



KARLSTADS UNIVERSITET

Fakulteten för teknik- och naturvetenskap

Vibrationsövervakning av Fortums maskinparker

Vibration Monitoring of Fortum's Hydroelectric Power Plants

Henrik STORM
Simon LUNDELL

Vibrationsövervakning av Fortums maskinparker

Vibration Monitoring of Fortum's Hydroelectric Power Plants

Henrik Storm
Simon Lundell

Examensarbete
Degree Project
Mekatronikingenjörsprogrammet

vt 2012

Handledare: Krister Ström, Fortum
Torbjörn Berg, Karlstads universitet

Detta examensarbete omfattar 22.5 hp och ingår i Mekatronikingenjörsprogrammet, 180 hp, vid Karlstads universitet. This 22.5 hp Degree Project is part of the 3 year, 180 hp, Mechatronic Engineering course at Karlstad University, Sweden vt 2012

Denna rapport är skriven som en del av det arbete som krävs för att erhålla Mekatronikingenjörsexamen/Teknologie kandidatexamen. Allt material i denna rapport som inte är mitt eget, har blivit tydligt identifierat och inget material är inkluderat som tidigare använts för erhållande av annan examen.

Henrik Storm

Simon Lundell

Rapporten godkänd,

datum Handledare: Krister Ström

Examinator: Peter Røjder

Abstract

Vibrationmeasurement is not a new phenomenon, however many businesses remains sceptical towards the somewhat abstract method. Same scepticism does not exist when you visit the doctor and he listens to the sounds off your body with a stetoscope, even though the similarities are striking. With todays technology it is possible to diagnose a machines different parts in search for damages by analysing the unique vibrationpatterns they provide.

This study aims to close this gap with the help off an introduction to the different terms and choices that exist in vibration analysis as a tool in preventive maintenance and finally to present guidelines for implementation where economy and availability is considered most pivotal for future decisions.

Sammanfattning

Vibrationsmätning är inget nytt fenomen men många företag anser sig ändå skeptiska till den abstrakta metoden. Samma skepticism finns inte vid ett läkarbesök där doktorn lyssnar efter ljud med sitt stetoskop, ändå är likheterna slående. Med dagens teknik är det möjligt att diagnostisera en maskins olika beståndsdelar efter skador genom att analysera det unika vibrationsmönster de bidrar med.

Detta arbete syftar att minska denna barriär med hjälp av en introduktion till de olika begrepp och val som finns inom vibrationsteknisk analys som hjälpmedel för underhåll och slutligen presentera en implementeringsmall där ekonomi och tillgänglighet anses vara mest vital inför framtida beslut.

Innehåll

Abstract	4
Sammanfattning	5
Nomenklatur	8
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Metod	10
1.3 Mål	10
2 Teori	11
2.1 Vibrationsanalys	11
2.1.1 Vad är vibrationer?	11
2.1.2 Potentiella fel	11
2.1.3 Vilka maskiner behöver övervakas?	12
2.1.4 Insamling av data	13
2.1.4.1 Hur datan mäts	13
2.1.4.2 Hur mycket data och hur snabbt man skall mäta	13
2.1.4.3 Hur data behandlas	14
2.1.4.4 Hur data presenteras	15
2.1.5 Vibrationsnormer	16
2.1.6 Mätutrustning	16
2.2 Tillståndsbaserat underhåll	19
2.2.1 P-F intervall	20
2.2.2 Förbättring av CBM tekniker	20
2.2.3 Implementering av CBM system	21
2.2.4 För- och nackdelar med ett CBM system	22
3 Analys	23
3.1 Befintligt mätsystem	23
3.2 Generatorer och turbiner	23
3.3 Vibrationsmätning av kraftverk	23
3.3.1 Typ av mätningar	23
3.3.1.1 Stator	24
3.3.1.2 Rotor	24
3.3.1.3 Lager	25
3.3.1.4 Växlar	25
3.3.1.5 Ledskenor	25
3.3.2 Typ av mätutrustning	26

3.3.3	Analys av mätdata	30
3.3.4	Lagring/presentation av data	31
3.3.5	Ansvarsdistribution	32
3.4	Installation av mätsystem	32
3.5	Ekonomi	33
4	Diskussion och slutsatser	35
4.1	Problematiken med källor	35
4.2	Ekonomisk trovärdighet	35
4.3	Avancerad teknik kräver stort fokus och engagemang	35
4.4	Bör Fortum satsa på vibrationsmätningar?	36
	Referenser	37
	Bilagor	39
A	Analys av Kymmens kraftverk	39
A.1	Inledning	39
A.2	Allmän information om kraftverket	40
A.3	Visuell inspektion	41
A.4	Förebyggande underhåll	41
A.5	Önskemål i dagsläget	42
B	Beräkningar	43
B.1	Tillgänglighet	43
B.2	Ekonomiberäkning	44
B.2.1	Reparationskostnader före och efter FU	45
C	Detekterbara vibrationsorsaker	47

Nomenklatur

1X	Varvtalsfrekvens
bpfi	Kulpassagefrekvens innerring, eng. <i>Ball Pass Frequency Inner</i> .
bpfo	Kulpassagefrekvens ytterring, eng. <i>Ball Pass Frequency Outer</i> .
bsf	Kulrotationsfrekvens eng. <i>Ball Spin Frequency</i> .
CBM	Tillståndsbaserat underhåll eng. <i>Condition Based Maintenance</i>
CCR	Operatorscentralen eng. <i>Central Control Room</i>
CMMS	Computerized maintenance management system
coast-down	diagnostiskt test i form av utrullningsprov för identifikation av egenfrekvenser.
DCS	Distributed control system
FFT	Fast Fourier Transform är en algoritm, en digital beräkningsrutin som används i FFT-analysatorn för att beräkna ett spektrum ur en vågform. Den omvandlar eller transformerar en signal från tidsrepresentation till frekvensrepresentation.
PdM	Förutbestämt underhåll eng. <i>Predictive Maintenance</i>

Detta kapitel presenterar syftet och metoden till varför detta arbete utförts och inleds med en bakgrund av Fortums företagssituation och underhållsstrategi.

1.1 Bakgrund

Fortum Generation AB är ett finskägt energiföretag med verksamhet i framförallt Finland, Sverige och Ryssland. Deras verksamhet är indelad i fyra delar som består av Power, Heat, Electricity solutions and distribution och Russia. Där

- Power har hand om kraftproduktion, planering och trading på marknaden för el samt även drift, underhåll och utveckling av kraftverken.
- Heat har ansvar för kraftvärmeproduktion, fjärrvärmeverksamhet och värmelösning för företag.
- Electricity solutions and distribution ansvarar för elförsäljning, distribution och ellösningar.
- Russia består av kraftvärmeproduktion samt försäljning i Ryssland.

Fortum är ett av de ledande energibolagen i Sverige med ca 2600 anställda utspridda över 60 orter från Skåne till Jämtland. De producerar, distribuerar och säljer både el, värme och kyla samt bedriver en serviceverksamhet med fokus på drift av kraftverk och energieffektiviserings-tjänster. De har fjärrvärmeverksamhet i 6 kommuner, 211 vattenkraftverk runt om i Sverige och delägare i de sex kärnkraftsreaktorerna i Oskarhamn samt Forsmark.

Under 2008 uppgicks Fortums produktion i Norden till 51,6TWh. Av detta kom 23,7TWh från kärnkraft, 22,7TWh från vattenkraft, och 5,2TWh från värmekraft.

Då så stor del av Fortums energiproduktion kommer från vattenkraft (44%) är det av största vikt att dessa anläggningar fungerar felfritt utan oförutsedda driftstopp eller energiförluster. Därför har Fortum ett antal olika varianter av underhållstyper där vibrationsmätning är en av dem.

Dessa vibrationsmätningar har man gjort på Fortums vattenkraftverk sedan mitten av 80-talet och då med hjälp av konsulter. Dessa konsulter har gjort schemalagda vibrationsmätningar på de olika vattenkraftverken med portabel vibrationsmätutrustning. Konsulterna har sedan lagrat och gjort analys av erhållen mätdata och rapporterat status på de aktuella maskinerna samt potentiella fel som kan existera.

1.2 Metod

Detta arbete är konstruerat efter en deduktiv ansatsmetod vilket innebär att slutsatser dragits efter teoretiska premisser. Datainsamling har bestått av litteratur, ostrukturerade ickestandardiserade intervjuer och teknisk dokumentation från vibrationsmätningsföretag.

1.3 Mål

- Undersöka Fortums bestånd av generatorer och turbiner och utifrån det utreda vilka typer av fel som kan identifieras innan ett haveri.
 - Analys av typer av generatorer, turbiner och om det eventuellt är fler maskiner som är intressanta
 - Analys av ovanstående fysik för identifikation av amplitudsvarningar
 - Vilka generella typer av fel kan påvisas med hjälp av vibrationsmätning
- Ta fram rekommendationer på vilken typ av mätutrustning som Fortum skall satsa på. Fabrikat, fast monterad, bärbar eller en kombination.
- Ta fram rekommendationer på mätintervall för olika typer av aggregat utifrån storlek.
- Kan mätningen göras av egen personal?
- Kan utvärderingen göras med egen personal?
- Hjälpmedel och lagring av mätdata.

Detta kapitel beskriver teorin bakom vibrationsanalys och en introduktion till tillståndsbaserat underhåll som ligger till grund för detta examensarbete.

2.1 Vibrationsanalys

För att kunna göra en bra vibrationsanalys och skörda fördelarna med detta måste man veta varför man mäter vibrationer över huvud taget. Genom att övervaka maskinens vibrationskaraktäristik får man en förståelse om dess hälsa och kondition vilket man kan använda för att upptäcka skador i tidigt skede och handla i god tid.

Om man regelbundet övervakar maskinens kondition kan man upptäcka problem som kan uppstå i framtiden och således korrigera dem före de inträffar vilket kan spara mycket tid, pengar och frustration. En maskin som vibrerar kraftigt har även sämre effektivitet vilket sin tur påverkar produktionen.

Motsatsen är att inte övervaka vibrationerna vilket ofta leder till att maskinen körs tills den havererar. Onödigt underhåll och byte av friska delar är även något som kan elimineras med hjälp av vibrationsbevakning där underhållet schemaläggs allt efter maskinens kondition.

2.1.1 Vad är vibrationer?

Maskinvibrationer är helt enkelt en reciprocerande rörelse hos en maskin eller komponent som generellt uppkommer på grund av en eller fler av följande orsaker:

- Upprepade kraftstötar
- Glapp
- Resonans

2.1.2 Potentiella fel

Många typer fel kan detekteras med hjälp av vibrationsövervakning och Bilaga C på sidan 47 visar en sammanfattning om vilka relevanta vibrationer som kan undersökas på ett kraftverk.

Även systemets egenfrekvenser kan identifieras med hjälp av vibrationsmätning via *coast-down*, påtvingad excitation via tillförd obalansmassa eller slagimpulsprov. Att köra turbinen i närheten av egenfrekvensen är extremt destruktivt då mycket stora vibrationsamplituder uppkommer. Detta sätt är både enklare samt mer pålitligt än beräkning av egenfrekvenser då beräkningar av kritiskt varvtal inte skall accepteras som riktiga före en kontroll utförts i verkligheten [1].

Förutom kritiska varvtal är självexciterande resonanser så som Oil whip i glidlager de särklass viktigaste vibrationerna att övervaka då en resonanssvängning bygger upp sig själv från nästan ingenting tills dess att systemets mekaniska begränsningar sätter stopp för ökningen. Smörjförhållandet i glidlagret blir då mycket dåliga och körningen bör avstanna hastigt för att undvika lagerskador.

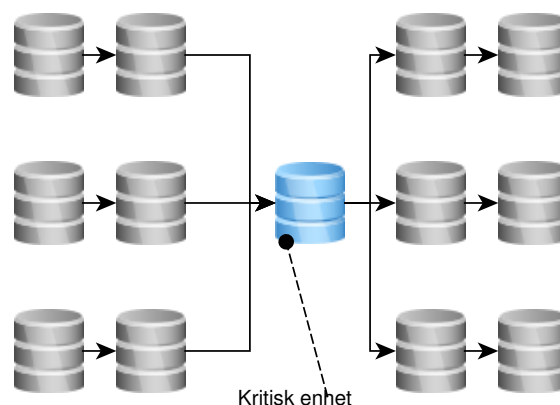
Kavitation är ett tillstånd som ofta uppträder i vattenturbiner i samband med att ett reducerat vätskestryck skapar bubblor nära rotorns yta. När bubblorna spricker överförs ganska stora krafter på rotorn vilket leder till att gropar bildas på ytan.

2.1.3 Vilka maskiner behöver övervakas?

När man överväger valet av maskiner att övervaka bör man lägga prioritet hos de som är kritiska. Analogin är mycket snarlik den att göra hälsokontroller på människor, det är onödigt att skicka fullt friska personer på kontroll istället för de som ligger i riskzonen och verkligen behöver det.

Generellt bör följande typer av maskiner kontrolleras med regelbundet intervall för att undvika långa och kostsamma problem

1. Maskiner som bidrar med dyra, tidskrävande eller svåra reparationer vid fel
2. Maskiner kritiska för produktionen eller drift av kraftverket
3. Maskiner som är kända att gå sönder ofta
4. Maskiner som kan påverka mänsklig eller miljömässig säkerhet



Figur 2.1: Diagram över processflöde för enkel identifikation av kritiska enheter

2.1.4 Insamling av data

De parametrar som används vid vibrationsmätning i spektrum kan delas in i fyra klasser

- Hur datan *mäts*
- Hur *mycket* och hur *snabbt* man skall mäta
- Hur datan *behandlas*
- Hur datan *presenteras*

2.1.4.1 Hur datan mäts

Här gäller det att använda rätt typ av givare placerad på rätt plats på rätt sätt för att resultatet av mätningen skall bli så bra som möjligt. Efter identifiering av intressanta maskinelement eller fenomen hos den maskin man vill undersöka måste rätt typ av givare väljas för jobbet. Det finns olika typer av givare och de vanligast förekommande är

- Accelerometer
- Hastighetsgivare
- Förflyttningsgivare

Givaren skall sedan placeras i rätt dominerande plan så nära maskinelementet som möjligt eftersom det likt hos människan är svårt att mäta hjärtslaget genom att sätta stetoskopet på foten. Vid mätning av lager bör man hålla sig så nära centerlinjen som möjligt. Används en accelerometer för att mäta vibrationer bör monteringen göras så fast som möjligt och på en yta fri från rost, färgflagor eller annat skräp. Detta för att förhindra förvrängningar av signalen och oönskat brus.

2.1.4.2 Hur mycket data och hur snabbt man skall mäta

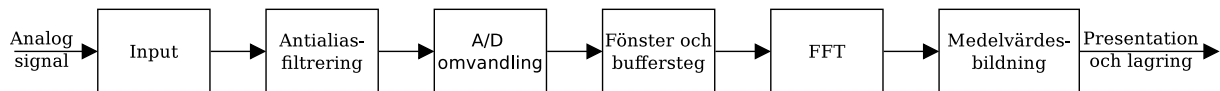
De parametrar som avgör hur mycket och hur snabbt data ska samlas är F_{max} , spektrallinjer och överlappning. Är F_{max} värdet högt bidrar det med ett stort spann på vibrationsfrekvenser och för att kunna samla den datan behöver man en snabb mätfrekvens även kallat *sampling rate*. Destå fler spektrallinjer ett spektrum har desto lättare är det för användaren att analysera datan men fler spektrallinjer kräver långsammare mätningar.

En rekommendation för bestämning av F_{max} är tre gånger antalet delar i maskinelementen multiplicerat med rotationsfrekvensen. För $F_{max} \leq 30$ kcpm räcker det generellt med 400 spektrallinjer medan 3200 linjer är att föredra vid $F_{max} > 1200$ kcpm [2, 3]. Antalet spektrallinjer är direkt kopplat till priset på mätutrustningen då snabbare CPU och mer RAM krävs för att inte behöva göra kompromisser i val av F_{max} och sampling rate. Överlappsdata är ett sätt att återanvända en andel av tidigare mätt vågform för att beräkna ett nytt spektrum. Större överlappningsandel

innebär att man behöver mindre ny data för generera ett nytt spektrum vilket gör att spektrumet snabbare kan visas. Överlappning på 50% är ideal i de flesta fall.

2.1.4.3 Hur data behandlas

De parametrar som avgör hur datan bearbetas är vilken form av medelvärdesbildning, antalet medelvärden och vilken fönstertyp som används.



Figur 2.2: Signalkedja vid digitalisering av vibrationsmätning

Medelvärdesbildning måste användas för att bestämma nivån på signalen vid varje frekvens. Anledningen till att man gör ett medelvärde av spektrat är för att minska bidraget som mätstörningar skapar. Olika metoder används vid medelvärdesbildning så som aritmetiskt medelvärde, kvadratisk medelvärde, 'Peak hold' och synkront medelvärde [4, 2]. Den vanligaste metoden är aritmetiskt medelvärde som är rekommenderad i de flesta fall och fungerar enligt följande ekvation.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

där x_i är spektrat och n antalet spektra. Aritmetiskt medelvärde är en användbar metod vid trendning av fel vilket används flitigt i förebyggande underhåll och reducerar även bakgrundsbruset från signalen.

Kvadratisk medelvärdesbildning tar störst hänsyn till det senaste spektrat och används då vibrationsmönstret varierar långsamt över tiden.

$$\begin{aligned} s_1 &= x_0 \\ s_t &= \alpha x_{t-1} + (1 - \alpha)s_{t-1} \quad , t > 1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

där α är den faktor mellan 0 och 1 som bestämmer hur mycket de tidigare mätningarna vägs in i medelvärdet s_t .

'Peak hold' är inte någon riktig medelvärdesbildning då den sparar det största värdet hos varje analyserad frekvens men är användbar vid identifiering av transienter eller som hjälpmedel vid utmattningsanalys.

$$y[k] = \max(y[k-1], x[k]) \quad (2.3)$$

där

$x[k]$ är det nya mätvärdet

$y[k]$ är det nya medelvärde

$y[k-1]$ är föregående medelvärde

Synkront medelvärde använder sig av en referenssignal från maskinen som analyseras. Signalen genereras vanligtvis från en fotocell, elektromagnetisk givare eller annan form av tachometer. Denna metod fungerar bra för filtrering av bakgrundsbrus.

Antal medelvärden man använder vid medelvärdesbildning antar en viktig roll i den bemärkelsen att ju större antal spektra som används desto mer brus filtreras men kräver också att mer data behandlas. Detta medför att det tar längre tid att visa upp ett medelvärdesbildat spektra. Fyra samples räcker i de flesta fall för medelvärdesbildning.

Fönster är parametern som bestämmer vilken fönsterfunktion som används för ytterligare filtrering vid signalbehandlingen för att lättare urskönja spikarna i FFT-spektrat. Den mest förekommande typen är Hann fönster¹ men även rektangulärt, Hamming, Tukey, cosinus, Lanczos, triangulärt, Gaussian, Bartlett-Hann, Blackman och Kaiser fönster förekommer i viss utrustning.

2.1.4.4 Hur data presenteras

För att välja hur ett spektrum skall presenteras i analysprogrammet eller den handhållna enheten måste man först bestämma vad man vill titta efter och vilken skala som skall användas. Antalet samt vilka typer av parametrar man kan ställa in spelar stor roll i analysarbetet då ett spektra i sig själv innehåller mycket information och valmöjligheten av parametrar hjälper användaren att lätt hitta rätt utslag. Vid mätningar med handhållen utrustning där maskinkondition avgörs på plats är det rekommenderat att alltid använda samma inställningar som tidigare mätningar för att undvika missbedömningar.

De enheter som oftast förekommer vid linjär amplitudskala är hastighet i in/s eller mm/s och frekvens kcpm alternativt kHz. Vid logaritmisk frekvensgradering används primärt vdB till amplitudskalan.

¹Ofta även kallat Hanning fönster.

2.1.5 Vibrationsnormer

För att avgöra om de uppmätta vibrationerna är skadliga finns två metoder att tillgå; egen trendmätning och haverianalys alternativt tröskeltal utifrån vibrationsnormer från industristandard och ISO. Generellt används standardnormer då primärt SS-EN 10816 där en tumregel är att vibrationsamplituden skall hållas under 3 mm/s RMS och att hastigheter över 7 mm/s RMS innebär medvetet slitage av maskinen [5].

2.1.6 Mätutrustning

Idag är mätutrustningen kompakt och finns tillgänglig som både fast monterad och bärbart format. Portabla system samt fast monterad utrustning som inte utför kontinuerlig mätning kallas *off-line* och med hjälp av mikroprocessorer konverteras analoga signaler till digitalt FFT spektrum vilket ger en smidig lösning för momentan inblick i maskinens hälsa. Detta gör att mätutrustningen är lätt att använda och bära med sig, tyvärr innebär detta vissa kompromisser gent de äldre analoga mätinstrumenten.

Ett stort problem med digital portabel utrustning är visningen av vibrationerna, då vibrationer sällan är stabila medför detta att mätvärdet måste dämpas eller medelvärdesbildas till den mån att displayen blir läsbar för operatören. Analoga visare ger en bättre representation av maskinvibrationerna, vibrationstoppar och även lagerkondition där operatören står för filtreringen, något som inte är möjligt med dagens digitala visare.

Kanske det mest övergripande problemet med *off-line* utrustning är att mätningar tenderar att ske lågfrekvent så som månadsvis eller med ännu större intervall. Detta leder i detta fall till att vibrationsanalys som diagnostiskt verktyg vid PdM/CBM i stort sett blir betydelselöst [6].

Tabell 2.1: För och nackdelar med off-line utrustning

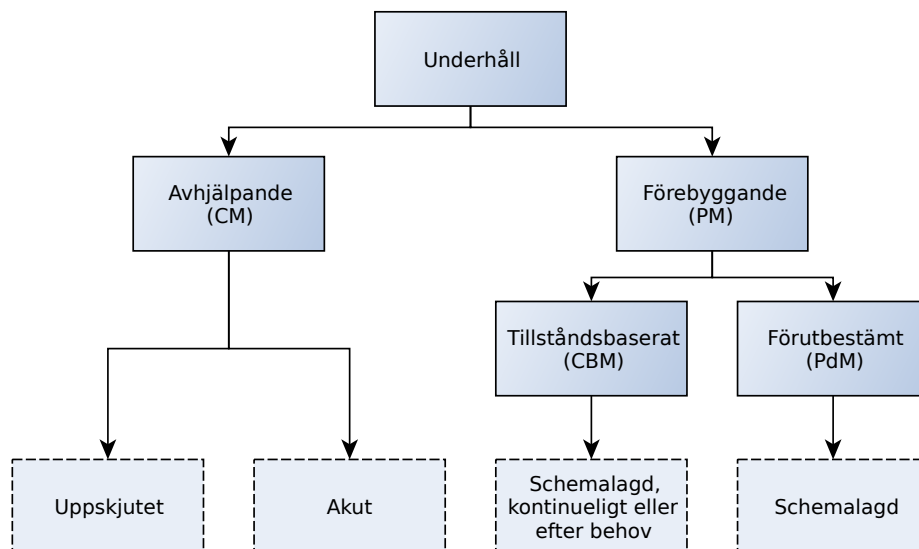
Fördelar		Nackdelar	
1	Portabilitet	1	Svårt att utföra korrekt mätning
2	Obegränsade mätningar	2	Begränsad för kritiska maskiner
3	Visuell inspektion på samma gång	3	Arbetssamt och kräver utbildad personal
4	Dataansamling är relativt enkel	4	Mätfrekvensen är begränsad
5	Möjlighet till rotorbalansering på plats	5	Falsklarm p.g.a. processfaktorer
6	Kräver ingen installation på maskinen	6	Okända problem förblir osynliga
7	Stör ej befintligt installerad utrustning	7	Oftast begränsad frekvens och amplitud vid mätning
8	Grundutbildning tar 5 dagar	8	Analysen blir begränsad utan fasdata
9	Relativt låg investeringskostnad	9	Ofta endast använd vid haveri/larm
10	Lägre kostnad per mätpunkt	10	Svårt att ersätta personal för vibrationsmätning
		11	Förbrukningsmateriel: kablar, batterier, sensorer
		12	Data förlorad vid mätutrustningshaveri
		13	Datan är sällan distribuerad
		14	Endast sedd som en underhållsfunktion
		15	Sällan integrerad med CMMS
		16	Sällan synliga för operatörer
		17	Ominvestering vart fjärde år

Ett system av integrerad hårdvara och mjukvara som kontinuerligt utför mätningar på maskinen dygnet runt kallas *on-line*. Datan presenteras sedan som information om maskinens hälsa via lättåtkämpliga grafer och värden med hjälp av en dator. Detta gör det lätt för operatören att avgöra när och om en åtgärd bör initieras. Systemet kan även användas som bidrag till övervakning av produktionens effektivitet. All rådata sparas så underhållsingenjörer lätt kan plocka ut intressanta värden för vidare analys av specifika maskinelement.

Tabell 2.2: *För och nackdelar med on-line utrustning*

Fördelar		Nackdelar	
1	Högkvalitetsdata tillgänglig för maskinanalys	1	Mätningarna är begränsade till antalet installerade sensorer
2	Mätningar görs automatiskt och kontinuerligt	2	Kräver att sensorerna är kopplade till CCR
3	Konstant kvalitet på mätningarna	3	Analys av data kan vara komplex
4	Direktlarm vid maskinfel	4	Kräver en utbildad diagnostiker eller konsult
5	Amplitud, frekvens, fas och last mäts	5	Hög kostnad per mätpunkt
6	Mycket kraftfullt analysinstrument	6	Relativt hög investeringskostnad
7	Kan länkas med annan processdata		
8	Datan distribueras via DCS		
9	Synlig för operatörer och konsulter		
10	Fungerar med och utan säkerhetsbevakning		
11	Idealisk för livslängdsuppskattning		

2.2 Tillståndsbaserat underhåll



Figur 2.3: Överblick av de olika underhållstyperna utifrån SS-EN 13306:2010

Tillståndsbaserat underhåll² (CBM) är en underhållsprocedure som går ut på att man övervakar tillståndet hos utrustningen och utifrån detta bestämmer *när* underhåll skall göras och *vad* som skall testas. CBM är snarlikt förutbestämt underhåll (PdM) där man byter ut/reparerar innan fel uppstår, skillnaden är att PdM tenderar att vara mer utrustningsfokuserad medan CBM är systemorienterat samt att underhållet justeras med hjälp av P-F intervall.

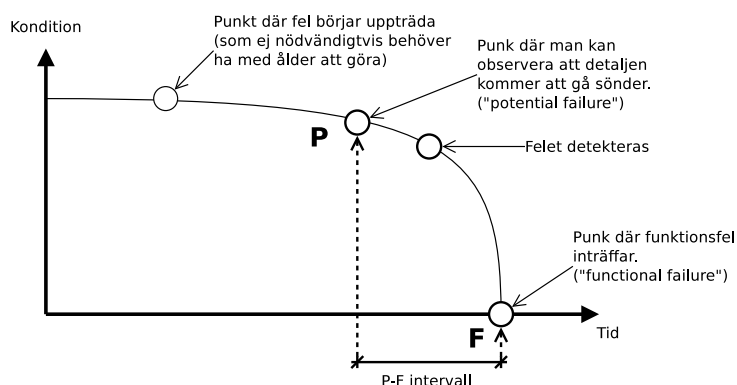
Målet med CBM är att

- Reducera oplanerat underhåll och stora underhållsarbeten
- Minska avtrycket av underhåll och logistik
- Utföra och integrera avancerad ingenjörskonst, underhålls- och informationsteknologi
- Underhåll endast vid bevisat behov
- Förbättring av diagnostik och prognostik
- Använda *real-time* uppskattning av materialkondition via mätningar från förankrade sensorer och/eller externa tester och mätningar via portabel utrustning
- Öka tillgängligheten

²Kommer hänvisas som CBM vidare i dokumentet.

2.2.1 P-F intervall

Tidsintervallet mellan underhållsarbetet bestäms av det s.k. P-F intervall som representeras enligt Figur 2.4 och beskriver tiden mellan det ett fel beräknas upptäckas och haveri inträffar. Även om många fel inte är åldersrellaterade avger de flesta maskinelement en tydlig indikation innan de fallerar. Underhållsintervallet vid PdM tar inte hänsyn till haverifrekvensen eller hur kritiskt ett maskinelement är vilket CBM gör genom att filosofin bygger på att fel inte inträffar omedelbart och att det ofta är möjligt att mäta om maskinelementet är inne i slutskedet av dess livscykel. Hittas indicier på att ett maskinelement är inne i slutskedet är det möjligt att utföra åtgärder som undviker haveri och/eller konsekvenserna som tillkommer.



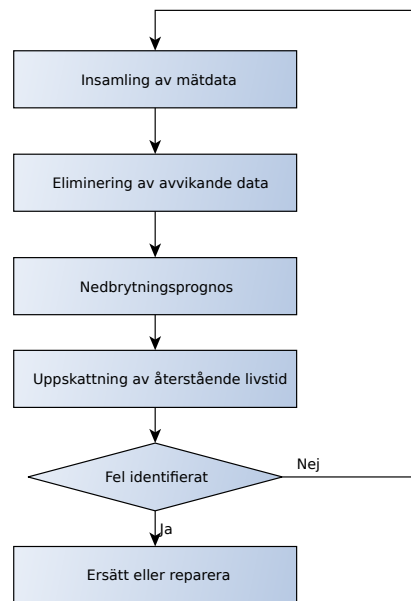
Figur 2.4: Grafisk representation av ett P-F intervall

Följande åtaganden bör göras för att CBM skall vara applicerbart och effektivt. Det måste finnas någon mätbar parameter som tydligt visar på nedbrytning i utrustningen samt personal kunnsig nog att identifiera detta och sätta gränser för underhållsintervall.

P-F intervallet måste vara konsekvent nog så inte åtgärder görs för tidigt eller att fel inträffar före den planerade åtgärden, intervallet bör dessutom vara av praktisk tidsrymd förslagsvis dagar eller veckor för att vara en god kandidat för CBM. P-F intervallet skall vara definierat så en tydlig varning uppstår med erfodelig tid för planering och utförande av åtgärd. Mest relevant i detta sammanhang är att underhållet måste vara billigare än ett potentiellt haveri över MTBF (Mean Time Between Failures).

2.2.2 Förbättring av CBM tekniker

Då kraven på produktivitet, kvalitet, lagerkontroll och maskinlivslängd ständigt ökar, förbättras CBM system i samma takt. Teknologiska framsteg implementeras till CBM system så som förbättrad kunskap om felmekanismer, säkrare prognoser via nya algoritmer, utveckling av nya sensorer och övervakningsutrustning, förbättring av diagnostisk och prognostisk mjukvara för att nämna några.



Figur 2.5: *Processflöde i CBM*

För att öka prestandan hos CBM system används nu mer fuzzy logic, neurala nät och applikation av Dempster-Shaferteori. CBM system värderas efter dess förmåga att säkert diagnostisera fel samt beräkna hur lång tid som återstår innan fel inträffar.

2.2.3 Implementering av CBM system

Nyckelordet för en lyckad implementering av CBM system är långsiktig planering. Lång tid före realisering av övervakning och analys av produktionen behövs gedigen insikt om vad som skall undersökas och hur detta utförs. För att verkligen börja spara pengar med det nya sättet att planera underhållsarbetet måste en grundlig analys av befintligt underhåll göras. Allt som inte fungerar enligt orginalplanen måste rättas till före en större förändring initieras.

Eftersom grundtanken med ett CBM system är mjukvarustyrda prognoser krävs högkvalitativ mätdata så val av givare och dess installation bör göras med största omsorg. Man kan med fördel använda sig av utrustning som följer någon av följande tre standarder

- IEEE 1451
- OSA-CBM
- MIMOSA

2.2.4 För- och nackdelar med ett CBM system

Tabell 2.3: *Sammanfattning av för och nackdelar med CBM system*

Fördelar		Nackdelar	
1	Reduktion av underhållskostnad	1	Diagnostisk utrustning är kostsamt och ökar investeringen
2	Minskad risk för haveri	2	Höga utbildningskostnader
3	Reduktion av driftstopp	3	Ledningen kan inte se den potentiella besparingen
4	Ökning av produktion		
5	Ökad komponentlivslängd		
6	Tillåter förebyggande åtgärder		
7	Minskar kostnader för reservdelar och arbete		
8	Förbättrar produktkvalitén		
9	Förbättrar person- och miljösäkerheten		
10	Förbättrar arbetsmoralen		
11	Energieffektiviserar		

Detta kapitel sammanfogar teori, intervjuer och besök på Kymmens kraftverk som en generell analys av hurvida vibrationsmätning skall utföras på ett kraftverk.

3.1 Befintligt mätsystem

Med Kymmens kraftverk som referens (se Bilaga A) sker vibrationsmätningen på Fortum sker i regel med hjälp av portabel vibrationsutrustning där datan sedan skickas till konsult för analys. Delar av mätdata sparas på en egen server i Alvesta medan majoriteten finns hos konsulten.

3.2 Generatorer och turbiner

Generellt är det inga större fysiska svårigheter att implementera och installera ett fast vibrationsmätningssystem i kraftverken och kommunikationsvägar finns redan installerade i kraftverken då de redan styrs via annan ort.

3.3 Vibrationsmätning av kraftverk

Ökade materialspänningar kan uppkomma via belägg och erosion som i sin tur påverkar balanseringen eller temperaturrelaterad expansion som ändrar komponentens uppriktning. Dessa problem bidrar med stor dynamisk belastning på lager som leder till förkortad livslängd men är lätt identifierade med hjälp av periodiska vibrationsmätningar och det finns välbeprövade metoder för direkta åtgärder [7].

3.3.1 Typ av mätningar

För att få en bra diagnos över vad som kan vara fel i anläggningarna krävs att man mäter på rätt punkter i systemet. Mäter man på fel punkter, eller inte samma punkt upprepade gånger, löper man stor risk att ställa felaktiga diagnoser och det kan bli kostsamt. Mätningarna hos Fortum idag verkar vara begränsade till enbart lager (styrlager, bärlager och turbinlager), huruvida detta är tillräckligt för att kunna göra en god diagnos över hela systemet återstår att se.

Mätpunkterna i sin tur skall tas på blottade delar i maskineriet som normalt är tillgängliga och så nära vibrationskälla samt i linje med kraften som möjligt. Exempelvis på alla huvudsakliga lager av maskinen.

Man bör vara försiktig så att man försäkras sig om att mätningarna representerar vibrationerna i lagerhuset och inte inkluderar någon lokal resonans eller amplitud. Placeringen av vibrationsgivare bör vara sådan att den tillhandahåller tillräcklig känslighet till de dynamiska krafterna av maskinen under olika drift- förhållanden. Typiskt för detta, speciellt i långsamtgående maskiner, är att man behöver två ortogonala radiella mätriktningar på varje lagerhus och att dessa punkter samt riktningar skall väljas med extrem omsorg [8].

Om off-line system brukas, skall mätpunkterna och driftsförhållandena vara samma mätning efter mätning, misslyckas man med detta löper man risk att dra felaktiga beslut angående vibrationsnivåerna.

Följande punkter bedöms som nödvändiga att mäta på i en anläggning se Bilaga C för detekterbara fel.

3.3.1.1 Stator

Stillastående del i en elektrisk maskin. Den är ofta konstruerad som en ring av magnetiskt material med inåtriktade poler försedda med magnetlindningar. I andra fall har statorn en plåtkärna som på innersidan är försedd med lindningar i spår [9].

Förslag på mätpunkter:

- Statorkärna
- Statorstomme
- Fundament

3.3.1.2 Rotor

Roterande del i en elektrisk maskin.

Förslag på mätpunkter:

- Styrlager - övre och undre
- Turbinlager
- Rotorpoler - Om vibrationer detekteras i någon av föregående punkter kan en impedansmätning vara nödvändig för vidare undersökning av elektrisk obalans i rotorn. Detta görs såklart ej av vibrationsutrustning utan snarare av utrustning lämplig att mäta impedans med.

3.3.1.3 Lager

Maskindel som håller uppe roterande axlar på plats och har till syfte att minska friktionen mellan axeln och bärytan [10]. I vattenkraftverk existerar främst glidlager, förutom på dom mycket små kraftverken. Följande analys är därför på just glidlager, och kullager behandlas i senare avsnitt.

Förslag på mätpunkter:

- Bärlager
- Styrlager - övre och undre, samma mätpunkter om bär och styrlager är kombinerat
- Turbinlager

Viktigt att tänka på vid vertikala maskiner i hydroelektriska anläggningar är att mätdata vid nedre styrlager ibland misstolkas; vibrationsnivåerna som erhålls vid sådana lager och deras kringliggande utrustning som är styvt inbäddade i maskineriet är ibland en produkt av hydrauliska krafter, direkt överförda från den hydrauliska maskinen via fundamentet [8].

3.3.1.4 Växlar

Anordning som gör att en maskin kan arbeta under gynnsamma varvtal oberoende av skiftande hastighets- och belastningsförhållanden [11].

Växellådor är komplicerade ur diagnossynpunkt p.g.a. många felmöjligheter. Ett problem vid felanalys är att kuggfrekventa vibrationer alltid finns, även i en felfri växel. Det är därför mycket viktigt att man mäter och gör ett frekvensspektra när man har en ny växel, och sedan gör mätningar med jämna mellanrum och får en trendutveckling.

Förslag på mätpunkter:

- Lager
- Kåpor

3.3.1.5 Ledskenor

Hydrauliskt reglerad anordning som möjliggör reglering av vattenflödet genom en turbin och optimering av verkningsgraden [12]. Potentiella fel specifika för ledskenor:

- Lutningen på ledskenorna kan skapa vibrationer i systemet.
- Tryckstötsvågor i specialfall kan komma över acceptabla gränser.

Förslag på mätpunkter:

- I dagsläget har man inte någon självklar punkt att mäta vibrationerna som kan uppstå p.g.a. ledskenorna, men en rekommendation är att helt enkelt följa ISO 10816-5:2000(E) som säger "Mätpunkterna i sin tur skall tas på blottade delar i maskineriet som normalt är tillgängliga och så nära vibrationskälla samt i linje med kraften som möjligt."

3.3.2 Typ av mätutrustning

Tabell 3.1: *Ekonomisk översikt på givartyper*

Mätområde	Givare	Exempel på leverantörer	Ca pris
Statorkärna	Accelerometer	SKF	6,000-
Statorstomme/ fundament	Hastighetsgivare	Bently Nevada	10,000 kr/givare
Rotor/ axelsträng ex-kl. poler	Förflyttningsgivare	VMI AB	
Växlar		Forbes Marshall	
Bärlager			
Styrlager (övre)			
Styrlager (undre)			
Turbinlager			
Kåpor			
Ledskenor			
Alt. Mätmetod lager			
Bärlager	Konduktivitetsgivare	Endress+Hausser	8,000 kr
Styrlager (övre)	Vatten i olja	Pall, Hydraul syd	10,000 kr
Styrlager (undre)	Oljeanalys	Shell	2,000 kr/gång
Turbinlager	Partikelräkningsgivare	Hydac, Colly	100,000 kr
Turbinaxel	Hall-element	Honeywell Hamlin	100-300 kr
Rotorpoler	Multimeter	ELFA	300-5,000 kr

Nuvarande mätutrustning är två portabla vibrationsmätningsskit med antaget piezoelektriska givare från SKF som är tänkt att skickas runt inom Fortum. Med denna mätutrustning ska

Fortums egna personal kunna dra egna slutsatser alt. ta kontakt med leverantören vid större problem.

Genom kontinuerlig mätning kan man analysera, trenda och alarmera de olika vibrationerna i en anläggning, och tack vare detta kan man enkelt förutse direkt haveri eller detektera när något kan behöva underhåll. Detta möjliggör underhållsarbete på rätt del, vid rätt tid och av rätt anledning. Genom arkivering av vibrationsdata över en längre tidsperiod och en dokumenterad historik över underhållsarbetet kan man enkelt skapa schema för kommande underhållsarbete sådant att man får maximal drifttid på maskinerna för de lägsta servicekostnaderna. Bara det mest effektiva och riktade underhållsarbetet behöver utföras.

Gällande val av mätutrustning, on-line eller off-line, bör man se till möjligheterna att välja mätutrustning som följer någon av dessa tre standarder:

- IEEE 1451
- OSA-CBM
- MIMOSA

Fördelarna med dessa standarder är:

- Kompatibla hårdvaru- och mjukvarukomponenter
- Mer tekniska val för användarna
- Snabbare teknikutveckling
- Reducerade priser
- Uppgradering av systemets komponenter lättare

Vidare kan man dela in mätinstrument i två huvudgrupper som kan motsvara uppdelningen av vibrationstekniskt arbete i A: vibrationer som skadar och B: skador som ger vibrationer.

- A - Vibrometrar som endast mäter vibrationers storlek och används för grundläggande vibrationskontroll.
- B - Analys- och mätinstrument för studium av orsak till vibrationer och för insats vid åtgärder.

Inom dessa grupper man kan dela in instrumenttyper i följande grupper:

Off-line instrument (portabla/handhållna)

1. Vibrometer - Hand- eller serviceinstrument med eller utan bandpassfilter för t.ex. ISO-värde eller lagerkondition
2. Filtervibrometer - Som ovanstående samt med rörligt manuellt filter för manuell frekvensmätning
3. Vibrationsanalysator - Instrument med kombinationer av fast filter och manuellt till hel-automatiskt rörligt filter samt trackingfilter. Vinkel- och varvtalsmätning.
4. Stötpulsmätare - Indikeringsinstrument för lagerfel genom stötpulsmätning
5. Spektrumanalysator - FFT-analys för frekvensspektrum
6. Mini-FFT - FFT-analysator i fickformat för snabb analys vid akuta problem
7. Datalogsystem - Insamlingssystem för vibrationsdata, ev, med FFT-analys, begränsade utvärderingsprogram för t.ex. trend- och lagerdata.
8. Programstyrda rondsystém - Mätning av alla vibrationstekniska data och med utvecklad FFT-analys i kombination med minnes-, diagnos- och expertprogram.
9. Kombiinstrument - Allt fler av vibrationsmätteknikens möjligheter förenas i vibrometrar som kombiinstrument där många ovanstående egenskaper finns i samma vibrometer och med andra driftsparametrar som t.ex. temperatur.

On-line övervakningsutrustning

Erbjuder allt det som off-line instrumenten gör men med mer avancerad övervakning och många fler fördelar såsom

- Nivåkontroll med ständigt inkopplade givare
- Universalinstrument för vibrationer, monteras fast i kontrollrum med manuell inkoppling av olika givare över knappsats
- Datorutrustning för kontrollrum med ständigt uppdaterande nivåstaplar, FFT- och vektordiagram samt linjeskrivare. Larminställningar för alla funktioner
- Utvecklad övervakningsutrustning med samma möjligheter som de datoriserade rondsystémerna med utvärderings- och expertprogram [13].

Fortum skulle därför utan tvekan gynnas av on-line system på deras vattenkraftverk. Det ger kontinuerlig information om anläggningen, möjlighet att koppla driften till produktionen, mer avancerad analys av erhållna mätdatan och tillåter kontinuerlig mätning på mätpunkter som annars kan vara svåra och farliga att mäta på med off-line system.

Efter man valt typ av övervakningssystem bör man först och främst klargöra sitt behov med utrustningen så att man inte köper en utrustning som bara står och samlar damm p.g.a. otillräckliga vibrationsmätningsegenskaper eller mätutrustning som inte kan hantera dom önskade

mätningarna. Punkter som sedan bör läggas mest vikt på vid val av vibrationsmätningssystem sammanfattas i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: *Generella punkter som bör finnas i åtanke vid komponentval*

Hårdvara		Mjukvara	
1	Bevisad pålitlighet	1	Det måste ha standardfunktioner och vara lätt att använda
2	Flexibel för utbyggnad	2	Definierar vilken typ av data som samlas
3	Bra kostnad/prestanda ratio för investeringen	3	Definierar hur dynamisk och processdata samlas
4	Enkelt interface mellan hårdvara och mjukvara	4	Sparar processinformation
5	Frekvens och dynamisk område	5	Intelligent alarmfunktion som automatiskt genererar rapporter
6	Mätparametrar	6	Möjlighet att dela data mellan olika kraftverk
7	Funktionstyp	7	Möjlighet att extrahera data för extern analys
8	Transduktortyp och anslutning	8	Lättvindighet för skapande av rapporter
9	Fas och hastighetsreferens	9	Länkar till CMMS
10	Data kommunikation	10	Möjlighet att exportera data för andra typer av rapporter
11	Antal år reservdelar finns tillhanda	11	Antal år med support
12	Uppgraderbarhet	12	Uppgraderbarhet
13	Lokal support med kärnkompetens	13	Lokal eller webbaserad support med hög tillgänglighet
14	Garantier och livslängd	14	Garantier och livslängd

Som nämns ovan vore ett on-line system att föredra, åtminstone på Fortums mer kritiska kraftverk där ett haveri skulle orsaka stora förseningar och i sin tur stora förluster. Vid ett komplett sådant system skulle man mäta alla rekommenderade punkter kontinuerligt, och med möjlighet att konstant övervaka systemet för en väsentligt mer exakt diagnos av maskinhälsan.

Vid ett mer komprimerat on-line system kan man mäta på bara ett fåtal av de rekommenderade punkterna, de som anses mest lönsamma är statorn samt lager. Ett komplement till dessa on-line system skulle vara ett fåtal Off-line system som kan cirkulera inom Fortum och användas på

mindre kritiska anläggningar. Dessa Off-line system används då främst vid diagnos av nuvarande maskin-och lagerhälsa, vid installation av nya maskiner, och balansering. Om något suspekt detekteras bör det följas upp med vidare mätningar. Detta kan dock bli problematiskt om fel detekteras vid flera av anläggningarna utan on-line system, då kanske antalet vibrationsutrustningar eller personal med kunskap ej räcker till.

3.3.3 Analys av mätdata

Vem som skall analysera datan beror främst på var intresset av informationen ligger, d.v.s. vem som i slutändan skall fatta beslut. Det kan utifrån ses som en trivial fråga men bör betas upp i tre steg

1. Konsulter
2. Egen personal
3. CBM system

Konsulter Då vibrationstekniska företag har stor kompetens och vana inom vibrationsanalys är det vanligt inom industrin att konsultera analysen men även om detta är en enkel lösning kortsiktigt innebär det i slutändan mindre insikt och trovärdighet på dessa rapporter. En av de mer vitala bristerna i de rapporter som studerats i detta arbete är att rapporterna undanskymmer trendning och jämförelsetal med tidigare mätningar vilket gör att rapporten visar att kraftverket fungerar men inte hur bra. Konsulter bör i stället ligga i uppstartsfasen och sedan primärt användas i utbildningssyfte av egen personal.

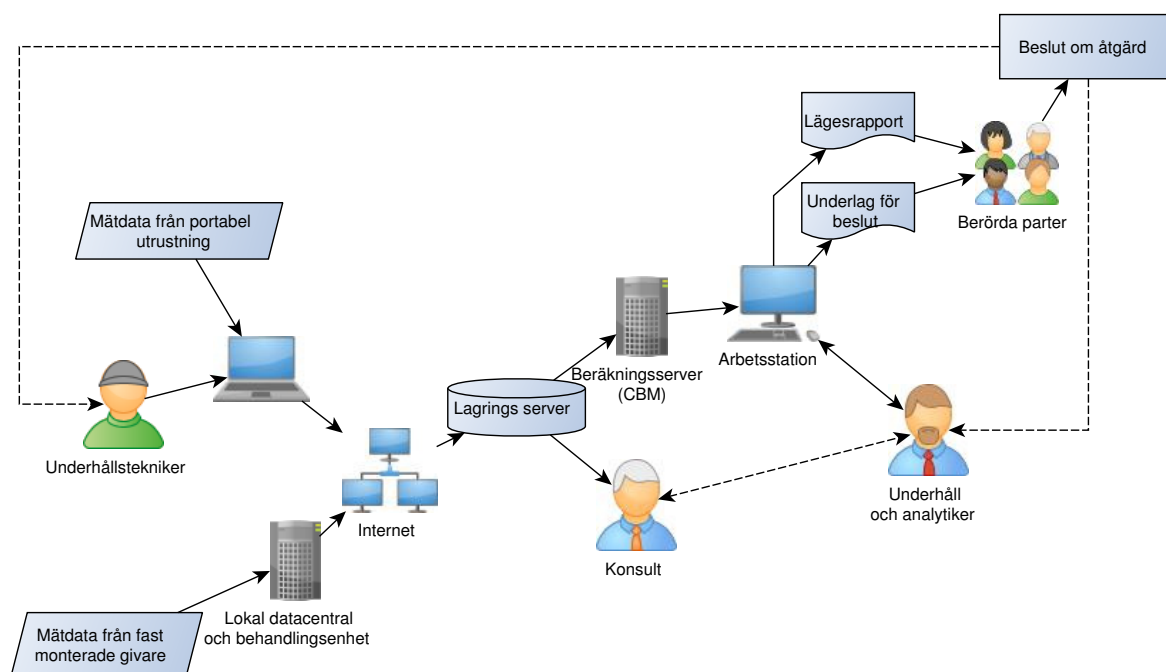
Egen personal Samlas data och analys på eget företag växer insikten om maskinernas hälsa internt och generellt är slagkraften större mellan egna enheter än från en rapport där konsulten fransäger sig allt ansvar. En underhållsenhet på företaget bör ha tillgång till all uppmätt data då fördelarna primärt är att via enkelt trendning kan man lätt urskönja materiella förändringar om man känner till hur maskinen körts fram tills nu.

CBM system När egen personal har god kunskap om vikten av bra vibrationsmätningar som verktyg i underhållsarbetet, dvs man ser klart och tydligt vikten av varför man utför och analyserar mätningar kan man implementera ett CBM system vilket inte bara kommer effektivisera underhållet men även ge kraft åt större beslut inom företaget då total analys av produktionen synkroniseras via ett system.

3.3.4 Lagring/presentation av data

Lagringen och presentationen av data är en mycket viktig del av vibrationsmätningstekniken. Om man har tillgång till gammal data och den är lätt att tolka, så kan man använda de gamla mätningarna som riktlinjer för de nya mätningarna och analys blir avsevärt mycket simplare. Hos Fortum, i dagsläget, skickas majoriteten av mätresultaten till SKF, som är leverantörer, i Luleå. Av SKF får man sedan en tillståndsrapport där nuvarande lagerstatus rapporteras och rekommendationer på åtgärder om nödvändigt.

Vid analys av rapporten visades vissa brister beroende på vem som är den tänkte mottagaren då presenterade grafer och dylikt kräver gedigen kunskap för att avläsas. Den kanske mest viktiga informationen saknades, det vill säga en lättåskådlig trendkurva över respektive komponent då man vid effektivt underhållsarbete är mer intresserad av förändringen av konditionen. Som det ser ut idag aggerar rapporten mer som en larmindikator.



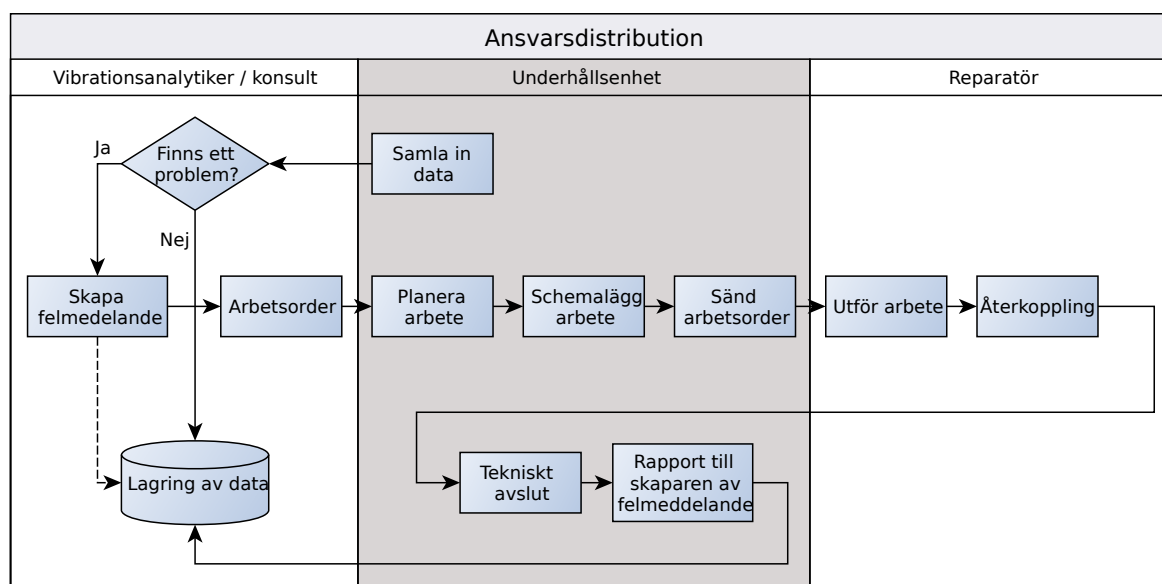
Figur 3.1: Förslag till mätdataflöde där fokus ligger på central lagring av data som lätt kan nås av egen personal samt konsulter

Ett förslag är att istället använda sig av en server för lagring av all mätdata, då inte enbart vibrationsmätningar enligt Figur 3.1 vilket sedan gör det möjligt att när som helst hämta önskad data för analys samt minskar den annars stora omställningen mot CBM. En central lagringsenhet för vibrationsdata ger framförallt en bättre översikt över hur lagerkondition och dylikt ändras över tid vilket i särklass är den bästa metoden att undvika haverier.

3.3.5 Ansvarsdistribution

Då flera enheter är länkade till underhållet och sedmera även vibrationsbevakningen delas det för enkelheten upp i två ansvarsområden: analys och åtgärd. Analys innefattar all personal inom underhåll och övriga enheter som bidrar med beslutsunderlag innan åtgärd. Skillnaden från dagens struktur är att en analytiker tillkommer som (om det behövs) har kontakt med en konsult för identifikation av skador. Som Figur 3.2 visar är det sedan analytikern som ger första utlåtandet om åtgärd skall vidtas eller ej.

Åtgärd innefattar sedan de som skall utföra arbetet samt evaluera resultatet efter avslutat ingrepp vilket bidrar till förbättring av underhållet. Fokus ligger på att all information gällande underhållet stannar kvar och lagras inom företaget samt återkopplas så att man kan observera betydelsen av vibrationsmätningarna.



Figur 3.2: Ansvarsdistribution vid vibrationsanalys och underhållsbeslut

3.4 Installation av mätsystem

För installation av mätsystem berörs endast *on-line* system då ett portabelt system inte behöver någon fysisk installation, mer än kanske några givare på givna punkter. Ett *on-line* system däremot monteras in i anläggningen och förblir där. När systemet sedan är på plats har man tillgång till alla mätpunkter, och då även kanske sådana som skulle varit mycket svåra och farliga att mäta om man inte använder sig av ett *on-line* system.

Installationen sker typiskt av leverantören och beroende på hur rigorösa mätningar man har bestämt sig för att ha påverkas tiden samt driftsförhållandena vid installation. Men installationen sker allt som oftast under de mest gynsamma förhållandena för kunden och efter installation påverkas inte produktionen negativt av utrustningen på något sätt.

3.5 Ekonomi

Kostnaden för mätutrustning är en vanlig orsak till debatt och Tabell 3.3 visar ett av många sätt som kalkylen kan presenteras. Sättet man jämför kostnaderna kan via olika kalkyler skilja sig markant och därför är det istället bättre att evaluera systemet utifrån följande resonemang; att frekvensen mellan mätningar och hög datakvalitet erhåller bättre avkastning på investeringen än sporadiska mätningar med diskutabel kvalitet.

Att underhåll har en direkt anknytning till besparingar då främst när risken för totalhaverier i stort sett kan elimineras helt, är ingen nyhet men desto bättre underhållet sköts desto svårare blir det att peka på vinsterna då "ingenting verkar gå sönder ändå". CBM är inget undantag till den här regeln men vid implementering och finjustering syns det markant bland kostnaderna för maskinunderhåll och reparationer då de inte görs i onödan.

Tabell 3.3: Ekonomisk jämförelse mellan on- och off-line mätutrustning

Off-line		On-line	
Hårdvara	Tkr	Hårdvara	Tkr
Mjukvara	Tkr	Mjukvara	Tkr
PC	Tkr	PC	Tkr
Personal		Personal	
Total		Total	
Maskiner	211 st	Maskiner	211 st
Mätpunkter per maskin	20 st	Mätpunkter per maskin	20 st
Två mätningar per månad		24 mätningar per dag	
Kostnad per mätning	kr	Kostnad per mätning	kr

Det finns många ekonomiska aspekter som förändras när det gäller implementering av CBM. Personalkostnader, utrustningskostnader, driftsförändringar, reparationskostnader osv. Man bör vara medveten om att för att få CBM att fungera krävs stora ändringar på underhållssidan för att det i längden skall bli lönsamt. Ett halvhjärtat försök att implementera CBM, resulterar allt som oftast i att det nya systemet blir ett mindre använt komplement till det gamla underhållssystemet.

Detta i sin tur skapar resulterar i större utgifter på underhållet än innan man implementerade CBM.

Med det sagt, bör man också inse att vid implementering av CBM blir det ofta en stor kostnad i investeringsfasen men att dessa pengar sedan skall fås igen genom ett mycket bättre underhållsarbete, med mindre reparationer, reservdelar och produktionsstopp. Därför är det viktigt att man inte ser CBM som enbart en kostnad, utan att man faktiskt tänker på att det kommer ge vinst i det långa loppet. För beräknat exempel se Bilaga B.2 på sidan 44.

Det kommer dock alltid, som illustreras nedan, att vara svårt att göra konventionella investeringskalkyler då det är många faktorer som spelar in på den ekonomiska situationen i ett vattenkraftverk. Det är därför nödvändigt att i stället lita till erfarenheter och utvärderingar av olika slag som t.ex.

- På några tiotal år har hundratal datoriserade rondsystém erövrat processindustrin i Sverige. Verksamheten engagerar en stor personalstyrka och orsaken är naturligtvis att det lönar sig.
- Rondverksamheten byggs oftast ut till kontinuerlig vibrationsövervakning i ett allt högre tempo, t.ex. pappersmaskiner i pappersindustrin bestyckas med hundratal givare.
- Utöver rena processindustrier och kraftverk sprider sig planerad vibrationskontroll till nya industrigrenar varje dag, som t.ex. verkstadsindustrin eller vanlig produktionsindustri
- Sjöfartsindustrin ligger idag långt bakom övriga industrin gällande vibrationsmätning och förlorar mycket pengar p.g.a. detta.

Listan kan göras lång, men utifrån dessa uttalanden kan man förstå att vibrationsövervakning nästan alltid lönar sig.

4 Diskussion och slutsatser

Detta kapitel presenterar slutsatserna av detta arbete och inleds med en diskussion gällande de problem som observerats under arbetets gång och avslutas med riktlinjer för vidare studier och implementation av övervakningssystem.

4.1 Problematiken med källor

Under arbetets uppbyggnad har kritiken till de källor som studerats ökat i takt med mängden referenser. En genomgående trend är att den litteratur som går att hitta inom vibrationsteknik och CBM är skriven av företag som säljer tjänster inom dessa områden. Även ytterst liten andel forskning verkar bedrivas opartiskt, då främst inom vibrationstekniska området.

4.2 Ekonomisk trovärdighet

De ekonomiska kalkylerna är mycket svåra att göra bra då väldigt lite nödvändig information finns att tillgå, och därför används några värden som saknar referens. Kalkylerna är dock fortfarande bra för att skapa en god bild över hur relativt små förändringar i t.ex väntetider och reparationstider skapar stora förändringar i kostnader. Detta anser vi är viktigt att poängtera då det är en stor (kanske den största) punkt i vårt argument till varför man bör överväga att implementera CBM.

Trovärdigheten på kalkylerna om man antar att värdena stämmer överens med verkligheten anses hög, det inte är några avancerade kalkyler med många oförklarliga termer. Det ses enkelt i kalkylen och man inser även med sunt förnuft att lyckas man förutse ett haveri och kan ha allt redo för när man skall byta/underhålla skadad del kommer man att tjäna pengar.

4.3 Avancerad teknik kräver stort fokus och engagemang

Att använda vibrationsmätningar som del av underhållet är ingen nyhet men kan vara lika svårt att ekonomiskt motivera som underhållet i sig självt. Destå bättre fungerande underhåll man har på ett företag desto mindre syns arbetet då optimalt sett ingenting går sönder och utgifterna istället förflyttas mot själva underhållsenheten.

För att implementera utrustning mot CBM behöver hela företaget ha insyn i tekniken, eftersom investeringen är såpass hög och tidskrävande måste alla berörda parter hålla fokus på målet och *varför* genomförandet har betydelse. CBM är en relativt ny teknik och även om grunden är beprövad måste man förstå att det är en prognostisk metod som bör användas som hjälpmedel men inte ersätta underhållet helt även om det ur ekonomisk synvinkel ser inbjudande ut.

4.4 Bör Fortum satsa på vibrationsmätningar?

Vibrationsmätningar kan användas i olika faser av underhållet, från bestämning av egenfrevenser till haverianalys och bestämning av underhållsintervall därför anser vi att åtminstone en portabel utrustning är ett viktigt verktyg oavsett storlek på kraftverken. På stora eller kontinuerligt opererande kraftverk där haverier innebär stora ekonomiska förluster rekommenderas ett *on-line* system där tydliga larmgränser upprättas för minskad haveririsk.

För att sedan effektivisera underhållet och även hela företaget som stort krävs större satsning vilket kanske inte är fullt så intressant i dagsläget. Genomgående gäller att analysen av mätdata bör göras av egen personal till största möjliga mån och konsulter endas inkallas vid specifika fall så som upplärning eller analys som inte faller inom normal drift.

- [1] Gösta Lindholm. *Vibrationer i maskiner - Resonanser och kritiska varvtal*, band 8 av 10. Mentor Communications AB, 1997. ISBN 91-972703-8-5.
- [2] Commtest Instruments Ltd. Beginner's guide to machine vibration. [Elektronisk]. www.reliabilityweb.com/forms/beginners_guide_vibration.pdf, Juni 2006. [2012-04-01].
- [3] Glenn White. *Maskinvibration - Vibrationsteori och principer för tillståndskontroll*. DIA-TEK, 1.0 utgåvan, 1996. ISBN 91-972362-8-4.
- [4] Dennis H. Shreve. Signal processing for effective vibration analysis. [Elektronisk]. www.irdbalancing.com/downloads/SIGCOND2_2.pdf, November 1995. [2012-05-08].
- [5] Gösta Lindholm. *Vibrationer i maskiner - Lönsamma vibrationer*, band 1 av 10. Mentor Communications AB, 1995. ISBN 91-972703-1-8.
- [6] Peter W. Hills. On-line machinery condition monitoring diagnostics. [Elektronisk]. <http://www.irdmechanalysis.com/PDF/MIL%20Tech%20Paper%20WP01%20-%20n-Line%20Machinery%20Condition%20Monitoring%20Diagnostics.pdf>, December 2005. [2012-04-01].
- [7] P.E Victor Wowk. A brief tutorial on machine vibration. [Elektronisk]. www.machinedyn.com/revised/tutorial.pdf. [2012-04-01].
- [8] ISO. *SS-ISO 10816-5: Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*. SIS (Standardiseringen i Sverige), Stockholm, Sverige, December 2000.
- [9] Svensk Energi. Stator. [WIKI] <http://energilexikon.svenskenergi.se/wiki/Stator>. [2012-05-21].
- [10] Svensk Energi. Lager. [WIKI] <http://energilexikon.svenskenergi.se/wiki/Lager>. [2012-05-21].
- [11] Svensk Energi. Växlar. [WIKI] <http://energilexikon.svenskenergi.se/wiki/V%C3%A4xell%C3%A5da>. [2012-05-21].
- [12] Svensk Energi. Ledskovel. [WIKI] <http://energilexikon.svenskenergi.se/wiki/Ledskena/ledskovel>. [2012-05-21].
- [13] Gösta Lindholm. *Vibrationer i maskiner - Vibrationsmätning*, band 2 av 10. Mentor Communications AB, 1995. ISBN 91-972703-2-6.
- [14] Anders Rejmeinger Bengt Sinner Alf Alfredsson, Karl Axel Jacobsson. *Elkrafthandboken - Elmaskiner*. Liber AB, 2 utgåvan, 1996. ISBN 91-47-05156-6.
- [15] Alf Alfredsson. *Elkraft*. Liber AB, 3 utgåvan, 2000. ISBN 978-91-47-01549-8.

- [16] Marcus Bengtsson. *On Condition Based Maintenance and It's Implementation In Industrial Settings*. Doktorsavhandling, Mälardalens Universitet, 2007.
- [17] S. Goto, Y. Adachi, S. Katafuchi, T. Furue, Y. Uchida, M. Sueyoshi, H. Hatazaki och M. Nakamura. On-line deterioration prediction residual life evaluation of rotating equipment based on vibration measurement. I: *SICE Annual Conference, 2008*, ss 812 –817, aug. 2008.
- [18] Peter W. Hills. Mechanalysis-on-line for vibration diagnostics and protection of hydro power generators. [Elektronisk]. <http://www.irdmechanalysis.com/PDF/MIL%20Tech%20Paper%20WP02%20-%20Mechanalysis-On-Line%20Diagnostics%20for%20Hydro%20Stations.pdf>, Mars 2006. [2012-04-01].
- [19] Peter W. Hills. Mechanalysis-on-line protection of small hydro power generators. [Elektronisk]. <http://www.irdmechanalysis.com/PDF/MIL%20Tech%20Paper%20WP03%20-%20Mechanalysis-On-Line%20Protection%20of%20Small%20Hydro%20Stations.pdf>, Juni 2006. [2012-04-01].
- [20] Peter W. Hills. A manager's introduction to turbo machinery on-line diagnostics for the power industry. [Elektronisk]. <http://www.irdmechanalysis.com/PDF/MIL%20Tech%20Paper%20WP04%20-%20Managers%20Intro%20to%20TurboMachinery%20Diagnostics%20Power%20Industry.pdf>, Maj 2006. [2012-04-05].
- [21] Karl-Edward Johansson. *Driftsäkerhet och Underhåll*. Studentlitteratur, 1997. ISBN 91-44-39111-0.
- [22] Gösta Lindholm. *Vibrationer i maskiner - Vibrationsmätinstrument*, band 3 av 10. Mentor Communications AB, 1996. ISBN 91-972703-3-4.
- [23] Gösta Lindholm. *Vibrationer i maskiner - Vibrationsorsaker*, band 6 av 10. Mentor Communications AB, 1996. ISBN 91-972703-6-9.
- [24] Bengt Molin. *Analog elektronik*. Studentlitteratur, 2:1 utgåvan, 2009. ISBN 978-91-44-05367-7.
- [25] Karl-Olof Olsson. *Maskinelement*. Liber AB, 1 utgåvan, 2006. ISBN 978-91-47-05273-8.
- [26] Staffan Johansson Per Carlsson. *Modern Elektronisk Mätteknik*. Liber AB, 1 utgåvan, 1998. ISBN 91-47-01098-3.
- [27] SKGS. Vad kostar kraften? - indikativ beräkning av kostnader för ny kraft exkl. styrmedel och skatter. Teknisk rapport, PricewaterhouseCoopers, April 2010. [Elektronisk] http://www.skgs.org/media/rapport_skgs.pdf.

A Analys av Kymmens kraftverk

A.1 Inledning



Figur A.1: Nedfart till maskinhall. Foto Leif Kuhlin, 2008-07-16. Bilden lånad från vattenkraft.info

Ett besök på Kymmens kraftverk gjordes 2012-04-13 för att få en inblick i driften av ett kraftverk, om och hur vibrationsmätning görs i dagsläget samt inspektion av potentiella mätpunkter och mätsystem. Per Hult var handledare vid besöket.

A.2 Allmän information om kraftverket

Maskinhallen till Kymmens kraftverk ligger insprängt 55 meter ner i berggrunden nära sjön Rottnen se Figur A.2. Det primära vattenmagasinet är Kymmen som tar nytta av vattenföringen från Rottnan, Granån via en överledningstunnel samt den naturliga vattentillrinningen. Kraftverket körs inte kontinuerligt utan produktionen sköts helt via parabollänk till centralen Stockholm. Sammanfattad information finns enligt Tabell A.1.



Figur A.2: Karta över kraftverksområdet. Bilden är lånad från vattenkraft.info

Tabell A.1: *Tekniska data*

Byggt år	1987
Antal aggregat	1
Effekt	55MW
Turbintyp	Francis
Stationstyp	Underjordsanläggning, pumpkraftverk
Fallhöjd	88m
Regleringsamplitud	81 – 88m
Utbyggnadsvattenföring	77 m ³ /s
Normal årsproduktion	34 GWh/år
Elcertifikat	Nej
Ägare	Fortum Generation AB

A.3 Visuell inspektion

Kraftverket består av fyra våningar där första våningen har kontrollrum, topp av generator samt travers för lyft av generatoren. Våning två innehåller statorn och dess separata kylvattensystem. Här finns även temperaturmätare för lager med analoga visare.

Turbinrummet ligger på våning tre där man har god översyn över vattenintaget, turbinhuset, styrning av ledskenor, turbinstyrlager och kompressor med tillhörande ackumulatortank som används vid pumpdrift av kraftverket. Pumpen fungerar genom att man stänger den övre ventilen, fyller turbinrummet med luft samtidigt som generatoren körs som motor upp till maximal effekt. Sedan öppnas porten och luften avbryts vilket gör turbinen till en pump.

Våning fyra huserar utflödesporten från turbinen där även en serviceport finns för inspektion och mindre reparation av turbinblad m.m.

A.4 Förebyggande underhåll

I dagsläget görs besök vid larm, en visuell inspektion varje vecka samt en mer genomgående kontroll med protokoll månadsvis. Övrig tid är anläggningen obemannad. Ingen vibrationsutrustning eller mätpunkter finns installerade i dagsläget men implementering av dessa anses varken vara svårt eller bidra med störningar i systemet.

Gällande haverier är de problem som uppstår med högst frekvens skador på de mindre maskinerna så som kylvatten- och kompressorsystem. På turbinen påvisades främst störningar p.g.a. pinnar i ledskenor men även indikationer på att kraftverket körs nära egenfrekvensen vid drift runt 24MW

har observerats via abnorm ljudnivå och vibrationer vid samtida besök. Detta kan vara mycket intressant att undersöka då drift nära resonansfrekvens kan vara mycket skadligt.

A.5 Önskemål i dagsläget

Det var önskvärt med lite mer ingående analys av anläggningen, och vibrationsmätning hade då varit ett mycket bra alternativ för att ställa bra diagnoser och för framtida referenser av tolererbara nivåer. Ingen vibrationsmätning hade dock skett på Kymmen, i alla fall inte som kom till minnet.

B.1 Tillgänglighet

Operativa tillgängligheten är ett driftsäkerhetsmått av kraftverket beräknat genom följande formel [21].

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MLDT + MTW(A) + \overline{M}} \quad (\text{B.1})$$

där:

$MTBM$ = Mean Time Between Maintenance, vilket har inverkan av både avhjälpande och förebyggande underhåll

$MLDT$ = Mean Logistics Down Time, vilket innefattar väntetider på underhållsresurser, exempelvis väntetider på reservdelar, tekniker eller verktyg

$MTW(A)$ = Mean Time Waiting Administrative, vilket innefattar administrativa väntetider innan underhåll kan genomföras

\overline{M} = Mean Maintenance Time, vilket innefattar medeltiden av den aktivt underhåll inräknat både avhjälpande och förebyggande som innebär funktionsavbrytande ingrepp.

Ofta används MDT som är summan av de olika väntetiderna (Mean Down Time)

$$MDT = \overline{M} + MLDT + MTW(A) \quad (\text{B.2})$$

vilket ger

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (\text{B.3})$$

B.2 Ekonomiberäkning

Följande beräkningar är schablonberäkningar över hur mycket Fortum skulle kunna tjäna på att förhindra oberäknade driftstopp i sina anläggningar. Det är antaget att snittpriset på producerad el är 45 öre och en vinstmarginal på 50%, detta ger en ren vinst på 0,225kr/kWh. Det är också antaget att snittdrifttiden på ett vattenkraftverk är 4000h/år samt en storlek på 40MW [27]. Det antas även att underhållskostnaden är den blygsamma siffran 2000kr/h inkl. arbete och material.

Med dessa siffror kan man enkelt räkna ut vinst per timme enligt

$$\frac{\text{snittpris} \cdot \text{snitteffekt} \cdot \text{snittdrift i timmar}}{\text{antal timmar per år}} = \frac{0.225 \cdot 40000 \cdot 4000}{365 \cdot 24} = 4110 \text{ kr/h} \quad (\text{B.4})$$

vilket även innebär att man förlorar lika mycket vid utebliven produktion.

Låt oss för enkelhetens skull anta att man får 1 fel som tvingar avbrott i produktionen på några olika tidsintervall samt att före och efter FU tillkommer en reparationskostnad \overline{M} ·underhållskostnad $= 40 \cdot 2000 = 80\,000$ kr då det ej är antaget att reparationstiden minskar i detta exempel. Sedan beräknas stillastående-kostnaden som är den stora kostnaden enligt

$$\text{Stillastående-kostnad} = (1 - A) \cdot \text{potentiellvinst/år} \quad (\text{B.5})$$

där

$$A = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (\text{B.6})$$

$$MTBM = \text{Drifttid} - MDT \quad (\text{B.7})$$

$$MDT = \overline{M} + MLDT + MTW(A) \quad (\text{B.8})$$

Med $\overline{M} = 40$, $MLTD = 92$ och $MTW(A) = 8$ blir

$$MDT = 40 + 92 + 8 = 140 \text{ h} \quad (\text{B.9})$$

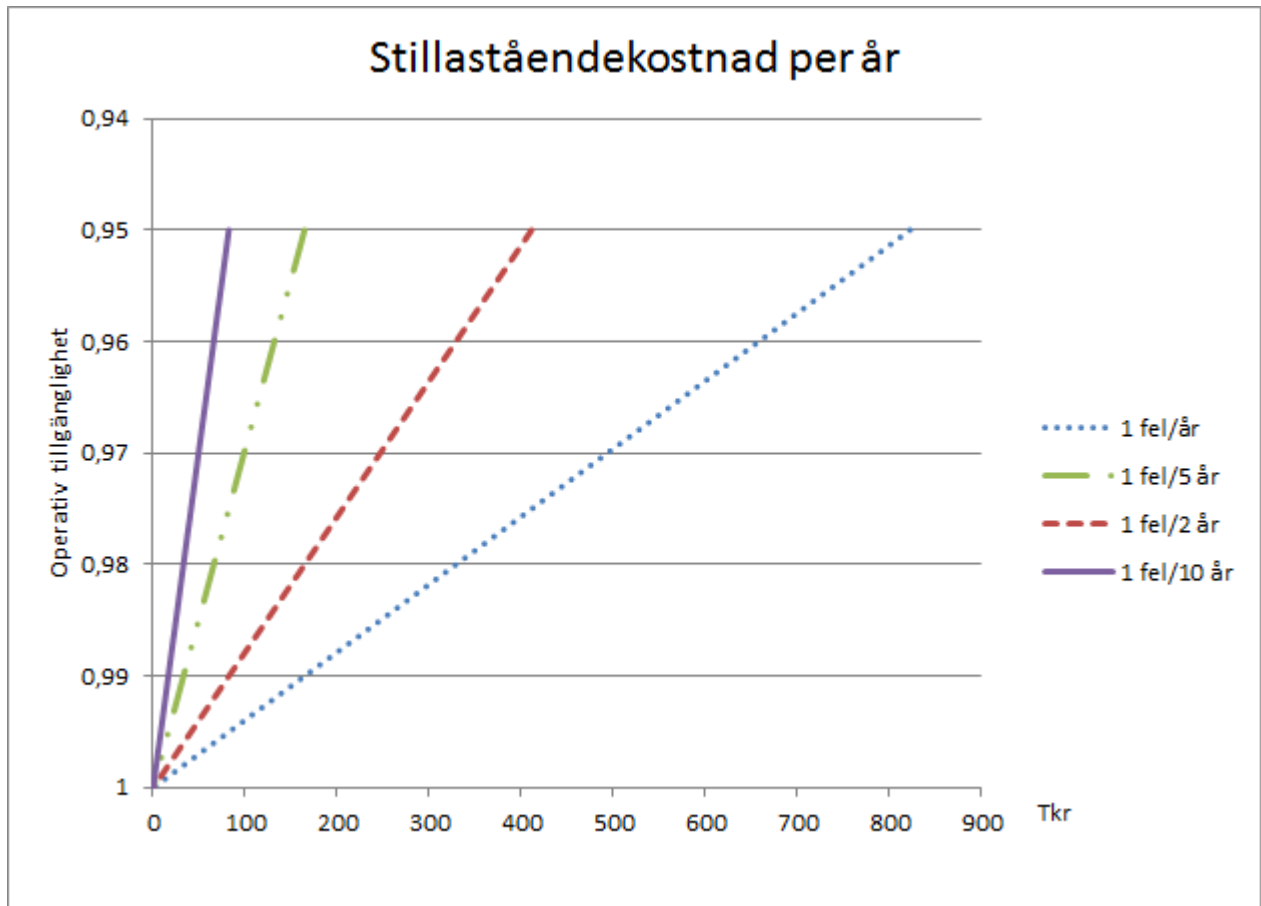
och via antagandet 1 fel/år får man i detta exempel

$$MTBM = 4000h - 140 = 3860 \quad (\text{B.10})$$

$$A = 0,96 \quad (\text{B.11})$$

Om man nu inför FU kan man såklart minska antal fel per år, men låt oss för enkelhetens skull anta att 1 fel per år kvarstår, men att man minskar MTW och \overline{M} avsevärt. Låt oss därför anta att man med hjälp av FU kunde förutspå haveri vilket medför att allt finns på plats och därför minskar $MWT = 2$ samt $MTTR = 10$.

$$A = \frac{3860}{3860 + 10 + 2} = 0,997 \quad (\text{B.12})$$



Figur B.1: Diagrammet visar sambandet mellan produktionsbortfall och operativ tillgänglighet

B.2.1 Reparationskostnader före och efter FU

Detta resulterar i en differens på 534 080kr. Denna summa kan man använda som en god riktlinje för vad man är villig att investera i sin CBM. Det ger såklart även en möjlighet att uppskatta hur lång tid det dröjer innan man har fått tillbaks sin investering och ren vinst genereras.

Man minskar $MLDT$ och $MTW(A)$ avsevärt tack vare FU. Man har förutspått haveri på en del och har den förbeställd och liggande på lager, samt att arbetsordern är gjord så inga onödiga väntetider tillkommer, tiden att utföra arbetet antas kvarstå. Detta innebär i sin tur att man kan öka den operativa tillgängligheten och stillastående-kostnaden sjunker. Ponera att operativa tillgängligheten A efter FU ökar till 0,99 vid 1 fel/år.

Då kan det utläsas ur graf(xx) eller kalkylera enligt Ekvation B.5 att före FU är stillastående-kostnaderna 657 600kr/år och efter FU 164 400kr/år. Total kostnad före FU blir således $80\,000 + 657\,600 = 737\,600$ kr och efter FU $80\,000 + 164\,400 = 244\,400$ kr

Detta resulterar i en differens på 493 200kr vid 1 fel/år. Denna summa kan man använda som en god riktlinje för vad man är villig att investera i FU som sedan blir ännu bättre med CBM. Det ger såklart även en möjlighet att uppskatta hur lång tid det dröjer innan man har fått tillbaks sin investering och ren vinst genereras.

C Detekterbara vibrationsorsaker

Följande tabeller visar en sammanfattning av vilka skador som kan identifieras med hjälp av vibrationsanalys och dess specifika karaktäristik [3, 23].

Tabell C.1: *Obalans*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Statisk massobalans	1X	radiell	Böjd rotor pga termisk spänning kan orsaka en ökande amplitud med en ökande temperatur som följd
Dynamisk massobalans	1X	radiell	Vanligaste formen av obalans (kolla upp hur man identifierar detta)

Tabell C.2: *Böjd axel*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Något böjd axel	1X, 2X	axiell, radiell, tangentiell	Kast i en rotormassa uppträder som en obalans
Böjd axel vid koppling	1X, 2X	axell, radiell, tangentiell	Kast i en koppling uppträder som ett upprikttingsfel

Tabell C.3: *Turbinproblem*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Problem med spalt	bladpassage frekvens	radiell	
Skador på turbinblad	1X och multiplar av bladpassage	radiell	Normalt har multiplarna högre amplitud än 1X. 1X sidband runt bladpassage

Tabell C.4: *Elektriska vibrationsorsaker*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Excentriskt luftgap i rotor	2X och 100Hz	radiell	
Excentrisk rotor	1X, 50Hz, 100Hz	radiell	
Lös statorkärna	100Hz	radiell	
Krökt rotor	1X, 50Hz, 100Hz	radiell	Vibrationsbilden beror av temperatur, tid och last.
Brusten rotorstav	Beror på antalet stavar	radiell	Försvinner direkt vid urkoppling.
Lös stav	Stator/rotor spårpassagefrekvens	radiell	Försvinner direkt vid urkoppling.
Överledning mellan faser	50Hz, 100Hz	radiell	Försvinner direkt vid urkoppling.
Jordfel	50Hz, 100Hz, spårpassagefrekvens	radiell	Försvinner direkt vid urkoppling.
Ojämn fasspänning		radiell	Försvinner direkt vid urkoppling.

Tabell C.5: *Felaktig uppriktning*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Vinkelfel vid uppriktning	1X, 2X	axiell	Normalt är uppriktningsfelen en kombination av parallellfel och vinkelfel.
Parallellfel vid uppriktning	1X, 2X	radiell	På långa sammankopplade axlar kommer 1x att ha högre amplitud
Snedställt lager	Ökad 2X, 1X, lagertoner	radiell, axell	Vanligtvis förenad med axiella komponenter.
Felaktigt uppriktat skovelhjul	2X, ökning av multip-larna på bladpassage-frekvensen	radiell	Vanligtvis förenad med låga axiella amplituder.

Tabell C.6: *Rullagerproblem*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Defekt innering, liten singeldefekt	bpfi, multiplar på bpfi	radiell	Radiell last
Defekt innerring, förvärrad singeleffekt	bpfi med multiplar och sidoband på 1X	radiell	Radiell last ökar nivån
Defekt innering, två eller tre små defekter	bpfi och framträdande multiplar	radiell	Bredbandsbrus, ökning av nivån
Defekt innerring, många små defekter med skalning runt hela lagerbanan (freq omriktare)	bpfi och framträdande multiplar	radiell	Bredbandsbrus, ökning av nivån
Defekt yttering, singelskada	bpfo och multiplar	radiell	Multiplarna har högre nivå än grundfrekvensen
Defekt yttering, förvärrad singelskada	bpfo och multiplar	radiell	Ökning av bredbandsbrusnivån
Defekt kula, eller rulle, singelkuldefekt	bsf och multiplar	radiell	
Flera defekta kulor	bsf och multiplar	radiell	Ökning av bredbandsbrusnivån
Skadad rullkroppshållar. Brott på ett sälle	Bredbandsbrus	radiell	Låg nivå på bruset
Rullkroppshållare bruten i bitar	Bredbandsbrus	radiell	Brus pga spillror av hållaren i lagret
Löst lager, valsning runt axeln	1X multiplar	radiell	Antalet multiplar och amplituden är ett mått på hur löst lagret är
Löst mot lagerhuset	1X, 2X och 4X	radiell	
Kraftigt glapp eller fel	0.5X och multiplar	radiell	Ökning av lågfrekvent brusgolv

Tabell C.7: *Glidlagerproblem*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Oil Whirl	0.38X till 0.48X	radiell	Skarp topp i spektrat
Oil Whip	0.38X till 0.48X	radiell	Kast i en rotormassa uppträder som en obalans. Kast i en koppling uppträder som ett uppriktningssfel. Skarpa toppar i spektrat
Allvarligt lagerspel	1X multiplar	radiell	Visas som puckel av 1X multiplar. 4X till 8X och/eller 7X till 15X
Glapp eller lösa glidlager	0.5X, 1X	radiell	0.5X multiplar i spektrat

Tabell C.8: *Mekaniskt glapp*

Vibrationskälla	Frekvens	Dominerande plan	Kommentar
Löst fundament	1X multiplar	normalt tangentiell	Indikeras av löst fundament
Lagerglapp i glidlager	1X multiplar	radiell	Multiplarna kan sträcka sig till 10X
Extremt lagerglapp i glidlager	0.5X undersynkrona multiplar	radiell	Ibland även 0.25X multiplar

