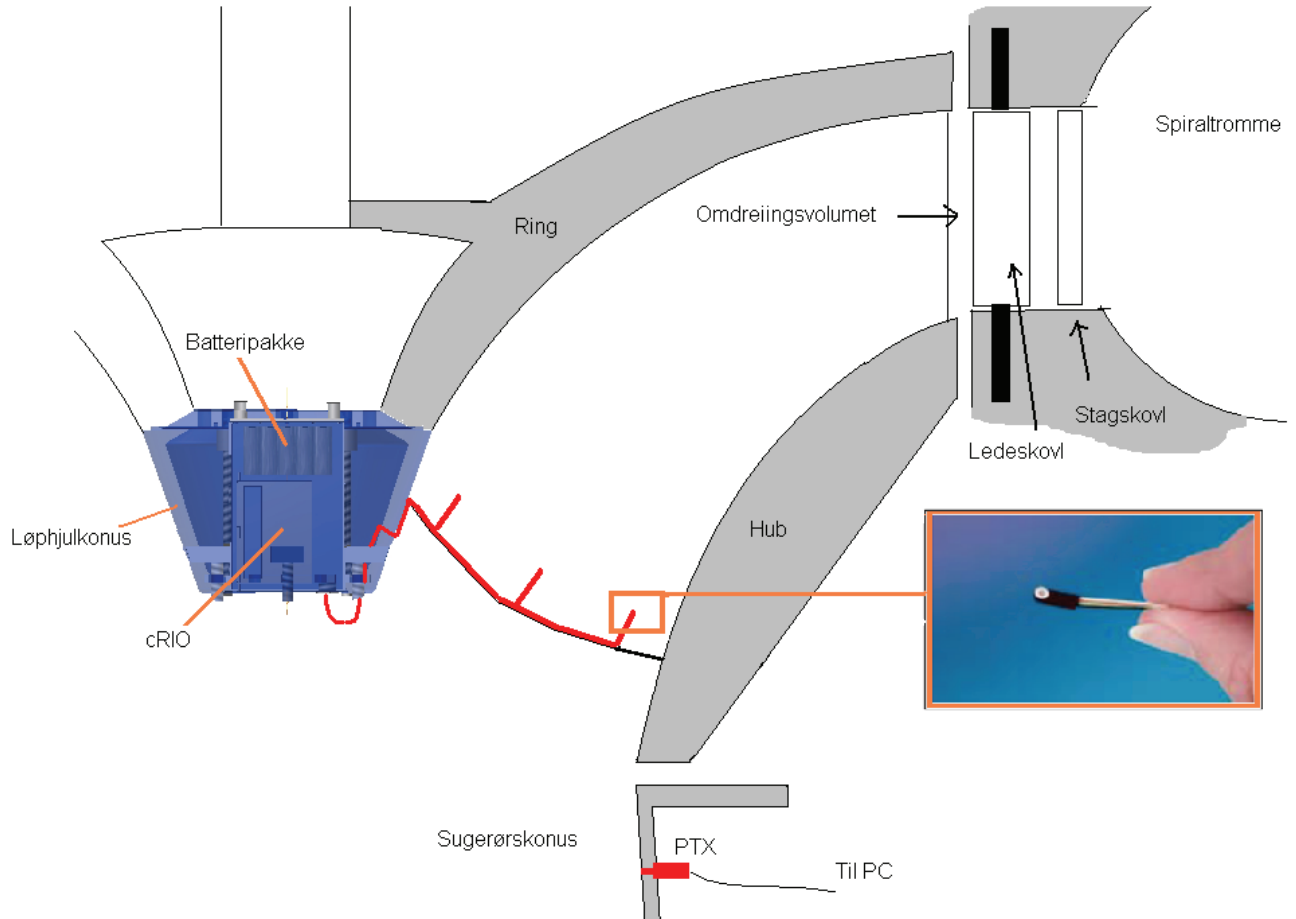
I 2005 utførte Nordconsult virkningsgradsmålinger for Statkraft ved Tokke. På grunnlag av disse målingene ble det besluttet å bytte ut løpehjulene ved kraftverket. Statkraft inviterte fire turbinleverandører til å lage hver sin modell av turbinen, men bare en av disse leverte et tilbud. Vannkraftslaboratoriet ved NTNU ble brukt som uavhengig testfasilitet, og modelltestene ble kjørt våren 2007. I den forbindelse ble det også bevilget penger til produksjon av et modellhjul designet ved Vannkraftslaboratoriet.

Modellløpehjulene ble også tilrettelagt for måling av trykkpulsasjoner. Disse målingene gjøres av doktorgradsstudenten Einar Kobro, der trykksensorer blir integrert i løpehjulsskovelene, slik at en kan gjøre trykkmålinger gjennom skovlkanalen til turbinen.

I forbindelse med inspeksjon av kraftverket på Tokke, ble Vannkraftslaboratoriet invitert til å delta under inspeksjonen, samt å kjøre trykkpulsasjoner i sugerrøret til ett av aggregatene. Dette ble gjort av Einar Kobro, og resultatene av disse målingen er å finne i masteroppgaven ”Trykkpulsasjoner i Francisturbiner” skrevet våren 2006.

#### ***3.2 Måleoppsett***

For å kunne gjøre målinger inne i skovlbladene under kjøring av kraftverket, er det nødvendig å ha en målestasjon som kan operere alene. Dette gjøres ved å bruke en CompactRIO-kontroller som vil være plassert inne i løpehjulskonusen under kjøring. CompactRIO-kontrolleren og batteripakken vil være installert inne i en vanntett boks som vil bli festet til konusen (se Figur 3-1). Videre ut fra den vanntette boksen går sensorledningen gjennom en vanntett kabelgjennomføring og opp langs innsiden av konusen til et gjennomgående hull. Fra hullet går ledningene langs avløpskanten til skovlen og ut til sensorene. Sensorene vil være limt fast til skovlbladene på trykk- og sugeside til en av skovlkanalene. I tillegg vil det være montert en PTX sensor i sugerørskonusen slik at en kan sammenligne trykkforholdene i sugerøret og kanalen. Det vil også være montert en snorposisjonsangiver til ledeskovelene.

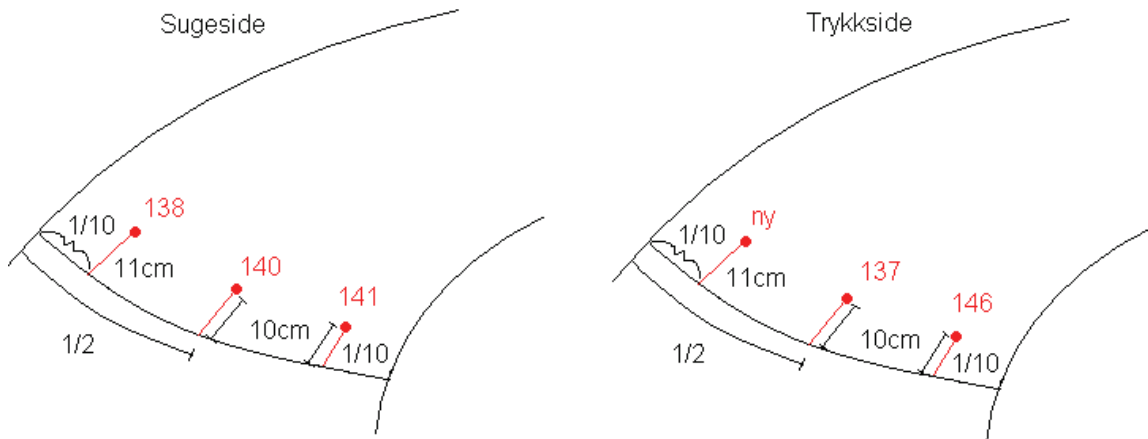


**Figur 3-1: Oversikt måleoppsett**

### 3.2.1. Plassering av sensorer på skovlbladene

Den turbinen som sitter i Tokke i dag er en halvskovlturbin som er designet av Kværner. Det vil ikke bli gjort noen modelltest av denne turbinen, og for å få et best mulig sammenligningsgrunnlag mellom de ulike målingene er det valgt å oppskalere sensorplasseringen gjort på modellturbinen som ble designet på Vannkraftlaboratoriet. Dette er gjort fordi Kværner turbinen og den som ble designet på Vannkraftlaboratoriet, har en forholdsvis lik design. Begge hjulene er halvskovelhjul, mens det nye hjulet som skal installeres er et helskovelhjul.

I forhold til lengden på avløpskanten er de ytterste sensorene plassert 10 % fra henholdsvis hub og ring. Den midterste sensoren har en plassering på skovlbladet midt mellom huben og ringen. Sensoren nærmest ringen er plassert 11cm fra utløpskanten mens de andre sensorene er plassert 10 cm fra kanten. Plassering av sensorene er vist i Figur 3-2.



**Figur 3-2: Sensorplassering på skovlbladene**

### 3.2.2. Sensor i sugerør og snorposisjonsangiver for ledeskovlene

Det vil også bli plassert en trykktransduser av typen PTX 610 i sugerøret. Dette gjøres slik at trykkforløp i sugerrøret kan sammenligne med trykkforløpet i skovlkanalen. Plasseringen av sensoren vil bli gjort etter samme oppsett som ble gjort under målingene på Tokke gjort av Einar Kobro (2006). For å ha kontroll på ledeskovlåpningen er det tenkt brukt en posisjonsangiver koblet til ledeskovlreguleringen. Dette er i hovedsak nødvendig for å kunne lese av en nøyaktig ledeskovlåpning under rolig opplast og rolig nedlast for turbinen.

## 3.3 Teori om måleutstyr for målinger i skovlkanalen

For å kunne gjennomføre målinger ved Tokke kraftverk var det viktig å velge riktig loggeutstyr. Et av problemene er at loggeutstyret skal plasseres inne i løpehjulskonusen der det er begrenset med plass. I tillegg må loggeutstyret ha høy nok loggefrequens, samt et lavt strømforbruk, siden det ikke vil være kontakt med utstyret før etter hele testen er gjennomført. På grunnlag av disse kriteriene ble det valt å satse på et CompactRIO-system.

### 3.3.1. NI cRIO-9012

NI cRIO-9012 (Figur 3-3) er en datalogger som er beregnet for å kunne operere alene under røffe forhold og med et lavt strømforbruk. CompactRIOen (cRIO) har en innebyggt real-time prosessor som gir en deterministisk og pålitelig bruk for målinger der man trenger å ha kontroll over absolutt tid. cRIOen kan bruke en spenning mellom 9 og 35 VDC og det er valgt å bruke en batteripakke på 24 VDC på 13Ah. CompactRIOen er godt egnet til å logge data ved høye frekvenser og opererer helt opp til 250 kHz. Ulempen med cRIOen er at den har begrensinger ved håndtering av store datamengder. Dette gjelder spesielt for "Field-programmable gate array" (FPGA) som cRIOen bruker for å ha kontakt med loggemodulene. cRIOen har 64 MB RAM, som kan bli i minste laget ved

høy frekvens på loggedata over en lengre periode. For mer spesifikk informasjon om cRIO anbefales det å lese brukermanual (National Instruments, 2007)



**Figur 3-3: Bilde av måleutstyr, fra venstre: CompactRIO, NI 9237, og trykksensor**

### 3.3.2. NI 9237

National Instruments 9237 er en loggmodul for simultan logging (Figur 3-3) som kan brukes sammen med en CompactRIO. 9237 har 4 mottakere for RJ50-plugger (vanlig internettkabel), og kan festes til et chassis som er skrudd sammen med cRIOen. NI 9237 kan gi ut en eksitasjonsspenning mellom 2,5 og 15V. NI 9237 gjør simultane målinger på alle uttakene, og det er også mulig å linke flere 9237 sammen under FPGA slik at alle sensorene avleses på likt. Usikkerheten til NI 9237 er maksimalt på 0,20 % (National Instruments, 2007)

### 3.3.3. Trykksensor LL-080 3,5 bar

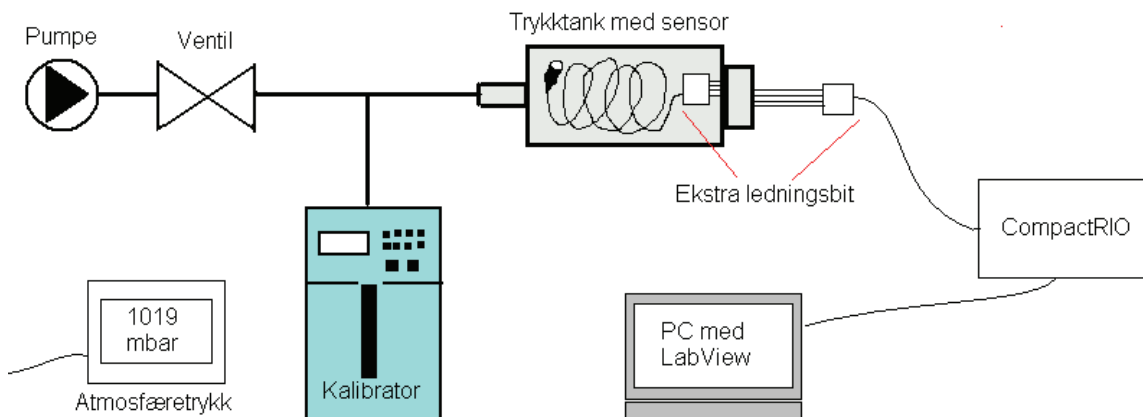
LL-080 er en liten trykktransduser, som p.g.a. sin størrelse gir en minimal påvirkning på strømningbildet. En trykktransduser (strekkklapp) er et elektromekanisk instrument som konverterer mekanisk effekt til et elektrisk signal. Teorien til en strekkklapp bygger på at resistansen i en elektrisk leder forandres når lengden forlenges. Når lederen i en strekkklapp utsettes for et trykk, fører dette til at lederen strekkes slik at motstanden øker. Strekkklappen er koblet sammen med en Wheatstone målebro (efunda 2007) for å kunne avlese økningen i motstand som et elektrisk signal. Trykktransduserene mottar en eksitasjonsspenning og sender et signal tilbake som er skalert i forhold til eksitasjonsspenningen. Sensorene er designet for en eksitasjonsspenning på 10V, og har da en feilkilde på pluss/minus 5mV. Feilkilden er prosentvis lavere ved høye eksitasjonsspenninger, og det ble derfor valgt å bruke en eksitasjonsspenning på 10V.

Trykktransduserne opererer opp til et trykk på 3,5 bar, men tåler det dobbelte uten påvirkning av kalibrering. Trykket inn på løpehullet ved Tokke kraftverk er på ca 37 bar, men fordi sensoren er plassert ved utløpet er det ingen fare for at trykktransduserne vil bli utsatt for et høyere trykk enn designtrykket. Sensorene fungerer slik at ved en

eksitasjonsspennning på 10V gir sensorene ut en spenning på 100 mV ved 3,5 bar, og 0 mV ved 0 bar. Ved en eksitasjonsspennning på 2,5V gir sensorene en spenning på 25mV ved 3,5 bar. Disse voltverdiene blir omgjort til heltallsverdier med en nøyaktighet på 32 bit i 9237ene, og sensorene gir lineære verdier som samsvarer med hvilket trykk de blir utsatt for.

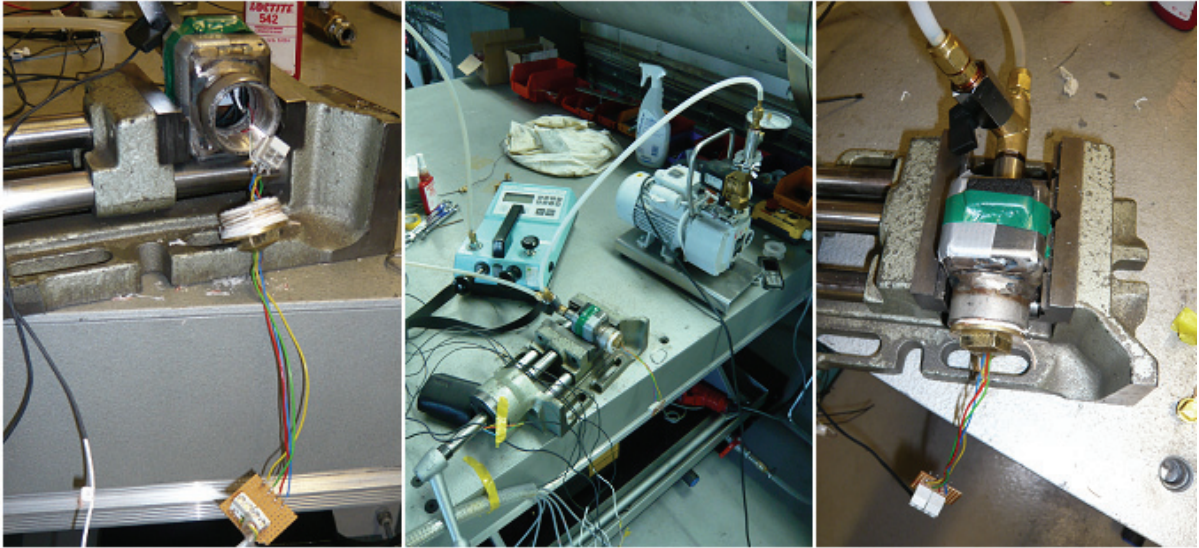
### 3.4 Kalibrering

Sensorene som skal brukes i måling ble kalibrert ved hjelp av Druck DPI601 trykkkalibrator. For å kalibrere LL-080 ble trykkkalibratoren koblet sammen med en vakuumpumpe og en liten trykktank, se Figur 3-4. Sensorene ble separat plassert inne i trykktanken, og for å minimere antall feilkilder ble sensorene kalibrert med de kanaler og ledninger som skal brukes under kjøring. Hver sensor hadde da riktig kanal ut fra NI 9237en og riktig ledning frem til sensoren i forhold til det som vil bli brukt under måling. Det trengtes bare en ekstra ledningsbit gjennom forseglingen til trykktanken (se Figur 3-4). For hvert loggepunkt ble også atmosfæretrykket avlest og tatt med i kalibreringen. Sensoren vil derfor vise absolutt trykk i bar etter kalibrering.



**Figur 3-4: Skisse over kalibreringsoppsett**

Ved hjelp av pumpe ble trykket redusert ned mot vakuum, før pumpe ble koblet av ved hjelp av en ventil. Videre ble kalibratoren brukt til å pumpe inn luft i systemet slik at sensorene ble kalibrert fra 0 til 4,5 bar med rundt 30 målepunkt på hver sensor. LL-080 gir et spenningssignal som er skalert ut fra eksitasjonsspenningen. Dette signalet blir omformet i NI 9237 til en tallverdi mellom 0 og 43 milliarder, som står i samsvar til et gitt trykk. Avlest resultat fra CompactRIOen ble sammenlignet med avlest trykk på kalibratoren for å generere en kalibreringsnøkkel for hver sensor (vedlegg B). Bilder av trykktanken og kalibreringsutstyret er vist i Figur 3-5.



Figur 3-5: Kalibreringsoppsett

### 3.5 Frekvensanalyse

Frekvensanalyse er et analyseverktøy som brukes på en gitt mengde data for å finne ut om et signal gjenta seg etter faste mønstre. Når en bruker frekvensanalyse av trykkpulsasjoner er det for å finne ulike frekvenser og deres amplituder, slik at en kan forstå årsakene til pulsasjonene.

I frekvensanalyse brukes det Fouriertransformasjon. En forutsetning for Fouriertransformasjon er at ligningen som skal transformeres er stykkevis kontinuertlig over et endelig intervall. Dette er ikke tilfelle ved en måleserie med loggepunkter, og derfor brukes Discret Fourier Transform(DFT), som gir en approksimasjon til den kontinuertlige fouriertransformerte ved å anta at funksjonen er kontinuertlig i hvert loggepunkt. En mer utfyllende teori om frekvensanalyse finnes hos O. Thorvaldsen (2007).

I LabView brukes ulike metoder av Fast Fourier Transformer(FFT), som er en effektiv måte å programmere DFT. Ettersom det kan være vanskelig å bedømme hvilken FFT-prosedyre som vil være beste egnet før en har måledata, er programvaren laget slik at en kan velge mellom ulike prosedyrer for FFT.(se vedlegg F).

#### 3.5.1. Overlappende vinduer

Felles for de ulike FFT-prosedyrene er at de bruker såkalte overlappende vinduer. Overlappende vinduer er en måte å dele opp en loggeserie i intervaller, og frekvensanalysere disse hver for seg. Hvert intervall vil bli overlappet av det påfølgende, og størrelsen på vinduene og overlappingen kan bestemmes av bruker. Med små vinduer og stor overlapping blir resultatet nøyaktige, men dette vil samtidig krever stor datakapasitet og tar lang tid. En må derfor vekte ønsket grad av nøyaktighet mot

tilgjengelige resurser. Etter at det er blitt foretatt frekvensanalyse på hvert vindu, vil vinduene bli midlet for å få et resultat for hele måleserien. Ved å bruke vinduer reduseres effekten av spektral lekkasje. I LabView kan det velges mellom en rekke ulike vinduer, og i programmet som er laget (Vedlegg F) kan man velge hvilket man vil bruke i forhold til det som passer best for loggedataene. I følge Kobro (2006) anbefales det å bruke et Hanningvindu, som gir en fornuftig vektning mellom nøyaktighet og tidsresurser.

### 3.5.2. Spektral lekkasje

En annen form for støy på resultatet som kan oppstå ved bruk av FFT og overlappende vinduer, er spektral lekkasje. Spektral lekkasje kan føre til at energien til signalet vil fordeles over flere frekvenser som fører til at amplituden på frekvensen synker. På grunn av spektral lekkasje vil derfor amplitudene til frekvensene få større usikkerhet.

### 3.5.3. Harmonier

I frekvensanalysen kan man oppleve at det oppstår harmonier. En harmoni i frekvensanalyse er en speiling fra en virkelig frekvens, som vises som en kunstig frekvens som gjerne har  $\frac{1}{2}$ , 2 eller 3 gang så høy frekvens som den virkelige frekvensen. Disse kalles 1/2.harmoni, 2. harmoni, 3. harmoni, og har gjerne en lavere amplitude en den frekvensen de speiler.

## 3.6 Forventede frekvenser

Ved analyse av resultatene er det viktig å ha kontroll på de forventede frekvensene. Aggregatet på Tokke har et turtall på 375 o/min, og det gamle løpehjulet som målingene skal tas på har 30 løpeskovler og 28 ledeskovler. Forventede frekvenser i Tabell 1 er beregnet ut fra teorien i kapittel 2.

**Tabell 1:Forventede frekvenser**

Frekvens	Absolutt ferkvens f[Hz]	Relativ frekvens f/fn [-]
Løpehjulsfrekvens(fn)	6,25	1
Løpeskovlfrekvens( flø)	187,5	30
Bladpasseringsfrekvens(fb)	175	28
Sugerørvirvelfrekvens (fr)	1,74<fr<2,08	0,28<fr/fn<0.33
Nettfrekvensen	50	8

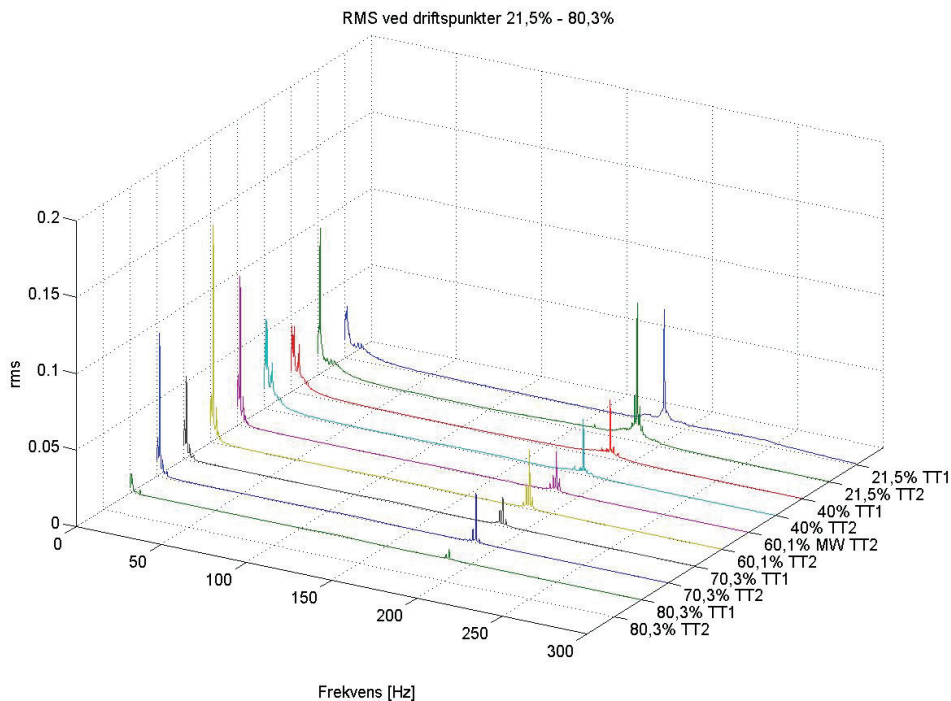
I tillegg til frekvensene vist i tabell 1, kan det oppstå ulike harmonier av disse. U-rørsvingninger og vannhammerfrekvenser kan også oppstå under kjøring, og for å begrense dette vil det under måling bli brukt en slagbegrenser. Slagbegrenseren låser ledeskoblene i en gitt stilling, slik at reguleringssystemet ikke har mulighet til å endre vinkel på ledeskoblene. For hver endring av driftspunkt går det 15 minutter til loggepunktet. Innen denne perioden har vannmassene hatt nok tid til å stabilisere seg, siden justeringen med slagbegrenseren vil bli gjort forsiktig for å unngå å sette opp for store svingninger.



I følge Kobro (2006) er vannhammerfrekvensen  $f = 0,64$  Hz og frekvensen for svingning mellom turbin og undervann lik  $f = 1,86$  Hz for Tokke kraftverk. Disse frekvensene er derfor lite ønskelig, siden de vil være i samme frekvensområde som sugerørsvirvelfrekvensen.

CompactRIO har en pause i loggingen på 81ms for hvert 2000. loggepunkt(forklart i kapittel 3.7.1). For å ha lengst mulig tid mellom hver pause i loggingen er det en fordel med en lav loggefrequens, samtidig som det er nødvendig å ha en høy nok loggefrequens til å kunne måle de høyeste frekvensen. Det er en tommelfingerregel at en bør ha en loggefrequens som er cirka 10 ganger høyeste forventede frekvens. Den laveste innstillingen for loggefrequens til 9237 er på 1613 Samples/sek (Hz). Det ble derfor gjort et kompromiss ved å velge en loggefrequens på 1613 Hz. På den måten blir loggefrequensen så lav som mulig, samtidig som den er høy nok til å logge høyeste frekvens som er bladpasseringsfrekvensen på 187,5 Hz. 1613 er også et primtall, slik at problemer med at loggefrequensen treffer en harmoni til noen av frekvensene forminskes.

I masteroppgaven til Einar Kobro (2006) ble det gjort målinger med trykktransdusere i sugerørskonusen på Tokke kraftverk. Resultatet av disse målingene er vist i Figur 3-66. Figuren viser at det i hovedsak var bladpasseringsfrekvensen og sugerørsvirvelfrekvensen som var dominerende ved målinger på dellast. På overlast var amplitude mye mindre(se Kobro 2006). Ettersom denne målingen skjer på samme turbin, må det forventes et lignende resultat.



**Figur 3-6: Amplituder og frekvenser for driftspunktene 16.7MW, 31.1MW, 46.7MW, 54.6MW, 62.4MW (21,5%, 40%, 60,1%, 70,3%, og 80,3% av BEP). (Kobro 2006)**

Trykksensoren på skovlbladene er festet i nærheten av avløpskanten og den fysiske avstanden mellom sensorene på skovlbladet og sensoren i sugerøret er på om lag 64 cm (Kobro 2006). Bladpasseringsfrekvensen oppstår i omdreingshulrommet og forplanter seg videre ned i systemet. En kan derfor forvente at trykkimpulser fra bladpasseringsfrekvensen kommer først til sensorene i skovlene før de avlese i sugerøret.

For Rheingangsfrekvensen, som oppstår i sugerøret (rett etter løpehjulet), vil impulsene ha størst amplitude i sensoren i sugerørskonusen. Siden sugerørsvirvelen er massesvingninger og kan bevege seg motstrøms, forventes disse også avlest i skovlkanalen. Impulser fra sugerørsvirvelen vil også være faseforskjøvet i de to punktene, men siden sugerørsvirvelen (Figur 2-2) er ustabil er det vanskelig å forutsi noen nærmere sammenheng.

### ***3.7 Programvare i LabView***

Programvaren som er laget for å kunne logge data er skrevet i LabView. Hovedpoenget med programvaren er at den skal kunne logge data fra alle sensorene til bestemte tidspunkt og lagre disse. For å kunne sammenligne loggedataene mellom de ulike sensorene er det viktig at disse dataloggingene skjer til bestemte tidspunkt som stemmer overens med ulike driftspunkt for turbinen. Det var opprinnelig planlagt å bruke tilgjengelig programvare, men siden dette viste seg uhensiktsmessig, ble all programvare laget fra bunnen av. Programvaren som skal brukes på CompactRIO er lagt opp som et realtimestprosjekt i LabVIEW. cRIO skal gjøre loggingen til sensorene i skovlkanalen, mens et program på PC tar hensyn til logging i sugerørskonusen og loggingen av ledeskovlåpningen. For å kunne ha samme loggepunkt på cRIO og PC er det laget en trigger som starter begge programmene samtidig. Programmene fungerer på den måten at de starter sin første loggesekvens en gitt periode etter at triggeren er utløst. I tillegg er det laget programvare som kalibrerer, justerer for loggepausene og gjør frekvensanalyse av loggedataene. En full oversikt over programvaren og hvordan den fungerer er vist i vedlegg F: "CompactRIO for dummies"

#### **3.7.1. Loggeprogram på cRIO**

Programmet er delt inn i to hoveddeler; host og target. Verten (host) er et virtuelt instrument (VI) som bestemmer rekkefølgen på når målet (target) skal bli kalt opp. Målet ligger under FPGA delen på cRIO, og avleser måledata fra NI 9237ene for hvert loggepunkt. Etter måling i et driftspunkt lagres dataene på en minnepinne som sitter i cRIO.

Måten hardwaren i cRIOen er bygd opp på skaper problemer under overføring av data. Dette kommer av at det er begrenset minnekapasitet på FPGA-delen, og når denne er full må data overføres til verten ved hjelp av en FIFO (first in, first out). En FIFO er en køstruktur der de elementene som ble lagret først også blir hentet ut først. Under denne overføringen av data fra "target" til "host" vil ikke cRIOen gjøre målinger. Med en loggefrekvens på 1613 Hz tar det ca 1 sekund før minnet på FPGAen er full. Prosessen

med å overføre data mellom minnene, fra målet til verten, tar ca 81ms. Dette gjør at for hvert 2000. målepunkt vil det være en loggepause på 81ms, der det ikke vil bli gjort målinger. Disse loggepausene må det tas hensyn til, og dette gjøres etter testen er utført ved å sette inn snittverdier i de aktuelle tidsrommene (Vedlegg F).

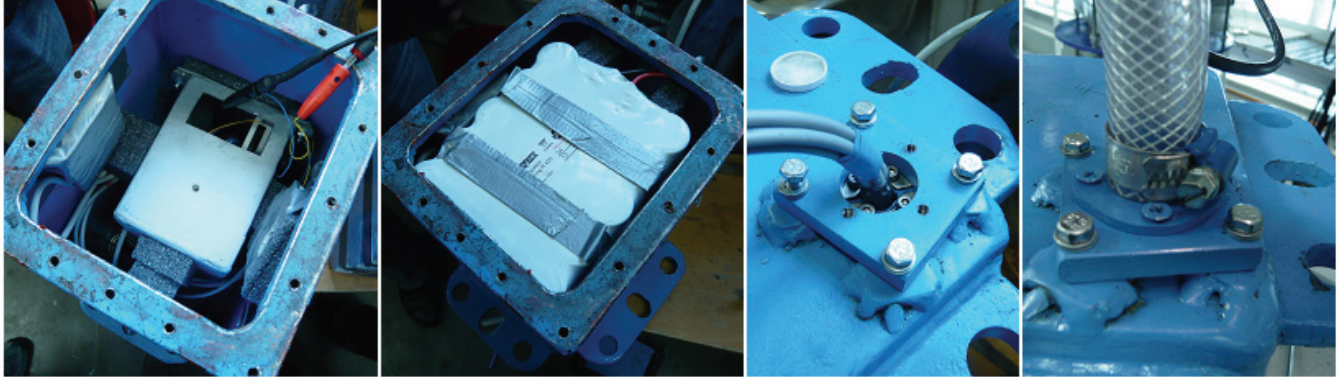
### **3.7.2. Loggeprogram for PTX og snorsensor**

Samtidig som cRIOen gjør målinger fra sensorene på skovlene, vil det være koblet til en PTX sensor i sugerørskonusen. Denne sensoren vil ved hjelp av programmet Tokke.vi (se vedlegg F) logge data og lagrer disse på en PC. En får dermed loggedata for de samme tidspunktene i skovlkanalen og i sugerøret.

Den innebygde klokka på CompactRIO-kontrolleren blir synkronisert med klokka på loggePCen. Synkroniseringen gjøres manuelt, og dette betyr at klokkene i verste fall kan bli opp mot ett sekund forskjøvet i forhold til hverandre. Når programmene blir trigget vil triggertidspunktet bli lagret på begge maskinene. Men for å sikre seg mot at en har loggedata for de samme periodene, er det valgt å la tokke.vi logge over en lengre periode. Loggingen i sugerørskonusen og på ledeskovlåpningen vil derfor starte ett minutt før, og slutte etter loggingen på cRIO for hver loggeserie. En nærmere beskrivelse av all programvaren som er laget finnes i bruksanvisningen i vedlegg ”CompactRIO for dummies”

## **3.8 Forberedelse til målinger**

Etter montering av sensorer og loggeenhet på løpehjulet, vil det ikke være mulig å forandre noe eller ha kontakt med dataloggeren før turbinen er stoppet og tømt for vann. For å sikre at dataloggeren logger på de ønskede tidspunktene, er det i samsvar med Einar Kobro satt opp en kjøreplan (Vedlegg C) med de ulike driftspunktene til turbinen. Trykksensorene i sugerrøret og i skovlkanalen følger samme loggesekvens, og vil med standardverdiene være nøyaktig linket opp mot kjøreskjema. Hver måleserie blir lagret som tidspunktet den ble startet for å ha kontrollere over at målingen skjer til rette tidspunkt. I tillegg lagres, for hvert loggepunkt, tiden fra start til det spesifikke loggepunktet. Ved å summere disse har man det nøyaktige tidspunktet for hvert loggepunkt.



**Figur 3-7: Montasje i vanntett boks, fra venstre; RIO, Batteripakke, Roxel, plastslange for beskyttelse.**

### 3.8.1. Utbedring av utstyr

I samarbeid med Kobro er mye av utstyret laget eller bearbeidet slik at det kan fungere under de forhold som er forventet under kjøring av turbinen. Hovedmålet har vært å sikre at alle deler av utstyret er vanntette for å minske faren for kortslutning av ledninger og utstyr. Selve cRIOen og batteripakka sitter inne i en vanntett boks (Figur 3-7), som vil bli festet ved hjelp av gjengestenger til løpehjulskonusen. Under kjøring vil det bli pumpet opp et lite overtrykk på 0,5 bar i den vanntette boksen for å redusere faren for vanninntrengning. Ledningen fra sensoren kommer inn i boksen gjennom en Roxel, som er en vanntett kabelgjennomgang (Roxel 2007). Siden Roxelten er beregnet for en enslig kabel, ble det laget en silikonplugg rundt alle sensorledningene (Figur 3-8). Fra Roxelten er det laget et plastrør bort til sugerørskonusen for å beskytte ledningene mot turbulens, som kan skade ledningene.

Både sensorledningene og beskyttelsesstrømpa rundt disse er laget av silikon, noe som gjør at det er svært vanskelig å fest noe til disse. Så for å forhindre at vann kom inn mellom beskyttelsesstrømpa og ledningene, ble det lagt krympestrømper fra sensorene og helt frem til CompactRIOen (Figur 3-8).



**Figur 3-8: Fra venstre; Sensor med og uten krympestrømpe, silikonplugg, RJ-50 plugg, kobling RJ-50 til sensor-kabel.**

Selve cRIOen og batteripakka vil under test bli påvirket av høye G-krefter. For å forminske dette problemet vil sentrum av både cRIOen og batteripakka være plassert i rotasjonsaksen til turbinen. På den måten blir momentet fra sentrifugalkraften minimert. Videre vil det bli brukt støtdempende materiale rundt utstyret, slik at det blir minst mulig bevegelse på cRIOen og batteripakka inne i den vanntette boksen.

### ***3.9 Praktisk gjennomføring***

Grunnet økonomiske vurderinger fra Statkraft, ble det i siste liten besluttet å flytte målingen på Tokke kraftverk fra uke 17 til uke 27. Det ble derfor ikke aktuelt å være med på disse målingene i forbindelse med denne masteroppgaven.

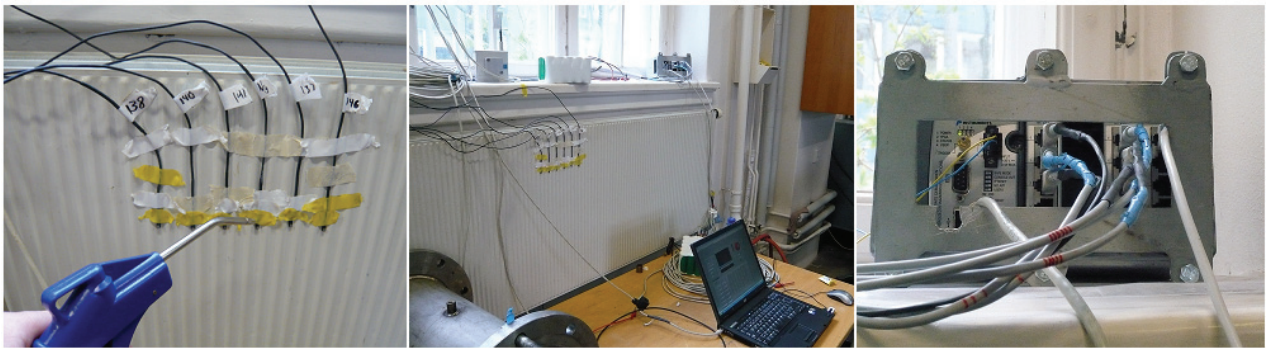
#### **3.9.1. Plan for gjennomføring**

Under målingene på Tokke vil det være en rekke faktorer som må tas hensyn til. Før man kommer så langt som til testdagen, vil ta flere dager å montere alt utstyret som skal brukes. Dette kommer av at arbeidsstedet er vanskelig tilgjengelig og trangt, og at epoksyen skal herde. Det er derfor viktig hvilken rekkefølge som blir fulgt under montasje. En detaljert rekkefølge for montasje å gjennomføring av måling er vist i vedlegg D. Det er også viktig å beregne ekstra tid tilfelle noe uforutsett skulle dukke opp.

## 4. Test av utstyr

Siden det ikke ble gjennomført noen måling før fristen for denne oppgaven, ble det valgt å gjennomføre en test for å kontrollere programvaren og hele måleoppsettet. Sensorene var allerede kalibrert og sjekket for lekkasjer. Det var også gjort utallige tester for å forsikre seg om at cRIOen fulgte målingene etter den bestemte kjøreplanen. Testen var derfor hovedsakelig ment for å teste programvaren for frekvensanalyse, og for å se hvordan sensorene reagerer på trykkimpulser.

Testene ble kjørt i Vannkraftlaboratoriet, og det ble brukt trykkluft for å lage trykkimpulser (Figur 4-1). Grunnen til at det ble brukt luft og ikke vann under testkjøring, kommer av at måleutstyret var ferdig tilrettelagt for måling ute på kraftverk. For å kunne teste sensorene i vann ville det ha vært nødvendig og gjøre forandringer på utstyret, som i verste fall kunne ført til problemer i forhold til den virkelige målingen.

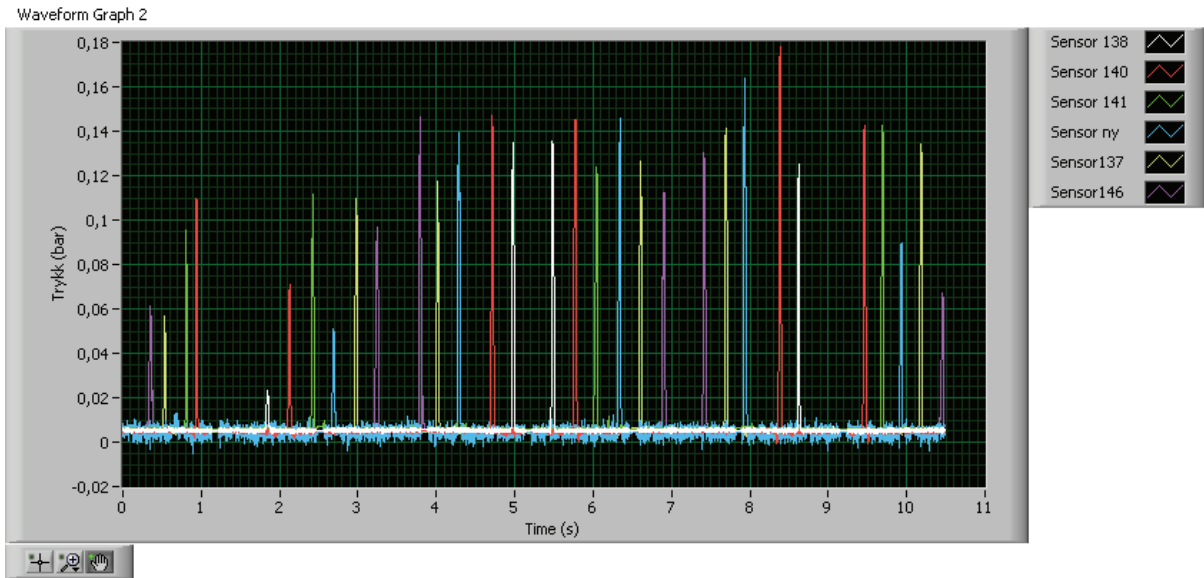


Figur 4-1: Testkjøring av CompactRIO

### 4.1 Testresultater

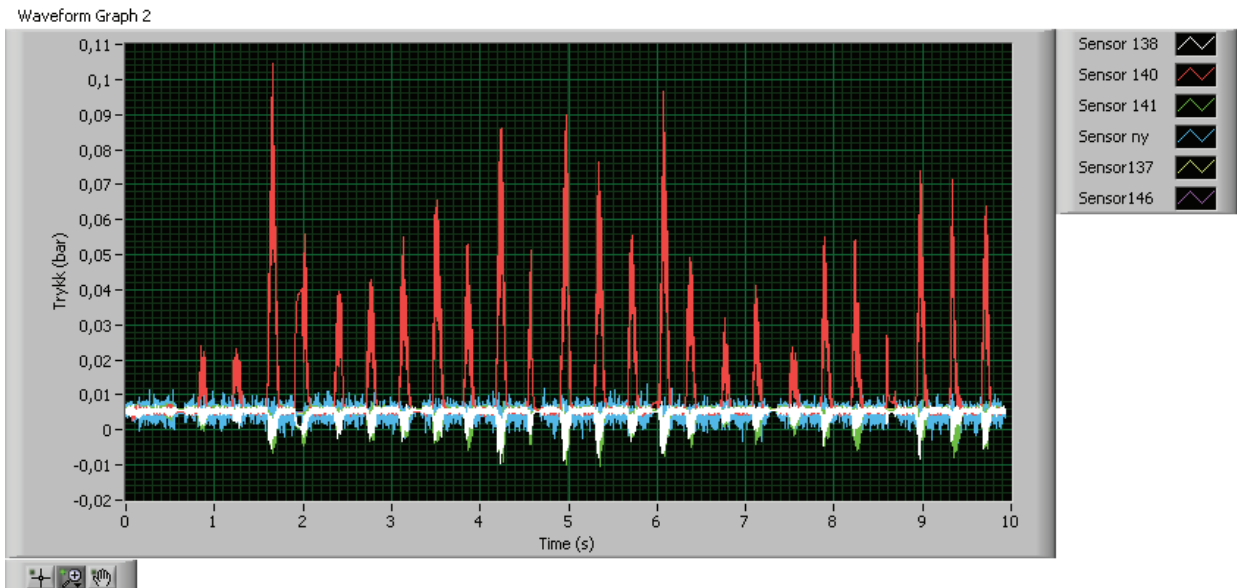
I Figur 4-2 vises resultatet fra en test der lufttrykkspistolen ble ført frem og tilbake over sensorene. Strålen fra pistolen ble sentrert om et lite område slik at den bare treffer en sensor av gangen. Sensorene ble plassert i rekkefølge i forhold til de kanalene de kommer ut fra cRIOen (Figur 4-1, bilde til venstre), og den samme rekkefølgen vises i grafen. Sensor 138 ble plassert lengst til venstre mens sensor 146 var til høyre. På grunn av at pistolen ble ført frem og tilbake vises det for de ytterste sensorene (138,146), to impulser etter hverandre(Figur 4-2).

Strålen fra trykkluftpistolen, som ble ført for hånd, har et lite treffområde. Det er derfor ikke unaturlig at det enkelte plasser er bommet på sensor: Sensor 141 etter 4,5 s og sensor 138 etter 9,3 s. Resultatet fra testen viser overtrykk målt på sensorene i bar, og fra Figur 4-2 ser man at sensorene gir jevne målinger og har god respons på raske impulser.

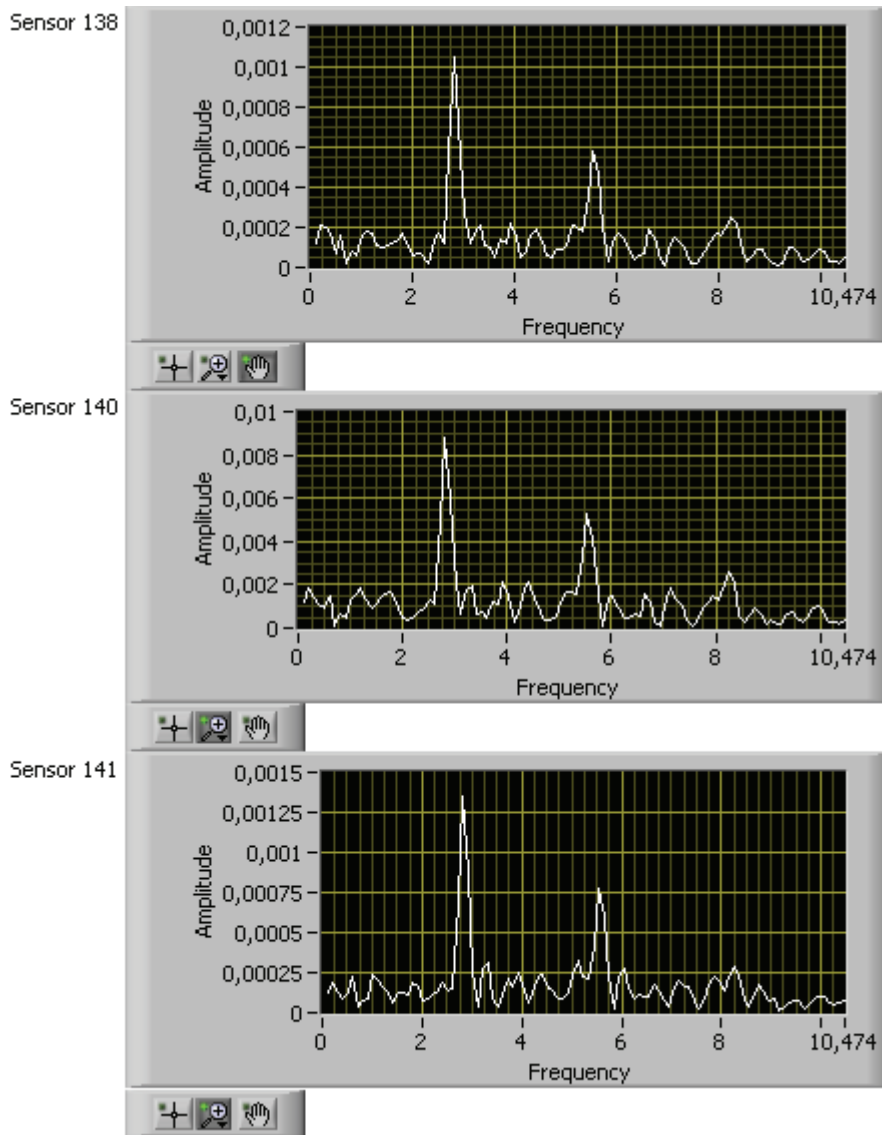


**Figur 4-2: Trykkluftsimpulser der pistolen ble ført frem og tilbake**

Figur 4-3 viser en testkjøring der det ved hjelp av trykkluftpistolen ble sendt luftimpulser med jevne mellomrom mot sensor 140. Også disse impulsene ble gjort for hånd, slik at det ikke er en absolutt amplitude på impulsene eller en absolutt tid mellom hvert trykkstøt. Som det kommer frem av figuren har sensor 140 en trykkøkning for hver impuls, mens det for de to nærliggende sensorene viser en reduksjon i trykket. Økningen i trykk på sensor 140 er forventet, mens reduksjonen i trykk på de nærliggende sensoren kan forklares ved at sensorene var plassert på en panelovn med riflete overflate (se Figur 4-1). Dette medfører at trykkluften blir reflektert fra veggen og det skapes en ”bakevje” for de nærliggende sensorene der det blir et lite undertrykk.



**Figur 4-3: Trykkluftimpulser der luft fra pistolen blir sendt støtvis**



**Figur 4-4: Frekvensanalyse fra testkjøring der luft fra pistolen blir sendt støtvis**

Figur 4-4 viser frekvensanalysen fra trykkforløpet vist i Figur 4-3, der luft støtvis ble sendt mot sensor 140. I Figur 4-3 ser man at det er omtrent 3 impulser i sekundet. Dette stemmer godt overens med de frekvensene som kommer ut fra frekvensanalysen (Figur 4-4), der frekvensen med størst amplitude ligger på 2,8 Hz. Det er også en frekvens på 5,6 Hz og en antydning til en frekvens på litt over 8 Hz. Disse frekvensene er 2. og 3. harmonien til luftstøtene som kom med en frekvens på 2,8 Hz. Amplituden på frekvensen hos sensor 140 er også langt større enn til de nærliggende sensorene, noe som også stemmer med trykkforholdene mellom dem.



## 5. Diskusjon

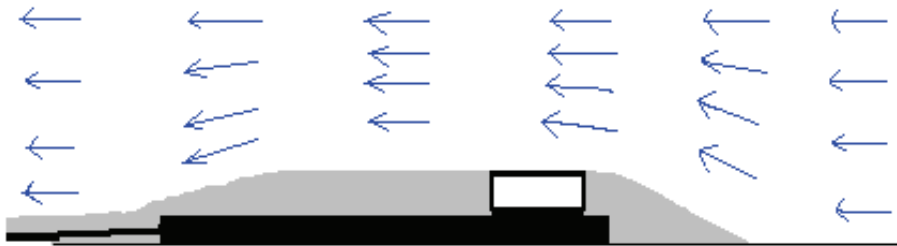
### 5.1 Kalibrering

Ved kalibrering vil det alltid være en del usikkerhet i resultatene. For å minimere disse, ble det under kalibreringen tatt hensyn til atmosfæretrykket. Den dominerende usikkerhet i kalibreringen ligger i å lese av korrekt trykk på kalibratoren, ettersom det viste seg vanskelig å unngå en liten lekkasje fra trykktanken. Problemet med lekkasje ble minimert ved å la målingen til kalibreringen gå over en kort tidsperiode på 0,2 sekund med en høy loggefrequens på 10 000 målinger/sekund. Loggeverdiene over perioden ble midlet for å gi en gjennomsnittsverdi som sto i samsvar til avlest trykk.

NI 9237 mottar et voltsignal fra sensorene som den gjør om til et tall mellom 0 og 45 milliarder. Dette tallet samsvarer med et bestemt trykk i bar, og den sammenhengen som ble funnet ved kalibrering, er vist i vedlegg B. I vedlegget ser man også R-verdien som sier noe om hvor bra de ulike målepunktene ligger på linja (1 er det optimale). Ved måling i atmosfæretrykk lå alle sensorene innenfor en margin på atmosfæretrykk +/- 0,002 bar, noe som er tilfredsstillende.

### 5.2 Sensorenes påvirkning på signalet

På prototypen skal, i motsetning til de modelltestene som gjøres, sensorene festes på overflaten av skovlene og ikke integreres. Dette vil føre til at sensorene selv kan være med å påvirke strømningsforholdene. For å minske dette aspektet jevnes alle kanter ut med epoksyen når sensorene festes (Figur 5-1). Det er viktig at det ikke kommer epoksy det område der trykket måles, siden dette kan påvirke signalet. For å begrense antall feilkilder er det viktig å legge sensorene mot strømningsretningen, og å unngå at noen ledninger krysser foran sensorene. Alt som festes på skovloverflaten vil forårsake turbulens i strømningsfeltet, noe som kan påvirke målingene.



Figur 5-1: Festing av sensor med epoksy

### **5.3 Sensor med navnet ”ny”**

På grunn av at en av sensorene var defekt måtte denne byttes ut med en annen sensor. Denne har blitt kalt ”ny” siden den ikke hadde nummerering. Denne sensoren har nøyaktig det samme utseende og er like stor som de andre sensorene, men den er dimensjonert for trykk på 17 bar. Dette innebærer ikke noe problem for målingen utenom at denne sensoren har større unøyaktighet enn de andre sensorene. Under kalibrering kom det også frem at denne sensoren bare fungerer ned til en halv bars undertrykk. Det er derfor lurt å montere denne på trykksiden av skovlen under testkjøring.

### **5.4 Mulige feilkilder under måling**

#### **5.4.1. Feil på sensor**

Feil på sensor er antagelig de feilkildene som er lettest å oppdage. Sensoroppsettet har flere svakheter, men de mest sannsynlige er: Brudd ved loddepunkt, lekkasje i krympestrømpe, eller at en sensor løsner fra skovlen. Både brudd ved loddepunkt og lekkasje vil mest sannsynlig føre til dårlig kontakt eller overledning på sensoren. Dette vil ødelegge signalet og kan lett avleses på måledata som konstante verdier som ikke samsvarer med virkeligheten. Hvis en sensor løsner fra skovlbladet, vil den mest sannsynlig bli kappet. Dette er et problem som en uansett vil merke under inspeksjon etter testen er ferdig.

#### **5.4.2. Påvirkning fra de andre maskinene**

Ved Tokke kraftverk er det fire maskiner. Testen foregår på en av maskinene, men det kan også være drift på de andre tre under logging. Det vil være en fordel om disse kjører på konstante driftspunkt under hele testen. Raske lastendringer på noen av de andre aggregatene vil gi store svingninger i hele vannveien, noe som også vil påvirke målingene. Det vil uansett være en fordel å ha kontroll med driftsmønsteret på de andre maskinene, slik at en kan ta hensyn til disse ved analyse av måledata.

#### **5.4.3. Endring av driftspunkt**

I den første målesekvensen vil det bli gjort målinger på 20 %, 40 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 % og 120 % av bestpunkt. For hver gang driftspunktet endres vil det settes opp u-rørssvingninger og vannhammerfrekvenser. Ved å sakte justere driftspunktet, slik at endringsraten til volumstrømmen blir liten, minsker man disse svingningene. For hvert driftspunkt ventes det 15 minutter mellom lastendring og loggepunkt. På den måten har svingningene satt opp av endring av driftspunkt, hatt lang nok tid til å forsvinne før loggepunktet.

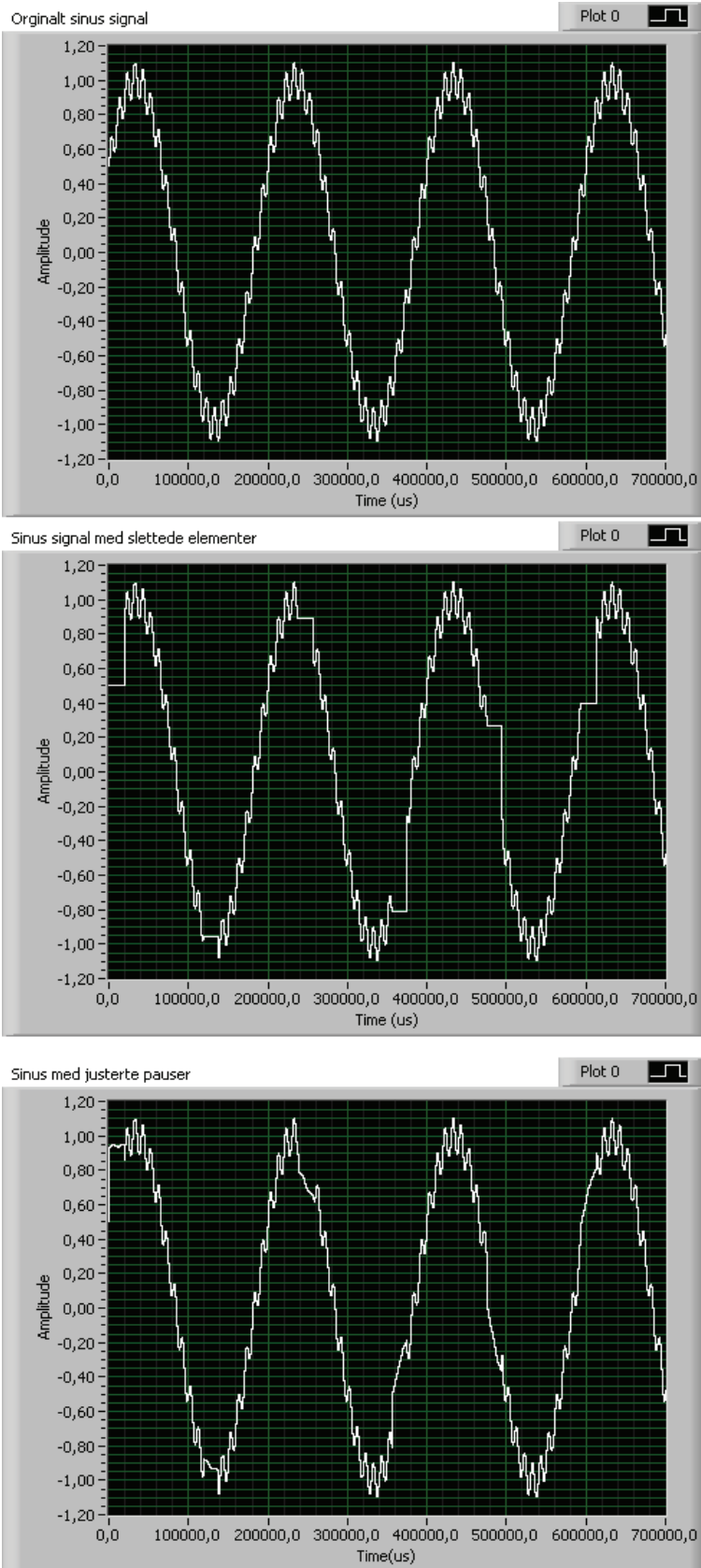
Under opplast og nedlast blir det logget kontinuerlig, også under endring av last. Dette vil medføre at u-rørssvingningene vil påvirke signalene. Drift ved de andre maskinene vil

faktisk være med på å dempe effekten fra disse svingningene, men man må forvente at disse vil være representert i måledataene.

#### **5.4.4. Påvirkning fra omgivelsene**

Det må også tas i betraktning at sensorene vil være plassert i et hardt miljø under målingen. Sensorene vil merke sterke skjærkrefter fra vannmassene, som vil kunne påvirke måledata. Skovlene vil også bli påvirket av hydrodynamiske og sentrifugale krefter på løpehjulet. Den aktive delen av sensoren vil oppleve en akselerasjon på grunn av sentrifugalkraften. Denne akselerasjonen vil stå normalt på trykkkomponenten og dermed motvirke signalet skapt av trykket. I tillegg kan mekaniske vibrasjoner på løpehjulet også påvirke signalet fra sensorene, og gi kunstige frekvenser.

I modelltesten vil det være mulig å teste noen av disse effektene. Ved å måle trykket til sensorene ved rotasjon i luft, kan man regne ut hvor mye sentrifugalkraften påvirker signalet. Generelt er det antatt at disse ulike feilkildene gir små utslag på målingene, og at det kun er vibrasjoner i løpehjulet som vil påvirke frekvensanalysen til dataene.



## 5.5 Kunstige data for loggepausene

Etter at målingen er gjennomført blir de loggede dataene fra CompactRIOen først kalibrert ut fra en kalibreringsnøkkel. Dataene gir da et trykk på alle seks sensorene på et gitt loggetidspunkt. Antall loggetidspunkt og avstand mellom dem avhenger av hvilke verdier som ble bestemt før kjøring.

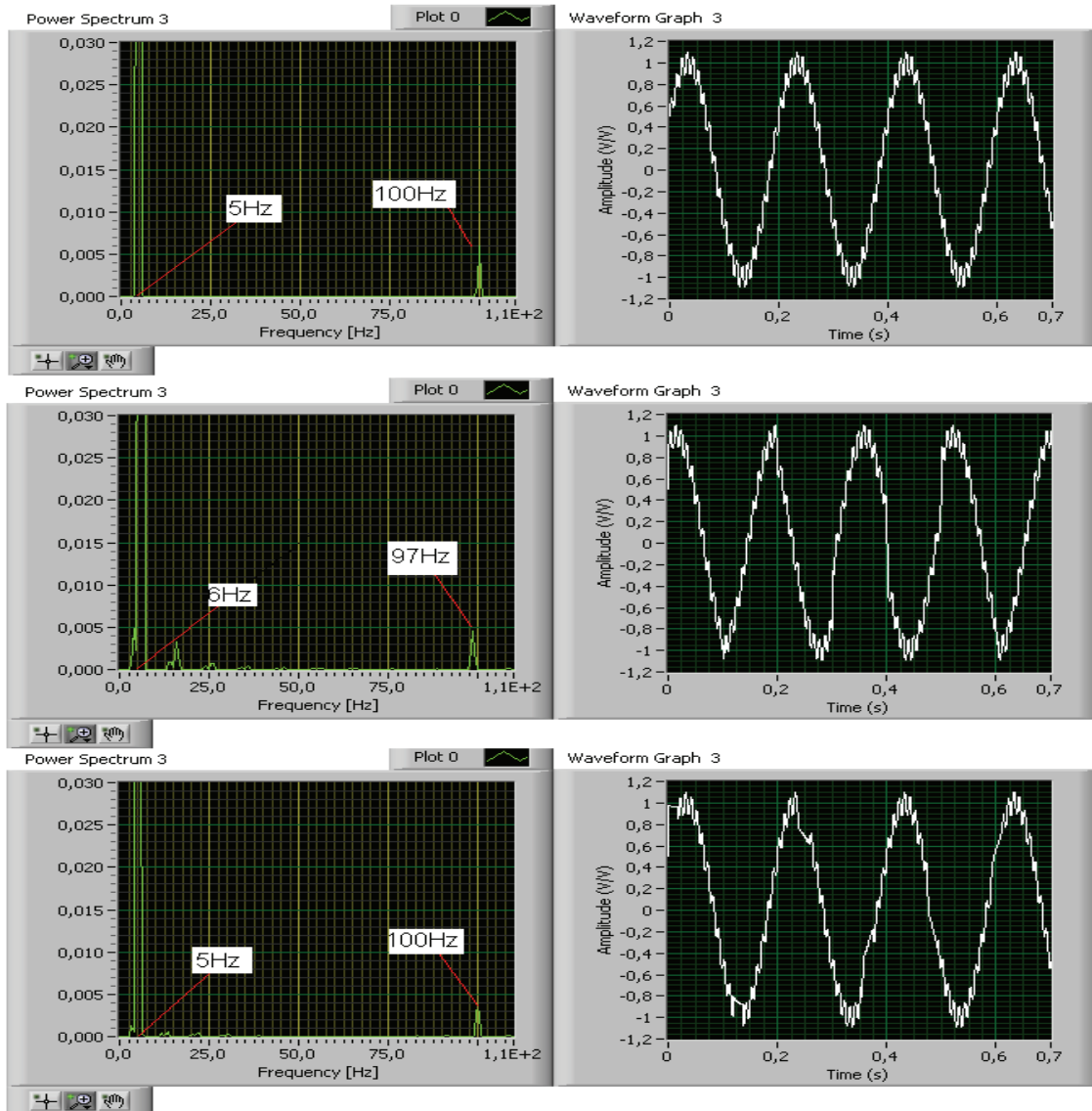
For å bruke loggedataene i en frekvensanalyse, er man avhengig av at det er et konstant tidsintervall mellom hvert loggepunkt. Dette er ikke tilfellet for rådataene, da de ved jevne mellomrom har loggepauser (forklart i foregående kapittel). For å kompensere for dette er det valgt å lage kunstige loggeverdier i de intervallene der det ikke finnes loggedata. Dette gjøres etter at selve loggingen er gjennomført, og ikke i den opprinnelige loggefilen.

For å vise problematikken er programmet kjørt med et testsignal bestående av et vanlig sinussignal med en frekvens på 5 Hz, pluss et "støy"-signal som har en sinus på 100 Hz (Figur 5-2, øverst).

I det midterste bildet i Figur 5-2 er enkelte deler av kurven slettet, for å etterligne hvordan signalet ville ha sett ut hvis det var logget med cRIOen. En har da mistet informasjon om visse deler av grafen, mens alle de andre loggepunktene har riktig tidspunkt og verdi.

Figur 5-2: Testsignal plottet i forhold til tiden

I det nederste bildet i Figur 5-2 har programmet justert for pausene ved å ved å konstruere fiktive målepunkt. Dette er gjort ved å ta snittverdien til 20 loggeverdier før og 20 etter en loggepause. Den samme justeringen som er vist i eksemplet må også gjøres på rådataene fra målingen. Hvordan programmet virker, er forklart i vedlegg F.



**Figur 5-3: Frekvensanalyse av testsignal**

Problemet som dukker opp hvis man ikke justerer for pausene kommer av at frekvensanalyseprogrammene antar at det er et gitt tidsintervall mellom hvert målepunkt. Når dette ikke er tilfelle vil FFTen miste informasjon om tidsplanet, noe som vil føre til gale frekvenser. Dette er vist i Figur 5-3 der det opprinnelige testsignalet er frekvensanalysert i det øverste bildet. Frekvensanalysen til venstre viser et utslag på 5 og 100 Hz som samsvarer perfekt med det opprinnelige signalet.

Bildet i midten av Figur 5-3 viser sinuskurven og frekvensanalysen uten justering for tidspauser. Dette tilsvarer hvordan rådata kommer ut fra cRIOen, og på grunn av feil i tidsplanet har denne kurven en kortere periode enn den opprinnelige. I Figur 5-3 kan man se at kurven i løpet av 0,7s har kommet nesten en halv periode lengre enn det opprinnelige signalet. Denne feiljusteringen vises også i frekvensplanet med frekvenser på 6 og 97 Hz i stede for 5 og 100 Hz.

I det nederste bildet i Figur 5-3, har programmet justert for tidspausene. På den måten er problemene med forandring i periode rettet opp, og signalet har fått like frekvenser som det opprinnelige testsignalet.

Ulempen med denne metoden er at de verdiene som blir satt inn i loggepausene er konstruerte dataene, som ikke vil stemme eksakt med det virkelige trykkforløpet i perioden. Hvis de konstruerte målepunktene avviker mye fra de verdiene som skulle ha vært i samme periode, kan dette medføre små feil ved frekvensanalysen. Disse feilene vil være som støy på signalet, og vil i hovedsak medføre en reduksjon i amplituder på de riktige frekvensene. Siden hver loggepause er på omtrent 80ms betyr dette at alle frekvenser som er høyere enn  $f = 1/0,08 = 12,5$  Hz, vil få en liten reduksjon i amplitude.

For de høye frekvensene som bladpasseringsfrekvensen og løpeskivfrekvensen anbefales det i tillegg å bruke en annen metode for å finne riktigere størrelser på amplituden. En kan dele opp måleseriene i perioder uten loggepauser. Disse kan man så frekvensanalysere hver for seg før man regner ut et snitt over alle periodene. Loggepausene kommer ca hvert sekund, slik at denne metoden kun kan brukes for trykkpulsasjoner med høye frekvenser. Uansett hvilken metode en velger å bruke, vil det være nødvendig å ta hensyn til loggepausene i måleserien hvis man skal bruke frekvensanalyse.

## **5.6 Batteripakke**

Under testing av programvaren kom det også fram at den ene batteripakken var ustabil. Dette kunne medføre at loggeserien kunne stoppe før alle loggepunktene var gjennomført. På grunn av dette er det viktig at batteripakke 2 brukes under måling og ikke pakke 1.

## **5.7 Trigger**

Under måling startes både programvaren på cRIOen og på PCen ved å utløse triggeren. Programvaren er laget slik at den vil logge en viss tid etter triggertidspunktet. Hvis det mot formodning skulle oppstå forsinkelser på testdagen er det viktig å forskyve kjøreplanen slik at loggepunktene stemmer overens med de faktiske driftspunktene til turbinen. Dette betyr at hvis en trigger en time senere enn planlagt, må man også starte første måling en time senere. Hvis forsinkelsene skjer etter triggertidspunkt er det vanskelig å reversere prosessen, og den enkleste løsningen vil være droppe ett eller flere av loggepunktene.

## 6. Konklusjon og videre arbeid

I forbindelse med trykkpulsasjonsmålinger ved Tokke kraftverk har måleutstyret blitt klargjort og gjennomtestet. En CompactRIO datalogger har blitt programmert i LabView til å kunne gjennomføre målinger ved ulike driftspunkt. Dataloggeren vil befinne seg i en vanntett boks i løpehjulskonusen under måling, og vil ikke være tilgjengelig før hele måleserien er ferdig.

Alt utstyret fra sensorer til cRIOen har blitt testet og kalibrert og ser ut til å fungere optimalt. Det største problemet er at CompactRIOen har begrenset lagringsplass på FPGA-delen. Dette medfører korte perioder der data ikke blir logget. Løsningen har vært å konstruere kunstige målepunkter i de periodene FPGAen har brukt til å lagre dataene. Dette har vært nødvendig siden måledataene skal bli frekvensanalysert. De kunstige måledataene er konstruert ved hjelp av snittverdier til hver sensor. Ved å bruke denne metoden med å konstruere loggedata, vil man få riktige frekvenser ved frekvensanalyse, men det kan føre til en liten reduksjon i amplitude. Det vil også være mulig å dele opp resultatene mellom hver loggepause og frekvensanalyser dem hver for seg. Uansett hvilken metode en velger å bruke, vil det være nødvendig å ta hensyn til loggepausene i måleserien hvis man skal bruke frekvensanalyse.

I sammenheng med arbeidet til Kobro gjøres det også et doktorarbeid av Håkon Franke, som omhandler reduksjon av sugerørsvirvelen. Arbeidet går ut på å montere dyser til vanninjeksjon i sugerørskonusen. Ved å sende vannet i motsatt retning av sugerørsvirvelen kan man motvirke spinnnet og dermed redusere sugerørsvirvelfrekvensen.

Den planlagte trykkpulsasjonsmålingen vil bli gjennomført i uke 27. Resultatene fra målingen vil bli brukt i forbindelse med doktorgradsarbeidet til Einar Kobro. Dette doktorarbeidet har som hovedhensikt å finne en sammenheng mellom trykkpulsasjoner på prototyp og modellturbiner. Videre skal det gjøres tester på to modelløpehjul der det ene er en modell av det nye løpehjulet som skal installeres ved Tokke. Etter installasjon på Tokke, vil det også bli tatt målinger på dette hjulet, slik at en kan sammenligne med modellen.

## 7. Referanser

Antonsen Ø., Unsteady flow in wicket gate and runner with focus on static and dynamic loa don runner. (doktoravhandling NTNU, 2007)

Avellan F., Etter S., Gummer J.H., Seidel U., *Dynamic Pressure Measurements on a Model Turbine Runner and their Use in Preventing Runner Fatigue Failure*. Proceedings of the 20th IAHR Symposium, August 7-9, 2000, Charlotte, North Carolina, USA.

Efunda, 2007, [online],  
[http://www.efunda.com/designstandards/sensors/methods/wheatstone\\_bridge.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/methods/wheatstone_bridge.cfm)  
[sist besøkt 18-04-2008]

Haugan K., Trykkpulsasjoner i Francisturbiner (Masteroppgave Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet, vår 2007)

Farhat M., Natal S., Avellan F., Paquet F., Lowys P.Y., Couston M., *Onboard Measurements of Pressure and Stain Fluctuations in a Modell of Low Head Francis Turbine-Part I: Instrumentation*, Proceedings of the XXI IAHR Symposium of Hydraulic Machinery and Systems, September 9-12, 2002, Lausanne

Haugen J. O.: *Laboratoriet – typiske frekvenser i strømningsmaskiner*. Internt notat fra GE turbinlaboratoriet; 1994

Jansson I., Cervantes M.J., *A Method to Flush Mount Replaceable Pressure Sensors on a 9.3 MW Prototyp of a Kaplan Runne*, 2<sup>nd</sup> IAHR Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, October 24 - 26, 2007.

Kjeldsen M., Olsen K-M., Nielsen T., Dahlhaug O.G., *Water injection for the minigation of draft-tube pressure pulsations*. IAHR Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems; Barcelona, June 2006.

Kobro E., Trykkpulsasjoner i Francisturbiner (Masteroppgave Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet, vår 2006)

National Instruments, 2007, [online] [www.ni.com](http://www.ni.com) [sist besøkt 18-04-2008]  
Brukermanual 9237 <http://www.ni.com/pdf/manuals/374186b.pdf> [18-04-2008]  
Brukermanual cRIO-9012 <http://www.ni.com/pdf/manuals/374126c.pdf> [18-04-2008]

Nielsen T., *Dynamisk dimensjonering av vannkraftverk*. Kompendium; NTNU Vannkraftlaboratoriet, 1990.

Oftebro I., Lønning A., *Pressure oscillations in Francis turbines*. Proc Instn Mech Engers 1966-1967, Vol 181 Pt 3a; 1967



Rheingangs W. J., *Power Swings in Hydroelectric Power Plants*. Transactions of the A.S.M.E vol 62;Milwaukee; April 1940

Roxtec, 2007,[online] [www.roxtec.no](http://www.roxtec.no) [sist besøkt 18-04-2008]  
Thorvaldsen O., Trykkpulsasjoner i Francisturbiner(Prosjektoppgave Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet, høst 2007)

Wang Z. og Zhou L.,Simulation and Measurements of Pressure Oscillations CAused by Vortex Ropes, *Journal of fluids Engineering*, Vol.128 s649-655, 2006

## **8. VEDLEGG**

<b>VEDLEGG A- DATA FOR TRYKKSENSORER .....</b>	<b>1</b>
<b>VEDLEGG B- KALIBRERING .....</b>	<b>2</b>
<b>VEDLEGG C - KJØREPLAN .....</b>	<b>3</b>
<b>VEDLEGG D- REKKEFØLGE MONTERING OG TEST .....</b>	<b>5</b>
<b>VEDLEGG E- PAKKELISTE .....</b>	<b>6</b>
<b>VEDLEGG F- "COMPACTRIO FOR DUMMIES" .....</b>	<b>7</b>

# Vedlegg A- Data for trykksensorer

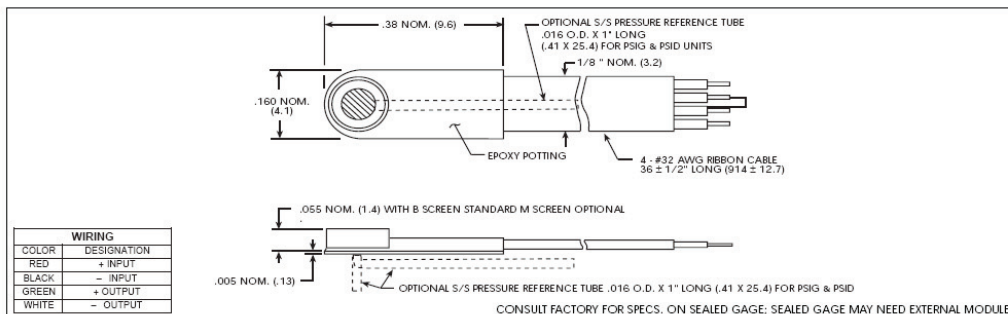
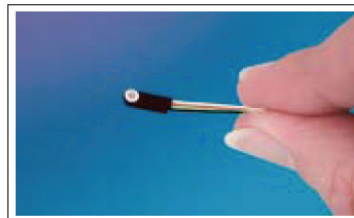
Kilde: <http://www.elsensors.com/LQLL-080.pdf>



**THIN LINE IS®  
PRESSURE TRANSDUCER**

**LQ-080 SERIES LE-080 SERIES  
LL-080 SERIES LLHT-080 SERIES**

- High Natural Frequency
- Excellent Stability
- Flight Qualified
- Patented Leadless Technology (LL/LLHT Series)
- High Temperature Capabilities  
-65°F To +450°F (LE/LLHT Series)



	LQ/LE		LL/LLHT/LQ/LE			
	0.7 10	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 BAR 500 PSI
<b>INPUT</b>						
Pressure Range						
Operational Mode	Absolute, Gage, Sealed Gage, Differential					
Over Pressure	2 Times Rated Pressure With No Change In Calibration					
Burst Pressure	3 Times Rated Pressure					
Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (LQ/LE) All Media Compatible With SiO <sub>2</sub> and 15-5 PH SS (LL/LLHT)					
Rated Electrical Excitation	5 VDC/AC					
Maximum Electrical Excitation	7.5 VDC/AC					
Input Impedance	1000 Ohms (Min.)					
<b>OUTPUT</b>						
Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)					
Full Scale Output (FSO)	100 mV (Nom.)					
Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)					
Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	0.1% FS BFSL (Typ.)					
Resolution	Infinite					
Natural Frequency (KHz) (Typ.)	300	400	500	600	750	1000
Acceleration Sensitivity % FS/g	7.0x10 <sup>-4</sup>	3.0x10 <sup>-4</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	1.0x10 <sup>-4</sup>	5.0x10 <sup>-5</sup>	3.0x10 <sup>-5</sup>
Perpendicular	1.4x10 <sup>-4</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	3.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-5</sup>	6.0x10 <sup>-6</sup>
Transverse						
Insulation Resistance	100 Megohm Min. at 50 VDC					
<b>ENVIRONMENTAL</b>						
Operating Temperature Range	LQ/LL SERIES -65° F to 250° F (-55° C to 120° C) LE/LLHT SERIES -65° F to 450° F (-55° C to 235° C)					
Compensated Temperature Range	LQ/LL SERIES 80° F to 180° F (25° C to 80° C) Any 100° F Range Within The Operating Range on Request LE/LLHT SERIES 80° F to 450° F (25° C to 235° C)					
Thermal Zero Shift	± 1% FS/100° F (Typ.)					
Thermal Sensitivity Shift	± 1% FS/100° F (Typ.)					
Steady Acceleration	30,000g. (Max.)					
Linear Vibration	10-2,000 Hz Sine, 100g. Max.					
<b>PHYSICAL</b>						
Electrical Connection	4 Conductor 32 AWG Ribbon Cable 36" Long (36 AWG Leads for LE/LLHT)					
Weight	.2 Gram (Nom.) Excluding Module and Leads					
Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon (Patented Leadless Technology - LL/LLHT)					

Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available.  
Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice - all dimensions nominal. (B)  
KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. • One Willow Tree Road • Leonia, New Jersey 07605 • Tel: 201 461-0900 • Fax: 201 461-0990 • <http://www.kulite.com>

## Vedlegg B- Kalibrering

Tabell i: Kalibrering av sensorer

Sensor	Nummer	a	b	RSQ	Benevning for Y
LL-080	138	1,02240E-06	6,18073E-02	0,999992	Bar
LL-080	140	1,02181E-06	1,75298E-02	0,999999	Bar
LL-080	141	1,02025E-06	-9,32837E-02	0,999997	Bar
LL-080	ny	5,08978E-06	4,14815E-01	0,999998	Bar
LL-080	137	1,02256E-06	6,72701E-03	0,999997	Bar
LL-080	146	1,02334E-06	-8,45934E-02	0,999988	Bar
PTX		1,27E+02	-2,55047E+02	0,999998	kiloPascal
Snorangiver		2,50E-01	-4,99E-01	0,999997	Meter

Tabell i viser kalibrering for de ulike sensorene. Sensorene er lineære og følger ligningen  $Y = a \cdot X + b$ . Benevning for Y er vist i kolonne til høyre.

## Vedlegg C - Kjøreplan

*Kjøreplan Tokke Aggregat 3, uke 27-2008*

Kjøreplanen forutsetter at alle forberedelser til måling er ferdig på morgenen den aktuelle kjøredagen. Det er imidlertid vanskelig å anslå hvor lang tid forberedelsene vil ta, så dagen for kjøring er noe usikker.

Kvelden før måling:

Sensorer ferdig limt, og lim herdet med varme

Loggeenhet med pc montert og klar til oppstart

Bærbar pc rigget opp med måling av sugerørstrykk og ledeapparatposisjon

<u>Tid</u>	<u>Aktivitet</u>
Kl 0800	Oppstart av loggepc. Rydding av sugerørskonus
Kl 0830	Stenging av mannhull i sugerør.
Kl 0845	Fylling av turbinen påbegynnes
Kl 1015	Turbinen ferdig fylt
Kl 1100	Oppstart av turbin, innfasing
Kl 1115	20% last målepunkt
Kl 1120	Lastendring, 20% til 30%
Kl 1135	30% last målepunkt
Kl 1140	Lastendring, 30% til 40%
Kl 1155	40% last målepunkt
Kl 1200	Lastendring, 40% til 50%
Kl 1215	50% last målepunkt
Kl 1220	Lastendring, 50% til 60%
Kl 1235	60% last målepunkt
Kl 1240	Lastendring, 60% til 70%

Kl 1255	70% last målepunkt
Kl 1300	Lastendring, 70% til 80%
Kl 1315	80% last målepunkt
Kl 1320	Lastendring, 80% til 90%
Kl 1335	90% last målepunkt
Kl 1340	Lastendring, 90% til 100%
Kl 1355	100% last målepunkt
Kl 1400	Lastendring, 100% til 110%
Kl 1415	110% last målepunkt
Kl 1420	Lastendring, 110% til 120%
Kl 1435	120% last målepunkt
Kl 1440	Lastendring, 120% til 100%
Kl 1455	100% last målepunkt (referansepunkt)
Kl 1500	Lastendring, 100% til 120%
Kl 1515	120% last målepunkt (referansepunkt)
Kl 1520	Rolig nedlasting fra 120% til 20%
Kl 1540	20% last målepunkt (referansepunkt)
Kl 1545	Rolig opplasting fra 20% til 120%
Kl 1555	Stans av turbin
Kl 1600	Start tømning av sugerør Dagen avsluttes

## Vedlegg D- Rekkefølge montering og test

### Montasje

1. Demontering av sugerørskonus
2. Sjekke av vanntettboks passer i løpehulskonus og at alle festeanordningene fungerer. (Etterpå tas denne ned igjen)
3. Lime fast sensorer med superlim i riktig posisjon på skovlene
4. Lime fast ledninger til skovlene.
5. Tre krympestrømpe som skal brukes til silikonplugg over ledningene.
6. Lodde sammen ledninger som kommer fra sensorene med de som kommer fra cRIOen. Ledningene må også krympestrømpe.
7. Kjøre test av sensorene (PC er koblet til cRIO med ethernet kabel). Testing gjøres med programmet test og kalibrering.vi. Viss alle sensorene gir signal, betyr det at loddingene er greie.
8. Feste ledninger og sensorer med epoksy til skovlbladene(epoksyen må herdes med varme, helst over natta)
9. Lage REAL-TIME application på cRIOen.
10. Montere cRIO og batteri i vanntett boks(settes på stillas under løpehjul). Må pakkes godt inn, men samtidig må det være plass nok til ekstra ledning som vil bli stappet inn. Sensorledninger, trigger og batteriledning stikker ut av hullet.
11. Feste vanntett boks til løpehjulskonusen
12. Lage silikonplugg på ledningene der disse skal gå gjennom roxtecen.(skal herde ganske lenge)
13. Montering av snorsensor til ledeapparatene.
14. Ordne for montering til PTX

### Testdagen

1. Koble til batteri for å sette på strøm til cRIO.
2. Sette i gang trigger, fjerne triggerledning som går til koblingsboks
3. Montering av Roxtec
4. Montering av beskyttelsesslange
5. Pumpe opp overtrykk i vanntett boks(kontrolleres med PTX)
6. Pakke utstyr ut fra sugerørskonus og montere sugerørskonus
7. Montere PTX til sugerør(test av PTX)
8. Koble PTX og snorangiver til koblingsboks. (sørg for at det er strøm til alle nødvendige enheter)
9. Rydde sammen og forlate området
10. Fylling av turbin påbegynnes

## Vedlegg E- Pakkeliste

X= allerede pakket

Posisjonsangiver	
kabler	
PTX610	
Ekstra kabler	
USB terminalboks, 24 Volts kilde for PTX	
cRio	
ledninger, sensorer, trigger og ledning til trigger	
batterier og lader	
Araldit med pistol og blanderør	X
Lynlim Scotch	
Krympestrømper	
Vanntett beholder med isolasjon, gjengestenger og terser	X
Ekstra ¼" ventil + overgang, M5 skruer	X
Gjengetape	
Locktite gjengetetting, skruesikring, flenstetting (272, 542, 574)	
Sandpapir	X
Aceton	
Plasthansker	
Friskluftmaske	
Umbraco til Roxtec	X
Avisoleringstang	
Knipetang	
Varmluftspistol	
Lufttrykkskalibrator	
Rissenål (til påføring av Araldit)	
Ducktape	
Loddebolt	
Loddetinn	
Multimeter	
Silikon RTV 3145	
Tynne ledninger til sensorforlengelse	
M20 muttere	X
Skruer til vanntett boks	X
Ekstra rørdeler	X
Roxtec grease	X
Sprayflaske med såpevann	X
M36 stor-skralle	
M5 og M6 trinnløs skralle	
Sykkelpumpe med ekstra slanger (evt kalibrator)	X
Feltkassa	
Strips	
Støtdempende materiale til cRIOen	



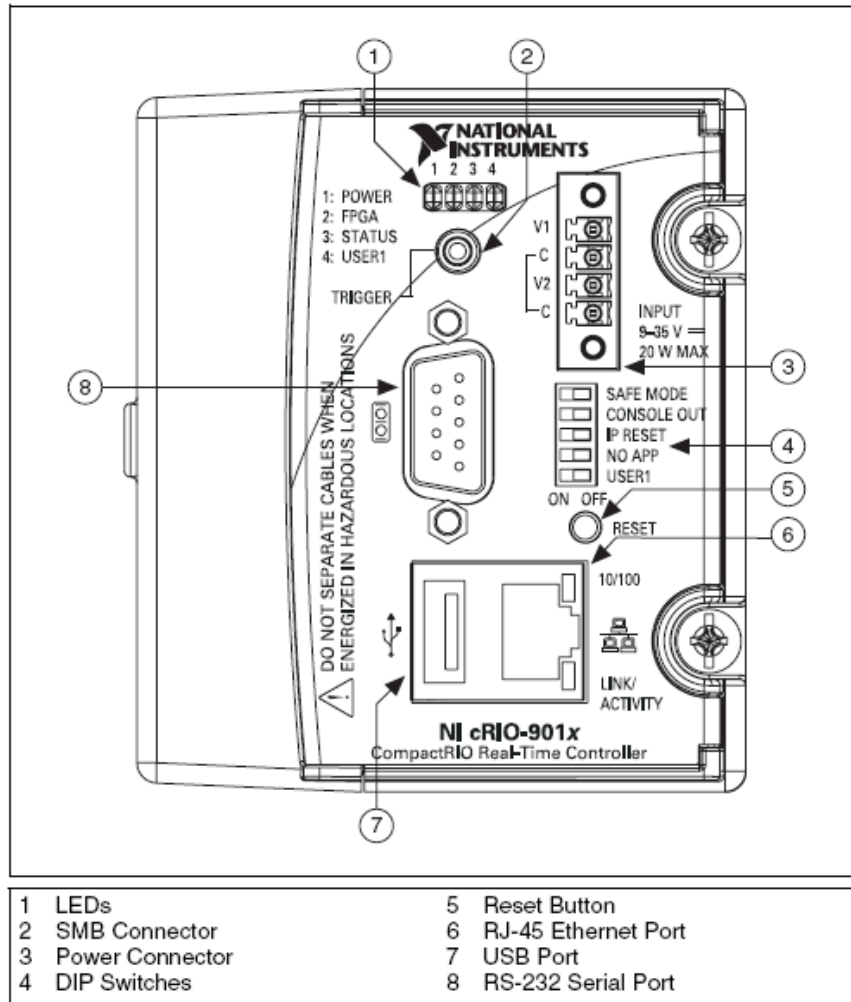
## **Vedlegg F- ”CompactRIO for dummies”**

CompactRIO for dummies er ment som et innføringsnotat i real-time programmering på CompactRIO. I tillegg er det en bruksanvisning for å forstå den programvaren som er laget i forbindelse med målinger på Tokke kraftverk. Dette vedlegget ble ansett som nødvendig siden det er usikkert om undertegnede blir med på målingene. Alle programmene som omtales i CompactRIO for dummies finnes på elektronisk vedlegg.



# ”CompactRIO for Dummies”

AV: Jo Magnus Solberg



Dette notatet er skrevet som et hjelpemiddel til real-time programmering i LabVIEW med CompactRIO. Det er også en brukerveiledning til den programvaren som ble laget for å gjøre målinger med CompactRIO på kraftverk i Tokke. For og forstå dette notat bedre anbefales det og lese:

## OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS

### CompactRIO cRIO-9012/9014

Intelligent Real-Time Embedded Controller for CompactRIO

Kan lastes ned på: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374126c.pdf> (sist nedlastet 14.mai 2008)

# Innholdsfortegnelse

<b>1. NØDVENDIG SOFTWARE .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OPPRETTE FORBINDELSE .....</b>	<b>2</b>
2.1    STARTE NYTT REALTIME PROSJEKT.....	3
2.2    LAGRING AV DATA .....	4
2.3    OPPRETTE ”STAND ALONE REAL-TIME APPLICATION” .....	4
<b>3. PROGRAMVARE FOR LOGGING AV DATA.....</b>	<b>6</b>
3.1    CRIO-PROSJEKT .....	6
3.1.1. <i>Host.vi</i> .....	6
3.1.2. <i>Fpga_sub.vi</i> .....	10
3.1.3. <i>Time_to_microsekunder</i> .....	10
3.1.4. <i>Trigger.vi</i> .....	10
3.1.5. <i>Fpga.vi</i> .....	11
3.1.6. <i>Test og kalibrering.vi</i> .....	11
3.2    TOKKE.....	13
3.2.1. <i>Tokke.vi</i> .....	13
3.2.2. <i>Daqmåling.vi</i> .....	14
<b>4. PROGRAMVARE FOR ETTERBEHANDLING AV DATA.....</b>	<b>15</b>
4.1    JUSTERING AV LOGGPAUSER .....	15
4.1.1.  ” <i>Tidsjustering.vi</i> ” .....	15
4.1.2.  ” <i>Justere pauser.vi</i> ” .....	15
4.2    FREKVENSANALYSE .....	16
4.2.1.  ” <i>Kalibrering og FFT.vi</i> ” .....	16
<b>5. BRUK AV PROGRAMVARE VED MÅLING PÅ TOKKE.....</b>	<b>18</b>

## Figurliste

FIGUR 2-1: OVERSIKT I MAX.....	2
FIGUR 2-2: ADD TARGETS AND DEVICES .....	3
FIGUR 2-3: REAL-TIME PROSJEKT .....	3
FIGUR 2-4: REAL-TIME BUILD .....	5
FIGUR 3-1: OVERSIKT OVER OPPBYGGING AV CRIOPROSJEKT .....	6
FIGUR 3-2:FRONTPANEL HOST.VI .....	7
FIGUR3-3: BLOKKDIAGRAM HOST.VI.....	8
FIGUR 3-4: BLOKKDIAGRAM FPGA_SUB.VI.....	8
FIGUR 3-5: BLOKKDIAGRAM TRIGGER.VI .....	10
FIGUR 3-6: BLOKKDIAGRAM FPGA.VI .....	11
FIGUR 3-7: FRONTPANEL TEST OG KALIBRERING.VI .....	12
FIGUR 3-8: FRONTPANEL TOKKE.VI.....	13
FIGUR 3-9: BLOKKDIAGRAM DAQMÅLING.VI .....	14
FIGUR 4-1: BLOKKDIAGRAM TIDSJUSTERING.VI .....	15
FIGUR 4-2: BLOKKDIAGRAM AV JUSTER PAUSEN.VI .....	16
FIGUR 4-3: FRONTPANEL KALIBRERING OG FFT.VI .....	17

# 1. Nødvendig software

Følgende software må være installert på maskinen før programmene virker:

LabVIEW 8.5

LabVIEW FPGA Module 8.5

NI- RIO 2.3 eller 2.4

LabVIEW Real-Time Module 8.5

Measurement and Automation Explorer 4.4

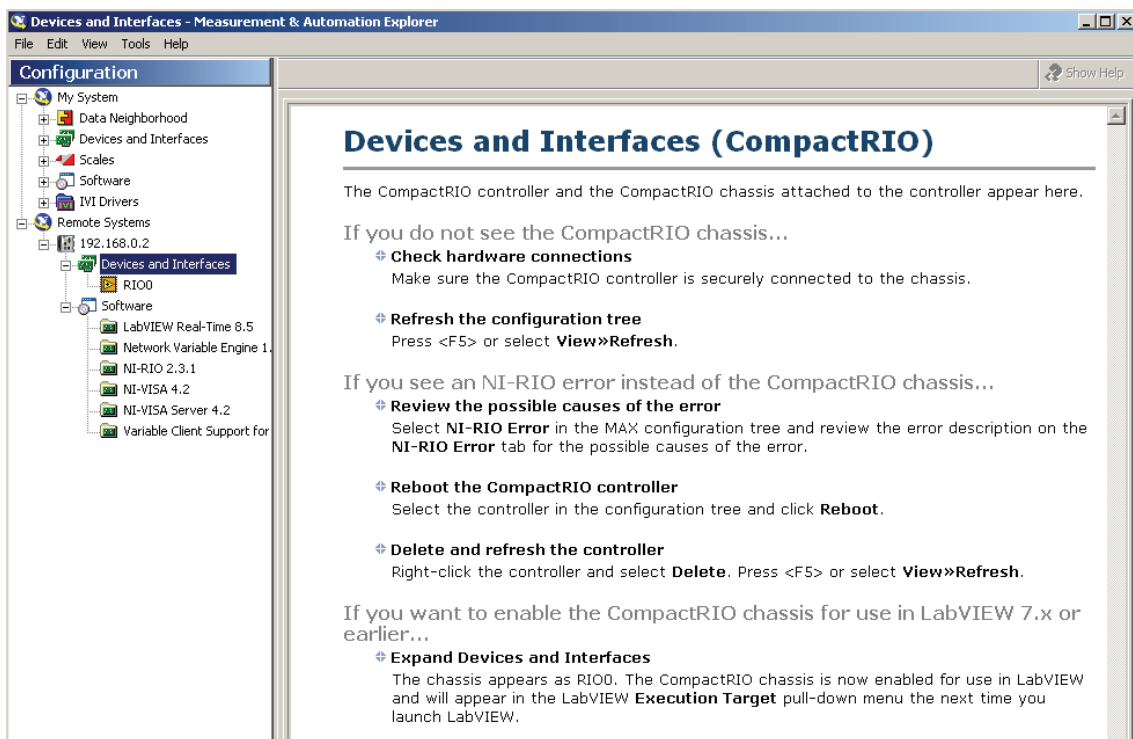
I tillegg er det en fordel med basiskunnskaper i LabView

## 2. Opprette forbindelse

Etter at all nødvendig software er installert på den respektive datamaskinen en skal bruke, kobler man en krysset Ethernet kabel mellom CompactRIOenheten og PCen for og opprette forbindelse. Deretter må man forandre internett innstillinger for å få kontakt med CompactRIOen. Dette gjøres på følgende måte:

Gå inn på **Network Connections>>Local Area Connection properties**, velg **Internet Protocol[TCP/IP]** og trykk **properties**. Det kommer opp en ny boks der en skriver inn en IP adresse for maskinen du bruker eks (192.168.0.1) og Subnet (255.255.255.0). Husk og slå av maskinens brannmur for å unngå at denne hindrer kontakt med RIOen.

Etter dette skal cRIO- modulen komme opp under **Remote Systems** i Measurement og Automation Explorer ( MAX). Der ligger det informasjon om apparatet og hvilken software som er installert. En kan også installere ny software hvis dette er ønskelig (se Figur 2-1)

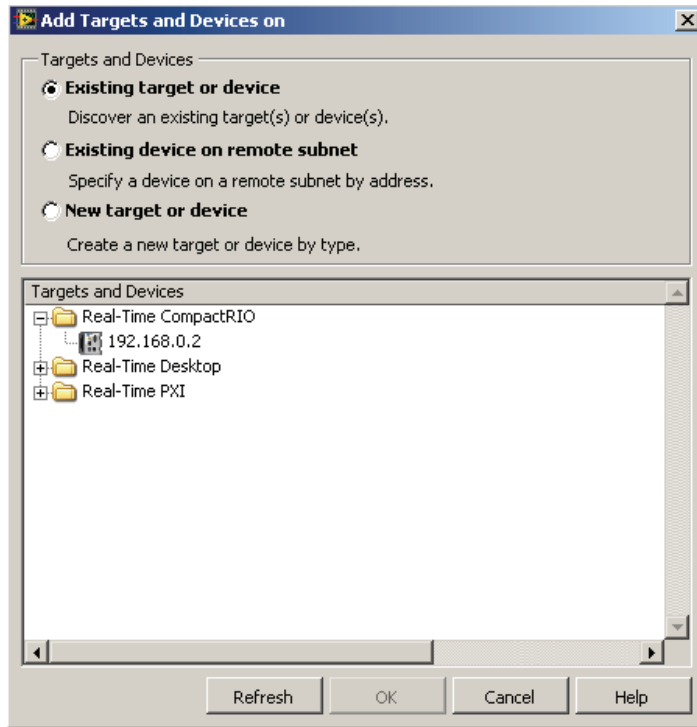


Figur 2-1: Oversikt i MAX

Første gang en starter en cRIOenhet, vil denne komme opp med IP adresse 0.0.0.0 og det vil da være nødvendig og tilegne enheten en IP adresse, noe som kan gjøres i MAX. Den cRIO enheten som er brukt vil komme opp med navnet 192.168.0.2 som også er IP adressen for enheten. Hvis det er ønskelig kan denne forandres ved å "boote" enheten i safe mode(se instruksjonsmanual), og tilegne enheten en ny IP adresse.

## 2.1 Starte nytt Realtime prosjekt

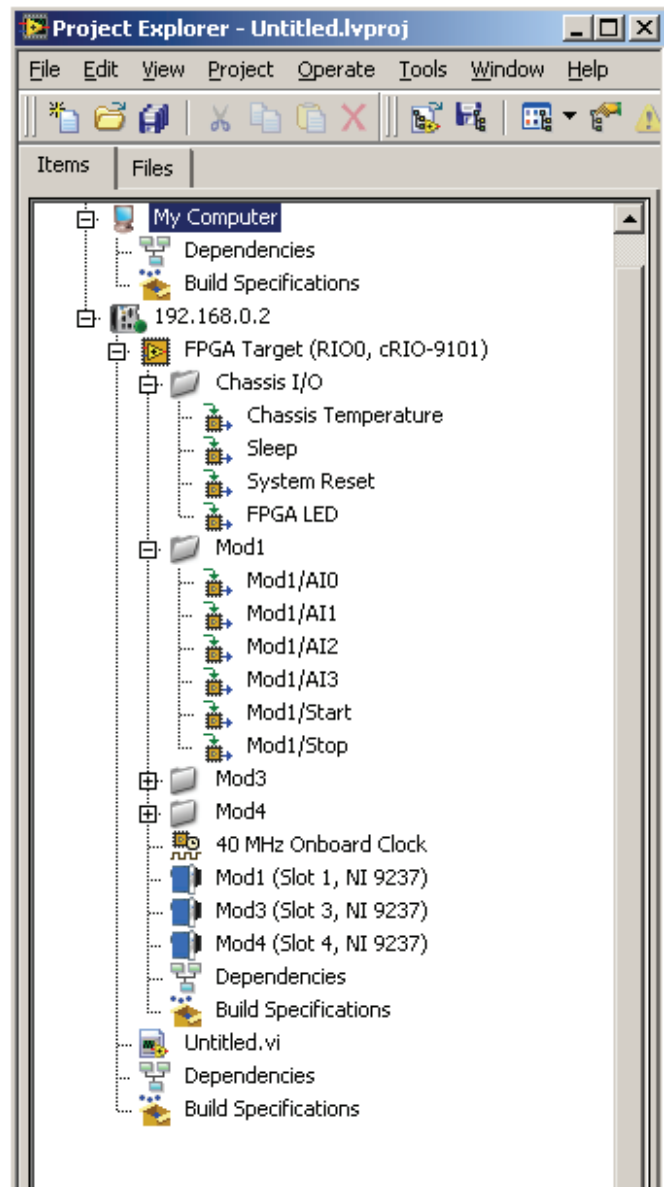
For å starte et nytt prosjekt i LabVIEW 8.5 velger man **New>>Real-Time Project**. I den påfølgende boksen velges **Custom prosjekt** under Project type og en skriver inn navn på prosjektet under **Prosjekt name**. Videre følges instruksjonen til en får spørsmål om å velge instrument. Trykk ”**Browse**” for og finne cRIO enheten og velger 192.168.0.2 (se Figur 2-2). Hvis en skal bruke programvaren som er laget på en annen RIOmaskin, eller gjøre større forandringer, anbefales det å starte et nytt prosjekt.



Figur 2-2: Add Targets and devices

Når en er ferdig med instruksjonen vil LabVIEW selv finne ut hvordan cRIO enheten er bygd opp, å hvilke moduler og kanaler som er tilstede. Når du trykker ”Finish” starter LabVIEW automatisk opp prosjektet og det kommer opp som i Figur 2-3.

Mod1, Mod2 o.s.v. beskriver i hvilket spor på chassiset de ulike NI 9237 modulene sitter. Mod1/AI0 tilsvarer den første 9237 sin første kanal.



Figur 2-3: Real-Time prosjekt

Hvis en skal bruke flere moduler samtidig med samme FPGA I/O node, slik at målingen blir gjort nøyaktig samtidig, må en høyreklikke på **Mod1(Slot1,NI9237)** under "FPGA Target", merk av for **Export Onboard Clock**. På de andre modulene velges Mod1 under **Master Timebase Source**.

## 2.2 Lagring av data

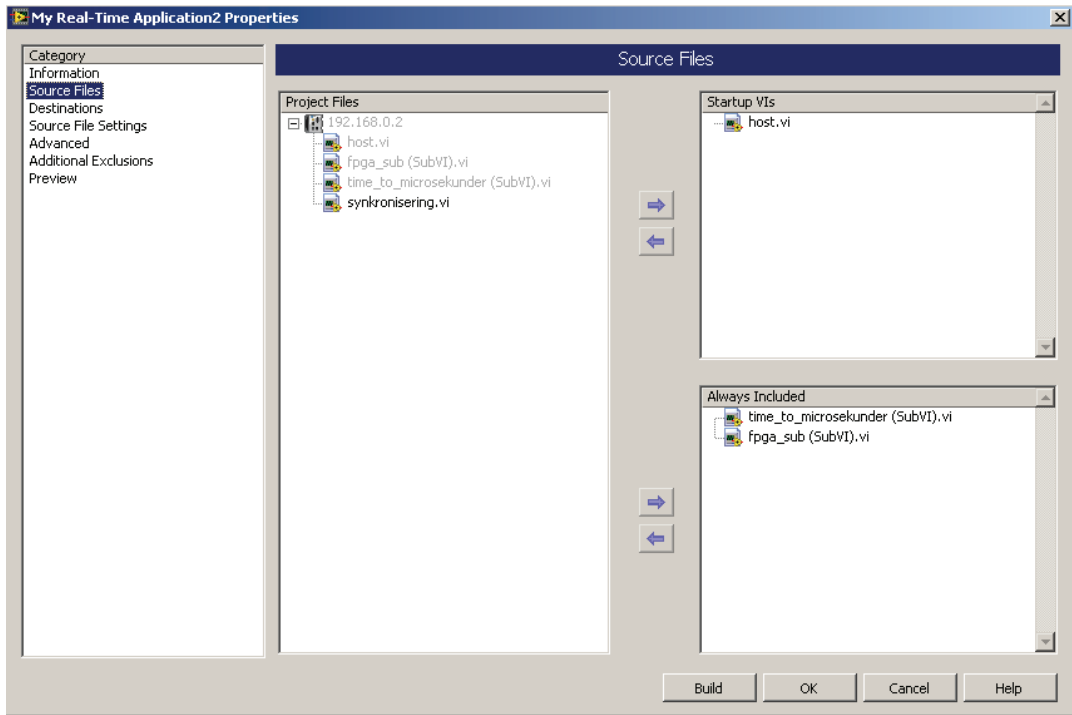
For og lagre data kan en lagre på minnet på cRIOen (lagrer på C:\ under kjøring) eller på minnepinne (U:\). For å få tilgang på lagrede data på det lokale minnet på cRIOen kan en skrive ftp:// og deretter IP-adressen til enheten.( <ftp://192.168.0.2/>) i et internettvindu.

## 2.3 Opprette "Stand alone Real-Time application"

Hvis en vil at cRIOen skal kunne kjøre alene, uten å være koblet til en ordinær PC, trengs det å opprettes en "Stand alone" prosedyre. Dette gjøres på følgende måte:

- I. Høyreklikk **Build Specification** under RT enheten. Denne finnes i "Project explorer" vinduet, velg **New>>Real-Time Application**. Da åpnes "My Real-Time Application Properties" boksen.
- II. (Valgfritt) Under kategorien "Information" kan en skrive inn navnet for mappa under **Build specification name** og et navn på "Stand alone" modulen under **Executable filename**. Hvis du ikke gjør dette punktet vil LabView bare bruke standard verdiene i stede.
- III. Under "Source files" velger en hvilke Labviewfiler som skal starte ved start av cRIOen og hvilke filer som skal være med (se figur). I cRIO-Prosjekt skal en velge host.vi som "Startup VIs" og fpga\_sub.vi og time\_to\_microsekunder.vi under "Always Included". Det er også mulig og fylle inn opplysninger i de andre kategoriene, men det er ikke nødvendig.
- IV. For å oppdatere spesifikasjonene som er lagt inn, trykk **Ok**. Da vil den nye Real-Time enheten komme opp under Build Specification.
- V. Lagre prosjektet(Ctrl- S)
- VI. For å sette Real-Time-programmet til å starte ved oppstart, høyreklikk Real-Time-enheten og velg **Set as startup**
- VII. Høyreklikk Real-Timeenheten og velg **Build** for og lage Stand Alone programmet.
- VIII. Høyreklikk Real-Timeenheten og trykk **Deploy** for å anvende programmet på RT-enheten. Neste gang enheten blir startet vil da filen som er satt som "Startup", starte automatisk etter oppstatsprosedyren til RIOen.



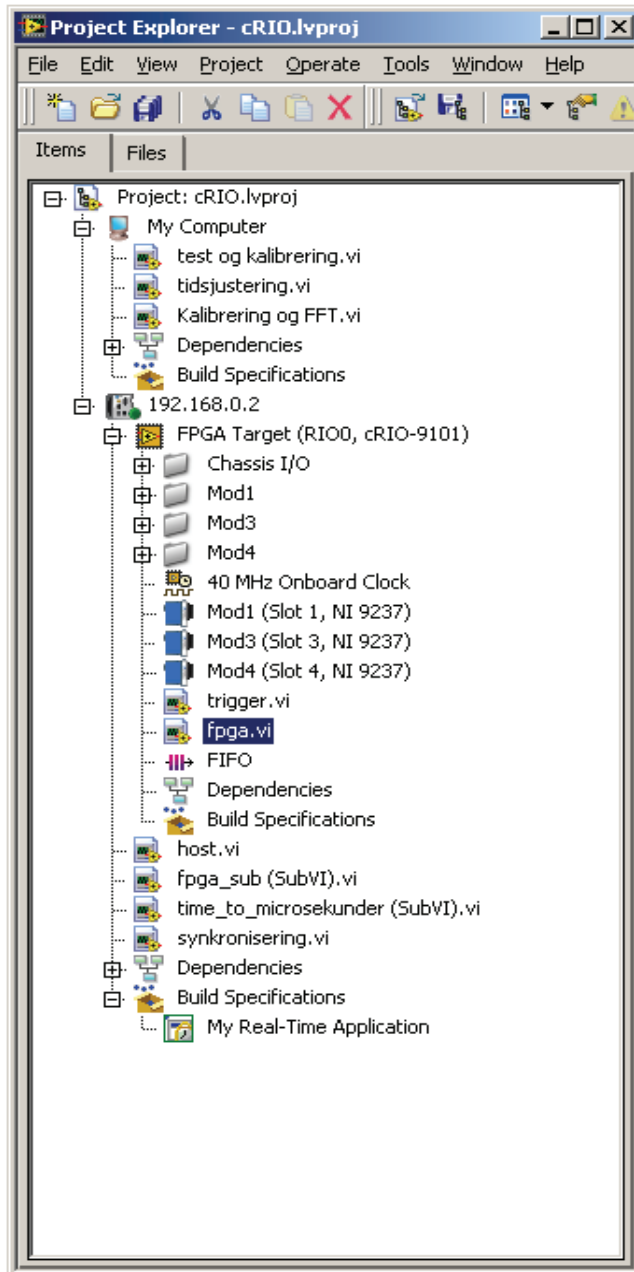


Figur 2-4: Real-Time build

## 3. Programvare for logging av data

### 3.1 CRIO-Prosjekt

Den programvaren som er laget for å kunne kjøre på CompactRIOen ved målinger ved Tokke er lagt i et prosjekt kalt cRIO. Dette er et real-time-prosjekt som inneholder ulike virtuelle instrumenter (VI), oversikt over hvordan prosjektet er bygd opp er vist i Figur 3-1



Figur 3-1: Oversikt over oppbygging av cRIOprosjekt

Programvaren som er laget er spesiallaget til måling på Tokke, men kan enkelt forandres slik at de kan brukes ved andre måleserier. Her er en kort beskrivelse av de ulike programmene som ligger i cRIO-Prosjektet og hva de gjør:

#### 3.1.1. Host.vi

Host.vi(vert) er hovedprogrammet på RIOen, og kaller de andre programmene etter tur. Alle de andre subrutinene mottar parametre som er skrevet inn i frontpanelet.

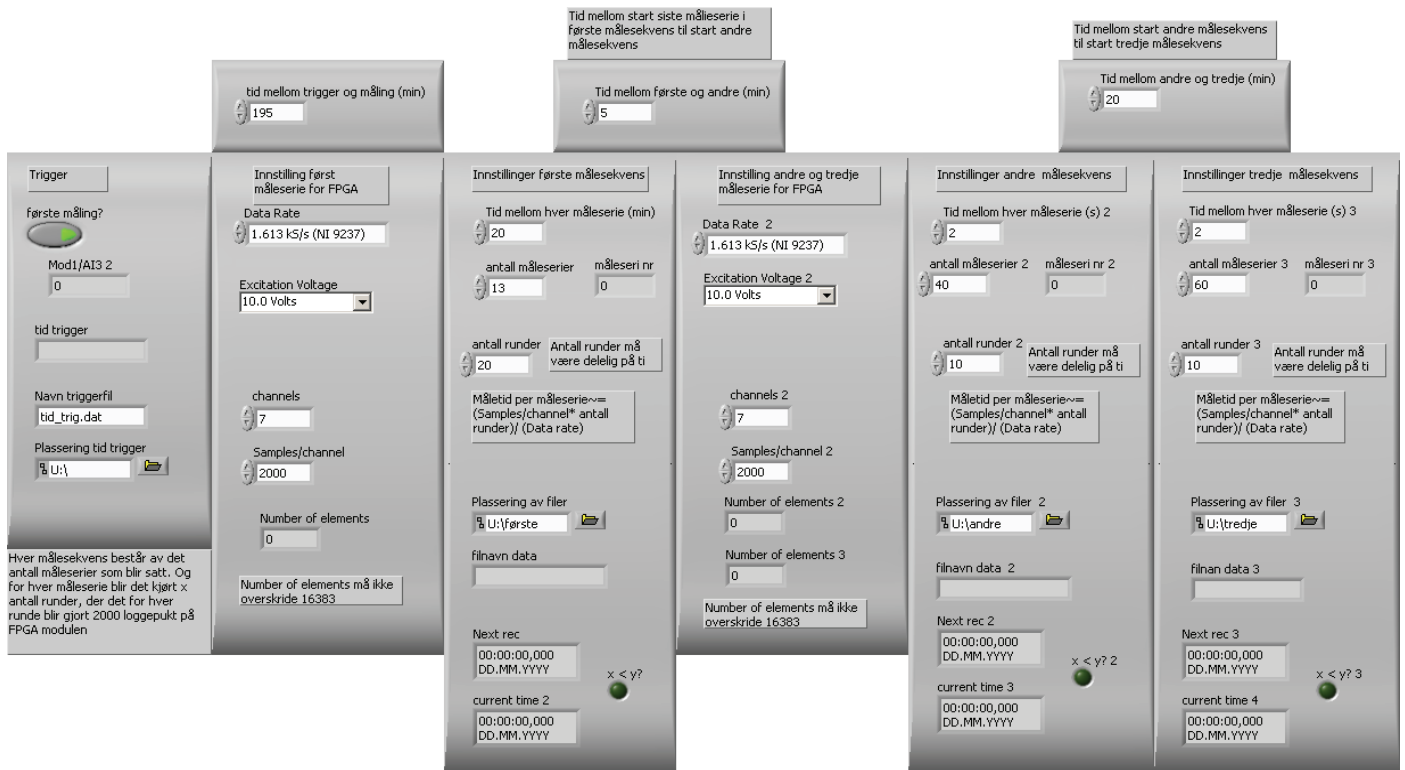
De standardverdiene som er lagt inn i frontpanelet (Figur 3-2)er beregnet på målinger ved Tokke og samsvarer med et gitt kjøremønster som skal brukes under måling.

Host.vi er delt opp i sekvenser, og starter til venstre og går kronologisk mot høyre både i blokkdiagrammet og frontpanelet. Den første sekvensen(se Figur3-3) starter trigger.vi som ligger under FPGA delen og venter på signal for at triggeren er utløst. Deretter lagrer den tidspunktet for utløsning av trigger til fil. Den andre sekvensen venter et gitt antall minutter fra trigger til første måling.

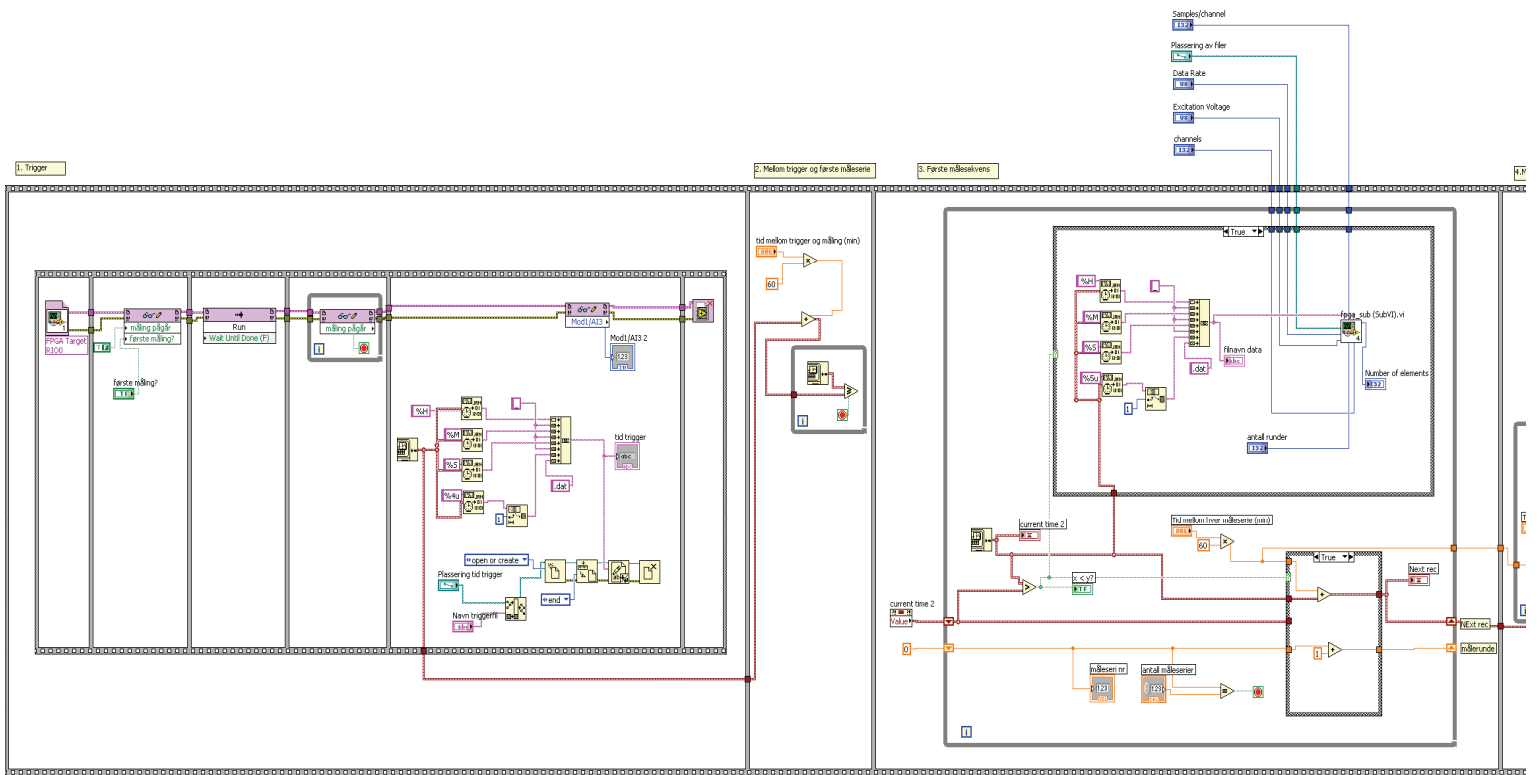
Sekvens tre er første målesekvens. Denne målesekvensen tar for seg alle de stasjonære målepunktene fra 20 % til 120 % last (se vedlegg C). Prosentverdien er beregnet ut fra at bestpunkt er 100 %. For hvert målepunkt kaller den opp fpga\_sub.vi, og med standardverdiene vil det logges i litt over 20s på hvert målepunktpunkt. Sekvens fire venter et gitt antall minutter fra loggetiden til det siste målepunktet til en vil starte neste målesekvens.

Sekvens fem er andre målesekvens. Denne målesekvensen tar for seg en rolig lastendring fra 120 % til 20 % last. Denne sekvensen varer i 10 minutter, og på grunn av begrenset lagerkapasitet i FPGA delen fungerer programmet slik at det logget i ca 12 sekunder, for så å lagre data i ca 5 sekunder uten at måldata blir logget.

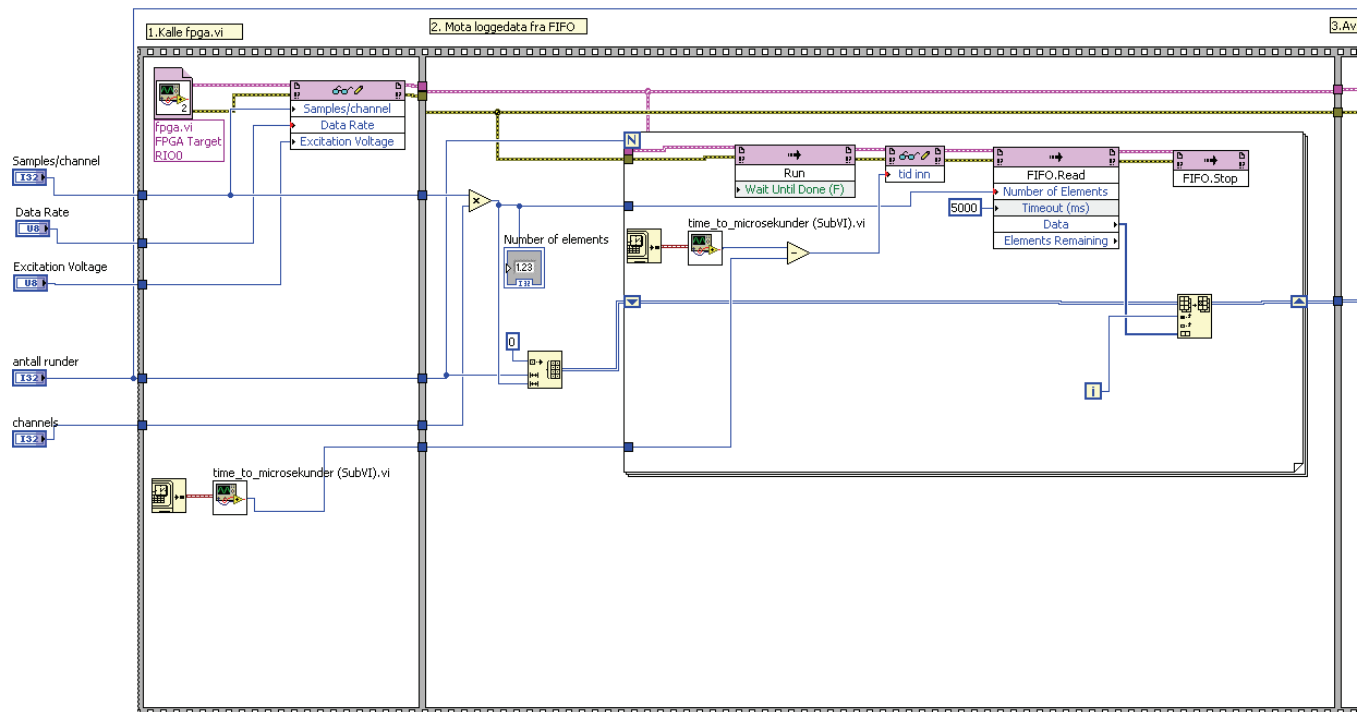
Sekvens seks er tid mellom andre og tredje målesekvens. Den syvende og siste sekvensen er tredje målesekvens. Denne serien logger rolig opplasting fra 20 til 120 % last. Tredje målesekvens er bygd opp nøyaktig lik andre målesekvens. Men for å fa en god referanseverdi til denne sekvensen starter logginga litt før og hele sekvensen varer litt lengre.



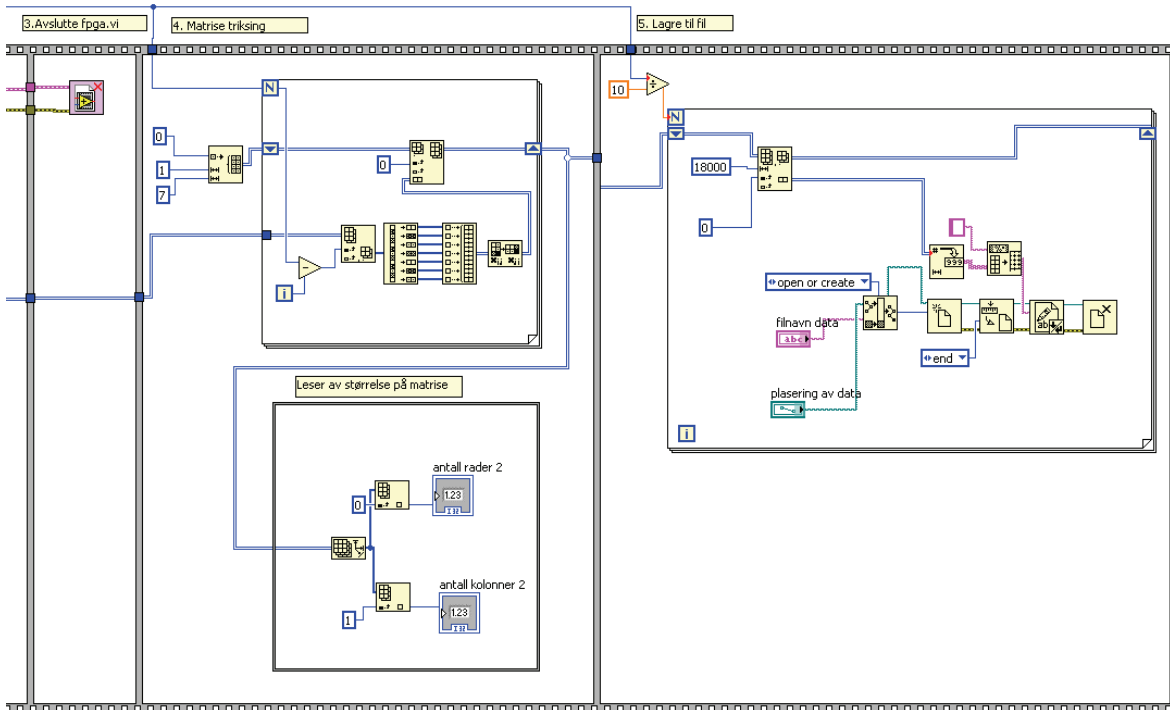
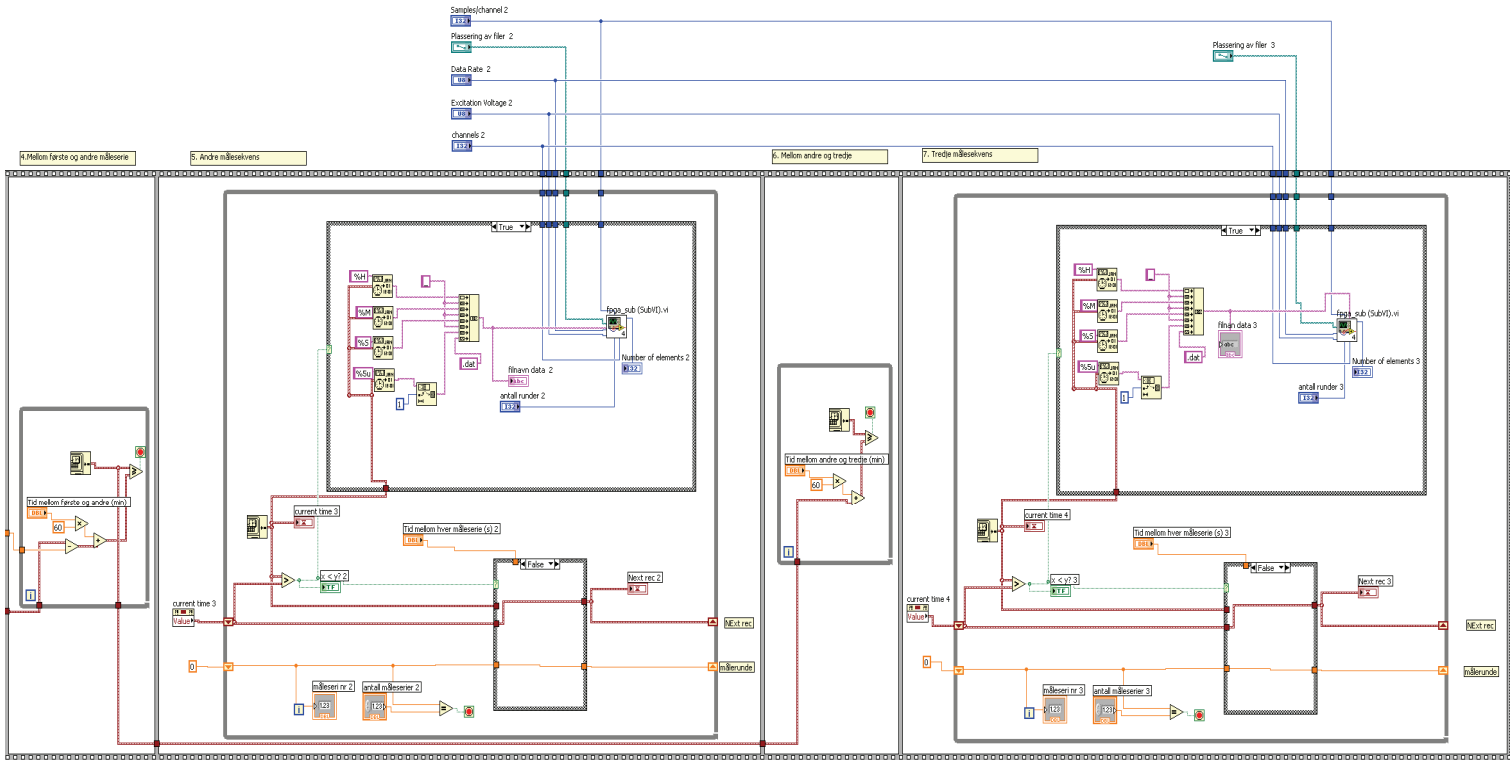
Figur 3-2: Frontpanel host.vi



Figur3-3: Blokkdiagram host.vi



Figur 3-4: Blokkdiagram fpga\_sub.vi



### 3.1.2. Fpga\_sub.vi

Fpga\_sub.vi (Figur 3-4) har som oppgave og kalle opp fpga.vi som ligger under FPGA delen. Dette programmet er også bygd opp i sekvenser og den første sekvensen åpner en referanse til fpga.vi og lagrer de variable som den skal bruke. Den andre sekvensen initialiserer en tom matrise før den kaller fpga.vi et gitt antall ganger. For hver gang forløkka kjører lagrer programmet loggedataene fra FIFOen til minnet (vist som shift register) og sletter data på FIFO. Denne prosessen tar 81ms, og det vil derfor bli en pause på 81 ms per 2000. målepunkt.

Sekvens 3 stopper referansen til fpga.vi, mens i sekvens fire blir det gjort litt matriseregning slik at det skal være lettere å lese av data. I tillegg leses det av antall rader og kolonner.

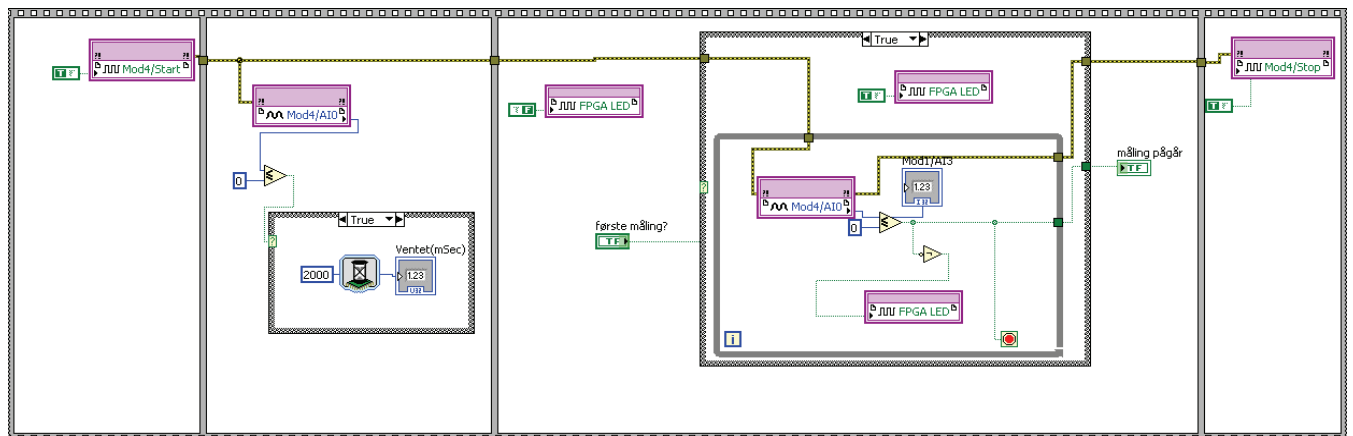
I sekvens fem blir loggedataene lagret til fil. Filnavnet til loggedataene er tidspunktet for når loggeserien startet, slik at det er lett å ha oversikt over de ulike loggepunktene i ettertid. For hvert loggepunkt blir den eksakte tiden også logget. Denne tiden tilsvarer mikrosekunder som har gått etter start for loggeserien. Ved å legge sammen disse tidene vil man ha den eksakte tiden for hvert loggepunkt, ned til mikrosekunder.

### 3.1.3. Time\_to\_microsekunder

Dette programmet tar inn en timestamp og gjør denne om til et tall i mikrosekunder. Dette tallet er et heltall og tilsvarer antall mikrosekunder som har gått siden 1.jan 1904. De andre programmene vil operere med heltallsvariable og for å få nok nøyaktighet brukes mikrosekunder.

### 3.1.4. Trigger.vi

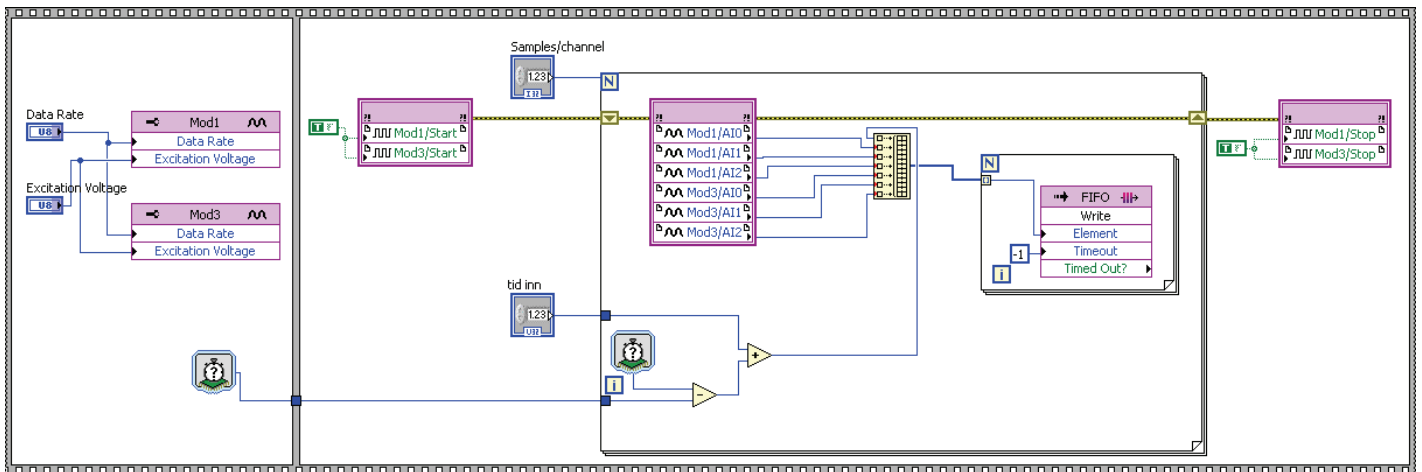
Trigger.vi ligger under FPGA delen og blir kalt opp av host.vi. Dette har som funksjon å sjekke om triggeren er utløst. Når programmet starter blir FPGA LED (lyspære på cRIOen) tent. Triggeren er koblet til Mod4\AI0 som leser av verdien kontinuerlig. Når triggeren blir utløst blir signalet negativt, og FPGA LED blir slukket slik at en kan se at målingene har startet.



Figur 3-5: Blokkdiagram trigger.vi

### 3.1.5. Fpga.vi

Fpga.vi ligger under FPGA delen og har som oppgave og hente loggedata fra NI 9237. I første sekvens blir loggefrekvensen og eksitasjonsspenningen til 9237 ene som står i Mod1 og Mod3 skrevet inn. I andre sekvens blir det for hvert loggepunkt avlest måleverdier for hver kanal, og tidspunktet for måleverdiene lagret til FIFOen. Når alle data er lagret til FIFO avsluttes programmet. FIFO i cRIO-prosjekt har bare plass til 16383 elementer og hvis dette overskrides vil programmet stoppe.

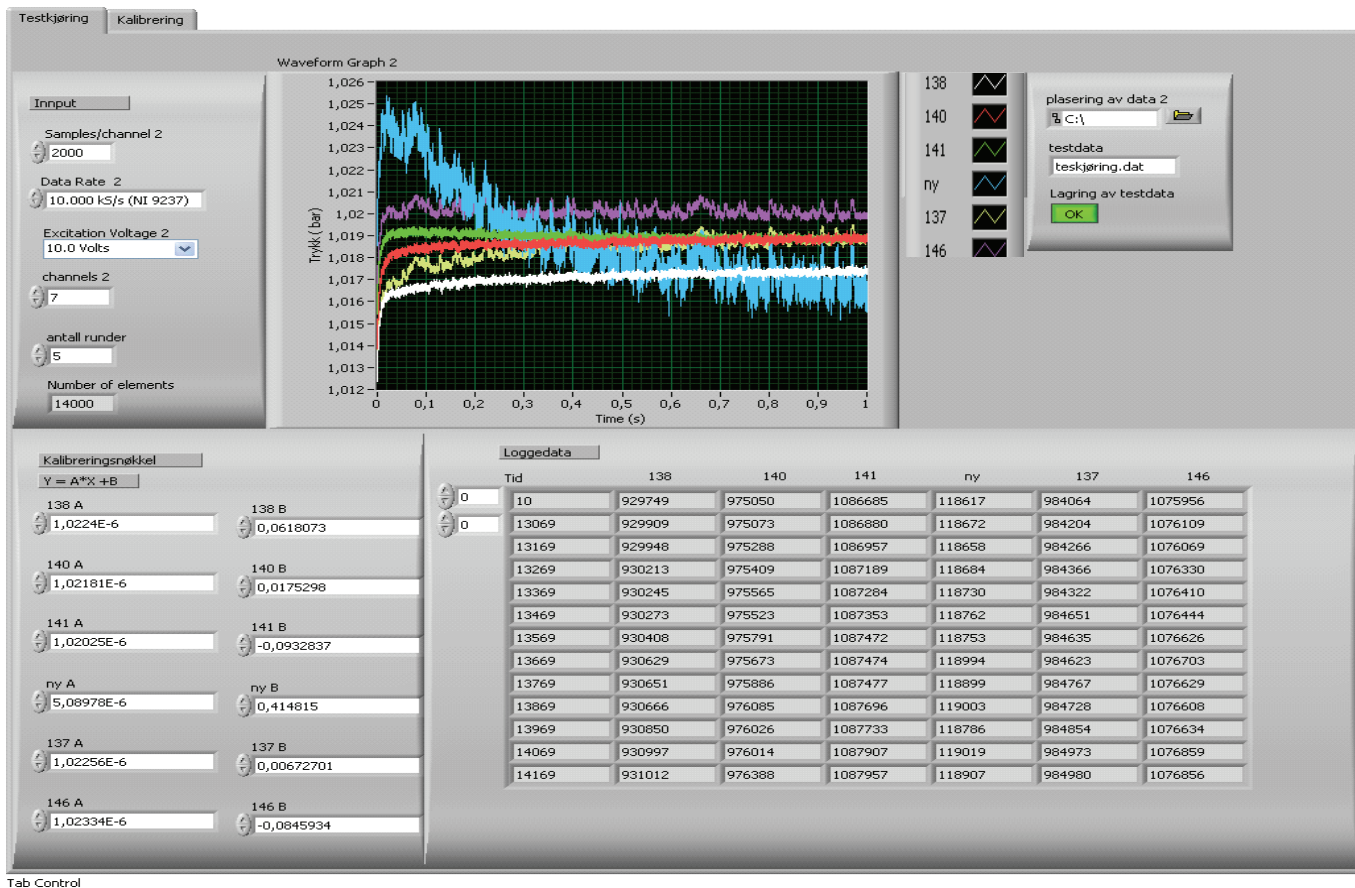


Figur 3-6: Blokkdiagram fpga.vi

### 3.1.6. Test og kalibrering.vi

Frontpanelet til dette programmet er delt opp i to mapper (Testkjøring og kalibrering). Testkjøringen er ment brukt etter sensorene er koblet til RIOen, men før RIOen skal monteres. Da har man en mulighet til raskt å sjekke om det er kontakt med alle sensorene og at de fungerer som de skal, før en gjennomfører testen.

Det er lagt inn kalibreringsdata for de ulike sensorene, slik at trykket for hver sensor blir vist i grafen (se Figur 3-7). En kan også lese av hvilke sensorer som er defekte i tabellen (stor variasjon i verdi betyr som regel dårlig kontakt i en lodding, låst verdi på et punkt betyr at det ikke er kontakt med noen av ledningene på den respektive sensor). Selve loggingen av data foregår på samme måte som under host.vi. Kalibreringsdelen av programmet er til bruk for kalibrering av sensorene. En skriver inn hvilken sensor som skal kalibreres og får ut snittverdien av alle punktene, samt en grafisk fremstilling av loggingen.



**Figur 3-7: Frontpanel test og kalibrering.vi**

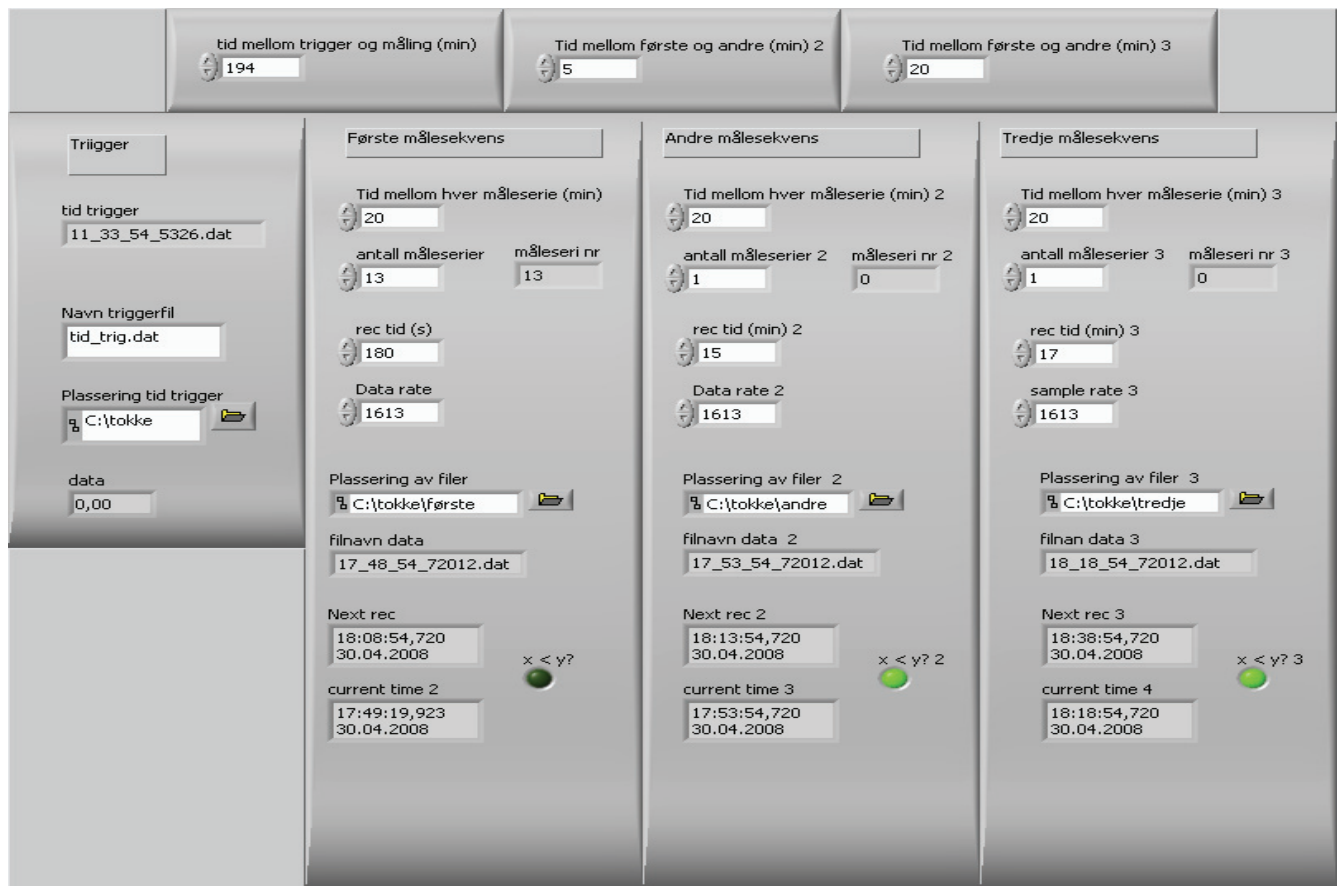
I Figur 3-7: Frontpanel test og kalibrering.vi ser man at sensor med navn "ny" har en mye større usikkerhet enn de andre sensorene og har derfor en større variasjon i loggepunktene. Det man også ser er at alle sensorene starter med lave verdier før de stabiliseres. Dette kommer av at det blir logget data fra sensorene før de har blitt varme. Under den virkelige måleserien vil ikke dette problemet oppstå, fordi sensoren vil ha en kontinuerlig eksitasjonsspennning på 3,3V mellom loggepunktene.



## 3.2 Tokke

### 3.2.1. Tokke.vi

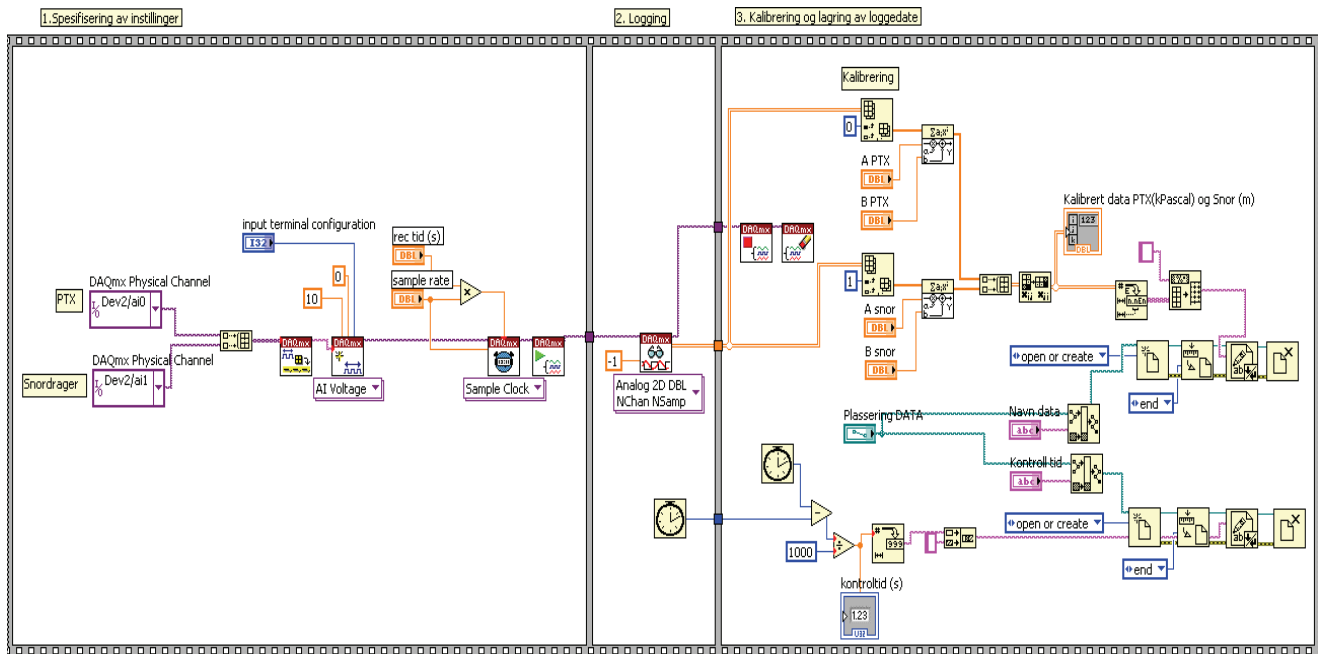
Tokke.vi er et vanlig LabVIEWprogram som kjøres simultant med cRIO-prosjektet. For hvert loggepunkt under måleserien, logger dette programmet verdier fra PTX sensoren som sitter i sugerørskonusen og posisjonsmåleren som overvåker ledeapparatåpningen. Programmet er bygd opp likt som host.vi, men kaller subrutinen daqmåling.vi i stede for fpga\_sub.vi. Tokke.vi starter sin logging 1 minutt før host.vi og har i tillegg lengre loggeperioder(se Figur 3-8). Dette er gjort for at en skal være sikker på at de ulike loggepunktene dekker det samme tidsintervallet.



Figur 3-8: Frontpanel tokke.vi

### 3.2.2. Daqmåling.vi

Daqmåling.vi er en subrutine som henter data fra sensorene, kalibrerer, og lagrer disse til fil. For å kontrollsjekke tidsinnstillingene på målingene blir den faktisk brukte tiden også lagret til fil. Oversikt over programmet er vist i Figur 3-9



Figur 3-9: Blokkdiagram Daqmåling.vi

## 4. Programvare for etterbehandling av data

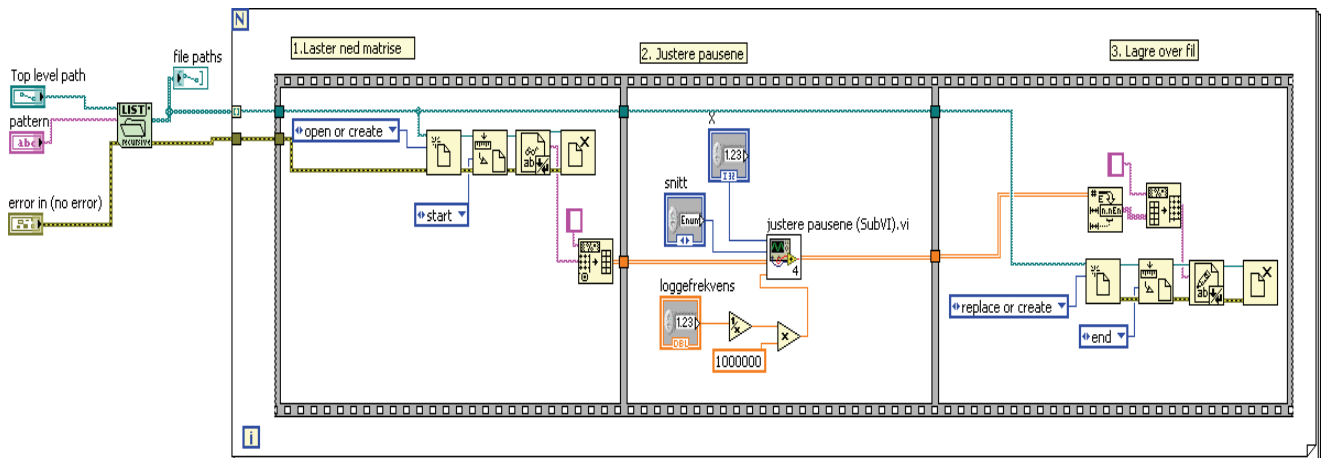
### 4.1 Justering av loggepauser

Etter endt måling skal det brukes frekvensanalyse for å finne de ulike frekvensene i måleserien. Som beskrevet tidligere, vil det i måledataene vil det være loggepauser ved jevne mellomrom. For å kunne bruke frekvensanalyse må det konstrueres kunstige målepunkter for loggepausene, og dette gjøres ved hjelp av programmet tidsjustering.

#### 4.1.1. ”Tidsjustering.vi”

I programmet ”tidsjustering.vi” skriver man inn plasseringen til en mappe og hvilke filtyper man vil justere. Programmet vil da åpne alle filer med ønsket filtype i mappen og i alle undermapper. Videre kaller programmet opp subrutinen ”juster pausene.vi” før de nye filene, med justerte pauser, blir lagret over de gamle. En oversikt over programmet vises i Figur 4-1.

I programmet kan man velge hvordan man vil at verdiene i loggepausene skal genereres. Ved å velge ”snitt X elementer før og etter”, vil verdien bli laget ved å ta X elementer før og X elementer etter en loggepause, og generere en snittverdi ut fra disse. X er et heltall man kan velge selv, men gjennom prøving har det vist seg at det lønner seg å velge et tall i størrelsesorden 10-20.

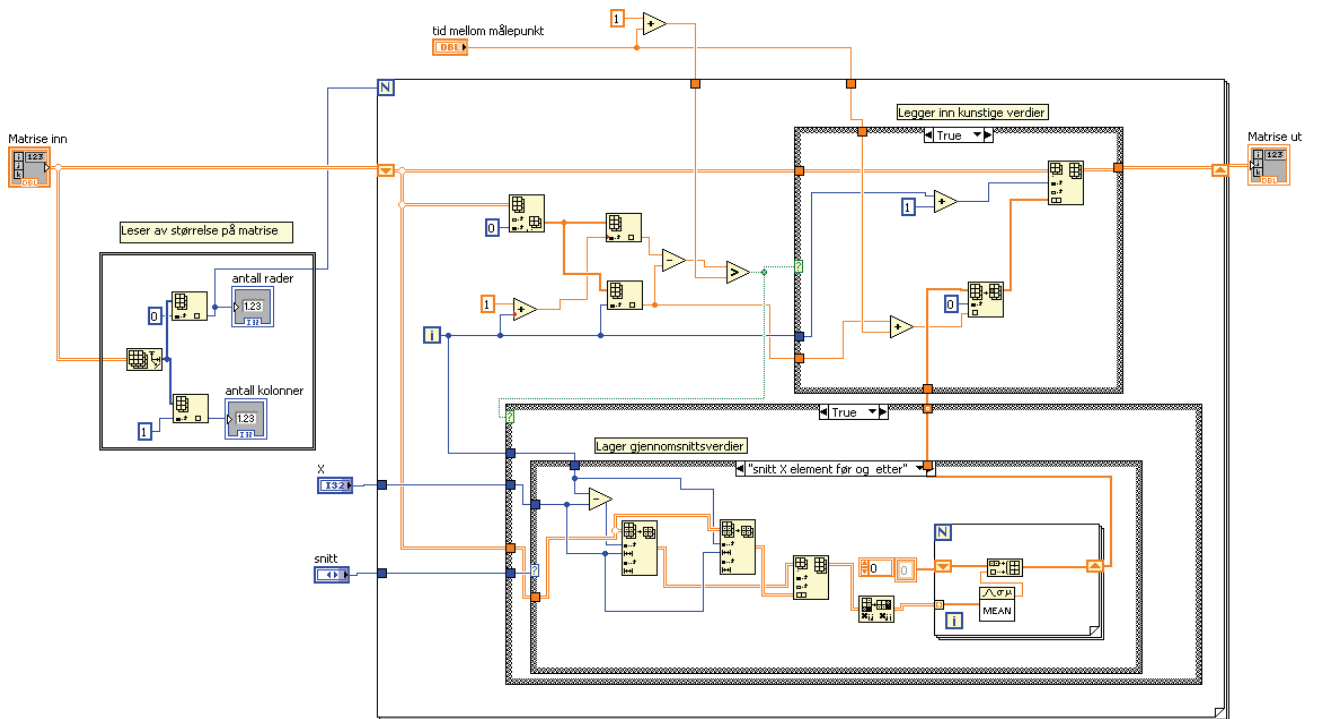


Figur 4-1: Blokkdiagram tidsjustering.vi

#### 4.1.2. ”Justere pauser.vi”

Programmet ”juster pauser.vi” får inn en matrise, og en beskjed om hvordan tidspausene skal justeres fra ”tidsjustering.vi”. Programmet går da gjennom hele matrisen og sammenligner tidspunktene, i første kolonne, til hvert loggepunkt. Hvis tidsperioden er for lang i forhold til loggefrekvensen vil det bli satt inn snittverdier for de ulike sensorene

i disse periodene. De nye loggepunktene som blir satt inn har samme frekvens som resten av loggeserien og en snittverdi for hver enkelt sensor.



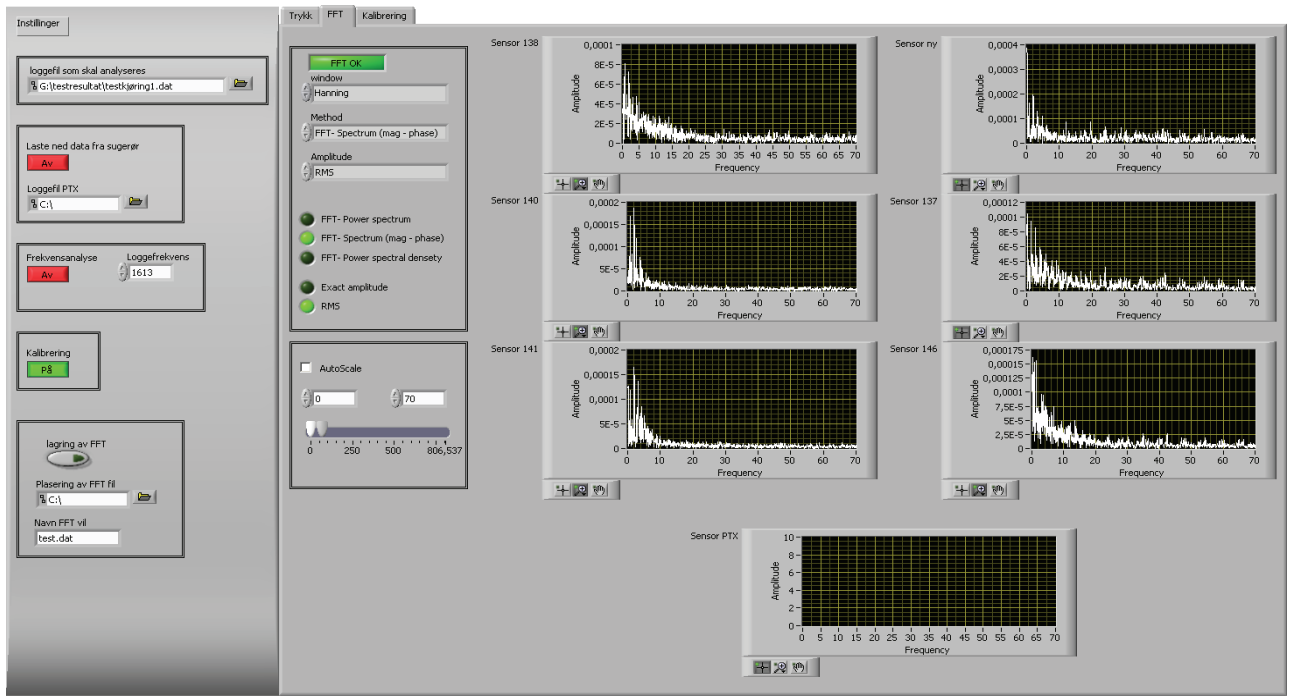
Figur 4-2: Blokkdiagram av juster pausen.vi

## 4.2 Frekvensanalyse

### 4.2.1. "Kalibrering og FFT.vi"

Programmet "kalibrering og FFT.vi" er et program som er ment som et analyseverktøy. Programmet henter først opp loggedata fra fil og kalibrere disse. Hvis man skal bruke frekvensanalysen er det viktig at programmet tidsjustering.vi er kjørt i forkant. Loggedata fra sugerørskonus for det samme tidsintervallet kan også lastes opp hvis det er ønskelig. Videre blir alle loggedata plottet i samme graf, slik at en kan se hvordan de ulike sensorene ligger i forhold til hverandre.

Frekvensanalysedelen av programmet er laget veldig generell slik at man har mulighet til og velge hvilken metode og hvilket vindu man ønsker og bruke i forhold til det som passer best til måledataene. En kan også lagre de frekvensanalyserte dataene hvis dette er ønskelig.



Figur 4-3: Frontpanel kalibrering og FFT.vi

## **5. Bruk av programvare ved måling på Tokke**

For målinger som skal gjøres på Tokke, er det ikke nødvendig og forandre på standardverdiene som er satt i frontpanelet på noen av programmene. Det programmet som kjøres først er kalibrering og test.vi. Dette programmet vil bli kjørt under montasje av målingsopplegget for å sjekke om det er kontakt med alle sensorene. Videre må det enten lages en "REAL-TIME application"(se kapittel 2.3 ), eller sørge for at denne er "deployed" på CompactRIOen før en skal gjennomføre testen.

Når all montasjen er ferdig, kobles PC sammen til triggeren for RIOen. Når man da setter strøm på RIOen vil programmet host.vi starte automatisk. Ved å starte programmet tokke.vi på PCen, vil dette vente på signal fra triggeren. Når man da utløser triggeren starter begge programmene på likt og gjennomfører målinger i løpehjulskanalen og i sugerørskonusen uavhengig av hverandre. Etter programmene er trigget vil begge gjøre målinger i samsvar med den kjøreplanen som er programmert.