



Slutrapport RO 2017:01

Olycka med vindkraftverk i Lemnhult, Vetlanda kommun, Jönköpings län, den 24 december 2015

Diarienum O-08/15

2017-02-22

SHK utreder olyckor och tillbud från säkerhetssynpunkt: Syftet med utredningarna är att liknande händelser ska undvikas i framtiden. SHK:s utredningar syftar däremot inte till att fördela skuld eller ansvar.

Rapporten finns även på SHK:s webbplats: www.havkom.se

ISSN 1400-5751

Illustrationer i SHK:s rapporter skyddas av upphovsrätt. I den mån inte annat anges är SHK upphovsrättsinnehavare.

Med undantag för SHK:s logotyp, samt figurer, bilder eller kartor till vilka någon annan än SHK äger upphovsrätten, tillhandahålls rapporten under licensen Creative Commons Erkännande 2.5 Sverige. Det innebär att den får kopieras, spridas och bearbetas under förutsättning att det anges att SHK är upphovsrättsinnehavare. Det kan t.ex. ske genom att vid användning av materialet ange ”Källa: Statens haverikommission”.



I den mån det i anslutning till figurer, bilder, kartor eller annat material i rapporten anges att någon annan är upphovsrättsinnehavare, krävs dennes tillstånd för återanvändning av materialet.

Omslagets bild tre – Foto: Anders Sjödén/Försvarmakten.

Innehåll

Allmänna utgångspunkter och avgränsningar	5
Utredningen.....	5
SAMMANFATTNING	8
SUMMARY IN ENGLISH	9
1. FAKTAREDOVISNING.....	12
1.1 Redogörelse för händelseförloppet	12
1.2 Olycksplats.....	12
1.2.1 Skador på vindkraftverket	14
1.3 Miljöaspekter	17
1.4 Räddningsinsatsen	18
1.5 Vindkraftverket.....	18
1.6 Ägare Lemnhult Energi AB	18
1.7 Tillverkaren och serviceföretaget – Vestas Wind Systems A/S.....	18
1.8 Meteorologisk information	19
1.8.1 Vädret vid tidpunkten för haveriet.....	19
1.9 Allmänt om vindkraftverk.....	19
1.10 Det havererade vindkraftverket.....	20
1.10.1 De horisontella skruvförbanden.....	20
1.10.2 Fästelementen	21
1.10.3 Smörjmedlet	23
1.10.4 Flänsar och tornsegment.....	25
1.10.5 Monteringsverktyg	25
1.10.6 Installationen av vindkraftverket.....	27
1.10.7 Service och kontroller av tornskruvarna.....	31
1.10.8 Historiken för lösa tornskruvar.....	33
1.11 Personal.....	36
1.11.1 Montören	37
1.11.2 Den övergripande arbetsledaren från Total Wind	37
1.11.3 Verksamhetsutövarens driftförvaltare	38
1.11.4 Övrigt.....	39
1.12 Lagstiftning, föreskrifter och tillståndsgivning.....	39
1.12.1 Maskindirektivet.....	39
1.12.2 Standard för dimensionering av vindkraftverk	41
1.12.3 Tillståndsprocessen för vindkraftverket	43
1.12.4 Plan- och bygglagstiftning.....	44
1.13 Särskilda prov och undersökningar	47
1.13.1 Skruvförband	47
1.13.2 Besök hos tillverkaren	50
1.13.3 Materialanalyser	51
1.13.4 FE-analys.....	59
1.13.5 Dynamiska förstärkningar av periodiska störningar.....	61
1.13.6 Kontrollberäkning av tornlaster.....	63
1.13.7 Störningar på generatorns styrsignal från parkstyrningen	66
1.13.8 Beräkning av skruvens livslängd beroende på förspänningskraft	67
1.13.9 Beräkning av skruvens livslängd beroende på ökade laster	72
1.13.10 Ökade laster från högre turbulens i skog	76
1.13.11 Mätning av förspänningskraft i torn 7 i Lemnhult vindpark	77
1.13.12 Vestas undersökningar av den havererade flänsen och tornskruvarna	79
1.13.13 Övrigt.....	81

1.14	Organisations- och ledningsfrågor.....	82
1.14.1	Vestas Wind Systems A/S organisation och uppföljning av leverantörer	82
1.14.2	Verksamhetsutövaren.....	84
2.	ANALYS.....	85
2.1	Grundläggande aspekter på haveriet.....	85
2.2	Design och konstruktion.....	87
2.3	Orsaken till för låg förspänningskraft.....	89
2.3.1	Tornskruvar och muttrar	91
2.3.2	Smörjmedlet	92
2.3.3	Installation och service (Vad påverkade tornet under installation och service?)	94
2.4	Lösa skruvar	97
2.5	Myndigheternas kontroller av vindkraftverket	97
3.	UTLÅTANDE.....	100
3.1	Utredningsresultat.....	100
3.2	Orsaker till olyckan	101
4.	VIDTAGNA ÅTGÄRDER	102
5.	SÄKERHETSREKOMMENDATIONER	103

Allmänna utgångspunkter och avgränsningar

Statens haverikommission (SHK) är en statlig myndighet som har till uppgift att utreda olyckor och tillbud till olyckor i syfte att förbättra säkerheten. SHK:s utredningar syftar till att så långt som möjligt klarlägga såväl händelseförlopp och orsak till händelsen som skador och effekter i övrigt. En utredning ska ge underlag för beslut som har som mål att förebygga att en liknande händelse inträffar i framtiden eller att begränsa effekten av en sådan händelse. Samtidigt ska utredningen ge underlag för en bedömning av de insatser som samhällets räddningstjänst har gjort i samband med händelsen och, om det finns skäl för det, för förbättringar av räddningstjänsten.

SHK:s utredningar syftar till att ge svar på tre frågor: *Vad hände? Varför hände det? Hur undviks att en liknande händelse inträffar?*

SHK har inga tillsynsuppgifter och har heller inte någon uppgift när det gäller att fördela skuld eller ansvar eller rörande frågor om skadestånd. Det medför att ansvars- och skuldfrågorna varken undersöks eller beskrivs i samband med en utredning. Frågor om skuld, ansvar och skadestånd handläggs inom rättsväsendet eller av t.ex. försäkringsbolag.

I SHK:s uppdrag ingår inte heller att vid sidan av den del av utredningen som behandlar räddningsinsatsen undersöka hur personer förda till sjukhus blivit behandlade där. Inte heller utreds samhällets aktiviteter i form av socialt omhändertagande eller krishantering efter händelsen.

Utredningen

SHK underrättades den 25 december 2015 om att en olycka med ett vindkraftverk inträffat i Lemnhult, Vetlanda kommun, Jönköpings län, den 24 december 2015 klockan 09.25.

Olyckan har utretts av SHK som företrätts av Jonas Bäckstrand, ordförande, Alexander Hurtig, utredningsledare och utredare beteendevetenskap, Claes Hedbom, teknisk utredare, samt Christer Jeleborg, teknisk utredare t.o.m. februari 2016.

Haverikommissionen har biträtts av Anders Wickström som expert på vindkraft och särskilt på lastberäkningar, Mohammad Al-Emrani för Finita Elementanalyser, samt Exova Materials Technology AB för materialanalyser och fälttester.

Utredningsmaterialet

Haverikommissionen har genomfört intervjuer och tekniska undersökningar, samt tagit del av en stor mängd teknisk dokumentation från berörda aktörer.

Intervjuer har bl.a. genomförts med tillverkaren, representanter för verksamhetsutövaren, skruvtillverkare, verktygstillverkare och smörjmedelsleverantör, samt med representanter för berörda myndigheter. Vidare har intervjuer genomförts med personal som deltog i monteringen av vindkraftverket. Däremot

har det inte varit möjligt att intervjua den montör som gjorde den slutgiltiga dragningen av skruvar i den första flänsen i vindkraftverket.

Flertalet tekniska undersökningar har gjorts av material från olycksplatsen. Tekniska undersökningar och beräkningar har genomförts baserat på underlag från tillverkaren.

En platsundersökning genomfördes fyra dagar efter olyckan.

Ett haverisammanträde hölls i Stockholm den 19 oktober 2016. Vid haverisammanträdet presenterade haverikommissionen det faktaunderlag som förelåg vid den tidpunkten.

Slutrapport RO 2017:01

Verksamhet:	Vindkraftverk
Typ	V112-3.0MW-50Hz
Ägare och verksamhetsutövare	Lemnhult Energi AB
Tillverkare	Vestas Wind Systems A/S
Service	Vestas Northern Europe AB
Tidpunkt för händelsen	24 december 2015, kl. 09.25
	Anm: All tidsangivelse avser svensk normaltids (UTC ¹ + 1 timme)
Plats	Lemnhult vindpark, Vetlanda kommun, Jönköpings län,
Väder	Enligt data insamlad från det aktuella vindkraftverket i samband med haveriet och från SMHI:s närliggande mätstation: Vind från sydväst omkring 12 m/s
Personskador	Inga
Skador på vindkraftverket	Totalhaveri
Andra skador (miljö)	Ett utsläpp på drygt 1 000 liter transmissionsolja, 250 liter hydraulolja och ca 600 liter glykolblandning.

¹ UTC (Coordinated Universal Time) – referens för angivelse av tid världen över.

SAMMANFATTNING

Lemnhults vindkraftspark ligger cirka 20 km söder om Vetlanda i Jönköpings län. I parken fanns 32 vindkraftverk som samtliga var av samma typ och storlek. Den 24 december 2015 kollapsade ett av vindkraftverken. Det vindkraftverk som föll, torn 15, hade vid tillfället varit i drift i nästan tre år. Tornet var 129 meter högt och hade en turbindiameter på 112 meter.

Tornkonstruktionen bestod av sex sektioner som upptill och nedtill var försedda med flänsar. Flänsarna var sammanfogade med skruvförband. Skruvförbandet i den första flänsen, dvs. mellan den första och den andra sektionen, brast och den övre delen av tornet (fem sektioner) föll. Tornets nedersta sektion, som var förankrad i ett betongfundament, stod efter händelsen kvar. Haverikommissionen har konstaterat att de skruvar som hade hållit samman det brutna skruvförbandet hade utmattningsskador som medförde att de inte längre kunde tåla den belastning de utsattes för. Flänsytorna bar spår av korrosion som troligen härstammar från skruvarna.

Orsaken till utmattningsbrotten var att förspänningskraften i förbandet var alltför låg. Att tillräcklig förspänningskraft inte hade uppnåtts berodde på att man under installationsförfarandet inte skyddade skruvarna eller tornsektionerna från regn eller snö. Vatten påverkade muttrarnas smörjmedel, vilket i sin tur ökade friktionen i skruvförbandets kontaktytor. De verktyg som användes vid installationen hade inte underhållits och kalibrerats enligt verktygstillverkarens rekommendationer för att säkerställa att rätt vridmoment uppnåddes. Montören som genomförde den slutliga förspänningen av skruvarna i förbandet hade ingen tidigare erfarenhet av sådant arbete, och hade inte heller gått tillverkarens interna kurs. Hänsyn hade inte tagits till de sättningar som alltid påverkar förspänningskraften, varken i förbandet eller i de mjuka material som ingick i skruvförbandet. Tillverkaren hade inte verifierat att den specificerade förspänningskraften uppnåddes eller testat hur väderförhållandena påverkade förbandets möjlighet att uppnå specificerad förspänningskraft vid momentdragning.

Tornet hade under olika tidsperioder utsatts för ökade vibrationer och ytterligare utmattningslaster p.g.a. problem med olika versioner av den mjukvara som användes för att styra vindkraftverket. Tillverkaren har angett att dessa laster var inom vindkraftverkets konstruktionsgränser, dock under förutsättningen att förspänningskraften hade uppgått till 1680 kN. Men med dåligt förspända skruvförband kan dessa tillfälligt högre laster leda till en förkortad livslängd. De myndigheter som skulle granska tornkonstruktionen ur ett säkerhetsperspektiv begärde inte in någon teknisk dokumentation om själva tornkonstruktionen. Den kommunala kontrollen begränsades till att endast avse grundfundamenten.

Lemnhult vindpark hade under de drygt tre åren i drift haft problem med lösa och trasiga skruvar i vindkraftverken. Dessa brister rapporterades inte av verksamhetsutövaren till länsstyrelsen som är tillsynsmyndighet för verksamheten.

Säkerhetsrekommendationer

Vestas Wind Systems A/S rekommenderas att:

- Följa upp att instruktioner och manualer efterlevs på alla bygg- arbetsplatser, se avsnitt 2.3.3. *(RO 2017:01 R1)*

Boverket rekommenderas att:

- På lämpligt sätt informera kommuner om de relevanta undersökningsresultaten i denna utredning, t.ex. att plan- och bygglagens (2010:900) krav på bärförmåga gäller för hela vindkraftverket. *(RO 2017:01 R2)*

Länsstyrelsen i Jönköpings län rekommenderas att:

- Tillse att verksamhetsutövaren tar fram tydliga rutiner för hur rapportering enligt förordningen (1998:901) om verksamhetsutövares egenkontroll ska ske för att i framtiden säkerställa att myndigheten får kännedom om händelser som kan leda till olägenheter för människors hälsa och miljön, se avsnitt 2.5. *(RO 2017:01 R3)*

Arbetsmiljöverket rekommenderas att:

- Tillsammans med lämplig sakkompetens inom vindkraft, montering och byggnation, utveckla en checklista för kontroller av maskintypen vindkraftverk, se avsnitt 2.5. *(RO 2017:01 R4)*
- Fördjupa sina kontroller och inspektioner i enlighet med maskindirektivet så att man kan säkerställa att maskinen under hela sin livstid, innefattande t.ex. design, montering, drift och nedmontering möter kraven på säkerhet, se avsnitt 2.5. *(RO 2017:01 R5)*

SUMMARY IN ENGLISH

Lemnhult wind farm is located about 20 kilometers south of the city of Vetlanda in Jönköping County. The wind farm consisted of 32 wind turbines, of the same type and height. On 24 December, 2015, one of the turbines collapsed. The wind turbine that fell, tower 15, was 129 meters tall, and had a turbine diameter of 112 meters. The wind turbine had been in operation for almost three years.

The tower structure consisted of six sections that on the top and bottom part were fitted with flanges. The sections were held together with bolted joints. The joint in the first flange, i.e. between the first and the second section, failed and the upper part of the tower (five sections) fell. The bottom section, which was anchored to a concrete foundation, was still standing after the collapse. The bolts that had held together the joint had suffered from a fatigue process and the bolts could no longer withstand the loads of normal operation. The flange surfaces in the main wind direction showed signs of corrosion, which most likely originated from the bolts.

The cause of the fatigue in the bolts was that the pre-tension force in the joint was too low. The reason for not achieving the specified pre-tension force was due to the bolts, tower sections and tools not being protected from rain and snow during the installation. Water affected the lubricant of the nuts, which led to increased friction in the contact surfaces of the joint. The tools used in the installation had not been maintained according to the standard or the tool manufacturer's recommendations to ensure that the proper torque force was applied. The assembler who performed the final torqueing of the bolts had no previous experience from such work, and had not received the manufacturer's internal training course to that end. Settlement had not been taken into account, either in the joint or in the softer materials, which always affect the pre-tension force. The manufacturer had not verified that the specified pretension force could be achieved or tested the weather's impact on the ability to achieve the specified pre-tension force.

During different time periods the wind turbine was exposed to vibrations and additional loads due to the software used in the control unit of the wind turbine. The manufacture has stated that these additional loads, under the condition that the specified pretension was achieved, were within the design limitations of the wind turbine. In a bolted joint with low pre-tension force these additional loads may lead to a decrease in lifetime.

The authorities who inspected the wind turbine from a safety perspective did not request the technical documentation for the tower construction. The municipality and the control manager limited the inspections to the foundations.

Lemnhult wind farm had had problems with loose and broken bolts prior to the accident. These problems were not reported by the operator to the supervisory authority, Jönköping County Administrative Board.

Safety Recommendations

Vestas Wind Systems A/S is recommended to:

- Follow up on the compliance of instructions and manuals on installation sites. *(RO 2017:01 R1)*

The National Board of Housing, Building and Planning is recommended to:

- In a suitable way inform municipalities of the relevant findings in this investigation, such as the Planning and Building Act's (2010:900) requirements on load bearing capacity. *(RO 2017:01 R2)*

Jönköping County Administrative Board is recommended to:

- Ensure that the operator has clear procedures for the reporting of events that may lead to an inconvenience to people's health and the environment according to the Ordinance (1998:901) of Owner's Own Control, see section 2.5. *(RO 2017:01 R3)*

The Work Environment Authority is recommended to:

- Together with suitable competency in the fields of wind power plants, assembly and construction, develop a checklist specifically aimed at inspections of the machine type wind power plant, see section 2.5. *(RO 2017:01 R4)*
- Strengthen the inspections regarding the fulfillment of the machine directive for the machine type wind power plant to ensure that the machine is compliant with the requirements for safety, including e.g. design, assembly, operations and disassembly, during the full life span of the machine, see section 2.5. *(RO 2017:01 R5)*

1. FAKTAREDOVISNING

1.1 Redogörelse för händelseförloppet

På morgonen strax efter kl. 09.00 torsdagen den 24 december 2015 hörde en lantbrukare som bodde i närheten av Lemnhults vindkraftspark ett ljud som lät som en hög metallisk klang. Han arbetade vid tillfället i sin ladugård och även om den miljön var bullrig kunde han utan problem höra det metalliska ljudet. Några minuter senare hörde lantbrukaren ytterligare ett kraftigt metalliskt ljud eller dån.

I vindkraftsparken fanns 32 driftsatta vindkraftverk. Vindkraftverken var av samma typ och höjd, med en navhöjd på 129 meter. Med bladen på turbinen inräknade, nådde varje enskilt verk 185 meter över marken. Det företag som utförde service på anläggningen förstod att något hade inträffat, eftersom dataloggningen från parken larmade om att förbindelsen mellan elnätet och vindkraftverk nummer 15 hade brutits. Strax innan elförbindelsen bröts fick man också en varning om vibrationer i tornet. Innan någon servicetekniker hade hunnit till platsen spreds bilder på ett havererat vindkraftverk på sociala medier.

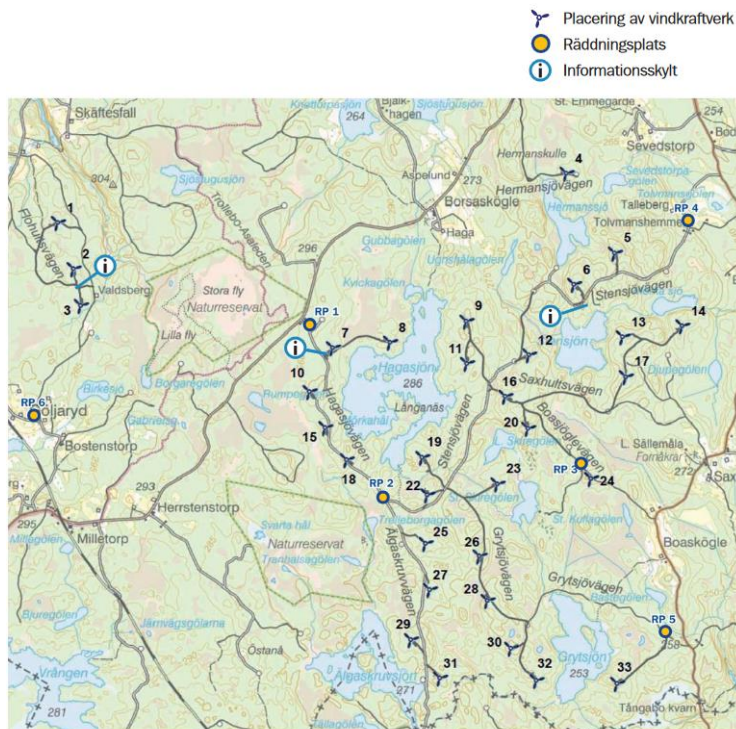
Det visade sig att ett av vindkraftverken, torn 15, hade totalhavererat. Tornet var konstruerat av sex segment som var sammanfogade med skruvförband. Det nedre segmentet stod kvar på sitt fundament och nådde ca 12 meter över marken. Resten av tornet hade fallit i östlig/nordöstlig riktning och alla skruvförband, utom mellan det andra och tredje segmentet, hade separerat.

Det har senare framkommit att dagen innan haveriet, den 23 december kring kl. 15.00, passerade två personer vindkraftsparken i bil och uppmärksammade vad de ansåg vara en rand med smuts eller möjligtvis en glipa på nedre delen av ett av tornen. I efterhand har de med hjälp av sin platskänedom och bilder från platsen kunnat dra slutsatsen att det havererade tornet var samma torn som de hade iakttagit dagen innan och att det hade brutit på den höjd där de uppfattat randen eller glipan.

1.2 Olycksplats

Lemnhults vindpark ligger ca 20 km söder om Vetlanda tätort i Vetlanda kommun, Jönköpings län. I parken hade Lemnhult Energi AB 32 vindkraftverk i en så kallad gruppstation (se figur 1). Vidare finns det i det omkringliggande området flera olika anläggningar med vindkraftverk.

Vindparken är tillgänglig från riksväg 31, via länsväg 755 som ansluter till ett enskilt vägnät i området.



Figur 1. Kartbild över vindparken. Kartbild: Stena Renewable AB.

Området kring vindparken är ett skogslandskap, där markförhållandena huvudsakligen är mossig skogsmark med inslag av berg, morän och torv. Tornet föll över en transportväg i området. I figur 2 kan man, genom glappet i trädlinjen, skymta den närliggande Hagsjön.



Figur 2. Bilden tagen i fallriktningen, ost/nordostlig, där tornets nedslagsplats framgår av röjningsgatan i trädlinjen.

I området kring vindkraftverket fanns inga bostäder eller andra byggnader. Trafikflödet på transportvägen var mycket lågt. Transportvägarna i området används främst av vindparkens personal, och undantagsvis av markägare, jägare och allmänheten i övrigt.

1.2.1 *Skador på vindkraftverket*

Tornet föll i ostlig/nordostlig riktning, och alla utom ett av de skruvförband som höll ihop tornets segment brast vid fallet. Det skruvförband som klarade fallet var det som höll ihop det andra och det tredje segmentet. Det första segmentet som var fäst i bottenplattan (betongfundamentet) stod kvar efter fallet. Den lokala transportvägen i området blockerades av den havererade tornet.



Figur 3. Det havererade vindkraftverket. Foto: Vestas Wind Systems A/S

På det kvarstående segmentet och fundamentet fanns det skador på den sida åt vilket tornet hade fallit i form av skrapmärken och inbuktningar. Skadorna kan förklaras av att tornet, när det föll, slog i det kvarstående segmentet.



Figur 4. Skadorna på det segment som stod kvar.

Flänsarna mellan första och andra segmentet

På fläns 1 i det första skruvförbandet fanns rostavlagringar. Dessa avlagringar var lokaliserade till den del av flänsarna som låg längst västerut. Flänsarna ska vara täta och med hjälp av en tätningssmassa som appliceras mellan flänsarna i varje förband under installationen ska vatten hållas ute.



Figur 5. Fläns 1, det undre segmentet. Foto: Vestas Wind Systems A/S.

På motsatt sida (längst österut) satt flera skruvar kvar och flänsen hade böjts uppåt. Där fanns inte några tecken på korrosion. Svaga skiftningar på flänsytan visade spår av den tätningssmassa som hade använts.

Turbinhuset och bladen fick omfattande skador. Bladen bröts av vid respektive blads infästning i navet.



Figur 6. Skador på navet och bladens inre delar.

Skrubar

Haverikommissionens platsundersökning genomfördes den 28 december 2015. Den visade att ett stort antal av skruvarna i förbandet mellan vindkraftverkets första och andra segment hade gått av, samt att många skruvar hade avskjivade² gängor.

Haverikommissionen omhändertog på plats två av skruvarna och tre av muttrarna från skruvförbandet mellan det första och det andra segmentet. De har därefter genomgått en materialanalys, vilken beskrivs närmare i avsnittet 1.13.3 Materialanalyser.

² Gängorna hade förskjutits med våld.



Figur 7. De skruvar och muttrar som omhändertogs av Statens haverikommission. Två av muttrarna hade rester av skruvar kvar.

1.3 Miljöaspekter

I samband med haveriet läckte drygt 1 000 liter transmissionsolja, 250 liter hydraulolja och ca 600 liter glykolblandning ut ur tornet. Markförhållandena där utsläppet skedde bestod till stor del av mossig skogsmark, vilket normalt innebär att spridningsrisken är begränsad. Glykolblandningar sprider sig i allmänhet enklare i naturen än olja men är samtidigt en förorening som naturen lättare kan bryta ner.

Ett område om 20 gånger 50 meter, som låg ungefär 50 meter från den närbelägna Hagasjön, berördes av utsläppet. Utsläppet skedde där vindkraftverkets maskinhus hade slagit ner. De rådande väderförhållandena som bl.a. innebar att det var minusgrader, bedömdes av inblandade parter begränsa spridningsrisken och situationen betraktades därför inte som akut.

Dagen efter haveriet grävdes ett uppsamlande dike där olja kunde samlas in med hjälp av absorberande material. Den omgivande skogen och det havererade tornet begränsade i viss mån tillträdet till området för utsläppet.

Området har undersökts och prover har tagits på både mark och vatten. Ingen oljefilm eller motsvarande uppmärksammades vid dessa kontroller på Hagasjön, (se figur 1).

Platsen sanerades senare genom utgrävning av jordmassor.

Länsstyrelsens slutbedömning var att föroreningen inte innebär någon miljö- eller hälsorisk utifrån den tänkta markanvändningen.

1.4 Räddningsinsatsen

Höglandets räddningstjänstförbund verkar på det småländska höglandet, i Nässjö och Vetlanda kommun, och var den räddningstjänst som larmades ut till platsen under eftermiddagen den 24 december 2015. De fick då information om att ett utsläpp av miljöfarliga ämnen hade skett.

Efter kontakter med representanter från bl.a. anläggningsägaren, servicebolaget, Vetlanda kommun och länsstyrelsen i Jönköpings län kunde räddningstjänsten konstatera att det fanns en risk att miljöfarliga ämnen hade förorenat omkringliggande mark.

Senare kunde man konstatera ett utsläpp av transmissions- och hydraulolja, samt av en glykolblandning. Räddningstjänsten påbörjade åtgärder genom att spärra av platsen men initierade inga egna saneringsinsatser. Man samverkade i stället fortsatt med andra berörda aktörer, inklusive kommunen och länsstyrelsen.

1.5 Vindkraftverket

Tillverkare:	Vestas Wind Systems A/S
Typ:	V112-3.0MW Mk OE
Serienummer:	47023
Tillverkningsår:	2012
Nominell effekt	3 075 kW
Turbindiameter	112 meter
Navhöjd	129 meter
Totalhöjd	185 meter

Vestas V112 är ett vindkraftverk med en totalhöjd på 185 meter. Vindkraftverket uppfördes under hösten och vintern 2012/2013, tillsammans med 31 andra vindkraftverk av samma modell.

Den nominella effekten för det aktuella vindkraftverket var 3075 kW. Det är den effekt som vindkraftverket är märkt med och benämns därför ibland som märkeffekt. Det är den högsta effekten som maskinen är konstruerad för att producera under långvarig tid.

1.6 Ägare Lemnhult Energi AB

Lemnhults vindpark ägs och drivs av Lemnhult Energi AB som är ett helägt dotterbolag till Stena Renewable AB som i sin tur är en del av Stenasfären, som bland annat har verksamheter inom energibranschen och sjöfartsnäringen.

1.7 Tillverkaren och serviceföretaget – Vestas Wind Systems A/S

Vindkraftverket var tillverkat av Vestas Wind Systems A/S som är en av världens största leverantörer av vindturbiner. Företaget har bl.a. en bakgrund inom tillverkning av hydrauliska kranar och har sedan slutet av 1970-talet konstruerat vindkraftverk.

Vestas Northern Europe AB är ett dotterbolag till Vestas Northern Europe A/S, som i sin tur är ett dotterbolag till Vestas Wind System A/S. Vestas Northern Europe AB, är baserat i Sverige och är det företag som enligt ett löpande avtal har utfört service på turbinerna i Lemnhult vindpark.

1.8 Meteorologisk information

Det finns en kartläggning av vindförhållanden i Sverige, den s.k. nationella vindkarteringen.

Årsmedelvindhastigheten i parken beräknas ligga på mellan 7,4 och 7,8 m/s på 120 meters höjd över marken.

Tillverkaren, Vestas Wind Systems A/S (benämns som Vestas eller tillverkaren), har i sitt underlag för vindparken använt långtidsmätdata från två meteorologimaster (väder och vind), Milletorp och Boaskögle. Baserat på dessa data har tillverkaren dragit slutsatsen att medelvinden i parken, på höjden 129 meter, är 7,2 m/s och att maximalt medelvärde i parken är 7,4 m/s.

Tillverkarens beräknade värden överensstämmer med de uppgifter som framgår av den nationella vindkarteringen.

1.8.1 Vädret vid tidpunkten för haveriet

SMHI har en väderstation i Tomtabacken, som ligger cirka 5 mil nordväst om Lemnhult. Observationer därifrån visar att väderläget vid tidpunkten för haveriet var normalt med hänsyn till årstiden. Vinden var sydlig till sydvästlig och vindstyrkan var mellan 7 och 15 m/s. Väderförhållandena låg inom operationsområdet för den aktuella typen av vindkraftverk.

1.9 Allmänt om vindkraftverk

Ett vindkraftverk är en maskin som omvandlar luftens rörelseenergi till elektrisk energi. Vindkraftverkets turbin bromsar således upp vindens hastighet.

När vinden överstiger den vind som genererar märkeffekt begränsas effektuttaget. De flesta moderna vindkraftverk, inklusive det nu aktuella V112, vrider bladen i torsionsled³, runt ett lager i bladrotten, för att på så sätt hålla effektuttaget konstant. Det begränsar samtidigt de laster som påverkar turbinen.

När vinden bromsas upp av vindturbinen uppstår en tryckskillnad över turbinplanet som resulterar i en horisontell kraft på turbinen. Det är denna s.k. trustkraft som genererar merparten av lasterna i tornet. Trustkraften når sitt maximala värde nära vindkraftverkets märkvind, dvs. den lägsta vind då märkeffekt uppnås. För vindhastigheter över märkvinden på 11-12 m/s regleras effekten genom att bladen vrids och

³ Vridning runt sin egen axel.

som en följd minskar belastningen på vindkraftverket. Det vertikala avståndet mellan turbincentrum och ett godtyckligt snitt i tornet, exempelvis i ett skruvförband, skapar ett böjmoment i tornet som skruvförbandet måste kunna ta upp.



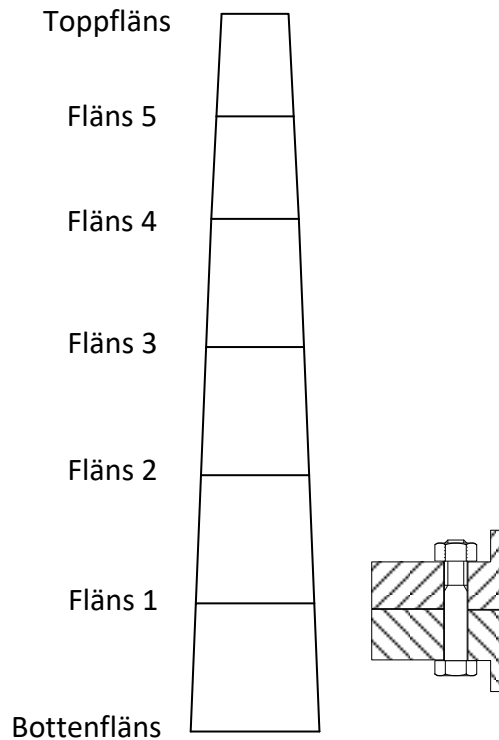
Figur 8. Illustration av horisontell trustkraft på turbinen och böjmoment i tornet, som i huvudsak orsakas av trustkraften.

På grund av vindens slumpmässiga karaktär är den inte konstant i varken tid eller rum. Dessa kortvariga variationer kallas för turbulens och kan beskrivas och modelleras i matematiska termer.

1.10 Det havererade vindkraftverket

1.10.1 *De horisontella skruvförbanden*

Tornet var uppbyggt av sex sektioner som sammanfogats med horisontella skruvförband med L-flänsar. Den första (nedersta) sektionen var fäst i grundfundamentet och utformningen av dess nedersta fläns skiljde sig därför från övriga mellanliggande flänsar. Tornsektionernas flänsar sammanfogades med skruvar, muttrar och brickor i horisontella skruvförband som gick runt hela insidan av tornet. Eftersom tornet smalnade av uppåt skiljde sig skruvförbanden åt i fråga om flänsens dimension, skruvarnas dimension och antalet skruvar i respektive förband. Av figur 9 framgår placeringen av flänsarna och utformningen av skruvförbanden i fläns 1-5. Botten- och toppflänsarna har inte undersökts närmare och beskrivs därför inte i rapporten. Vid varje mellanliggande fläns fanns en plattform av durkplåt. Plattformen var utformad som ett helt golv men med hål för steg och hiss. Golven var placerade ca 1,3 meter under respektive fläns.



Figur 9. Tornets uppbyggnad och skruvförbandens utformning.

Tabell 1. Skruvdimensioner

Fläns	Skruvdimension	Längd (mm)	Antal	Förspänningskraft (kN ⁴)	Åtdragningsmoment (Nm)	Tillverkare
Fläns 5	M36	195	100	510	2 800	Cooper&Turner
Fläns 4	M42	240	132	710	4 500	Friedbergs
Fläns 3	M56	315	104	1 280	10 000	Cooper&Turner
Fläns 2	M64	385	92	1 680	15 000	Cooper&Turner
Fläns 1	M64	355	100	1 680	15 000	Friedbergs

1.10.2 Fästelementen

Vid uppförandet av vindparken i Lemnhult användes skruvar från två olika tillverkare. De skruvar som användes i fläns 1 i torn 15, och som brast vid olyckan, var tillverkade av August Friedberg GmbH (nedan Friedbergs). Friedbergs har levererat skruvar åt Vestas under lång tid och i alla de dimensioner, M36-M64, som använts för tornsegmenten i vindparken.

⁴ Newton, SI-enhet för kraft, 1 kilonewton (kN) motsvarar 1 000 newton.

De skruvar som användes i skruvförbanden benämns i Vestas dokumentation omväxlande som HV bolts, tornskruv och flänsskruv. I denna rapport används benämningen tornskruv eller bara skruv. Specifikationerna för skruvarna i fläns 1 är angivna på en ritning med ritningsnummer 0026-3478, Ver. 0 enligt följande.

HV Bolts 100pcs M64 x 355-10.9-tZn; DAST-Richtlinie 021. Pre-stress force 1 680kN; Tightening torque 15 000Nm lubricating with MOS₂

Specifikationerna för övriga tornskruvar framgår av Tabell 1. För skruvarna med tillhörande mutter med dimension M36 gällde standarden EN 14399-4 och för brickorna EN 14399-6. De krav som anges i standarderna finns även angivna i Vestas dokument *Technical Purchase Specification for Bolt Assemblies* med dokumentnummer 900177 rev 4 som var giltig vid leveransen av skruvarna i det haverade förbandet. SS-EN 14399-4:2005 är en standard som hanterar krav för höghållfasta fästelement som är tänkta att användas i stålkonstruktioner med förspända förband, dvs. förband där skruven töjs vid montering. Del 4 hanterar system HV, skruvförband med sexkantsskruvar och sexkantsmutterar.

DAST-Richtlinie 021 är en tysk standard för skruvar av större dimensioner än M36. Enligt uppgifter från skruvtillverkaren innefattar standarden krav på skruvens materialsammansättning, dimensioner, toleranser för ytbehandling, härdning, mekaniska egenskaper, rekommenderad förspänningskraft, att skruvarna ska levereras som ett set med tillhörande brickor och muttrar, samt att muttrarna ska smörjas innan leverans. För kraven på galvaniseringsprocessen har Vestas hänvisat till standarden EN-ISO 10684. Enligt uppgifter från Vestas så härstammar det moment och den förspänningskraft, som man har specificerat, från Friedbergs rekommenderade värden, vilka är hämtade från *DAST-richtlinie 021*. Värdet på förspänningskraften för M64 tornskruvarna innebär att de dras till 63 procent av brottgränsen. Enligt uppgift från skruvtillverkaren är 63 procent ett värde som används i den tyska stålindustrin där man för större dimensioner över M36 använder en lite lägre förspänningskraft. Det går enligt skruvtillverkaren inte att använda de högre förspänningskrafterna som finns beskrivna i utförandestandarden SS-EN 1090-2 på dimensioner över M36 för de standardiserade produkter som finns på marknaden.

Enligt SS-EN 1090-2 ska 70 procent av den nominella brottgränsen eftersträvas som förspänningskraft. Standarden följer av Eurokodsystemet och Boverkets föreskrifter på området. Eurokodsystemet är gemensamma europeiska konstruktionsstandarder som tagits fram av European Committee for Standardization. Standarden beskriver ett antal olika metoder för att dra skruvar. Tillverkaren har valt att använda den s.k. momentmetoden. Enligt standarden ska metoden genomföras med ett momentverktyg där åtdragningen ska ske i två steg och på ett jämnt sätt. I ett första steg ska momentverktyget ställas in på ungefär 75 % av det specificerade slutgiltiga momentet. Det andra steget innebär att momentnyckeln ska ställas in på 110 % av det specificerade

moment. Anledningen till att man lägger på 10 % är för att ta höjd för de sättningar som alltid sker i skruvförband.

Skruvarna hade hållfasthetsklassen 10.9, enligt *ISO 898-1*. För en 10.9-skruv är den nominella brottgränsen 1 000 N/mm². Enligt standarden *EN-ISO 898-1* uppgår det exakta värdet till 1 040 N/mm² med en sträckgräns som ligger på 90 procent av brottgränsen. De mekaniska egenskaperna för fästelement av kolstål anges i standarderna *EN-ISO 898-1* för skruvar och *EN-ISO 898-2* för muttrar.

Enligt uppgift från tillverkaren har de använt standarden *DAST-richtlinie 021* för montering av samtliga tornskruvar i dimensionerna M36 till M64. Standarden pekar i sin tur på ett tyskt nationellt tillägg till eurokoderna *1993-1-8/NA*, som gäller upp till M36. Detta tillägg beskriver en modifierad momentmetod som skiljer från metoden i *SS-EN 1090-2*. Den modifierade metoden definierar till skillnad från momentmetoden inget värde som ska uppnås i första steget av momentdragningen för att uppnå ett homogeniserat förband. I det nationella tyska tillägget står det att kraven och de allmänna råden i *SS-EN 1090-2* gäller, förutom de undantagsfall som är upptagna i tillägget. Undantag i det här fallet är den modifierade momentmetoden och en lägre förspänningskraft för dimensioner över M36. Vidare tar den modifierade momentmetoden inte lika tydligt höjd för sättningar i ett skruvförband. Dock finns en notis i tillägget som medger att man kan återdra skruvar för att motverka den förlust av förspänningskraft som uppkommer efter några dagar, dvs. sättningar. Även *SS-EN 1090-2* pekar på spännkraftsförlust pga. sättningar utöver de vanliga som omhändertas av momentmetoden och att dessa kan åtgärdas genom att förbandet återspänns några dagar senare.

1.10.3 *Smörjmedlet*

Det smörjmedel som Friedbergs använde var *GLEITMO HMP 9020* och tillverkades av *FUCHS LUBRITECH* i Tyskland. Smörjningen av muttrarna genomfördes hos ett dotterbolag till Friedbergs. Smörjmedlet är ett skruvvax där *HMP* står för *High Molecular Polymers*. De delar i smörjmedlet som påverkar friktionen är polymerer och molybdendisulfid (MoS_2).

MoS_2 finns i *HMP 9020*, eftersom det klarar höga kontakttryck vilket uppkommer i större skruvdimensioner. Smörjmedlets syfte är att minska spridningen av förspänningskraften i ett förband genom att styra friktionen i gängen, liksom mellan en bricka och en mutter.

Enligt databladet för skruvvaxet ska beläggningen vara en homogen svart film, Smörjmedeltillverkaren har uppgivit att det är MoS_2 som ger smörjmedlet den svarta färgen, men tillverkaren har uppgivit att det i vissa applikationer kan ha en grå ton efter applicering. Vaxet levereras i flytande form.

Smörjmedlet rekommenderas upp till skruvdimensionen M30. Anledningen till att smörjmedlet rekommenderas för skruvdimensioner upp till M30 är att det förekommit synpunkter från kunder på att friktionen blir för låg när *HMP9020* används på större skruvdimensioner.

Smörjmedlet har inga korrosionsskyddande egenskaper. Smörjmedelstillverkaren har inte undersökt hur fukt eller vatten påverkar smörjmedlets egenskaper och har inte gjort några tester eller verifieringar av detta. Tillverkaren specificerar inte heller med vilken tjocklek skruvvaxet ska appliceras. Allt detta är det upp till användaren att kontrollera och styra för att uppnå de tillämpliga kraven.

Det finns inte några uppgifter om livslängden på smörjmedlet efter att det har applicerats eller uppgifter om hur smörjmedlet påverkas av att en skruv först dras med ett lägre moment och att den senare dras med fullt moment.

Risker vid användning av smörjmedlet

Skruvvaxer är generellt känsliga när det gäller tjockleken på skiktet eftersom det finns risk att vid för tunna skikt få en större spridning än önskvärt. Vaxet bär ibland, medan det ibland blir för tunt och resultatet liknar då ett osmört förband. Detta medför dessutom att spridningen av förspänningskraften kan öka jämfört med ett osmört förband vid för tunna lager vax.

Ett skruvvax är förbrukat efter första dragningen och det är inte tillåtet att lossa eller återmontera en skruv. Skruvvax underlättar inte demontering av en skruv.

När smörjmedlet används på större dimensioner än vad det är rekommenderat för enligt databladet behöver smörjmedlet appliceras väldigt tunt. När smörjmedlet appliceras i en bulkprocess är det svårare att styra toleranserna för tunna lager, vilket ökar riskerna med spridning av friktion.

Friedbergs appliceringsprocess och kontroll av muttrar

För applicering av smörjmedlet använder sig Friedbergs av s.k. doppcentrifugering. Före appliceringen tvättas muttrarna i tre olika bad för att få bort eventuella kontamineringar, fett och oljor. Smörjmedlet rörs om innan det hålls ner i en centrifug som pumpar runt smörjmedlet. Muttrarna läggs i en korg som sänks ner i centrifugen i vilket muttrarna översköljs av smörjmedlet. Efter detta lyfts korgen över till en annan centrifug och värme tillförs för att torka delarna. När delarna har torkat har en film av smörjmedlet bildats på muttrarna.

Enligt smörjmedelstillverkarens instruktion är parametrar som centrifugeringshastighet, omrörning för att undvika sedimentering, smörjmedlets koncentration och rengöringsprocessen viktiga att övervaka under appliceringsprocessen. Enligt uppgifter från skruvstillverkaren övervakar de och styr dessa steg i produktionen.

Haverikommissionen har besökt Friedbergs anläggning för att närmare granska processen för tvättning och kontroll av smörjmedelskoncentration. Skruvtillverkaren har uppgett att man har använt det här smörjmedlet i över tio år och har under den tiden utvecklat deras process för applicering.

Skruvtillverkaren tar sex muttrar från varje leverans för att kontrollera hur ett visst moment ger en viss förspänningskraft. Testet genomförs i en provbänk med ett förband anpassat för testutrustningen. Vid testerna av de aktuella muttrarna användes en M64-skruv som var 280 millimeter lång. Testet utförs under optimala förhållanden där brickorna inte tillåts rotera. Muttrarna för den aktuella leveransen för fläns 1 testades i februari 2012. Värdena från det testet var mellan 1 756,8 och 2 077,2 kN med ett medelvärde på 1 902,4 kN. Skruvtillverkaren har uppgett att dessa värden måste ligga mellan 1680 kN och 2343 kN, vilket finns beskrivet i *DAS-richtlinie 021*.

1.10.4 *Flänsar och tornsegment*

Flänsarna till tornsegmenten köptes från en underleverantör, Titan Wind, som är lokaliserad i Kina. Flänsarna svetsades ihop med tornväggarna, som bestod av flera sektioner. Kraven på flänsarna fanns angivna i Vestas ritningar och i övrig dokumentation. När flänsarna hade svetsats på till en sektion så ytbehandlades och målades delarna innan de fraktades till installationsplatsen.

Titan Wind genomförde mätningar av de färdigarbetade flänsarna innan de transporterades till beställaren. Mätningen utfördes med laser, EazyLaser, dokumenterades och resultaten skickades till beställaren. Vid tillfället för det aktuella tornets tillverkning fanns ett krav att den globala jämnheten, sett över hela flänsen, inte fick avvika med mer än två millimeter. Vid större avvikelser skulle man informera Vestas för att komma överens om hur detta skulle hanteras. Enligt ritningen får det förekomma en tiltning, lutning, mellan flänsens kontaktyta och den horisontella lodlinjen. Det medför att det får vara en vinkel, innan skruvmontering, på två millimeter på insidan av flänsen. Det får inte förekomma någon tiltning på flänsens utsida mot tornväggen, s.k. negativ tiltning.

Båda flänsdelarna i fläns 1 klarade kravet på två millimeter.

Det fanns en avvikelse, som dock inte var så stor att den avvek från kravet på global jämnhet, men som lokalt över en mätpunkt visade jämnhetsskillnader på mellan 0,7-0,8 millimeter.

Den horisontella svetsfog som sammanfogar flänsen och tornväggarna är ur ett designperspektiv svagare än flänsförbandet enligt uppgift från tillverkaren.

1.10.5 *Monteringsverktyg*

Det hydrauliska verktyg som användes för den slutgiltiga dragningen av tornskruvarna i den sedermera havererade flänsen var tillverkat av företaget Plarad. Modellen heter MX-EC där olika varianter används för olika dimensioner på skruvarna. För det aktuella förbandet med M64 användes MX200. Pumpen till hydraulverktyget var en VAX3,5-Z.

Varje verktyg av MX-typ levererades med en momenttabell där ett visst tryck från pumpen ska ge ett visst moment. Momenttabellen som levererades med verktyget som användes vid monteringen av Fläns 1 i det havererade tornet anger att ett moment på 15 004 Nm uppnås med 540 bars tryck (se figur 10). I dokumentationen saknades information om toleransspecifikation. Vestas har uppgivit att de genomför service och kontroll årligen på hydraulverktyget och det aktuella verktyget kontrollerades av Vestas den 1 september 2011. I protokollet står att verktyget är smort och testat. Det finns inga uppgifter om att momenttabellen har uppdaterats eller vad verktyget har kontrollerats mot. Personen som genomförde servicen hade 2006 genomgått en utbildning hos Plarad för service och underhåll av hydraulverktygen. Den utbildningen ger enligt Plarad en tekniker den grundläggande färdigheten för att genomföra service och lättare underhåll, men inte kalibrering. Vestas har även uppgivit att en service genomförs på verktygen varje gång de återkommer från en installationsplats. Alla pumpar kalibreras årligen av Vestas. Vestas har en verktygsavdelning som hanterar verktygen och pumparna. Där utförs servicen på pumparna och verktygen, och därifrån sköts även logistiken för verktygen.

Det aktuella verktyget som användes vid monteringen har inte undersökts av haverikommissionen. Verktyget har under tre års tid använts vid flera service- och installationsuppdrag. Verktygets status tre år efter händelsen bedöms inte kunna avspegla den faktiska statusen vid installationstillfället.

Ungültig · Invalid AD [®] Torque & Tension Systems			
Leistungstabelle / Performance Chart / Tableau de Performance			
Seriennummer: Serial No. No. de Série	89-14457	G50-200-0-00152	Prüfdatum Date 8. September 2010
	04-3083	G20-128-0-00103	
Bezeichnung Model Modèle	MX-EC 200 TS-SO Hydrauliknøgle U 12/1,7-800 EFSL 1 XY elektrisk hydraulikpumpe		
	[bar]	[Nm]	
	80	2318	D Achtung: Vor Inbetriebnahme des Geräts unbedingt Bedienungsanleitung durchlesen. Wir empfehlen eine jährliche Überprüfung!
	100	2870	GB Please read carefully the operation instructions before using the tool. We recommend a yearly inspection!
	120	3422	
	140	3974	F Veuillez consulter les conseils d'utilisation avant la mise en service de l'outil. Nous recommandons une vérification annuelle!
	160	4526	
	180	5078	DK OBS: Før brugtagningen af apparatet er det absolut nødvendigt at gennemlæse betjeningsvejledningen. Vi anbefaler et årligt eftersyn!
	200	5630	
	220	6182	NL Attention: voor de inbedrijfstelling van het toestel absoluut de handleiding lezen. Wij adviseren U jaarlijks te controleren!
	240	6734	
	260	7286	S Obsersera: Det är mycket viktigt att du läser igenom bruksanvisningen innan du börjar använda apparaten. Vi rekommenderar en årlig inspektion!
	280	7838	
	300	8390	E ¡Ojo! Es imprescindible que lea las instrucciones para el manejo antes de poner el aparato en marcha. Le recomendamos hacer una comprobación anual!
	320	8940	
	340	9490	FIN Huomio: käyttöohje on luettava ehdottomasti ennen laitteen käyttöönottoa. Suosittelemme tarkastusta vuosittain!
	360	10040	
	380	10590	P Atenção: Por favor ler o manual de instruções antes de pôr o aparelho em funcionamento. Recomendamos uma avaliação anual!
	400	11140	
	420	11692	I Attenzione: prima della messa in funzione dell'apparecchio leggere rigorosamente le istruzioni d'uso. Si raccomanda un controllo annuale!
	440	12244	
	460	12796	TR Testiñaz: Dajerleri orta sert vidalama için ISO 5393 e uygundur. DİKKAT: Makineyi kullanmadan önce muhakkak kullanma kılavuzunu okuyunuz. Senelek inceleme tavsiye edilir!
	480	13348	
	500	13900	PL Wartości momentu obrotowego dla skręcania śruby wg ISO 5393 Uwaga - przed uruchomieniem urządzenia należy koniecznie przeczytać instrukcję obsługi. Zalecamy coroczną kontrolę!
	520	14452	
	540	15004	
	560	15556	
	580	16108	
	600	16660	
	620	17210	
	640	17760	
	660	18310	
	680	18860	
	700	19410	
	720	19972	
	721	20000	

Figur 10. Momenttabell för MX-EC 200.

På momenttabellen i figur 10 har det angetts att den är ogiltig. Det beror på att haverikommissionen begärt av Plarad att få ut den tabell som levererades tillsammans med verktyget för ett antal år sedan och därmed inte kan sägas vara aktuell längre. Rekommendationerna från Plarad har dock inte ändrats sedan installationen i Lemnhult vindpark. Plarad rekommenderar att verktygen kalibreras minst en gång per år för att säkerställa att momenttabellen fortfarande är korrekt. När en auktoriserad servicetekniker utför en kalibrering av ett verktyg tas en ny momenttabell fram för det aktuella verktyget. Verktyget ska underhållas och smörjas för att säkerställa rätt funktion enligt de instruktioner som följer med verktyget. Serviceintervallen beror på vilken miljö verktyget används i och hur ofta det används. Den stående rekommendationen från Plarad är att verktyget åtminstone servas var tredje månad och kalibreras en gång per år. Verktygen ska utöver detta smörjas efter 20 timmars aktiv drift. Kalibrering ska utföras av Plarad själva eller av godkänd aktör. Plarad har uppgett att man inte kan garantera att ett verktyg som inte är smort, servat eller kalibrerat ger rätt moment, då friktionen i verktyget kan öka. Den momenttabell och specifikation som skickas med det aktuella verktyget specificerade inte någon noggrannhet på verktyget eller tolerans för olika tryck.

1.10.6 *Installationen av vindkraftverket*

Vid installationen och servicen i parken använde man samma instruktioner och manualer för alla de 32 tornen i Lemnhult. Tornen monterades under perioden från september 2012 till april 2013. I dokumentationen finns dock olika handlingar med olika datum angivna för samma aktiviteter när det gäller installationen av det havererade tornet. I dokumentet *Service inspection form* anges när vissa steg genomförts under installationen. I dokumentet *Daily reports* sammanfattas de aktiviteter som utförts en viss dag.

Haverikommissionen har valt att använda informationen från de dagliga lägesrapporterna (*Daily reports*) eftersom de bedöms som mest tillförlitliga då dessa skrevs och avrapporterades just dagligen. I dessa förekommer även annan detaljerad information som inte återfinns i den övriga dokumentationen.

Väderförhållandena vid installationen

Förberedelserna för att montera den första och andra sektionen på fundamentet påbörjades den 13 november 2012. Den 14 november monterades den första och den andra sektionen av tornet. Skruvarna som höll ihop sektionerna monterades med ca 30 procent av det slutgiltiga momentet. Den 22 november monterades den tredje tornsektionen och dagen efter drogs förankringsskruvarna mellan fundamentet och bottenflänsen med fullt moment. Den 28 november 2012 monterades resterande tornsektioner och den 2 december monterades resterande delar och turbinen. Tornskruvarna drogs med fullt moment mellan den 3 och 5 december.

Vestas dokumenterade vädret under installationsperioden (13 november till 5 december). Av dessa uppgifter framgår att temperaturen varierade mellan + 6 och - 14°C. Regn eller snö har registrerats på platsen under nästan alla dagar. Mellan den 23 och den 28 november var det nederbörd registrerad med upp till 14 millimeter på en dag. Vinden varierade under perioden, men låg oftast kring 9-16 m/s. När tornsegment 1 och 2 monterades var temperaturen mellan 1 och 3 grader Celsius. Under perioden för den slutgiltiga momentdragningen, den 3-5 december, varierade temperaturen mellan -3 och -14°C.

Tiden från det att fläns 1 monterades och drogs fast med en elektrisk skruvdragare, till dess att slutgiltig momentdragning genomfördes var ca 3 veckor. Under den perioden var tornskruvarna och flänsen utsatta för vatten och fukt på grund av nederbörd. Tornskruvarna kom i lådor från ett centrallager och transporterades ut till installationsområdet där de placerades vid de platser där tornen skulle monteras.

Tillverkarens instruktioner för montering och hantering av skruvar

Under installationsperioden gällde tillverkarens dokument *Storage Manual V112, 0017-7028 V01* för hantering och lagerhållning av tornskruvar. Det refererade till ett dokument med krav för lagerhållning av delar och komponenter innan installation. Dokumentet anger att delarna måste förvaras i sina originalförpackningar och att det ska finnas containrar tillgängliga under installationen för att förvara pallarna med skruv. Tornskruvarna ska levereras från skruvtillverkaren i pallar med pallkragar och trälock. I pallarna ska skruvarna ligga i ett plastemballage som tillsluter för att ge skydd.

Tillverkarens installationsmanual med dokumentnummer *0009-0956 v05* var giltig under installationsperioden. Av installationsmanualen framgick det att innan en tornsektion kunde lyftas på plats skulle man kontrollera att flänsen var ren från smuts och skräp. Mindre märken och grader fick tas bort med en fil. Skruvarna skulle lyftas upp med kran till tornsegmentets plattform och placeras längs med tornväggen runt hela plattformen, för att klara viktkrav på plattformen. En tätningssmassa, Sikaflex 521 UV, skulle appliceras i ett högst fyra millimeter i diameter tjockt lager på ytterdelen av kontaktytan på flänsen. Tätningssmassan fick appliceras maximalt två timmar innan tornsektionen skulle lyftas på.

Tornsektionen skulle sedan lyftas upp med en kran och placeras på den underliggande sektionen. I manualen stod det också att det inte fick finnas damm eller jord på skruvarna eftersom det kunde påverka friktionen, samt att det inte fick appliceras mer smörjmedel eftersom muttrarna redan var smorda vid leverans. När ett tornsegment skulle lyftas på plats fick ingenting befinna sig mellan flänsarna p.g.a. av risken för skador.

Tornskruvarna skulle monteras underifrån med skruvskallen nedåt och muttern uppåt och en bricka på varje sida. Tornskruvarna spändes sedan fast med hjälp av en elektrisk skruvdragare. Den elektriska skruvdragaren fick inte användas för att dra tornskruvarna till mer än 75 procent av det specificerade momentet (15 000 Nm moment som skulle ge en förspänningskraft på 1 680 kN) eftersom det annars fanns en risk att skada skruvarna och muttrarna.

För att dra tornskruvarna till specificerat moment skulle ett hydrauliskt verktyg användas. Momentvärden för de olika tornskruvarna fanns angivna i Vestas dokument *Bolt Connections doc. 960501*. Installationsmanualen innehöll följande instruktion på engelska (här översatt till svenska) för slutgiltig åtdragning av tornskruvarna:

Spänn alla tornskruvar till fullt moment. Fortsätt dragningen tills ingen mutter rör sig längre när fullt moment appliceras. När alla tornskruvar är dragna till fullt moment ska den övre delen av skruven markeras med ett kryss. Om skruven roterar vid dragning ska ett mothåll användas som håller fast skruvskallen.

Mothållsverktyg fanns att tillgå och levererades av tillverkaren av hydraulverktyget.

Om installationen av tornet tillfälligt behövde avbrytas fanns ett krav på att skruvarna måste dras med slutgiltigt moment inom 7 dagar.

I instruktionen framgick att tornskruvarna inte fick återmonteras.

Montörerna fick en instruktion på plats om vilket verktyg och hylsa till verktyget som skulle användas samt vilket tryck som den tillhörande pumpen skulle ställas in på. Olika tryck för dragningar till 70 procent och 100 procent fanns angivet (se figur 11).

Top of Mid section (3. tower section)		Socket size:
Bolt size:	M56 - HV	90mm
Torque: (70%)	7.000 Nm	
Torque: (100%)	10.000 Nm	
Tool type:	MX120	or
Bar: (70%)	400	
Bar: (100%)	575	
Top of Lower mid (2. tower section)		Socket size:
Bolt size:	M64 - HV	100mm
Torque: (70%)	10.500 Nm	
Torque: (100%)	15.000 Nm	
Tool type:	MX200	or
Bar: (70%)	380	
Bar: (100%)	540	
Top of Bottom (1. tower section)		Socket size:
Bolt size:	M64 - HV	100mm
Torque: (70%)	10.500 Nm	
Torque: (100%)	15.000 Nm	
Tool type:	MX200	or
Bar: (70%)	380	
Bar: (100%)	540	

Figur 11. Montörernas instruktion för momentvärden.

Allmänt om installationen

Enligt de uppgifter som framkommit om monteringen och installationen av torn 15, var det inte något som var avvikande eller anorlunda i förhållande till monteringen av övriga torn. Arbetet fortgick normalt. Tornskruvarna kom från ett centrallager och transporterades ut till installationsområdet där de placerades vid de platser där tornen skulle monteras. Det var vanligt att dessa lådor med tornskruvar, och dess plastemballage, öppnades direkt för att kontrollera innehållet.

Ibland lämnades de öppna och det var inte ovanligt att man var tvungen att ta bort snö från lådorna innan skruvarna användes. Några containrar för att förvara skruvarna fanns inte på platsen. Vid ett tillfälle har det rapporterats om att tornskruvar lämnats på en plattformsektion i omonterat skick över natten. Dagen efter gick det inte längre att skruva på muttern för hand. För att kunna montera dem fick man använda en elektrisk skruvdragare. Trots att mothållet (anordning för att säkerställa att skruven inte roterar vid dragning) användes vid slutgiltig momentdragning så rörde sig inte muttern något när man applicerade fullt moment. Montörerna har uppgivit att de ibland behövde använda gasolvärmare för att försöka få bort snö och is från flänsarna innan montering skedde.

Det har rapporterats att issörja eller snö ibland pressades ut mellan flänsarna när montörerna genomförde den slutgiltiga momentdragningen med fullt moment. Det finns däremot inte några konkreta uppgifter om vid vilka torn eller flänsar som detta observerades.

Haverikommissionen har vid olika tillfällen, både vid Vestas lager i Åseda och vid skruvtillverkarens fabrik provat att för hand montera en ny mutter och det har enkelt gått att skruva av och på en mutter på en skruv för hand.

Monteringen av tornskruvarna genomfördes av Vestas underentreprenör Total Wind. Vestas gör inte några egna kontroller av tornskruvarna efter montering i samband med installationsprocessen. Vid besiktning och överlämning (där en så kallad walk-down genomförs) görs visserligen ett antal olika kontroller, men inte att skruvarna har korrekt förspänningskraft.

1.10.7 *Service och kontroller av tornskruvarna*

Vestas hade ett kontrollprogram under drift för tornskruvar som följde ett särskilt schema⁵. Första kontrollen skulle göras efter tre månader i drift och den andra efter ett år. Sedan skulle kontroller genomföras var fjärde år upp till tornets avsedda livslängd på 20 år. Tremånaderskontrollen av det havererade vindkraftverket genomfördes den 8 mars 2013, i direkt anslutning till att vindkraftverken installerades. Ettårskontrollen genomfördes den 17 juli 2013. Anledningen till att tremånaders- och ettårskontrollen tidigarelades var att det var bättre att göra dessa kontroller under våren och sommaren eftersom det oftast blåser mindre.

Kontrollen av en skruv innebar att man gjorde en momentdragning. Vid tremånaderskontrollen skulle var tredje skruv kontrolleras genom att den drogs med 100 procent av åtdragningsmomentet. Om muttern roterade mer än tio grader räknades den som lös. De tornskruvar som testades märktes upp med ett kryss på sidan av muttern. Vid ettårskontrollen skulle var tionde tornskruv kontrolleras med samma

⁵ Inspection of Tower Flange Bolts Pretension 0002-1230 v8.

åtdragningsmoment och muttern skulle märkas med ett streck på sidan. Om man hittade en lös tornskruv fanns följande åtgärdsaktiviteter.

Tabell 2. Ett översatt utdrag från den engelska servicemanualen.

Service	Åtgärd vid funnen lös tornskruv
3 månaders	Dra åt alla tornskruvar i den aktuella flänsen
12 månaders	<ul style="list-style-type: none"> • Dra åt alla tornskruvar i den aktuella flänsen • Byt ut den lösa tornskruven och de två intilliggande tornskruvarna på båda sidor. Säkerställ rätt förspänning genom att återdra de nya tornskruvarna efter minst 6 timmar.
Vart 4 år	<p>Dra åt alla tornskruvar i den aktuella flänsen. Byt ut lösa tornskruvar beroende på andelen lösa skruvar enligt nedan.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Om mindre än 10 % av tornskruvarna är lösa och de är jämnt fördelade över flänsen byt ut den lösa tornskruven och de två intilliggande tornskruvarna på båda sidor. Säkerställ rätt förspänning genom att återdra de nya tornskruvarna efter minst 6 timmar. • Om antalet lösa är mindre än 10 % men grupperade tillsammans (>3 skruvar per grupp) initiera en orsaksanalys. • Om det är fler än 10 % lösa tornskruvar ska alla skruvar i flänsen bytas och en orsaksanalys initieras. Efter 3 månader ska alla tornskruvar kontrolleras igen.

Om lösa tornskruvar påträffades skulle man fylla i ett särskilt dokument, *Service Inspection Form for Loose Tower Flange Bolt*⁶ (förkortas SIF). Rapporten skulle sedan skickas till en e-postadress hos tillverkaren. Denna e-postadress var enkom upprättad för att ta emot just sådana rapporter. Rapporterna skulle sedan gås igenom och vid behov skulle en orsaksanalys initieras av tillverkaren.

Enligt uppgift från tillverkaren ska man alltid upprätta en SIF när lösa tornskruvar upptäcks.

⁶ Document S0002-1232

1.10.8 *Historiken för lösa tornskruvar*

Både lösa och trasiga tornskruvar (skruvar som har gått av helt) har vid ett flertal tillfällen under flera år upptäckts i flera av tornen i vindparken i Lemnhult. Följande är ett utdrag av inkomna uppgifter.

Under tremånaderskontrollen i torn 15 upptäcktes sex lösa tornskruvar i fläns 5. Tornskruvarna i denna fläns kom från tillverkaren Cooper&Turner. Två av de lösa skruvarna var slumpmässigt utspridda medan fyra var placerade till höger om stegen och distribuerade mellan tio sammanhängande skruvhål. Enligt den rapport som finns över händelsen bedömdes de vara slumpmässigt utspridda.

Under ettårskontrollen upptäcktes två trasiga skruvar i fläns 2 i torn 25. Tornskruvarna i denna fläns kom från tillverkaren Friedbergs. Den 22 juli 2013 upptäcktes 39 lösa tornskruvar i fläns 4 och 37 lösa tornskruvar i fläns 5 i torn 27. Den största gruppen var 15 lösa skruvar bredvid varandra. Haverikommissionen har inte fått in någon uppgift om vilka åtgärder som vidtogs i dessa flänsar till följd av de lösa skruvarna.

Verksamhetsutövaren har uppgett att man inte fick kännedom om de lösa och trasiga skruvar som hittades under tremånaders- och ettårskontrollen.

Den 22 november 2014 upptäcktes tre lösa tornskruvar i torn 7 i fläns 2 i samband med en utbildning för klättring. Skruvarna påträffades av en slump och de gick att rotera för hand. Efter denna upptäckt startade tillverkaren en kontroll av samtliga torn i Lemnhult. Under januari 2015 inleddes ett kontrollprogram för tornskruvarna i parken. Denna kontroll var inte en del av Vestas ordinarie underhållsschema utan genomfördes på grund av upptäckten av lösa skruvar. Den metod som användes för kontrollerna kallas av tillverkaren för ett pingtest. Testet består av att man slår på en skruv med ett metalliskt föremål och lyssnar efter en metallisk klang. Om ljudet var annorlunda bedömdes skruven vara lös. Metoden bedömdes som lite osäker under kalla förhållanden och man beslöt att göra om testet under sommaren 2015. Nedanstående är en sammanfattning över de lösa skruvar som upptäcktes med hjälp av pingtestmetoden i januari 2015. Av kolumnen "Vatten" kan utläsas om det observerades inträngande vatten vid de lösa tornskruvarna.

Tabell 3. Sammanställning över lösa och trasiga tornskruvar från januari 2015.

Torn	Fläns	Antal lösa/trasiga	Vatten	Tillverkare
7	2	5 trasiga 2 lösa	Ja	Cooper&Turner
12	3	1 trasig		Friedberg
15	5	2 trasiga 3 lösa	Ja	Cooper&Turner
20	1	1 lös		Cooper&Turner
22	2	1 lös		Friedberg
25	4	2 trasiga 6 lösa	Ja	Friedberg
27	1 2 5	2 lösa 4 lösa Ej angivet antal	Ja Ja Ja	Cooper&Turner Friedberg Cooper&Turner
31	2	1 lös		Cooper&Turner
33	2	2 lösa		Cooper&Turner

I torn 27 vid fläns 5 visade inte pingtestet att någon skruv var lös men det fanns vatteninträning runt hela flänsen. I rapporten från kontrollen rekommenderades det att fläns 5 borde kontrolleras med ett momentverktyg.

Under våren 2015 genomfördes ett byte av de tornskruvar som var lösa eller trasiga under pingtestet i januari 2015. I torn 15 upptäcktes sex lösa skruvar på höger sida av stegen i fläns 5 vid tremånaderskontrollen. Under pingtestet i januari 2015 upptäckte man att de tornskruvar som hade bytts ut vid tremånaderskontrollen var lösa eller trasiga igen. Skruvar i positionerna 100 till 13 (där stegens mitt räknas som utgångspunkt medurs runt flänsen) fick bytas. I januari 2015 hade lösa skruvar rapporterats i skruvhålen 1, 3, 4 och 5.

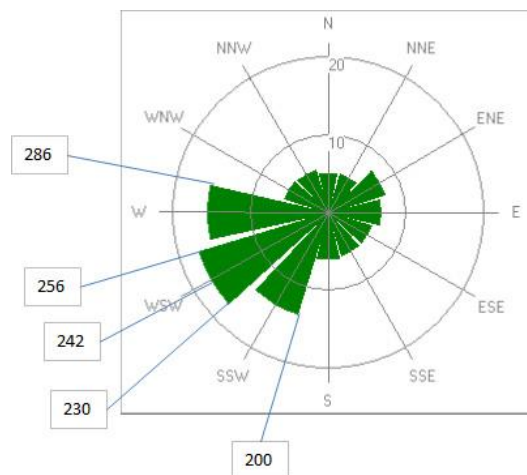
Det finns en rapport från den 28 maj 2015 om att man hittade sju trasiga och tre lösa tornskruvar grupperade tillsammans i fläns 3 på torn 9. I rapporten kan man se att de sju tornskruvarna låg på golvet av plattformen dvs. tornskruvarna hade gått av helt. Under pingtesten i januari 2015 upptäcktes inga lösa skruvar i torn 9.

Mellan 12 och 15 juni genomfördes nya pingtester i hela parken. I torn 25 fläns 4 hittades åtta lösa och fyra trasiga tornskruvar. Vatten hade dessutom trängt in i tornet. För torn 26, fläns 2, finns en rapport om en skruv som tycktes vara lös. I torn 27 upptäcktes två lösa skruvar i fläns 1 och en lös i fläns 2.

På uppmaning från verksamhetsutövaren genomförde tillverkaren en analys av problemen som uppstod under perioden januari-juni 2015. Slutsatsen var att man i montageprocessen inte hade uppnått specificerad förspänningskraft. De lösa skruvarna åtgärdades av Vestas och man bedömde att problemet var åtgärdat i och med att de lösa tornskruvar som upptäcktes byttes ut. I minst två flänsar byttes samtliga skruvar ut.

Sammanställning lösa tornskruvar

Av de tio flänsar som hade problem upptäcktes skruvarna i anknytning till stegens position i sju av fallen. Tornens orientering är olika i parken. Den huvudsakliga vindriktningen på platsen ligger mellan 200-286 grader, i kompassriktning, alltså från sydväst. I åtta av tio flänsar hade de lösa tornskruvarna suttit i intervallet 200-286 grader eller på rakt motsatta sida (20-106 grader). Av de två som låg utanför så var den ena precis på gränsen till dessa intervall och den andra 90 grader avvikande mot centrum av maxvinden.



Figur 12. En s.k. vindros för Lemnhult, dvs. en sammanställning över sannolikhet för olika vindriktningar i området.

Som framgår av tabell 3, har problem uppmärksammats i alla olika mellanliggande flänsar och för alla skruvdimensioner som använts för tornsegmenten. Flest avvikelser har uppmärksammats i fläns 1, 4 och 5. Angående skruvtillverkare så var tornskruvar från Cooper&Turner monterade i sex av flänsarna och i fyra flänsar satt tornskruvar från Friedbergs.

I hälften av flänsarna har vatteninträngning observerats under kontrollerna. Vatten har runnit ut ur skruvhålen när flera skruvar har demonterats. Det exakta antalet eller positionen har inte kunnat fastställas.

Fläns 5 i torn 27 har inte räknats med i ovanstående sammanfattning då man inte hittade några lösa eller trasiga tornskruvar där. Den bedömdes ha särskilda problem och rekommendationen var att den skulle kontrolleras ytterligare.

Mjukvaruproblem och vibrationer

Varje vindkraftverk i parken har en övervakningsenhet som loggar olika händelser, varningar och larm. Bland annat finns ett så kallat accelerationslarm. Detta larm utlöser om tornet börjar röra sig eller vibrera för kraftigt, i syfte att undvika att lasterna ska överskrida de nivåer som aggregatet är dimensionerat för. Ett sådant larm medför att vindkraftverket automatiskt ska stoppas och stå still i en minut för att sedan sättas igång igen.

Sedan augusti 2013 fram till haveriet registrerades totalt 113 accelerationslarm i tornet. Av dessa inträffade 89 larm under 2015, endast två stycken under 2014 och resterande 22 larm under 2013.

Tillverkarens analys av larmhistoriken har visat att perioderna med höga larmnivåer sammanfaller med användandet av vissa mjukvaruversioner till styrsystemet. När torn 15 kollapsade hade turbinen varit i drift i nästan tre år, och under dessa år hade man haft problem med två mjukvaruversioner under nästan 18 månaders tid.

Tillverkaren har konstaterat att dessa mjukvaror har orsakat vibrationer i tornkonstruktionen med ökade utmattningslaster till följd. Tillverkaren har gjort en beräkning av vad dessa vibrationer och larm kan ha bidragit till i ökade laster. I den beräkningen kom man fram till att dessa larm motsvarade ungefär en procents ökning av de totala utmattningslasterna. Den slutsats som tillverkaren drog av dessa resultat var att ökningen var försumbar ur ett 20-årigt livstidsperspektiv.

Haverikommissionen har gjort beräkningar på hur dessa larm och vibrationer påverkade torn 15, avsnitt 1.13.9 *Beräkning av skruvens livslängd beroende på ökade laster*. Dessutom har mätvärden från ett annat torn analyserats för att se om det vindkraftverket har varit utsatt för högre laster. Mätvärdena uppmättes efter haveriet av torn 15.

1.11 Personal

Haverikommissionen har försökt att nå och genomföra intervjuer med den personal som var direkt involverad i skruvdragning av torn 15. Även personal som utfört service som inkluderar skruvdragning har sökts. Denna personal består av personer av olika nationaliteter som är bosatta över hela Europa, vilket har inneburit att kontakt inte har kunnat knytas med alla.

Arbetet med att förspänna tornskruvar på det aktuella tornet genomfördes av en ensam montör. Dessutom fanns det en övergripande arbetsledare som skötte den direkta översynen av hela arbetet. Båda arbetade för en underentreprenör, Total Wind A/S.

I parken fanns dessutom personal från tillverkaren på plats. Deras uppdrag var främst att erbjuda hjälp och stöd om problem uppstod på vägen, men de var inte operationellt involverade i arbetet med att dra skruv. Dock genomförde de kontroller av arbetet och besiktning av installationen i en s.k. ”walk down”.

1.11.1 *Montören*

Haverikommissionen har gjort flera försök att komma i kontakt med den montör som utförde skruvdragningen i den första flänsen i tornet men har inte lyckats. Dock har tillverkaren kunnat komma i kontakt med montören, som kortfattat har berättat om sitt arbete i Lemnhults vindpark.

Vid tillfället för monteringsarbetet på Lemnhult vindpark hade montören sedan tidigare ingen erfarenhet av att montera vindturbiner. Han hade inte gått någon formell utbildning för att lära sig sina arbetsuppgifter, men han hade fått muntliga instruktioner om hur han skulle gå till väga.

Montören har uppgett att han inte kommer ihåg om det under installationen hände något onormalt som skulle kunna förklara haveriet.

Han har berättat om processen att förspänna skruvarna. Först drog man åt tio skruvar på fyra olika ställen på flänsen med 70 procent av den slutgiltiga förspänningskraften. Därefter förspändes alla med 70 procent. Sedan gjordes den slutgiltiga förspänningen av de 100 skruvarna. Efter det kontrollerades de första tio som hade förspänts, och efter det var femte skruv. Det kunde gå flera veckor mellan den första och den slutgiltiga dragningen av en skruv.

Montören har också uppgett att is pressades ut mellan flänsarna när skruvarna i den havererade flänsen fick sin slutgiltiga förspänning. Flera gånger under arbetet i parken utfördes skruvdragningen under blöta och regniga förhållanden.

1.11.2 *Den övergripande arbetsledaren från Total Wind*

Den övergripande arbetsledaren övervakade hela installationsprocessen och fördelade dagliga arbetsuppgifter till de olika arbetslagen i vindparken. Det var också dennes ansvar att kontrollera arbetet och signera de papper som behövdes för att dokumentera det.

Tornen monterades i flera omgångar, då fundamentet inte kunde belastas av fler än två segment innan det hade torkat fullständigt. Två segment monterades och sedan täcktes tornet över till dess att man kunde fortsätta arbetet. Arbetet var väderberoende.

Under installationsprocessen blev man försenad och ett andra arbetslag och en ytterligare arbetskran togs in. Torn 15 var det andra arbetslagets första monteringsuppgift.

Arbetsledaren har berättat att, såvitt han minns, innebar den inledande monteringsprocessen att det första tornsegmentet fästes mot fundamentet. Med lyftkran lyftes skruvar och verktyg upp till den första flänsen. Innan det andra segmentet sattes på plats fick man flera gånger värma med skärbrännare för att få bort is och snö och det innebar allt som oftast att flänsytorna var blöta.

Den sista åtgärden innan lyftet av det andra segmentet gjordes var att dra en smal sträng Sikaflex tätningsmassa på flänsen, utanför hålen för skruvarna. Sedan lyftes segmentet på och flänsarna passades mot varandra. Skruvarna sattes i hålen och de drogs initialt med en mutterdragare med ett moment om 1 000 Nm. Skruvarna drogs först i en stjärnformation för att få ner flänsen jämt. Efter det användes ytterligare en eldriven mutterdragare med upp till 3 500 Nm vridmoment för att få flänsen på plats.

Det sista steget i att förspänna tornskruvarna bestod egentligen av två olika steg. Första steget var att dra alla skruvar i en sekvens med, som han kommer ihåg det, 80 procent av det specificerade slutgiltiga momentet. Det sista steget var att fullborda sekvensen med att förspänna skruvarna med 100 procent av momentet (15 000 Nm). Ibland kunde det finnas ett litet glapp mellan flänsarna efter det första momentet, men de gick alltid ihop under det sista momentet.

Ingen kontroll genomfördes av skruvarna för att säkerställa att man hade uppnått full förspänningskraft, vare sig av arbetsledaren eller av de installationsansvariga hos tillverkaren. Detta kontrollerades inte heller i besiktningarna som genomfördes inför överlämnandet av vindkraftverket.

Under installationsprocessen fanns det problem och frågor som hantades löpande, men inte av en sådan dignitet att de föranledde någon misstanke om att skruvdragningen inte genomförts på ett korrekt sätt. Vädret ställde dock till det tidvis, då kyla och snö innebar vissa svårigheter. Vid minusgrader kunde exempelvis tätningsmassan bli svårare att applicera, och montörerna fick försöka att hålla det vid rätt temperatur efter bästa förmåga.

Ingen efterarbetning, såsom exempelvis planslipning av flänsar, genomfördes av de olika segmenten på plats i vindparken. De kom färdiga som moduler och monterades efter att en okulär kontroll hade gjorts.

1.11.3 *Verksamhetsutövarens driftförvaltare*

Stopp orsakade av larm från tornvibrationer inträffade ofta i början av 2013. Enligt tillverkaren användes då en programversion som resulterade i att turbinen i vissa situationer arbetade i ett resonansstillstånd där rotationsfrekvensen sammanföll med tornets egenfrekvens. Om man vid ett sådant tillfälle befann sig halvvägs upp i tornet behövde man hålla i sig, då tornet roterade runt sitt eget centrum (torsionsrörelser)

och pendlade fram och tillbaka. Men tillverkaren menade att de hade räknat på det och kommit fram till att det bara var några procents ökade laster och inget att oroa sig över.

En ny programvara installerades i början av 2014 och problemet minskade kraftigt.

En ytterligare ny programvara installerades i maj 2015 och nya tornvibrationsproblem uppstod. Turbinen, som var kopplad till ett överordnat effektregeringssystem (PPC), fick effektvärdets uppdatering med samma frekvens som tornets egenfrekvens, vilket förstärkte tornrörelserna och resulterade i larm för tornvibrationer. Vid samtliga dessa stopp svajade tornet en tid efter stoppet.

Några veckor före haveriet installerades en programvara som gjorde situationen bättre och problemen med kopplingen till effektregeringssystemet minskade. Då försvann också de tornsvajningar som tidigare hade uppstått när man stoppade turbinen.

1.11.4 *Övrigt*

Enligt uppgifter som framkommit i de intervjuer som Vestas genomfört fanns det tillfällen då vissa muttrar inte rörde sig någonting vid den slutgiltiga momentdragningen.

1.12 **Lagstiftning, föreskrifter och tillståndsgivning**

1.12.1 *Maskindirektivet*

Ett vindkraftverk och alla dess delar är att anse som en maskin. Begreppet maskin omfattar även tillhörande sidoanläggningar såsom exempelvis en kopplingsstation. Det innebär att de regler som följer av det s.k. maskindirektivet⁷ är tillämpliga. Vid tillkomsten av maskindirektivet gjordes i Sverige bedömningen⁸ att huvuddelen av direktivets regler kunde genomföras genom föreskrifter av Arbetsmiljöverket med stöd av befintliga bemyndiganden i arbetsmiljölagen (1977:1160) och arbetsmiljölförordningen (1977:1166). Vissa mindre lagändringar ansågs dock behövas.⁹

Arbetsmiljöverkets föreskrifter om maskiner

Arbetsmiljöverkets föreskrifter (AFS 2008:3) om maskiner är utformade för att genomföra maskindirektivet i svensk nationell rätt. Föreskrifterna reglerar bl.a. vad en tillverkare ska göra innan en maskin släpps ut på marknaden, vilket förfarande som ska användas vid bedömning av överensstämmelse med föreskrifterna, samt vilken teknisk dokumentation som ska tas fram och vid behov göras tillgänglig.

⁷ Europaparlamentet och rådets direktiv 2006/42/EC av den 17 maj 2006 om maskiner och om ändring av direktiv 95/16/EG.

⁸ Departementspromemoria Ds 2007:44, Genomförande av det nya maskindirektivet.

⁹ Regeringens proposition 2007/08:65 Genomförande av det nya maskindirektivet, m.m.

Vissa typer av maskiner ska enligt 12-13 §§ i föreskrifterna genomgå särskilda typer av kontroller. Vindkraftverk omfattas dock inte av de bestämmelserna, utan ska, enligt 11 §, genomgå en intern granskning enligt bilaga 8 till föreskrifterna. Det finns alltså inte något krav på extern granskning för att få sälja vindkraftverk på den svenska marknaden.

Bilaga 8 anger bland annat att tillverkaren ska upprätta viss teknisk dokumentation och vidta alla de åtgärder som krävs för att säkerställa att maskinen överensstämmer med dokumentationen.

Eftersom det inte finns några harmoniserade standarder¹⁰ för maskintypen vindkraftverk, i maskindirektivets mening, är det kraven i bilaga 1 till Arbetsmiljöverkets föreskrifter om maskiner, som en tillverkare måste uppfylla. En harmoniserad standard skulle kunna ersätta en del av eller hela föreskrifterna. I bilaga 1 beskrivs en stor mängd krav som berör alltifrån grundläggande ergonomiska krav på en operatörsplats till underhållsrelaterade krav på maskinen.

Det kan särskilt nämnas att det här finns krav på skydd mot mekaniska riskkällor. Där konstateras att en maskin, dess komponenter och tillbehör ska vara så stabila att de inte välter, faller eller gör okontrollerade rörelser under transport, montering, demontering och varje annan åtgärd som rör maskinen. Dessutom ska de olika delarna i en maskin och dess förbindningar tåla den påfrestning som de utsätts för när de används. Dock erbjuder inte bilaga 1 till föreskrifterna någon vägledning kring hur detta krav ska uppnås.

Arbetsmiljötillsyn och marknadskontroll

Arbetsmiljöverket utövar tillsyn av arbetsmiljön bl.a. genom att göra inspektioner av vindkraftverk. Det kontrolleras då att vindkraftverken och anläggningsägarna uppfyller de krav som följer av arbetsmiljölagsstiftningen.

Därutöver genomförs också marknadskontroller av maskiner, ofta i så kallade saminspektioner. Vid sådana tillfällen granskas ett vindkraftverk samtidigt både utifrån arbetsmiljölagsstiftningen men också i fråga om kraven i maskindirektivet är uppfyllda.

Arbetsmiljöverket gör marknadskontroller, vilka bedrivs i projektform, hos olika tillverkare av vindkraftverk, samt för olika typer av vindkraftverk. I början av 2016 fanns det tio olika tillverkare av vindkraftverk på den svenska marknaden. Sammanlagt hade dessa tillverkare omkring 25 olika typer av vindkraftverk. Varje vindkraftverk

¹⁰ En icke bindande teknisk specifikation som antagits av ett standardiseringsorgan, närmare bestämt Europeiska standardiseringsorganisationen (CEN), Europeiska standardiseringsorganisationen inom elområdet (Cenelec) eller Europeiska institutet för telekommunikationsstudier (ETSI), inom ramen för ett mandat från kommissionen enligt de förfaranden som anges i Europaparlamentets och rådets direktiv 98/34/EG av den 22 juni 1998 om ett informationsförfarande beträffande tekniska standarder och föreskrifter och beträffande föreskrifter för informationssamhällets tjänster.

granskas som en unik maskin. Undantag från det görs endast om flera vindkraftverk har exakt samma konstruktion.

Arbetsmiljöverkets marknadskontroller följer en generell checklista, som är densamma oavsett maskintyp, dvs. vindkraftverk bedöms efter samma kriterier som alla andra maskiner. Sedan olyckan i Lemnhult inträffade har ett kriterium lagts till på denna checklista, som särskilt ställer frågan om service- och underhållsrutiner finns dokumenterade. En stor del av kontrollerna ägnas åt frågor kring arbetsmiljön, exempelvis arbetarskydd såsom hissar och utrymmen som ska användas av servicetekniker.

I en marknadskontroll finns inget särskilt kriterium som tar upp stabilitetsfrågor. Dock har man möjlighet att begära in den tekniska dokumentationen. Detta har fram till mars 2016 inte gjorts, då dokumentationen ofta är mycket omfattande och kräver särskild sakkompetens för att kunna granskas på ett meningsfullt sätt.

1.12.2 *Standard för dimensionering av vindkraftverk*

Turbintypen V112 är dimensionerad i enlighet med den mest vedertagna standarden för konstruktion av vindkraftverk, *IEC 61400*.

Tillverkaren har valt att dimensionera V112 enligt turbinklass 3A. Det innebär den lägsta klassen avseende vindhastighet och samtidigt den högsta klassen avseende turbulensintensitet.

Wind turbine class		I	II	III	S
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	Values specified by the designer
A	I_{ref} (-)		0,16		
B	I_{ref} (-)		0,14		
C	I_{ref} (-)		0,12		

In Table 1, the parameter values apply at hub height and V_{ref} is the reference wind speed average over 10 min, A designates the category for higher turbulence characteristics, B designates the category for medium turbulence characteristics, C designates the category for lower turbulence characteristics and I_{ref} is the expected value of the turbulence intensity² at 15 m/s.

Figur 13. Grundläggande parametrar för vindhastighet och turbulensintensitet vid dimensionering av vindkraftverk. Från standard *IEC 61400-1*.

Beroende på vindförutsättningarna på den aktuella platsen väljer turbintillverkaren en vindturbinklass. Den specificerar i huvudsak vindhastigheten och turbulensintensiteten. Tillverkaren har sedan att visa att vindförhållandena på den plats som turbinen ska stå på motsvarar den turbinklass som valts. Med hjälp av mätningar som gjorts i Lemnhult har tillverkaren kunnat visa att förhållandena inte överskred de som V112 var dimensionerad för.

Den nämnda standarden anger att tillverkaren har att säkerställa och visa att hållfastheten för den lastbärande strukturen är fullgod med hänsyn tagen till en acceptabel säkerhetsnivå.

Hållfastheten avser både extrem- och utmattningslaster och ska verifieras med beräkningar eller tester som visar en tillräcklig nivå av säkerhet för att förhindra haverier. Lasterna får inte överstiga vad vindkraftverket är konstruerat för.

Laster som tillverkaren har att ta hänsyn till inkluderar enligt standarden:

- Gravitation och tröghetslaster. Dessa är till sin natur både statiska och dynamiska och kommer från gravitation, vibrationer, turbinrotation och eventuellt seismisk aktivitet.
- Aerodynamiska laster. Dessa är både statiska och dynamiska och orsakas av luftflödet och dess interaktion med fasta och rörliga delar på vindkraftverket.
- Laster från styrning och reglering av vindkraftverket. Dessa laster uppkommer under drift av aggregatet och inkluderar bl.a. moment som uppstår på generatoraxeln, moment som vill vrida maskinhuset efter en vindvridning samt laster från pitch-reglerservon (som reglerar bladens vinkel).

Vid konstruktion ska vindturbinens hela livslängd representeras av ett antal specificerade situationer (lastfall) som täcker de villkor som vindturbinen kan uppleva. Dessa lastfall inkluderar inte bara att vindkraftverket är i drift vid olika vindförhållanden utan också de olika felfall som kan uppstå. Vidare ska transport och montage beaktas.

Standarden innefattar även en processbeskrivning, *IEC 61400-22*, för att genomgå ett certifieringsförfarande. I denna process granskas vindkraftverket av en extern part. Turbintypen med denna särskilda höjd hade genomgått och blivit godkänt i ett sådant certifieringsförfarande och därmed blivit certifierat i Danmark. Certifieringen saknar dock formell betydelse i Sverige. Haverikommissionen har tagit del av den rapport som granskaren ställt till tillverkaren.

Haverikommissionen har låtit utföra ytterligare analyser för att studera vissa av de områden som granskades i certifieringsförfarandet, se avsnitt 1.13 *Särskilda prov och undersökningar*.

1.12.3 *Tillståndsprocessen för vindkraftverket*

I enlighet med dåvarande lagstiftning var vindparken tillståndspliktig¹¹ och tillståndsansökan prövades av miljöprövningsdelegationen på Länsstyrelsen i Jönköpings län.

Tillståndsprocessen följde den ordning som då beskrevs i miljöbalken och förordningen (1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd. Sedan dess har lagstiftningen ändrats genom att det har tillkommit en ny miljöprövningsförordning (2013:251). Själva processen för tillstånd är i stort oförändrad.

Tillstånd till vindkraftparken gavs 2011 och tillståndet överläts därefter till Lemnhult Energi AB.

Länsstyrelsen i Jönköpings län har angett att man under tillståndsprocessen inte granskade vindkraftverkens tekniska utförande med avseende på deras utformning och stabilitet. Man ansåg inte att miljöprövningen omfattade dessa delar, då de var CE-märkta och således föll under maskindirektivets regler.

Egenkontroll

Förordningen (1998:901) om verksamhetsutövares egenkontroll gäller för den som yrkesmässigt bedriver verksamhet eller vidtar åtgärder, som omfattas av tillstånds- eller anmälningsplikt enligt 9 eller 11-14 kap. miljöbalken. Verksamhetsutövaren, i det här fallet Lemnhult Energi AB, omfattas således av denna förordning.

Förordningen berör bl.a. det organisatoriska ansvaret för frågor som gäller verksamheten och den ställer samtidigt krav på att det ska finnas rutiner för att fortlöpande och systematiskt undersöka och bedöma riskerna med verksamheten från hälso- och miljösynpunkt.

Enligt 6 § i samma förordning ska verksamhetsutövaren omgående underrätta tillsynsmyndigheten om det inträffar en driftstörning eller liknande händelse som kan leda till olägenheter för människors hälsa eller miljö. Haveriet föranledde en sådan underrättelse till länsstyrelsen i Jönköping. I övrigt har inga underrättelser gjorts med anledning av driftsstörningar i Lemnhult vindpark på grund av lösa eller trasiga skruvar.

Tillsyn

Länsstyrelsen är en av de myndigheter som utövar tillsyn enligt miljöbalken. Tillsynen kan i vissa avseenden överlätas till en kommun som begär det. Länsstyrelsen i Jönköpings län ansvarade för tillsynen av Lemnhult vindpark.

¹¹ Se 9 och 11 kap. miljöbalken (1998:808).

Tillsynen var inriktad på de aspekter som ansökan med tillhörande miljökonsekvensbeskrivning tog upp i tillståndsprocessen. Viktiga frågor för ett vindkraftverk, i det avseendet, är miljöfrågor bl.a. buller och skuggbildning¹².

1.12.4 *Plan- och bygglagstiftning*

Ett vindkraftverk är ett byggnadsverk och måste således uppfylla de krav och regler som finns i plan- och bygglagen (2010:900), däribland kraven på bärförmåga, stadga och beständighet i 8 kap. 4 §, och plan- och byggförordningen (2011:338) och andra relaterade föreskrifter.

Vid tidpunkten för Lemnhult vindparks uppförande fanns Boverkets föreskrifter och allmänna råd samlade i EKS 8, Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder. Boverket konstruktionsregler, EKS, utgår från eurokoderna¹³. Bland annat finns i EKS de val som behöver göras för den nationella tillämpningen.

Bygganmälan

Vindkraftverken i Lemnhult var inte bygglovspliktiga, men däremot anmälningspliktiga.

En anmälan ska bl.a. innehålla uppgifter om byggherren, tidpunkt då arbetet är avsett att påbörjas, förslag på kontrollplan samt uppgifter om den kontrollansvarige. Undantag från kravet på kontrollansvarig gäller endast för vissa mindre åtgärder med ett byggnadsverk och är inte aktuellt här. Förutom dessa grundläggande uppgifter behövs i vissa ärenden även andra handlingar, som exempelvis situationsplan, planritning, fasadritning, sektionsritning, konstruktionsritning och hållfasthetsberäkning.

Kontrollplan och kontrollansvarig

Kontrollplanen är ett dokument för verifiering av att samhällets krav på den bebyggda miljön uppfylls avseende tekniska egenskapskrav m.m. En kontrollplan ska innehålla en sammanställning av de kontroller som byggherren eller en av denne särskilt utsedd sakkunnig ska genomföra för att säkerställa dessa krav. Oftast utformas kontrollplanen som en checklista där det i rader och kolumner framgår vad som ska kontrolleras, vem som ska kontrollera, hur och när kontrollen ska göras, mot vad kontrollens resultat ska jämföras och på vilket sätt resultatet ska redovisas.

Byggherren ska senast vid det tekniska samrådet lämna ett förslag till kontrollplan. Byggnadsnämnden ska fastställa kontrollplanen i startbeskedet som är en förutsättning för att byggnationen får påbörjas.

¹² Varje blad kastar en särskild skugga när de snurrar, denna skuggbildning kan uppfattas som störande och kan medföra att ett vindkraftverk periodvis måste stängas ned.

¹³ Europagemensamma dimensioneringsregler för bärverk.

Den kontrollansvarige ska hjälpa byggherren med att ta fram ett förslag till kontrollplan för den aktuella åtgärden. Det är visserligen byggherrens ansvar i ett egenkontrollsystem att se till att kraven i plan- och bygglagstiftningen uppfylls och att kontroller görs i tillräcklig omfattning, men den kontrollansvarige ska se till att kontrollplanen och gällande bestämmelser och villkor för åtgärderna följs samt att de nödvändiga kontrollerna utförs. Om det görs några avvikelser från föreskrifterna eller de villkor som byggnadsnämnden har meddelat ska den kontrollansvarige underrätta byggherren och vid behov meddela byggnadsnämnden.

Den kontrollansvarige ska dokumentera sina byggplatsbesök och notera de iakttagelser som kan vara av värde vid utvärderingen inför slutbeskedet. Den kontrollansvarige ska också avge ett utlåtande till byggherren och byggnadsnämnden som underlag för slutbeskedet som byggnadsnämnden utfärdar och som är förutsättningen för att ett byggnadsverk får tas i bruk.

Den kontrollansvarige ska vara certifierad av ett ackrediterat certifieringsorgan.

Arbetsplatsbesök från byggnadsnämnden

Arbetsplatsbesök ska alltid göras vid stora eller komplicerade byggprojekt eller om byggnadsnämnden och byggherren vid det tekniska samrådet har kommit överens om ett arbetsplatsbesök.¹⁴

Byggnadsnämndens handläggare och den kontrollansvarige ska alltid vara med på arbetsplatsbesöket. Det är även lämpligt att byggherren eller dess ombud och den som utför åtgärden är med.

Vid ett arbetsplatsbesök kontrollerar byggnadsnämndens handläggare bland annat kontrollplanen, att den kontrollansvarige är närvarande i föreskriven utsträckning och att inget uppenbart strider mot byggreglerna.

Om man vid besöket upptäcker allvarliga avvikelser från plan- och bygglagstiftningen, gällande föreskrifter, beslut i ärendet eller planerad kontroll bör byggnadsnämnden kalla till samråd och diskutera nödvändiga åtgärder.

EKS – Europeiska konstruktionsstandarderna

Boverkets föreskrifter (BFS 2011:10) och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder) benämns EKS och anknyter till 3 kap. 7 och 8 §§ plan- och byggförordningen (2011:338). Där ställs bl.a. krav på bärförmåga, stadga och beständighet hos byggnadsverk.

¹⁴ 10 kap. 27 § plan- och bygglagen (2011:900)

Föreskrifterna i EKS hänvisar bl.a. till standarder i det så kallade eurokods-systemet. Dessa standarder avhandlar exempelvis laster på bärverk, vindlaster, dimensionering av knutpunkter och förband.

Kommunens och den kontrollansvariges hantering av bygganmälan och kontrollplan för Lemnhults vindpark

Kommunen godkände en kontrollplan som omfattade vindkraftverkens fundament och konstruktion. Kontrollplanen och en kontrollansvarig för dessa åtgärder accepterades i samband med startbeskedet som kommunen gav den 29 februari 2012.

Enligt kommunens företrädare var det kommunens uppfattning att eftersom tornkonstruktionen (ståltornet) och turbinen omfattades av maskindirektivets krav, så omfattade byggnadsnämndens ansvar endast fundamenten (alltså den gjutna grunden för tornet) och inte konstruktionen i sin helhet. Denna uppfattning ansåg man vara i enlighet med Sveriges kommuner och landstings (SKL) rekommendationer och praxis för kommuner som har stora etableringar av vindkraft. Därför tog man på kommunen inte in några handlingar kring tornkonstruktionen och begränsade sina två arbetsplatsbesök till kontroller av fundamenten.

Enligt uppgifter från både kommunen och den kontrollansvarige genomfördes heller inga kontroller på plats med avseende på tornkonstruktionen vare sig av byggnadsnämnden eller av den kontrollansvarige. Som skäl har man angett att området var en byggarbetsplats och riskerna förenade med detta omöjliggjorde ett besök, samt att det krävdes tillstånd från byggherren.

Den kontrollansvarige har accepterat de egenkontroller byggherren har utfört.

Sveriges kommuner och landsting

Sveriges kommuner och landsting har i ett cirkulär tydliggjort sin tolkning av de förändringar som den nya plan- och bygglagstiftningen innebär.¹⁵ I cirkuläret anger SKL att den s.k. dubbelprövningen tagits bort, vilket innebär att den tillståndssökande inte längre behöver söka både tillstånd hos länsstyrelsen och bygglov hos kommunen.

Förändringarna i lagstiftningen skulle inte innebära någon försämrad kontroll av anläggningarnas placering och utformning. Dock skriver SKL att prövningen enligt miljöbalken omfattar alla de intressen och frågor som kommunen kunnat pröva enligt plan- och bygglagen.

SKL har påpekat att cirkuläret skrevs mot bakgrund av formuleringar i plan- och bygglagen (1987:10) och inte den vid tillfället gällande plan- och bygglagen (2010:900).

¹⁵ SKL cirkulär 09:57, diarienummer 07/4226, 2009-10-15.

SKL har angett att man sedan cirkulärets publicering inte har publicerat några ytterligare rekommendationer, cirkulär eller checklistor på det här området.

Boverket om vindkraftverk och krav enligt PBL

Boverket är den föreskrivande myndigheten för plan- och bygglagstiftningen. Enligt Boverket utgör ett vindkraftverk ett byggnadsverk i enlighet med plan- och byggförordningen (2011:338) och ska uppfylla egenskapskraven¹⁶ inklusive kraven på bärförmåga, stadga och beständighet. Hela vindkraftverket omfattas dessutom av maskindirektivet.

Både torn och fundament måste uppfylla kraven på ett byggnadsverk i enlighet med lagstiftningen, vilket betyder att de kontroller som föreskrivs inte kan avgränsas till endast en del av byggnadsverket.

Om en tillverkare gör ett avsteg från en i Sverige gällande standard behöver denne med prövning och verifiering säkerställa att man uppnår minst samma resultat. Detta innebär att nationella föreskrifter och standarder från andra länder går att använda men att tillverkaren ska visa på att appliceringen av dessa föreskrifter fungerar under de rådande förhållandena.

1.13 Särskilda prov och undersökningar

1.13.1 Skruvförband

Vid montering av ett förspänt skruvförband är det en viss förspänningskraft som önskas. Förspänningskraften är den axiella¹⁷ dragkraft som uppstår i skruven när skruven förlängs och flänsen komprimeras. Förspänningskraften uppkommer när ett vridmoment appliceras på muttern eller skruvskallen. Flera faktorer påverkar förspänningskraften i ett skruvförband och generellt brukar man beskriva fördelningen av det applicerade momentet enligt följande.

Ungefär hälften av vridmomentet, alltså 50 procent, går åt för att övervinna friktionen i de roterande delarnas anliggningsytor dvs. ytorna mellan mutter och bricka respektive mellan bricka och kontaktyta på flänsen. Ytterligare 40 procent går åt till att övervinna friktionen i gängorna mellan skruv och mutter. Detta innebär att endast 10 procent av det applicerade momentet åstadkommer den önskade förspänningskraften.

En skruv med för låg förspänningskraft kommer under belastning att utsättas för en kombination av böjning och dragning som initierar mikrosprickor vid stålets korngränser¹⁸ i den mest påkända delen av gängan. De yttre lasterna kommer sedan att medföra att sprickan växer

¹⁶ 8 kap. 4 § plan- och bygglagen (2011:900).

¹⁷ Riktning genom en axel eller centrumlinje på ett föremål.

¹⁸ Gränsområde på mikroskopisk nivå mellan kristallkornen i kristallina material.

in mot centrum. När sprickan växer, minskar den area som kraften fördelar sig på, vilket medför att spänningen i den kvarvarande arean ökar och stålet kommer till slut att plasticera¹⁹.

När materialet plasticeras reduceras förspänningskraften betydligt. Närliggande skruvar i förbandet får då ta en större andel av de yttre lasterna och motsvarande sprickbildning uppstår också där. Till slut är skruvarnas spänningsbärande area så liten att en helt normal last får hela förbandet att kollapsa och förbandet släpper helt.

Skruvens förlängning beror av förspänningskraften (F), skruvens area (A), klämlängden (L) och elasticitetsmodulen (E) för skruvmaterialet. Δl är förändringen i längd för skruven. För en M64 skruv i det aktuella förbandet gäller följande siffror. Förspänningskraften ska vara 1 680 kN, arean 2 676 mm², elasticitetsmodulen $210 \cdot 10^3$ N/mm² och klämlängden 270 mm. Förspänningskraften och förlängningen av skruven har ett direkt linjärt samband.

$$\Delta l = \frac{F (N) * L (mm)}{A (mm^2) * E \left(\frac{N}{mm^2} \right)} \rightarrow \frac{1\,680 \cdot 10^3 * 270}{2\,676 * 210 \cdot 10^3} \approx 0,81 \text{ mm}$$

Med sättningar i skruvförband avses summan av alla plastiska deformationer i skruvförbandet som orsakar en förkortning i skruvens förlängning. En del av sättningarna erhålls vid montering och en del uppkommer efter en tid i drift. Sättningar inträffar i samtliga hopfogade delar och i gängorna. Med de hopfogade delarna avses alla ingående delar i förbandet som brickor, packningar och ytbehandlingsformer i form av t.ex. förzinkning och färg. Vid användande av momentmetoden ska den slutgiltiga momentdragningen enligt standarden SS-EN 1090-2 göras med ett moment som motsvarar 110 procent av den specificerade förspänningskraften. Tester har visat att 10 procent relaxerar (kraften minskar) med tiden, under förutsättning att inga övriga sättningar sker p.g.a. färgskikt, mjuka packningar, övriga ytbehandlingsformer, ytdefekter m.m. i det sammanfogade stålmaterialet. Ingår det även sådana komponenter så påverkar de sättningens storlek ytterligare och det finns en risk för större sättningar, vilket leder till en kortare förlängning av skruven.

Vestas har angett att den metod de använde vid installationen, som innebar först en dragning med 70 procent av momentet och i nästa steg 100 procent, tar höjd för sättningar i förbandet.

I det aktuella förbandet fanns följande lager som medförde risk för sättningar utöver de normala.

¹⁹ En permanent förändring av materialet.

Tabell 4. Skruvförbandets olika lager.

Id.	Antal lager	Typ av material	Del	Tjocklek på lagret (µm)
A	1	Zinklager	Undersida mutter	50
B	2	Zinklager	Bricka	50*2
C	1	Metallisering och målarfärg	Övre sidan på övre flänsen	60+165
D	2	Zinklager	Kontaktytor i flänsen	100*2
E		Packning av tätningsmassa (Sikaflex)	I kontaktytan på flänsen	130 till 140
F	1	Metallisering och målarfärg	Undre sidan på undre flänsen	60+165
G	2	Zinklager	Bricka	50*2
H	1	Zinklager	Undersida på skruvskallen	50

Värdena i tabellen har tagits från tillverkarens specifikationer. Maximalt tillåtet värde har använts om det funnits specificerat, annars har tillverkarens riktvärden använts. Värdet på tjocklek på tätningsmassan Sikaflex efter montering har angetts av tillverkaren. Den totala tjockleken av mjuka material var 1,1 millimeter.

Den tätningsmassa som användes var Sikaflex 521UV. Enligt databladet får det appliceras vid en omgivningstemperatur mellan +5 och +40°C.

Eurokodsyste ment hänvisar till utförandestandarden *SS-EN 1090-2 Tekniska krav på utförande av stålkonstruktioner*. Enligt standarden finns det flera metoder för montage av skruvförband i stålkonstruktioner. Standarden innehåller generella krav på utförandet och monteringen, och i vissa avseenden specifika värden för dimensioner upp till M36. Dock gäller de generella kraven oavsett dimension på skruv. För större dimensioner ska erforderlig provning genomföras för att bestämma rätt metod för montering. Standarden anger dessutom att om åtdragningsprocessen fördröjs för fästdon i en utsatt miljö kan fästdonens smörjning påverkas, vilket då bör kontrolleras.

I standarden finns ett krav på att de monteringsverktyg som används vid montering ska kalibreras enligt ett definierat intervall. Det finns

även krav på verktygets noggrannhet och repeterbarhet beroende på vilken metod som används vid montering. Kraven för noggrannhet återfinns i *EN-ISO 6789*. Vid användning av momentmetoden, som är den metod som är mest känslig för spridning i förspänningskraft ska verktygen ha en noggrannhet på ± 4 procent och en kontroll ska utföras varje vecka.

Haverikommissionen har talat med flera sakkunniga inom området skruvförband. De uppgifter som framkommit är att i ett standardförband anses det normalt med en spridning på ± 25 procent när momentmetoden (enligt *SS-EN 1090-2*) används. Spridningen för de smorda muttrarna i den aktuella skruvleveransen, som varierade mellan 1 757 kN och 2 077 kN, har bedömts som normal.

1.13.2 *Besök hos tillverkaren*

Ett platsbesök hos tillverkaren i Danmark genomfördes en månad efter haveriet i syfte dels att undersöka delar av tornet som hade omhändertagits, dels att samtala med företagets utredningsgrupp och experter.

Tillverkaren hade efter haveriet, inräknat de skruvar som omhändertogs av haverikommissionen, kunnat fastställa att 32 tornskruvar hade utmattningsbrott, med varierande grad av tillhörande restbrott. Figur 14 visar på ett urval av dessa skruvar. Totalt åtta av tornskruvarna, som omhändertagits av Vestas och haverikommissionen, hade kontrollmärkningen för tremånadersservicen och fyra hade märkningen för ettårsservicen. Detta är i linje med de skrivna instruktionerna för respektive service, då en tredjedel respektive en tiondel av skruvarna ska kontrolleras.



Figur 14. Bild på tornskruvarna med utmattningsbrott och varierande grad av restbrott.

På den motsatta sidan av flänsen sett från fallriktningen fanns det tecken på korrosionsavlagringar.



Figur 15. Del av en av fläns 1, från det undre segmentet.

De skruvar som inte bröts av böjdes och fick sina gängor avskjuvade (se figur 16). Dessutom deformerades flänsen kraftigt. Kryssen på skruvarnas undersidor var en kontrollmarkering som gjordes i samband med den slutgiltiga skruvdragningen för att visa att de dragits till med fullt moment.



Figur 16. Del av fläns 1, första tornsegmentet, med böjda skruvar som fått sina gängor avskjuvade.

1.13.3 *Materialanalyser*

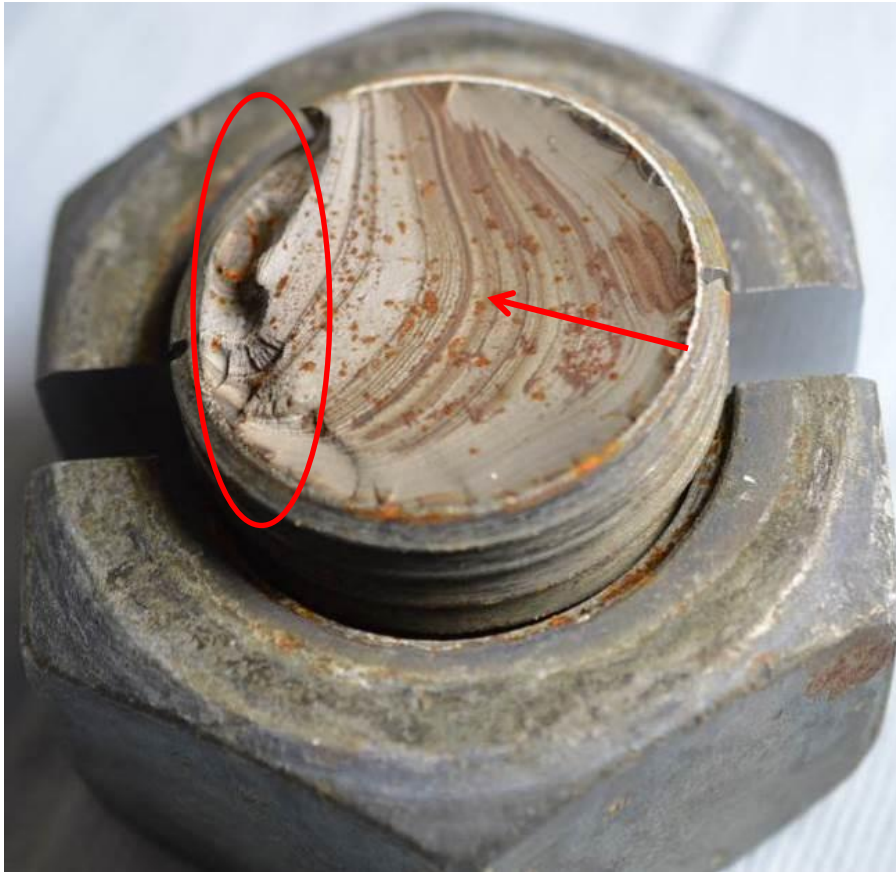
Haverikommissionen har låtit genomföra olika materialtester av tornskruvar från det havererade tornet. Dessutom har ett antal tornskruvar från andra torn och i andra dimensioner också undersökts.

Materialanalys av brutna skruvar från det havererade tornet

De två tornskruvar (A och B), tre muttrar (1 till 3), varav mutter 1 och 2 hade rester av en skruv i sig och benämns som skruvrest 1 och 2, och den bricka som omhändertogs av haverikommissionen under platsbesöket den 28 december 2015 har undersökts av Exova Materials Technology AB. Undersökningen bestod av flera moment såsom visuell och fraktografisk undersökning, svepelektronmikroskop, energidispersiv röntgenanalys, mikrostruktur, bestämning av skiktjocklek, kemisk analys, hårdhetsprovning och mekanisk provning.

Skruvresterna 1 och 2 samt skruv B brast på grund av utmattning. På brottytorna nära gängbottnarna uppvisade skruvarna en så kallad interkristallin brottyta. I undersökningen fann man endast mycket små mängder molybden, vilka var för små för att säga att de kom från ett eventuellt smörjmedel.

Skruvrest 1 och mutter 1 fick inledningsvis sågas isär. Resterande del med skaftet och skallen påträffades inte på haveriplatsen. Skruvrest 1 hade ett utmattningsbrott med ett mycket litet restbrott. Initieringspunkter kunde observeras runt hela omkretsen av skruvrest 1. Med stöd av den genomförda undersökningen kunde man konstatera att dragbelastning alternativt i kombination med enkelriktad böjbelastning hade orsakat brottet.



Figur 17. Mutter 1 och skruvrest 1, utmattningsbrottet (se röd ellips) med typiska flodmönster (se röd pil) och ett litet restbrott.

Skruvrest 1 var angripen av korrosion i gängorna. Både röd- och vitrost kunde observeras. Vitrost uppstår vanligen då nyförzinkade ytor kommer i kontakt med fukt. Man kunde inte påvisa några smörjmedelsrester vid en visuell undersökning.



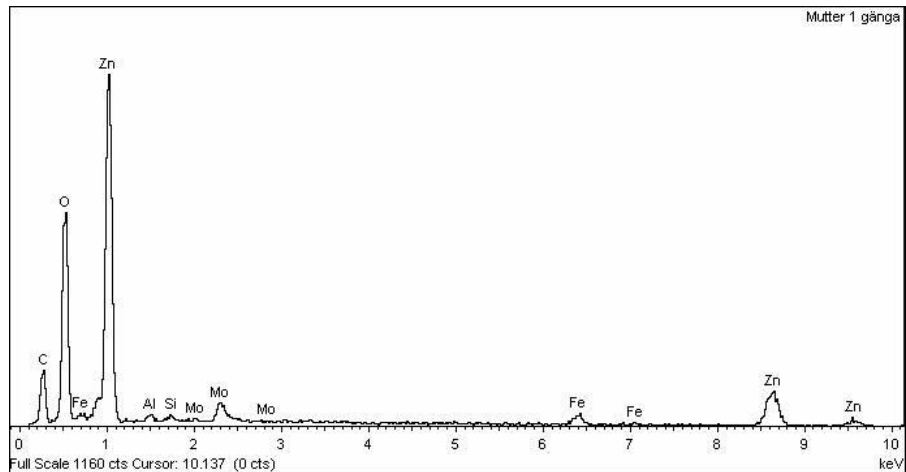
Figur 18. Gängor på skruv 1, röd- och vitrost.

Mutter 1 som satt kvar på skruv 1, hade liksom skruven angripits av korrosion (se figur 19).



Figur 19. Mutter 1, insidan på en av mutterhalvorna.

Från tio slumpmässigt utvalda positioner togs prover för att bestämma om det fanns spår av smörjmedel kvar på mutter 1. Endast vid ett av dessa prov kunde en förekomst av Mo (molbyden), som är en av beståndsdelarna i det aktuella smörjmedlet, påvisas. Resultatet från den analysen har jämförts med förekomsten av Mo på en fabriksny skruv. En tydlig skillnad framkommer i jämförelsen, där den fabriksnya skruven, figur 24, gav ett tydligt utslag av Mo, vilket mutter 1 inte gjorde (se figur 20).



Figur 20. Förekomst av olika grundämnen i analysen för mutter 1. Y-axeln signifierar mängden av ämnena.

Vid undersökningen av skruvrest 2 (som likt skruvrest 1 fortfarande satt kvar i sin mutter) konstaterades också ett utmattningsbrott, men som hade propagerat från två olika gängbottnar. I det här fallet var restbrottet större jämfört med skruvrest 1. Även i detta fall hade dragbelastning alternativt kombinerat med böjbelastning orsakat sprickpropageringen.

I mutter 3 kunde gängrester observeras, vilket kan sammankopplas med en överbelastning av gängorna.

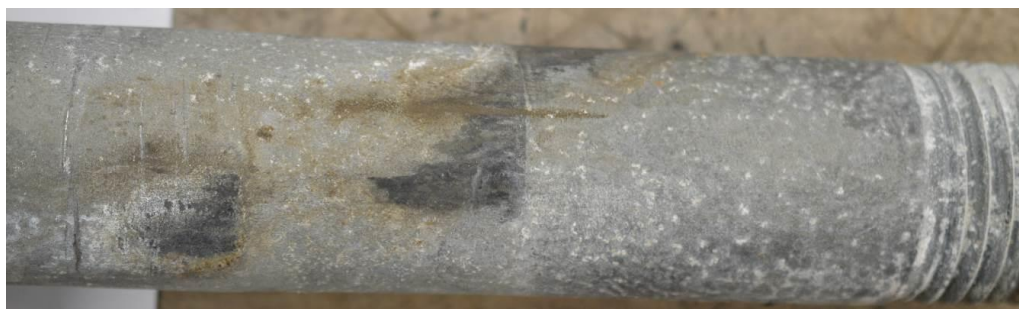
Skruv A hade fått flera gängvarv avskjuvade till följd av överbelastning. Sprickor kunde observeras i gängbottnarna. I den gängade delen fanns en förekomst av rost, främst vitrost.



Figur 21. Skruv A med avskjuvade gängor.

På bricka A fann man färgrester från skruvförbandet.

Skruv B uppvisade nötningsskador på skruvskftet. De skadorna är en indikation på att skruvförbandet har rört på sig vid belastning, inledningsvis på mikroskopisk nivå. Dessutom fann man en spricka som täckte ca halva omkretsen hos det första gängvarvet från skruvhuvudet sett. Sprickdjupet uppmättes till 2,7 mm.



Figur 22. Skruv B med nötningsskador.

Sprickor kunde observeras i varje undersökt gängbotten, både i storleksordningen 200-600 mikrometer och mindre sprickor som var ca 10 mikrometer djupa. Sprickpropageringen bedömdes vara interkristallin. Varken zink eller rost observerades i sprickorna, vilket indikerar att sprickorna uppstod efter varmgalvaniseringsprocessen, alltså efter tillverkningen.

Brottet i skruv B hade föregåtts av utmattningssprickor som propagerat från en gängbotten. Ett tydligt restbrott återfanns (se figur 23). Även i detta fall hade sprickpropageringen orsakats av dragbelastning alternativt en enkelriktad böjbelastning.



Figur 23. Skruv B.

En kemisk analys av skruv B, bricka B och mutter 1 genomfördes. I de fall det finns krav på den kemiska sammansättningen befann sig dessa värden inom kravnivåerna.

Dessutom genomfördes en mekanisk provning och hårdhetsprovning. Inte heller här avvek materialet från det som beskrivs i kravdokumenten. Skruven bedömdes uppfylla kraven på hållfasthet.

Materialanalyser av skruvar från andra vindkraftverk i Lemnhult vindpark

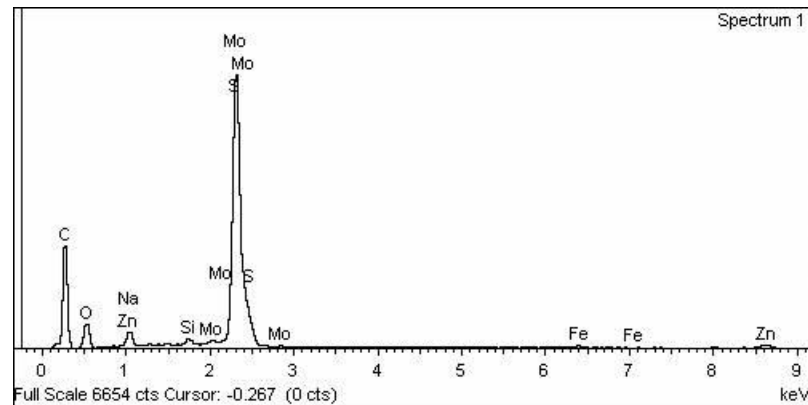
Haverikommissionen har också undersökt tornskruvar från andra vindkraftverk i Lemnhult. Flera olika undersökningar genomfördes, bl.a. en visuell undersökning, svepelektronmikroskop, mikrostruktur, skiktjockleksmätning och hårdhetsprovning.

Sju olika skruvar i olika dimensioner, från de olika skruvtillverkarna, undersöktes.

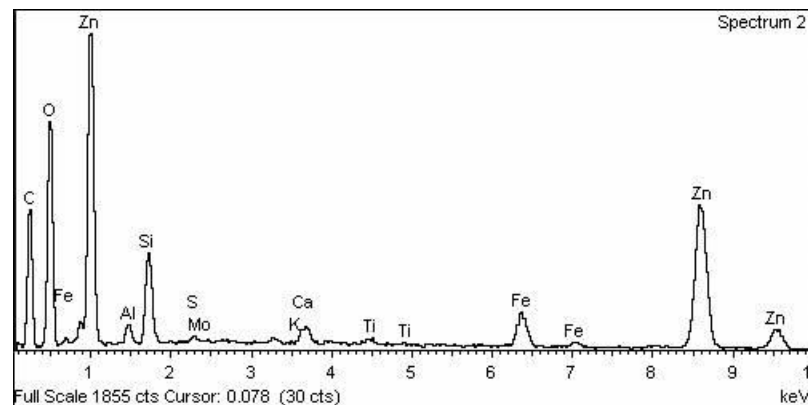
Hårdhet och mikrostruktur var inom kravgränserna för alla skruvar.

Samtliga skruvar i dimensionerna M36 och M42 var något deformerade och gängorna i skruvarnas nedre del var avskjuvade. Skruvarna i dimensionen M64 hade nötningsskador på skruvskaften och på flera positioner, primärt där muttern hade varit i fastdraget läge. Det översta skiktet var helt eller delvis bortnött eller kunde utan svårigheter petas bort i större flagor.

En undersökning för att identifiera smörjmedelsrester genomfördes. De mängder molybden som kunde studeras var för låga för att kunna säga att de härrörde från smörjmedlet. För att kunna göra en sådan jämförelse genomfördes ett referenstest med en fabriksny skruv, (se figur 24 och 25). För den fabriksnya skruven finns ett tydligt utslag för molybden, vilket kan jämföras med den mycket låga nivån på skruv F2.



Figur 24. Smörjmedelsreferens från fabriksny skruv.



Figur 25. Analys av tvättrester från skruv F2, Exovas benämning.

Undersökning av smörjmedlet

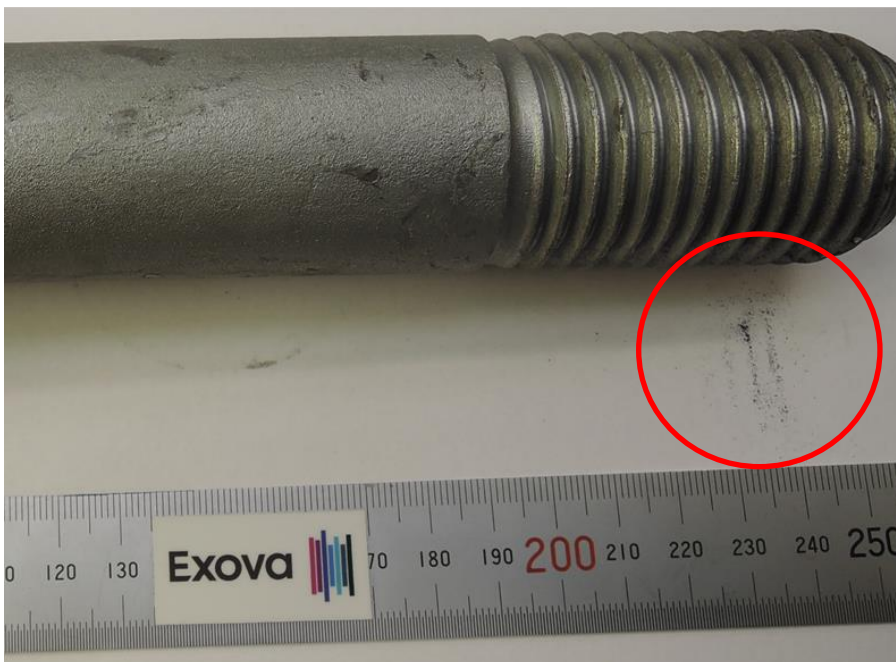
Smörjmedlets egenskaper vid hantering och hur det påverkas av vatten har också undersökts.

Man lät 10 milliliter vatten från en konventionell vattenspruta spridas över mutterns gänga. Svarta partiklar från smörjmedlet följde med vattnet när det rann av (se figur 26).



Figur 26. Mutter vars gänga har sprutats med vatten, samt smörjmedelsrester som runnit av.

Vid hanteringen av en tornskruv där muttern hade avlägsnats kunde man se svarta partiklar, beståndsdelar i smörjmedlet, som ramlade av när en skruv försiktigt lades ner på ett undersökningsbord. Skruven ska inte vara smörjd från fabrik, men en del av smörjningen har överförts i samband med att den smorda muttern fästs på tornskruven.



Figur 27. Tornskruv med svarta partiklar som lossnat vid hantering.

1.13.4 *FE-analys*

För att undersöka ett antal frågeställningar kring tornets konstruktion och hållfasthet har haverikommissionen låtit genomföra en Finita Element-Modell (FEM) av skruvförbandet och delar av tornet. Frågeställningarna som undersöktes var bl.a. hur externa laster överförs till individuella skruvar och förspänningssekvensen. FEM är en matema-

tisk metod för att enklare beräkna hållfasthet i olika mer eller mindre komplexa strukturer. Med hjälp av en programvara kan man exempelvis kontrollera en konstruktion genom att visualisera dess förskjutningar under olika villkor, exempelvis yttre laster.

En reduktion av klämkraft/förspänningskraft i ett skruvförband kan leda till en väsentlig förändring i hur en skruv utstår externa laster. Till följd av en sådan reduktion får den individuella tornskruven en förkortad livslängd. Därför kan ofta ett utmattningsförlopp i tornskruvar relateras till olika faktorer som har medverkat till en förlust av förspänningskraft.

Fem huvudsakliga faktorer kan teoretiskt sett bidra till en sådan förlust.

- 1) För hög friktion mellan skruv och mutter, t.ex. vid otillräcklig eller obefintlig smörjning under monteringen. Mer av momentkraften går åt för att övervinna friktionen mellan en skruv och mutter, och man får en mindre förspänningskraft som följd.
- 2) Det initiala glappet mellan flänsarna kan skapa lokala krafter i materialet när flänsarna måste deformeras innan klämkraften når skruven.
- 3) Om den korrekta processen för att förspänna ett skruvförband inte följs.
- 4) Om det finns stora variationer i materialegenskaper eller avvikelser i dimensioner kan den initiala förspänningskraften relaxeras när skruvar intill varandra förspänns.
- 5) Alltför stora överlasten under drift som gör att skruvarna lokalt plasticerar, vilket leder till en förlust av förspänningskraft.

I analysen användes två olika modeller, en med 1/100-dels fläns (alltså över en tornskruv) och en med 1/8-dels fläns där tre tornskruvar i mitten av segmentet modellerats. 1/100-delsmodellen gav svar på frågor om laster och krafter i en enskild skruv och gav också input till analysen om livstid vid olika förspänningskrafter, se avsnitt 1.13.8 *Beräkning av skruvens livslängd beroende på förspänningskraft*. Modellen med 1/8-dels fläns visade hur sekvensen med förspänning med olika glapp mellan flänsarna påverkade förspänningskraften i förbandet och krafter i tornskruvarna.

Analysen av förspänningssekvensen, alltså den process som man använder för att förspänna förbandet, visade att med ett glapp mellan flänsarna om fyra millimeter, som förspänns i ett steg, alltså utan att man går två hela varv runt flänsen, tappar de tornskruvar som initialt förspänts upp till 14 procent förspänningskraft och böjmomentet i skruven ökar med upp till 80 procent. Denna förlust finns endast om skruvdragningen sker genom att skruva åt varje skruv en gång. Vid ett glapp om två millimeter, är denna förlust försumbar. Om glappet stängs och man får full kontakt i flänsen, genom dragning i flera steg

och varv, uppstår inte heller denna förlust. Konstruktionsritningarna tillåter en tiltning om upp till två millimeter per fläns, vilket medför att det teoretiskt sett kan finnas ett glapp om fyra millimeter.

Analysen kunde också visa vid vilken förspänningskraft som man kan förvänta sig att flänsarna går ihop vid montage. Redan vid en kraft om 190 kN för två millimeters glapp och 320 kN för fyra millimeter kan detta observeras. Denna analys förutsätter en fläns utan variationer.

Analysen har också gett ett antal s.k. överföringsfunktioner. En överföringsfunktion berättar om hur externa laster överförs till varje individuell tornskruv. Överföringsfunktioner för förspänningskrafter mellan 600 och 1 680 kN har tagits fram. Dessa används sedan som underlag för analysen av livstiden för ett bultförband beroende på olika förspänningskrafter. För dessa analyser har en tiltning om en millimeter per fläns antagits, alltså ett glapp om två millimeter. Det är ett grundläggande designvillkor och i linje med den verkliga tiltningen och glappet för det havererade segmentet.

1.13.5 *Dynamiska förstärkningar av periodiska störningar*

Ett vindkraftverk är ett mekaniskt system där tornet med dess massa och tröghet i torn toppen har ett antal egenfrekvenser som kan självsvänga.

Som respons på en kraftig laständring, exempelvis efter ett nödstopp, triggas tornets egenfrekvenser och dess lägsta frekvens får så kraftiga utslag att de kan noteras från marken och beräknas med hjälp av exempelvis ett stoppur.

När ett vindkraftverk är i drift passerar ett blad regelbundet framför tornet. Då uppstår en aerodynamisk störning på tornet. Det beror på att luften inte kan passera genom tornet. Luftströmmen bryts istället av vilket resulterar i en periodisk störning, alltså en störning som återkommer med ett visst givet tidsmellanrum. För en trebladig turbin sker detta fenomen tre gånger per varv. I vindkraftsammanhang benämns det 3P-störningen. Dess frekvens beräknas ur sambandet:

$3P = 3 \cdot n / 60$ där n representerar turbinens varvtal.

En turbin har vanligtvis också någon form av massobalans eller asymmetri. Det kan bero på att bladen inte väger exakt lika mycket eller att navet eller något av bladen har en geometrisk defekt. Då kan en periodisk störning uppstå som sker en gång per varv, den s.k. 1P-störningen. Dess frekvens beräknas ur sambandet:

$1P = 1 \cdot n / 60$

Genom olika typer av balanseringar kan 1P-störningen minska eller elimineras. Det är däremot inte möjligt för 3P-störningen.

För det havererade vindkraftverket ligger dess första och lägsta egenfrekvens på 0,154 Hz²⁰, vilket motsvarar en periodtid på 6,5 sekunder. Vid varvtalet 9,25 varv per minut (rpm) sammanfaller 1P-frekvensen med tornets lägsta egenfrekvens.

Om 3P-störningens frekvens sammanfaller med någon av tornets egenfrekvenser kan resonans uppstå, som resulterar i dynamiska förstärkningar av lasterna i vindkraftverket. Det är en farlig situation som äventyrar turbinens livslängd. Därför är det viktigt att beräkna och anpassa tornets egenfrekvenser så att de inte sammanfaller med 3P-störningen.

För att undvika 3P-störningens frekvens har tillverkaren specificerat att den lägsta tornegenfrekvensen får ligga inom frekvensintervallet 0,149 – 0,165 Hz.

Vindkraftverk konstrueras normalt så att 3P-frekvensen blir betydligt högre än lägsta tornegenfrekvensen. Vid nominell effekt ligger 3P-frekvensen kring 0,68 Hz, för denna turbintyp.

Vid uppstart av turbinen passeras varvtalet där 3P sammanfaller med första tornegenfrekvensen. Det sker vid tre varv per minut (rpm) och går relativt snabbt så att resonans inte hinner utvecklas.

Tillverkaren har specificerat att det lägsta varvtalet inte får understiga 5,3 varv per minut, som resulterar i $3P = 0,26$ Hz. Därigenom kan man undgå risken för resonans.

I förhållande till tidigare versioner av turbintypen har tornet höjts från 119 till 129 meters navhöjd, vilket sänker alla dess egenfrekvenser. Dessutom har det nominella varvtalet ökats (från 12,8 till 13,6 varv per minut), vilket höjer störningsfrekvensen 3P då turbinen producerar med nominell (full) effekt. Vid detta varvtal, 13,6 varv per minut på turbinen, 1 540 varv per minut på generatoren, blir 3P-frekvensen alltså 0,68 Hz. Om någon systemegenfrekvens ligger i närheten av denna frekvens finns en risk för dynamiska förstärkningar, resonans och därmed ökande laster.

Enligt uppgift har tillverkaren i sitt dimensioneringsunderlag för V112 inkluderat högre ordningens egenfrekvenser i lastberäkningarna. Haverikommissionen har dock inte haft tillgång till dessa beräkningar i sin helhet och de omnämns inte särskilt i rapporten om tornlaster, *Tower Loads*. Haverikommissionen har därför undersökt detta. Det kan finnas en risk att den last som vindkraftverket utsätts för påverkas och ökar om högre ordningens tornfrekvenser sammanfaller med exempelvis 3P-störningen. Tillverkaren uppger att man i sin design har tagit hänsyn till ett sådant scenario.

Med konstruktionsunderlag från tillverkaren har turbintypen modellerats med balkelement i en Finit Element-Modell. Tornet har anslutits

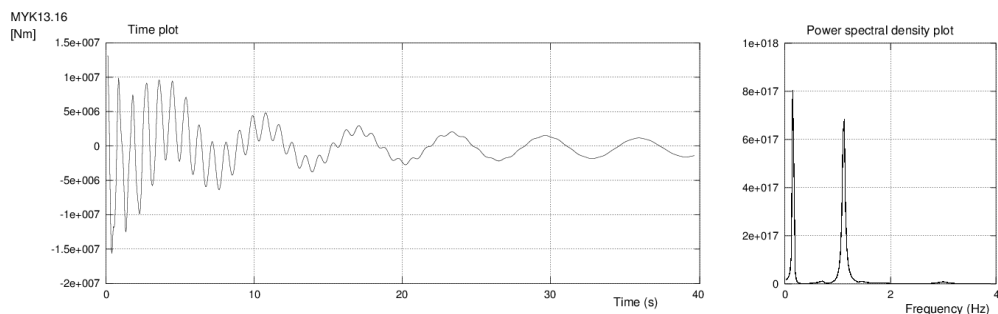
²⁰ Hertz – enhet för frekvens.

till marken med ett fjäderelement vars styvhet motsvaras av de krav och specifikationer tillverkaren ställer på fundamentet. Med givna massor och trögheter i torn toppen kan systemets egenfrekvenser och självsvängningsformer beräknas.

Systemets lägsta egenfrekvens har med den modellen beräknats till 0,15 Hz, vilket överensstämmer väl med tillverkarens specifikationer. Denna frekvens har också mätts upp på den turbin i Lemnhult (T08) som efter haveriet utrustats med extra mätutrustning.

Systemets andra egenfrekvens har beräknats till 1,1 Hz. Denna egenfrekvens ligger klart högre än 3P-frekvensen vid nominell effekt på 0,68 Hz och också högre än den högsta 3P-frekvensen vid 17,7 varv per minut.

Vestas V112 FREQUENCY TEST AT STANDSTILL



Figur 28. Med stöd av denna frekvensanalys kan de två lägsta egenfrekvenserna för tornet bestämmas till 0,15 respektive 1,1 Hz.

Periodiska störningar har troligen inte resulterat i några förstärkningar av tornets egenfrekvenser eller ökat utmattningslasterna.

1.13.6 *Kontrollberäkning av tornlaster*

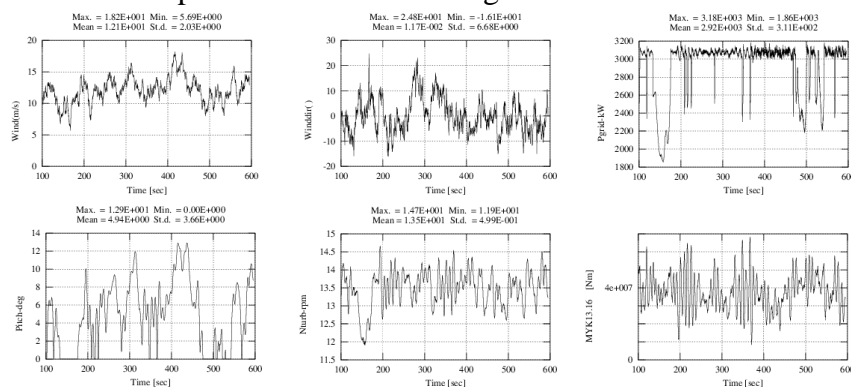
En viktig yttre förutsättning för tornets hållfasthet och livslängd är de laster det utsätts för. Lasterna delas normalt upp i två kategorier, extremlaster och utmattningslaster.

För att kunna kontrollera de lastförutsättningar som använts som underlag för dimensioneringen av tornet och tillhörande skruvförband har en beräkningsmodell tagits fram som motsvarar de krav som ställs för denna typ av arbete. Verktöget som har använts för detta syfte är ett aeroelastiskt program, Vidyn, som utvecklats inom ramen för svensk vindkraftsforskning sedan 1980-talet. Programmet har bland annat använts för dimensionering och certifiering av ett vindkraftverk med liknande storlek som är i produktion i Göteborgs inre hamn sedan 2011.

Baserat på ritningar och övriga specifikationer har torn, blad, maskinhus och övrig struktur av betydelse modellerats. Särskilt viktigt är att massor, trögheter och styvheter är riktiga för att representera den havererade turbinens dynamiska beteende på ett korrekt sätt.

Haverikommissionen har inte haft tillgång till detaljer i den specifika turbinreglering som fanns i det havererade vindkraftverket. Därför har en öppen och publik turbinregulator²¹ anpassats till turbinens storlek och effektuttag. Denna turbinregulator är beprövad, robust och enkel men den saknar en del mer avancerade funktioner. Regulatorn har inte fintrimmats på samma sätt som en turbintillverkare troligtvis gör, då detta skulle varit en mycket omfattande och tidsödande process. Turbinreglering har stor betydelse för lasterna, främst för att sänka dem om regleringen är god, men där finns också en källa till förhöjda laster om fel eller andra olyckliga omständigheter uppstår.

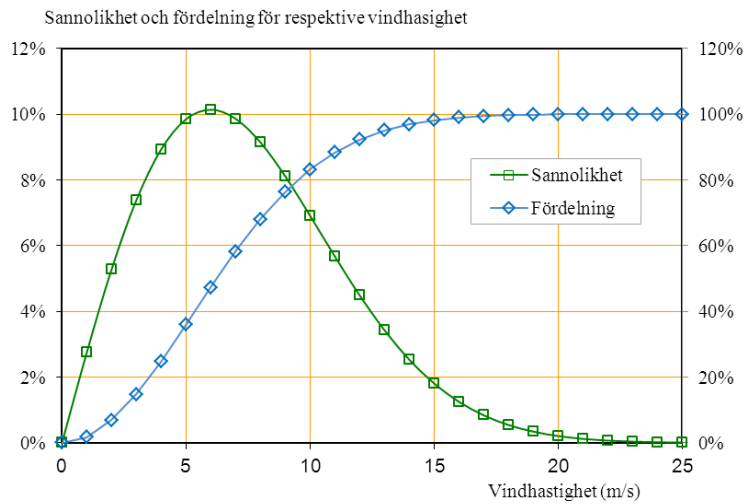
Beräkningar har genomförts för att ta fram utmattningslaster, där varje medelvind mellan 4 och 25 m/s har simulerats under 10 minuters drift med den turbulensintensitet som följer av turbinklass 3A, figur 29. Det blir totalt 22 simuleringar, vilket är en delmängd av de lastfall som ingår i standard *IEC 61400*. Denna analys är något förenklad men bedöms ändå representera de utmattningslaster som turbinen utsätts för.



Figur 29. Tidsgrafer från en av sammanlagt 22 simuleringar. Medelvinden är 12 m/s och effekten når under större delen märkeffekten 3075 kW. MYK13.16 visar böjmomentet i det tornsnitt som havererade, 13 meter över marknivån.

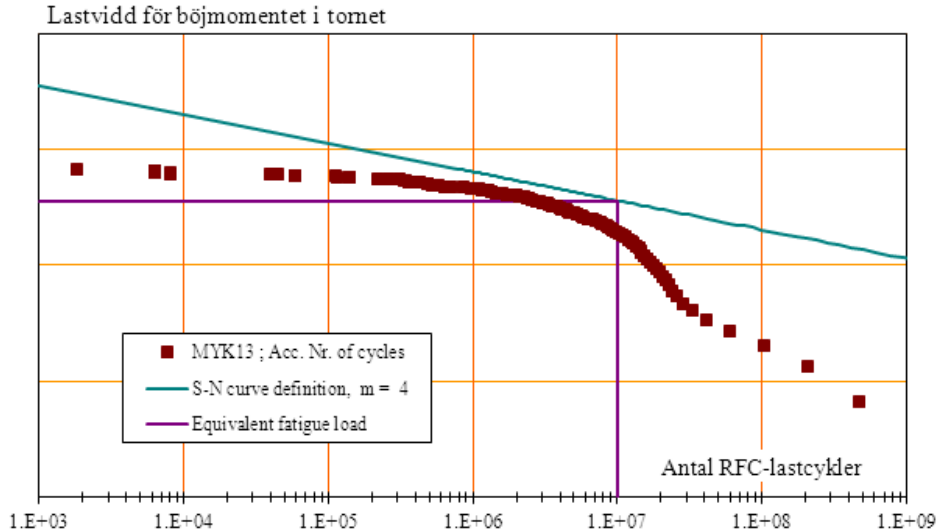
Utmattningslaster beräknas genom att summera lastcyklerna i alla tio-minuterssimuleringar baserat på en s.k. RainFlowCount-algoritm (RFC). Det motsvarar hur materialet, i detta fall stål, utstår belastningen utifrån hållfasthet. Varje simulering viktas utefter den sannolikhet som finns för respektive vindhastighet och multipliceras sedan med en tidsfaktor som motsvarar turbinens livslängd (normalt 20 år).

²¹ NREL 5MW.



Figur 30. Sannolikhetsfördelning av vindhastigheter i enlighet med turbinklass 3A

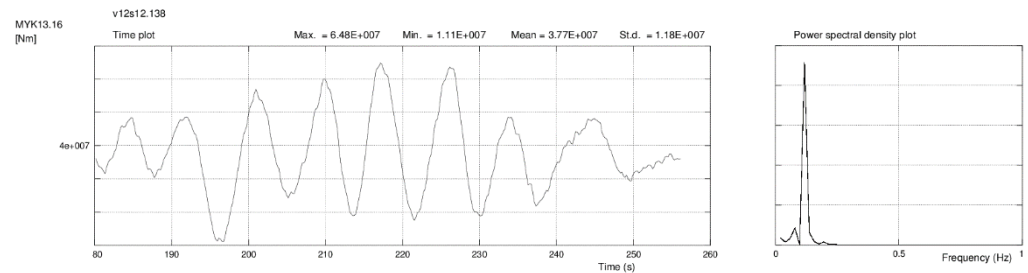
För böjmomentet i tornet, på 13 meters höjd över mark, resulterar utmattningsberäkningen i ett antal lastcykler som normalt representeras som ackumulerade värden i ett log-log-diagram, figur 31. För att få ett jämförelsetal brukar man använda beteckningen *ekvivalent utmattningslast* för ett visst antal cykler, vanligtvis $1,0E+7$. Denna ekvivalenta last motsvarar summan av alla beräknade lastcykler utifrån utmattningshållfasthet.



Figur 31. Ackumulerade värden över lastvidd för böjmomentet i tornet samt beräknad ekvivalentutmattningslast för S-N-kurva med konstant lutning $m = 4$

I dimensioneringsunderlaget för det havererade vindkraftverket har en motsvarande beräkning genomförts. Kontrollberäkningen visar 35 procent högre utmattningslaster än vad vindkraftverket är dimensionerat för.

Vid närmare analys av tornets böjmoment kan de högre lasterna troligtvis förklaras av de dynamiska tillskott som uppstår när tornet svänger med sin grundegenfrekvens (se figur 32).



Figur 32. Detalj från figur 29 ovan som visar böjmomentet i tornsnittet där skruvförbandet havererade. Till höger visas också en frekvensanalys av momentet. Det är tydligt att tornets grundegenfrekvens på 0,15 Hz har exciterats i denna sekvens, vilket bidrar till höga laster i tornet.

Eventuellt kan dessa tornrörelser förhindras med en mer sofistikerad turbinregulator. Tillverkaren kan mycket väl ha programvara som bättre hanterar turbinens dynamiska beteende. Genomgångar av mätdata från torn 8 tre månader efter händelsen visar att tornsvängningarna vid de undersökta tidstillfällena inte visar på värden över tillverkarens designgränser.

Baserat på dessa resultat kan haverikommissionen därför inte dra någon slutsats om att tillverkarens utmattningslastunderlag har varit felaktigt eller för lågt.

Däremot kan det konstateras att konstruktionen är känslig för hur den styrs och regleras. Problem eller felaktigheter i turbinregleringen kan med säkerhet innebära förhöjda laster, som överstiger de värden som använts i dimensioneringen.

1.13.7 *Störningar på generatorns styrsignal från parkstyrningen*

Tillverkaren använder ett system för att styra effektuttaget centralt i vindparken i Lemnhult. Systemet kallas för Power Plant Controller (PPC). Merparten av turbinerna är anslutna till detta system, inklusive den havererade turbinen.

PPC är ett system som enligt tillverkaren kan anpassas till olika reglerkoncept för att klara alla lokala krav som kan finnas på elnätet.

Om PPC-systemet innehåller något fel eller ändrar och uppdaterar effektbörvärden med frekvenser som ligger nära systemegenfrekvenser hos det individuella vindkraftverket finns en risk för dynamisk förstärkning, tornvibrationer och därigenom ökade laster.

För att utreda konsekvenserna av eventuella fel i PPC:n har ett antal aeroelastiska simuleringar genomförts, där styrsignaler till vindkraftverket har modifierats för att analysera effekterna av möjliga fel. Det är rimligt att anta att det enbart är effektvärdet till respektive vindkraftverk som därigenom påverkas. Pitchregleringen, dvs. styrningen

av bladens vinkel mot vinden, antas rimligen fungera och utan fördröjning korrekt styra varvtalet på turbinen vid vindhastigheter som överstiger nominell effekt.

Resultatet från de simuleringar och beräkningar som har genomförts ger inget stöd för att konstatera att störningar från parkstyrningen resulterat i väsentligt större laster. Dock bygger de antaganden som gjorts om störningens karaktär inte på detaljerad information om hur styrningen faktiskt skett eller hur de rapporterade problemen med tornvibrationer kopplade till vissa programversioner påverkat turbinen. Detta skulle innebära en ingående och alltför tidskrävande granskning av varje programvaruversion.

I de mätningar som tillverkaren utfört på torn 8 sedan början på februari 2016, alltså efter haveriet, finns inget som tyder på störningar i generatorstyrningen.

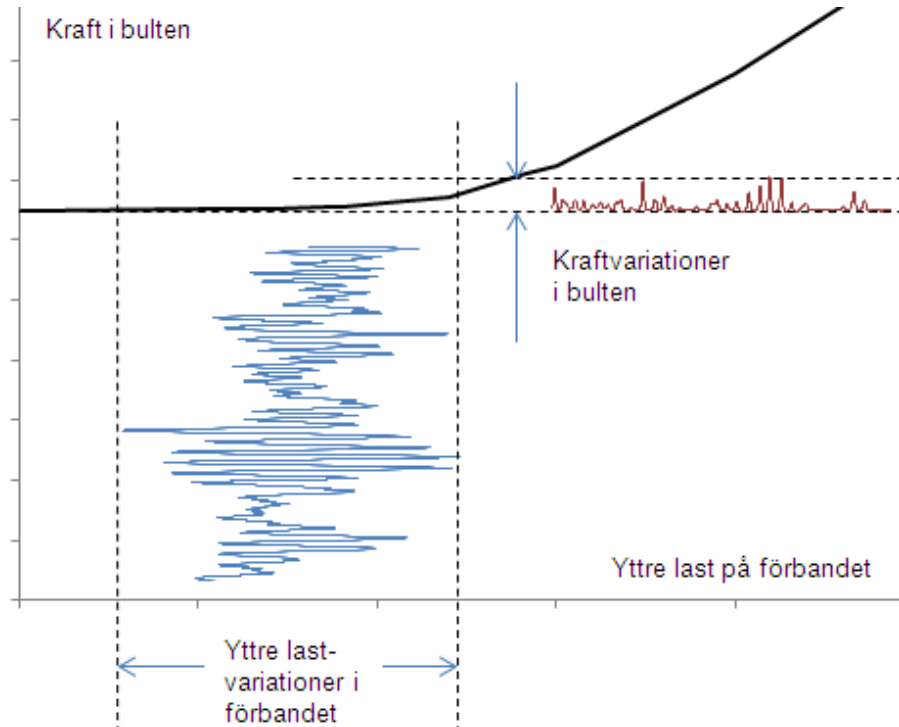
Torn 8 körs dock inte med någon av de programversioner som rapporterats vara problematiska och som föranlett ett större antal larm p.g.a. tornvibrationer.

1.13.8 *Beräkning av skruvens livslängd beroende på förspänningskraft*

En avgörande förutsättning för skruvförbandets hållfasthet är förspänningskraften. Det allmänna utmattningsförloppet av tornskruvarna är förenligt med att man inte har lyckats uppnå rätt nivå av förspänningskraft i förbandet. Därför har en beräkning genomförts för att bestämma vid vilken förspänningskraft ett skruvbrott inträffar.

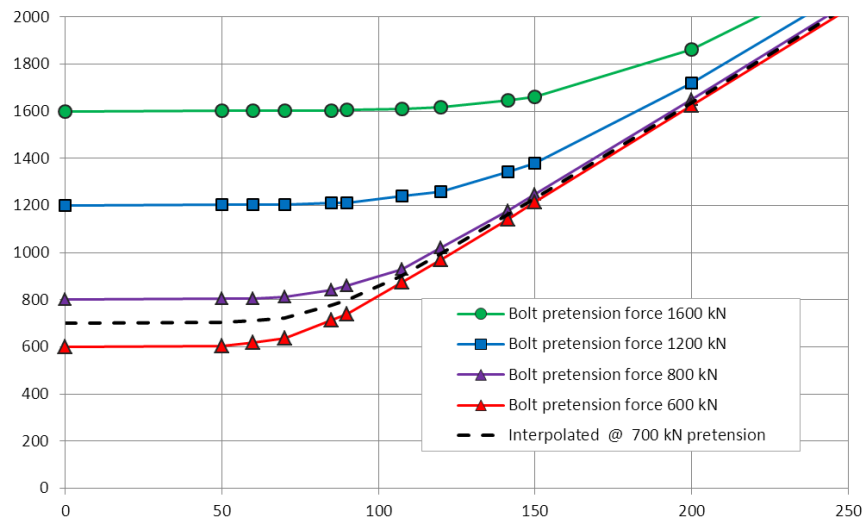
Förutsättningen i denna analys är att inga andra möjliga eller troliga felorsaker har bidragit till skruvens brott. Det förutsätts alltså att förbandets geometri är helt enligt alla ritningsspecifikationer samt att de yttre lasterna överensstämmer med de värden som tillverkaren har angivit.

Bara en liten andel av de yttre lastvariationerna kommer då att resultera i lastvariationer i skruven, se principiellt samband i figur 33.



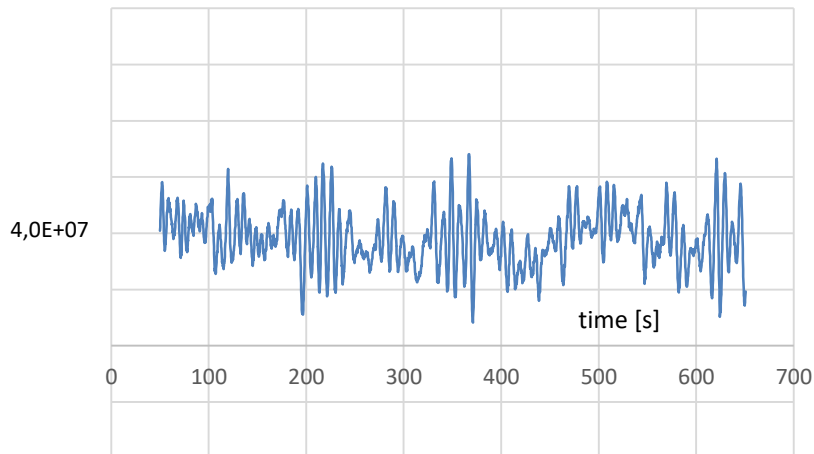
Figur 33. Principiell graf som visar hur relativt stora variationer av de yttre lasterna i ett skruvförband endast resulterar i små variationer av kraften i skruven. Förutsättningen för denna, för skruven gynnsamma, effekt är förspänningskraften av skruven.

Med stöd av de FEM-analyser som genomförts av skruvförbandet har överföringsfunktioner beräknats för fyra olika nivåer på förspänningskraft, 1 600, 1 200, 800 samt 600 kN. Överföringsfunktionerna visar ett samband mellan den yttre pålagda lasten i ett givet snitt på tornet, i detta fall för höjden 23 meter över marken. Denna höjd är vald med tanke på att det är där som den yttre kraften angriper i FE-modellen.



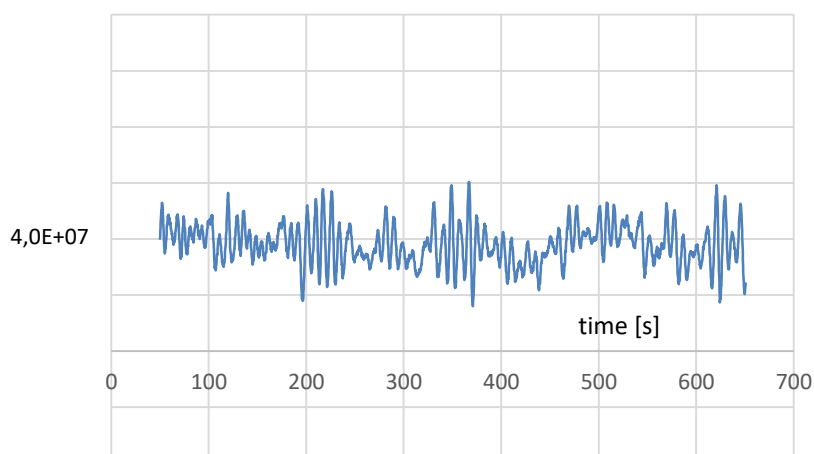
Figur 34. Överföringsfunktionerna baserade på detaljerade FE-analyser av förbandet. Graferna visar samband mellan den yttre pålagda lasten (x-axeln) i ett givet snitt på tornet samt hur kraften i skruven påverkas och förändras av denna yttre last (y-axeln). FE-analysen har beräknat sambandet för fyra förspänningskrafter: 1 600, 1 200, 800 samt 600 kN. Med linjär interpolation kan ytterligare överföringsfunktioner med god precision beräknas för godtycklig förspänningskraft. I grafen är det interpolerade värdet för förspänningskraften 700 kN också inlagt.

Lasterna har, som tidigare redovisats, beräknats med det aeroelastiska programmet Vidyn. Dessa kontrollberäkningar visade högre utmattningslaster än de som tillverkaren beräknat. För att hantera denna differens har en amplitudfaktor införts. Avvikelserna från medelvärdet har multiplicerats med en faktor 0,741 för att justera ner alla amplituder i Vidyn-resultatens tidsserier, jämför figur 35 med figur 36. På så sätt ändras inte tidsseriernas medelvärden, vilket är viktigt eftersom absolutvärdenas storlek avgör lastvariationen i skruven.



Figur 35. Graf som visar böjmomentet i tornet vid höjden 13 meter som funktion av tid under en 10-minuters simulering vid medelvinden 12 m/s. Simuleringen har genomförts med det aeroelastiska programmet Vidyn, vilket ger högre utmattningslaster än de som tillverkaren beräknat.

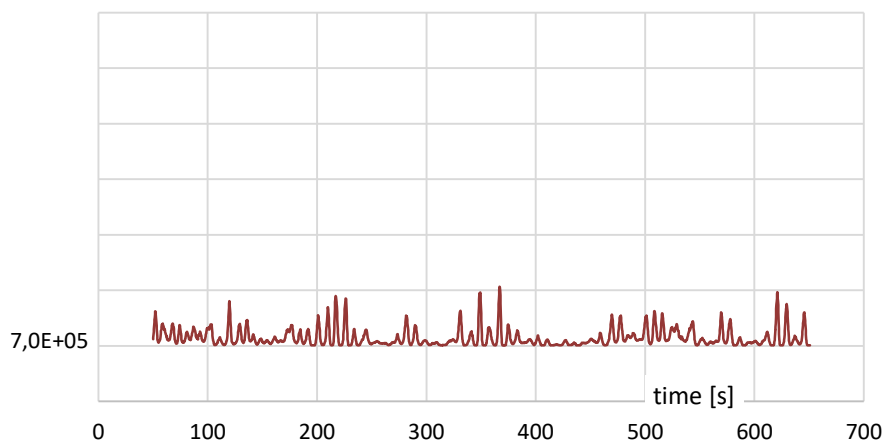
Faktorn 0,741 kommer från förhållandet mellan utmattningslasterna beräknade av tillverkaren och motsvarande beräknade med Vidyn.



Figur 36. Samma storhet som i Figur 35. Tidsserien har dock manipulerats med en amplitudfaktor (0,741) för att minska utmattningslasterna till samma nivå som tillverkaren beräknat. Medelvärdet är fortsatt detsamma.

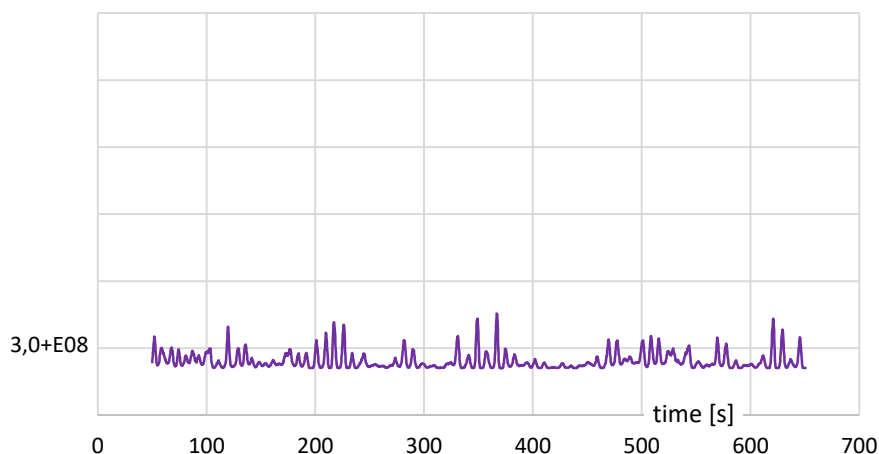
Genom att utgå från alla tidsserier som ligger till grund för utmattningslasterna skapas en ny tidsserie utifrån hur den yttre lasten i FE-modellen beräknats.

Eftersom överföringsfunktionen för en förspänningskraft är given kan sedan den verkliga skruvkraften $BoF_{13}(t)$ beräknas som ytterligare en tidsfunktion, där 13 anger förbandets höjd från marken.



Figur 37. Graf som visar hur kraften i skruven varierar som funktion av tid under en 10-minuters simulering vid medelvinden 12 m/s. I detta fall är förspänningskraften 700 kN, vilket medför att kraftvariationer i skruven uppgår till 210 kN som mest.

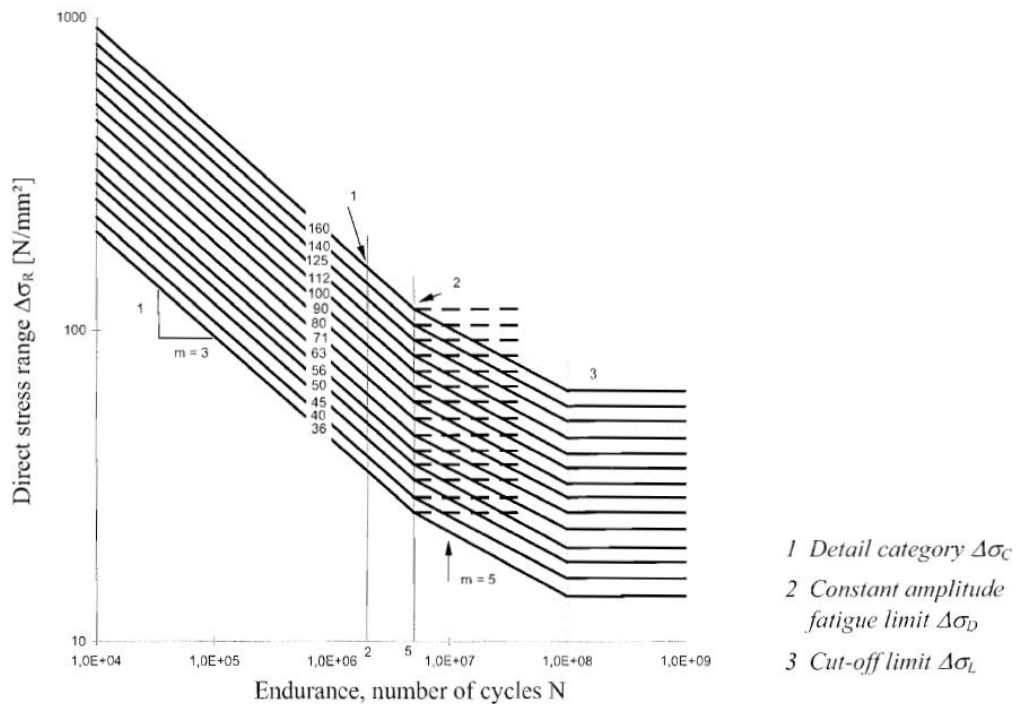
I nästa steg beräknas spänningen i skruven, $BUS(t)$ som är linjärt proportionell mot kraften.



Figur 38. Graf som visar hur spänningen i skruven varierar som funktion av tid under en 10-minuters simulering vid medelvinden 12 m/s. I detta fall är förspänningskraften 700 kN. Spänningen är direkt proportionell mot kraften, som visas i Figur 37.

När spänningen i skruven beräknats för alla tidsserier som ingår i utmattningsanalysen, kan denna nya storhet genomgå motsvarande RFC-beräkning som ligger till grund för beräkningen av utmattningslasterna. Sannolikhetsfördelningen mellan olika medelvindar är 3A, densamma som tidigare.

Skruvens utmattningshållfasthet framgår av gällande standard²². Kurvorna, figur 39, anger utmattningshållfasthet beroende på materialets, svetsens eller komponentens s.k. detaljkategori (Detail Category, DC). För skruvar utsatta för sträckpåkänningar gäller kurvan för DC=50.



Figur 39. Figur från gällande Eurocode 3.

Storleken har betydelse för utmattningshållfastheten. Generellt gäller att stora eller tjocka material klarar lägre spänningsvariationer innan utmattningsbrott. För skruvar som är utsatta för dragpåkänningar gäller DC = 50. Dock ska detta värde reduceras om skruvens diameter överstiger 30 mm, figur 40.

7.2.2 Size effect

(1) The size effect due to thickness or other dimensional effects should be taken into account as given in Table 8.1 to Table 8.10. The fatigue strength then is given by:

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C \quad (7.1)$$

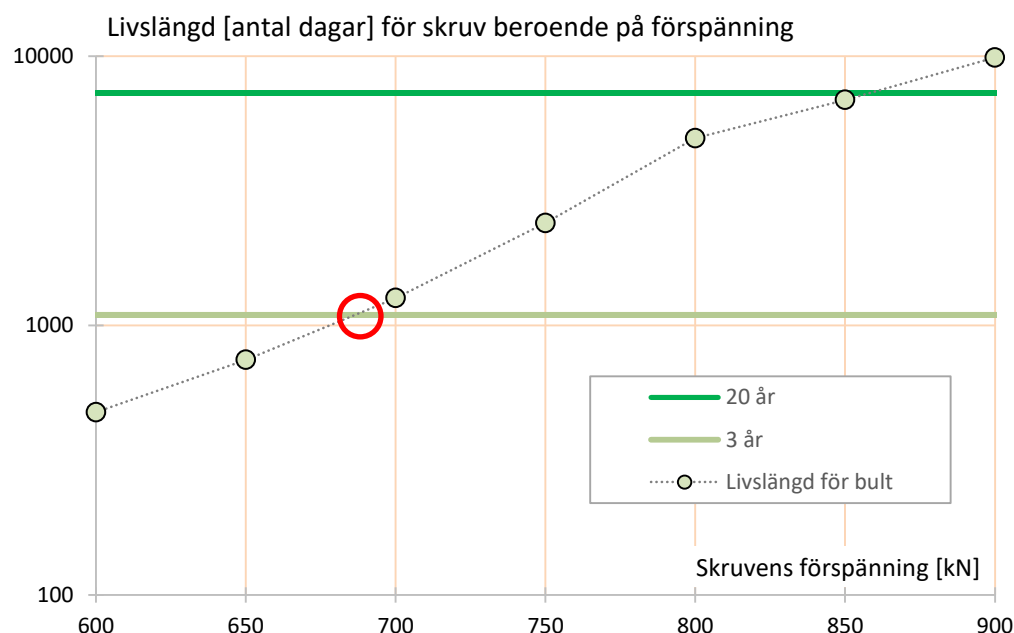
Figur 40. Figur från gällande Eurocode 3.

De skruvar som satt i det havererade förbandet var M64 med diametern 64 mm. Med det värdet beräknas faktorn vara 0,82744. Skruvens reducerade hållfasthet blir DC = 41,37 N/mm².

RFC-cyklerna visualiseras i ett Log-Log-diagram och en tidsfaktor anpassas för att den ackumulerade utmattningshållfastheten ska motsvara den beräknade för skruven, dvs. 41,37 N/mm².

²²EN.1993.1.9.2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.

Tre års livslängd för en skruv uppnås vid ungefär 690 kN i förspänningskraft, figur 41.



Figur 41. Skruvens beräknade livslängd som funktion av skruvens förspänningskraft. Hjälpelinjer för 20 respektive 3 år har också lagts in. Med livslängden på Log-skala kan sambandet approximeras med räta linjer mellan punkterna. Den tid som turbinen var i drift innan haveriet är tre år. Skruvens förspänningskraft som motsvarar den tiden är markerad med en röd ring och uppnås vid ungefär 690 kN i förspänningskraft. Detta värde gäller alltså utifrån att förbandets geometri är helt enligt alla ritningsspecifikationer samt att de yttre lasterna överensstämmer helt med de värden som tillverkaren beräknat för dimensioneringen.

1.13.9 Beräkning av skruvens livslängd beroende på ökade laster

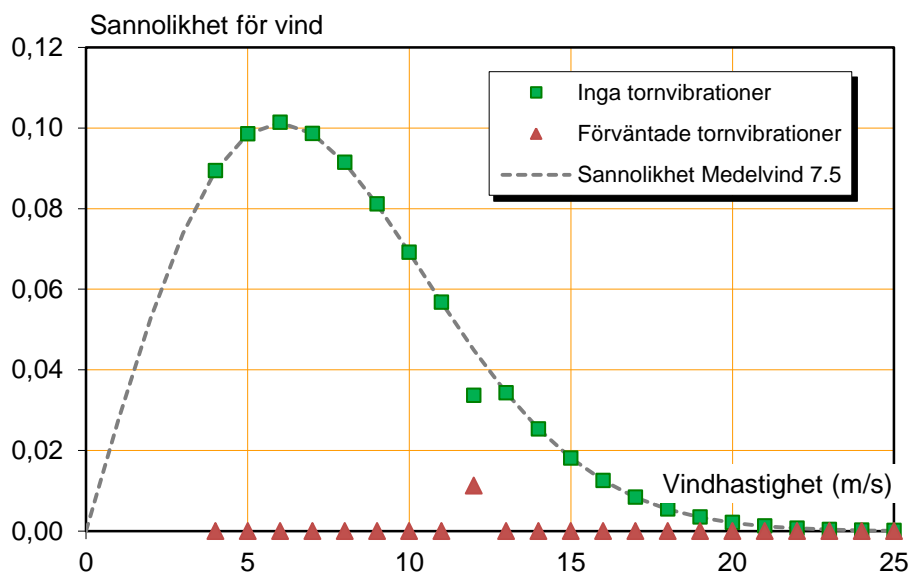
Det är känt, från observationer och registrering av larm med tillhörande stopp av turbinen, att den havererade turbinen utsattes för ytterligare laster under vissa perioder under sina tre år i drift. Anledningen till detta har enligt tillverkaren varit att olika reglerprogramversioner i styrdatorn inte har fungerat tillfredställande.

En programversion (12.07.58) användes på turbinen under elva månaders tid, 2013. Kontrollfunktionen som skulle undvika resonans mellan 1P och tornets egenfrekvens fungerade inte som förväntat och ledde till ett ökat antal driftstopp på grund av tornsvängningar.

En senare programversion (13.08.60) användes på turbinen under sju månaders tid, 2015. Den orsakade en olycklig koppling mellan den interna turbinregulatorn och det övergripande effektregeringssystemet (PPC) i hela parken. Återigen ökade antalet tornsvängningar och larmstopp.

För att utreda konsekvenserna av lastökningar som är relativt begränsade i tid, har skruvens livslängd beräknats för olika förspänningskrafter, där också inverkan av tidvis förhöjda laster ingått.

Turbinen har varit i drift under tre års tid. Under 18 månader har turbinen körts med programvara som medfört ytterligare laster, dock inom designvillkoren, och larmstopp orsakade av tornvibrationer. I referenssimuleringar med Vidyn noteras att tornets första egenfrekvens exiteras i vindar kring 12 m/s. Av de totalt 22 tidsserier som ingår i utmattningsanalysen antas alla utom den vid 12 m/s ha de laster som tillverkaren beräknat. Även merparten av tiden med medelvind 12 m/s har tillverkarens laster antagits korrekta. Men under hälften av de 18 månaderna med problematiska programversioner antas utmattningslasterna öka. Det motsvarar 25 procent av den tid som turbinen varit i drift (9/36 månader). Sambandet och respektive sannolikhet visas i figur 42. Den totala tidsfaktorn med tornvibrationer blir således 0,0112, alltså drygt en procent av total drifttid under tre år.



Figur 42. Sannolikhetsfördelning för medelvind 7,5 m/s. Sannolikheten för drift där inga tornvibrationer förväntas visas med gröna rektanglar. Sannolikheten för drift där tornvibrationer förväntas visas med röda trianglar. Dessa är noll för alla vindar utom 12 m/s där tiden med förväntade tornvibrationer uppgår till 25 procent av tiden. Den totala tidsfaktorn med tornvibrationer blir således 0,0112 (= 0,0449*0,25).

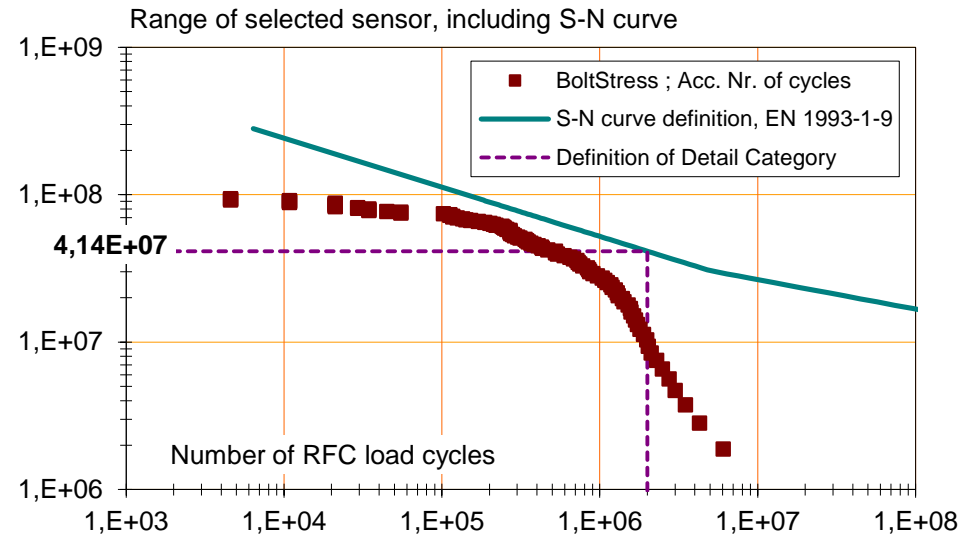
Nivån på de antagna ökade utmattningslasterna styrs av en lastamplitudfaktor. Denna har antagits till olika nivåer för att se hur lastökningarna påverkar skruvens livslängd. Med amplitudfaktor = 1,0 fås samma laster som tillverkaren uppgivit, vilket visas i figur 36.

Upprepade livslängdsberäkningar har genomförts där faktorn ökats med steg om 0,5 upp till 4,0.

På motsvarande sätt som skruvens livslängd har beräknats med tillverkarens laster har skruvens livslängd beräknats med partiellt ökade laster vid medelvinden 12 m/s. I fallet med 700 kN förspänningskraft²³ blir livslängden mer än halverad om lastamplitudfaktorn ändras från 1,0 (tillverkarens antagna laster utan tornvibrationer) till 2,0 (an-

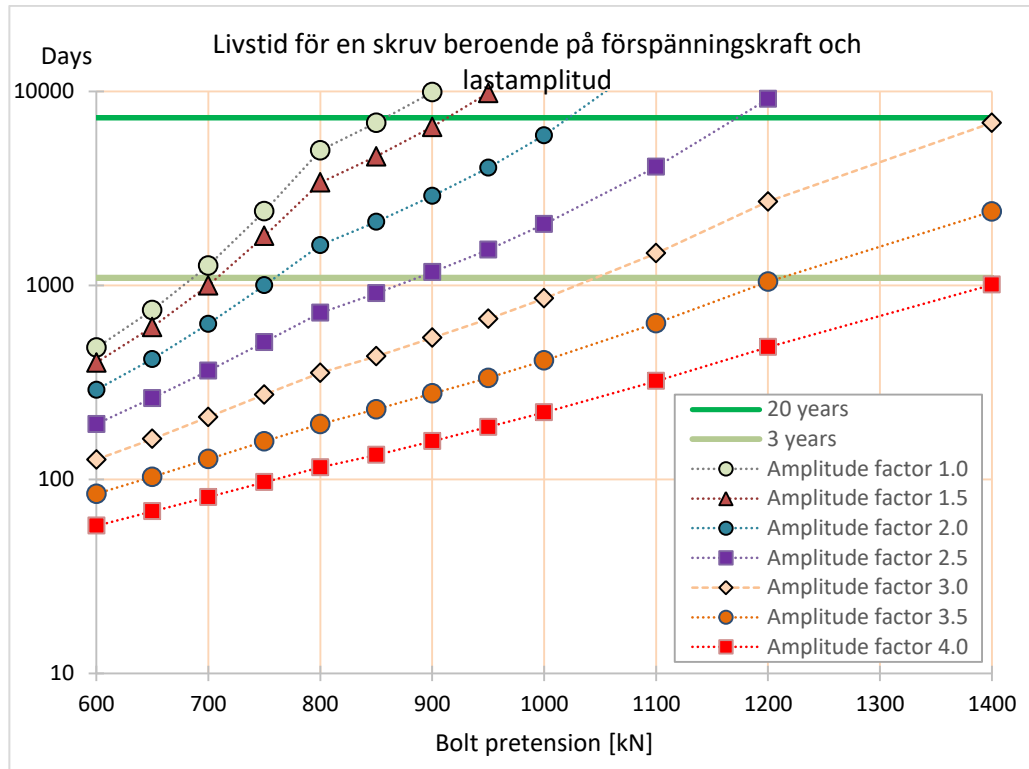
²³ Varje värde för skruvspänning har anpassats med en tidsfaktor för att dess ackumulerade värde ska motsvara 2E+6 konstantamplitudvariationer med spänningsvidden 4.137E+7 Pa, motsvarande M64-skruvens tillåtna hållfasthetsvärde.

taget dubbelt så höga utmattningslaster under 25 procent av tiden vid 12 m/s).



Figur 43. S-N-kurva som anger utmattningshållfasthet för en skruv enligt Eurocode 3. Förspänningskraften i skruven är satt till 700 kN och lastamplitudfaktorn = 1,0, motsvarande tillverkarens angivna laster. I förhållande till antagen livslängd på 20 år blir tidsfaktorn 0,1731, vilket motsvarar 3,46 år (= 1 264 dagar). Varje värde för skruvspänning har anpassats med en tidsfaktor för att dess ackumulerade värde ska motsvara 2E+6 konstantamplitudvariationer med spänningssvidden 4,137E+7 Pa, motsvarande M64-skruvens tillåtna hållfasthetsvärde.

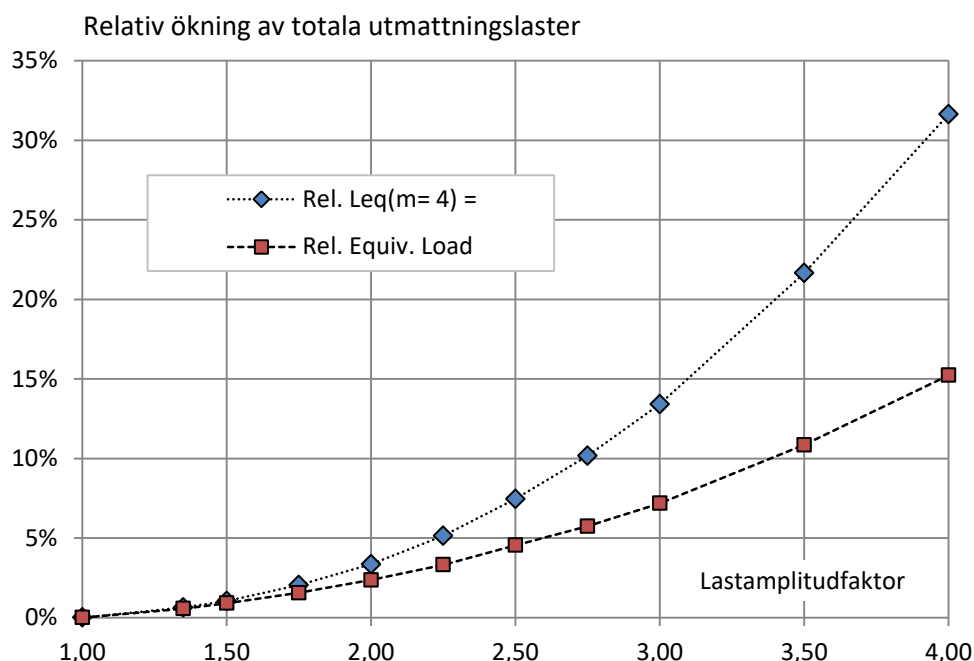
Livslängden blir tre år med tillverkarens lastantaganden för en förspänningskraft på knappt 700 kN. Med en antagen lastamplitudfaktor på 2,5 uppnås tre års livslängd vid förspänningskraften 900 kN. Om lastamplitudfaktorn istället skulle vara 4,0 uppnås tre års livslängd vid en förspänningskraft över 1 400 kN. Relativt korta perioder med höga laster får alltså mycket stor betydelse för vilken förspänningskraft som motsvarar tre års livslängd. Det förklaras av den icke linjära överföringsfunktionen mellan yttre last och skruvens last. En komplett sammanställning av resultatet framgår av figur 44.



Figur 44. Diagram som visar skruvens livslängd (y-axeln) beroende på förspänningskraft (x-axeln) för olika värden på lastamplitudfaktorn under 25 % av den tid då medelvinden är 12 m/s. Vid låg förspänningskraft har storleken på de yttre lasterna relativt sett mindre betydelse än vid högre förspänningskraft.

En amplitudfaktor om 1,5 motsvarar en total lastökning om ca 1 procent, figur 45. Livstiden för en skruv vid en förspänningskraft om 700 kN är ungefär 1 200 dagar. Denna livstid förkortas med drygt 200 dagar om de globala lasterna ökar med 1 %. Livslängden minskar snabbt med ökande yttre last.

De globala lasterna ökar dock relativt lite till följd av de kortvarigt högre lasterna.



Figur 45. Grafer som visar hur de totala utmattningslasterna påverkas av de relativt korta perioderna av förhöjda laster. Lasterna kan definieras på två olika sätt: *Leq(m=4)* är ett förenklat sätt att ange utmattningslaster utifrån en konstant lutning (=4) i S-N-kurvan. *Equiv. Load* är det mera korrekta och representativa sätt som stål upplever utmattningslaster, med två olika lutningar i S-N-kurvan.

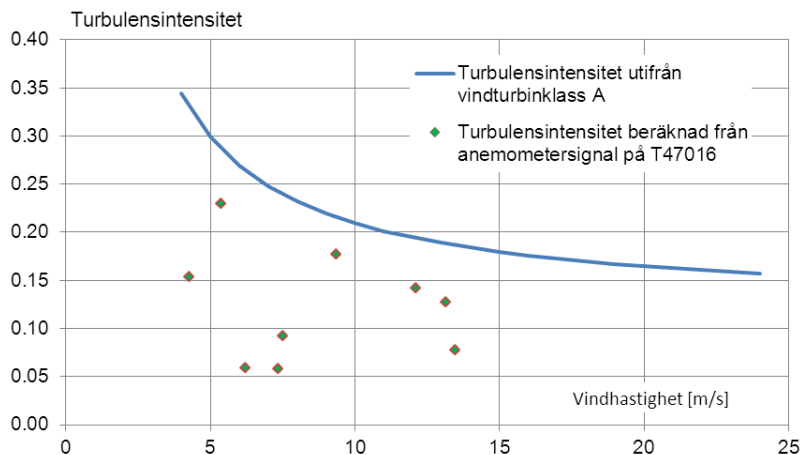
1.13.10 *Ökade laster från högre turbulens i skog*

När luft med olika hastighet blandas, exempelvis på grund av olika hinder, bildas turbulens. En ytas ojämnhet påverkar förekomsten av turbulens, där större råhet ger mer turbulens. En skogsbeväxtad yta genererar mer turbulens än en åker.

Senare tids forskning visar att turbulensen i skog kan vara högre och mer komplex än man tidigare trott. Det skulle i sin tur kunna resultera i att vindsituationen är svårare än vad tillverkaren har antagit i dimensioneringen av vindkraftverket.

Mätdata från en av parkens turbiner, anemometersignalen²⁴ från torn 8, har använts för att beräkna turbulensintensiteten vid några olika tillfällen under våren 2016. Vid samtliga tillfällen ligger turbulensintensiteten klart under den nivå som tillverkaren använt för dimensionering av vindkraftverket (se figur 46).

²⁴ Mätinstrument för att bestämma luftens rörelser.



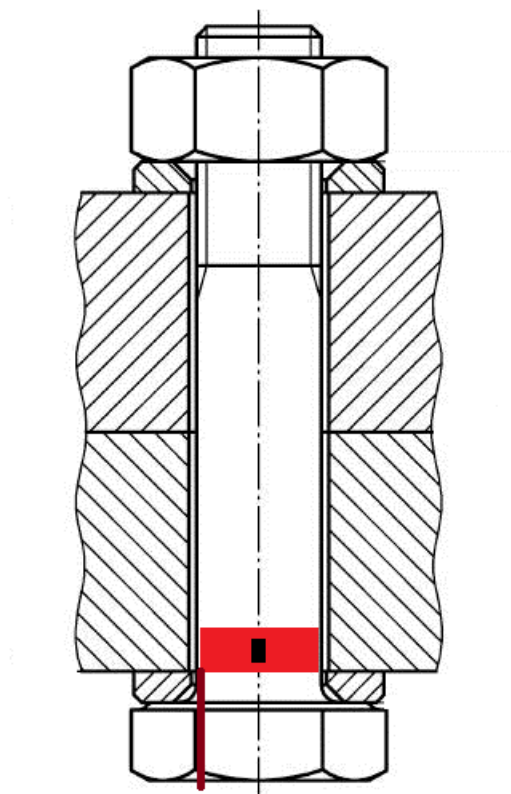
Figur 46. Turbulensintensitet vid torn 8, uppmätta värden understiger gränsen för vindturbinclass A.

Dessa resultat motsäger slutsatsen att förhöjd turbulens på platsen har resulterat i ökade utmattningslaster på vindkraftverket.

1.13.11 *Mätning av förspänningskraft i torn 7 i Lemnhult vindpark*

För att undersöka hur förspänningskraften i en tornskruv varierar under olika smörjningsförhållanden lät haverikommissionen genomföra ett test i Lemnhults vindpark på torn 7.

Åtta tornskruvar preparerades med en mätutrustning, fyra stycken M64 och fyra stycken M36. Två trådtöjningsgivare monterades i varje skruv. Under bearbetningen och monteringen skyddades muttern och skruvarnas gängor med tätslutande plastpåse.



Figur 47. Skruv i genomskärning med rödmarkerade områden där skruven bearbetades.

Tornskruvarna kalibrerades för att få ett noggrant förhållande mellan last och töjning, då en trådtöjningsgivare anger hur mycket materialet sträcks ut och detta översätts sedan till en kraft. Kalibreringen visade i efterhand på en hög noggrannhet (<1 procent fel).

Provningen genomfördes på två plan i torn 7. För rengöring av skruvarna användes en mjuk stålborste, rengöringstrasor, samt vatten.

Alla dragningar av M64:or genomfördes genom att ställa in trycket på hydraulpumpen på 542 bar, vilket skulle motsvara ett moment om 15 000 Nm, om inte annat anges nedan. Detta moment skulle ge en förspänningskraft på 1 680 kN.

Det första testet genomfördes med originalsmorda skruvar från Friedbergs. De uppnådde ett medelvärde om 1 804 kN med ett lägsta värde på 1 575, vilket låg något under riktvärdet. Den andra dragningen med samma tornskruvar, skruvarna lossades och återmonterades igen, visade på en minskning av förspänningskraften motsvarande 25 procent för medelvärdet (1 356 kN). Det lägsta uppmätta värdet var 1 282 kN. Med risk för att någon av tornskruvarna skulle fastna gjordes ingen ytterligare dragning av skruvarna under detta förhållande.

Nästa steg var att testa tornskruvarna med muttrar som Exova hade smörjt med HMP 9020. Smörjprocessen följde smörjmedelsleverantörens instruktion. Den valda metoden var doppning med avrinning och torkning med varmluft. Tornskruvsleverantörer låter muttrarna centri-

fugeras både under doppningsprocessen och torkningsprocessen. Detta förfarande kunde inte efterliknas i testet. Detta medförde också att de muttrar som smörjdes av Exova fick en klart svartare ton, jämt fördelad över hela muttern.

Testet med de smörjda muttrarna visade på höga förspänningskrafter. Första dragningen gav en förspänningskraft på 2 604 kN, vilket bedömdes ligga strax över sträckgränsen för skruven. Med en sänkning till 320 bar på hydraulpumpen uppnåddes vid nästa försök en förspänningskraft om 1 243, 1 412 och 1 708 kN för respektive tornskruv. För att se hur smörjmedlet degraderade gjordes ytterligare två dragningar per tornskruv. Succesivt under de efterföljande dragningarna minskade förspänningskraften hos respektive tornskruv. Efter en andra dragning kunde en minskning motsvarande 25 procent i medel mellan 1:a och 2:a dragningen observeras.

Tabell 5. Resultat i kN från test av muttrarna som Exova försorde.

	Mutter gul	Mutter blå	Mutter grön
1:a dragningen	1 708	1 412	1 243
2:a dragningen	1 232	1 070	1 007
3:e dragningen	1 094	878	937

Vidare gjordes även tester på en tornskruv med brickor och mutter i ett osmört förhållande. De rengjordes med en mjuk metallborste, en trasa och vatten. Tre efterföljande dragningar genomfördes. Det osmorda förhållandet resulterade i värdena 959, 659 och 595 kN, med ett medel på 738 kN.

Tester genomfördes också på M36-skruvarna. Samma typ av degradering kunde studeras av förspänningskrafterna mellan olika dragningar. Medelförlusten uppgick till ungefär 19 procent mellan första och andra dragningen. Riktvärdet för förspänningen vid fullt pålagt moment var för en M36-skruv 510 kN. Värdena vid första dragningen för respektive skruv hade ett medel av 627 kN alltså ett medelöverskridande med 27 procent. Högsta respektive lägsta värdet var 681 och 549 kN.

Även osmorda muttrar och skruvar testades. Rengöringen genomfördes på samma sätt. Medelvärdet på mätningarna blev 275 kN. Det lägsta värdet var 250 kN, alltså hälften av riktvärdet.

1.13.12 *Vestas undersökningar av den havererade flänsen och tornskruvarna*

Efter haveriet omhändertog tillverkaren delar av vindkraftverket och transporterade dessa till sina lokaler i Danmark för närmare undersökning. Haverikommissionen har tagit del av undersökningarna av flänsen och tornskruvarna.

Flänsen

Tillverkaren lät genomföra flera olika undersökningar av de två delar som tillsammans bildade fläns 1. Bl.a. 3D-scannade man flänsens båda delar och försökte passa in dem mot varandra.

Vid undersökningen av den nedre delen av fläns 1 fann man skrapmärken på insidan. Man konstaterade att zinkrester och jämnheten vid dessa märken kan indikera att innersidorna av flänsen vid något tillfälle kan ha haft kontakt med varandra, det vill säga en negativ tiltning. Man lät ett oberoende laboratorium undersöka detta. Laboratoriet konstaterade att skillnaderna i jämnhet på flänsen inte indikerar förslitningar som skulle kunna ha berott på att förbandet har varit utsatt för negativ tiltning.

Man hittade korrosion på de delar av flänsen som befunnit sig i den huvudsakliga vindriktningen. Den korrosion som syntes på flänsen härstammade enligt Vestas från skruvhålen och eventuellt från skruvarna, men inte från själva flänsen. Vid en undersökning av flänsen observerade Vestas att korrosionen var lätt att få bort och låg utanpå den rostskyddande metalliseringsbehandlingen som fanns på flänsen. Behandlingen var intakt.

Skruvtester

Tillverkaren gjorde bl.a. ett eget test av hur skruvarna påverkades av väta. De sänktes ner i salt- eller sötvatten i mellan en och 14 dagar och provmonterades sedan i en testbänk (bestående av en del av en riktig fläns). Man mätte skruvens längd med ett skjutmått innan och efter att den monterats. Skruvens förlängning har ett direkt linjärt samband med förspänningskraften.

Resultaten visade på ett medelunderskridande om 42 procent (0,464 millimeter) jämfört med tester av opåverkade skruvar (0,8 millimeter). Den enskilt kortaste förlängningen man uppmätte (0,264 millimeter) motsvarade 33 procent av förlängningen på opåverkade skruvar. Man fann inga signifikanta skillnader som kan hänföras till hur lång tid skruvarna utsatts för vatten eller om det varit fråga om salt- eller sötvatten.

Metoden bedöms ha en noggrannhet på ± 20 procent.²⁵ Den får anses vara sämre än eller likvärdig med mätklocka, då skruvens förlängning

²⁵ Swedish Fasteners Network, handbok för skruvförband.

mäts med en analog eller digital mikrometer. Detta medför att testet inte är tillförlitligt när det kommer till att mäta den faktiska förlängningen utan bör endast användas för att mäta skillnad i förlängning på samma skruv under olika villkor.

Metallurgiska analyser av skruvarna

Tillverkaren lät en egen expert samt oberoende experter granska de tornskruvar som satt i den havererade flänsen. Sammantaget fann man att skruvarna hade brustit p.g.a. ett utmattningsförlopp, med en varierande grad av utmattningsbrott och restbrott. Utmattningsbrotten hade haft en långsam utveckling.

I undersökningen fanns också intergranulära tecken där utmattningar hade initierats. Man gjorde därför bedömningen att detta kan vara ett tecken på att väte (H) hade introducerats från den omgivande miljön. Skruvarna hade omfattande korrosionsangrepp.

1.13.13 *Övrigt*

Vid ett tillfälle i april 2016 genomförde haverikommissionen ett platsbesök på vindparkens lager för tornskruvar. Under detta besök gjordes en visuell undersökning av tornskruvar som skulle användas på vindparken.

Under denna undersökning studerades bland annat smörjningen och det generella skicket på skruvar och muttrar. På flera muttrar var det svårt att överhuvudtaget se några svarta partiklar (MoS_2) från smörjmedlet.



Figur 48. Muttar med mycket små mängder smörjmedel i gängan.

En av skruvarna som undersöktes hade också en mindre skada på gängan.



Figur 49. Skada på skruvens gänga.

På flera andra skruvar fanns det avlagringar från smörjmedlet i små sjok, eftersom smörjmedlet lossnat från mutterns insida.



Figur 50. Smörjmedel i små sjok på skruvens gänga.

1.14 Organisations- och ledningsfrågor

Flera aktörer var inblandade i uppförandet av vindparken i Lemnhult. Här kommer bara de som bedömts vara relevanta för utredningen att behandlas.

1.14.1 *Vestas Wind Systems A/S organisation och uppföljning av leverantörer*

Tillverkaren, Vestas Wind Systems A/S, är ett multinationellt företag med produktion, service och anställda i flera länder.

Konstruktions- och designverksamheten är i huvudsak förlagd till flera platser i Danmark. Tillverkningen är i huvudsak utlagd på underleve-

rantörer runt om i världen. Företaget äger också flera dotterbolag som utför service.

Tornsegmenten var tillverkade i Kina hos en underleverantör, Titan Wind Energy. Det företaget kunde i sin tur beställa de delar de behövde hos andra underleverantörer som Vestas hade godkänt. Flänsarna i det brustna skruvförbandet hade levererats från en annan underleverantör. För arbetet med för att leda och utföra skruvdragningen vid installationen hyrdes personal in från ett danskt företag, Total Wind A/S.

Skruvarna i det brustna förbandet levererades från August Friedberg, som har varit underleverantör till Vestas sedan slutet av 1990-talet.

Kontroll och uppföljning av underleverantörer

Vestas har tillämpat en process för godkännande av leverantörer som bl.a. innebär att kvaliteten på leverantörens första leverans kontrolleras, en s.k. First Article Inspection, FAI.

Tillverkarens system för uppföljning av underleverantörer bygger på att samla in så kallade *Non-conformity reports* (avvikelse rapporter).

All kontrollmätning av produkter genomförs av leverantörerna själva. Mätningarna ska i varje enskilt fall dokumenteras. Som exempel gjorde Titan Wind Energy en lasermätning för att kontrollera planheten på de flänsar som senare kom att användas i det havererade tornet.

Friedbergs, som tillhandahöll M64-skruvarna som användes i det brustna skruvförbandet, har varit en godkänd leverantör i över 20 år. Tillverkaren har enligt utsaga inte fått några avvikelse rapporter från skruvleverantören som skulle ha gett upphov till uppfattningen att produkterna inte höll god kvalitet.

Utbildningssystem för montagepersonal

Tillverkaren har tagit fram ett utbildningssystem för att ge montörer rätt grundförutsättningar vid installations- och montagearbete. Utbildningssystemet fanns redan innan installationen av vindkraftverken i Lemnhult och företag som tillhandahållit personal för exempelvis skruvdragning har haft möjlighet att låta sin personal gå dessa utbildningar.

Systemet var uppbyggt i steg. Det fanns däremot inget krav på att sådan personal skulle ha genomgått hela utbildningssystemet, eller enskilda delar av det. All den inhyrda personalen från Total Wind A/S ansågs av tillverkaren ha tillräcklig erfarenhet av att montera vindkraftverk.

Den montör som enligt protokollet hade utfört den slutgiltiga skruvdragningen i den första flänsen hade inte genomgått någon del av tillverkarens utbildningssystem. Detta var vid tillfället för installationen

inte ovanligt, då endast 25 procent av all inhyrd personal som arbetade med liknade uppgifter för tillverkarens räkning hade genomgått det första steget i utbildningssystemet.

1.14.2 *Verksamhetsutövaren*

Lemnhult Energi AB är verksamhetsutövare och dotterbolag till Stena Renewable AB. Moder och dotterbolag benämns inom den egna organisationen som Stena, och organisationsstrukturen är densamma i båda bolagen.

I tillståndsprocessen var det Stena Renewable AB som sökte tillstånd, vilket senare överläts till dotterbolaget. Försättningsvis används Stena för att benämna båda bolagen.

Stena upprättade i samband med tillståndsprocessen ett så kallat kontrollprogram för vindparken i Lemnhult. Detta används och uppdateras fortlöpande. Dessutom har Stena upprättat riskanalyser för att belysa och hantera risker i verksamheten. Det stora flertalet av de hanterade riskerna berör arbetsmiljöfrågor och miljöfrågor. Inom organisationen har man också tagit fram rutiner, bl.a. i form av en beredskapsplan, för att hantera olyckor och incidenter, bränder, sabotage, spill av olja och kemikalier m.m.

I den vid tidpunkten gällande versionen av kontrollprogrammet beskrev Stena hur de skulle hantera olika miljökrav från tillsynsmyndigheten såväl under etableringen av vindparken som i den löpande verksamheten. Tornstabilitet eller risker med totalhaverier hanterades inte i kontrollprogrammet. I stället hanterades enskilda risker för hälsa och miljö i interna riskanalyser.

Som stöd vid t.ex. olyckor, sjukdomsfall eller miljöspill fanns en beredskapsplan. Inom varje händelseområde i planen fanns en checklista som man skulle följa.

Enligt 6 § förordning (1998:901) om verksamhetsutövarens egenkontroll ska verksamhetsutövaren omgående underrätta tillsynsmyndigheten om driftstörningar eller liknande händelser som kan leda till olägenheter för människors hälsa eller miljön. Som nämns (se avsnitt 1.10.8

Historiken för lösa tornskruvar) hade både lösa och trasiga tornskruvar upptäckts vid ett flertal tillfällen under flera år i vindparken i Lemnhult. Någon underrättelse hade emellertid inte lämnats till tillsynsmyndigheten före haveriet, med avseende på lösa eller trasiga tornskruvar.

2. ANALYS

2.1 Grundläggande aspekter på haveriet

Vindkraftverket var en standardturbin som används på alla vindkraftverk i vindparken, dessutom finns samma turbin och torn typ på andra platser i Sverige.

Vindkraftverket var dimensionerat för en livstid om minst 20 år. Tornet havererade efter ungefär tre år i drift. Vindkraftverkets kontrollenhet hade dessförinnan inte gett något varningstecken som kunde tyda på att ett totalhaveri var förestående. I stället fick verksamhetsutövaren och servicebolaget reda på att strömmen till ett antal vindkraftverk hade brutits, utan att man förstod att ett av dem hade havererat.

Utredningen har visat att ett drygt 30-tal tornskruvar efter händelsen hade typiska tecken på utmattningsbrott. Resterande tornskruvar utsattes för ett hastigt drag- eller böjförlopp i samband med att tornet föll. Anledningen till att tornkonstruktionen havererade var att förspänningskraften i skruvförbandet mellan det första och andra segmentet var alltför låg. Ett utmattningsförlopp med utbredda utmattningsbrott följer vanligen av att man inte uppnått rätt förspänningskraft i förbandet. Vibrationer som uppkommit p.g.a. hur tillverkaren styrt det aktuella vindkraftverket ledde till ett accelererande förlopp.

Vid monteringen av torn 15 följde processen med att förspänna tornskruvarna i tornet inte de skriftliga instruktionerna. I stället gav arbetsledningen en muntlig instruktion till montörerna som avvek från den information som fanns i installationsmanualen. Den montör som utförde förspänningen hade inte deltagit i den interna utbildning som Vestas erbjöd, och hade inte heller någon erfarenhet av den här typen av arbete. Utbildningen var inte obligatorisk. Processen följde inte heller någon metod som finns upptagen i standarden *SS-EN 1090-2*, i stället följde man i huvudsak den modifierade metoden som den beskrivs i det tyska nationella tillägget till eurokoden, *1993-1-8/NA*.

Verktyget som användes för att förspänna tornskruvar hade inte servats eller kalibrerats i enlighet med verktygstillverkarens rekommendationer eller kraven i *SS-EN 1090-2*. Vid tidpunkten för installationen utfördes ingen kalibrering av själva momentverktygen, utan bara av hydraulpumparna. Tillverkaren av vindkraftverket kände inte heller

till vilka toleranser verktyget hade eftersom verktygstillverkaren aldrig skickat med något sådant intyg. Verktygstillverkaren gjorde endast detta om det hade beställts.

Tornskruvarna, tornsegmenteten och verktygen utsattes för regn, snö och isbildning. Det smörjmedel som användes på muttrarna motstod inte de väderförhållanden som rådde på installationsplatsen, och var heller inte konstruerat för sådana förhållanden. Detta ledde till att en alltför låg förspänningskraft uppnåddes i förbandet.

Det finns flera frågetecken som rör val och applicering av smörjmedel. Smörjmedlet saknar korrosionsskyddande egenskaper, och måste appliceras tunt för att den specificerade förspänningskraften ska uppnås vid specificerat moment.

Tornstillverkaren har inte genomfört några tester eller verifieringar av förspänningskraften i förbanden eller påverkan av de miljöparametrar som existerar under installation.

I flera omgångar under vindparkens livstid har lösa eller trasiga skruvar upptäckts i alla typer av mellanliggande flänsar och skruvar oavsett dimension. Lösa tornskruvar var sedan tidigare ett känt problem. De första upptäcktes under hösten 2013 och dokumenterades, men medförde inte någon fördjupad granskning. Problemen med lösa skruvar ansågs till slut vara lösta sommaren 2015, efter man i slutet av 2014 hade upptäckt flera lösa skruvar i torn 7 i parken och under början av 2015 initierat ett undersökningsarbete i alla torn. I undersökningsarbetet kom tillverkaren fram till att problemen var relaterade till att förspänningskraften var för låg, men haverikommissionen kan inte se att man kom fram till vad som hade orsakat det.

Haveriet innebar en totalförlust av vindkraftverket. Inga personer kom till skada. Dock skedde ett utsläpp av miljöfarliga ämnen där turbinhuset slog ner. Detta utsläpp sanerades senare och påverkan för platsens framtida markanvändning har ansetts vara begränsad. Inget utsläpp kunde påvisas i den närliggande sjön.

Vindkraftverket har genomgått en tillståndsprövning av länsstyrelsen vilken innefattar en begränsad säkerhetsgranskning. Kommunen har i sina kontroller och sin uppföljning fokuserat på fundamenten och de tekniska dokument man begärt in rörde bara dessa. Under monteringsförfarandet har varken kommunens representanter eller den kontrollansvarige gjort kontroller på plats av byggherrens egenkontroller av monteringen.

Sammantaget har haverikommissionen funnit avvikelser inom två huvudsakliga områden. Det ena är tillverkarens styrning och uppföljning av att deras rutiner och instruktioner följs under installationen t.ex. hantering och förvaring av skruvar, tid mellan montering och slutgiltig förspänning av skruvar och att man inte följde sin egen installationsmanual. Det andra är förmågan att hantera externa krav som t.ex. krav

och allmänna råd i *SS-EN 1090-2*, verktygstillverkarens rekommendationer rörande service och kalibrering, smörjmedlets specifikation, omgivningstemperaturen vid applicering av tätningssmassan och vädrets påverkan i deras applikation.

2.2 Design och konstruktion

Ett vindkraftverk och alla dess delar är att anse som en maskin. Det innebär att de regler som följer av det s.k. maskindirektivet är tillämpliga på konstruktionen. Tillverkaren lät en extern part granska och certifiera den turbintyp och tornhöjd som användes i Lemnhult. Denna process följde en internationell standard, *IEC 61400-22*. Standarden är dock inte harmoniserad med maskindirektivet, vilket medför att den omständigheten att en maskin är certifierad enligt standarden inte betyder att alla krav i maskindirektivet är uppfyllda. Certifieringen har inte heller någon formell betydelse i Sverige.

Enligt standarden ska alla ingående delar undersökas och man ska bl.a. göra kontrollberäkningar och granskningar av dimensioneringsunderlaget. Den granskningen visade inte på några avgörande brister eller avvikelser i designen. Dock innefattade inte certifieringen någon granskning av installations- och monteringsförfarandet av vindkraftverket.

Haverikommissionen har tagit in ett antal uppgifter för att genomföra en egen granskning av hållfastheten, om än något förenklad jämfört med den certifieringsprocess som ett vindkraftverk ska genomgå enligt standarden.

De totala utmattningslasterna har beräknats. Alla uppgifter för denna analys har inhämtats från tillverkaren, dock saknades uppgifter om turbinregleringen, varför en generisk modell med öppen källkod användes i beräkningarna. Den undersökningen visar på upp till 35 procent högre laster jämfört med de som är specificerade i dimensioneringsunderlaget.

Den skillnad i laster som beräkningarna visar jämfört med dimensioneringsunderlaget kan bero på att haverikommissionen inte haft tillgång till adekvata uppgifter om turbinregleringen. Det är alltså möjligt att vindkraftverket haft en så effektiv och väl anpassad turbinreglering att hela skillnaden i utmattningslaster eliminerats. Denna skillnad i laster fanns inte i de analyserade mätningarna från torn 8.

Förutom de totala utmattningslasterna har vindkraftverkets egenfrekvenser undersökts. Undersökningen visar att vindkraftverkets egenfrekvenser inte på ett uppenbart sätt interagerat med de kritiska frekvenserna för konstruktionen. Haverikommissionen har inte funnit något stöd för att parkstyrningen, såsom den fungerade efter händelsen, resulterade i väsentligt större laster (se avsnitt 1.13.5 ovan *Dynamiska förstärkningar av periodiska störningar*).

Tillverkaren har vid konstruktionen av skruvförbandet inte verifierat att den specificerade förspänningskraften uppnås vid det valda momentet. Detta har heller aldrig provats eller testats i ett torn. Tillverkaren har utgått från den tyska standarden *DASt-richtlinie 021* som är för dimensioner över M36 och för utförandet har de använt den tyska nationella bilagan till eurokoden, *1993-1-8/NA*, som beskriver en modifierad momentmetod. Tillverkaren har därmed gjort ett avsteg från den svenska standarden *SS-EN 1090-2* och Boverkets föreskrifter (EKS) eftersom den tyska nationella bilagan till eurokoderna *1993-1-8/NA* på flera punkter skiljer sig från dessa när det kommer till just momentmetoden. Det är tillverkarens ansvar att visa på att den modifierade metoden uppnår samma eller bättre resultat i deras applikation, vilket ytterligare belyser vikten av att man verifierar sin konstruktion och sina valda metoder under de rådande förhållandena som kan finnas vid en installation.

Man har heller inte tagit hänsyn till den förlust av förspänningskraft som uppkommer p.g.a. sättningar i skruv- och flänsmaterial i ett skruvförband, inklusive gängor, och som beskrivs i standarden *SS-EN 1090-2*. För att kompensera för sättningar kräver standarden att man använder ett moment som motsvarar 110 procent av den specificerade förspänningskraften. Standarden anger att om man har andra påverkande delar eller maskinelement, t.ex. färgskikt, mjuka material eller ytbehandlingar, så måste man ta ytterligare hänsyn till dessa. Att momentmetoden innehåller två steg är inte för att motverka sättningar, utan för att skapa ett homogent förband där flänsarna har gått ihop innan fullt moment appliceras. Tillverkaren har uppgett att man följer det tyska nationella tillägget till eurokoden, *1993-1-8/NA*. I det tyska nationella tilläggets inledande ord står det att de generella kraven i *EN 1090-2* gäller, men att den modifierade momentmetoden kan användas liksom en lägre förspänningskraft än vad som anges i *EN 1090-2*.

Inte heller har man tagit hänsyn till hur alla delar av montaget av ett skruvförband kunde påverkas av miljön det utförs i, i det här fallet med regn och snö.

Haverikommissionen kan inte se att tillverkaren har testat eller verifierat att de tabellvärden som enligt standarderna ska ge önskad förspänningskraft på 1680kN faktiskt uppnås i deras applikation och i den specifika miljön. Designen har utgått från de tabellsiffror som finns upptagna i den tyska standarden *DASt Richtlinie 021* för skruvdiametrar över M36. Tillverkarens krav var att MoS_2 skulle användas i smörjmedlet och att, i enlighet med denna standard, den specificerade förspänningskraften 1 680 kN skulle uppnås vid ett moment om 15 000 Nm. Som designer och tillverkare har applikationen aldrig specificerats närmare än så. I stället har det varit upp till underleverantörerna att i sina processer definiera hur de ska klara de krav som ställts på dem.

I den leverans av tornskruvar som användes till den havererade flänsen hade skruvtillverkaren kontrollerat sex muttrar i en testbänk. Det

var på det sättet skruvtillverkaren kunde visa att man uppnår specificerad förspänningskraft vid specificerat moment.

Tillverkaren har valt att följa upp underleverantörer baserat på de avvikelser som dessa ska rapportera in. Inga avvikelser med bäring på det aktuella haveriet har påträffats i samband med utredningen.

Under drifttiden har flera accelerationslarm loggats i övervakningsenheten för det havererade vindkraftverket. Dessa larm har senare kunnat kopplas samman med olika programvaruversioner i den aktuella enheten. Tornet har därmed utsatts för ytterligare utmattningslaster. Tillverkaren har i sina egna analyser kommit fram till att detta medfört en ökning om ungefär en procents ytterligare utmattningslaster, vilket man anser vara försumbart. Haverikommissionens egen undersökning (se 1.13.9 *Beräkning av skruvens livslängd beroende på ökade laster*) om skruvens livslängd avseende dessa laster visar på att de har haft en accelererande effekt på utmattningsförloppet i tornskruvarna, även om bidraget var begränsat. En enprocentig förändring av utmattningslasterna medför en ökning motsvarande en amplitudfaktor på ca 1,5 för hur skruvarna tar upp krafterna, och därmed en förkortad livstid. Om man hade uppnått specificerad förspänningskraft i skruvförbandet hade dessa laster inte haft någon påverkan på tornets specificerade 20-åriga livslängd.

2.3 Orsaken till för låg förspänningskraft

Orsaken till att tornet föll var att förspänningskraften var alltför låg i flänsförbandet mellan tornsektionerna. Detta beror i sin tur på flera faktorer som beskrivs nedan. En faktor som styrker att en alltför låg förspänningskraft uppnåddes i förbandet är att inga skador eller brott har observerats på de svetsar som sammanfogar flänsen med det cylindriska tornskalet i det havererade tornet. Svetsarna har konstruerats så att de ska vara svagare än flänsförbandet och ska därför gå sönder innan skruvarna gör det. Det gäller dock bara under förutsättning att förbandet har de specificerade värdena på förspänningskraft som tillverkaren angett.

Nedan följer en sammanställning över de delar som har bidragit till att förspänningskraften blev låg. Analysen i det följande bygger på utförda tester och undersökningar, simuleringar, inkomna uppgifter från Vestas undersökningar, uppgifter från testprotokoll från tillverkare, uppgifter från standarder och handböcker.

Syftet är att visa hur spridningar och toleranser kan påverka förspänningskraften negativt. Sammanställningen är uppställd i den ordning som faktorerna bedöms ha påverkat förspänningskraften. Värdena för momentverktyget och sättningar är taget från handböcker då dessa inte har gått att ta fram i efterhand. Tillverkarens riktvärde för förspänningskraft är 1 680 kN.

Momentverktygets spridning

Momentverktygen har en viss spridning som kan ge ett lägre moment än det inställda värdet. Det fanns inte någon uppgift om tolerans för just det verktyg som tillverkaren använde. Med utgångspunkt i relevanta handböcker om skruvförband har ett antagande gjorts om en tolerans på ± 5 procent vilket är ett värde som ofta antas i momenttabeller i handböcker om skruvförband. En spridning på ± 5 procent på momentverktyget ger en spridning på ± 16 procent på förspänningskraften. Detta medför att verktyget kan ge ett lägre moment vilket resulterar i en förspänningskraft enligt följande:

$$1\,680 - 1\,680 * 0,16 \approx 1\,410\text{kN}$$

Spridning i friktion hos muttrarna

Enligt data från skruvtillverkaren så provas förspänningskraft på sex muttrar ur varje leverans. Uppgifterna om den aktuella leveransen visar på en spridning mellan 1 709 till 2 077 kN vilket kan ses som en spridning på ca ± 150 kN. Spridningen har bedömts som normal.

$$1\,410 - 150 \approx 1\,260\text{kN}$$

Friktionens påverkan av vatten

Under installationen utsattes både skruvar och tillhörande muttrar för regn och snö. Tillverkaren har utfört tester som visat att förlängningen, som är direkt proportionell mot förspänningskraften, minskar med ca 42 procent efter en kort tid i vattenbad.

$$1\,260 - 1\,260 * 0,42 \approx 731\text{kN}$$

Generella sättningar i förbandet

Enligt standard SS-EN 1090-2 ska ett förband dras med 110 procent av förspänningskraften, p.g.a. att ca 10 procent förloras i sättningar i skruv- och flänsmaterial i ett standardförband redan utan hänsyn till extra ytbehandlingar, mjuka material, andra maskinelement eller defekter. Därför påverkas således förspänningskraften ytterligare.

$$731 - 731 * 0,1 \approx 658\text{kN}$$

Sättningar i mjuka material i förbandet

I handböcker om skruvförband anges generellt att mjuka material och färg ska undvikas helt i alla kritiska förband. På flertalet ställen på flänsar i tornet har färgen slitits bort helt under brickorna. Färg kan pulveriseras över tiden och krypa ut ur förbandet. Andra material som tätningmassor har enligt uppgift från intervjuer en oändlig krypning, dvs. de slutar inte krypa så länge de är under tryck. För alla typer av packningar eller tätningar har rekommendationen varit att spår eller

liknande måste finnas om dessa typer av material ska användas i flänsens kontaktytor.

I det aktuella förbandet finns sammanlagt 790 µm i form av färg, zinklager i flänsens kontaktytor och Sikaflex-tätningen. Varmförzinkningen ingår inte här då den antas innefattas i den generella sättningen ovan.

Konservativt räknat uppstår sättningar med 10 procent i dessa material om alla material räknas som hård pulverlack (det är svårt att hitta data för sättningar i mjukare material men här används värdet för pulverlack som räknas som en hård och stabil färg). Se avsnitt 1.13.1 *Skruvförband* för nedanstående ekvation

$\Delta l = 0,079\text{mm}$ (ändring i förbandets klämlängd)

$$658 - \frac{0,079 * 2\,676 * 210 \cdot 10^3}{270} \approx 494\text{kN}$$

Sammanställningen kan ses som ett teoretiskt exempel på hur låg förspänningskraften i värsta fall kan bli. Samtidigt kan det konstateras att i beräkningen har medelvärden använts och vissa orsaker till spridning av förspänningskraften har inte tagits med (som skruvens toleranser, ojämnheter på flänsen, krympningar i mjuka material t.ex. Sikaflex, snö och is i flänsens kontaktytor som måste trängas undan eller riskerar att smälta senare samt rostens påverkan över tid).

Haverikommissionen kan i vart fall med säkerhet fastställa att de aktuella skruvarna var utsatta för regn och snö, att sättningar i förbandet och i mjuka material har skett, vilket sammantaget har medfört att en alltför låg förspänningskraft uppnåddes. Även om muttern och momentverktyget antas ha varit helt enligt specifikationerna kan förspänningskraften ha uppgått till ett så lågt värde som 700 kN, vilket innebär en livstid för skruven om tre år. Om alla ovan nämnda faktorer gällde förutom att skruvarna var påverkade av vatten är det fortfarande möjligt att förspänningskraften inte översteg 1 000 kN, vilket också vida understiger det specificerade värdet.

2.3.1 *Tornskruvar och muttrar*

Haverikommissionen har undersökt de materialtekniska och kemiska sammansättningarna för flera av de tornskruvar som gick av. Inga avvikelser från gällande materialtekniska krav har observerats.

De flesta stegen i produktionen av skruvarna var helt automatiserade med parametrar endast vissa personer kunde ändra, och de flesta processteg övervakades och kontrollerades. Ett kritiskt moment vid skruvtillverkning är att driva ut väte då det finns risk för väteförspredning. De brott som brukar uppstå p.g.a. väteförspredning uppkommer vanligen i direkt anslutning till montering eller kort därefter. Om väteförspredning skulle varit fallet måste felet finnas i alla skruvdimen-

sioner M36-M64 och hos båda tillverkarna. Därför kan den orsaken uteslutas.

Haverikommissionen har försökt att få kontakt med den andra skruvleverantören, Cooper & Turner, men har inte fått svar på de frågor som ställts. Skruvarna från Cooper & Turner respektive Friedbergs har ett liknande utseende. Specifikationen för skruvarna är samma till båda tillverkarna där endast MoS₂ är specificerat när det gäller smörjning. Det är sannolikt att samma eller en liknande typ av smörjmedel har använts av båda tillverkarna. Detta har dock inte kunnat fastställas.

Test av förspänningskraft

De värden på moment och förspänningskraft som Vestas använder är tabellvärden plockade ur standarden *DAS_t-richtlinie 021*. Den enda kontroll som görs av de parametrar som påverkar förspänningskraften är ett test av förspänningskraften i en testbänk hos skruvleverantören på sex muttrar i varje leverans. Testbänkens uppgift är endast att kontrollera spridningen av förspänningskraften för det applicerade smörjmedlet på muttern.

Den del som överensstämmer med den verkliga applikationen är muttern med dess smörjmedel och brickorna. I testbänken används visserligen en M64 skruv men den är kortare än den som Vestas använder och haverikommissionen har inte fått uppgifter om skruven som används är tillverkad på samma sätt och med samma behandlingar som de skruvar som levereras till Vestas eller om skruven används för mer än en dragning. Testbänken har ett annat förband med annan klämlängd än den som finns i tornet och i testbänken förhindras brickorna att rotera. Roterar brickor under montering kan det påverka fördelningen av kraften då friktionsförhållandena mellan kontaktytor ändras. De ytbehandlingar och mjuka material som använts i tornets förband återfinns inte i testbänken.

2.3.2 *Smörjmedlet*

Tillverkaren av vindkraftverket har inte i sin beställning närmare specificerat vilken typ av smörjmedel man velat ha, förutom att det skulle innehålla MoS₂, som är ett friktionsstyrande medel som ska minska spridningen av förspänningskraften i ett förband genom att styra friktionen i gängen och mellan en bricka och en mutter. I övrigt har valet av smörjmedel överlämnats till skruvleverantören. Då Vestas inte specificerat ett smörjmedel så överlämnas valet till underleverantören som inte har samma ansvar, kontroll över applikationen eller kunskap om hanteringen av produkterna. De saknar även en helhetsbild och kunskapen om Vestas interna instruktioner för installation och kontroll. Så vitt haverikommissionen kan se så har Friedbergs i allt väsentligt uppfyllt de krav som Vestas har ställt angående förspänningskraften vid ett specificerat moment och valt ett smörjmedel som innehåller MoS₂.

Den valda typen har inga korrosionsskyddande egenskaper och haverikommissionen har visat att det med den appliceringsmetod och tjocklek som Friedbergs använder, relativt lätt sköljs bort delar av MoS₂ vid kontakt med vatten eller faller av vid hantering.

Haverikommissionen har genom tester visat att mängden smörjmedel påverkar friktionen och således förspänningskraften kraftigt vilket gör att om mängden MoS₂ påverkas av vatten, fukt och vibrationer under hantering och montering ökar risken att förspänningskraften kommer att påverkas negativt.

Skruvvaxet får som visat kraftigt försämrade egenskaper vid återmontering, och skruvarna får inte återmonteras.

Tillverkaren har inte undersökt eller testat hur smörjmedlets förmåga att styra friktionen påverkas av att först dras med 30 procent för att sedan sitta så i fler veckor med vatten i gängorna, för att sedan dras med 70 procent och därefter 100 procent av momentet. Smörjmedels-tillverkaren uppger att de inte har testat smörjmedlet för applikationer med åtdragningar i flera steg med långa tidsperioder mellan dragningarna då skruvarna också påverkats av vatten. Standarden *SS-EN 1090-2* anger emellertid att om åtdragningsprocessen fördröjs för fästdon i utsatt miljö kan fästdonens smörjning påverkas och att detta bör kontrolleras. Det har tillverkaren av vindkraftverket inte gjort.

Haverikommissionen har visat att variationer i den mängd smörjmedel som används leder till att de förspänningskrafter som uppnås varierar mellan 570 kN och 2 600 kN trots att samma moment är inställt på verktyget. Detta visar på hur känsligt systemet med direkt momentdragning är för ändringar i friktionen. De nya skruvarna som haverikommissionen har tittat på (se figur 48) har inte haft en homogen svart film av smörjmedlet som databladet uppger. Det har i stället varit en tunn ljusgrå film som inte kan sägas vara homogent applicerad. Även ansamlingar av MoS₂ återfanns, i form av svart pulver, i vissa gängdalar vilka inte såg ut att binda i vaxet. De syns även spår av avrinningar eller centrifugeringspår av lite mörkare ton på vissa muttrar.

De värden som Vestas specificerar, 1 680 kN förspänningskraft vid 15 000 Nm, kontrolleras genom att skruvtillverkaren tar sex muttrar ur varje leveransomgång och testar dem i en testbänk, se avsnitt 2.3.1. Vestas har inte specificerat några toleranser för värdet på förspänningskraften utan det verkar vara upp till skruvtillverkaren att bedöma. I den aktuella leveransen uppnåddes värden mellan 1 709 och 2 077 kN. Alla värden låg över riktvärdet på 1 680 kN. Den största spridningen över riktvärdet var mer än 20 procent, i en i stort sett idealiskt kalibrerad testbänk. Även detta visar på hur stor inverkan friktionen har på förspänningskraften. Eftersom smörjmedlet verkar appliceras väldigt tunt ökar risker med att vidhäftningen av MoS₂ påverkas och att mindre avvikelser kan leda till att en större eller mindre mängd smörjmedel får en bra addition till muttern. Torrt MoS₂ ramlar av vid lättare hantering av muttrar, vatten påverkar friktionen och sköljer av

smörjmedlet enligt de undersökningar haverikommissionen genomfört och tagit del av. Ett tunt lager riskerar därför att påverka friktionen i skruvförbandet. MoS_2 behöver bindas med de övriga substanserna i smörjmedlet för att få god vidhäftning. Vid ett för tunt lager finns en risk att för lite vax finns kvar. Smörjmedlet består till stora delar av vatten, ca 80-90 procent, vilket gör att om det appliceras för tunt och centrifugeras för kraftigt eller för länge under torkning kan det bli svårt att styra appliceringen till en tunn homogen film. Även om det i en kontrollerad miljö går att applicera smörjmedlet så att förspänningskraften och momentet närmar sig Vestas specificerade värden, har det inte kontrollerats att smörjmedlet fungerar i den riktiga applikationen avseende hantering, spridning av friktion och påverkan av miljön.

Smörjmedelstillverkaren rekommenderar smörjmedlet upp till maximalt skruvdimensioner på M30 då flera kunder har uppgivit att de har haft svårt att styra processen för större dimensioner. De har i dessa fall rapporterat att friktionen blivit för låg, vilket lett till en för hög förspänningskraft. Denna uppgift stöds av förspänningsvärdena för den aktuella skruvleveransen och att en tunn film av smörjmedlet appliceras på skruvarna. Sammantaget leder detta till högre nivåer av förspänningskraft jämfört med det specificerade värdet. För att uppnå en lägre förspänningskraft måste då smörjmedlet appliceras tunnare och tunnare tills specificerad förspänningskraft uppnås. Det kan vara riskfyllt att låsa fast parametrar som moment och typ av smörjmedel för att uppnå önskat förspänningskraft som man har gjort i det här fallet. Vanligtvis väljs ett smörjmedel för att sedan testas i den riktiga applikationen. Därefter kan man komma fram till vilket moment som behöver appliceras för att uppnå den önskade förspänningskraften.

2.3.3 *Installation och service (Vad påverkade tornet under installation och service?)*

Skruvarna har under installationsperioden förvarats och hanterats på sådant sätt att de utsattes för nederbörd i form av regn och snö. Enligt Vestas instruktioner ska komponenter skyddas genom att placeras i en container, men det gjordes inte i det här fallet. Pallarna med skruvar och muttrar förvarades utomhus och ibland med trälocken och skyddsemballaget borttagna.

Vatten har stor inverkan på friktionen. Smörjmedlet har inget korrosionsskydd och mutterns insida är inte galvad vilket gör att den snabbt kan börja rosta. Enligt gällande standarder får inte muttrar vara galvade på insidan då det medför att toleranser inte kan uppfyllas och efterbearbetning av gängor är inte tillåten för större dimensioner. Korrosion har observerats i muttrarnas gängor på tornskruvarna i den fallerade flänsen. Det har inte gått att säkerställa när korrosionen bildades men det är sannolikt att skruvarna påverkades så att deras friktion ökade markant innan den slutgiltiga momentdragningen påbörjades.

Tätningssmassan Sikaflex som användes i flänsen mellan tornsegmenten applicerades när temperaturen låg under den tillåtna, +5 °C grader Celsius. Vilken effekt detta har haft för den aktuella flänsen har inte kunnat klarläggas, men det kan leda till att tätningssmassan blir svårare för flänsen att pressa ut och att den lättare kryper vid högre temperaturer.

Standarderna *SS-EN 1090-2* och *EN-ISO 6789* ställer krav på noggrannheten hos momentverktyg och dess kalibrering, samt ställer krav på metoder för att förspänna skruvar. Momentmetoden är den minst noggranna av de föreskrivna metoderna och omfattas således av den högsta kravbild. Detta är också något som en kontrollansvarig kan kontrollera vid ett platsbesök under byggnationen. Tillverkaren av vindkraftverket har inte följt de krav som ställs på verktygen enligt standarden eller verktygstillverkarens rekommendationer för service och underhåll, vilket skapar en osäkerhet vid montering. Haverikommissionen har inte närmare undersökt de verktyg som användes vid installationen, eftersom de använts och möjligen genomgått viss service under de tre år som förflutit sedan dess. En sådan undersökning skulle därför inte ge några tillförlitliga uppgifter om verktygens skick vid monteringen. Hydraulpumparna används till flera momentverktyg men de genomgår en kalibrering varje år. Olika momentverktyg används till de olika skruvdimensionerna. Enligt haverikommissionens bedömning är det inte troligt att orsaken till låg förspänningskraft beror på något fel i verktyget. I sådana fall skulle alla verktyg ha haft samma fel eller gått sönder under samma period. Däremot har momentverktygen en viss tolerans, dvs. att momentet varierar med ett antal procent med samma inställning på hydraulpumpen. Toleransen för de verktyg som användes vid installationen har inte specificerats, vilket standarden kräver.

Vid monteringen fanns det snö och is mellan torndelarna. Det går inte att beräkna dess påverkan på förspänningskraften, eftersom exakta förhållanden och mängd inte finns dokumenterade. Haverikommissionen bedömer, speciellt om inte kraften varit större än vad som visas i inledningen till avsnitt 2.3, att snö och is inte pressas ut lika lätt. Det gör att mer kraft går åt till att komprimera och pressa ut snön och isen ur förbandet med en ökad risk för att flänsen inte går ihop. Kvarvarande snö och is som sedan smälter reducerar förspänningskraften ytterligare. Vid monteringen applicerades först 30 procent av momentet, varefter tornet stod i ca tre veckor innan fullt moment applicerades. Dessa tre veckor är en avvikelse gentemot Vestas krav på att det maximalt får gå sju dagar till dess att full momentdragning genomförs. Under denna period fanns det en risk för att både vitrost (utfällning av zink) och rödrost (järnoxid) kunde medföra att friktionen i förbandet ökade ytterligare. Detta förhållande styrks av uppgifter som säger att muttrar vid flera tillfällen inte rörde sig när fullt moment applicerades. Dessutom finns uppgifter om att flänsen i vissa fall gått ihop först vid dragning med 100 procent av momentet. Det talar för att dessa skruvar maximalt uppnådde omkring 30 procent av den specificerade förspänningskraften. Detta visar att momentet inte gett den

önskade förspänningskraften i förbandet. Därtill kommer att vattenin-
trängning har observerats i flera torn. Enligt de simuleringar och
beräkningar som haverikommissionen låtit genomföra ska flänsen un-
der optimala förhållanden gå ihop vid 30 procent av fullt moment och
definitivt vid 70 procent.

Under uppförandet av vindkraftsparken arbetade olika montörer i
olika torn. Haverikommissionen har inte sett något mönster som kopp-
lar lösa tornskruvar till enskilda montörer. De faktorer som har varit
gemensamma för alla tornskruvar oavsett dimension och tillverkare är
de förhållanden som rådde under installation, hur de hanterades under
installation och de instruktioner som användes. Mot bakgrund av
Vestas vidtagna åtgärder efter händelsen, se avsnitt 4, så finns det fort-
farande anledning för den centrala organisationen inom företaget att
på ett noggrannare sätt följa upp hur de interna instruktionerna efter-
levs på installationsplatserna. Det är bra att man nu ställer krav på att
montörer ska ha rätt utbildning. Men flera av bristerna som fanns un-
der uppförandet av Lemnhult vindpark relaterar till direkta organisa-
tionsfrågor, såsom avsaknaden av skyddande lagringsmöjligheter för
skruvar. Haverikommissionen rekommenderar därför Vestas att på ett
noggrant sätt följa upp att instruktioner och manualer efterlevs på alla
byggarbetsplatser.

*Varför uppmärksammades inte lösa skruvar under Vestas kontroller
av tornskruvar vid 3-mån och 1-års kontrollerna?*

De faktorer som nämnts ovan gör att den återdragning som görs vid
service, där samma moment (15 000 Nm) appliceras, inte blir verk-
sam. Ett moment om 15 000 Nm ger inte under de ovan nämnda för-
hållandena 1 680 kN i förspänningskraft. När ytterligare tid har förlöpt
så har korrosionen låst fast skruv och mutter ännu mer vilket ökar
friktionen i förbandet. Det valda smörjmedelet har inga korrosions-
skyddande egenskaper och tester visar att inte ens spår av MoS₂ går att
upptäcka i muttrar som varit monterade i tre år. Skruvvaxet degraderar
vid flera dragningar och anses förbrukat efter första dragningen. Mon-
törer har uppgett att det ofta var svårt att demontera skruvar. De be-
hövde då öka momentet ganska mycket för att lossa skruvarna. Dessu-
tom fick de i flera fall värma muttrarna för att kunna lossa dem. Det
innebär i praktiken att förbandet kan jämföras med ett osmört förband
och en dragning med 15 000 Nm ger då en förspänningskraft på om-
kring 595 kN.

De kontroller som torntillverkaren utför av skruvarna kan under vissa
omständigheter leda till att man upptäcker lösa skruvar om friktionen i
gångor och kontaktytor inte påverkats för mycket av de faktorer som
nämnts ovan. Vid tremånaderskontrollen provas var tredje skruv och
vid senare kontroller provas var tionde. Det kan med säkerhet konsta-
teras att dessa kontroller inte kontrollerar att specificerad förspän-
ningskraft har uppnåtts i hela förbandet.

2.4 Lösa skruvar

Vestas konstaterade vid tidigare upptäckter av lösa skruvar att orsaken till att skruvarna var lösa eller trasiga var att man inte uppnådde den specificerade förspänningskraften i skruvförbandet. Dock gick man inte till botten med den analysen för att förklara hur detta kunde ske. De hade ett omfattande problem med lösa och trasiga skruvar men bedömde att det var åtgärdat. Lösningen innebar att byta skruvar med samma metod som användes vid den ursprungliga installationen.

I tillverkarens dokument *Loose tower bolts* beskrivs de åtgärder som ska genomföras när lösa bultar upptäcks vid de regelbundna kontrollerna. Om lösa skruvar upptäcks vid en fyraårskontroll och villkoren är uppfyllda i fråga om antal och gruppering, ska en orsaksanalys initieras. Någon sådan analys föreskrivs inte vid liknande upptäckter som sker under tremånaders- eller ettårskontrollen. I dessa fall ska skruvarna endast ersättas.

Den kontroll som genomfördes efter upptäckten av lösa tornskruvar i torn 7 ledde till fler upptäckter av lösa och trasiga skruvar i flera av tornen. Den metod som användes, ”pingtest”, får anses vara begränsad eftersom det är oklart vilka förspänningsnivåer som verkligen går att upptäcka. Troligen kan helt lösa, inte fastrostade, och trasiga skruvar upptäckas med metoden. En av de faktorer som pekar på att pingtestet inte upptäckte alla problem är att det i torn 27 fläns 5 inte hittades några lösa tornskruvar men att det förekom vatteninträning runt nästan hela flänsen. Tornen ska vara helt täta och vatten ska inte kunna tränga in utifrån. Trots att man genomförde två kompletta pingtester på samtliga torn under 2015 så rasade torn 15 sex månader senare.

I torn 15 fläns 5 upptäcktes lösa skruvar den 8 mars 2013 bakom stegen. Detta medförde, enligt då gällande rutiner, att 14 skruvar behövde bytas och att samtliga tornskruvar i flänsen kontrolldrogs med fullt moment. Under pingtestet i januari 2015 upptäckte man dock att skruvarna som byttes under 2013 var lösa igen. De åtgärder som genomfördes i parken avseende byte av skruvar och kontrolldragning har inte fungerat. De rutiner som fanns för servicekontroller var inte tillräckliga för att i tid fånga upp problemen med lösa och trasiga tornskruvar.

2.5 Myndigheternas kontroller av vindkraftverket

Det finns flera myndigheter som har ansvar för kontroller och tillsyn vid uppförande av ett vindkraftverk. När en ny maskin kommer ut på marknaden har Arbetsmiljöverket ansvar för att följa upp dess överensstämmelse med EU:s maskindirektiv, länsstyrelsen ger i sin tur tillstånd för uppförande och kommunen ska bl.a. godkänna kontrollplanen för byggnationen och följa upp att den inte uppenbart strider mot byggreglerna. Även andra myndigheter kan vara berörda men haverikommissionen har avgränsat beskrivningen till de myndighetsuppgifter som bedömts vara mest relevanta för händelseförloppet.

Ett vindkraftverk är en maskin och ska därför, som nämnts, följa kraven i maskindirektivet. Arbetsmiljöverket tar inte in någon teknisk dokumentation om tornkonstruktionen. Man anser sig inte ha den tekniska kompetens som behövs för att göra en granskning av de dokumenten. Dessutom är den tekniska dokumentationen mycket omfattande och skulle kräva särskild handläggning. Arbetsmiljöverket har också påpekat att det saknas en harmoniserad standard som hade kunnat vara en bättre och mer ändamålsenlig vägledning vid en inspektion av ett nytt vindkraftverk. Man anser också att det svårt att direkt applicera föreskrifterna på en så komplex maskintyp som ett vindkraftverk. Den mest vedertagna standarden *IEC 61400* saknar formell betydelse eftersom den inte är harmoniserad med maskindirektivet.

Haverikommissionen konstaterar att ett vindkraftverk är en komplex byggnad och att det krävs specialistkompetens för att till fullo kontrollera att maskindirektivets krav är uppfyllda. Samtidigt finns det aspekter som kan kontrolleras på relativt enkla sätt. Till exempel kan det vid en skrivbordsgranskning undersökas om tillverkaren har kunskap om vilka regelverk och standarder som ska följas. Monteringen ska följa de generella kraven i standarden *SS-EN 1090-2* som beskriver tillämpliga metoder för att förspänna skruv. Hade man exempelvis kontrollerat om tillverkaren följer den standarden, vilket tillverkaren i vissa delar inte gjorde, så skulle man ha kunnat uppmärksamma om det fanns tydliga monteringsanvisningar, i enlighet med kravet i maskindirektivet, som sa att verktyget måste genomgå service och kalibrering på ett särskilt sätt. Samma frågeställning gäller även för andra verktyg, som har samma principuppbyggnad, leverantör och funktion. Arbetsmiljöverket rekommenderas därför att tillsammans med lämplig sakkompetens, inom vindkraft, montering och byggnation, utveckla sin checklista för sina kontroller av maskintypen vindkraftverk.

Dessutom rekommenderas Arbetsmiljöverket att fördjupa sina kontroller och inspektioner i enlighet med maskindirektivet så att man kan säkerställa att maskinen under hela sin livstid, innefattande t.ex. design, montering, drift och nedmontering möter kraven på säkerhet.

Den granskning som en byggnadsnämnd ska göra av ett byggprojekt innebär bl.a. att, genom en kontrollansvarig, följa upp att byggherren följer den kontrollplan som finns framtagen. Men byggnadsnämnden ska också göra arbetsplatsbesök och andra kontroller. I det här fallet har man inte haft någon detaljkunskap kring vindkraft, vilket har inneburit att man inte kunde göra en granskning av tornkonstruktionen. Det var heller aldrig aktuellt att göra så då man ansåg att Arbetsmiljöverket, med stöd av maskindirektivet, skulle granska frågor kring bärighet och liknande. Byggnadsnämnden gjorde därmed inte några platsbesök eller direkta kontroller av monteringen av tornkonstruktionerna. Man valde i stället att endast kontrollera fundamenten. Beträffande dessa begärde man in tekniska handlingar och gjorde uppföljande platsbesök med kontroller. Den kontrollansvarige var inte heller

på plats under själva monteringen av tornkonstruktionerna, men skrev under samma period under på att byggherren hade genomfört de kontroller som denne skulle göra i monteringsförfarandet. Förfarandet har bl.a. motiverats med att man som byggnadsnämnd och kontrollansvarig måste få tillstånd att besöka platsen och att de risker som finns med att befinna sig på den här typen av byggarbetsplats är alltför stora för att ett besök ska vara motiverat. Risker med att besöka en byggarbetsplats måste självklart tas på största allvar men bör inte medföra en sämre granskning av ett komplext byggprojekt. Sammantaget belyser detta behovet av att sprida resultatet av denna utredning till de kommuner som i dag handlägger frågor om vindkraft. Det är viktigt att kommuner har vetskap om de krav och allmänna råd som gäller, exempelvis att plan- och bygglagens (2010:900) krav på bärförmåga gäller för hela vindkraftverket. Därför rekommenderas Boverket, som den föreskrivande myndigheten för plan- och bygglagstiftningen att på lämpligt sätt informera kommunerna om de relevanta undersökningsresultaten i denna utredning.

Det går dock inte att säga att fler arbetsplatsbesök eller kontroller av monteringen på plats skulle ha kunnat förhindra olyckan. Så vitt haverikommissionen känner till, finns det inte någon kontroll som hade kunnat göras som hade svarat på om rätt förspänningskraft hade uppnåtts mot bakgrund av den metod som tillverkaren hade valt. Men hanteringen av material och tornskruvar på platsen, att de fick ligga oskyddade och därmed utsattes för väder och vind, måste anses som en avvikelse som den kontrollansvarige eller en representant för byggnadsnämnden hade haft möjlighet att upptäcka. Även i detta fall hade den kontrollansvarige och byggnadsnämndens representant kunnat uppmärksamma hur byggherren arbetade med standarden *SS-EN 1090-2*.

Innan torn 15 havererade hade flera vindkraftverk haft problem med lösa och trasiga tornskruvar. Under 2013 hittade man, i en enskild fläns i ett torn, 37 lösa tornskruvar. Om en så stor andel av skruvarna i ett förband är lösa är risken mycket stor för en händelse med skadekonsekvenser. Inget fynd av lösa skruvar föranledde en anmälan till tillsynsmyndigheten, Länsstyrelsen i Jönköpings län, i enlighet med det tillstånd man hade för vindparken. Förordningen (1998:901) om verksamhetsutövares egenkontroll anger att om det inträffar en driftstörning eller liknande händelse som kan leda till olägenheter för människors hälsa eller miljö ska detta anmälas till tillsynsmyndigheten. Hade tillsynsmyndigheten fått kännedom om problematiken hade man i ett tidigare läge kunnat ställa krav på verksamhetsutövaren och följa upp utvecklingen av de avhjälpande åtgärderna. Det är inte säkert att detta skulle ha förhindrat haveriet, men det hade gett tillsynsmyndigheten en möjlighet att agera. Länsstyrelsen i Jönköpings län rekommenderas att tillse att verksamhetsutövaren tar fram tydliga rutiner för hur rapportering enligt förordningen (1998:901) om verksamhetsutövares egenkontroll ska ske för att i framtiden säkerställa att myndigheten får kännedom om händelser som kan leda till olägenheter för människors hälsa och miljön.

3. UTLÅTANDE

3.1 Utredningsresultat

- 1) Vindkraftverket havererade efter att ha varit i drift i knappt tre år.
- 2) Turbintypen var dimensionerad enligt rådande standard, IEC 61400.
- 3) IEC 61400 är inte en harmoniserad standard.
- 4) Vindkraftverket var CE-märkt.
- 5) Tillverkaren har inte gjort någon verifiering eller test av att den specificerade förspänningskraften uppnås i det aktuella skruvförbandet.
- 6) Tillverkaren har inte verifierat hur installationsmiljön påverkar förspänningskraften i skruvförbandet.
- 7) Tillverkaren har inte undersökt hur spridningar i materialegenskaper och dimensioner i ingående delar, inklusive smörjmedlet, i skruvförbandet påverkar förspänningskraften.
- 8) Tillverkaren har inte i sin design kompenserat för de förluster i förspänningskraft som uppkommer p.g.a. av sättningar i skruvförbandet.
- 9) Den specificerade förspänningskraften uppnåddes inte.
- 10) Vid flera tillfällen under installationsperioden har flänsarna gått ihop fullständigt först vid anläggande av 100 procents moment.
- 11) Under monteringsperioden var arbetsplatsen utsatt för regn och snö.
- 12) Instruktionerna för hur flänsar, skruvar och muttrar skulle skyddas mot påverkan av regn och snö följdes inte.
- 13) Vid flera tillfällen under installationsperioden har snö och vatten pressats ut mellan flänsarna under förspänningen av skruvar.
- 14) Den berörda montören hade ingen tidigare erfarenhet av att montera vindturbiner, och hade inte genomgått tillverkarens interna utbildning för det arbetet.
- 15) Kommunen begärde inte in den tekniska dokumentationen för tornkonstruktionen.
- 16) Varken kommunen eller den kontrollansvarige har gjort några arbetsplatsbesök under uppförandet av vindkraftverket.
- 17) Tillsynsmyndigheten för maskindirektivet (Arbetsmiljöverket), begärde inte in de tekniska handlingarna för tornkonstruktionen.

- 18) I Lemnhult vindpark hade flera vindkraftverk, oberoende av skruvleverantör, omfattande problem under åren 2013-2015 med lösa och trasiga tornskruvar samt med vatten som trängde in i skruvförbanden.
- 19) Verksamhetsutövaren har uppgivit att man inte fick kännedom om de lösa och trasiga skruvarna som hittades under tremånaders- och ettårskontrollen.
- 20) Verksamhetsutövaren rapporterade inte de omfattande problemen med lösa och trasiga skruvar till tillsynsmyndigheten.
- 21) Vindkraftverket var under perioder utsatt för vibrationer, och ytterligare utmattningslaster till följd av det.
- 22) Förspänningskraften i ett skruvförband påverkas kraftigt av friktionen i förbandet. Tjockleken av smörjmedelslagret har stor påverkan på denna friktion.
- 23) Inga eller mycket små spår av smörjmedlet kunde påvisas materialtester på skruvar från det brustna förbandet.
- 24) Smörjmedlet påverkas kraftigt av vatten. Tillverkarens tester visar på en medelförlust av 42 procent av förspänningskraften vid påverkan av vatten.
- 25) Insidan av muttrarna i den aktuella flänsen var angripna av korrosion.
- 26) Flänsarna i det havererade skruvförbandet hade inga avvikelser i förhållande till tillverkarens specifikation. De skruvar och muttrar samt den bricka som har undersökts hade inga materialavvikelser avseende hårdhet och mekanisk provning. Ungefär en tredjedel av alla skruvar i det aktuella förbandet hade utmattningsbrott.

3.2 Orsaker till olyckan

Orsaken till utmattningsbrotten var att förspänningskraften i förbandet var alltför låg. Att tillräcklig förspänningskraft inte uppnåddes berodde på att man under installationsförfarandet inte skyddade skruvarna och tornsektionerna från regn och snö. Vatten påverkade muttrarnas smörjmedel, vilket i sin tur ökade friktionen i gängorna på de skruvar och muttrar som användes. De verktyg som användes vid installationen hade inte underhållits och kalibrerats för att säkerställa att rätt momentkraft uppnåddes. Hänsyn hade inte tagits till de sättningar, varken i förbandet eller i de mjuka material som ingick i skruvförbandet, som alltid påverkar förspänningskraften. Tillverkaren hade inte verifierat att den specificerade förspänningskraften uppnåddes eller testat den omgivande miljöns påverkan på förbandets förmåga att uppnå specificerad förspänningskraft.

Tillverkarens organisation har inte fångat upp avvikelser från deras rutiner och instruktioner som skedde under installationen av tornet och har heller inte fångat in och hanterat alla externa krav som påverkar skruvförbandets förmåga att få korrekt förspänning.

Tornet har under olika tidsperioder utsatts för ökade vibrationer och högre utmattningslaster p.g.a. av problem med olika versioner av mjukvara som användes för att styra vindkraftverket. Med dåligt förspända skruvförband kan dessa tillfälligt högre laster leda till ytterligare förkortad livslängd.

4. VIDTAGNA ÅTGÄRDER

Vestas Wind Systems A/S:

- Tillverkaren utfärdade i februari 2016 en *Safety Alert* (säkerhetsmeddelande) för att informera tekniker, underleverantörer och ägare av vindkraft vilka omedelbara försiktighetsåtgärder som behövde tas, både för nya etableringar men också i serviceintervaller för äldre vindkraftverk. I meddelandet poängterades följande:
 - Fästelementen måste lagras och hanteras i torrt skick.
 - Tiden mellan initial förspänning av skruvförband och den slutgiltiga förspänningen får inte överstiga sju dagar. I en uppdaterad utgåva sattes tiden i stället till två dagar.
 - Insidan på tornet måste hållas torr.
 - När installation sker i minusgrader måste man genomföra en kontroll så att is inte har bildats på flänsens kontaktytor. En liknande kontroll måste också utföras när skruvarna förspänns.
 - Vid varje planerat besök ska alltid en kontroll göras för att se om vattningress har skett. I så fall, ska detta hanteras.
- För att säkerställa att säkerhetsmeddelandet följs har tillverkaren kommunicerat innehållet till hela sin egen organisation.
- Tillverkaren säkerställer nu att alla underleverantörer som genomför installationsarbete har genomgått träningsnivå C och D.
- I början av 2017 kommer man att ge ut en ny utgåva av installationsmanualen för att på ett mer detaljerat sätt beskriva hur fästelementen ska hanteras.
- Servicemanualen kommer att uppdateras så att man genomför en visuell kontroll av flänsarna.

- Tillverkaren har också genomfört inspektioner på övriga vindkraftverk i Lemnhult vindpark och har initierat ett kontrollschema för liknande tornkonstruktioner på andra etableringsplatser för att undersöka integriteten på skruvförbanden.

5. SÄKERHETSREKOMMENDATIONER

Vestas Wind Systems A/S rekommenderas att:

- Följa upp att instruktioner och manualer efterlevs på alla byggarbetsplatser, se avsnitt 2.3.3. (RO 2017:01 R1)

Boverket rekommenderas att:

- På lämpligt sätt informera kommuner om de relevanta undersökningsresultaten i denna utredning, t.ex. att plan- och bygglagens (2010:900) krav på bärförmåga gäller för hela byggnadsverket, se avsnitt 2.5. (RO 2017:01 R2)

Länsstyrelsen i Jönköpings län rekommenderas att:

- Tillsä till verksamhetsutövaren tar fram tydliga rutiner för hur rapportering enligt förordningen (1998:901) om verksamhetsutövares egenkontroll ska ske för att i framtiden säkerställa att myndigheten får kännedom om händelser som kan leda till olägenheter för människors hälsa och miljön, se avsnitt 2.5. (RO 2017:01 R3)

Arbetsmiljöverket rekommenderas att:

- Tillsammans med lämplig sakkompetens inom vindkraft, montering och byggnation, utveckla en checklista för kontroller av maskintypen vindkraftverk, se avsnitt 2.5. (RO 2017:01 R4)
- Fördjupa sina kontroller och inspektioner i enlighet med maskindirektivet så att man kan säkerställa att maskinen under hela sin livstid, innefattande t.ex. design, montering, drift och nedmontering möter kraven på säkerhet, se avsnitt 2.5. (RO 2017:01 R5)

SHK emotser besked **senast den 22 maj 2017** om vilka åtgärder som har vidtagits med anledning av de rekommendationer som har lämnats i rapporten.

På haverikommissionens vägnar

Jonas Bäckstrand

Alexander Hurtig