

# Trätorn – Kan det vara något för svensk vindkraft i skogsmiljö?

Projekt

Energi- och miljökompetenscentrum

Rapport 2011:1

Anders Angantyr och Daniel Hägerby

Oktober 2011



HÖGSKOLAN  
DALARNA

FÖRSTUDIE

Högskolan Dalarna  
Energi- och  
miljöteknik

En investering för framtiden





# Sammanfattning

Inom ramen för projektet Energi- och miljökompetenscentrum vid Högskolan Dalarna har en kortare förstudie kring tekniken som används av Timber Tower GmbH för höga vindkrafttorn i trä gjorts. Huvudsyftet med studien har varit att titta närmare på tekniken och dess potential för svensk landbaserad vindkraft samt utreda vad detta kan innebära för regionen.

Trenden för landbaserad vindkraft i skogsmiljö går mot allt högre torn. Skogsmiljön gör att den marknära turbulensen och vindgradienten blir större än över t.ex. hav vilket gör det mer fördelaktigt att använda högre torn.

Tekniken som Timber Tower GmbH använder är att bygga tornet på plats med en konisk hålstomme av plana paneler av korslimmat limträ (som annars främst används vid byggnation av höga hus med massivträstomme). Tekniken är skyddad av ett flertal patentsökningar varav minst en är beviljad.

Vid en jämförelse mellan träorn och svetsade ståltorn (som är den dominerande torn tekniken idag) kan det konstateras att träornstekniken är ekonomiskt intressant. Framförallt blir träornen mer intressanta i jämförelse med ståltornen vid ökande höjder (> 100 m) pga. dess transportfördelar. Vidare bör det nämnas att de torn tekniker som används idag vid höjder runt 140 m och högre främst är fackverkstorn i stål och hybridtorn med en hög bas av förspänd betong och övre delen i stål.

Då ett typgodkännande av ett vindkraftverk gäller torn och turbin är det i praktiken alltid turbintillverkaren som prissätter och levererar ett komplett vindkraftverk. Med utgångspunkt i regeringens planeringsram för svensk vindkraftutbyggnad (20 TWh/år landbaserad vindkraft 2020) kan dock marknadsvärdet för torn uppskattas till 2-3 miljarder kr/år fram till 2020. För träorn motsvarar detta en årlig potentiell volym på ca 190 000 m<sup>3</sup>.

Slutsatsen i denna korta studie är att det är tekniskt möjligt att designa ett träorn i rimliga dimensioner för en 2-3 MW turbin med navhöjd ca 140 m och att detta sannolikt även är ekonomiskt intressant. Då ett träorn blir något lättare än motsvarande ståltorn går det åt mindre energi för att göra ett träorn. Hur mycket mindre är dock osäkert pga. den stora spridningen i siffror för energiåtgång för stålproduktion och i praktiken blir skillnaden även leverantörsberoende. Eftersom andelen förnyelsebar energi är betydligt större vid tillverkningen av materialet för träornen kommer träornet att ge en betydande sänkning på utsläppt CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub> jämfört med motsvarande verk med ståltorn. Ett annat argument för träorn är förenklade transporter jämfört med t.ex. svetsade ståltorn eller hybridtorn med prefabricerade betongelement.

Om tekniken etableras kan det i förlängningen leda till en regional påverkan i form av ökat lokalt innehåll i vindkraftprojekten t.ex. genom ökade råvaruleveranser (eg. sågat och torkat virke), lokal produktion av korslimmat limträ eller exempelvis bildande av specialiserade montagefirmor. Det största hindret för tekniken just nu är dess marknadsintroduktion och acceptans samt typgodkännande tillsammans med en för svensk marknad intressant turbinleverantör. För att få acceptans för tekniken krävs byggande och utvärdering av minst ett verk med träorn. En intressant storlek för marknaden är en 2-3 MW turbin med navhöjd ca 140 m. Ett sådant verk skulle i så fall få det högsta vindkrafttornet i Sverige och sannolikt det högsta vindkrafttornet i trä i världen. Byggandet av ett första verk med träorn skulle sannolikt även kräva ett behov av stödfinansiering för att täcka en projektörs ökade risk. Då flera vindkraftetableringar i regionen uppvisar goda produktionsresultat (med Tavelberget som gott exempel) visar det att regionen är intressant för introduktion och utvärdering av ny teknologi.

# Innehåll

1 Inledning.....	2
1.1 Bakgrund.....	2
1.2 Trender inom vindkraften.....	2
1.3 Upplägg för studie.....	3
2 Trätornstekniken.....	4
3 Dimensionering och design av vindkrafttorn.....	6
3.1 Certifiering och försäkring.....	6
3.2 Lastfall.....	6
3.3 Grundläggande principer för torndesign.....	7
3.3.1. Torndynamik.....	7
3.3.2. Stabilitet.....	8
3.4 Andra faktorer som driver designen.....	9
4 Jämförelse av svetsade konventionella ståltorn och trätorn.....	10
4.1 Förutsättningar.....	10
4.2 Beräkningar för trätorn.....	11
4.3 Beräkningar för svetsade ståltorn.....	12
4.4 Jämförelse trätorn – svetsade ståltorn.....	12
5 Energinetto- och CO <sub>2</sub> -jämförelse av ståltorn och trätorn.....	13
5.1 Energinetto.....	13
5.2 CO <sub>2</sub> per genererad kWh.....	13
6 Andra tornalternativ.....	15
7 Trätorn – potential och utsikter.....	17
7.1.1. Potential.....	17
7.1.2. Utvecklingsmöjligheter.....	17
7.1.3. Utsikter för tekniken.....	18
7.1.4. Möjlig regional påverkan.....	18
7.2 Slutsatser.....	19
8 Referenser.....	20

# 1 Inledning

Inom ramen för projektet Energi- och miljökompetenscentrum vid Högskolan Dalarna har en kortare förstudie kring tekniken med höga vindkrafttorn i trä gjorts. Huvudsyftet med studien har varit att titta närmare på tekniken och dess potential för svensk landbaserad vindkraft samt utreda vad detta möjliga teknikskifte kan innebära för regionen.

## 1.1 Bakgrund

Idag sker en kraftig utbyggnad av vindkraften i skogsmiljö i Sverige. Den dominerande tekniken för vindkrafttorn i Sverige är ståltorn svetsade i sektioner som lyfts på plats och monteras ihop med skruvförband. Ett 100 m högt ståltorn innehåller i storleksordningen 300 ton stål. Idag finns det dock olika intressen för att kunna använda träbaserade torn istället.

I Sverige använder InnoVentum trä för tornen i deras miniverk och gårdsverk upp till 21 m för deras turbiner upp till 30 kW, [1]. Vidare har Vertical Wind AB byggt ett vertikalt vindkraftverk på 200 kW med ett träbaserat torn utanför Falkenberg, [2]. Sannolikt planerar företaget att använda träbaserade torn även för större verk. Mer intressant för stora konventionella trebladiga horisontella verk är tyska Timber Tower GmbHs teknik för trätorn, [3]. Denna typ av teknik har även uppmärksammats av den nyligen startade Kanadensiska organisationen Canadian Timber Structures, [4], som nyligen bytt namn från Canadian Timber Towers. Till denna organisation är bl.a. Aeolis Wind anslutna. Aeolis Wind är ett vindkraftbolag aktiva i British Columbia. Vad författarna känner till, har i dagsläget varken Timber Tower GmbH eller Canadian Timber Structures färdigställt något högre torn (~ 100 m). Dock har Timber Tower GmbH byggt en prototyp av de översta 25 m för deras torn. Det är Timber Towers GmbHs teknik som studeras i denna rapport.

## 1.2 Trender inom vindkraften

De trender som här pekas ut för vindkraften är i huvudsak baserat på Staffan Engströms rapport [5].

- Det dominerande konceptet för vindkraftverk är idag trebladiga horisontalaxlade turbiner.
- Utvecklingen går mot allt större effekter.
- Utvecklingen går mot direktdrivna synkrona permanentmagnetgeneratorer med tillhörande frekvensriktare.
- Kina kontrollerar idag 95 % av produktionen av sällsynta jordartsmetaller (som behövs för tillverkning av permanentmagneter) vilket gör att tekniska initiativet förskjuts allt mer från Europa och USA mot kinesiskt håll.
- Utbyggnaden av vindkraften som sker i Sverige idag är landbaserad pga. dess kostnadsmässiga fördel gentemot havsbaserad. 2010 installerades 308 nya landbaserade vindkraftverk och inga nya havsbaserade, [6].
- För landbaserad vindkraft i skogsmiljö går trenden mot allt högre torn. En utredning kring högre torn är [7] som även pekar ut trätorn som en potentiellt kostnadseffektiv lösning.

Anledningen till varför trenden går mot högre torn är i sammanhanget viktig att förstå. Vindeffekten är proportionell mot vindhastigheten i kubik, [8], vilket gör att en ganska liten ökning av medelvinden får ett stort utslag på elproduktionen från ett vindkraftverk. Skogsmiljön gör att vindgradienten blir större än över t.ex. hav. Med andra ord, vinden ökar snabbare med ökande höjd över skog jämfört med över hav (i alla fall vid höjder som är aktuella för dagens vindkraftverk). Detta leder till att det är ekonomiskt fördelaktigare

att använda högre torn för landbaserad vindkraft i skogsmiljö än för t.ex. havsbaserad vindkraft.

I [7] exemplifieras detta med vinddata representativ för skogsmiljö och 3 MW turbin. Om navhöjden ökas från 100 m till 150 m ökar medelvinden från 6.2 m/s till 7.2 m/s vilket leder till att den förväntade produktionen ökar från 6.3 GWh/år till 9.0 GWh/år. Då kostnadsökningen rimligen måste kunna göras mindre i relation till intäktsökningen är det därför mycket intressant för främst vindkraftprojektörer och vindkraftägare att öka navhöjden.

### **1.3 Upplägg för studie**

Syftet med studien är att titta på Timber Tower GmbHs teknik för höga trätorn och utreda potentialen i denna, främst för etablering i svensk skogsmiljö. I avsnitt 2 studeras tekniken närmare och i avsnitt 3 går grunderna för dimensionering av vindkrafttorn översiktligt igenom. I avsnitt 4 görs en jämförelse mellan trätorn och svetsade ståltorn för två tornhöjder, 100 m och 140 m. Vidare studeras energi- och klimatargumenten för teknologierna separat av andraförfattaren till denna rapport under avsnitt 5. Andra tornalternativ studeras översiktligt i avsnitt 6. Slutligen sammanfattas utsikterna för trätornstekniken.

## 2 Trätornstekniken

Timber Tower GmbH är ett ungt tyskt företag som konstruerar trätorn för stora vindturbiner. Företaget har lämnat in ett flertal patentansökningar för tekniken. Minst ett patent är beviljat (DE 10 2009 017 593 B4). Detta avsnitt berör deras teknik för trätorn utifrån vad som går att förstå från deras hemsida [3]. Figur 1 visar monteringen av prototypen till toppen av ett trätorn.



Figur 1 Prototyp av översta 25 m för ett trätorn under montage, [3].

Tornet byggs upp av paneler av korslimmat limträ (cross laminated timber, CLT) runt en prefabricerad innerstruktur. För det färdiga tornet är det panelerna i hålstommen som är lastbärande. Sannolikt används någon form av fästelement vid montage för stabilisering vid limning av fogarna. För kostnadsberäkningarna i avsnitt 4.2 antas en limtjocklek på 1 mm. Som väderskydd används en takduk direktlimmad mot CLT-panelerna. Skarvarna för denna limmas på plats efter montage av panelerna. I de flesta andra limträkonstruktioner är det oftast förbanden och infästningarna som är dimensionerande, så borde vara fallet även för denna konstruktion. Hållfasthetsdata för CLT-paneler är beroende på klassningen av lamellerna men typiska data ges i Tabell 1.

Tabell 1 Typiska mekaniska data för CLT-paneler, [9].

Densitet	450 kg/m <sup>3</sup>
E-modul, parallellt	11 GPa
Böjbrottgräns, parallellt	10 MPa
Dragbrottgräns, parallellt	7.0 MPa
Tryckbrottgräns, parallellt	8.5 MPa

Maximala längder för produktion av CLT-paneler är ca 16 m. Enligt företagets hemsida kan tornen transporteras i 40 ft containers vilket ger en maximal panellängd på ca 12 m. Detta innebär även att största lyften vid montage av tornen är ca 5-7 ton om en paneltjocklek på 300 mm antas.

För beräkningarna av materialåtgång i avsnitt 4.2 antas det att ett stabiliserande tvärsnitt med 100 mm CLT-paneler görs var femte meter. Vidare antas att den prefabricerade innerstrukturen utgörs av fyra stycken 300 mm x 300 mm limträpelare.



# 3 Dimensionering och design av vindkrafttorn

## 3.1 Certifiering och försäkring

Vindkraftverk dimensioneras för olika vindförhållanden (eg. vindklass och turbulensintensitet) specificerade i IEC 61400-1. Vidare dimensioneras vindkraftverken för att motstå den s.k. extrema 50 års vindbyn. För större delen av den svenska landbaserade vindkraften gäller IEC III vilket motsvarar en årsmedelvind på maximalt 7.5 m/s och 52.5 m/s för den extrema 50 års vindbyn.

Enligt flera personer med goda insikter i försäkringsbranschen krävs det ett typgodkännande av ett vindkraftverk för ett givet vindförhållande för att det ska vara möjligt att försäkra. Enligt [11] innebär ett typgodkännande att ett certifieringsorgan (Det Norske Veritas, Germanischer Lloyds, etc.) godkänner och utfärdar ett typgodkännande utifrån minst:

- Grunden för design utvärderingen (eg. laster och lastfall)
- Vindturbinutvärderingen (eg. teoretiska beräkningar)
- Typprov
- Tillverkningsutvärdering
- Slutlig utvärdering

Viktigt att förstå i sammanhanget är att ett typgodkännande enbart kan ges för komplett turbin och torn. Ett typgodkännande kan alltså inte ges för enbart ett torn. En eventuell oberoende torntillverkare måste således i praktiken alliera sig med minst en turbintillverkare för att kunna få avsättning för sina torn. Värt att nämnas när det gäller typgodkännande är att fundamentet inte behöver ingå i det typgodkännande som utfärdas för turbin och torn. Vidare är det inte ett krav att typprov utförs med komplett turbin och torn i full skala för att erhålla ett typgodkännande.

Vidare kan enligt [11] även ett prototypcertifikat utfärdas utifrån:

- Grunden för designutvärderingen (eg. laster och lastfall)
- Vindturbinutvärderingen (eg. teoretiska beräkningar)
- Testplan för prototypen
- Säkerhets och funktionstest

Ett prototypcertifikat kan alltså utfärdas innan några tester för turbin och torn gjorts. Syftet för att söka ett prototypcertifikat är sannolikt för att få en tidig granskning av tekniken och för att underlätta processen att senare få ett typgodkännande.

## 3.2 Lastfall

Laster som påverkar dimensioneringen av ett vindkraftverk är aerodynamiska laster som beror på vindstyrka, vindbyar, turbulens, vindskjuvnig men även mass- och tröghetslaster som gravitation, centrifugalkrafter och gyroskopiska moment är dimensionerande, [16]. Utgående från [10] dimensioneras vindkraftverk således normalt för olika lastfall:

- Normal drift
- Eventuella tekniska fel
- Extrema lastfall (50 års vindbyn)
- Utmattning

Förutom en del stabilitetsaspekter spelar dynamiken (bladdynamik, torsion i drivlina, vriddynamik, tornets dynamik) för systemet en viktig roll när det gäller utmattning.

### 3.3 Grundläggande principer för torndesign

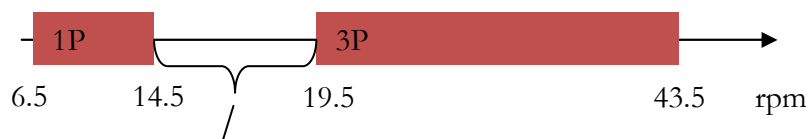
När det gäller tornets design är det enligt [16] framförallt styvhet och stabilitet som driver designen men även utmattning i framförallt svetsade- och andra förband. Då styvhet och stabilitet står i motsats till ett minimalt materialanvändande studeras dessa begrepp mer ingående.

#### 3.3.1. Torndynamik

Egentligen är det tornets dynamik och inte styvheten i sig som är intressant. Styvheten är dock en viktig faktor för tornets egenfrekvenser och således dess dynamik. Dynamik i detta sammanhang kan man enkelt säga är tornets respons (vibration) pga. av en tidsberoende last. Om frekvensen för en tidsberoende last sammanfaller med en egenfrekvens för tornet har man resonans vilket kan leda till höga vibrationer i tornet med höga påkänningar som följd.

De dynamiska laster som främst är viktiga för tornet är obalans i rotorn och aerodynamiska laster från bladpassagen. Frekvensen för dessa laster är  $1P$  respektive  $3P$  för en trebladig rotor (vilket i princip alla aktuella verk har idag) där  $P$  är varvtalet för vindturbinen.

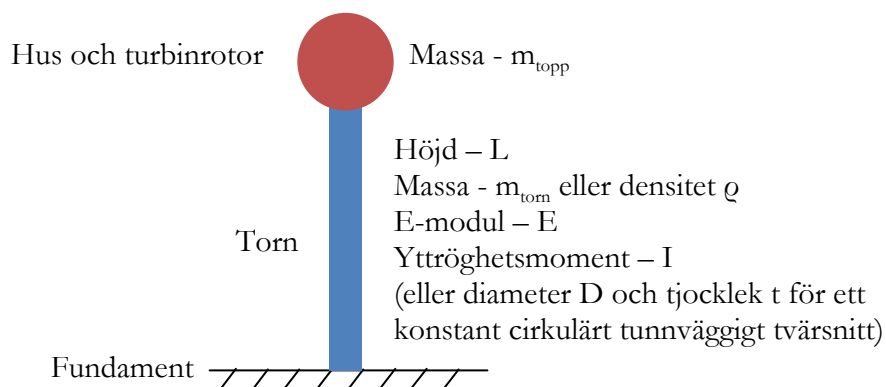
Det viktiga i sammanhanget är att man försöker undvika att egenfrekvensen för tornets första böjmod sammanfaller med frekvenserna  $1P$  och  $3P$ . För en turbin med variabelt varvantal blir detta istället två varvtalsområden som man försöker undvika med första egenfrekvensen. Dessa varvtalsområden illustreras i Figur 2 för en 2.5 MW Vensys100 turbin med variabelt varvantal, [19].



I praktiken ökar varvtalsområdet för egenfrekvensen för tornets första böjmod

Figur 2 Varvtalsområden för  $1P$  och  $3P$  för en 2.5 MW Vensys100 turbin. Observera att egenfrekvensen tornets första böjmod ej uppges i databladet, [19].

Av praktiska skäl designas de flesta av dagens torn så att egenfrekvensen för tornets första böjmod ligger i intervallet mellan varvtalsområdena för  $1P$  och  $3P$ . Idag görs i princip alla torn koniska men för att förstå vilka parametrar som är viktiga för första egenfrekvensen kan man studera en enkel balkmodell med konstant tvärsnitt som modell för ett vindkraftstorn med hus och turbin enligt Figur 3.



Figur 3 Fast inspänd balk med en toppmassa som modell av ett vindkraftverk.

Eigenfrekvensen  $f$  (Hz) för första böjmoden för en fast inspänd balk med konstant tvärsnitt och en massa  $m$  i änden enligt [20] är:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m_{topp} + 0.24m_{torn})}} \quad (2.1)$$

Om balken (tornet) har ett tunnväggigt cirkulärt tvärsnitt blir ekvation 2.1:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3ED^3t}{8L^3(m_{topp} + 0.24\pi DtL\rho)}} \quad (2.2)$$

Av ekvation 2.2 kan man inse att ökning av höjden på tornet ( $L$ ) ”effektivt” ger en sänkning av egenfrekvensen. Likväl som en ökning av diametern ger en ”effektiv” höjning av egenfrekvensen. Detta är anledningen att man vill ha en stor diameter (bas) för tornen. I ett fackverkstorn minskar man dessutom även massan ( $m_{torn}$ ) vilket håller uppe egenfrekvensen för första böjmoden.

Om man t.ex. vill öka höjden för ett ståltorn från 100 m till 140 m vars egenfrekvens redan ligger nära övre gränsen för 1P måste detta kompenseras med en ökad diameter ( $D$ ) eller godstjocklek ( $t$ ). Om diametern måste hållas konstant (se diskussion under 3.4) måste tjockleken ökas grovt sett en faktor  $(140/100)^3 \approx 2.7$ . Detta innebär alltså att ett ståltorn på 140 m blir ca 3 gånger tyngre än ett ståltorn på 100 m om basen ej kan ökas förutsatt att egenfrekvensen för första böjmoden måste ligga över 1P.

### 3.3.2. Stabilitet

När det gäller stabilitet för tornet i ett vindkraftverk är det fråga om buckling. Alltså risken för en kollaps av tornet pga. att det utsätts för laster som ger höga tryckspänningar i tornet. Enligt [21] är bucklingsspänningen (alltså spänningen vid vilken buckling sker)

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{E}{\sqrt{1-\nu^2}} \frac{t}{R} \quad (2.3)$$

för ett tunnväggigt cirkulärt tvärsnitt med radie  $R$  utsatt för en axiell belastning. ( $E$  är e-modul och  $t$  är väggjocklek.) Men pga. imperfektioner gäller i praktiken ungefär

$$\sigma' \approx 0.3E \frac{t}{R}. \quad (2.4)$$

Av ekvation 2.4 kan man dra slutsatsen att bucklingsspänningen ökar linjärt med väggjockleken och minskar linjärt med ökande radie.

Om vi nu använder ekvation 2.4 och rimliga data för ett 140 m högt trätorn ( $E = 11$  GPa,  $R = 5$  m och  $t = 0.3$  m) så blir bucklingsspänningen 198 MPa. Denna spänning är dock avsevärt mycket högre än vad ett CLT-torn kommer att dimensioneras för ( $\sim 10$  MPa). Av det kan man dra slutsatsen att buckling inte är dimensionerande för ett trätorn. Med andra ord, buckling är inget problem för ett trätorn.

För ett ståltorn ( $E = 210$  GPa) med samma bas  $R = 5$  m och en väggjocklek  $t = 30$  mm blir bucklingsspänningen 380 MPa vilket är i samma storleksordning som sträckgränsen för en rimlig materialkvalitet, ( $\sim 350$  MPa). För ett ståltorn med basen  $R = 5$  m och en väggjocklek understigande ca 30 mm blir alltså buckling dimensionerande.

### 3.4 Andra faktorer som driver designen

Det är av största intresse att minska materialåtgången då materialkostnaden kommer att vara en betydande del av totala tornkostnaden oavsett typ av torn. I exemplen med trätorner och svetsade ståltorner i nästa avsnitt jämförs därför materialkostnaderna direkt då det ger en bild av hur kostnadseffektiv en tornlösning är. Givetvis påverkar även andra kostnader som t.ex.

- Produktionskostnader
- Transportkostnader
- Uppförandekostnader
- Underhållskostnader

men dessa är mycket svårare att säkert kvantifiera, speciellt i denna typ av korta förstudie. En viktig sak som berör svensk landbaserad vindkraft och hör samman med transportkostnader och uppförandekostnader är transportbegränsningar. Enligt [5] är det inte möjligt att ens med dispens landtransportera vindkrafttorner med diameter överstigande 4.5 m pga. höjdrestriktioner.

En annan kostnadsaspekt för torndesign som förmodligen kommer att bli mer och mer aktuell är kostnader för eventuell återvinning av torner. En viktig faktor som också bör tas i beaktande vid jämförelse av olika tornlösningar är hur robust designen är. Med robust menas designens okänslighet för olika fel eller störningar under t.ex. produktions-, montage- eller driftperioden.

# 4 Jämförelse av svetsade konventionella ståltorn och trätorn

Svetsade ståltorn är den idag dominerande tekniken vid installation av landbaserade vindkraftverk i Sverige. Därför görs i detta avsnitt främst en jämförelse mellan denna teknik och trätorntekniken.

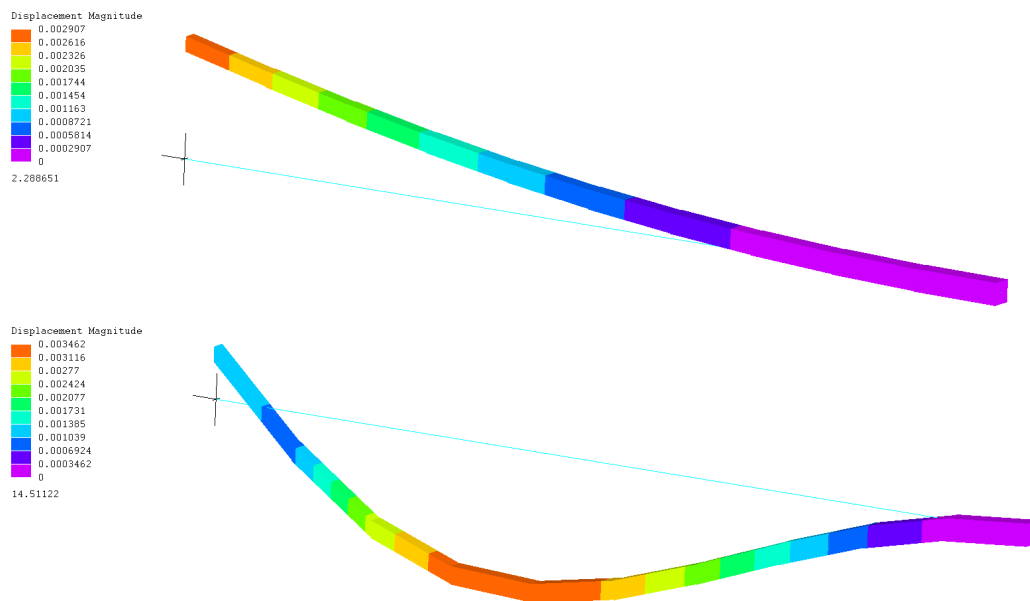
## 4.1 Förutsättningar

I avsnitt 4.2 och 4.3 presenteras översiktligt dimensionerade trä- respektive ståltorn för två olika Vensysturbiner och höjderna 100 m och 140 m. (I detta fall avses tornets höjd och inte navhöjd men detta spelar mindre roll i en så pass grov studie.) Med dimensionerade menas i detta fall att torndimensionerna är rimliga främst med avseende på egenfrekvensen för tornets första böjmod och varvtalsområdet för turbinen. Uppgivna data för turbinerna från [19] och [22] samt antagna data ses i Tabell 2. Då massan för rotor och hus inte uppges i datablenden antas denna vara ungefär lika som massan för två motsvarande Fhurländer turbiner, [23].

Tabell 2 Uppgivna data och antagna data för turbiner.

	Vensys 82	Vensys 100
Vindklass	IEC IIIa	IEC IIIa
Rotor diameter	82 m	100 m
Massa rotor och hus (antagen)	90 ton	150 ton
Varvtalsområde	9-17.3 rpm	6.5-14.5 rpm

Egenfrekvenserna för tornets första och andra böjmoder (se exempel i Figur 4) beräknas med en enkel balkmodell i ett finit element program.



Figur 4 Exempel på beräknade första och andra böjmoder för ett 100 m trätorn. Siffrorna 2.28 och 14.5 i bilden motsvarar egenfrekvenserna i rad/s. Observera att geometrin endast visas schematiskt.

## 4.2 Beräkningar för trätorn

Trätornet antas vara konstruerat enligt avsnitt 2. Eftersom det är svårt att få referenser för materialkostnader antas dessa utefter ett antal samtal med personer med goda insikter i respektive bransch enligt Tabell 3. Kostnaden för CLT inkluderar bearbetning som t.ex. fasning.

Tabell 3 Antagna materialkostnader för volymer motsvarande ungefär ett trätorn.

CLT inklusive bearbetning	500 €/m <sup>3</sup>
Täckskikt inklusive lim	8 €/m <sup>2</sup>
Polyuretanlim	20 €/liter

I Tabell 4 anges typiska beräknade dimensioner och motsvarande uppskattade materialkostnader för två trätorn.

Tabell 4 Typiska dimensioner och uppskattade materialkostnader för två trätorn.

Turbin	1.5 MW Vensys 82 (90 ton)	2.5 MW Vensys 100 (150 ton)
Tornhöjd	100 m	140 m
Toppdiameter	3 m	3.5 m
Bottendiameter	7 m	9.5 m
Vägg tjocklek	300 mm	300 mm
<b>Beräknade torndata</b>		
Volym CLT	443 m <sup>3</sup>	818 m <sup>3</sup>
Massa CLT	199 ton	368 ton
Yta	1600 m <sup>2</sup>	2900 m <sup>2</sup>
Volym innerkonstruktion	75 m <sup>3</sup>	143 m <sup>3</sup>
Massa innerkonstruktion	34 ton	64 ton
Limvolym	600 liter	900 liter
Egenfrekvens 1a böjmod	21.8 rpm	15.7 rpm
Egenfrekvens 2a böjmod	138 rpm	93.4 rpm
<b>Materialkostnader</b>		
CLT	221 000 €	409 000 €
Innerkonstruktion	38 000 €	72 000 €
Täckskikt	13 000 €	24 000 €
Lim	12 000 €	18 000 €
<b>Totalt</b>	<b>284 000 €</b>	<b>523 000 €</b>

I bägge fallen ses det att egenfrekvensen för första böjmoden ligger över intervallet för 1P för respektive turbin. Vidare ska sägas att materialkostnaden för innerkonstruktionen antas vara samma som materialkostnaden för CLT enligt Tabell 3.

### 4.3 Beräkningar för svetsade ståltorn

Enligt en svensk inköpschef ligger materialkostnaden för grovplåt i S355 runt 0.75 €/kg vid köp av stora volymer. Detta ligger i linje med vad [24] uppger för varmvalsad plåt för maj 2011. Då även annat som svetsmaterial, skruvförband, etc. ingår i ett svetsat ståltorn antas materialkostnaden vara 0.85 €/kg. I [6] uppges även ett marknadspris för ett färdigt svetsat ståltorn vara ca 2.3 €/kg för 2010.

Typiska dimensioner och uppskattade materialkostnader för två tornhöjder sammanfattas i Tabell 5. I kolumn 3 har ett försök gjorts att dimensionera ett 140 m torn med villkoret att basdiametern ej får överstiga 4.5 m. I kolumn 4 antas inte denna begränsning gälla vilket gör att tornet måste delas på något vis om det ska transporteras på land.

Tabell 5 Typiska dimensioner, uppskattade materialkostnader och marknadspris för ståltorn för två höjder.

Turbin	1.5 MW Vensys 82 (90 ton)	2.5 MW Vensys 100 (150 ton)	2.5 MW Vensys 100 (150 ton)
Tornhöjd	100 m	140 m	140 m
Toppdiameter	3 m	3 m	3 m
Bottendiameter	4.5 m	4.5 m	7.5 m
Väggjocklek i topp	15 mm	15 mm	15 mm
Väggjocklek i botten	43 mm	75 mm	35 mm
<b>Beräknade torndata</b>			
Massa	273 ton	597 ton	474 ton
Egenfrekvens 1a böjmod	20.1 rpm	11.7 rpm	15.9 rpm
Egenfrekvens 2a böjmod	120 rpm	62.3 rpm	88.2 rpm
<b>Materialkostnad</b>	<b>232 000 €</b>	<b>507 000 €</b>	<b>403 000 €</b>
<b>Marknadspris 2010</b>	<b>628 000 €</b>	<b>1372 000 €</b>	<b>1090 000 €</b>

Observera att 140 m tornet med basdiameter 4.5 m ligger med egenfrekvensen för tornets första böjmod inom varvtalsområdet för 1P. Det är kanske möjligt att designa ett sådant torn men det är säkert inte den mest robusta lösning man kan tänka sig. Vidare bör sägas att det inte är säkert att det med hänsyn mot bl.a. buckling är möjligt att göra tornet i kolumn 4 med så pass tunn väggjocklek.

### 4.4 Jämförelse trätorner – svetsade ståltorn

Vid en jämförelse av materialkostnaderna för trätorner och ståltorn ser dessa ut att ligga något högre för trätorner än för svetsade ståltorn. Detta kan dock ändras snabbt pga. ändrade världsmarknadspriser. Intressant är dock att materialkostnaden för trätorner har en bra bit upp till marknadspriset för ståltorn. Och eftersom inte mycket arbete (förutom prefabriceringen av innerkonstruktionen) tillkommer innan platsmontage för trätorner bör dessa vara ett mycket kostnadsintressant alternativ till de svetsade ståltornen.

Vidare ska sägas att det är helt rimligt att göra 140 m trätorner med en basdiameter på 9-10 m med avseende på egenfrekvensen för första böjmoden vilket inte är fallet för ståltorn med en begränsning på 4.5 m för basdiametern.

## 5 Energinetto- och CO<sub>2</sub>-jämförelse av ståltorn och trätorner

Två argument för vindkraftstorn i trä kan vara förbättrat energinetto och minskad klimatpåverkan för vindkraften. Vi har därför tittat närmare på dessa två aspekter. I analysen har vi antagit återvinning av 85 % av stålet i tornet och energiåtervinning av hela trätorner. Analysen är baserad på exemplet i Tabell 6.

Tabell 6 Exempel på typiska massor för ett vindkraftverk med 100 m högt torn som använts i energinetto- och CO<sub>2</sub>-analys.

	Ståltorn	Trätorn
Hus och rotor	100 ton	100 ton
Torn	270 ton	230 ton
Fundament	840 ton	840 ton

### 5.1 Energinetto

EROEI, Energy Returned on Energy Invested, är ett sätt att beskriva en energikällas effektivitet. Olja som pumpades upp i USA på tidigt 1900-tal hade ett mycket högt energinetto/EROEI på ca 100, dvs man fick 100 enheter energi i form av olja för varje enhet som användes för att ta upp oljan. Denna typ av kalkyler bygger på ett livscykel tank där all energi som tagits i anspråk för att utvinna en viss energiform ställs i relation till nyttgjord energi. Det är förstås viktigt att skilja på olika former av energi, t.ex. värme och el, samt om den är förnybar eller fossil.

I en omfattande studie [12] av energinetto för vindkraft med ståltorn fann man att EROEI för vindkraft låg kring 20, dvs ca 20 kWh<sub>el</sub>/kWh<sub>in</sub>. Spridningen de ingående studierna emellan är dock stor och kraftigt beroende av t.ex. energiåtgång per viktenhet av använt material. För stål anges 0.5-1.5 MWh/ton vilket ungefär stämmer med uppgifter från SSAB, [13], ~ 1 MWh/ton. World Steel [14] anger dock en högre siffra, ~ 4 MWh/ton trots 85 % återvunnet material.

Enligt exemplet har ett trätorner något mindre massa än motsvarande ståltorn och energiåtgången för limträ är ca 1 MWh/ton [15]. Därför bör det gå åt något mindre energi för att göra ett trätorner. Hur mycket mindre är dock osäkert. Andelen förnybar energi är dock väldigt olika, med fördel trätorner. Detta eftersom en mycket stor del av energiförbrukningen för produktion av limträelement, ur ett livscykel perspektiv, utgörs av restprodukter från virket, som alltså är en förnybar energikälla.

### 5.2 CO<sub>2</sub> per genererad kWh

Livscykelanalyser med fokus på klimatpåverkan per genererad kWh<sub>el</sub> ger i storleksordningen 17 g CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub> för vindkraft [16] (med konventionella ståltorn).

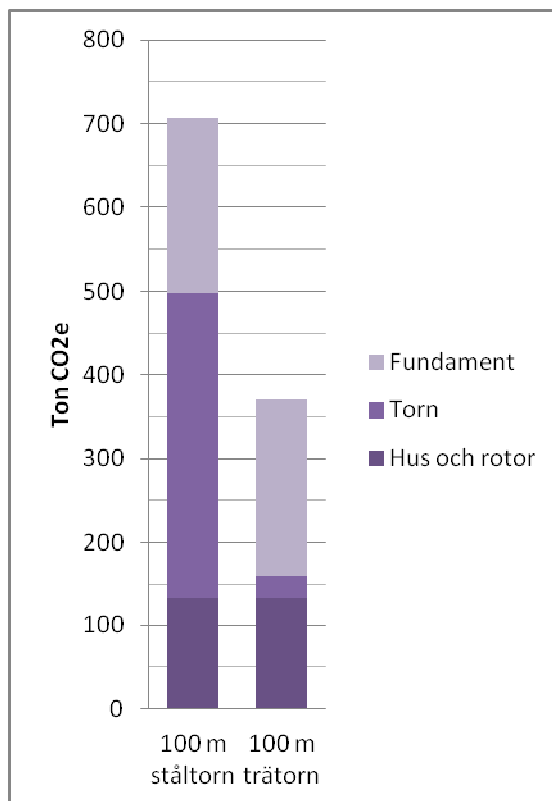
Med hjälp av data från producentorganisationer för de olika materialslagen kan vi göra en grov uppskattning av skillnaden i koldioxidekvivalenter mellan trä- och ståltorn för exemplet i Tabell 6.

Hus och rotor antas bestå av stål och fundamentet enbart av betong. Med koldioxidekvivalenter på 1,34 ton CO<sub>2e</sub>/ton stål [14], 0,25 ton CO<sub>2e</sub>/ton betong [17] och 0,13 ton CO<sub>2e</sub>/ton för limträ [15] blir totala ekvivalenta CO<sub>2</sub> utsläppen för exemplet enligt Tabell 7 och Figur 5.



Tabell 7 Ekvivalenta CO<sub>2</sub> utsläpp för verk med 100 m ståltorn och 100 m trätorrn.

	Ståltorn	Trätorn
Hus och rotor	134 ton	134 ton
Torn	363 ton	30 ton
Fundament	210 ton	210 ton
<b>Totalt</b>	<b>707 ton</b>	<b>374 ton</b>



Figur 5 Ekvivalenta CO<sub>2</sub> utsläpp för verk med 100 m ståltorn och 100 m trätorrn.

Ett verk med trätorrn har enligt vår analys en betydligt lägre klimatpåverkan relativt ett motsvarande verk med ståltorn. Dock utgör tornet bara en del i vindkraftens totala utsläpp av klimatgaser. Eftersom fundamentet oftast är mycket stort och gjort av betong med relativt hög klimatpåverkan [17], blir därför reduktionen av klimatgaser för tornet stor, men för vindkraftsverket, uttryckt i CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub>, mindre. Med en rumslig systemgräns dragen så att endast själva verket på plats (exklusive t.ex. vägar, elnät m.m.) blir resultatet en ungefärlig halvering av klimatpåverkan från vindkraften vid användande av trätorrn.

Om man slår ut 707 ton ekvivalent CO<sub>2</sub> på 25 år för ett verk som ger 5 GWh/år så blir ekvivalenta utsläppen ca 10 g CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub> vilket då ungefär skulle motsvara verkets (fundament, torn, hus) del i de 17 g CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub> enligt [16]. För ett verk med trätorrn blir då ekvivalenta CO<sub>2</sub> utsläppen ungefär 12 g CO<sub>2e</sub>/kWh<sub>el</sub>. Observera att dessa siffror är en grov uppskattning och mycket beroende av bl.a. förväntad produktion och systemgränser.

## 6 Andra tornalternativ

Med utgångspunkten att tornen för svensk landbaserad vindkraft i skogsmiljö inom en snar framtid normalt kommer att bli betydligt högre än 100 m diskuteras här alternativa tornlösningar översiktligt. De torn typer som studerades i [7] var:

- Konventionella svetsade ståltorn
- Ståltorn med skruvförband
- Betongtorn (glidforsgjutna eller uppbyggda av prefabricerade element)
- Hybridtorn (konventionellt ståltorn med högt betongfundament)
- Fackverkstorn i stål
- Trätorn med hålstomme

I Figur 6 ses exempel på hybridtorn och fackverkstorn.



Figur 6 Hybridtorn från *Advanced Tower Systems* [26] och fackverkstorn med *Fuhrländer 2.5 MW* turbin från [23] (bilden är beskuren).

Hybridtornstekniken tillämpas av bl.a. Enercon för verk i Sverige, t.ex. i Markbygden med tornhöjder upp till 138 m. I [7] drogs en tämligen säker slutsats att hybridtornen var mer ekonomiska än rena betongtorn. Därför torde rena betongtorn knappast vara aktuella alls. Ur  $\text{CO}_2$  aspekt har betong eller hybridtorn en nackdel jämfört med t.ex. fackverkstorn eller trätorn.

Svetsade ståltorn har en klar fördel med möjlighet till invändigt förmontage och ett rationellt platsmontage. Men när det gäller högre höjder blir möjligheten till landtransport ett problem. Förutsatt landtransport, måste åtminstone de lägre sektionerna komma att bli demonterbara och då faller lite av fördelarna med förmontage och ett rationellt platsmontage. Konceptet närmar sig då skruvade ståltorn.

De högsta vindkraftstornen idag ( $\sim 160$  m) är gjorda som fackverkstorn i stål. Fackverkstorn har en klar fördel jämfört med andra tekniker i fråga om materialutnyttjande både vad gäller tornet i sig och fundamentet. Ett fackverkstorn på 140 m innehåller ca 280 ton stål vilket är jämförbart med ett svetsat ståltorn på 100 m, [25]. En av fackverkstornens nackdelar är underhållet i form av kontroller av skruvar (om än bara visuella). Antalet

skruvar i ett fackverkstorn är i storleksordningen 10 000 st. Om fackverkstornen passar in i landskapsbilden i skogsmiljö är en för stor fråga att utreda här med till dess fördel nämns ofta visuella effekten att de blir nästan transparenta på långt håll. Vidare är frågan om isbildning viktig för fackverkstornen. Fackverkstornen kan dimensioneras för att tåla kraftig isbildning men risken för isras ökar betydligt jämfört med slutna torn. När det gäller arbetsmiljö och säkerhet för underhållspersonal bör det vara en nackdel med ett öppet torn.

Om vi här förutsätter att trästorn verkligen är ett potentiellt koncept för högre vindkraftstorn leder diskussionen ovan till att hybridstorn, fackverkstorn eller skruvade/svetsade stålstorn torde vara de främsta andra alternativen för vindkraftetableringar i svensk skogsmiljö.

## 7 Trätorn – potential och utsikter

I detta avsnitt diskuteras potentialen för användningen av trätornstekniken för landbaserad vindkraft i Sverige. Teknikens utsikter och utvecklingsmöjligheter diskuteras utifrån författarnas subjektiva bedömning. Vidare diskuteras teknikens möjliga regionala påverkan.

### 7.1.1. Potential

Enligt regeringspropositionen som kom 2008, [27], är planeringsramen för vindkraft 30 TWh/år 2020 fördelat på 20 TWh/år landbaserad vindkraft och 10 TWh/år havsbaserad vindkraft. (Sveriges totala nettoproduktion av el var under 2010 145 TWh, [6].) Under 2010 installerades inte något nytt havsbaserat vindkraftverk i Sverige, [6], däremot installerades 308 st landbaserade vindkraftverk. Ett antagande om landbaserad vindkraft motsvarande 20 TWh/år 2020 är därför rimligt. Detta motsvarar en utbyggnad på 17 TWh/år till 2020. (2010 producerades ca 3 TWh från landbaserad vindkraft och under 2011 förväntas denna siffra stiga till närmare 5.8 TWh, [28].)

Om det antas att den utbyggnad som kommer att ske görs med 3 MW verk och tornhöjd 150 m för en medelvind på ca 7.2 m/s (vilket är representativt för stora skogsområden i södra Sverige, [6]) som ger ca 9 GWh/år motsvarar 17 TWh/år alltså ca 1900 nya verk fram till år 2020 eller 190 nya verk per år.

Ett trätorn på 150 m innehåller ca 1000 m<sup>3</sup> CLT vilket ger att den årliga potentiella volymen i Sverige är ca 190 000 m<sup>3</sup>. Hur stor marknadsandel trätorn kan tänkas få är idag mycket osäkert och diskuteras närmare under sektion 7.1.3. Det är dock lättare att exemplifiera hur stor marknadsandel som behövs för att tekniken rimligen ska vara lönsam.

Enligt [29] produceras 650 000 m<sup>2</sup> korslimmade paneler per år i en fabrik med 130 anställda. Om man antar att medeltjockleken är ca 100 mm bör årliga volymen vara ca 65 000 m<sup>3</sup>. Således skulle det behövas en marknadsandel på ca 35 % för att fullbelägga en CLT-fabrik.

Vidare kan det vara intressant att uppskatta vad marknaden för torn är värd i Sverige. Om man antar att investeringskostnaden för vindkraft är ca 15 miljoner kr per MW och att tornets del i detta är 30 % så blir svenska marknaden för torn värd ca 2-3 miljarder kr per år fram till 2020 enligt resonemanget ovan.

### 7.1.2. Utvecklingsmöjligheter

Trätornstekniken är en ung teknologi vilket i sig borgar för en möjlig god utvecklingspotential. I denna rapport är inte mycket sagt om sammanfogningen av CLT-elementen. Men klart är att sammanfogningstekniken i sammanhanget är en av de mest kritiska punkterna då denna förmodligen är dimensionerande samt även påverkar montaget i stor utsträckning.

Enligt [3] kan ett trätorn monteras på två dygn vilket kanske är möjligt efter intrimning av tekniken. Men då trätornsmontaget innefattar limning kan montaget sannolikt tidsmässigt (eg. krantid) inte konkurrera med montaget av ett ståltorn av svetsade sektioner. För högre höjder (~ 140 m) då bottensektionerna måste delas oavsett teknik (ståltorn eller hybridtorn) är situationen förmodligen annorlunda. Klart är dock att det finns god utvecklingspotential kring logistik, lyft och montage och att minimering av montagetiden blir mycket viktigt om en kran för höga och tunga lyft måste användas. Största lyften vid montage av ett trätorn är maximalt ca 5-7 ton på ett litet avstånd från torncentrum. Därför är det rimligt att tänka sig att det går att bygga ett helt torn utan extern mobilkran med en mindre central kran som flyttat uppåt allteftersom bygget fortskrider likt den teknik som har utvecklats för byggnation av höga hus med massivträstomme, se Figur 7.



Figur 7 Byggnation av höga träbuss med byggsystem från Martinssons, bild från [30].

### 7.1.3. Utsikter för tekniken

Under ca 100 m där de svetsade stålornen är dominerande idag är det förmodligen svårt för tekniken att etablera sig. Däremot finns bättre möjligheter för tekniken för högre torn. Om man antar att det idag skulle finnas en typgodkänd och beprövad kostnadseffektiv lösning med ett 140 m träorn och en 2-3 MW turbin för låga medelvindar ( $< 7.5$  m/s) skulle detta vara en mycket intressant produkt för den svenska marknaden.

Trätornstekniken har potential att bli ett kostnadseffektivt alternativ. Det största hindret för tekniken idag är dess marknadsintroduktion och acceptans. För att tekniken ska accepteras måste minst ett första verk med trätorn byggas. Detta måste sannolikt stödfinansieras på något sätt då risken för projektören är högre. Att någon av de större turbintillverkarna med egna stora investeringar i t.ex. stålornsteknologi eller hybridteknologi skulle vara intresserade av ett samarbete med en mindre trätornstillverkare är tveksamt. För en mindre turbintillverkare som saknar höga torn skulle dock en allians med en trätornstillverkare kunna bli en marknadsöppnare för den svenska marknaden. Om tekniken vinner acceptans hos marknaden och det verkligen visar sig att den är ett kostnadseffektivt alternativ, finns goda möjligheter att tillsammans med rätt turbinleverantör ta delar av den svenska marknaden.

### 7.1.4. Möjlig regional påverkan

I detta avsnitt diskuteras trätornsteknikens möjliga påverkan i regionen. Ett antal olika tänkbara scenarion associerat med tekniken är:

1. Uppstart av ett konkurrerande trätornsföretag
2. Lokal produktion av CLT
3. Sågverken blir leverantör av lokal råvara
4. Uppstart av montagefirmor
5. Byggnation av en prototyp i regionen
6. Minskat motstånd till vindkraftetableringar

1) Då ett antal patentansökningar är kopplat till tekniken är en uppstart av ett direkt konkurrerande företag till Timber Tower GmbH inte enkelt. Detta skulle även kräva djup kompetens inom både vindkraftteknik och träbyggande vilket inte finns i regionen idag. Ett uppköp av företaget för att komma åt tekniken är dock tänkbart. Möjliga intressenter skulle kunna vara någon av de tre stora inom Svenskt Limträ, Martinssons, Moelven eller Setra med limträtillverkning i Långshyttan eller företag som t.ex. Stora Enso och KLH Scandinavia.

- 2) Då Timber Tower GmbH är ett ingenjörsföretag utan tillverkning är lokal produktion av CLT i en ny fabrik eller exempelvis hos KLH Scandinavia (som bearbetar CLT-paneler i Orsa) fullt tänkbart. Detta förutsätter dock att det finns en etablerad marknad.
- 3) Att sågverken i regionen kan bli en leverantör av lokal råvara är naturligt. Detta i sig kräver ingenting nytt då försäljningskanaler och logistiken är etablerad.
- 4) Att tekniken kan leda till uppstart av nya montagefirmor är fullt tänkbart. Detta förutsätter dock att det finns en etablerad marknad.
- 5) En kritisk punkt för acceptans av tekniken är uppförandet av ett första verk med trätorner. Ett verk med 140 m torn och en 2-3 MW turbin för låga medelvindar bör vara högst aktuell för Timber Tower GmbH. Ett sådant verk skulle bli det högsta vindkrafttornet i Sverige och sannolikt det högsta vindkrafttornet i trä i världen. Flera vindkraftetableringar i regionen uppvisar goda produktionsresultat. Tavelberget utmärker sig med en kapacitetsfaktor (kvoten mellan faktisk produktion och teoretisk maximal produktion) på 0.35-0.44 för 2010 [31] vilket är mycket högt i den svenska statistiken. Därför bör en etablering av ett första verk med trätorner i regionen vara intressant. PR-värdet i detta för regionen borde undersökas närmare. Uppförande av ett första verk med trätorner förutsätter sannolikt någon form av finansiellt stöd för att täcka en projektörs ökade risk.
- 6) Sannolikt förbättras den lokala opinionen för vindkraftetableringar vid ökat lokalt innehåll i projekten (t.ex. genom lokalt producerade vindkrafttorner i trä). Om detta ger en reell- eller enbart marginell förändring är ett utrymme att studera.

## 7.2 Slutsatser

Några korta slutsatser för trätornerstekniken med hålstomme är:

- Trätorn i storleksordningen 140 m för ca 2-3 MW turbiner är tekniskt fullt realistiska och verkar även vara ekonomiskt mycket intressanta.
- Marknaden för torner i Sverige bör vara värd ca 2-3 miljarder per år fram till 2020.
- Enbart torner går i praktiken inte att sälja till en slutkund. Därför måste en oberoende tornerstillverkare alliera sig med minst en turbintillverkare.
- Ett införande av en ny teknologi med trätorner innebär sannolikt att någon/några med andra incitament än de traditionella vindkraftprojektörerna måste stödfinansiera åtminstone ett första verk.
- Det går åt mindre energi att producera ett vindkraftverk med trätorner än ett liknande verk med ståltorner. Hur mycket mindre är dock osäkert men klart är att ett trätorner ger en betydande minskning i utsläppt ekvivalent CO<sub>2</sub> per producerad kWh jämfört motsvarande verk med ett ståltorner.
- Ett av de starkaste kända argumenten för trätorner gentemot konventionella stål- eller hybridtorner är förenklade transporter för trätorner.
- Det finns inget i denna studie som visar att trätorner diskvalificeras från att vara ett realistiskt torneralternativ.
- Då flera projekt i regionen uppvisar goda produktionsresultat bör det finnas platser i regionen som vore intressanta för ett första verk med trätorner.

## 8 Referenser

- [1] Produktinformation InnoVentum, <http://www.innoventum.se/>, 2011-09-07.
- [2] Vertical Wind AB, <http://www.verticlwind.se/>, 2011-09-07.
- [3] Timber Tower GmbH, <http://www.timbertower.de/>, 2011-09-07.
- [4] Canadian Timber Structures, <http://canadiantimberstructures.com/>, 2011-09-07.
- [5] Staffan Engström, "Nytt och trendigt inom vindkraften – Omvärldsbevakning 2010", Elforsk rapport 10:49.
- [6] Energimyndigheten, "Vindkraftstatistik 2010", ES 2011:06.
- [7] Staffan Engström, Tomas Lyrner, Manouchehr Hassanzadeh, Tomas Stalin och John Johansson, "Tall towers for large wind turbines", Report from Vindforsk project V-342 Höga torn för vindkraftverk, Elforsk rapport 10:48.
- [8] Tore Wizelius, 2007, "Vindkraft i teori och praktik", Studentlitteratur andra upplagan.
- [9] Produktdokumentation M1 BSP crossplan, <http://www.mm-kaufmann.com/>, 2011-09-07.
- [10] IEC 61400-1, Wind turbines Part 1: Design requirements.
- [11] IEC 61400-22, Wind turbines Part 22: Conformity testing and certification.
- [12] M Lenzena, J Munksgaard, 2002, "Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications", Renewable Energy, 26, 339-362.
- [13] SSAB Hållbarhetsredovisning 2010.
- [14] LCI-data på begäran från worldsteel.org.
- [15] Miljödeklaration, [www.svensktlimtra.se](http://www.svensktlimtra.se), 2011-08-31.
- [16] Vattenfall 2010, "Vattenfall wind power certified environmental product declaration EPD of electricity from Vattenfall's wind farms". [www.vattenfall.se](http://www.vattenfall.se), 2011-09-27.
- [17] Jeanette Sjunnesson, 2005, "Life Cycle Assessment of Concrete", Master thesis Lunds Tekniska Högskola, LUTFD2/TFEM--05/5009—SE.
- [18] Erich Hau, 2006, "Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer 2nd Edition.
- [19] Technical Data Vensys 2.5MW Platform, [www.vensys.de](http://www.vensys.de), 2011-09-02.
- [20] Robert D. Blevins, 2001, "Formulas for natural frequency and modeshape", Krieger Publishing Company, Reprint Edition 2001.
- [21] Warren C. Young and Richard G. Budynas, 2002, "Roark's formulas for stress and strain", McGraw-Hill 7<sup>th</sup> Edition.
- [22] Technical data Vensys 1.5MW Platform, [www.vensys.de](http://www.vensys.de), 2011-09-02.
- [23] Technical data FL 1500 and FL 2500, <http://www.fuhrlander.de/>, 2011-09-06.
- [24] Steel prices, <http://www.steelonthenet.com/>, 2011-09-06.
- [25] Wind tower product solutions, <http://www.ruukki.com/>, 2011-09-08.
- [26] Advanced Tower Systems, <http://www.advancedtowers.com/>, 2011-09-08.
- [27] Regeringens proposition 2008/09:163, "En sammanhållen klimat- och energipolitik Energi".
- [28] Svensk Vindenergi, <http://www.vindkraftsbranschen.se>, 2011-10-17.
- [29] Klhscandinavia, <http://www.klhscandinavia.se>, 2011-09-16.
- [30] Martinssons, <http://www.martinssons.se>, 2011-09-19.

[31]Energimyndigheten, “Driftuppföljning av Vindkraftverk – Årsrapport 2010”,  
<http://www.energimyndigheten.se>, 2011-10-04.