

Conditiebewaking rotor bladen

Belastingmetingen met optische sensoren

T.W. Verbruggen
P.A. van der Werff

ECN-E--07-025

Verantwoording

Het project was gedeeltelijk gefinancierd door SenterNovem

ECN project nummer : 7.4378

SenterNovem contract nummer : 2020-03-11-10-005

Abstract

Condition monitoring of wind turbine components is of growing importance. For bearings, gearboxes and other rotating equipment, techniques are available from other applications. For condition monitoring of rotor blades, no suitable techniques are available up to now. However the interest for it is increasing in order to get more insight in the occurring loads and to reduce these loads by applying other control techniques.

Within this project, a blade condition monitoring system has been designed, integrated and installed in a large wind turbine. Three activities have been executed in parallel:

- Development of a read-out unit and data acquisition system
- Further development of Bragg sensors
- Development of diagnostic software.

The read-out unit and the data acquisition system including a rotor part and a turbine part have been designed, built and tested by FOS and ECN. The design is based upon a set of requirements as defined by ECN. Based on the requirement specification, a test program was defined and executed in the laboratory as well on a large turbine.

Apart from the activities with respect to the measurement system, further development of the sensors is essential. During this project, a retrofit type has been applied. This enables to install sensors after production of the blades and to replace them in case of failure. Bragg sensors are sensitive for temperature variation. For this project, active temperature compensation has been chosen. The temperature sensors, based upon the same technology, have been modified in order to prevent for strain modulation. These sensors have been tested together with the other sensors and the instrumentation in the laboratory as well as on a turbine.

The diagnostic software should provide information to the user which can be used for planning of maintenance. The modules providing most information for that, being load counting, frequency analysis and fatigue damage calculation have been worked out during the project. An initial version of the diagnostic software was implemented in the blade condition monitoring system. Because the system was not operational for large periods of time, the modules have been tested offline based on available load data from another turbine of the same farm.

After execution of the tests has been concluded that:

- The delivered hardware was not suitable to operate in this environment and further development focused on this application will be necessary.
- The strain sensors gave problems with respect to accuracy and reproducibility. Apart from that, the temperature sensors also show strain modulation. Further developments for sensors and methods for temperature compensation will be necessary.
- The diagnostic software shows very good results with respect to the interactive method for processing of measurement data and the calculation of the load spectra. Via frequency analysis small shifts in the eigen frequency can be detected. On line tests are necessary as further follow up in order to demonstrate the usefulness in practice.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
2. Doelstellingen en taken	9
3. Meetsysteem	11
3.1 Systeemconfiguratie	11
3.2 Pakket van eisen	12
3.3 Gebruikers interface	15
3.3.1 Configuratiegegevens	15
3.3.2 Time series	16
3.3.3 Presentatie analyseresultaten	16
3.4 Afnametesten	16
3.5 Resultaten	19
3.5.1 Aluminium strip	19
3.5.2 GRP strip	20
3.6 Besluit	21
4. Installatie in NORDEX-5	23
4.1 Bepaling van locatie van de sensoren	23
4.2 Voorbereiding en installatie van sensorlijnen en rotormodule	24
4.3 Installatie turbinemodule	25
4.4 Besluit	25
5. Bedrijfservaring	27
5.1 Analyse van meetdata	27
5.2 Besluit	30
6. Diagnostische software	31
6.1 Beschrijving analyse module (DLL): oorspronkelijke opzet.	31
6.2 Resultaten	32
7. Meetdata	33
7.1 Data analyse van optische metingen	33
7.2 Data analyse beschikbare ECN-data	35
7.2.1 Belastingsspectra / benadering cumulatieve methode	36
7.2.2 Frequentie analyses	38
7.3 Besluit	40
8. Conclusies	41
8.1 Instrumentatie	41
8.2 Installatie	41
8.3 Bedrijfszekerheid	41
8.4 Operationele aspecten	41
8.5 Gebruikersinterface	42
8.6 Analyse tools	42
9. Commerciële realisatie van projectresultaten	45
10. Resultaten van indirecte energieopbrengst	47
11. Referenties	49

Lijst van tabellen

Tabel 3-1:	Eisen reksensoren	12
Tabel 3-2:	Eisen temperatuursensoren	12
Tabel 3-3:	Eisen Rotormodule	12
Tabel 3-4:	Eisen Gondelmodule	13
Tabel 3-5:	GRP-teststrip	18
Tabel 3-6:	Meetresultaten rek bij eenzijdige inklemming	19
Tabel 3-7:	Metingen temperatuursensoren op basis van gemiddelde waarden aluminium strip	20
Tabel 3-8:	Metingen temperatuursensoren op basis van gemiddelde waarden GRP strip	20
Tabel 5-1:	Onderlinge vergelijking gemeten ranges	28
Tabel 5-2:	Gemeten temperaturen op verschillende bladlocaties	30

Lijst van figuren

Figuur 3-1:	Basis configuratie Blad Bewakingssysteem	11
Figuur 3-2:	Gebruikersinterface systeemconfiguratie	15
Figuur 3-3:	Presentatie tijdseries	16
Figuur 3-4:	Testopstelling	17
Figuur 3-5:	Teststrip (aluminium en GRP)	18
Figuur 3-6:	GRP teststrip voor excitator	18
Figuur 3-7:	ALU teststrip voor statische test	19
Figuur 3-8:	Aluminium strip, éénzijdig ingeklemd.	19
Figuur 3-9:	Tijdseries / discontinuïteiten	21
Figuur 3-10:	Faseverschuiving meetsignalen	21
Figuur 4-1:	Testveld EWTW	23
Figuur 4-2:	Positie rek- en temperatuursensoren	24
Figuur 4-3:	Strain sensor (evenwijdig blad-as) en temperatuur sensor (loodrecht blad-as)	25
Figuur 5-1:	Edgewise and flapwise strain signals	27
Figuur 5-2:	Installatie rek- en temperatuursensor	28
Figuur 5-3:	Temperatuursensoren in 2 richtingen geplakt	29
Figuur 5-4:	Voorbeeld van rekmodulatie op temperatuursignaal	29
Figuur 6-1:	Analyse software binnen meetsysteem	31
Figuur 7-1:	FFT edgewise rek voor windsnelheidsklasse 9 (9 tot 10 m/s) voor drie bladen	33
Figuur 7-2:	Rainfall plot voor blad 1, edgewise rek, windsnelheidsklasse 9	34
Figuur 7-3:	FFT flap wise rek, windsnelheidsklasse 9, drie bladen	34
Figuur 7-4:	Waterfall plot voor blad 1, windsnelheidsklasse 9, flap wise	35
Figuur 7-5:	FFT in zwaairichting van blad 2 voor de windsnelheidsklassen 6, 8, 9, 10 en 11 ..	35
Figuur 7-6:	Selectie en berekening van cumulatieve belastingsspectra	37
Figuur 7-7:	Geaccumuleerde belastingsspectra over 2004 en 2005 voor alle metingen	38
Figuur 7-8:	Geaccumuleerde belastingsspectra over 2004 en 2005 voor geldige meetseries ..	38
Figuur 7-9:	Geaccumuleerde belastingsspectra over 2004, 2005 en 2006 voor geldige meetseries	38
Figuur 7-10:	Frequentie plots op basis van 1 minuut en 10 minuut tijdseries	39
Figuur 7-11:	Frequentie plots op basis van 1- en 10 minuut tijdseries rond eigenfrequentie	39
Figuur 7-12:	Ligging eigenfrequentie gedurende meetperiode	40

Samenvatting

Het belang van conditiebewaking van windturbinecomponenten wordt steeds groter. Voor lagers, tandwielkasten en andere roterende onderdelen zijn technieken beschikbaar vanuit andere toepassingen. Voor bladen van windturbines zijn tot nu toe geen technieken beschikbaar. Wel komt dit onderwerp steeds meer in de belangstelling, enerzijds om meer inzicht te krijgen in de optredende belastingen en anderzijds om de belastingen te kunnen reduceren door bijvoorbeeld aanpassing van de regeling.

Binnen dit project is een bladbewakingssysteem ontworpen, samengesteld en ingebouwd in een windturbine. Hierbij zijn drie parallel lopende activiteiten uitgevoerd:

- Ontwikkeling van readout-unit en data acquisitie systeem
- Doorontwikkeling van Bragg-sensoren
- Ontwikkeling van diagnostische software.

De read-out unit en het data-acquisitiesysteem, bestaande uit een rotordeel en een turbinedeel, zijn ontworpen, samengesteld en zijn zowel door ECN als door FOS getest. Het ontwerp is gebaseerd op een door ECN opgesteld programma van eisen. Aan de hand daarvan is een testprogramma opgesteld en zijn testen uitgevoerd, zowel in het laboratorium als op de turbine.

Naast de activiteiten m.b.t. het meetsysteem, is de doorontwikkeling van de sensoren van essentieel belang. Voor dit project is gekozen voor een retrofit-uitvoering van de Bragg sensoren, hetgeen installatie en vervanging mogelijk maakt. Doordat de Bragg-sensoren gevoelig zijn voor temperatuurvariaties, is gekozen voor actieve temperatuurcompensatie. De hiervoor benodigde optische temperatuursensoren zijn voor dit project aangepast om strain-modulatie te voorkomen. Deze sensoren zijn samen met de instrumentatie getest in het laboratorium en op een turbine.

De diagnostische software is gericht op het verschaffen van informatie aan de gebruiker hetgeen gebruikt kan worden bij de planning van onderhoud. De modules die hiervoor de meeste informatie verschaffen, te weten load counting, frequentie analyse en analyse van vermoeiingsschade zijn in dit project volledig uitgewerkt. Van deze diagnostische software is een initiële versie geïmplementeerd in het bladbewakingssysteem. Vanwege het niet operationeel zijn van het bladbewakingssysteem zijn de modules off-line uitgetest m.b.v. beschikbare belastingsdata van andere turbine uit hetzelfde park.

Na het uitvoeren van de testen is geconcludeerd dat:

- De geleverde hardware niet geschikt is om langdurig in deze omgeving te functioneren en verdere ontwikkeling gericht op de toepassing noodzakelijk is.
- De strain sensoren problemen geven t.a.v. nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid. De temperatuursensoren geven daarbij problemen t.a.v. strain modulatie. Verdere ontwikkeling t.a.v. sensoren en methoden voor temperatuurcompensatie is dan ook noodzakelijk.
- De diagnostische software geeft offline goede resultaten t.a.v. de interactieve wijze waarop de gegevens kunnen worden verwerkt en belastingsspectra worden opgebouwd. Tevens kunnen via frequentieanalyses kleine verschuivingen in de eigen frequenties worden gedetecteerd. On line testen zijn als vervolg hierop nodig om de bruikbaarheid ervan in de praktijk aan te tonen.

1. Inleiding

Conditiebewaking van windturbinecomponenten wordt in toenemende mate toegepast met als doel te komen tot verlaging van het productieverlies en de onderhoudskosten. Reductie van onderhoudskosten kan in voorkomende gevallen worden bereikt door verschuiving van correctief en preventief onderhoud naar toestandsafhankelijk onderhoud en het vermijden van gevolgschade. Conditiebewaking voor het detecteren van falen van tandwielkasten, lagers en andere draaiende delen in een vroeg stadium worden in meerdere takken van de industrie toegepast. Sensoren, instrumentatie en software voor data-acquisitie zijn in ruime mate beschikbaar en kunnen in principe worden toegepast voor windturbines.

Voor het bewaken van rotorbladen zijn tot nu toe geen bruikbare technieken ontwikkeld. Verschillende technieken voor het vaststellen van de toestand van de bladen zijn onderzocht, doch dit heeft nog niet geresulteerd in grootschalige praktische toepassingen. Eén methode is het installeren van versnellingsensoren in de bladen en frequentieanalyses uit te voeren voor toestandsbewaking. Veranderingen in het frequentiegedrag kunnen een aanwijzing zijn voor een verandering van de toestand. Dit wordt aangeduid als "Health Monitoring". De praktische waarde hiervan is echter nog niet aangetoond. Een andere methode is de belastingen te meten en deze nader te analyseren ("Load Monitoring" of "Load Counting"). Voor het meten van belastingen wordt veelal gebruik gemaakt van klassieke (koperen) rekstrookjes. Belangrijke nadelen van de toepassing van klassieke rekstroken zijn dat periodiek herkalibratie noodzakelijk is en dat de levensduur van de sensoren beperkt is tot ca. 1 tot 2 jaar. Optische sensoren op basis van Bragg-technologie hebben deze nadelen in theorie niet. In combinatie met de uitleeseenheid is deze technologie te duur en is er onvoldoende praktische ervaring voor deze toepassing. Sinds enkele jaren laten zowel de sensoren als de uitleesunits een significante prijsdaling zien.

ECN heeft in voorgaande projecten (het Dowec-project en het FOBM_II-project) ervaring opgedaan met het toepassen van optische sensoren en heeft een bruikbaar concept ontwikkeld voor het gebruik hiervan voor conditiebewaking van de bladen. Binnen dit project (aangeduid als FOBM_III) is het pakket van eisen nader gedetailleerd. Op basis hiervan is een Blad Conditiebewaking Systeem gemaakt, dat geschikt is om praktijkervaring op te doen aan de hand van toepassing in een windturbine om op deze wijze procedures voor "Health Monitoring" and "Load Counting" te ontwikkelen, te verifiëren en verder te optimaliseren. Tevens kan dit concept het uitgangspunt zijn voor een commercieel product.

Volgens planning zouden twee systemen worden geïnstalleerd en beproefd, één op de DOWEC-turbine en een tweede op een NORDEX N80 turbine. Beide turbines staan opgesteld op het ECN Windturbine Testpark Wieringermeer (EWTW). Op de DOWEC-turbine was reeds een systeem geïnstalleerd voor een "Proof of Principle". Het huidige FOBM_III project, dat specifiek is gericht op bladbewaking, is daarop een logisch vervolg. Vanwege de late levering van het eerste systeem, bedoeld als upgrade voor de DOWEC-turbine, de voor ECN eenvoudige toegang tot de NORDEX-turbines en de beschikbaarheid van extra meetvoorzieningen is ervoor gekozen het eerste systeem op een N80 te installeren. Na verdere vertragingen in de levering en technische problemen met het eerste systeem is vervolgens besloten van de bestelling van een tweede systeem af te zien.

Met het door FOS ontwikkelde en gebouwde systeem is enige praktische ervaring opgebouwd binnen het huidige FOBM_III project zoals is beschreven in de hoofdstukken 3, 4 en 5. Met betrekking tot ervaringen op de lange termijn heeft het project helaas geen informatie opgeleverd. Het gebruikte systeem heeft hiervoor niet voldoende lang gefunctioneerd.

De ervaringen en verdere uitwerking van de diagnostiek is gerapporteerd in de hoofdstukken 6 en 7.

2. Doelstellingen en taken

De doelstellingen van het FOBM_III project zijn:

1. Het opbouwen van praktische ervaring met een Bladbewakingssysteem dat is gebaseerd op rekmetingen met optische sensoren.
2. Tijdens het project moet op basis van langdurige experimenten worden aangetoond dat betrouwbare meetdata automatisch kan worden verzameld over langere perioden, zonder dat voortdurend onderhoud of herkalibratie noodzakelijk is.
3. Het verbeteren en optimaliseren van analysesoftware, welke de gebruiker direct informatie verschaft over de toestand van de bladen. De informatie moet operators en onderhoudsbedrijven behulpzaam zijn bij het plannen van onderhoud op de lange termijn.

Voor het realiseren van bovenstaande doelstellingen zijn de volgende taken gedefinieerd:

1. Experimentele systemen.
Dit omvat het definiëren en ontwikkelen van de bladbewakingssystemen.
2. Analyse meetdata t.b.v. beoordelen en verbeteren meetsysteem.
Hierbij kan gebruik worden gemaakt van resultaten zoals reeds beschikbaar zijn uit het DOWEC-project, alsmede nieuwe ervaringen zoals deze uit de beginfase van het FOBM_III project worden opgedaan.
3. Ontwikkelen van de applicatie voor “blad conditiebewaking”
Dit betreft de ontwikkeling van diagnose-software en van voorzieningen betreffende de gebruikers interface.
4. Analyse meetdata t.b.v. blad conditiebewaking
Na installatie van de applicaties, wordt meetdata gedurende een langere periode opgeslagen. Deze meetdata zal worden gebruikt voor een verdere optimalisatie van de gebruikerssoftware.

Het project is uitgevoerd in samenwerking met FOS en Neg_Micon. FOS was daarbij verantwoordelijk voor de ontwikkeling van het data-acquisitiesysteem met inbegrip van de gebruikersinterfaces voor de bediening van het systeem en de presentatie van analyseresultaten. Tevens profileert FOS zich daarbij als een toekomstige leverancier van deze systemen voor de windturbine-industrie.

NEG-MICON heeft binnen het project de DOWEC-turbine beschikbaar gesteld voor het uitvoeren van experimenten.

3. Meetsysteem

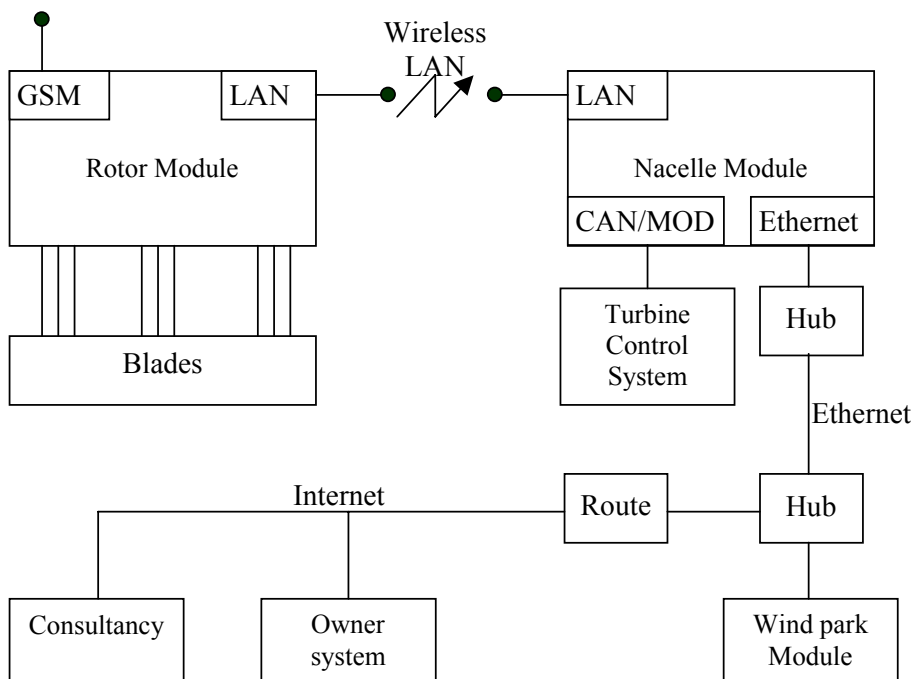
In het project was de installatie van 2 bladbewakingssystemen voorzien. Het eerste systeem zou worden geïnstalleerd op de DOWEC-turbine. De infrastructuur was reeds beschikbaar uit een voorgaand project, hetgeen de installatie en communicatievoorzieningen vereenvoudigt. Tevens waren reeds belastingsmetingen uitgevoerd en was de turbine beschikbaar voor productie over een langere periode.

Een tweede systeem zou worden geïnstalleerd in een NORDEX-turbine, wat een standaard productie machine is, zonder additionele meetvoorzieningen. Het installeren van een bladbewakingssysteem vereist extra communicatievoorzieningen, hetgeen bij bestaande turbines altijd het geval zal zijn. Dit betreft zowel communicatievoorzieningen tussen de rotor en de vaste wereld, alsmede voor het verkrijgen van meetdata uit de turbine-PLC.

I.v.m. vertraging in de levering van het bladbewakingssysteem, de inmiddels gerealiseerde extra meet- en datacommunicatievoorzieningen in de NORDEX-turbine en de beperkte toegankelijkheid van de DOWEC-turbine is later besloten het eerste systeem te installeren in een NORDEX-turbine. Na verdere vertraging in de levering van het eerste systeem is vervolgens besloten van de bestelling van een tweede systeem af te zien.

3.1 Systeemconfiguratie

De basis systeemconfiguratie is weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: Basis configuratie Blad Bewakingssysteem

In elk van de drie bladen wordt zowel de rek als de temperatuur gemeten op vier locaties. De sensoren zijn verbonden met een uitleeseenheid, welke in de rotor is ingebouwd. De rotormodule verstuurt de meetdata naar een module welke is opgesteld in de gondel of in de torenvoet, via wireless LAN. Bovendien wordt in de rotormodule een voorziening opgenomen om alarmen direct via GSM te versturen, zonder tussenkomst van het datacommunicatienetwerk.

De gondelmodule is tevens geschikt voor het meten van turbinedata zoals windsnelheid, vermogen, toerental en bladhoeken. De meetdata, dus zowel de turbineparameters als de bladbelastingen worden als tijd-gesynchroniseerde data in 10-minutenbestanden opgeslagen. Tijdsynchronisatie vindt plaats via een GPS-klok.

In de gondelmodule vindt ook verdere dataverwerking plaats voor informatie naar de gebruiker. De gebruiker heeft via internet toegang tot de gondelmodule.

3.2 Pakket van eisen

Een eerste versie van een programma van eisen voor een blad bewakingssysteem is opgesteld in een voorgaand project, tezamen met andere projectpartners. Gedurende het huidige project zijn deze specificaties aangepast aan de specifieke situatie m.b.t. de turbine (Ref. 1). Het pakket van eisen is samengevat in de tabellen Tabel 3-1, Tabel 3-2, Tabel 3-3 en Tabel 3-4.

Op basis van het pakket van eisen heeft FOS een voorstel voor een systeem gemaakt, dat zoveel mogelijk aan de eisen voldoet en dat binnen het gegeven budget gerealiseerd kon worden. De afwijkingen t.o.v. het pakket van eisen zijn hierbij aangegeven (Ref. 2). In de onderstaande tabellen zijn alleen de afwijkingen aangegeven.

Tabel 3-1: Eisen reksensoren

	Item	Requirement	Supplier specification
1.1	Number of sensors per blade	4 (extendable to 8)	
1.2	Resolution	1 $\mu\epsilon$	5 $\mu\epsilon$, target 1 $\mu\epsilon$
1.3	Accuracy / stability	better than 5 $\mu\epsilon$	20 $\mu\epsilon$, target better than 5 $\mu\epsilon$
1.4	Temperature range	-20 .. +50 degC	
1.5	Frequency	16 Hz	
1.6	Maximum strain level	2000 $\mu\epsilon$ for sensors 1 to 4 (blade root) 4000 $\mu\epsilon$ for sensors 5 to 8 (other locations)	
1.7	Calibration	Remote under supervision	

Tabel 3-2: Eisen temperatuursensoren

	Item	Requirement	Supplier specification
2.2	Number of sensors per blade	4 (extendable to 8)	
2.3	Resolution	0,1 degC	0,5 degC
2.4	Accuracy	better than 0,5 degC	better than 1 degC
2.5	Temperature range	-20 .. +50 degC	
2.6	Frequency	1 Hz	16 Hz
2.7	Calibration	Expansion coefficient estimation based on RMS-method	

Tabel 3-3: Eisen Rotormodule

	Item	Requirements	Supplier specification
3.1	Number of optical lines (bragg gratings)	3x1 for strain. 3x1 for temperatures	3x1 for strain, 3x1 for temperatures or mixed
3.2	Number of sensors in Bragg grating lines	4-8 sensors per line	
3.4	System	Solid state components only	

	Item	Requirements	Supplier specification
3.5	Measurement frequency	16 Hz	
3.6	Storage capacity	one hour	
3.7	Instantaneous warnings/alarms (GSM) (separate phone number per fault condition)	1. Extreme loads (one message per new alarm) 2. Loss of communication 3. Breakage of optical fuse	Function shifted to turbine module
3.8	Data transfer (wireless LAN)	1. 16 Hz time series for strain signals with time stamp 2. 1 Hz time series for temperature signals with time stamp 3. Alarm messages with time stamp 4. Data transmission automatically recovers after network interrupt.	Function shifted to turbine module
3.9	Alarm messages storage	1. Storage of alarms in Blade specific information file (at least last five alarms) 2. Copy of message via wireless LAN to Nacelle Module	Function shifted to turbine module
3.10	Blade specific information file (each blade separately)	1. Start date operation 2. Balance data 3. Weight 4. Centre of Gravity 5. Material properties 6. Temperature coefficient 7. Instantaneous alarms history	Function shifted to turbine module
3.11	Sensor configuration	1. Location co-ordinates of each sensor 2. Sensor parameter file 3. Current calibration values	Function shifted to turbine module
3.12	Calibration data (Blade horizontal)	1. Strain flap wise (blade angle 90 deg) 2. Strain edge wise (blade angle 0 deg) 3. Calibration data	Function shifted to turbine module
3.13	Calibrations history	1. Calibration date / data 2. idem 1 3. idem 2 4. idem 3	Function shifted to turbine module
3.14	Temperature compensation	Strain measurements should be temperature compensated or not temperature compensated (user option)	
3.15	Remote access	1. start / stop / reset 2. uploading programmes, parameters, detection levels, rotor specific information 3. Downloading programmes, parameters, detection levels, measurement data, rotor specific information	
3.16	Watchdog	Watchdog function should be available.	
3.17	System start-up	Automatic start up after power-up	

Tabel 3-4: Eisen Gondelmodule

	Item	Requirements	Supplier specification
4.1	System	System shall be sufficiently robust for operation in the Nacelle	
4.2	Measurement frequency of wind turbine data	16 Hz (minimum)	

	Item	Requirements	Supplier specification
4.3	Information to be stored	1. Time series of measurement data (temperature compensated strain) 2. Time series of wind turbine data 3. All time series will be stored in 10-minute files with one time base. Files will start at multiples of 10 minutes (**.00.00; **.10.00, etc.). Successive files should join seamless. 4. For each of the signals, statistical values (mean, min, max, st.dev.) over the 10-minute period will be calculated and stored in a separate file. 5. Reference data such as IEC-spectra, material properties 6. Blade signature data (copy of Rotor Module) 7. Analysis results 8. Warnings and alarms 9. Event based log files	6. No copy of rotor module
4.4	Storage capacity	1. Time series: 1 year, ring buffer 2. Analysis results: 1 year, ring buffer	
4.5	Data transfer / communication	1. Wireless LAN with Rotor Module 2. Industrial bus (MOD / CAN / ...) or analogue interface for wind turbine data 3. TCP/IP for external communication 4. Communication should recover automatically after network interrupt.	
4.6	Alarm messages to external system (e-mail)	1. Instantaneous alarm messages (copy of SMS rotor module messages, one SMS for new alarm)) 2. Diagnostic information in case of exceeding warning levels, one message for new alarm 3. System life messages each 24 hours for rotor module as well as for nacelle module	1. No copy of rotor module
4.7	Calibration data (Blade horizontal)	1. History of calibration data 2. Copy of calibration data	
4.8	Remote access	1. start / stop / reset 2. uploading programmes, parameters, detection levels. 3. Downloading programmes, parameters, measurement data. 4. Access to Rotor Module	
4.9	System start-up	Automatic start up after power-up	
4.10	Time synchronisation	GPS	

Ten opzichte van de oorspronkelijk opzet geeft de leverancier er de voorkeur aan de rotormodule uitsluitend als meetinstrument te gebruiken en de overige functies zoveel mogelijk in de Gondelmodule op te nemen. Binnen dit project vormt dit geen belemmering, doch voor een commerciële versie kan de oorspronkelijk opzet de voorkeur hebben vanwege uitwisselbaarheid van componenten.

Ten aanzien van de nauwkeurigheid en resolutie lijkt de leverancier niet aan de verwachtingen te kunnen voldoen. Voor de stabiliteit (afwijkingen op de langere termijn) wijkt sterk af.

3.3 Gebruikers interface

De gebruikersinterface is ook geïmplementeerd in de gondelmodule. Volgens het pakket van eisen is bij deze gebruikersinterface gedacht aan de volgende functionaliteiten:

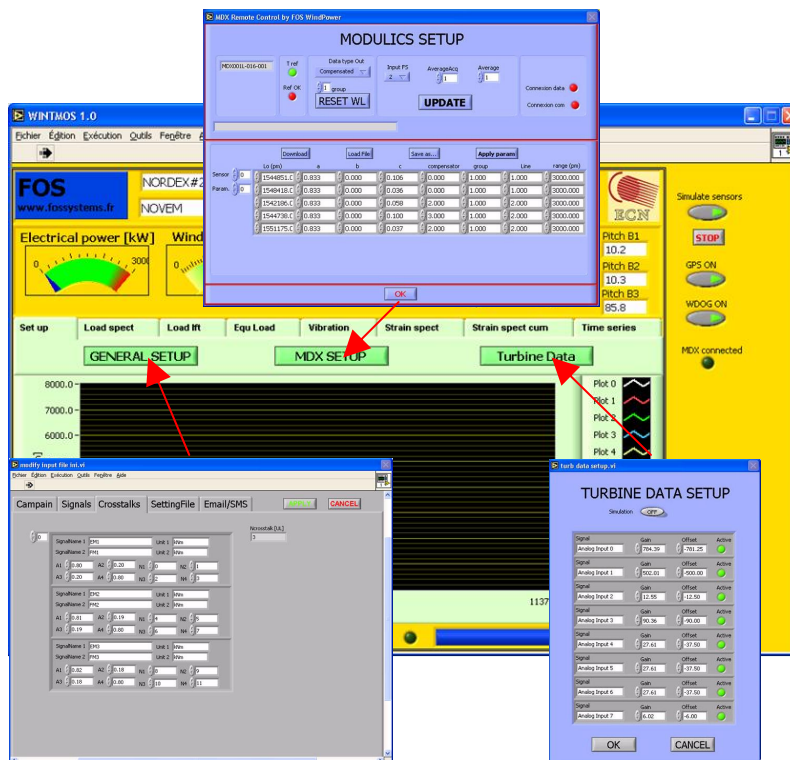
1. Toegang tot de rotormodule via remote access. De rotormodule moet op afstand geconfigureerd kunnen worden en de instellingen moeten uitleesbaar zijn.
2. Toegang tot de turbinemodule via remote access. Het systeem moet volledig op afstand bediend kunnen worden. Alle data dient opvraagbaar te zijn.
3. Calibratiedata dient traceerbaar te zijn vastgelegd. Dit houdt in dat moet worden bijgehouden, wanneer settings zijn aangepast en welke waarden het betreft.
4. De toegang tot het systeem voor verschillende gebruikersgroepen moet voor meerdere niveau's geregeld kunnen worden.
5. De interface moet de resultaten van de signaalanalyses op een gebruikersvriendelijke wijze kunnen presenteren.

Deze functionaliteiten zijn op een zodanige wijze geïmplementeerd, dat voor een prototype aan de doelstelling wordt voldaan. Voor een uiteindelijke commerciële versie is verdere uitbreiding hiervan noodzakelijk.

De presentatie van analyseresultaten is in deze versie beperkt tot de gekalibreerde meetseries, de gecumuleerde belastingsspectra, de restlevensduurbepaling en de frequentiespectra.

3.3.1 Configuratiegegevens

Via de gebruikersinterface kunnen alle configuratiegegevens worden ingevoerd. De hiervoor gebruikte schermen zijn in Figuur 3-2 weergegeven.

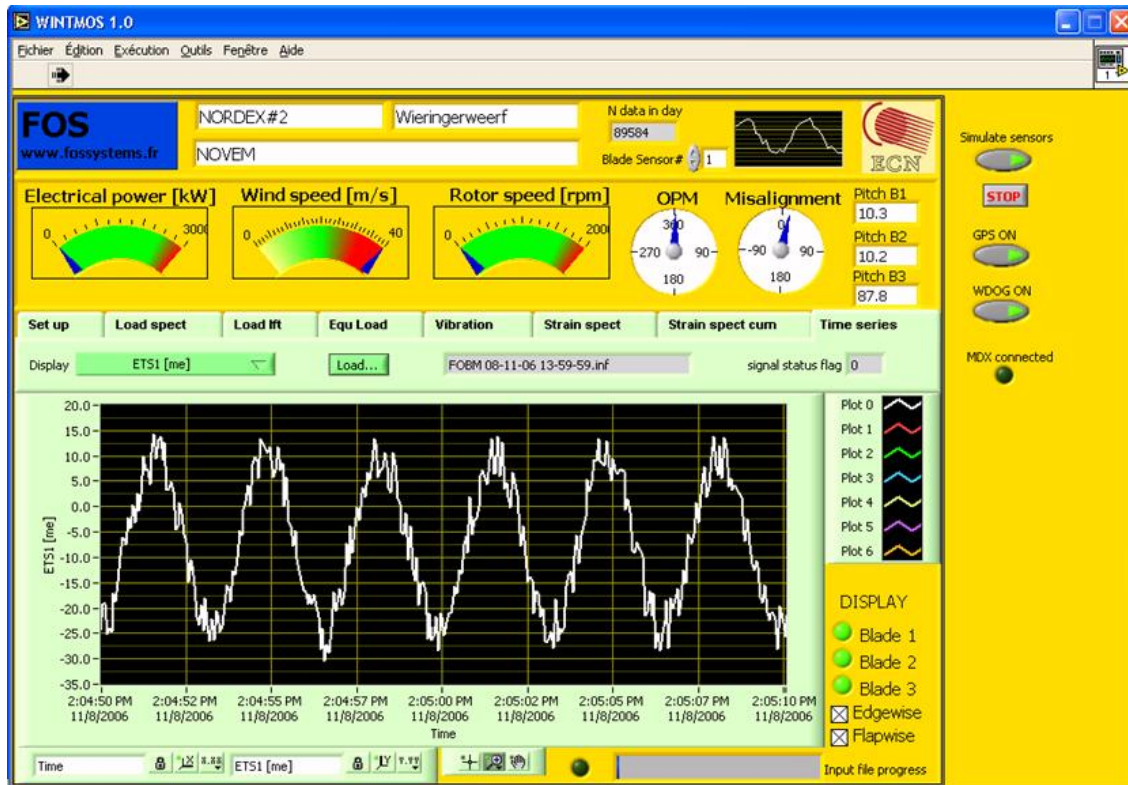


Figuur 3-2: Gebruikersinterface systeemconfiguratie

De algemene set-up bevat een aantal tabbladen waarin gegevens betreffende de calibratie, de turbine en communicatie zijn opgenomen. Op deze wijze kunnen alle gegevens online worden aangepast. Telkens wanneer updates worden uitgevoerd, worden van de corresponderende files nieuwe versie aangemaakt, waardoor de wijzigingen traceerbaar blijven.

3.3.2 Time series

Via het rechter tabblad kunnen de gemeten signalen zichtbaar worden gemaakt op het scherm (Figuur 3-3).



Figuur 3-3: Presentatie tijdseries

Via een menu kan het signaal worden geselecteerd en via een zoom-functie kan een deel van de tijdserie nader worden bekeken. In Figuur 3-3 is een tijdserie weergegeven van de rek in edge richting, gemeten aan de zijde van de trailing edge.

3.3.3 Presentatie analyseresultaten

Naast de twee voorgaande functies, kunnen via de ander tabbladen analyseresultaten zichtbaar worden gemaakt. Vanwege een voortijdig falen van het systeem zijn hiervan geen afbeeldingen beschikbaar. De volgende grafische schermen zijn hierbij voorzien:

1. Loadspectrum
2. Loadspectrum over de levensduur
3. Equivalente belastingen
4. Trillingsanalyses
5. Strain spectrum
6. Strain spectrum cumulatief

3.4 Afnametesten

Voorafgaande aan het inbouwen van het systeem in de turbine heeft een afnametest plaatsgevonden. Hiervoor is in overleg met de leverancier een testprotocol overeengekomen en is een testopstelling samengebouwd (zie Figuur 3-4).



Figuur 3-4: Testopstelling

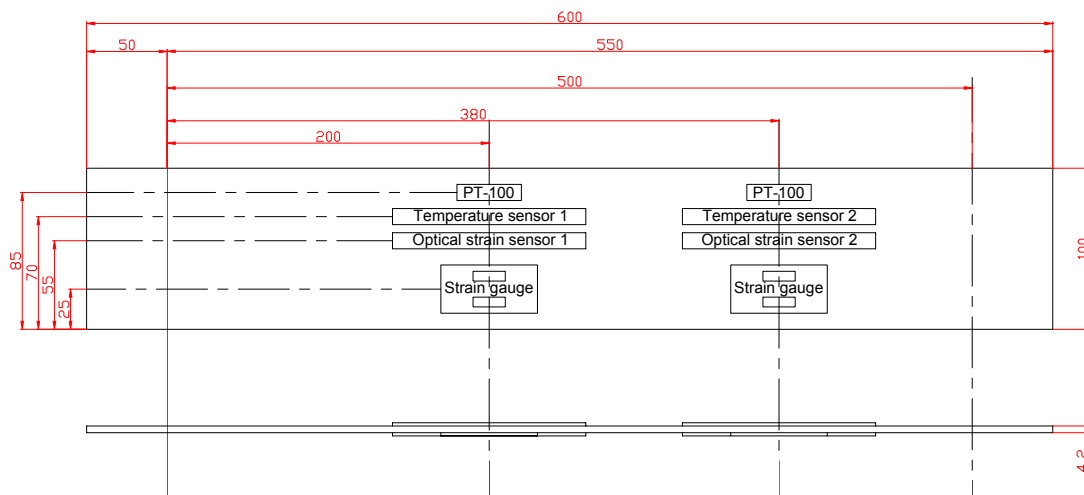
De testopstelling bestaat uit:

1. Rotor module
2. Turbine module
3. GPS klok
4. Monitor
5. Excitator met GRP-strip
6. Interfacevoorzieningen

De excitator is speciaal voor dit doel opgebouwd. In deze excitator kan een teststrip aan één zijde worden ingespannen en aan de andere zijde worden geëxciteerd. Zowel de amplitude als de slingerfrequentie zijn instelbaar.

De GRP-teststrip is voorzien van (zie Figuur 3-5 en Figuur 3-6):

1. 4 Bragg sensoren voor rekmeting (2 maal voorzijde, 2 maal achterzijde)
2. 4 Bragg sensoren voor temperatuurmeting (2 maal voorzijde, 2 maal achterzijde)
3. 2 PT-100 temperatuuropnemers
4. 4 Klassieke rekstrookjes (2 maal voorzijde, 2 maal achterzijde)



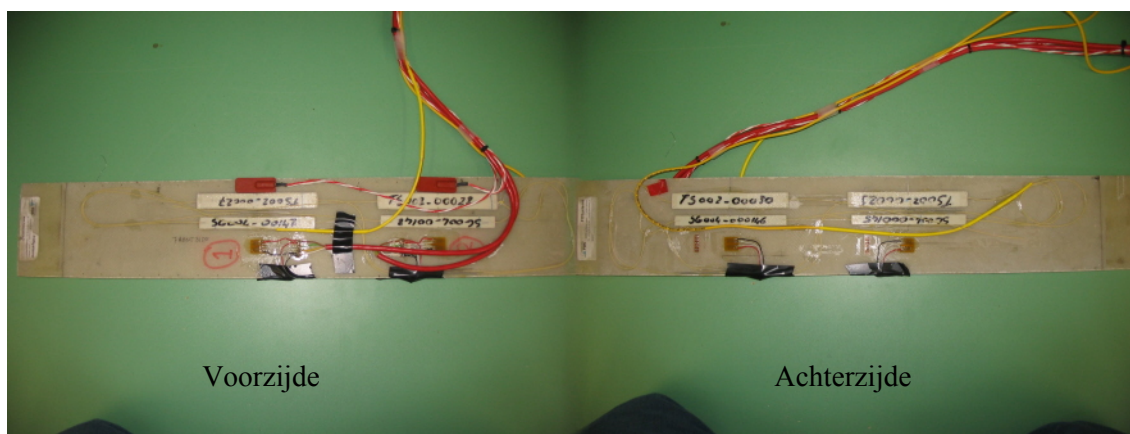
Figuur 3-5: Teststrip (aluminium en GRP)

De locaties van de reksensoren op de strip, de dikte van de strip en de amplitude aan het uiteinde van de strip, zijn zodanig gekozen dat een representatieve rek wordt gemeten.

Tabel 3-5: GRP-teststrip

Strip properties		
I_{strip}	6,17E-10	m^4
E_{grp}	3,00E+10	N/m^2
Displacement at 0,5 m	0,06	m
Strain at 0,2 m	850	$\mu\epsilon$
Strain at 0,38 m	340	$\mu\epsilon$

De Bragg sensoren worden via de rotormodule aangesloten op de gondelmodule. De PT-100 sensoren en de klassieke rekstrookjes worden via de analoge kanalen direct op de gondelmodule aangesloten. Op deze wijze kan een goede onderlinge vergelijking worden gemaakt.



Figuur 3-6: GRP teststrip voor excitator

Naast de kunststof teststrip is tevens gebruik gemaakt van een aluminium teststrip met uniforme en bekende materiaaleigenschappen (zie Figuur 3-7). De aluminium strip kan op twee manieren worden gebruikt:

1. De strip kan eenzijdig worden ingeklemd en aan de andere zijde een gedefinieerde uitwijking worden gegeven. Vanwege de uniforme materiaaleigenschappen kunnen de rekken nauwkeurig worden gemeten en berekend.

2. De aluminium strip kan in zijn geheel worden verwarmd. Bij een uniforme temperatuurverdeling en een bekende uitzettingscoëfficiënt kan de rek bij een bepaalde temperatuurverandering worden berekend en worden vergeleken met de gemeten waarde. Een temperatuurverandering van 30 °C komt overeen met een rek van ca. 700 $\mu\epsilon$.

De aluminium teststrip is voorzien van dezelfde sensoren en de locaties van de sensoren zijn gelijk gekozen. Alleen de materiaaldikte is afwijkend.

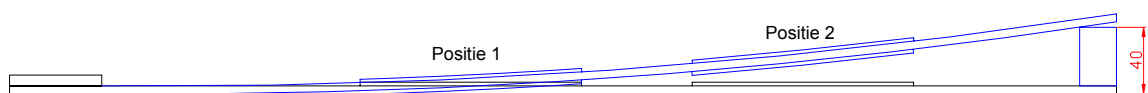


Figuur 3-7: ALU teststrip voor statische test

3.5 Resultaten

3.5.1 Aluminium strip

De aluminium strip is eenzijdig ingeklemd, terwijl het andere uiteinde wordt opgelegd op een blokje van 2 resp. 4 cm hoog.



Figuur 3-8: Aluminium strip, éénzijdig ingeklemd.

De meetresultaten voor de reksensoren zijn weergegeven in Tabel 3-6. De resultaten laten zien dat de gemeten rekken van zowel de optische sensoren als van de klassieke rekstrookjes redelijk in overeenstemming zijn met de berekende waarden.

Tabel 3-6: Meetresultaten rek bij eenzijdige inklemming

Meting na calibratie (Gain=420)						
	2 cm	4 cm	Range		Berekend	
SA1	182	372		190	199	$\mu\epsilon$
SA2	-171	-81		90	91	$\mu\epsilon$
SAF1	185	367	182	185.75	199	$\mu\epsilon$
SAB1	79.5	-110	-189.5			$\mu\epsilon$
SAF2	173.5	263	89.5	90.75	91	$\mu\epsilon$
SAB2	121	29	-92			$\mu\epsilon$

SA1/2 : Klassieke rekstrookjes op posities 1 en 2

SAF1/2 : Optische rekstrookjes aan de voorzijde van de strip op posities 1 en 2

SAB1/2 : Optische rekstrookjes aan de achterzijde van de strip op posities 1 en 2

Voor de beoordeling van de temperatuursensoren zijn de gemiddelde waarden bepaald over tijdseries van 10 minuten. Hierbij zijn tijdseries geselecteerd, waarbij de temperatuur vrijwel constant is geweest. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-7

Tabel 3-7: Metingen temperatuursensoren op basis van gemiddelde waarden aluminium strip

Sensor	Mean value behaviour	Mean values	Remark
TA1	Constant	22,4	Estimated temperature: 22,7 °C
TA2	Constant	23,0	
TAB1	Constant	21,3	Out of spec
TAB2	Constant	23,3	
TAF1	Constant	22,8	
TAF2	Constant	26	Out of spec

TA1/2 : PT-100's op positie 1 en 2

TAB1/2 : Optische temperatuursensoren aan achterzijde strip op posities 1 en 2

TAF1/2 : Optische temperatuursensoren aan voorzijde strip op posities 1 en 2

Van de 4 sensoren voldoen er 2 niet aan de specificatie. M.n. sensor TAF2 geeft een afwijking van meer dan 3 graden.

3.5.2 GRP strip

De GRP strip is opgespannen in de excitator. Op basis van 10-minuten tijdseries zijn de gemiddelde waarden van de temperatuursensoren bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-8.

Tabel 3-8: Metingen temperatuursensoren op basis van gemiddelde waarden GRP strip

Sensor	Mean value behaviour	Mean values	Remark
TC1	Constant	22,1	Estimated temperature: 22,3 °C
TC2	Constant	22,4	
TCB1	Constant	22,6	
TCB2	Constant	121	Out of spec
TCF1	Constant	21,4	
TCF2	Constant	18,8	Out of spec

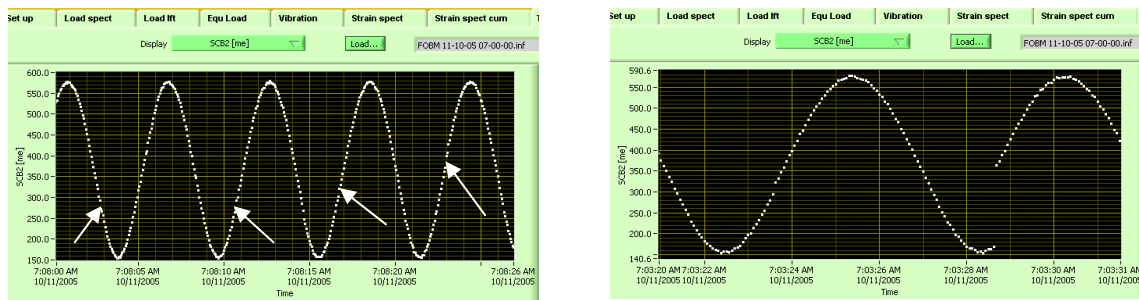
TC1/2 : PT-100's op positie 1 en 2

TCB1/2 : Optische temperatuursensoren aan achterzijde strip op posities 1 en 2

TCF1/2 : Optische temperatuursensoren aan voorzijde strip op posities 1 en 2

Op basis van de metingen blijkt dat twee sensoren niet aan de specificaties voldoen. Met name sensor TCB2 vertoont een grote afwijking. Een temperatuurafwijking van 1 graad voor de optische fiber komt overeen met $\approx 10 \mu\epsilon$. Bij rated vermogen ligt de bladdoorbuiging t.g.v. het aandrijvende koppel in de orde van $50 \mu\epsilon$. De onderlinge temperatuurverschillen voor de verschillende meetlocaties kunnen oplopen tot ca. 10°C .

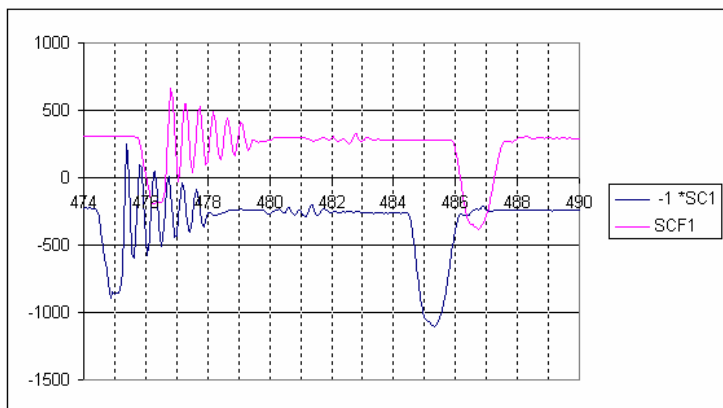
Nadere analyse van de tijdseries laat zien dat de signalen discontinuïteiten bevatten. Deze discontinuïteiten wijzen op synchronisatieproblemen van de tijdseries. Figuur 3-9 laat hiervan enkele voorbeelden zien.



Figuur 3-9: Tijdsreeksen / discontinuïteiten

De tijdsignalen laten zien dat veelal kleine faseverschuivingen in het signaal voorkomen. Voor de signaalanalyse betekent dit dat hoogfrequente signaalveranderingen worden geïntroduceerd, welke m.n. de cumulatieve spectra zullen verstoren.

Naast de discontinuïteiten in de signalen zelf, is uit de analyse van de meetsignalen ook naar voren gekomen dat de analoge metingen (turbinesignalen) en de rekmetingen afkomstig van de rotormodule onderling een faseverschuiving laten zien (zie Figuur 3-10).



Figuur 3-10: Faseverschuiving meetsignalen

De faseverschuiving bedraagt in dit voorbeeld meer dan 1 seconde, hetgeen groter is dan gespecificeerd.

3.6 Besluit

Op basis van de testresultaten kon het systeem niet worden afgenomen. De volgende redenen waren hierin doorslaggevend:

1. Gedurende de looptijd van de afnametesten is de bedrijfszekerheid van het systeem niet aangetoond. De maximale aaneengesloten meetperiode bleef beperkt tot 4 dagen. Daarna was een herstart steeds noodzakelijk.
2. De 10-minutenfiles vertoonden steeds discontinuïteiten. Waarschijnlijk is dit te wijten aan synchronisatieproblemen.
3. De temperatuurmetingen vertoonden te grote afwijkingen, waardoor een goede temperatuurcompensatie niet mogelijk is gebleken.
4. De mechanische uitvoering van de rotormodule was niet in overeenstemming met de rotorcondities.

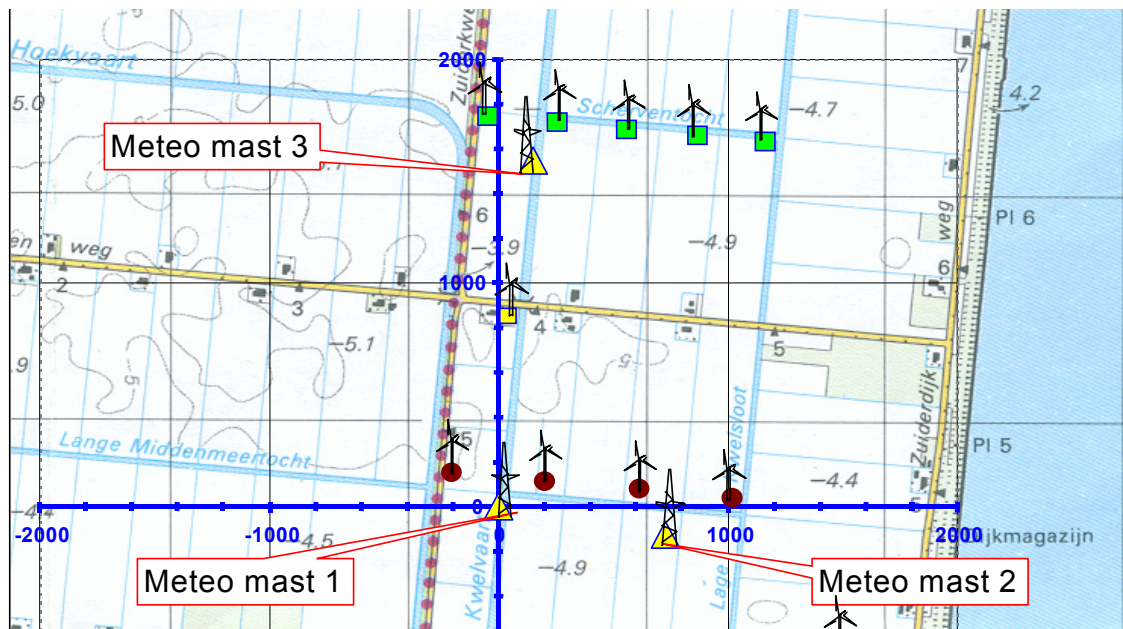
Daarnaast zijn afwijkingen van de specificaties vastgesteld, welke niet direct belemmerend zijn voor het veldexperiment. Op grond van de resultaten uit de afnametest is besloten tot formele afname van het systeem nadat gedurende een half jaar aantoonbaar goed heeft gefunctioneerd. Hiervoor zijn onder meer de volgende eisen met de leverancier overeengekomen:

- Het systeem dient over de periode van een half jaar aaneengesloten goed functioneren waarbij de metingen aan de specificaties voldoen (vrij van spikes, nauwkeuringheid en reproduceerbaarheid, synchronisatie). Dit geldt m.n. ten aanzien van de temperatuur en de rek.
- De metingen moeten tenminste 134 tijdseries per dag opleveren, waarbinnen alle signalen aan de specificaties voldoen.
- Daarnaast zijn nog een aantal installatie technische aspecten overeengekomen.

4. Installatie in NORDEX-5

Het Blad Bewakingssysteem is geïnstalleerd in één van de Nordex windturbines (in Figuur 4-1 aangegeven met een groene stip) op het testveld EWTW. Gekozen is voor de meest westelijke turbine (NORDEX-5). Op de tweede turbine van deze rij (NORDEX-6) worden reeds belastingsmeting uitgevoerd m.b.v. koperen rekstrookjes. NORDEX-5 was de meest aantrekkelijke optie voor installatie van het bladbewakingssysteem vanwege:

- De meest gunstige ligging t.o.v. de voorkeurswindrichting
- De directe nabijheid van NORDEX-6, hetgeen enig vergelijk van belastingsmetingen mogelijk maakt.
- De directe nabijheid van meetmast 3
- De reeds geïnstalleerde voorzieningen in de turbine.



Figuur 4-1: Testveld EWTW

De installatie van het Blad Bewakingssysteem omvat de volgende activiteiten:

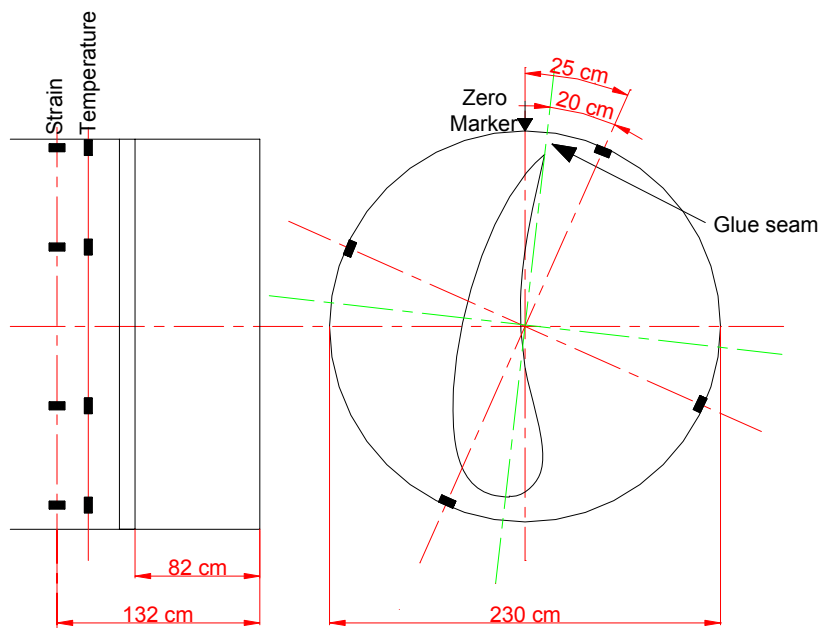
1. Bepaling van de locatie van sensoren
2. Voorbereiding van sensorlijnen, rotormodule en turbinemodule
3. Installatie sensoren / rotor module / turbine module
4. Testen van het systeem

4.1 Bepaling van locatie van de sensoren

De bladbelastingen worden altijd berekend in de flap- en klap-richting. De rekstrookbruggen worden bij voorkeur aangebracht in deze richtingen, doch ook op een locatie waar de materiaaleigenschappen redelijk homogeen zijn, waar de bladdoorsnede een cilindrische vorm heeft en waar zich geen andere obstakels bevinden.

De locaties van de sensoren zijn gekozen conform NORDEX-6:

- Afstand tot flens: 132 cm
- 10. graden clockwise t.a.v. lasnaad.



Figuur 4-2: Positie rek- en temperatuursensoren

Op locatie zijn de plaatsen voor de sensoren afgetekend, op basis waarvan de benodigde sensorlijnen konden worden voorbereid (volgorde van sensoren binnen de lijnen en de afstanden tussen de sensoren). Lokale splicing (verbinden van glasfibers) is niet overwogen.

4.2 Voorbereiding en installatie van sensorlijnen en rotormodule

Voor de plaatsing van de rotormodule is een ondersteuningsconstructie gemaakt, zodat een goede opsluiting tijdens langdurig bedrijf is gewaarborgd. Tevens zijn een aantal mechanische aanpassingen uitgevoerd intern in de rotormodule om schade t.g.v. van lostrillen te voorkomen. De sensorlijnen zijn allen vooraf door de leverancier op maat gemaakt. Voor het aanbrengen van de instrumentatie waren 3 mandagen noodzakelijk. Hierbij aangetekend dat het personeel geen ervaring had met werken in windturbines.

Ondanks deze voorbereiding moet achteraf worden vastgesteld dat er voor installatieaspecten meer aandacht nodig is. Een aantal problemen zijn geheel of gedeeltelijk terug te voeren op fouten tijdens de installatie:

1. De locaties waarop de sensoren zijn bevestigd, zijn niet voldoende vlak om verzekerd te zijn van een goed reproduceerbare meting. Onervarenheid met dit type sensoren voor deze toepassing is hiervan de oorzaak.
2. De temperatuursensoren zijn niet consequent in dwarsrichting geplakt. Ter voorkomen van strain modulatie op het temperatuursignaal moeten deze sensoren bij voorkeur worden aangebracht in de richting waarin de rek minimaal is. Vooraf was hiermede geen rekening gehouden omdat strain modulatie niet was voorzien en ook niet acceptabel is.



Figuur 4-3: Strain sensor (evenwijdig blad-as) en temperatuur sensor (loodrecht blad-as)

4.3 Installatie turbinemodule

Het installeren van de turbinemodule omvatte:

1. Aansluiting van GPS-klok
2. Aansluiting W-LAN
3. Aansluiting turbinesignalen
4. Aansluiting en instellingen van de communicatievoorzieningen

Voor de tijdsynchronisatie is een GPS-clock geïnstalleerd. Voor de communicatie tussen de rotor module en de turbine module wordt gebruik gemaakt van een reeds aanwezige WLAN-voorziening.

De turbine signalen zijn in analoge vorm beschikbaar via een meetbox, welke reeds als extra voorziening in de NORDEX-turbine beschikbaar was.

De turbine module is aangesloten op het lokale netwerk, hetgeen gekoppeld is met het ECN-netwerk. Dit betekent dat het systeem vanuit ECN direct bereikbaar is voor alle functies. Communicatie van buiten ECN is niet mogelijk vanwege strikte veiligheidsmaatregelen m.b.t. het ECN-netwerk.

4.4 Besluit

De tijd benodigd voor de installatie van de optische rekstrookjes is vergelijkbaar met de tijd die nodig is voor het installeren van conventionele rekstrookjes. Vanwege gebrek aan ervaring in combinatie met de matige omstandigheden (korte dagen, temperatuur onder nul) heeft de installatie langer geduurd dan strikt noodzakelijk was.

Na installatie is gebleken dat tijdens het aanbrengen niet voldoende nauwkeurig te werk is gegaan. Voor de reksensoren is de voorbehandeling van het bladmateriaal onvoldoende geweest. Tevens zijn de temperatuursensoren niet consequent in één richting aangebracht. Temperatuursensoren moeten ongevoelig zijn voor de rek en de oriëntatie zou dan ook geen invloed mogen hebben. In de gegeven omstandigheden zou het beter zijn geweest de sensoren aan te brengen in een richting waarin de rek minimaal is.

5. Bedrijfservaring

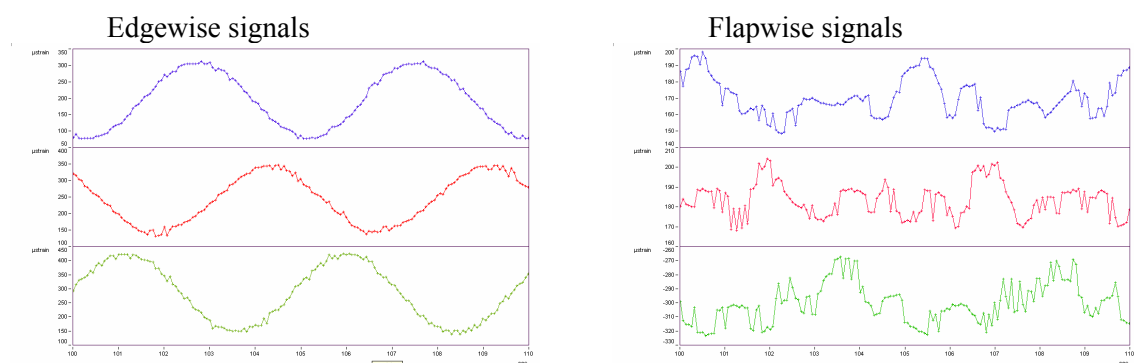
Na installatie van het systeem en het verhelpen van een aantal setting-problemen, hebben zich de volgende gebeurtenissen voorgedaan:

1. Een aantal sensoren bleken niet juist bevestigd. Hiervoor waren reparaties na twee weken bedrijf noodzakelijk. Het falen wordt geweten aan onjuiste keuze van lijm en onvoldoende preparatie van de locaties waar de sensoren geplakt moesten worden.
2. De bedrijfszekerheid van het systeem was onvoldoende. Een aaneengesloten meetperiode is niet langer geweest dan 4 dagen. Na een reset van de turbinemodule herstartte het systeem aanvankelijk weer. Na enkele herstarts functioneerde het systeem niet meer goed.
3. Na een totale meetperiode van 14 dagen deed zich een storing voor in de turbinemodule. Hiervoor was gedeeltelijke vervanging noodzakelijk.

Gezien de beperkte beschikbaarheid van het systeem is besloten de metingen definitief af te breken en geen verdere reparaties aan het systeem uit te voeren.

5.1 Analyse van meetdata

Gedurende een periode van 14 dagen zijn metingen uitgevoerd. Deze metingen zijn nader geanalyseerd.



Figuur 5-1: Edgewise and flapwise strain signals

De edgewise signalen worden beheerst door een sinuscomponent met een faseverschuiving van 120 deg, welke voortkomt uit het eigengewicht van de bladen gedurende de rotatie van de rotor. Verder vertonen de signalen een redelijk continu karakter. De beperkte resolutie (10 $\mu\epsilon$) veroorzaakt echter wel dat het signaal niet “glad” is.

Daar de drie bladen vrijwel identiek zijn en de locaties van de sensoren op de bladen gelijk is, wordt verwacht dat de ranges op de overeenkomende locaties ongeveer gelijk zijn. De resultaten zijn in de onderstaande tabel weergegeven.

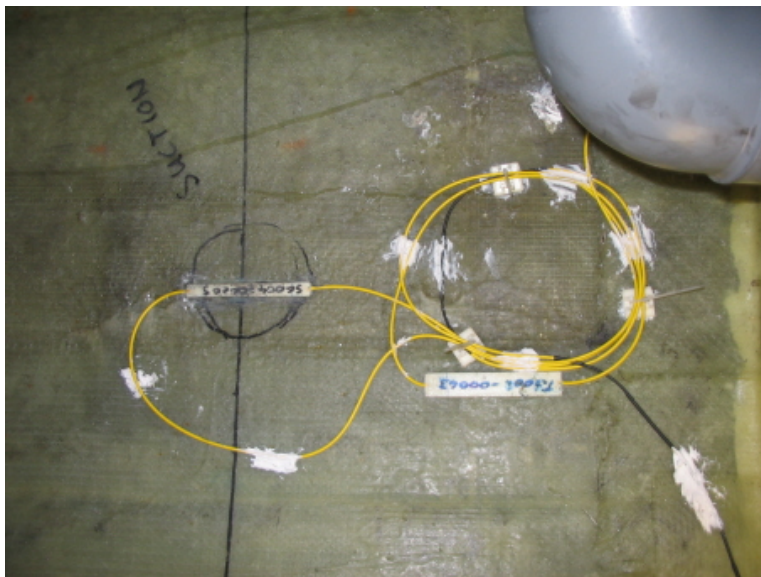
Tabel 5-1: Onderlinge vergelijking gemeten ranges

Location	Signal	Range [$\mu\epsilon$]	Difference [$\mu\epsilon$]
Edgewise leading	ELS1	252	81
	ELS2	231	
	ELS3	311	
Edgewise trailing	ETS1	433	60
	ETS2	380	
	ETS3	373	
Flap compression	FCS1	116	58
	FCS2	91	
	FCS3	149	
Flap suction	FSS1	141	42
	FSS2	106	
	FSS3	148	

Anders dan verwacht zijn de onderlinge verschillen tussen de drie bladen erg groot. Omdat de proeven met de sensoren tijdens de afnametest geen grote onderlinge verschillen in range lieten zien, zal de oorzaak hiervan waarschijnlijk niet in de sensor zelf of de bevestiging ervan moeten worden gezocht. Mogelijke oorzaken zijn:

1. Kleine afwijkingen in de locatie van de sensoren in de nabijheid van verstevigingen kunnen verschil in rek laten zien.
2. Het materiaal zelf kan niet als isomorf worden beschouwd.
3. De locaties zijn niet voldoende voorbereid, waardoor de invloed van de aanhechting zeer verschillend kan zijn.

In Figuur 5-2 is te zien dat de structuur van het materiaal niet als homogeen kan worden beschouwd en dat de oppervlaktebehandeling beter kan worden uitgevoerd.

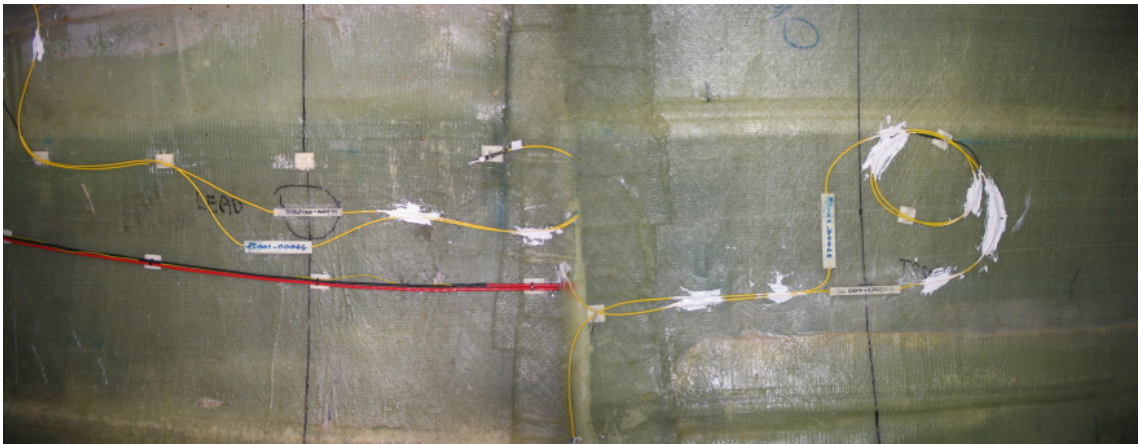


Figuur 5-2: Installatie rek- en temperatuursensor

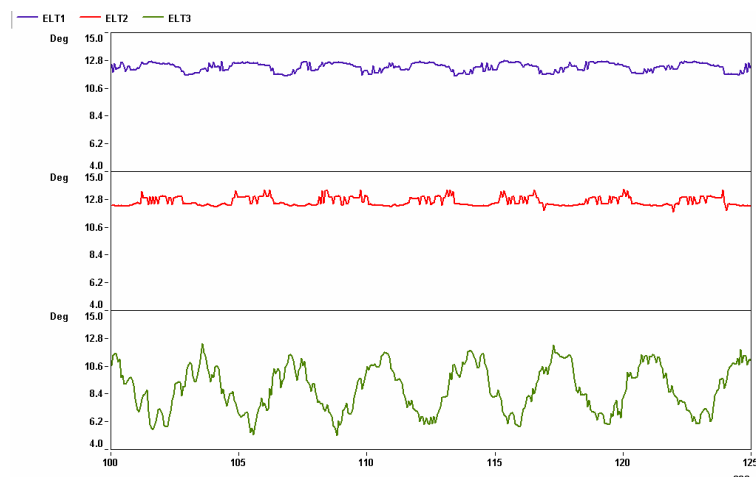
De grote afwijkingen in de gemeten rekken hebben tot gevolg dat de metingen niet bruikbaar zijn voor de bepaling van de restlevensduur. Voor het bepalen van de restlevensduur is een representatieve rekmeting noodzakelijk.

De huidige uitvoering zijn de temperatuursensoren vaak ook gevoelig van de rek (zie Figuur 5-4). Om de gevolgen hiervan te beperken, kunnen de temperatuursensoren daarom beter in de

torsierichting van het blad worden geplakt. Bij installatie is echter in twee verschillende richtingen geplakt! (zie Figuur 5-3)



Figuur 5-3: Temperatuursensoren in 2 richtingen geplakt



Figuur 5-4: Voorbeeld van rekmodulatie op temperatuursignaal

De temperatuursignalen geven ook geen continu signaal. Als gevolg van de beperkte resolutie, springt het signaal voortdurend naar een ander niveau. Wanneer dit signaal dan ook onbewerkt voor temperatuurcompensatie van het reksignaal wordt gebruikt, dan wordt hierdoor extra ruis geïntroduceerd. Daar het temperatuursignaal slechts langzaam in de tijd verandert, kan voor de temperatuurcompensatie gebruik worden gemaakt van de 10-minuten gemiddelde waarde. De ongewenste effecten van de modulatie van het reksignaal wordt hierdoor ook vermeden.

Naast modulatie van de rek op het temperatuursignaal, is ook gekeken naar de gemiddelde waarden. In Tabel 5-2 zijn de resultaten voor 2 tijdseries weergegeven.

Tabel 5-2: Gemeten temperaturen op verschillende bladlokaties

Location	Signal	Signal 1		Signal 2	
		Mean [°C]	Difference [°C]	Mean [°C]	Difference [°C]
Edgewise leading	ELT1	12.2	3.8	5.7	5.5
	ELT2	12.5		2.6	
	ELT3	8.7		0.2	
Edgewise trailing	ETT1	18.5	4.5	7.3	3.8
	ETT2	16.5		7.0	
	ETT3	13.9		3.5	
Flap compression	FCT1	12.5	0.4	3.2	2.4
	FCT2	12.4		5.6	
	FCT3	12.1		3.7	
Flap suction	FST1	15.8	4.9	3.1	1.5
	FST2	10.9		3.3	
	FST3	13.5		1.8	

De afwijkingen in de gemeten temperaturen zijn zodanig dat deze niet bruikbaar zijn voor temperatuurcompensatie. Omdat bovendien de afwijkingen voor verschillende tijdseries niet dezelfde zijn, kan geen correctie d.m.v. een offset worden uitgevoerd.

5.2 Besluit

Op basis van het gebruik van het systeem en nadere analyse van de meetdata kan het volgende worden geconcludeerd:

- De reksignalen hebben veel ruis in vergelijking met reksignalen van conventionele rekstrookjes. Daarnaast is de gemeten rek waarschijnlijk niet representatief voor de heersende rek.
- De temperatuurmetingen zijn zodanig dat deze niet voor temperatuurcompensatie gebruikt kunnen worden. Naast rekmodulatie is ook een (niet constante) offset vastgesteld.
- Het meetsysteem is onbetrouwbaar.
- De negatieve eigenschappen zijn niet inherent aan de toegepaste technologie en kunnen met de juiste maatregelen worden opgelost:
 - De bevestiging van de reksensoren kan sterk worden verbeterd
 - Temperatuursensoren dienen in een neutrale richting te worden aangebracht
 - De temperatuurmetingen kunnen over een langere tijd worden gefilterd.
 - Herontwerp van de thermische sensoren gericht op mechanische ontkoppeling en verbeterd thermisch contact.

6. Diagnostische software

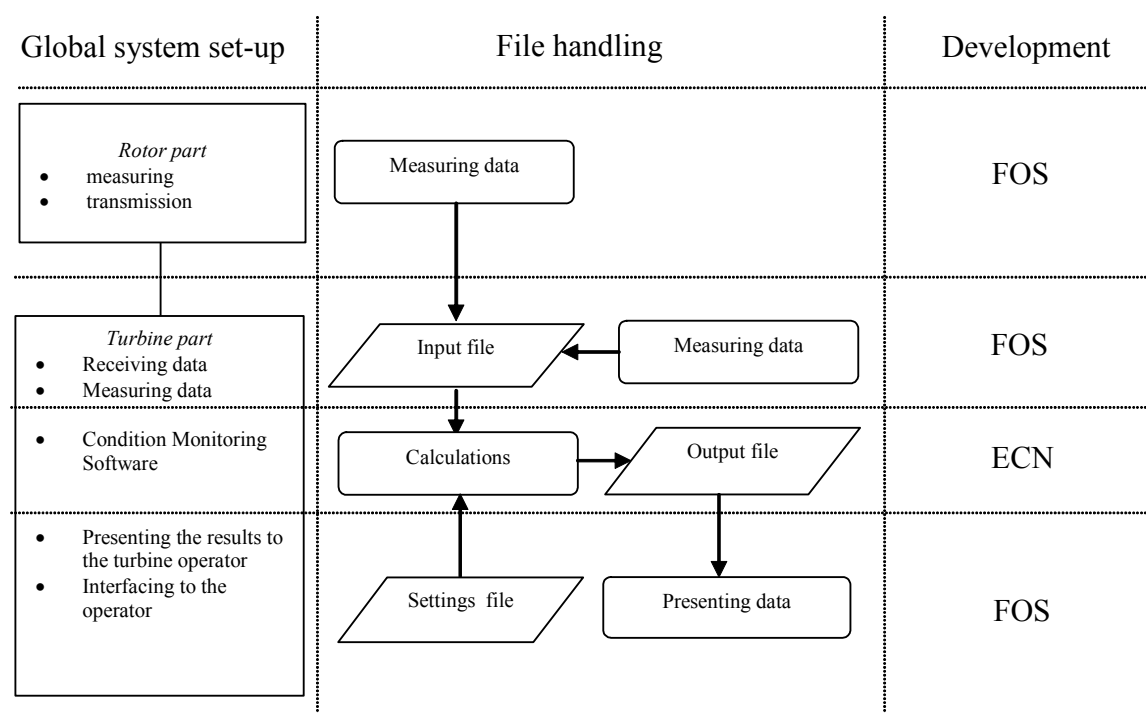
In het huidige monitorsysteem is een initiële versie van een analysemodule geïnstalleerd met de volgende functionaliteiten:

1. Calculation of cumulative load spectrum
2. Calculation of loadspectrum for turbine lifetime
3. Calculation of equivalent loads of time serie and mean value
4. Fatigue damage calculation
5. FFT's

Bij de installatie gaat het om een initiële versie, welke gedurende het project verder ontwikkeld zou gaan worden.

6.1 Beschrijving analyse module (DLL): oorspronkelijke opzet.

De ontwikkeling van de diagnostische software is opgezet binnen het kader zoals is aangegeven in onderstaande figuur.



Figuur 6-1: Analyse software binnen meetsysteem

Het meetsysteem verzamelt data van de rotormodule en de turbine en slaat deze op in 10-minuten files (input files). Naast de inputfiles met meetdata, maakt de analyse software gebruik van configuratiegegevens (bijv. calibratiefactoren), welke in een settings file worden verzameld. Op basis van de settingsfile en de inputfiles worden bewerkingen uitgevoerd waarvan de resultaten in een outputfile worden verzameld. Elke 10 minuten wordt een nieuwe outputfile aangemaakt. De gebruikersinterface presenteert de analyseresultaten voor de gebruiker.

6.2 Resultaten

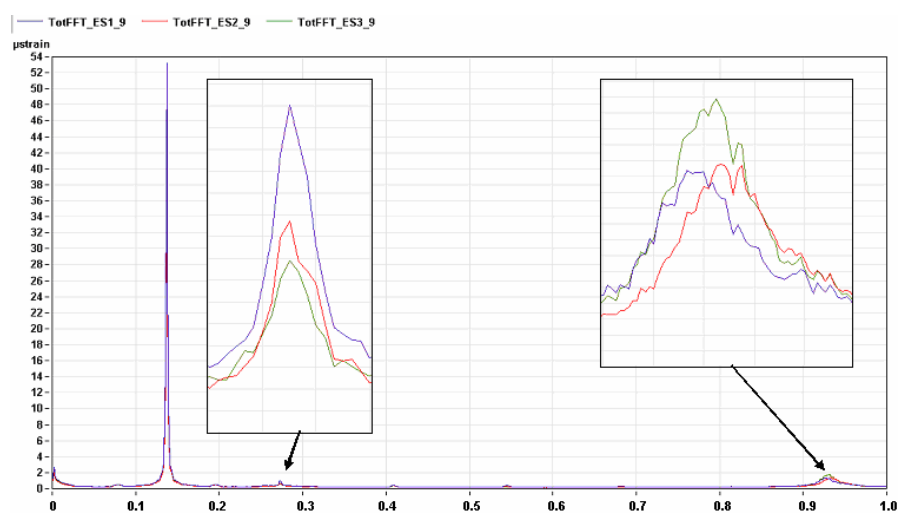
De analyse module functioneert binnen de omgeving van het monitoring systeem. Gedurende het project was het niet mogelijk uitgebreide ervaring met het systeem op te doen, vanwege de beperkte beschikbaarheid. Voor verdere ontwikkeling is dan ook gebruik gemaakt van andere meetdata, welke van een andere NORDEX-turbine over een langere periode beschikbaar was. In hoofdstuk 7 wordt hierop nader ingegaan.

7. Meetdata

7.1 Data analyse van optische metingen

Van de optische meetdata is slechts een zeer beperkte set beschikbaar. Daarom konden slechts frequentieanalyses worden uitgevoerd. Bij de analyses is alleen gebruik gemaakt van tijdseries waarbij de turbine in bedrijf was en waarbij geen bladverstelling plaatsvond. Tevens wordt de eis gesteld dat alle reksignalen gedurende de tijdseries beschikbaar waren.

Omdat het hier een windturbine betreft met een variable toerental, is de analyse uitgevoerd per windsnelheidsklasse. Voor iedere windsnelheidsklasse zijn FFT's berekend en vervolgens is daarvan een gemiddelde waarde berekend. Het resultaat hiervan is voor één windsnelheidsklasse weergegeven in Figuur 7-1.

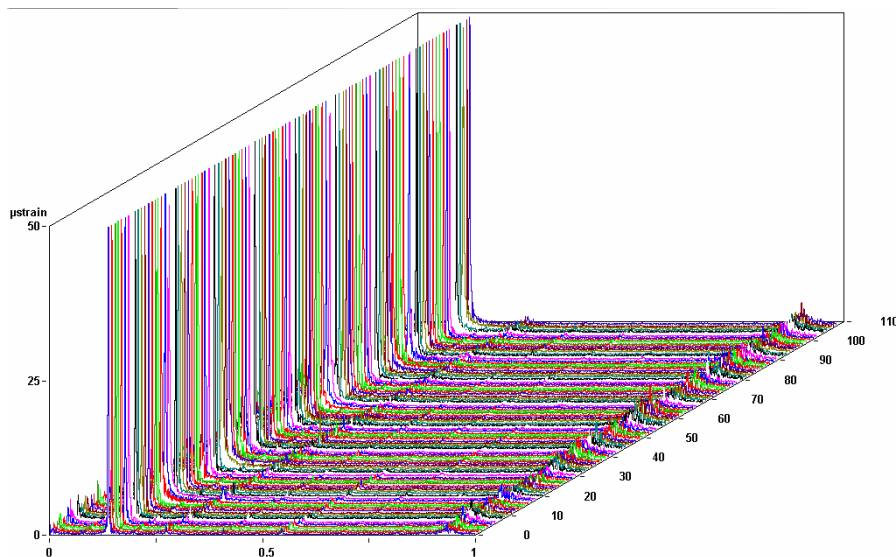


Figuur 7-1: FFT edgewise rek voor windsnelheidsklasse 9 (9 tot 10 m/s) voor drie bladen¹

De 1-p frequentie is voor alle drie bladen gelijk. De eigenfrequentie van de bladen ligt in dezelfde orde als de opgave van de fabrikant (afwijking < 4 %). Deze eigenfrequenties vertonen een klein verschil tussen de drie bladen (ten opzichte van blad 1, ligt de eigenfrequentie van blad 2 0,7% hoger, blad 3 0,38% hoger), hetgeen waarneembaar is via het optische meetsysteem.

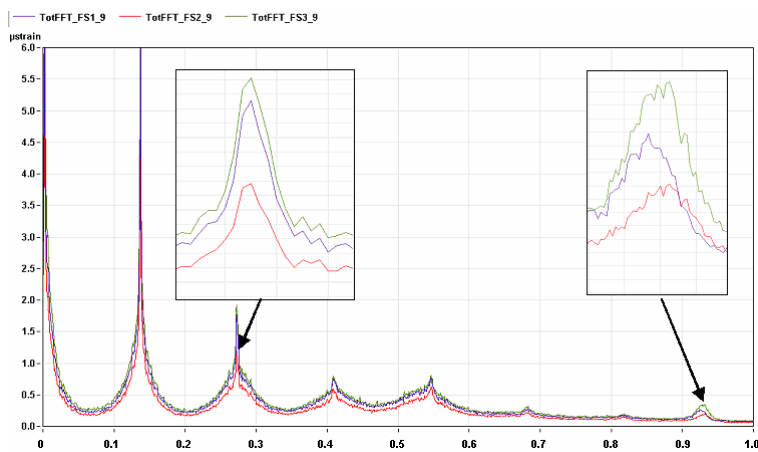
Ter controle zijn tevens waterfallplots gemaakt (zie figuur Figuur 7-2). Aan de hand hiervan kan worden vastgesteld of er meetseries zijn die in de loop van de tijd gaan afwijken van de voorgaande meetseries. Dit zou kunnen wijzen op verandering van het systeemgedrag. Hiervoor is een langere meetperiode vereist.

¹ De frequenties zijn geschaald weergegeven



Figuur 7-2: Rainfall plot voor blad 1, edgewise rek, windsnelheidsklasse 9²

Voor de flap richting is dezelfde analyse uitgevoerd (zie Figuur 7-3 en Figuur 7-4). Ook hier geldt dat 1-p en hogere toerental afhankelijke frequenties voor de drie bladen samenvallen. De eigenfrequenties kunnen ook in de flaprichting worden gemeten en zijn ten opzichte van elkaar zijn verschoven (T.o.v. blad 1 ligt de eigenfrequentie van blad 2 0.54% hoger, van blad 3 0.27%).

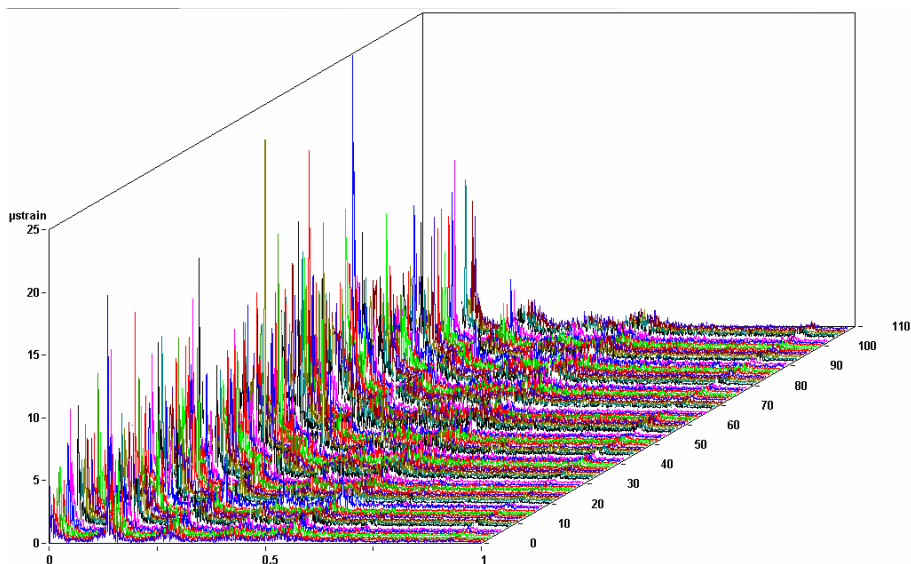


Figuur 7-3: FFT flap wise rek, windsnelheidsklasse 9, drie bladen³

Op basis van de figuren Figuur 7-2 en Figuur 7-3 kan worden vastgesteld dat blad 2 het meest stijf is en blad 1 het minst.

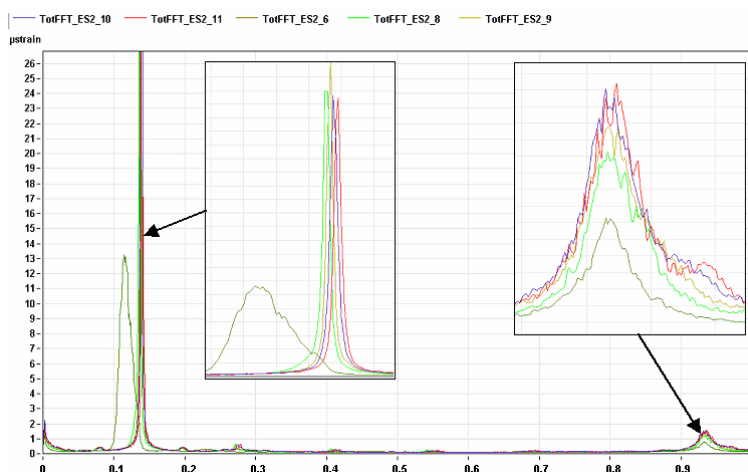
² Frequenties zijn geschaald weergegeven

³ Idem



Figuur 7-4: Waterfall plot voor blad 1, windsnelheidsklasse 9, flap wise⁴

De blad eigenfrequentie in klaprichting kan niet in de FFT's worden teruggevonden, waarschijnlijk vanwege een grote demping. De eigenfrequentie in zwaairichting wordt echter in beide FFT's teruggevonden, vanwege de kleine demping in die richting en de overspraak in de rekmetingen (de positie van de reksensoren wijken ca. 16 graden af van de zwaai- en klap richting).



Figuur 7-5: FFT in zwaairichting van blad 2 voor de windsnelheidsklassen 6, 8, 9, 10 en 11⁵

In Figuur 7-5 zijn de FFT's voor de verschillende windsnelheidsklassen vergeleken. Vanwege het variabele toerental verschuift de 1-p frequentie, afhankelijk van het toerental. De blad-eigenfrequentie daarentegen is vrijwel gelijk voor de verschillende windsnelheidsklasse.

7.2 Data analyse beschikbare ECN-data

Voor conditiebewakingssystemen is het van essentieel belang dat de meetdata wordt vertaald naar bruikbare informatie voor de operator. Conditiebewakingssystemen genereren veelal veel data, welke alleen door specialisten goed kunnen worden geïnterpreteerd. Bij de ontwikkeling van de data-analysemodule voor het bladbewakingssysteem wordt ernaar gestreefd de informatie zodanig te presenteren dat dit ook direct een toegevoegde waarde heeft voor de bedrijfsvoering.

⁴ Frequenties zijn geschaald weergegeven

⁵ Idem

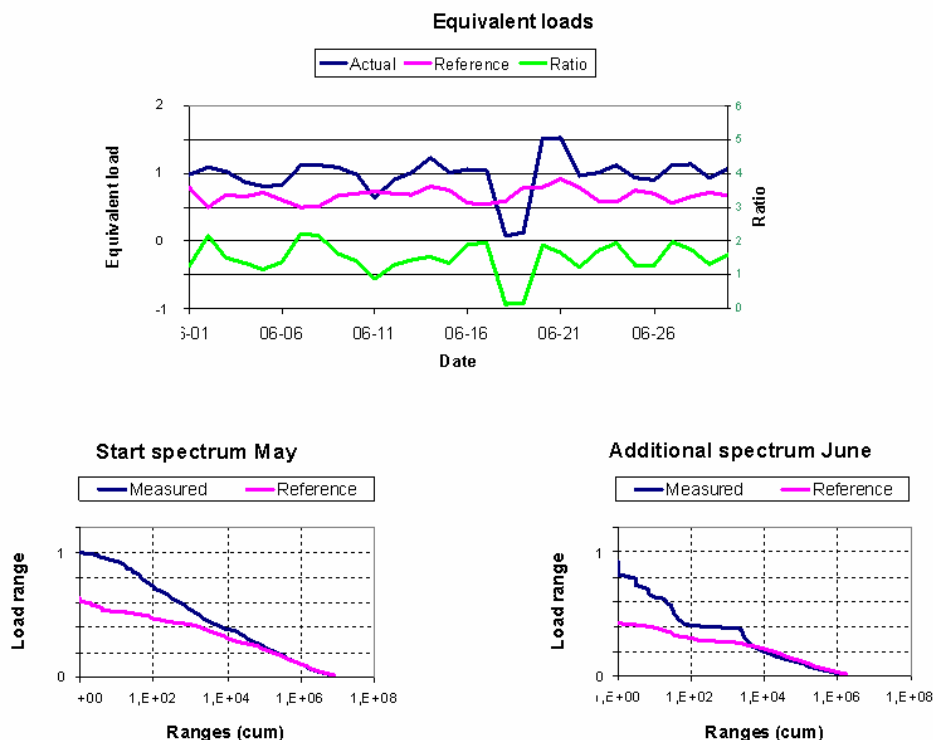
Voor de ontwikkeling van de module zou gebruik worden gemaakt van meetdata, welke beschikbaar komt van het fibre optic meetsysteem. Het aantal metingen is echter te gering om hier ook daadwerkelijk bij de ontwikkeling op zinvolle wijze gebruik van te kunnen maken. Om die rede is gebruik gemaakt van beschikbare metingen van de NORDEX-6 turbine, uitgevoerd op basis van klassieke rekstrookjes.

Tijdens het berekenen van de cumulatieve belastingsspectra is gebleken dat de kwaliteit van de metingen essentieel is. Meetfouten in de vorm van spikes geven direct een verstoord beeld van het belastingsspectrum. Wanneer de cumulatieve data zijn verstoord, dan is daarmee het resultaat onbruikbaar voor de gebruiker. Tevens zijn de verstoringen moeilijk te herstellen. Dit betekent dat een goede kwaliteitscontrole van de inputdata noodzakelijk is.

7.2.1 Belastingsspectra / benadering cumulatieve methode

Van de NORDEX-6 zijn belastingsmetingen beschikbaar vanaf april 2004. Deze meetdata zijn in eerste instantie gebruikt om belastingsspectra te maken voor twee richtingen met behulp van de data analyse module. Uit de eerste resultaten is gebleken dat onjuiste meetdata te veel verstoring gaven in de resultaten. Een "spike" in een meetsignaal heeft een grote invloed op het belastingsspectrum, dus geeft een sterk vertekend beeld. Deze fouten moeten dan ook uit de metingen worden verwijderd, bij voorkeur automatisch. Daarom is gezocht een gebruikersvriendelijke selectiemethode waarmee in eerste instantie handmatig foutieve meting kunnen worden opgespoord en verwijderd. Dit proces kan a.d.h.v. ervaring in toenemende mate worden geautomatiseerd. Hiervoor is de volgende aanpak gekozen:

1. Uit de beschikbare metingen zijn voor het gehele windsnelheidsgebied referentiemetingen geselecteerd. Deze referentiemetingen zijn handmatig geselecteerd en worden als representatief beschouwd binnen een windsnelheidsklasse. In eerste instantie is daarbij met de turbulente geen rekening gehouden.
2. Op basis van de referentie tijdseries worden de belastingsspectra en de equivalente belastingen berekend voor elke windsnelheidsklasse. Voor nieuwe meetseries wordt hiermede vastgesteld welke equivalente belastingen en belastingsspectra bij een gegeven windconditie verwacht kunnen worden.
3. Nadat alle referentiewaarden bekend zijn, wordt de meetcampagne gestart. Na iedere maand worden de belastingsspectra en de equivalente belastingen berekend zowel op basis van de belastingsmetingen als op basis van de referentie metingen. De resultaten worden grafisch weergegeven.



Figuur 7-6: Selectie en berekening van cumulatieve belastingsspectra⁶

In Figuur 7-6 is een voorbeeld gegeven van de bepaling van de cumulatieve belastingsspectra. In de bovenste grafiek zijn de equivalente belastingen uitgezet van de metingen over de maand juni. Op basis van de gemeten windsnelheid zijn ook de equivalente belastingen van de referentiemetingen weergegeven. Grote afwijkingen tussen de equivalente belastingen zou kunnen wijzen op foutieve metingen. Het bovenstaande voorbeeld geeft aanleiding tot het nader analyseren van de metingen op 18 en 19 juni. In het spectrum over de maand juni is er ook een groot verschil tussen het referentiespectrum en het gemeten spectrum.

Nadere beschouwing van de metingen over de maand juni geeft in dit geval het volgende resultaat:

1. De turbine is op 18 en 19 juni vrijwel niet in bedrijf geweest.
2. De hogere belastingen gedurende de rest van de maand wordt veroorzaakt door een grotere turbulentie (zog effecten) en door de bedrijfsvoering van de turbine. Tijdens in- en uitschakelen zijn de belastingen vaak hoger.

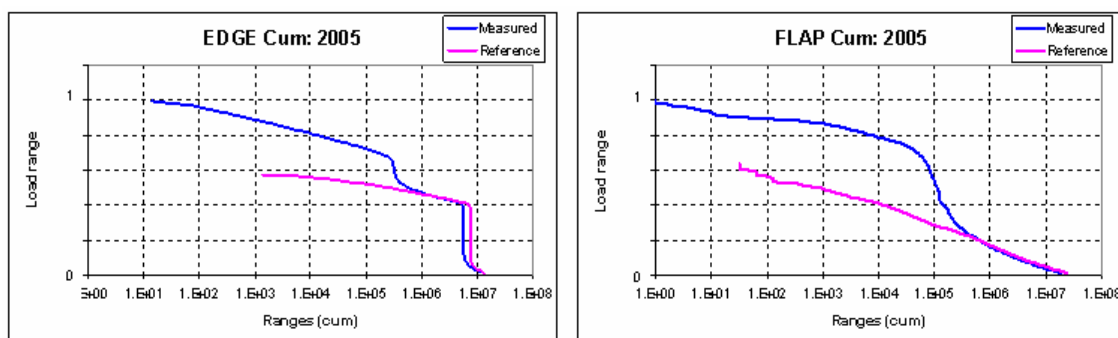
De afwijkingen blijken in deze maand niet door meetfouten te zijn beïnvloed, doch moeten als reële belastingen worden gezien.

Deze berekenings- en selectiemethode is ondergebracht in een rekenprogramma en blijkt zeer bruikbaar te zijn. In het vervolgtraject zal deze benadering dan ook worden geïmplementeerd.

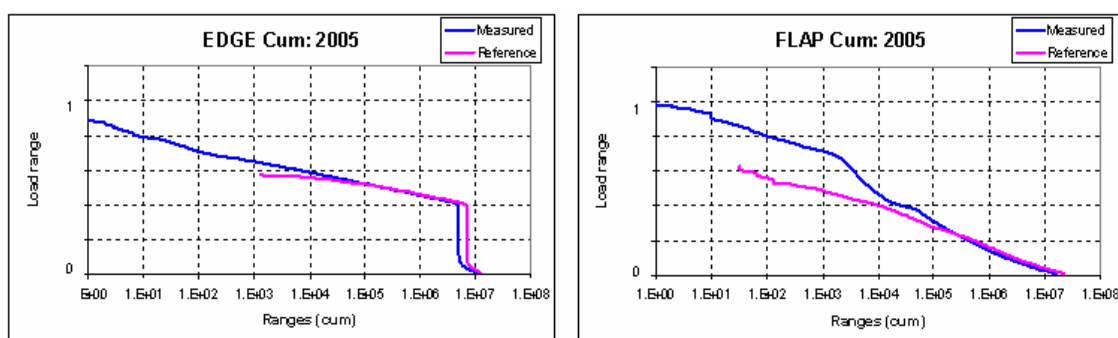
Voor de Nordex-turbine is over de periode van twee jaar de data geëvalueerd en zijn op basis daarvan belastingsspectra berekend. Tot eind 2005 is dit gedaan voor alle beschikbare metingen (zie Figuur 7-7) en voor een set van metingen waarbij series met meetfouten niet zijn meegenomen (zie Figuur 3-8). In het eerste geval zijn de belastingsspectra groter dan verwacht, hetgeen wordt veroorzaakt door foutieve metingen. Dit zijn in sommige gevallen spikes, doch soms ook meetfouten die zich soms voordoen tijdens starten en stoppen. De gemeten belastingen worden dan als "onrealistisch" beoordeeld. Wanneer deze metingen niet in de

⁶ Load ranges en equivalent loads zijn geschaald weergegeven

berekeningen worden meegenomen, dan stemmen de berekende belastingspectra veel beter overeen met de spectra zoals die op basis van de referentiespectra zijn vastgesteld.

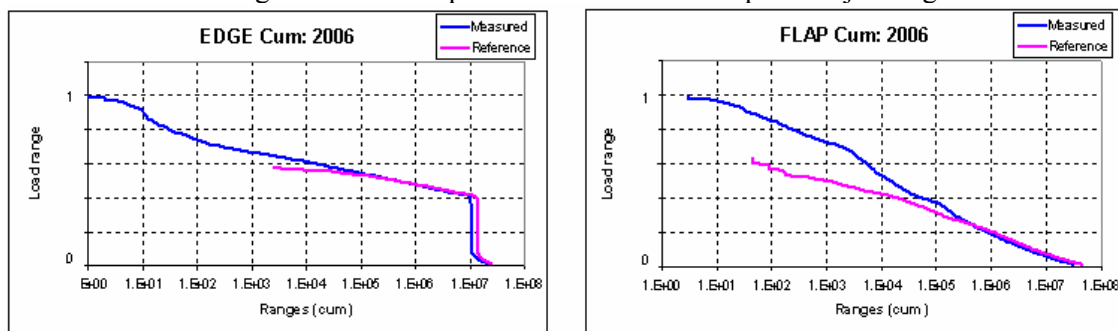


Figuur 7-7: Geaccumuleerde belastingspectra over 2004 en 2005 voor alle metingen⁷



Figuur 7-8: Geaccumuleerde belastingspectra over 2004 en 2005 voor geldige meetseries⁸

In Figuur 7-9 zijn de metingen over 2006 aan de spectra toegevoegd. Hierbij heeft dezelfde selectie plaatsgevonden. De spectra op basis van de belastingsmetingen stemmen hierbij goed overeen met de metingen zoals deze op basis van de referentiespectra zijn vastgesteld.



Figuur 7-9: Geaccumuleerde belastingspectra over 2004, 2005 en 2006 voor geldige meetseries⁹

Voor de spectra in klapproef worden wel hogere waarden gevonden, die kunnen worden verklaard uit zogeheten.

7.2.2 Frequentie analyses

Een tweede belangrijk onderdeel van de signaalanalyses is uitvoering van frequentieanalyses. Het gaat hierbij om het vaststellen van afwijkingen in het frequentiegedrag t.o.v. initiële condities.

⁷ Load ranges zijn geschaald weergegeven

⁸ Idem

⁹ Idem

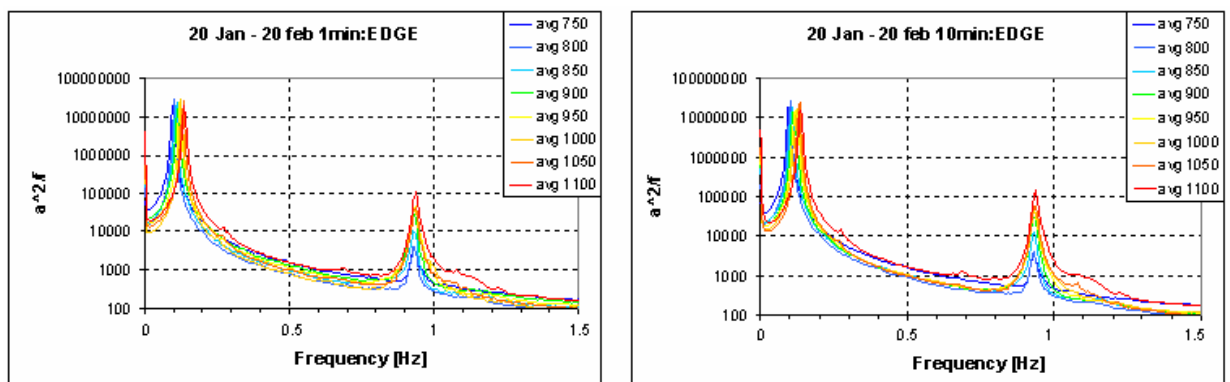
Ook bij de uitvoering van frequentieanalyses is het van belang dat de informatie op een zodanige wijze wordt gepresenteerd dat die door de gebruiker eenvoudig te interpreteren zijn. Hierbij spelen de volgende aspecten een rol:

1. Rekening moet worden gehouden met het variabel toerental van de windturbine.
2. Verandering van eigenschappen van een blad kan tot uiting komen in de eigenfrequentie.
3. Rekening moet worden gehouden met de kwaliteit van de metingen.
4. De analyse moet zijn gericht op lange termijn veranderingen in de bladeigenschappen. Mogelijke trends moeten op herkenbare wijze worden gepresenteerd.

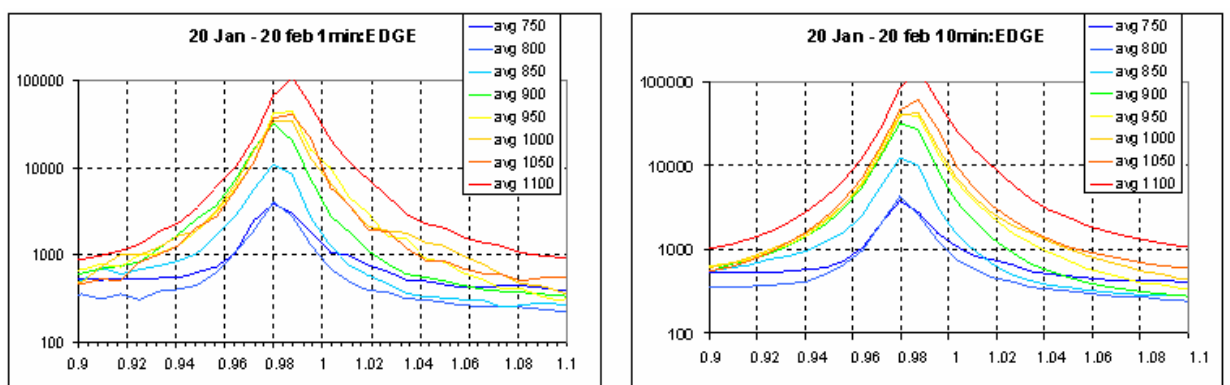
Voor het bepalen van de frequentieanalyses is eerst nagegaan op welke wijze met het variabele toerental moet worden omgegaan. De frequentieplots zijn daarom op twee manieren berekend:

1. Uit een tijdserie van 10 minuten wordt een deel geselecteerd van 1 minuut, waarover de variatie in het toerental minimaal is. De resultaten worden op basis van het gemiddelde toerental over 1 minuut gebinned. Vervolgens wordt een APSD berekend.
2. Complete tijdseries van 10 minuten worden op basis van het gemiddelde toerental over deze 10 minuten gebinned. Vervolgens wordt een APSD berekend.

De resultaten van deze twee methoden zijn weergegeven in Figuur 7-10 en Figuur 7-11.



Figuur 7-10: Frequentie plots op basis van 1 minuut en 10 minuut tijdseries¹⁰



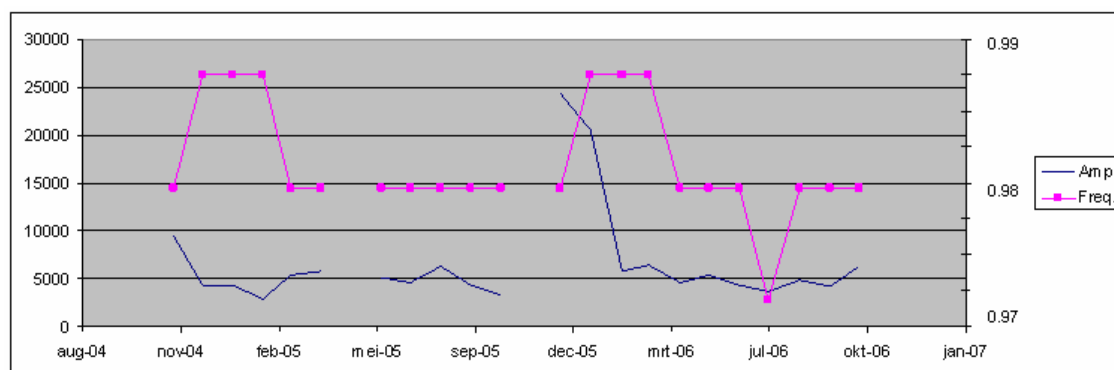
Figuur 7-11: Frequentie plots op basis van 1- en 10 minuut tijdseries rond eigenfrequentie¹¹

Voor conditiebewaking zijn vooral de eigenfrequenties van belang. De resultaten zijn in beide gevallen vrijwel hetzelfde. Voor het vervolg is daarom gekozen de analyses uit te voeren op basis van gehele 10-minuten meetseries.

¹⁰ Frequenties zijn geschaald weergegeven

¹¹ Idem

De APSD-functies zijn over periodes van een maand berekend over de gehele periode dat metingen beschikbaar waren (eind 2004 tot eind 2006). Vervolgens is voor elke APSD de ligging van de eigenfrequentie geschat. De resultaten hiervan zijn in onderstaande figuren weergegeven.



Figuur 7-12: Ligging eigenfrequentie gedurende meetperiode¹²

De verschuiving van de eigenfrequentie is absoluut gezien, klein. Opvallend is dat de eigenfrequentie gedurende de zomermaanden lager is dan gedurende de wintermaanden. De omgevingstemperatuur is kennelijk van invloed op de eigenfrequentie.

Verandering van bladeigenschappen als gevolg van veroudering kunnen op basis van deze relatief korte meetperiode niet worden vastgesteld. Wel is duidelijk dat kleine trendmatige veranderingen in bladeigenschappen mogelijk wel op deze manier kunnen worden gedetecteerd.

7.3 Besluit

De analyses voor het bepalen van de belastingsspectra geven duidelijk aan, dat voor de cumulatieve bepaling ervan op basis van gemeten tijdseries de kwaliteit van de metingen belangrijk is. Het detecteren van meetfouten is essentieel voordat de data verder verwerkt kan worden. Tevens is het bij de beoordeling van de spectra van belang te beschikken over goede referentiewaarden, welke op basis van representatieve tijdseries kunnen worden vastgesteld. Wanneer sprake is van meerdere turbines neemt het belang hiervan toe omdat invloed van zog op de belastingsspectra dan expliciet naar voren komen.

Tevens laten de analyses zien, dat kleine verschillen in eigenfrequenties uit de metingen goed te bepalen zijn. De relatie met de conditie van de bladen en hoe de verandering hiervan zich in de loop van de tijd manifesteert is op grond van de huidige metingen niet vast te stellen.

¹² Frequenties zijn geschaald weergegeven

8. Conclusies

Het project heeft een aantal resultaten opgeleverd welke van belang zijn bij een verdere ontwikkeling van het bladbewakingssysteem. De doelstelling om een volwaardig monitoring systeem te realiseren en de analysesoftware te optimaliseren zijn te optimistisch gebleken. Ook andere ontwikkeling op het gebied van bladmonitoring op basis van vergelijkbare technologie hebben nog niet tot succesvolle producten geleid. De projectresultaten en de ontwikkelingen op het gebied van optische meetmethoden geven echter aanleiding om de ontwikkeling zeker te continueren.

8.1 Instrumentatie

Het geleverde systeem voldeed niet aan de specificaties, welke met de leverancier overeen waren gekomen. De afwijkingen bleken niet beperkt tot enkele aspecten doch het betrof vrijwel alle aspecten m.b.t. documentatie, gebruikerssoftware, data handling, instrumentatie en sensoren. De afwijkingen zijn hierbij reeds tijdens laboratoriumtesten direct na aflevering vastgesteld. Na installatie van het systeem in de NORDEX-6 turbine is dit beeld bevestigd.

8.2 Installatie

De installatiewerkzaamheden betroffen de montage van de rotormodule, de rek- en temperatuursensoren en de turbinemodule in de torenvoet. Voor een robuuste montage van de rotormodule bleken aanpassingen noodzakelijk, zodat een degelijke mechanische opsluiting gerealiseerd kon worden. De installatie van de sensoren was aanvankelijk goed voorbereid, toch de uitvoering bleek onvoldoende. Binnen een maand was een aantal sensoren losgekomen. Tevens zijn de onderlinge verschillen in het meetbereik zodanig dat aan een goede overdracht van de rek van het bladmateriaal op de sensor moet worden getwijfeld. Voor de installatie van de temperatuursensoren is geen rekening gehouden met de voorkeursrichting, waarmee rekmodulatie (een reeds bekend probleem) voorkomen had kunnen worden.

De installatie van de turbinemodule was betrekkelijk eenvoudig en heeft geen problemen opgeleverd.

8.3 Bedrijfszekerheid

Tijdens het gebruik is het systeem nooit langer dan een periode van 4 dagen in bedrijf geweest. Reeds tijdens de testfase in het laboratorium faalde het systeem regelmatig. Na een meetperiode van ca één week moesten sensoren opnieuw worden vastgezet. Na een meetperiode van 3 weken is de rotormodule bezweken en is besloten van verdere metingen af te zien. Op basis van deze ervaringen kan echter niet worden geconcludeerd dat de technologie niet geschikt zou zijn voor deze toepassing. Via andere toepassingen is reeds ruimschoots aangetoond dat systemen op basis van fiber optics in vergelijkbare omgevingen gedurende lange perioden betrouwbaar kunnen functioneren.

8.4 Operationele aspecten

De opzet van het systeem is zodanig gekozen dat het vrijwel volledig remote kan worden bediend. Dit heeft in de praktijk ook aan de verwachtingen voldaan. De toegankelijkheid van het systeem voor derden (gebruikers buiten ECN, zoals de fabrikant) was zonder extra voorzieningen vanuit veiligheidsredenen niet snel realiseerbaar.

Met het gebruik voor een langere periode is geen ervaring opgedaan. Belangrijke aandachtspunten zijn echter:

- Calibratie. Door de fabrikant van het systeem wordt een jaarlijkse calibratie van het systeem voorzien. Hiervoor is het noodzakelijk dat de rotormodule wordt uitgebouwd. Voor toepassing in windturbines is dit onacceptabel.
- Het aanbrengen en vervangen van sensoren dient door specialisten te worden uitgevoerd. Voor een bredere toepassing binnen de windindustrie is het noodzakelijk dit via het reguliere onderhoud moet kunnen worden uitgevoerd. Ontwikkeling van vervangbare sensoren en daarbij benodigde gereedschappen moeten daarvoor worden ontwikkeld.
- De installatie van m.n. de sensoren dient zodanig te zijn dat het risico van beschadiging minimaal is. Een integrale oplossing voor de sensoren, de behuizing en de overlengte aan bedrading is hiervoor noodzakelijk.

8.5 Gebruikersinterface

Een goede gebruikersinterface is van belang voor het beheer van het systeem en ook voor acceptatie van het systeem voor een potentiële gebruiker. De realisatie van de geleverde interface was niet conform specificaties.

- Wijzigen van instellingen is niet eenduidig geïmplementeerd, waardoor de kans op vergissingen erg groot is.
- Er vindt geen verificatie op geldigheid van de wijzigingen plaats.
- Bescherming tegen onbedoeld wijzigen van settings is minimaal.
- De historie van settings kan alleen op primitieve wijze worden vastgelegd via windows-functies.

8.6 Analyse tools

De door ECN ontwikkelde analyse tool is in het systeem geïmplementeerd. Gedurende het gebruik van het systeem kon deze module nauwelijks worden getest. Ook verdere optimalisatie kon niet worden uitgevoerd.

Tijdens demonstraties en laboratoriumtesten is wel een aantal tekortkomingen gesignaleerd:

- De kwaliteit van de meetdata is belangrijk voor automatische gegevensverwerking, vooral wanneer het accumulatie van data betreft. Bij de huidige opzet is er van uitgegaan dat de signaalcontrole binnen het meetsysteem afdoende zou zijn. In de praktijk blijkt dit niet voldoende.
- De huidige opzet voorziet in het accumuleren van meetdata over de gehele meetperiode en extrapolatie over de levensduur van de turbine. Dit geeft geen inzicht in de momentane veranderingen. Een gewijzigde aanpak hiervan blijkt noodzakelijk.
- De frequentieanalyse functioneert naar behoren, doch de resultaten geven onvoldoende informatie aan de gebruiker. Het implementeren van de trenddetectie voor lange termijn verandering is noodzakelijk.

Een aantal verbeteringen is voorgesteld en verder ontwikkeld en geverifieerd met behulp van de NORDEX-6 metingen. De resultaten hiervan zijn zodanig dat een verdere ontwikkeling in de gekozen richting voor de hand ligt. T.a.v. de recursieve bepaling van belastingsspectra is goed inzicht verkregen op welke wijze het proces moet gaan verlopen. T.a.v. de frequentieanalyse is gedemonstreerd dat kleine verschuivingen in de eigenfrequenties detecteerbaar zijn.

8.7 Discussie en aanbevelingen

Gedurende het project is duidelijk geworden dat het ontwikkelen van een commercieel product meer tijd zal vergen dan was aangenomen. De beschikbare technologie is nog niet voldoende om daarop een applicatie te kunnen ontwikkelen. Voor een verdere ontwikkeling dienen dan ook twee belangrijke knelpunten te worden opgelost:

- Betrouwbare instrumentatie, gericht op toepassing in windturbines dient beschikbaar te zijn. Het systeem dient volledig remote te kunnen worden bediend. Noodzakelijk hercalibratie moet worden voorkomen.

- Sensoren moeten in een zodanige vorm beschikbaar te zijn, dat installatie op eenvoudige wijze kan worden uitgevoerd. De sensoren moeten uitwisselbaar zijn in geval van falen. Tevens moet er een goede methode voor temperatuurcompensatie worden ontwikkeld.

Pas wanneer op deze wijze een stabiel en betrouwbaar meetsysteem beschikbaar is, kunnen op basis hiervan applicaties verder worden ontwikkeld.

9. Commerciële realisatie van projectresultaten

Het project heeft niet geleid tot een verdere doorontwikkeling en optimalisatie van het bladmonitoring systeem. De leverancier van het systeem, die aanvankelijk geïnteresseerd was in de ontwikkeling en de vercommercialisering van het product, heeft haar ambities niet waar kunnen maken. ECN heeft dan ook van verdere samenwerking afgezien. Dit heeft tot gevolg dat het traject voor de commerciële realisatie behoorlijk is vertraagd.

Tijdens de uitvoering van het project hebben zich een aantal ontwikkelingen voorgedaan, welke voortzetting van het project rechtvaardigen:

1. Een leverancier (HBM) van meetinstrumentatie voor rekstrookjes is momenteel bezig zelf een optisch meetsysteem te ontwikkelen, hetgeen voor een belangrijk deel uit dit project is voortgekomen. De leverancier voert zelf deze ontwikkeling uit en maakt daarbij gebruik van ervaringen uit het project. Dit meetsysteem is niet specifiek gericht op toepassing in windturbines.
2. ECN heeft ervoor gekozen zelf een meetsysteem samen te stellen op basis van beschikbare optische componenten. De technologie is inmiddels zo ver ontwikkeld, dat hierdoor een systeem kan worden samengebouwd dat goed aansluit bij de behoefte. De selectie van componenten wordt momenteel uitgevoerd in samenwerking met een Nederlandse onderneming. Gebruik van een systeem van HBM is hierbij een waarschijnlijke optie.
3. Ten aanzien van de sensoren zijn vanuit het project een aantal ideeën voortgekomen welke een verbetering zullen geven t.a.v. de reproduceerbaarheid van de metingen, de temperatuurgevoeligheid, calibratie en de hanteerbaarheid.
4. Een Spaans onderzoeks- en ontwikkelingsbedrijf is geïnteresseerd in de toepassing van bladbewakingssystemen voor windturbines. Ondanks de stopzetting van de samenwerking met FOS, wil AIN graag aansluiten bij verdere ontwikkelingen van ECN.

Op de korte termijn zijn commercieel gezien geen mogelijkheden. Een vervolgtraject biedt duidelijke kansen op de langere termijn. Het vervolgtraject zal gericht moeten zijn op de volgende onderwerpen:

- Het ontwikkelen van een robuust low-cost meetsysteem dat voldoet aan de eisen m.b.t. betrouwbaarheid, nauwkeurigheid en lange termijn stabiliteit.
- Het ontwikkelen van een optische uitwisselbare sensor met bij voorkeur passieve temperatuurcompensatie. De metingen dienen hierbij representatief te zijn voor de optredende rekken conform de opgelegde eisen.
- Het meetresultaat dient geschikt te zijn voor bladbewaking, turbineregeling en voor beslissingsondersteuning t.a.v. onderhoud.

Ten aanzien van het vervolgtraject zoals was voorzien, zal de ontwikkeling van een betrouwbaar meetsysteem, met inbegrip van de sensoren, veel meer aandacht moeten krijgen.

10. Realisatie van indirecte energieverdienste

Het projectresultaat draagt in belangrijke mate bij aan de indirecte energieopbrengst op de langere termijn. Op de korte termijn is er geen bijdrage, daar een product nog niet beschikbaar is. Voor verdere ontwikkeling tot een marktrijp product in de vorm van een robuust meetsysteem is een tijdsbestek van ca 4 jaar noodzakelijk.

Na realisatie van het product, kunnen de volgende bijdragen worden verwacht:

1. Innovatie:

Het project draagt bij in de toepassing van betrouwbare meetmethoden voor mechanische belastingen, hetgeen met rekstrookjes niet gerealiseerd kan worden. De toepassing van optische sensoren voor rekmeting en de daarbij behorende read-out unit en dataoverdracht via WLAN is innovatief en is geschikt conventionele meetsystemen te vervangen. Het prijsniveau is nog niet op een aanvaardbaar niveau voor deze toepassing doch op termijn zullen de kosten zeker lager worden. Instrumentatie is commercieel beschikbaar, doch daarbij vooral gericht voor stationaire toepassingen (laboratoriumachtige omgevingen). Integratie van componenten tot één hanteerbaar en robuust meetsysteem en de bijbehorende software is op basis van beschikbare technologie binnen 2 jaar haalbaar.

2. Kritieke punten:

Toepassing van de technologie wordt momenteel beperkt doordat:

- ⇒ Instrumentatie, welke geschikt is voor de toepassing, is niet beschikbaar. Verkrijgbare instrumentatie betreft veelal complete meetsystemen voor een laboratorium-achtige omgeving.
- ⇒ De temperatuurafhankelijkheid is voor de berekening van de restlevensduur belangrijk. Beschikbare oplossingen verhogen de complexiteit van het systeem en dus de kosten.
- ⇒ De effectiviteit van conditiebewakingssystemen bij toepassing voor de conversietrein in windturbines is nog niet aangetoond. Dit heeft ook zijn uitstraling op de ontwikkeling en toepassing van bladbewakingssystemen.
- ⇒ Optimalisatie van analysesoftware vraagt een lange tijdsperiode.

Het project heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de oplossingen voor deze knelpunten. Het meetsysteem is ontworpen, gemaakt en ingebouwd in een windturbine waarbij de omgevingscondities ongunstig zijn. Hoewel de toepassing van actieve temperatuurcompensatie niet direct heeft geleid tot een oplossing, zijn wel andere oplossingen geïdentificeerd. De optimalisatie van analyse software is uitgevoerd op basis van beschikbare metingen en is daardoor geschikt voor verdere implementatie.

3. Effecten op de kWh-prijs:

Belastingsmeting zal bijdragen aan de verlaging van de kWh-kosten voor windturbines door de volgende effecten:

- ⇒ Belastingsmetingen kunnen worden gebruikt voor de regeling van de turbine. Op basis hiervan kunnen de belastingen worden gereduceerd, hetgeen op termijn een verlagend effect zal hebben op de investeringskosten.
- ⇒ Conditiebewaking van de bladen zal een verlaging van de onderhoudskosten tot gevolg hebben. Vergroting van het inspectie-interval en het voorkomen van gevolgschade door vroegtijdige detectie hebben een reducerend effect op de kosten.
- ⇒ Bij toepassingen van load monitoring op parkniveau zal de invloed op de kWh-kosten veel groter zijn, omdat slechts enkele turbines met een meetsysteem moeten worden uitgevoerd, terwijl de effecten op veel meer windturbines van toepassing zullen zijn (flight-leader principe).
- ⇒ Wanneer de belastingen aan het einde van de geplande levensduur lager blijken dan de ontwerpbelastingen, dan kan de levensduur worden verlengd.
- ⇒ Evenals bij conditiebewakingssystemen voor de aandrijftrein kan installatie van een bladbewakingssysteem leiden tot verlaging van de verzekeringskosten.

Door toepassing van een bladbewakingssysteem wordt verwacht dat de operationele kosten verminderen met ongeveer 5 tot 10%. De jaarlijkse O&M-kosten voor onshore windenergie liggen in de orde van 30 €/kW. Voor een 100 MW-park onshore zijn de O&M-kosten dus 3 M€/jaar, dus de kostenreductie ligt daarmee tussen de 150 en 300 k€/jaar.

Ten aanzien van de indirecte energieverdiensite was uitgegaan van een snelle implementatie van bladbewakingssystemen in navolging van andere CM-applicaties. De implementatie van conditiebewakingssystemen verloopt echter aanzienlijk trager dan verwacht. Oorspronkelijk is er van uitgegaan dat 2005 het eerste jaar van implementatie zal zijn, hetgeen uiteindelijk resulteert in een indirecte energieverdiensite van 6.69 PJ in 2020. Verwacht wordt dat het jaar van implementatie zal verschuiven naar 2012, waardoor de energieverdiensite in 2020 zal dalen tot 6.12 PJ. Doordat de omvang van de kostenbesparing niet afneemt, wordt de uiteindelijke doelstelling later gerealiseerd.

11. Referenties

- Ref. 1: Requirements for FOBM phase III Nordex systems. Rev. 1. ECN-Wind Memo-04-011. May 2004
- Ref. 2: Fiber Optic Blade Monitoring Phase III. Delivery of monitoring equipment for Nordex #1. Ref.: C03-015-03. 12/05/2004
- Ref. 3: WINTMOS Turbine module and software. User Manual. FOSWindPower. 01/06/2005
- Ref. 4: Measurement Plan FOBM-Nordex Rev. 1. November 2005