

# Urban vindkraft

– Dagens kunskapsläge



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Institutionen för arkitektur och byggd miljö/Energi och byggnadsdesign

Examensarbete:  
Sophia Christianson  
Mikael Olenmark

© Copyright Sophia Christianson, Mikael Olenmark

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2009

## Sammanfattning

För en lyckad projektering av urban vindkraft krävs att vinden så väl som infästningar, ljudutbredningar och de krav och regler som gäller beaktas. Men mycket erfarenhet saknas fortfarande och många projekt misslyckas därför. I denna rapport behandlas ovan nämnda aspekter och en sammanställning av erfarenheter och kunskapsbrister har gjorts med syftet att underlätta i projekteringsfasen.

Vindförhållandena i urban miljö är komplicerade och de flesta vindmodelleringsprogram är utformade för storskalig vindkraft. Då vinden är den faktor som avgör om investering i vindkraft blir lönsamt eller inte är det viktigt att försöka förutse. Den metod som vi anser är mest lämpad för urbana vindförhållanden beskrivs i kapitlet *Handberäkningsmodell för vind och höjd över taket*. Metoden är approximativ men ger en bra utgångspunkt för bestämning av vindhastighet och vindkraftverkets placering på taket.

Oavsett om ett vindkraftverk har de perfekta vindförhållandena och möjligheten att producera stora mängder energi får vindkraftverket inte drivas om det låter för mycket. Därför är det viktigt att vindkraftverkets ljuddata är kända och att den är tillförlitlig.

Vad det gäller infästningarna mellan vindkraftverket och stommen konstateras att det är en viktig aspekt att beakta för att förhindra stomljud och vibrationer samt undvika skador i byggnadens skal. Det finns dock inga tumregler att tillgå eftersom infästningarna måste utformas specifikt för varje fall då förutsättningarna skiljer för olika hus.

Det finns en mängd regler som ska följas och krav som ska uppfyllas för att ett vindkraftverk ska få monteras. Här behandlas därför innehållet i en bygglovsansökan, regler för anslutning till elnätet och riktvärden för buller från vindkraftverk. Även krav för skuggning och stroboskopeffekten samt tekniska krav på vindkraftverket tas upp.

Uppgifter om energiproduktionen från projekt med urbana vindkraftverk är idag bristfälliga. Därför kan inga definitiva slutsatser om deras effektivitet göras. Däremot kan det konstateras att det inte är troligt att urban vindkraft någonsin kommer att nå samma avkastning som storskalig vindkraft eftersom vindresurserna i urban miljö inte är lika förmånliga.

Å andra sidan är urban vindkraft fortfarande i sin utvecklingsfas. Detta innebär att kostnaderna kommer att minska och att effektiviteten kommer förbättras. Om förslagen på nettomätning och avveckling av kostnaden för hantering av

timvis mätning och dubbla abonnemang godkänns av riksdagen skulle detta ytterligare öka förutsättningarna för att urban vindkrafts lönsamhet.

Om inte tar hänsyn tas redan från början till val av plats, höjd, placering på taket, infästningar och ljudutbredning har det visat att vindkraftverken inte sällan blir helt felplacerade och knappt producerar någon energi eller låter för mycket och tvingas stängas av. Ska man satsa på urban vindkraft bör man se till att förhållanden är de rätta genom att göra en grundlig projektering, alltså göra rätt från början.

Nyckelord: Urban, småskalig, vindkraft, vindmodellering, HAWT, VAWT, UWT

## Abstract

For a successful project of urban wind power requires wind as well as attachments, sound level and the requirements and regulations should be taken under consideration. But a lot of experience is still lacking and many projects fail therefore. This report covers the aspects described above and a summary of experiences and knowledge gaps have been made with the aim of facilitating the planning phase.

Wind conditions in urban environment are complex and most wind modeling programs are designed for large-scale wind power. Since the wind is the factor which determines whether an investment in wind power is profitable or not it is important to try to predict. The method which we believe is most suitable for urban wind conditions is described in the chapter *Hanberäkningsmodell för vind och höjd över tak*. The method is approximate but gives a good starting point for the determination of wind and placement.

Even if a wind turbine has the perfect wind conditions and the ability to produce large amounts of energy it may not run if the sound level is too high. It is therefore important that the audio data is known and that it is reliable.

In the case of attachments, between the wind turbine and the structure, it is established that it is an important aspect to consider in order to prevent structure-borne sound, vibrations and to avoid damage in the building shell. However, there are no rules of thumb because the attachments must be designed specifically for each case as the conditions differ for different houses.

There are a variety of rules to be followed and requirements to be met in order for a wind turbine to be fitted. Therefore the contents of a building permit application, rules for connecting to the grid and guideline for the noise from wind turbines are brought into context. Requirements for shading, flicker and reflexes and technical requirements are also addressed.

Data on energy production from urban wind turbines are currently inadequate. Therefore it's not possible to draw any definitive conclusions about their effectiveness. However, it is unlikely that urban wind power ever will reach the same yield as large-scale wind power because the wind resources in urban environment aren't as favorable.

On the other hand, urban wind power is still in its development. This means that costs will be reduced and efficiency will improve. If the proposals on net metering and change of double subscription and the cost of the management of hourly measurement are approved by parliament, this would further enhance the prospects of the urban wind power to become more profitable.

If aspects such as choice of location, height and position on the roof, the attachment and acoustics are not considered from the beginning, it has been shown that wind turbines frequently becomes entirely misplaced and hardly produces any energy or causes too much disturbance and are forced to shut down. If you want to invest in urban wind power you should be certain that the conditions are right by making a thorough planning, in other words, make it right from the beginning.

Keywords: Urban, small scale, wind power, wind modeling, HAWT, VAWT, UWT

## Förord

När vi började skriva om urban vindkraft insåg vi direkt att intresset och engagemanget var stort. Trots att erfarenheterna är ringa har vi lyckats få kontakt men mycket kunniga och hjälpsamma personer. Alla vi har kontaktat under resas gång har varit villiga att ställa upp på intervjuer över telefon, via mail och på möten.

Vi vill tacka vår examinator Björn Karlsson, professor i solenergiteknik på LTH, Michael Sillén, miljökonsult, Johnny Kronvall, ISU Malmö och Jon Andersson, Energikontoret Skåne. De har alla tagit sig tid och fungerat som bollplank i början av arbetet. Fredrik Loodin, WSP Systems, och Mattias Gustavsson, Gävle Dala Energikontor, har bidragit med erfarenheter från de projekt som de har varit involverade i. Akustikern Johan Scheuer, WSP Akustik, har hjälpt oss med den ljudtekniska biten och Lennart Söder har förtydligat problematiken rörande anslutningen till elnätet.

Men framförallt så vill vi tack vår handledare Ola Trulsson, WSP Environmental, som har varit ovärderlig då han har gett oss värdefull respons och styrt oss i rätt riktning.

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Avgränsning</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 Metod</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Vind – allmänt</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Ytråhet</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 Turbulens</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3 Vindprofil</b> .....	<b>4</b>
<b>2.4 Nollplan</b> .....	<b>4</b>
<b>2.5 Vind i urban miljö</b> .....	<b>4</b>
<b>2.6 Vindfördelning</b> .....	<b>5</b>
<b>2.7 Beräkning av energi</b> .....	<b>6</b>
<b>2.8 Olika typer av vindkraftverk</b> .....	<b>7</b>
2.8.1 HAWT .....	8
2.8.2 VAWT.....	8
<b>3 Beräkningsmodeller för vind</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1 Vindmätningar</b> .....	<b>9</b>
3.1.1 Studier av monterade UWTs.....	10
3.1.1.1 Erfarenheter .....	10
<b>3.2 Vindmodelleringsprogram</b> .....	<b>10</b>
3.2.1 CFD .....	11
3.2.1.1 Erfarenheter .....	12
3.2.2 BREVe.....	13
3.2.2.1 Erfarenheter .....	13
<b>3.3 Handberäkningsmodell för vind</b> .....	<b>14</b>
3.3.1 Lokala vindhastigheter .....	14
3.3.2 Råhetsskiften .....	15
3.3.3 Råhetsklassning .....	15
3.3.4 Topografi.....	17
3.3.5 Beräkningsgång .....	17
<b>3.4 Handberäkningsmodell för höjd över tak</b> .....	<b>18</b>
<b>3.5 Handberäkningsmodell för vind och höjd över tak</b> .....	<b>18</b>
3.5.1 Beräkning av vind i urban miljö .....	18
3.5.2 Byggnadsutformningens påverkan på vinden .....	20
3.5.3 Placeringens inverkan på vinden.....	22
3.5.4 Erfarenheter .....	22
<b>3.6 Vindtunneltester</b> .....	<b>24</b>
3.6.1 Erfarenheter .....	24
3.6.1.1 Hus med 50° taklutning i fri terräng .....	25



3.6.1.2	Hus med 25° taklutning i fri terräng .....	25
3.6.1.3	Omgivande byggnaders inverkan på vindhastigheten .....	26
3.6.1.4	Parametrar till Weibullfördelning .....	26
3.6.1.5	Turbulens .....	27
3.6.1.6	Slutsatser .....	27
<b>3.7</b>	<b>Sammanfattning av beräkningsmodellerna .....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Infästning .....</b>	<b>29</b>
4.1	Avsaknad av riktlinjer .....	29
4.2	Erfarenheter .....	29
<b>5</b>	<b>Akustik .....</b>	<b>31</b>
5.1	Maskering .....	31
5.2	Ljudutbredning .....	32
5.3	Ljudmätning .....	33
5.4	Åtgärder .....	33
5.5	Erfarenheter .....	33
<b>6</b>	<b>Krav .....</b>	<b>35</b>
6.1	Bygglov .....	35
6.1.1	Innehåll i en bygglovsansökan .....	35
6.2	Anslutning till elnätet .....	36
6.2.1	Tekniska krav för anslutning .....	37
6.2.2	Anslutning inom den egna elinstallationen .....	37
6.2.3	Försäljning av el .....	37
6.3	Buller från vindkraftverk .....	38
6.4	Skuggning, stroboskopseffekten och reflexer .....	38
6.5	Tekniska krav på vindkraftverk .....	40
<b>7</b>	<b>Marknaden för urban vindkraft .....</b>	<b>41</b>
7.1	Framtida bestämmelser .....	41
7.2	Otillförlitlig information .....	43
7.2.1	Erfarenheter .....	44
7.3	Bristande erfarenhet .....	44
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>45</b>
8.1	Vindkartering .....	45
8.2	Framtidsutsikter .....	45
<b>9</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>47</b>
9.1	Tumregler om vind .....	47
9.2	Infästningar .....	47
9.3	Akustik .....	48
9.4	Marknaden .....	48
<b>10</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>49</b>
10.1	Artiklar .....	49

<b>10.2 Böcker</b> .....	<b>55</b>
<b>10.3 Mailkontakt</b> .....	<b>56</b>
<b>10.4 Intervjuer</b> .....	<b>56</b>
<b>11 Bilagor</b> .....	<b>57</b>
<b>11.1 Beräkningsschema</b> .....	<b>57</b>
<b>11.2 Exempel på infästning</b> .....	<b>58</b>
11.2.1 Planritning .....	58
11.2.2 Sektionsritning .....	58
<b>11.3 Beräkningsexempel</b> .....	<b>59</b>
11.3.1.1 Nollplansförskjutning.....	59
11.3.1.2 Byggnadsutformningens påverkan på vinden.....	59
11.3.1.3 Beräkning av vind- och energiresurs.....	62

# 1 Inledning

Marknaden för vindkraft ser för närvarande ljus ut. Riksdagen har föreslagit att vindkraftproducerad el ska öka från nuvarande 1,4 TWh till 10 TWh år 2015 och regeringen jobbar för att handläggningen av storskalig vindkraft ska förenklas och gå snabbare. Samtidigt medverkar större miljömedvetenhet hos människor till att marknaden för småskalig vindkraft utvecklas. Då större delen av Sveriges befolkning idag bor i städer eller tätbebyggda områden, utan möjlighet att montera fristående vindkraftverk i sin närhet, är takmonterade vindkraftverk i urban miljö av stort intresse.

Urban vindkraft är en viktig marknad eftersom den gör det möjligt för städer att producera förnyelsebar energi. Men eftersom marknaden bara är i sin utvecklingsfas är erfarenheter från tidigare projekt begränsad vilket gör att kunskaperna är knapphändiga. Hur vinden påverkas av stadsmiljö och vilka effekter ett vindkraftverk monterat på tak kommer att ha är helt nya frågor att ta hänsyn till. Därför är det mycket relevant att göra en sammanställning av kunskapsläget idag och de aspekter som bör tänkas på vid projektering av urban vindkraft. Det är även viktigt att belysa de kunskapsluckor som finns och vilka faktorer som kan förbättra förutsättningarna för urban vindkraft.

## 1.1 Bakgrund

Vinden har fungerat som en energikälla för människor i tusentals år. Då användes vindkraften för att driva båtar, kvarnar, pumpar och andra mekaniska arbeten. Det var så sent som för cirka 30 år sedan som vindkraften utvecklades och började användas för kommersiell produktion av el.<sup>1</sup> En gynnsam omständighet hos vinden är att det blåser mer på vintern när energin behövs som mest.<sup>2</sup>

Vindkraft är en energiproduktionskälla med globala fördelar men däremot med lokala nackdelar eftersom vindkraftverken både hörs och syns. Utveckling går dessutom mot allt större vindkraftverk då dessa är effektivare. Idag finns vindkraftverk på 6 MW i drift men verk upp mot 20 MW kan bli verklighet i framtiden.<sup>3</sup>

En annan marknad som också har vuxit kraftigt de senaste åren är småskalig vindkraft med urban vindkraft som det senaste utvecklingsområdet. Något som motiverar många att investera i småskalig vindkraft är att de redan idag bestämmer vilket elpris de kommer att ha 15-20 år framåt. Många som i dagsläget installerar småskalig vindkraft gör det inte enbart av ekonomiska

---

<sup>1</sup> Naturvårdsverket (2007)

<sup>2</sup> Vindkompaniet (2008)

<sup>3</sup> Naturvårdsverket (2007)

drivkrafter utan värdesätter att generera sin egen el och att den kommer från en förnybar energikälla.<sup>4</sup>

Eftersom marknad för urban vindkraft är i sin utvecklingsfas är erfarenheterna få vilket försvårar projekteringsfasen. Vinden är den faktor som är avgörande för om en investering i vindkraft blir lönsam eller inte men det är svårt att uppskatta vinden i urban miljö eftersom den uppför sig mer komplext jämfört med i öppet landskap.<sup>5</sup>

## 1.2 Syfte

Syftet är att göra en sammanställning av den erfarenhet och kunskap som finns samt de krav som ställs på urban vindkraft. Rapporten belyser även de kunskapsluckor som finns idag. Detta är viktigt eftersom de studier som finns på området är spridda. En sammanställning kan därför användas som ett verktyg och underlätta i projekteringsfasen.

## 1.3 Avgränsning

Urban vindkraft syftar här till takmonterad småskalig vindkraft och begränsas till vinkraftverk med en effekt mellan 1 till 20 kW. Den största delen av arbetet kan dock användas även för vindkraftverk monterade på marken. Byggnadsintegrerad vindkraft behandlas däremot inte.

Aspekter som kan påverka den urbana vindkraftens lönsamhet diskuteras men ingen utvärdering görs. Inte heller utvärderas kvaliteten eller lönsamheten hos olika tillverkares modeller.

## 1.4 Metod

Arbetet grundar sig på en litteraturstudie som gjorts över ämnet urban vindkraft. Detta har bland annat inneburit att sammanställa de rapporter som finns från olika, främst brittiska, undersökningar. Då ämnet är relativt utforskat och underlaget därför begränsat har mycket information även inhämtats via mail- och telefonkontakt med personer som har kunskap och erfarenheter inom respektive område.

---

<sup>4</sup> Siroccoenergy

<sup>5</sup> Santamouris M. (2006) s. 100

## 2 Vind – allmänt

Vindkartering innebär vindhastighetsberäkning och kartläggning av vindförhållanden på en plats. För att göra detta måste hänsyn tas till ett antal olika faktorer som påverkar vinden. Vindförhållandena i urban miljö, vilket innebär typiskt stadsmiljö, är dessutom mer komplexa än i öppet landskap. Det är först efter att en vindkartering har utförts som en uppskattning av ett vindkraftverks energiproduktion kan göras.

### 2.1 Ytråhet

Vindens hastighet påverkas av terrängens karaktär, ju större friktionen mot terrängen är desto mer bromsas vinden. Det är jordytans skrovlighet som bestämmer hur mycket vinden bromsas av marken. Det skikt som bildas över ojämnheter i terräng kallas ytråhet. Över gräs har detta lagret en tjocklek på bara ett par centimeter medan det över skog kan sträcka sig upp till någon meter. Därför delas ytråhet in i olika råhetsklasser enligt *tabell 1*.<sup>6</sup>

Råhets klass	Karaktär	Terräng	Läggivare	Gårdar	Tätorter	Skog
0	Hav, sjöar, fjordar	Öppet vatten	-	-	-	-
1	Öppet landskap, med lite vegetation och bebyggelse	Platt till jämnt kuperat	Endast låg småvegetation	0-3 gårdar per km <sup>2</sup>	-	-
2	Landsbygd med en blandning av öppna ytor, vegetation och bebyggelse	Platt till starkt kuperat	Skogsdungar, alléer är vanliga	upp till 10 gårdar per km <sup>2</sup>	Byar och små tätorter förekommer	-
3	Mindre tätorter eller landsbygd med många gårdar, dungar och läggivande hinder	Platt till starkt kuperat	Många dungar, vegetation och alléer/trädridåer	Många gårdar, >10 per km <sup>2</sup>	Många byar, små tätorter eller förstäder	Låg skog
4	Större städer eller hög tät skog.	Platt till starkt kuperat	-	-	Större städer	Hög tät skog

Tabell 1, Råhetsklasser för olika terrängtyper, Wizelius T. (2007)

### 2.2 Turbulens

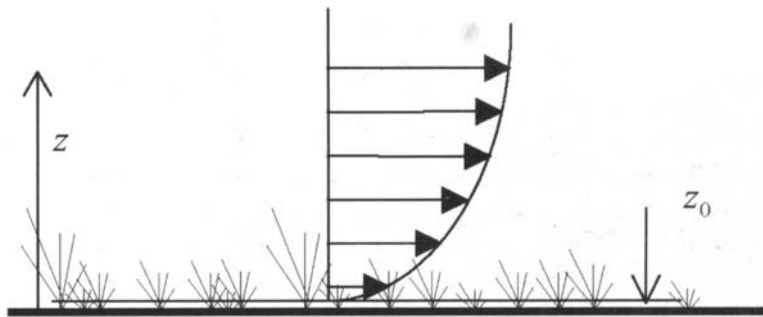
När vinden stöter på hinder, så som terrängens ytråhet, bromsas den upp och luftvirvlar uppstår. Dessa virvlar visar sig som korta variationer i vindhastigheten vid vindmätningar och kallas för turbulens. Vinden som däremot är ostörd vilket innebär att den inte påverkas av markens friktion och att den är i balans med jordens rotation och lufttryck kallas för geostrofisk vind. Om ytråhet blir grövre och därför även friktion mot marken ökar sprider sig den turbulenta luften uppåt allt eftersom vinden rör sig in över området med den högre ytråheten och avståndet till den geostrofiska vinden blir allt större. Gränsen mellan den geostrofiska vinden och den störda vinden kallas gränsskikt.<sup>7</sup> Hädanefter definieras ostörd vind som vind som inte påverkas av hinder.

<sup>6</sup> Wizelius T. (2007) s. 61, 322

<sup>7</sup> Wizelius T. (2007) s. 56-61

## 2.3 Vindprofil

En vindprofil visar hur vindens hastighet ökar med höjden över marken, se *figur 1*.<sup>8</sup> Vindprofilens form beror på jordytans ytråhet. Vindprofilen över skog, som har hög ytråhet, är därför flackare än vindprofilen över vatten. Detta innebär att vindhastigheten över en skrovlig yta ökar betydligt snabbare med höjden men den blir inte lika hög som vindhastigheten över en slät yta förrän på 100-1000 meters höjd.<sup>9</sup>



**Figur 1**, Vindprofil i rural miljö,  $z$  är höjd över marken och  $z_0$  är ytråheten, Mertens S. (2006)

## 2.4 Nollplan

Den nivå där vindhastigheten sägs vara noll kallas nollplan och anger höjden ovan den höjd som vinden upplever som marknivån.<sup>10</sup> I rural miljö, det vill säga i öppet landskap, är denna nivå lika med marken.<sup>11</sup> I övrig terräng måste nollplanet förskjutas för att ta hänsyn till höjden av vegetation och bebyggelse.<sup>12</sup>

## 2.5 Vind i urban miljö

I urban miljö är ytråheten grövre därför att det finns fler skymmande objekt som byggnader och träd än i rural miljö vilket innebär att nollplansförskjutningen måste korrigeras.<sup>13</sup> Faktorer så som byggnadernas utformning och mellanrummet mellan hinder påverkar graden av turbulens och ger ett svårbestämt vindförhållande.<sup>14</sup>

När vinden passerar en förändring i ytråhet förändras flödet och vindhastigheten anpassas till friktionen hos den underliggande terrängen. Ett exempel på detta är när vinden från ett ruralt område blåser in över ett urbant område. Ju längre in i staden vinden kommer desto högre upp bromsas vinden in och blir mer turbulent. Detta resulterar i ett nytt gränsskikt, det interna gränslagret, se illustration i *figur 2* nedan.<sup>15</sup>

<sup>8</sup> Mertens S. (2006) s.18

<sup>9</sup> Wizelius T. (2007) s. 59

<sup>10</sup> Energimyndigheten (2008) 2

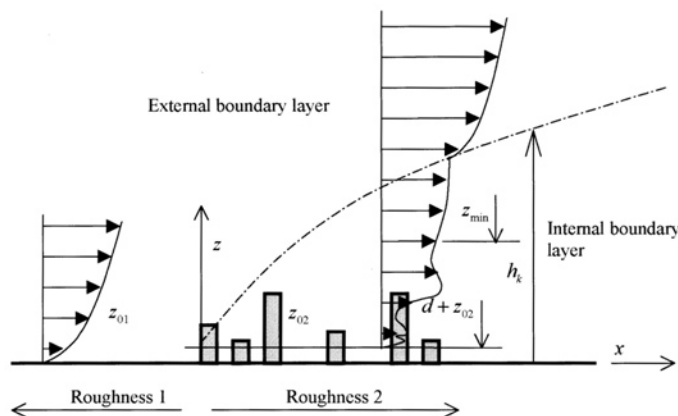
<sup>11</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008), s.100

<sup>12</sup> Bergström, H. (2007)

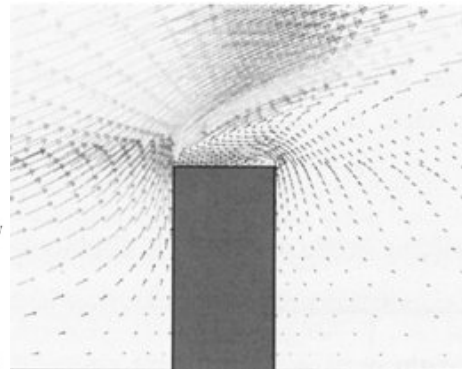
<sup>13</sup> Mertens S. (2006) s. 19

<sup>14</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>15</sup> Wizelius T. (2007) s. 60



**Figur 3** Vindförhållande i stadsmiljö som visar alla ingående parametrar.  $z$  är höjd över markplan,  $d$  är nollplansförskjutningen,  $z_{02}$  är ytråheten för staden,  $z_{01}$  är ytråheten för ruralt område,  $h_k$  är höjden på det interna gränslagret och  $z_{min}$  är minimihöjden  
Mertens S. (2006)



**Figur 2** Turbulensområdet enligt CFD-beräkningar för vind över ett platt tak.  
Mertens S. (2006)

För att bestämma turbinens minsta höjd över taket bör även byggnadens inverkan på vindhastigheten beaktas. Flödet över taket kommer dels att bestå av ett område med turbulent och inbromsad vind och dels ett område med ett accelererat luftflöde, se *figur 3*. Därför måste turbinens navhöjd anpassas beroende på var på taket turbinen placeras för att den ska arbeta i de bästa vindförhållanden och i den dominerande vindriktningen.<sup>16</sup> Figuren visar även att takets utformning orsakar en ändring av vindens vinkel mot horisontalplanet. Detta innebär att vinden som träffar ett vindkraftverk placerat på ett tak inte är parallell med horisontalplanet utan träffar vindkraftverket med en skev vinkel.<sup>17</sup>

## 2.6 Vindfördelning

Vindfördelningen på en plats visar den mängd timmar som vind blåser inom olika hastighetsintervall under ett år.<sup>18</sup> Vindmätningar har visat att stormvindar är sällsynta i de flesta städer medan medel till friska vindar är mycket vanliga. Vindens fördelning antas vara sannolikhetsfördelad enligt en Weibullfördelning som beskrivs av de tre parametrarna  $k$ ,  $A$  och  $c$ .  $K$ -värdet är formfaktorn som bestämmer utbredning av fördelningen, ju högre  $k$ -värde desto spetsigare blir fördelningen.  $A$  är skalfaktorn som bestäms av  $c$ -värdet multiplicerat med medelvindhastigheten. Ett högt  $A$ -värde ger därför en hög medelvindhastighet.<sup>19</sup>  $K$ -värdet varierar mellan olika platser men om  $k$ -värdet,  $c$ -värdet och medelvindhastigheten är kända kan en uppskattning av vindfördelningen på platsen göras.<sup>20</sup> Vanligtvis används  $k$ -värdet 2,0 för Sverige.<sup>21</sup>

<sup>16</sup> Mertens S. (2006) s.33

<sup>17</sup> Mertens S. (2006) s. 72

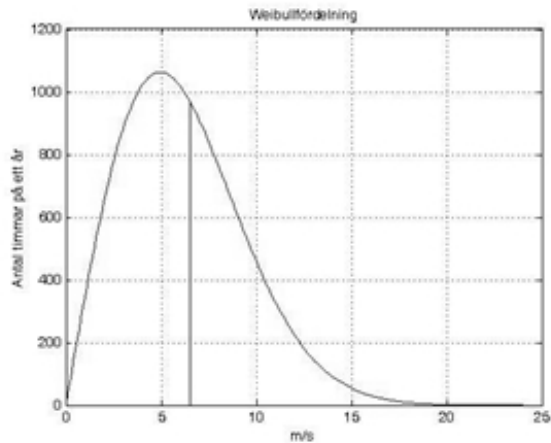
<sup>18</sup> Mertens S. (2006) s. 3, 6

<sup>19</sup> Vindmølleindustrier (2006)

<sup>20</sup> Bergström, H. (2007)

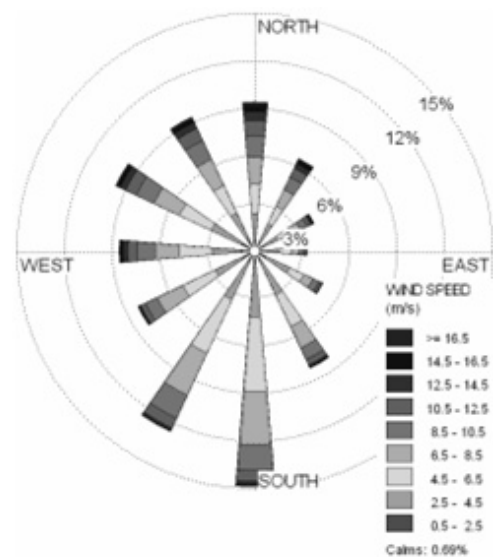
<sup>21</sup> SV Energi AV (2008)

Weibullfördelningen som visas i *figur 4* har i detta fall en genomsnittlig vindhastighet på 7 m/s och k-värdet 2. Det svarta strecket visar att medianvindhastigheten är 6,6 m/s vilket innebär att 6,6 m/s är den vindhastighet som överskrids lika ofta som den underskrids. Grafen visar även att vindhastighetsfördelningen inte är symmetrisk eftersom de mycket höga vindhastigheterna är sällsynta. 5,0 m/s är den mest frekventa vindhastigheten vilket kan avläsas vid grafens topp.



**Figur 4,** Weibullfördelning med medelvind 7 m/s och k-värdet 2.

Ett annat sätt att illustrera vindens hastighetsfördelning är med hjälp av en vindros. Den illustrerar frekvenserna av olika hastigheter, på 10 meters höjd, som staplar i varje väderstreck,<sup>22</sup> Exemplet i *figur 5* visar, förutom lugn vind på 0-0,4 m/s, vindfördelningen på 12 vindriktningar och för 9 vindhastighetsklasser. Ringar för 3, 6, 9, 12, 15 % av tiden är utritade.<sup>23</sup>



**Figur 5,** Vindros SMHI (2007)

I urbana miljöer är den vind som är tillgänglig på specifika platser beroende av vindriktning eftersom närliggande hinder kan skärma av vinden från turbinen. För att maximera vindturbinens produktion är det förnuftigt att låta turbinen exponeras bra för den övervägande vindriktningen, vilket tydligt kan avläsas i vindrosen.<sup>24</sup>

## 2.7 Beräkning av energi

Energien i vinden varierar med kuben av vindhastigheten enligt *ekvation 1*.<sup>25</sup> Det vill säga att en halvering av vindhastigheten minskar energin i vinden med åtta gånger. Därför är det av yttersta vikt att vindförhållanden är de rätta på platsen där vindkraftverket placeras. Ett felplacerat vindkraftverk kan i värsta fall vara helt oproduktivt.<sup>26</sup>

<sup>22</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>23</sup> SMHI (2007)

<sup>24</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

<sup>25</sup> Mertens S. (2006) s. 3, 6

<sup>26</sup> Blackmore, Paul (2009)



$$P = 0,59 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A \quad (1)$$

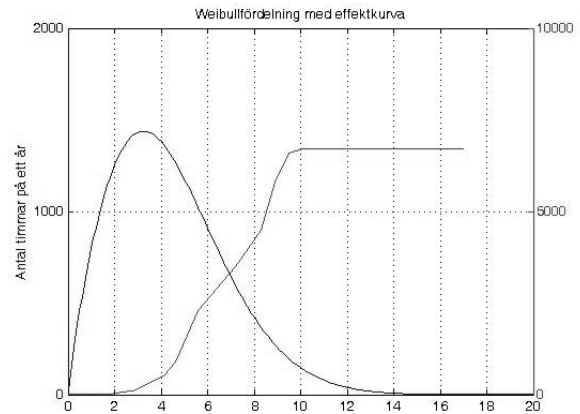
0,59 = maximal effektkoefficient

$\rho$  = luftens densitet = 1,225 (kg/m<sup>3</sup>)

$u$  = medelvindhastighet (m/s)

$A$  = beblåst tvärsnittsarea (m<sup>2</sup>)

En effektkurva visar den effekt som vindkraftverket, enligt tillverkaren, ska generera vid motsvarande vindhastighet.<sup>27</sup> Effektkurvametoden är en av flera metoder som kan användas för att bestämma det möjliga energiuttaget på en plats. Genom att jämföra vindkraftverkets effektkurva med platsens förutspådda vindhastighetsfördelning kan den energin som vindkraftverket förväntas producera beräknas, se figur 6.<sup>28</sup>



Figur 6. Effektkurvametoden, effektkurva kombinerat med Weibullfördelning för att beräkna årlig energiproduktion.

Eftersom det summerade medelvärdet av kuben av olika vindhastigheter alltid är större än kuben av medelvindhastigheten kan två platser med samma medelvindhastighet ge olika årsproduktion av energi. Därför är det viktigt att vid utvärdering av vindresursen på en speciell plats inte bara tittar på medelvindhastigheten utan också gör en analys av vindenergi över ett år. Olika vindhastighetsfördelningar passar olika turbiner eftersom de har olika start- och stopphastigheter.<sup>29</sup>

## 2.8 Olika typer av vindkraftverk

I detta arbete syftar urban vindkraft på vindkraftverk som är utvecklade särskilt för bebyggd miljö eftersom de kan placeras på byggnader och på marken bredvid byggnader. Dessa vindkraftverk har ofta en effekt på mellan 1 till 20 kW. I fortsättningen kan dessa vindkraftverk även refereras till som UWT vilket står för Urban Wind Turbine. Vindkraftverk roterar antingen runt en horisontell eller en vertikal axel. Dessa kan i sin tur delas in i en uppsjö olika modeller. På hemsidan [www.allsmallwindturbines.com](http://www.allsmallwindturbines.com) finns en sammanställning av ett flertal olika modeller och fabrikat.

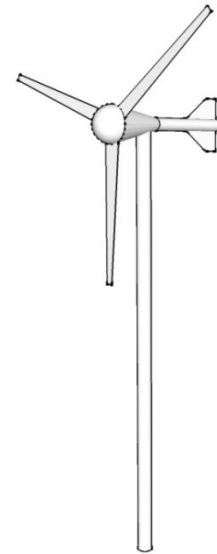
<sup>27</sup> Encraft (2009)

<sup>28</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

<sup>29</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

### 2.8.1 HAWT

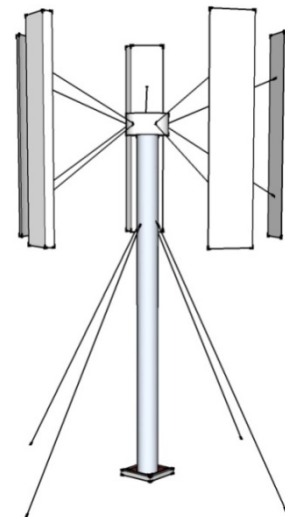
Begreppet HAWT står för Horizontal Axis Wind Turbine vilket innebär att det roterar runt en horisontell axel. Denna typ är lik de gamla väderkvarnarna med en propeller vinkelrätt mot vinden, se *figur 7*. Generatoren i denna typ av vindkraftverk är placerad i vindkraftverkets nav. Dagens vindkraftverk, med två eller tre blad, som används för att producera el kallas för snabblöpare och har ofta ett löptal kring 10 vilket innebär att vingspetsen har en hastighet som är 10 gånger högre än vindens.<sup>30</sup> Nackdelen med ett vindkraftverk av denna typ är att de måste ställa in sig med propellern vinkelrät mot vindriktningen för att utnyttja vinden som bäst. Detta gör att de hela tiden måste ställa in sig efter förändringar i vindriktningar. I urban miljö ändras vindriktningen ofta på grund av turbulens vilket gör att ett HAWT inte kommer att arbeta i optimalt flöde i urban miljö.<sup>31</sup>



Figur 7, HAWT

### 2.8.2 VAWT

VAWT står för Vertical Axis Wind Turbine vilket innebär att de roterar runt en vertikal axel, se exemplet i *figur 8*. Jämfört med ett HAWT är denna typ av vindkraftverk teoretiskt mindre effektiv. En fördel är att generator och eventuell växellåda kan placeras längst ner i tornet vilket underlättar service och underhåll.<sup>32</sup> En annan fördel med ett VAWT är att det inte behöver ställa in sig efter vindens riktning utan arbetar lika bra oavsett vindriktning, vilket kan göra det mer passande för urban miljö. Ett VAWT roterar långsammare med ett löptal kring 2-4.<sup>33</sup> Eftersom uppkomsten av ljud till stor del beror på löptalet alstrar det teoretiskt sett inte heller lika mycket ljud som ett HAWT.<sup>34</sup>



Figur 8, VAWT

<sup>30</sup> Wizelius T. (2007) s.88, 96

<sup>31</sup> Mertens S. (2006) s. 11

<sup>32</sup> Wizelius T. (2007) s. 101

<sup>33</sup> Mertens S. (2006) s. 11-12

<sup>34</sup> Bennie, Mols (2005)

## 3 Beräkningsmodeller för vind

De metoder som finns för att beskriva vind tar olika hänsyn till de faktorer som påverkar vinden i urban miljö. En del är inte alls anpassade till urban miljö medan andra har korrigerats för att bättre kunna appliceras i urbana förhållanden. I detta kapitel presenteras ett antal metoder och erfarenheter från projekt då de använts. Dessutom beskrivs en matematisk beräkningsmetod som är specifikt framtagen för vinduppskattning i urban miljö.

### 3.1 Vindmätningar

Vid första anblick kan direkta mätningar bedömas vara säkrare vid bestämning av vindresurserna än beräkningar med modeller eftersom dessa är förenade med viss osäkerhet.<sup>35</sup> En faktor som däremot kan påverka mätningarna är hur mätaren reagerar på byig vind. Även om den reagerar snabbt på en ökande vind kan den reagera långsammare på avtagande vind med en överskattat medelvindhastighet som följd. Korsskålsanemometern som är det vanligaste instrument har dock skålkors som ska avhjälpa detta.<sup>36</sup>

Trots att korsskålsanemometrar har en robust design är de känsliga instrument som ska hanteras varsamt eftersom bara en mindre skada kan innebära felaktiga mätningar. Även nedisning och fastfrysning av anemometrar kan vara ett stort problem och därför rekommenderas att instrumentet är uppvärmt.<sup>37</sup>

Ultraljudsanemometern, vilken mäter vinden genom att mäta tiden det tar för en akustisk puls att skickas mellan två omvandlare, har den fördelen att den inte har några rörliga delar vilket innebär att inget mekaniskt slitage finns. Ytterligare ett mätinstrument är propelleranemometern som kan kombinera vindhastighet och vindriktning.<sup>38</sup>

Något som ytterligare påverkar osäkerheten hos mätningar är det faktum att de ofta bara görs under en begränsad tid och därför måste normalårs-korrigeras. Det görs genom att utnyttja en närliggande väderstation där vinden har mätts under en lång period. Genom att jämföra vinden vid väderstationen med vinden vid vindkraftverket kan beräkningar göras på ungefär hur mycket vinden skulle ha varierat flera år tillbaka.<sup>39</sup> Med en begränsad tid menas dock att mätningar bör utföras under minst ett år för att de ska kunna gälla som ett årsmedelvärde.<sup>40</sup> Det tar därför längre tid än att utföra mätningar jämfört med uppskattningar i vindmodelleringsprogram. Det är dessutom dyrt att utföra vindmätningar i proportion till vad det kostar att uppföra ett urbant vindkraftverk.<sup>41</sup>

---

<sup>35</sup> Bergström Hans (2008)

<sup>36</sup> Bergström Hans (2008)

<sup>37</sup> Bergström Hans (2008)

<sup>38</sup> Anemometer – Sonic Anemometer (2009)

<sup>39</sup> Wern, Lennart, (2009) 2

<sup>40</sup> Bergivik Skog AB

<sup>41</sup> Gustafsson, Mattias, (2009) 2

### 3.1.1 Studier av monterade UWTs

I projektet *Warwick Wind Trials* i England var syftet att undersöka resultatet av urbana vindkraftverk monterade på olika byggnader. Detta för att se om några mönster kunde hittas som skulle vara en hjälpsfull guide för potentiella köpare. Rapporten är baserad på mätningar från 25 vindkraftverk placerad på olika höjd i urban omgivning. I projektet användes vinddata från NOABL-databasen. Detta är en databas som ger uppskattad årlig medelvindhastighet över hela Storbritannien i 1-kilometersrutnät på 10, 25 och 40 meters höjd. Dessa data är emellertid resultatet av en luftflödesmodell som uppskattar effekten av den grova topografin på vindhastigheten. Den tar inte hänsyn till effekten av den underliggande ytans ojämnheter orsakad av byggnader i en urban miljö eller de lokala effekterna runt enskilda byggnader. Detta innebär att uppskattningar baserade på dessa data tenderar att ge väldigt optimistiska resultat i urban miljö.<sup>42</sup>

#### 3.1.1.1 Erfarenheter

De uppmätta vindhastigheterna var på alla platser lägre än den som NOABL förutspått, på 16 av platserna var de mer än 40 % lägre. Därför gjordes egna skalfaktorer för att bättre kunna förutspå vinden i urban miljö. Det visade sig att om dessa skalfaktorer användes på NOABL's vinddata förbättrades alla de förutspådda vindhastigheterna så att de låg inom 20 % avvikelse. 15 av platserna låg inom 10 % avvikelse. En slutsats från projektet var att det krävs en tillförlitlig metod för att förutse medelvindar i urban miljö, men att skalfaktorer har potential att förbättra de förutspådda vindhastigheterna även om mer arbete kan göras på detta område.<sup>43</sup>

Med hjälp av de uppmätta vindhastigheterna kunde Weibullfördelningar för de olika platserna i projektet utformas. Därefter kunde k-, A- och c-värden sammanställas. Det visade sig att de observerade vindhastigheterna på de flesta platser passade in på en Weibullfördelning med ett k-värde mindre än 2. På 18 av platserna låg det på mindre än 1,6. Medelvärde av c-värdet för alla platser låg kring 1,10. Det poängteras i slutsatserna att mer arbete borde göras för att undersöka lämpligt val av formfaktorer i Weibullfördelningen för att vindhastighetsfördelningen i urban miljö lättare ska kunna förutses.<sup>44</sup>

## 3.2 Vindmodelleringsprogram

Vindmodelleringsprogram är datorprogram som genom ett flertal olika beräkningsmodeller förutser vindklimat, vindresurs och eventuellt energiproduktion från vindkraftverk. Årsmedelvindhastigheten i vindmodelleringsprogram fås approximativt med hjälp av kunskap om bland annat platsens topografi och ytråhet samt vindstatistik från andra mätstationer.<sup>45</sup>

---

<sup>42</sup> Encraft (2009)

<sup>43</sup> Encraft (2009)

<sup>44</sup> Encraft (2009)

<sup>45</sup> Wern, Lennart, (2009) 1

Modellering ger bättre geografiskt täckning än mätningar och om tillräckligt avancerade modeller används kan upplösningen bli detaljerad. Dessa modeller är dock komplexa att använda och tidskrävande. Enklare modeller ger snabbare men inte lika noggranna resultat och dessutom krävs då vindmätningar. Risken finns även att modeller inte helt kan ta hänsyn till terrängens inverkan på vinden.<sup>46</sup>

### 3.2.1 CFD

CFD står för Computational Fluid Dynamics och är en generell benämning på olika typer av numeriska modeller som löser flödesdynamiska problem där enklare modeller inte kan förväntas ge tillfredsställande resultat. De globala vädermodellerna är en typ av CFD-modell, men ofta används CFD till att beräkna strömningen runt en bil eller ett flygplan. I meteorologiska sammanhang utnyttjas beräkningsmodellen när det görs detaljerade beräkningar av t.ex. gatuplanet i en stad eller mellan husen i ett bostadsområde.<sup>47</sup> Då byggs hus, topografi och vegetation upp i detalj i datorn och simulerar ner till mindre än en meters upplösning.<sup>48</sup>

Ett exempel på en CFD-modell är MIUU-modellen.<sup>49</sup> MIUU är en avancerad mesoskalemodell som tagits fram av Meteorologiska Institutet på Uppsala Universitet.<sup>50</sup> Mesoklimat beskriver vindförhållandet i ett land eller region, till skillnad från mikroklimat som gäller för en plats.<sup>51</sup> MIUU-modellen är en vindkartering över hela Sverige i vilka medelvindhastigheten kan avläsas med en upplösning på 1 km<sup>2</sup>. Vindkarteringar har gjorts för höjderna 49, 72 och 103 meter.<sup>52</sup>

Idag genomförs laserscanning i flera kommuner för att få fram 3D-modeller över städer.<sup>53</sup> Dessa skulle kunna användas i en CFD-modell för att hitta de mest lämpliga platserna för UWTs.<sup>54</sup> CFD-modeller är dock mycket beräkningsintensiva och kan endast göras för mindre områden.<sup>55</sup>

---

<sup>46</sup> Bergström H. (2007) 1

<sup>47</sup> Bergström H. (2008)

<sup>48</sup> Wern, Lennart, (2009) 2

<sup>49</sup> Bergström H. (2007) 1

<sup>50</sup> Bergström, H. (2007) 2

<sup>51</sup> Markovic S., Osbeck F. (2008)

<sup>52</sup> Energimyndigheten (2008) 2

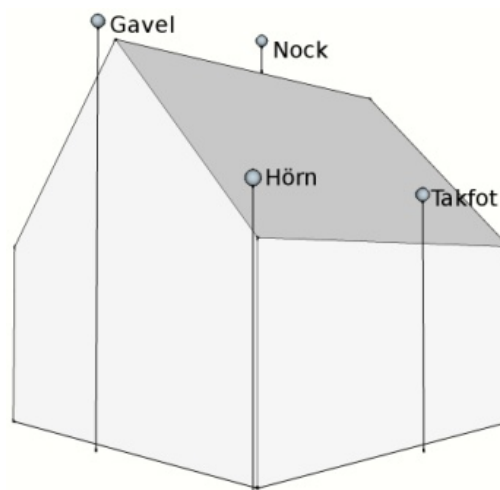
<sup>53</sup> Sveriges Kommuner och Landsting (2008)

<sup>54</sup> Dutton A G, Halliday J A, Blanch M J (2005)

<sup>55</sup> Larsson, Karin. (2009)

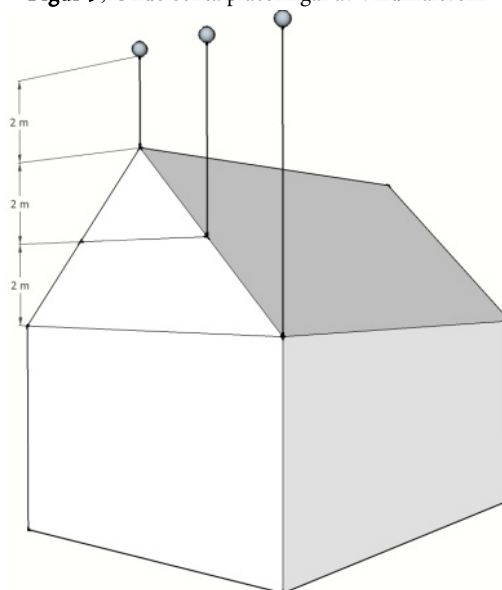
### 3.2.1.1 Erfarenheter

I ett försök som beskrivs i *Small scale Wind Energy Technical Report*, har studier gjorda med CFD, undersökt vindförhållanden vid fristående byggnader och byggnader i urban miljö. I försöket gjordes tester för fyra lämpliga monteringspunkter för vindkraftverket på taket, se *figur 9*. Resultatet presenterades som förhållandet mellan vinden vid de olika punkterna och vind på tio meters höjd utan byggnadens inverkan.<sup>56</sup>



Figur 9, Undersökta placeringar av vindkraftverk

För en byggnad i urban miljö visar testet att vinden bromsas upp mer på grund av taket jämfört med en byggnad i rural miljö. Testet visar även tydliga skillnader mellan de olika positionerna och vindriktningarna. För en turbin monterad lägre eller lika med den totala byggnadshöjden på tio meter är positionen på hörnet att föredra. Här är vindhastigheten 50-60 % av den ursprungliga vindhastighet som inte påverkats av byggnader. På 13 meters höjd är platsen framför huset, takfoten i *figur 9*, den som ger bäst vindförhållanden med samma vindhastighet som ursprungshastigheten. Placeringarna vid nocken och gaveln är endast lämplig då vindkraftverket placeras på 13 meters höjd, det vill säga tre meter över nocken, då vindhastigheten är 90 % av den ursprungliga.<sup>57</sup>



Figur 10, Minsta rekommenderad höjd över taket för vindkraftverk

I ett annat test som presenteras i samma rapport dras slutsatsen att turbiner monterade på hus med lutande tak ska placeras över nocken med en höjd som motsvarar åtminstone halva höjden av skillnaden mellan nock och takfot, se *figur 10*.<sup>58</sup>

<sup>56</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008), s. 59

<sup>57</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008), s. 59

<sup>58</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008), s. 103

Ytterligare tumregler som nämns är att en vindturbin bör placeras över medelhöjden av hinder kring turbinen. Turbinen ska antingen placeras längre bort än 3-10 gånger hinderhöjden eller, om närmare, 1-1,5 gånger högre än hinderhöjden. Om turbinen inte kan placeras enligt dessa kriterier är det viktigt att se till att siktlinjen i den dominerande vindriktningen är fri.<sup>59</sup>

### 3.2.2 BREVe

BREVe är ett brittiskt vindmodelleringsprogram som tar hänsyn till ytråhet, geografisk position, avstånd till kusten, topografi samt kännedom om typiska storlekar på bebyggelsen. I artikeln *Micro-wind turbines in urban environments: an assessment* beskrivs en metod för att beräkna vindresurserna i en stad genom att med hjälp av referensplatser i och kring staden skapa skalfaktorer med hjälp av detta vindmodelleringsprogram. Skalfaktorerna är beräknade så att de ska kunna appliceras på meteorologisk data från mätstationer på 10 meters höjd i närheten av staden. Beräkningarna i artikeln görs för tre olika typer av städer; den lilla staden Wick, Portsmouth som ska representera en medelstor kuststad med förorter och Manchester som är en storstad i inlandet.<sup>60</sup>

Vindhastigheten på referensplatserna och vid väderstationen skattades med BREVe för varje 30°-riktning. Genom att beräkna förhållandet mellan varje referenspunkt och väderstationen kunde en skalfaktor fås. Skalfaktorerna användes i sin tur för att reducera de uppmätta vindhastigheterna vid väderstationen så att dessa kunde räknas om och på så sätt gälla som vindhastigheter vid referenspunkterna. Därefter summerades vindhastigheterna för varje vindriktning för att få en gemensam medelvindhastighet. På samma sätt gjordes en skalfaktor för vindenergin vid referensplatserna genom att beräkna det kubiska förhållandet av vindhastigheterna.<sup>61</sup>

#### 3.2.2.1 Erfarenheter

Resultatet av undersökningen visar att vindförhållandena i större städer som Manchester är dåliga och möjligheten till att få ut någon stor mängd energi liten. Däremot kan en stad som Wick med goda vindresurser ge ett förmodat energiuttag som är 20 gånger så stort som i Manchester. För varje plats som undersöktes var vindhastigheterna i städernas centrum ungefär 40 % lägre än väderstationerna. Manchesters centrum hade den lägsta vindresursen. De andra städerna visade sig ha en hög variation av årlig vindresurs vid de olika referenspunkterna vilket främst beror på vilken ytråhet som den övervägande vinden utsätts för i de olika vindriktningarna. För de platserna i städerna som exponerats mest för de övervägande vindarna var vindresurserna minst lika höga som resurserna vid väderstationerna.<sup>62</sup>

<sup>59</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008) s. 103

<sup>60</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

<sup>61</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

<sup>62</sup> Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007)

### 3.3 Handberäkningsmodell för vind

M. Glaumann och U. Westerberg har utvecklat en metod som uppskattar vindförhållandena i en stad med syftet att skapa lä. I boken *Klimatplanering vind* beskrivs denna metod som lämpar sig för grafiska beskrivningar. Den grundar sig på medianhastigheter hos ostörd vind som räknas om från 10 meters höjd till vistelsenivån på 2 meter och korrigeras för ytråhet, byggnadshöjd och topografi. I denna rapport presenteras enbart den del av metoden som tar hänsyn till omgivningens topografi och ytråhet eftersom de andra korrigeringarna görs med avseendet att planera för lä. Vid läplanering bör vinden överskattas för att vara på den säkra sidan till skillnad från vid projektering för vindkraftverk.<sup>63</sup>



Figur 11, Indelning av Sverige i 3 vindzoner. Glaumann M., Westerberg U. (1988)

#### 3.3.1 Lokala vindhastigheter

Metoden är baserad på uppmätta vindhastigheter från 45 olika svenska väderstationer. Den utgår från genomsnittshastigheter på 10 m till havs, något som kallas bashastigheter. Figur 11 visar de tre zoner som Sverige delats in i och tabell 2 visar respektive uppsättning bashastigheter och tidsandelar. Metoden går ut på att bestämma förhållandet mellan den lokal vindhastigheten och bashastigheten för regionen. De framräknade lokala vindhastigheterna måste alltid användas med försiktighet eftersom ett relativt stort mått av osäkerhet är oundvikligt<sup>64</sup>

Zon	N	NO	O	SO	S	SV	V	NV	
I	7,2	7,4	7,4	7,2	7,4	8,5	9,0	7,4	m/s
f	0,08	0,11	0,11	0,11	0,12	0,18	0,19	0,10	
II	7,8	7,3	6,8	7,4	7,9	7,9	7,7	7,5	m/s
f	0,13	0,10	0,08	0,11	0,16	0,18	0,12	0,12	
III	7,2	6,7	6,0	6,2	6,8	6,4	6,4	7,2	m/s
f	0,13	0,08	0,09	0,16	0,18	0,12	0,11	0,13	

Tabell 2, Bashastigheter och tidsandelar för respektive zon, Glaumann M., Westerberg U. (1988)

<sup>63</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>64</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

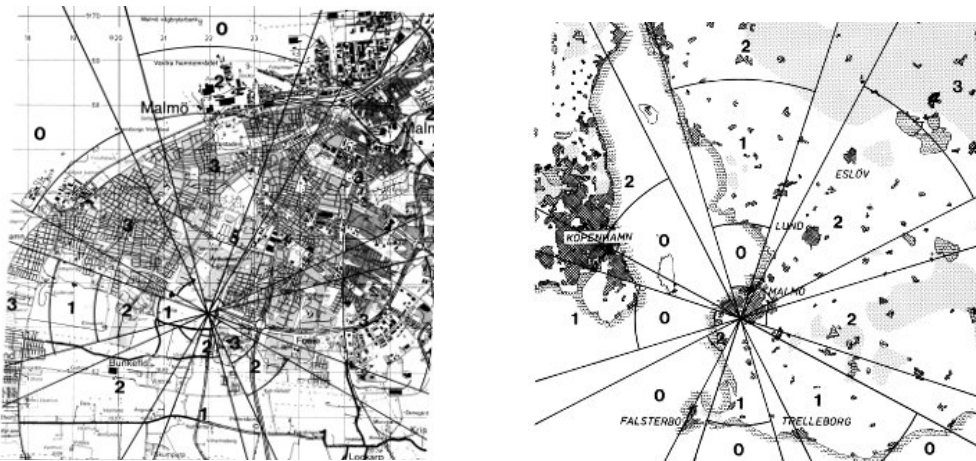


### 3.3.2 Råhetskiften

Kvoten mellan lokal hastighet och bashastighet är yråhетens jämviktskvot. Denna korrektionsfaktor delas in i fyra klasser, se *tabell 3*, det är färre klasser än vad som vanligen används vilket minskar precisionen men förenklar beräkningsgången. För att bestämma en lokal hastighet måste markytan klassas successivt uppströms så långt bort att yråhетen inte anses ha något inflytande på den lokala vindhastigheten vilket anses vara på avståndet 20 mil.<sup>65</sup>

Klass	Jämviktskvot	Markyta
0	1,00	Vattenyta om minst 1 km i djupled.
1	0,68	Öppen yta med högst enstaka träd eller hus, t ex områden med mycket stora fält eller flygfält
2	0,54	Omväxlande öppet och slutet landskap, t ex omväxlande öppen åker och trädplanteringar och byggnader
3	0,40	Slutet landskap, t ex skogs- och bebyggelseområden

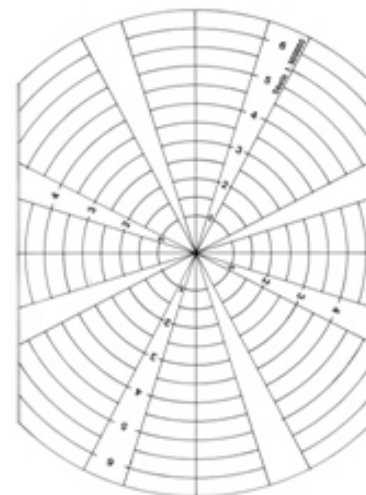
Tabell 3. Råhetsklass, jämviktskvot och markyta, Glaumann M., Westerberg U. (1988)



Figur 12. Kartor med vindsektorer och råhetsklassning, Glaumann M, Westerberg U. (1988)

### 3.3.3 Råhetsklassning

Varje sektor N, NO, O, ... o.s.v. skall råhetsklassas. Det görs genom att lägga en transparent mall med vindsektorerna över en karta, se *figur 13* och exempel i *figur 12*. Lantmäteriets topografiska karta, Terrängkartan, i skala 1:50 000 är i allmänhet tillräcklig för klassningen inom de närmsta milen, men en större karta eller ett flygfoto kan vara ett komplement. För att undvika risken att hinder hamnar i fel sektor är kilarna mellan dem tomma. Ju längre avståndet från referenspunkten är, desto mer ökar sektorns yta och därmed oftast även variationen i yråhет inom sektorn. Klassen i dessa sektorer fås av ett ungefärligt medelvärde av jämviktskvoterna. På större



Figur 13. Avståndsmall till hjälp vid yråhetsklassning. Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>65</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

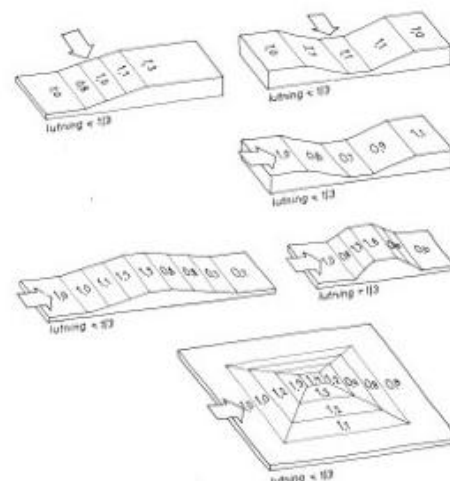
avstånd betyder små ytor lite, därför avslutas klassningen i regel med 0 när havet nåtts eller 3 när skogsområden överväger. Råhetsklassningen görs mer noggrant nära referenspunkten än längre bort.<sup>66</sup>

---

<sup>66</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

### 3.3.4 Topografi

Metoden är bäst lämpad att använda i ett lätt kuperat landskap med höjdskillnad på mindre än 100 m. För sluttningar och dalgångar kan korrektionsfaktorn approximeras med hjälp av schablonerna i *figur 14*.<sup>67</sup>



### 3.3.5 Beräkningsgång

I *bilaga 11.1, Beräkningsschema* redovisas beräkningsgången för hur hänsyn tas till bashastigheter, råhetsfaktor och terrängfaktor. Nedan görs en kortfattad beskrivning.<sup>68</sup>

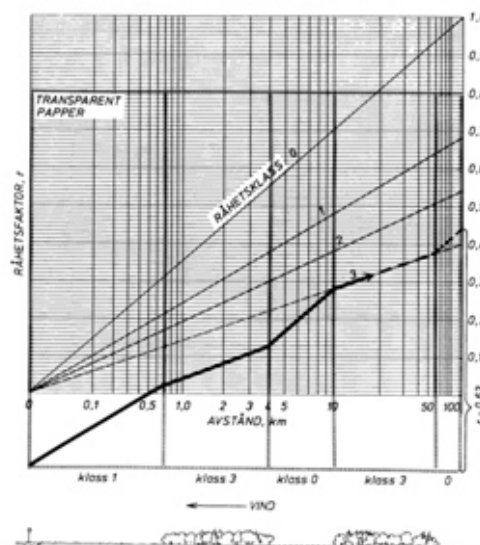
#### *Bashastigheter, $v_B$*

Bashastigheter och basfrekvenser för den aktuella zonen enligt *figur 11* förs in i beräkningsschemat.<sup>69</sup>

#### *Råhetsfaktor, $r$*

Avståndsmallen med sektorerna kopieras på genomskinlig plast och läggs väderstreckorienterad över den topografiska kartan med centrum i referenspunkten. Därefter kan områdena klassas för varje sektor och avstånd och råhetsklasser kan sedan föras in i beräkningsschemat för varje riktning.<sup>70</sup>

Beräkning av den gemensamma råhetsfaktorn,  $r$ , för varje riktning görs genom att lägga transparent millimeterpapper över ett så kallat råhetsfaktor-diagram. Först ritas diagrammets sidor av på det transparenta pappret och avstånden till varje råhetsskifte markeras med vertikala streck. Sedan utgår man från referenspunkten och för pappret till den råhetsklasslinje som motsvarar första råhetsområdet och ritas av lutningen för denna. Detta görs vid varje råhetsskifte tills råhetsfaktorn,  $r$ , kan avläsas på den vertikala skalan längst till höger. Detta görs för varje vindriktning.<sup>71</sup> Se exempel i *figur 15*.



**Figur 15,** Beräkning av råhetsfaktorn,  $r$ . Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>67</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>68</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>69</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>70</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>71</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

Terrängfaktor,  $t$

Ligger referenspunkten i en svacka eller på en sluttning uppskattas terrängfaktorn med ledning av *figur 14*.<sup>72</sup>

Lokala årsmedianhastigheter,  $v_L = v_B \cdot r \cdot t$

Lokala årsmedianhastigheter fås genom att multiplicera bashastigheten med råhetsfaktorn,  $r$ , och eventuellt terrängfaktorn,  $t$ .<sup>73</sup>

Lokal medianhastighet för alla riktningar,  $v_{tot}$

Den summerade medianhastigheten,  $v_{tot}$ , blir  $v_{tot} = \sum (f_i \cdot v_i) = \sum v_L \cdot f$ .<sup>74</sup>

### 3.4 Handberäkningsmodell för höjd över tak

I rapporten *Small scale wind Energy Technical Report* presenteras en metod för att beräkna vindkraftverkets höjd över taket. För turbiner monterade på platta tak och på en höjd över omgivande hinders medelhöjd kan den minsta höjden till rotorns underkant beräknas med *ekvation 2* nedan.<sup>75</sup>

$$y = 0.28 \cdot \min (W_B^{7/9} \cdot H_B^{2/9}, W_B^{5/9} \cdot H_B^{4/9}) \quad (2)$$

$y$  = Vertikala avståndet från taket till turbinen [m]  
 $W_B$  = Den längsta av byggnadens längd respektive bredd [m]  
 $H_B$  = Byggnadens höjd [m]

### 3.5 Handberäkningsmodell för vind och höjd över tak

I Sander Mertens bok *Wind Energy in the Built Environment* beskrivs hur vindförhållanden i stadsmiljö matematiskt kan beräknas med hänsyn tagen till byggnadshöjd, ytråhet, navhöjd och placering av vindkraftverket på taket. I en bilaga till diskussionen görs ett beräkningsexempel av metoden för att förtydliga beräkningsgången, se *bilaga 11.3 Beräkningsexempel*.

För att beskriva vindhastigheten på en viss höjd,  $z$ , används ett samband som benämns som *log-law*. Med hjälp av denna lag kan vinden beräknas på olika höjder över marken.<sup>76</sup>

#### 3.5.1 Beräkning av vind i urban miljö

I urban miljö krävs att hänsyn tas till fler faktorer som påverkar vinden. I *figur 2* som redovisats i kapitel 2.5 *Vind i urban miljö* förklaras de faktorer som måste beaktas där  $d$  är nollplansförskjutningen,  $z_{02}$  är ytråheten för staden,  $z_{01}$  är ytråheten för ruralt område,  $h_k$  är höjden på det interna gränslagret och  $z_{min}$

<sup>72</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>73</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>74</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988)

<sup>75</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008) s. 103

<sup>76</sup> Mertens S. (2006) s.19

minimihöjden.<sup>77</sup> Med *ekvation 3* kan vindhastigheten på höjden  $z$  på en specifik plats i staden beräknas utifrån en given vindhastighet utanför stadsområdet. Eftersom fler faktorer måste antas eller viktas blir förhållandet tämligen approximativt och ska betraktas med stor osäkerhet.

$$u(z) = 1,31 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_k}{z_{01}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_{02}}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_{01}}\right) \cdot \ln\left(\frac{h_k-d}{z_{02}}\right)} \cdot u_p \quad (3)$$

$z$  = Höjden där hastigheten beräknas [m]  
 $z_{01}$  = Ytråheter innan råhetsskifte [m]  
 $z_{02}$  = Ytråhet efter råhetsskifte (här urban miljö) [m]  
 $h_k$  = Höjden på det interna gränslagret [m]  
 $d$  = Nollplansförskjutningen [m]

Med de tre nedanstående ekvationerna bestäms ingående data till *ekvation 3*. Nollplansförskjutningen i urban miljö beräknas med *ekvation 4*. I denna metod beräknas nollplansförskjutningen som medelhöjden på husen minus en faktor som beror av förhållandet mellan byggnader och markyta,  $A_H$ , och ytråheten för urban miljö,  $z_{02}$ . I *tabell 4* ges några typiska värden för medelhöjden,  $H$ , ytråheterna,  $z_{01}$  och  $z_{02}$ , och nollplansförskjutningen,  $d$ .<sup>78</sup>

$$d = \bar{H} - 4,3 \cdot z_{02} \cdot (1 - A_H) \quad (4)$$

$\bar{H}$  = Medelhöjden för omgivande bebyggelse [m]  
 $A_H$  = Förhållandet yta byggnader / markyta  $\left[\frac{m^2}{m^2}\right]$

Stadsmiljö	$H(m)$	$z_0(m)$	$d(m)$
Ruralt område	-	0,03	-
Låg bebyggelse, 1-2 plans hus i villaområde	5-8	0,3-0,8	2-4
Måttlig bebyggelse, 2-3 plans hus, radhusområde öppen omgivning	7-14	0,7-1,5	3,5-8
Hög bebyggelse, närliggande byggnader	11-20	0,8-1,5	7-15
Hög bebyggelse, stadskärna	>20	>2,0	>12

**Tabell 4.** Förslag till lämplig indata för beräkning av vind i en urban miljö.<sup>79</sup>

För att *ekvation 2* ska gälla måste minimihöjden,  $z_{min}$ , för turbinens navhöjd vara högre än 1,5 gånger nollplansförskjutningen, enligt *ekvationen 5*.

$$z_{min} = 1,5 \cdot d \quad (5)$$

$z_{min}$  = Minsta höjden för att LogLaw ska gälla

<sup>77</sup> Mertens S. (2006) s. 19-23

<sup>78</sup> Mertens S. (2006) s. 19-23

<sup>79</sup> Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008) s.28,100

Nästa steg är att beräkna höjden på det interna gränslagret vilken ändras då vinden kommer in över urbant område. Det är beroende av avståndet från den valda platsen till gränsen mellan urbant om ruralt område där ytråheterna skiljer sig. Höjden beräknas med *ekvation 6*.<sup>80</sup>

$$h_k = 0,28 \cdot z_{0,max} \cdot \left( \frac{x}{z_{0,max}} \right)^{0,8} \quad (6)$$

$$500 < x < 5000 \text{ [m]}$$

$h_k$  = höjden på det interna gränsskiktet [m]

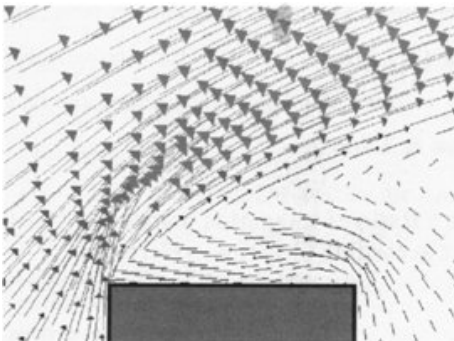
$x$  = Avståndet från platsen till råhetsskifte vid stadens ytterkant [m]

$z_{0,max}$  = Största av  $z_{01}$  och  $z_{02}$  i urban miljö, oftast  $z_{02}$  [m]

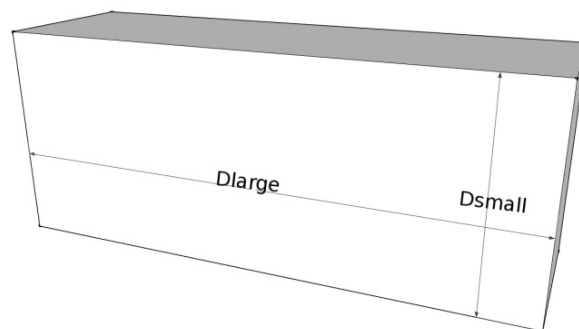
### 3.5.2 Byggnadsutformningens påverkan på vinden

Då taket orsakar ett område med turbulent vind och lägre vindhastighet måste turbinens navhöjd anpassas beroende på var på taket turbinen placeras, se *figur 16*. För att bestämma den minsta höjd över taket,  $y$ , där turbinen bör placeras används *ekvationerna 7 och 8*.

Först måste faktorn  $D$  som är den karakteristiska storleken på den anblåsta fasaden bestämmas utifrån hur höjden och bredden/längden förhåller sig till varandra.  $D_{small}$  och  $D_{large}$  får därför olika värden beroende på om det är ett smalt högt hus eller ett långt lågt hus, se *figur 17*. Den faktor av  $D_{small}$  eller  $D_{large}$  som bestäms av hushöjden ska minskas med nollplansförskjutningen,  $d$ . Vid de förhållanden som gäller i *figur 17*, där långsidan (längden) är anblåst, är  $D_{small}$  den faktor som ska minskats med  $d$ .<sup>81</sup>



**Figur 16**, Turbulensområde enligt CFD-beräkningar för vind över ett platt Mertens S.(2006)



**Figur 17**, Karakteristisk byggnadsstorlek på anblåst sida för bestämning av minsta turbinhöjd med avseende på turbulensområdet.

<sup>80</sup> Mertens S. (2006) s. 19-23

<sup>81</sup> Mertens S. (2006) s. 34-35

$$D = D_{small}^{2/3} \cdot D_{large}^{1/3} \quad (7)$$

$D$  = Den karakteristiska storleken på anblåst fasad  
 $D_{small}$  = Den minsta av höjden resp. bredden/djupet  
 $D_{large}$  = Den största av höjden resp. bredden/djupet

$$y = 0,28 \cdot D^{2/3} \cdot x^{1/3} \quad (8)$$

$y$  = Vertikala avståndet till turbins underkant [m]  
 $x$  = Avståndet från turbinen till den anblåsta sidan [m]

Då det turbulenta området antas vara mindre i denna beräkningsmetod ger den en lägre höjd över taket jämfört med *ekvation 2*<sup>82</sup>

Beroende på vilken av husets fasader som är anblåst kommer höjden till turbinen bli olika. Ett större  $x$ , det vill säga avståndet från takkanten till turbinen, ger en högre höjd till turbinen. Men efter ett visst avstånd böjer det turbulenta området av och blir parallellt med taket, se *figur 18*. Med hjälp av *ekvation 9* kontrolleras att turbinen är placerad i detta parallella flöde.<sup>83</sup>



Figur 18, Placeringar med parallellt flöde Mertens S.(2006)

$$L_c = 0,9 \cdot D \quad (9)$$

$$0 < \frac{W}{H} < 10$$

$L_c$  = Avstånd från takkant vid anblåsta sida till parallellt flöde [m]  
 $W$  = Bredd/längd [m]  
 $H$  = Höjd [m]

När nivån på turbinen är beräknad kan vinklingen av den inkommande vinden som takets utformning orsakar bestämmas genom att derivera *ekvation 8*, se *ekvation 10*.

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = 0,28 \cdot D^{2/3} \cdot \frac{x^{-2/3}}{3} = \frac{0,28 \cdot D^{2/3}}{3 \cdot x^{2/3}} \quad (10)$$

Vinkeln beräknas med *ekvation 11*.

$$\varphi = \tanh^{-1} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (11)$$

$\varphi$  = Vinkel mellan horisontalplanet och vinden [°]

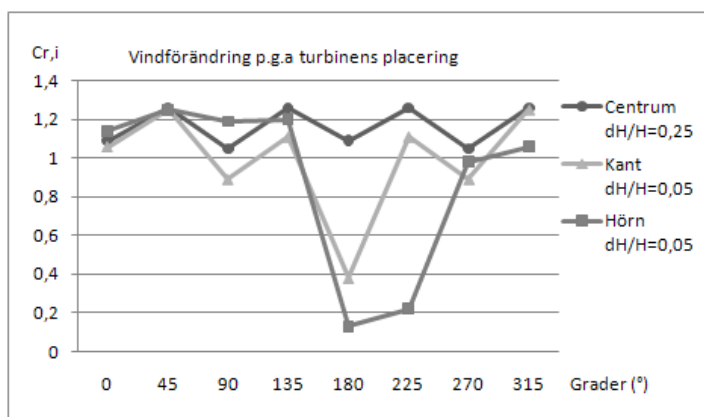
<sup>82</sup> Bussel v. GJ. W. & Mertens S. (2005)

<sup>83</sup> Mertens S. (2006) s. 39

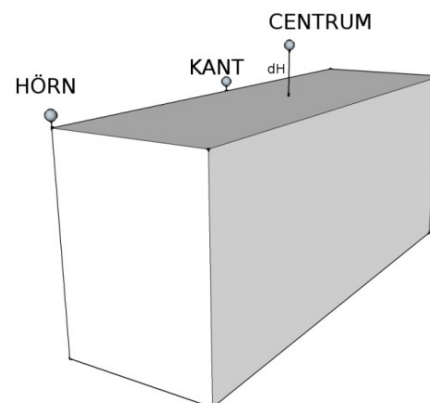
### 3.5.3 Placeringens inverkan på vinden

Vinden påverkas olika beroende på var på taket vindturbinen är placerad. Därför har ett förhållande,  $C_{r,i}$ , beräknats för att ta hänsyn till detta. *Diagram 1* visar förhållandet mellan den vindhastighet som korrigerats för byggnadens inverkan och den opåverkade vinden, se *ekvation 6*. Indata har tagits fram genom modellering i CFD för ett platt tak.<sup>84</sup> I diagrammet kan accelerationen av vinden för olika anblåsningvinklar mot huset avläsas. En indelning av de tre olika placeringarna centrum, kant och hörn har gjorts eftersom vinden påverkas olika för dessa placeringar vid olika vindriktningar, se *figur 19*.<sup>85</sup>

$H$  är höjden på huset och  $dH$  är höjden från taket till turbinen. Om turbinen placeras centralt på taket måste  $dH$  vara högre än om den placeras vid kanten eller hörnet på hustaket. Detta eftersom kant- och hörnplacerade turbiner kan arbeta i ett accelererat flöde vid lägre höjder om vindriktningen är den rätta. Se *figur 19*.



**Diagram 1**, Förändring av vindflöde, enligt ekv. 11, över byggnader med platta tak vid olika placeringar, Mertens S. (2006)



**Figur 19**, Placeringarna av vindkraftverken i *diagram 1*, Mertens S. (2006)

### 3.5.4 Erfarenheter

När Familjebostäder satte upp sitt vindkraftverk på ett bostadshus i Göteborg gjordes en förenklad beräkning med denna metod. Vindmätningarna som låg till grund för beräkningarna togs från byggnaden *Läppstiftet* vid Lilla Bommen i Göteborg. Under projektering uppkom problem med att få fram medelhöjden för omgivande bebyggelse, flera olika fastighetsägare fick kontaktas för denna information. Enligt beräkningarna borde vindkraftverket suttit 2-3 meter högre än vad det sitter idag, men för att bygglovsförfarandet inte skulle försenas gjordes aldrig någon korrigering. Vindkraftverket når därför inte helt över turbulensområdet. Detta visar de två vindmätarna som monterades i utvärderingssyfte i samband med uppförandet av vindkraftverket. Den

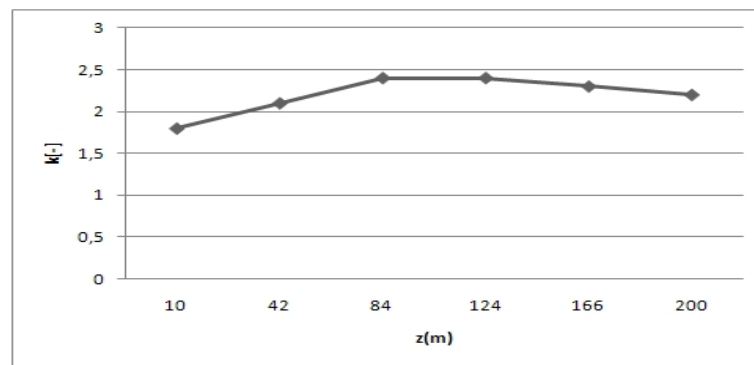
<sup>84</sup> Mertens S. (2006) s. 71

<sup>85</sup> Mertens S. (2006) s. 70



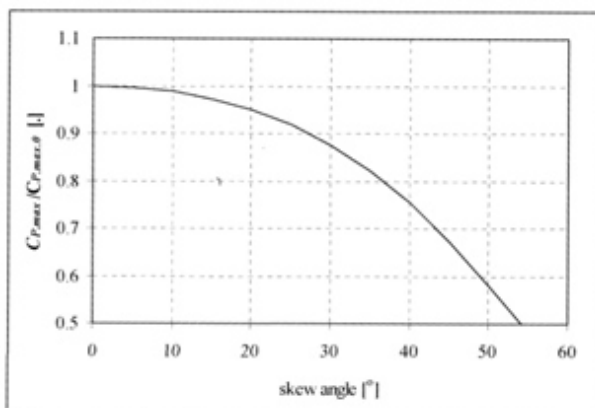
vindmätare som är placerad på 90 centimeters höjd över taket visar på betydligt lägre vindhastigheter än den på 7 meters höjd.<sup>86</sup>

I *Wind Energy in the Built Environment* presenteras erfarenheter av vindhastighetsfördelningen i staden Cabauw i Nederländerna. Dessa visar att ett k-värde på 2 är en god approximation till Weibullfördelningen för en byggnad med en höjd på cirka 20 meter, se *diagram 2*.<sup>87</sup>

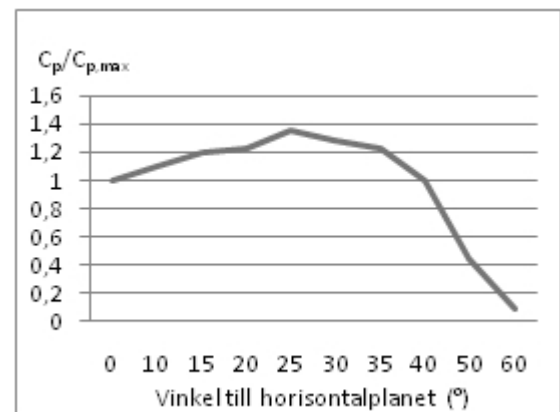


**Diagram 2,** K-värde för Weibullfördelningen för staden Cabauw i Nederländerna S. Mertens (2006)

Undersökningar har även gjorts gällande energiproduktion när vinden träffar vindkraftverket med vinkel mot horisontalplanet. Erfarenheter visar att dessa sneda vindar minskar den möjliga energiproduktionen för ett HAWT vilket *diagram 3* nedan visar med förhållandet  $C_p/C_{p,max}$ . En större vinkel ger en lägre energiproduktion. Testresultat för ett VAWT av typen H-Darrius som roterar med låg hastighet visade istället på en ökning av den möjliga energiproduktionen då vinden är vinklad mellan 0-35°, se *diagram 4*. Om det roterade med hög hastighet reagerade det däremot mer som ett HAWT.<sup>88</sup>



**Diagram 3,** Förändring av energiproduktion, på grund av icke horisontell vind, från ett HAWT, S. Mertens (2006)



**Diagram 4,** Förändring av energiproduktion, på grund av icke horisontell vind, från ett långsamsnurrande H-Darrius, S. Mertens (2006)

<sup>86</sup> Åkesson, Lars, (2009)

<sup>87</sup> Mertens S. (2006) s. 30

<sup>88</sup> Mertens S. (2006) s. 73

### 3.6 Vindtunneltester

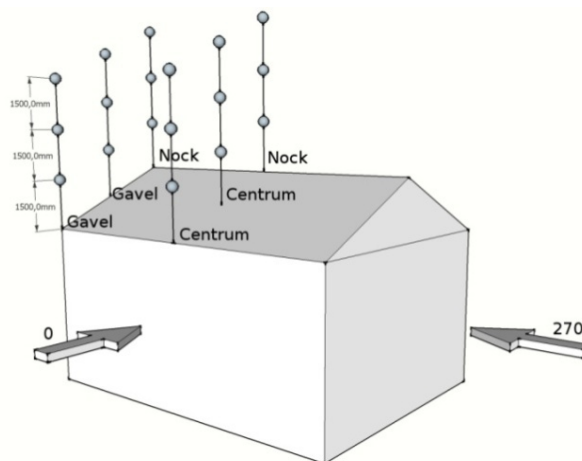
För att testa vind i bebyggelsemodeller används en vindtunnel av typen *boundary layer wind tunnel*. Här placeras bebyggelsemodellen på en vridbar platta och genom att justera plattan simuleras olika vindriktningar. Markens naturliga ytråhet imiteras med hjälp av så kallade råhetelement, bestående av till exempel klotsar i olika storlekar, som placeras uppströms i vindtunneln. Stor vikt läggs på att skapa en skalenlig vindprofil för att efterlikna den verkliga vinden så mycket som möjligt. Därför används även lokal vindstatistik och speciella generatorer med syftet att skapa turbulens.<sup>89</sup> Vindtunneltester utförs i regel med olika typer av elektriska vindgivare som bygger på att en ökad vindhastighet ger en ökad avkylning på mätsonden.<sup>90</sup>

Modellstudier har den fördelen att vindeffekter kan undersökas redan i planeringsstadiet. Simulering kan emellertid vara besvärlig i vissa situationer, t.ex. när kraftiga nivåskillnader eller mycket vegetation ska beaktas. För att strömningen kring en modell skall bli densamma som i verkligheten får modellen inte vara för stor i förhållande till tunnelns tvärsnittsarea vid mätsträckan, då förstörs strömningen vid vindtunnelns väggar. I regel är modellen i skala 1:200 till 1:500.<sup>91</sup>

I Sverige finns ett fåtal vindtunnlar att tillgå eftersom det inte direkt finns någon tradition att utföra vindtunneltester i kommersiellt syfte. Högskolan i Gävle har en av de få vindtunnlar där luftrörelser simuleras kring byggnader, men detta görs mestadels i forskningssyfte. I USA, Kanada och Storbritannien utförs däremot vindtunneltester i betydligt större utsträckning, bl.a. av brittiska BRE – Building Research Establishment.<sup>92</sup>

#### 3.6.1 Erfarenheter

Brittiska BRE, Building Research Establishment, har gjort omfattande vindtunneltester på byggnader, för placering av vindkraft på hustak. I artikeln *Siting micro-wind turbines on house roofs* mäts vindhastigheter på flera nivåer på hustak med olika lutningar och omgivningar.



Figur 20, Undersökta placeringar av vindmätare, Blackmore, Paul (2009)

<sup>89</sup> Johansson Å. & Sandberg J, s. 37

<sup>90</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988), s. 69

<sup>91</sup> Glaumann M, Westerberg U. (1988), s. 69

<sup>92</sup> Johansson Å. & Sandberg J, s. 37

Testerna har gjorts på sex platser i tre nivåer på hus med taklutningarna 25° och 50°, se *figur 20*. Mätningarna gjordes för vindhastighet och turbulens för varje 30°-vinkel. För att simulera stadsmiljö gjordes även tester med hinder på avstånd 10, 20 och 50 meters avstånd. Enligt internationell standard har mätningarna gjorts med anblåsande vind på motsvarande 10 meters höjd. Mätningarna visar endast horisontella vindar över hustaken. Då några vindkraftverk även kan reagera på vertikala vindar kan resultat bli underskattat. Resultatet av testerna visar hur vindhastigheten påverkas på grund av takets utformning. I diagrammen nedan visas förhållandet mellan den uppmätta vindhastigheten vid hustaket och den ostörda vindhastigheten, mätt utan några hinder på samma höjd.<sup>93</sup>

### 3.6.1.1 Hus med 50° taklutning i fri terräng

Upp till tre meters höjd över infästningspunkten på taket är det bara de mätstationer på nocken som inte visar en minskning av vindhastigheten på grund av husets aerodynamik.<sup>94</sup>

På fyra och en halv meters höjd visar de flesta mätstationer att vinden är ungefär densamma som den ostörda vinden. Gavelplaceringarna och centrumplaceringarna visar dock en kraftig minskning av vindhastigheten mellan 0 - 60° och 100 - 260°. Se *diagram 5*.<sup>95</sup>

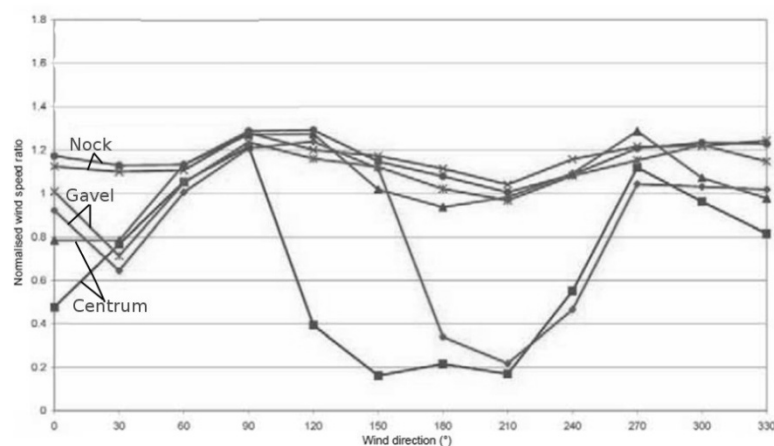


Diagram 5, Vindförhållande på 4.5 meter över tak med 50 graders lutning, Blackmore Paul (2009)

### 3.6.1.2 Hus med 25° taklutning i fri terräng

Vid höjden en och en halv meter över taket visar framförallt centrumplaceringarna en minskning av vindhastigheten jämfört med den ostörda vinden, men även de två mätstationerna på gaveln visar en minskning för de flesta vindriktningarna. Placering på nocken visar sig vara mindre beroende av vindriktning och vindhastigheten ligger nära den ostörda.<sup>96</sup>

<sup>93</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>94</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>95</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>96</sup> Blackmore, Paul (2009)

På tre meters höjd är det de nedersta positionerna, på gaveln och centrum, som visar mest minskning av vindhastigheten. Vindhastigheten vid de andra positionerna liknar den ostörda vinden då de visar på ett förhållande kring ett. Det är bara vidnocken som de flesta mätvärde ligger över den ostörda vindhastigheten.<sup>97</sup>

På fyra och en halv meters höjd har de flesta positioners ett förhållande mellan 0,8 och 1,2. Nocken är fortfarande minst beroende av vindriktning. Se *diagram 6*.<sup>98</sup>

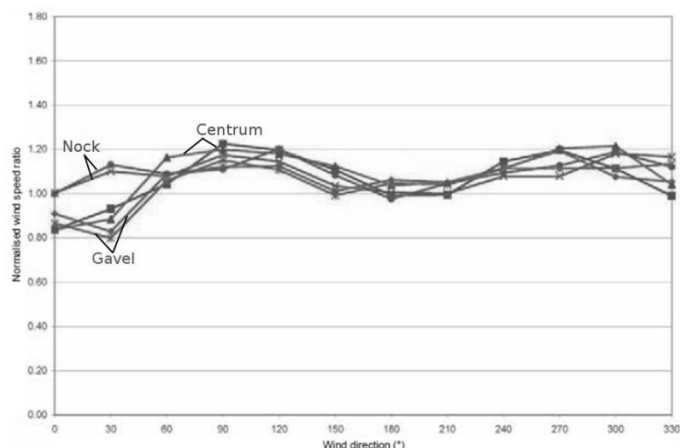


Diagram 6, Vindförhållande på 4.5 meter över tak med 25 graders lutning, Blackmore, Paul (2009)

### 3.6.1.3 Omgivande byggnaders inverkan på vindhastigheten

Tester gjordes med omgivande bebyggelse på avstånd mellan 10 – 20 meters avstånd samt på 50 meters avstånd. För hus med taklutningen 25° minskade vindhastigheten till en faktor mellan 0,6-0,7 av den ostörda vindhastigheten både för byggnader på avståndet 10-20 meter och på avståndet 50 meter. För hus med taklutningen 50° var minskningen av vindhastigheten lägre. Förhållandet låg mellan 0,8-0,95 av den ostörda vinden för bebyggelsen på 10-20 meters avstånd och 0,7-0,9 då avståndet var 50 meter. När vindriktningen var parallell med gatorna syntes ingen signifikant minskning av vindhastigheten.<sup>99</sup>

### 3.6.1.4 Parametrar till Weibullfördelning

Med hjälp av dessa tester kunde en Weibullfördelning fås fram. Det visade sig att ett k-värde på 1,85 och ett c-värde på 1,12 var passande för urban miljö.<sup>100</sup>

<sup>97</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>98</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>99</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>100</sup> Blackmore, Paul (2009)

### 3.6.1.5 Turbulens

Vindtunneltesterna visade att de båda taklutningarna generellt ger ett tillskott av turbulens på nivåer upp till cirka 4,5 meter över taket. Värdet på 4,5 meters höjd motsvarar ungefär samma turbulensvärde som den ostörda vinden på 10 meters höjd.<sup>101</sup>

### 3.6.1.6 Slutsatser

I rapporten *Siting micro-wind turbines on house roofs* görs följande sammanfattning:

- Branta tak medför oftast en lägre vindhastighet.
- Vindhastigheten vid takfoten är ofta de sämsta.
- Över branta tak är den byggnadsgenererade turbulensen stor även på höjder upp till 4,5 meter över taket.
- Omgivande byggnader påverkar vindhastigheten minst när de står nära. Därefter är det inte förrän omgivande bebyggelse är på ett avstånd som motsvarar cirka 5-7 byggnadshöjder som vindhastigheten börjar öka igen.
- Generellt gäller att desto högre placering över taket desto bättre är vindresurserna och desto mindre turbulent är vinden. Montering bör ske på minst 1,5 meter övernocken och placering på takfoten bör undvikas helt.<sup>102</sup>

## 3.7 Sammanfattning av beräkningsmodellerna

Uppskattning av vindhastighet i urban miljö:

- Med beräkningsgången i kapitel 3.3 *Handberäkningsmodell för vind* kan vinden beräknas med hänsyn till inverkan från omgivande ytråhet och topografi.
- Med *ekvationerna 3-6* från kapitel 3.5 *Handberäkningsmodell för vind och höjd över tak* beräknas hur vinden påverkas av höjden på det interna gränsskiktet, nollplansförskjutningen och ytråhetsskiftet mellan rural och urban miljö. *Ekvation 12* korrigerar sedan vindhastigheten beroende på var på taket vindkraftverket är placerat.
- Om en laserscanning finns av staden i form av en 3D-modell kan ett CFD-modelleringsprogram användas för beräkning av vindflödet över byggnader, enligt kapitel 3.2.1 *CFD*.

---

<sup>101</sup> Blackmore, Paul (2009)

<sup>102</sup> Blackmore, Paul (2009)

- MIUU och liknande beräkningsprogram redovisar vindhastigheter på högre höjder än vad som är aktuellt för urban vindkraft. Dessa vindhastigheter kan skalas ner för att bättre anpassas till vind i urban miljö.

Beräkning av vindkraftverkets minsta höjd över taket:

- *Ekvation 2* i *Handberäkningsmetod för höjd över tak* som tar hänsyn till vindkraftverkets placering på taket och byggnadens utformning kan användas.
- Även med *ekvation 8* med de tillhörande *ekvationerna 7 och 9* från *3.5 Handberäkningsmodell för vind och höjd över tak* kan minsta höjden över taket beroende på vindkraftverkets placering och byggnadens utformning uppskattas. Denna beräkningsmetod är dock mer optimistisk eftersom den ger en lägre minsta höjd jämfört med *ekvation 2*.
- En mer förenklad beräkningsmetod är att använda sig av tumregeln beskriven i *figur 10*. Den säger att vindkraftverket som placeras på ett lutande tak ska ha en navhöjd över nocken som motsvarar åtminstone halva höjden av skillnaden mellan nock och takfot.

## 4 Infästning

Om infästningarna mellan vindkraftverket och byggnadsstommen är stumma kan stomljud överföras till byggnaden, något som är viktigt att undvika. Stomljud är vibrationer i en byggnad som strålar ut som ljud. Detta är typiskt för en roterande maskin som är hårt kopplad till byggnadsstommen. Infästningarna är därför viktiga att beakta så att de blir gjorda på ett sådant sätt att risken för överföring av vibrationer till stommen minimeras.<sup>103</sup> Men det är svårt att ge några tumregler för hur infästningarna ska göras eftersom förutsättningar rörande både vibrationer och stomljud varierar för varje byggnad.<sup>104</sup> Förslagsvis kan vindkraftverket dockas i ett vibrationsdämpande material och därefter fästas i stommen genom att stagas med vajrar, eftersom de inte överför stomljud.<sup>105</sup>

### 4.1 Avsaknad av riktlinjer

Att montera ett vindkraftverk på ett tak är komplicerat och förutsättningarna varierar beroende på byggnadens specifika egenskaper. Därför vore det lämpligt att konstruera riktlinjer för en säker installation av UWTs på byggnader. Dessa skulle ha sin grund i befintliga strukturella utvärderingar samt konstruktionsnormer och riktlinjer. Ett system för att certifiera UWTs både med avseende på produkten och på installationen skulle underlätta säkerhetskontroller.<sup>106</sup>

### 4.2 Erfarenheter

Mattias Gustafsson som var ansvarig för projekteringen av vindkraftverket på Polhemskolan i Gävle anser att ett av de största problemen med vindkraftverk monterade på tak är just stomljud eftersom det är svårt att uppskatta hur mycket stomljud som vindkraftverket kan komma att generera. Den bästa lösningen för att undvika stomljud, i Polhemskolan, var att tillverka ett fundament som sattes på tunna gummimattor och monterades på taket. I skrivande stund har vindkraftverket varit monterat i fem månader och än så länge har inga problem med stomljud märkts. Däremot finns risken att det kan uppstå eventuella problem efter en tids användning. I *bilaga 11.2 Exempel på infästning* redovisas projektets konstruktionsritning över infästningarna.<sup>107</sup>

Vid Familjebostäders projekt i Göteborg sattes masten på en bultkrans som bultades i en platta som i sin tur dockades i en vagga med vibrationsdämpande material. Masten har förts igenom takkonstruktionen ner till det bärande betongbjälklaget och är vajerstagad av fyra vajrar som är fästa med speciella smidesfästen.<sup>108</sup> Trots detta uppstod problem med vibrationer eftersom inga

---

<sup>103</sup> Scheuer, Johan, (2009)

<sup>104</sup> Sandberg, Göran, (2009)

<sup>105</sup> Scheuer, Johan, (2009)

<sup>106</sup> Wineur (2007)

<sup>107</sup> Gustafsson, Mattias, (2009) 1

<sup>108</sup> Loodin, Fredrik, (2009)

ritningar och därför inte heller några lastförutsättningar eller konstruktionsförutsättningar fanns att tillgå. För att åtgärda problemet föreslås att masten ska fyllas med sand för att dämpa bort vibrationerna. Fenomenet kan ha varit specifikt för just denna version av modellen eftersom ett äldre verk inte har visat på några sådana problem.<sup>109</sup>

Även vid projektet *Warwick Wind Trials* uppkom problem med infästningar i väggen vilket resulterade i att turbiner fick stängas av. Ansvar för vindkraftverkets pålitlighet innefattar inte bara tillverkarna utan även installatörerna. Ett exempel på detta visade sig när en gavelvägg gick sönder. En del av installationsproceduren innebar ett dragtest på infästningarna på 5kN. Även om detta försäkrar att bultarna är tillräckligt fästa i väggen och att tegelstenarna är stabilt cementerade och fästa vid varandra så testas det inte själva väggkonstruktionens styrka.<sup>110</sup>

---

<sup>109</sup> Pettersson, Mattias, (2009)

<sup>110</sup> Encraft (2009)



## 5 Akustik

Begreppet buller definieras som icke önskvärt ljud eftersom det inte finns någon rent fysikalisk definition. Vindkraftverk alstrar aerodynamiskt- och mekaniskt ljud. Det aerodynamiska ljudet har ett svischande läte som i huvudsak bestäms av bladspets hastigheten, bladens form och turbulensen i luften. Mekaniskt ljud är ett skorrande ljud med hörbara toner. Ljudet bestäms till stor del av detaljkonstruktionen av växellåda, infästningar mm.<sup>111</sup> Det finns även vindkraftverk som inte har någon traditionell växellåda.<sup>112</sup> Förekomsten av mekaniskt ljud är olika för olika fabrikat men det är idag ovanligt för moderna serietillverkade konventionella turbiner.<sup>113</sup> Det är först när någon komponent håller på att gå sönder som mekaniskt ljud uppkommer.<sup>114</sup>

Mekaniskt ljud är normalt svagare än det aerodynamiska ljudet men det upplevs ändå ofta som mera störande. Detta beror på att de rena toner som mekaniskt ljudet kan ge upphov till är lätta att uppfatta även vid närvaro av annat ljud. Aerodynamiskt ljud påminner istället om naturligt vindbrus.<sup>115</sup>

Eftersom ljudnivån på det aerodynamiska mestadels beror på bladspetsens hastighet, blir skillnaden mellan stora och små vindkraftverk små. Små vindkraftverken har nämligen högre varvtal än stora.<sup>116</sup>

### 5.1 Maskering

Eftersom aerodynamiska ljud påminner om vindbrus kan det vid kraftig vind överröstas av det naturliga vindbruset, ett fenomen som kallas maskering. Konventionella stora vindkraftverk hörs bäst vid låga vindhastigheter när det naturliga vindbruset har låg nivå. Eftersom ljudnivån varierar med vindens styrka medför detta att ljudalstringen blir relativt låg vid låga vindhastigheter, något som är eftersträvänt. Vid höga vindhastigheter brukar vindkraftverk övergå till drift med ett konstant varvtal, varför inte heller förhållandena vid mycket höga vindhastigheter ger några speciella problem.<sup>117</sup> Därför är det bara vid vindstyrkor från startvind 3-4 m/s och upp till 8 m/s som vindkraftverket hörs inom utbredningszonen.<sup>118</sup>

I stadsmiljö är generellt vindhastigheterna låga och 8 m/s är ytterst sällsynt. Det innebär att maskering på grund av vindbrus blir ringa. I stadsmiljö är det i första hand trafikbuller som skulle kunna maskera ljud från vindkraftverk, men det är

---

<sup>111</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>112</sup> Favonius

<sup>113</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>114</sup> Wizelius T. (2007) s 201

<sup>115</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>116</sup> Wizelius T. (2007) s. 201

<sup>117</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>118</sup> Wizelius T. (2007) s. 203

inte lika effektivt nattetid då trafiken är mindre. Eftersom det idag till och med är vanligt med klagomål på buller från luftvärmepumpar i villaträdgårdar måste även placeringen av urbana vindkraftverk beaktas noga.<sup>119</sup>

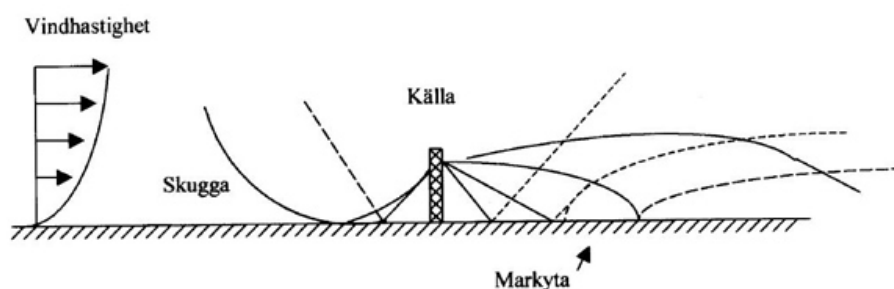
## 5.2 Ljudutbredning

Huvudorsaken till att ljudnivån avtar med avståndet från ett vindkraftverk är den geometriska utbredningsdämpningen. Detta beror i första hand på att ljudenergin fördelas över ett allt större område. Ljudutbredning påverkas även av de meteorologiska förhållandena, främst vindförhållanden och lufttemperatur.

Dessutom påverkas ljudutbredningen av markens egenskaper i form av så kallad markdämpning.<sup>120</sup>

Ljudets utbrednings ökar med ökande lufttemperatur. Det är vid mycket svag vind som temperaturgradienten har störst betydelse för ljudutbredningen. Vindförhållandena får därför oftast större betydelse än temperaturförhållandena för ljudutbredningen vid ett vindkraftverk.<sup>121</sup>

Ljudnivån blir högre nedströms vindkraftverket, det vill säga i medvind, jämfört med samma avstånd från vindkraftverket uppströms. Detta beror på att vindhastigheten adderas till ljudvågens normala utbredningshastighet medströms vilket medför att ljudvågorna tenderar att böjas ner mot marken. Marken får då bara en liten inverkan på ljudutbredningen. Uppströms däremot så träffar ljudvågorna markytan med en flack infallsvinkel vilket resulterar i en markdämpning. I vissa fall kan en ljudskugga bildas vilket innebär att ljudnivån uppströms bli väldigt låg, se *figur 21*.<sup>122</sup>



Figur 21 Ljudutbredning från ett vindkraftverk, Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

Generellt beräknas buller utifrån siktlinjen, finns en skärm eller om en del av taket skymmer siktlinjen mellan rotorn och nästa hus så är det bra ur bullersynpunkt. Eftersom ljud reflexteras mot ytor är effekten av detta något som bör studeras i varje enskilt fall.<sup>123</sup>

<sup>119</sup> Lundmark Gunnar, (2009)

<sup>120</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>121</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>122</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>123</sup> Scheuer, Johan, (2009)

### 5.3 Ljudmätning

Ljudemission och ljudimmission är två olika sätt att mäta ljud på. Det ljud som vindkraftverket skickar ut, emitterar, kallas för ljudemissionen. Ljudemissionen från rotornavets centrum när det blåser 8 m/s på tio meters höjd, i en terräng med råhetsklass 1,5, är det värde som tillverkaren redovisar och som används vid beräkningar. Den ljudnivå som uppmäts på ett visst avstånd från vindkraftverket är istället ljudimmissionen. Detta kan därför beräknas på olika avstånd från vindkraftverket om ljudemission och navhöjd är kända.<sup>124</sup>

### 5.4 Åtgärder

Ett första steg vid ljudproblem är att identifiera storkällorna. De ljuddämpande åtgärder som kan bli aktuella i efterhand beror nämligen på om det aerodynamiska eller det mekaniska ljudet dominerar. Mekaniskt ljud från ett aggregat kan bero på slitage eller haveri av någon komponent. I vissa fall kan det aerodynamiska ljudet sänkas genom ändring av styrning och drift, exempelvis ändring av bladvinkel. Ytterligare åtgärder är att sänka varvtalet eller att inte köra turbinen på kvällar och nätter eftersom det är då som risken är störst för att närboende upplever störande buller.<sup>125</sup>

### 5.5 Erfarenheter

Bullerfrågan är viktig eftersom den är avgörande för om verket får vara i drift eller inte. Om den inte beaktas från början kan det innebära merkostnader och eventuella problem kanske inte ens går att åtgärda. Därför är det bättre att ta en kostnad för bulleråtgärder i början för att undvika problem senare. Problem med ljud från vindkraftverk borde gå att lösa med tanke på att det redan finns ventilationsutrustning och liknande apparater som klarar att sitta på tak alldeles utmärkt trots att de vibrerar och avger ljud.<sup>126</sup> I projektet *Warwick Wind Trials* fick däremot 6 av 25 vindkraftverk stängas av på grund av för hög ljud nivå.<sup>127</sup>

För att ta reda på ett vindkraftverks ljuddata är ett användbart verktyg att använda sig av redan testade vindkraftverk. Det är även viktigt att veta vem det är som har utfört mätningarna. Om de är uppmätta av tredje part enligt en ISO-standard är de mer tillförlitliga än om tillverkaren eller leverantören själv har gjort mätningarna.<sup>128</sup> Familjebostäder var de första som monterade ett vindkraftverk på ett bostadshus i Sverige. De ljudberäkningar som gjordes vid projekteringen visade att ett traditionellt HAWT alstrar för mycket ljud.<sup>129</sup> Därför valdes ett

---

<sup>124</sup> Wizelius T. (2007) s. 200

<sup>125</sup> Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001)

<sup>126</sup> Scheuer, Johan, (2009)

<sup>127</sup> Encraft (2009)

<sup>128</sup> Scheuer, Johan, (2009)

<sup>129</sup> Pettersson, Mattias, (2009)

VAWT eftersom det ska vara tystare. Det var inget våldokumenterat verk men konsultfirman WSP hade mätt ljudet på den tidigare versionen av samma verk.<sup>130</sup>

---

<sup>130</sup> Pettersson, Mattias, (2009)

## 6 Krav

Det är först då effekten hos ett eller flera vindkraftsverk är minst 125 kW som det klassas som miljöfarlig verksamhet enligt kap. 9 i Miljöbalken. Detta innebär att en miljöanmälan, alternativt en ansökan om miljötillstånd, måste göras.<sup>131</sup> Detta behandlas dock inte här.

### 6.1 Bygglov

Enligt 8 kap. 2§, Plan- och bygglagen (PBL) krävs bygglov för att sätta upp ett vindkraftverk om:

- turbindiameter är större än två meter, eller
- det är fast monterat på en byggnad, eller
- det är placerat närmare tomtgränsen än verkets höjd<sup>132</sup>

Det är kommunens byggnadsnämnd som prövar bygglovsansökan och avgör om platsen är lämplig för vindkraft. Kommunen sänder ansökan vidare till myndigheter och andra organisationer för att de ska få möjlighet att yttra sig. De som berörs och även vissa organisationer kan överklaga ett bygglovsbeslut. En byggnadsmälan måste göras av byggherren till kommunen för att se till att arbetet utförs enligt gällande bestämmelser. Byggnadsmälan ska göras senast tre veckor innan arbetet påbörjas.<sup>133</sup>

#### 6.1.1 Innehåll i en bygglovsansökan

För att byggnadsnämnden ska kunna behandla ansökan behöver en bygglovsansökan innehålla vissa uppgifter. Vad som krävs varierar mellan olika kommuner, därför bör den kommun som berörs kontaktas. Ofta krävs följande uppgifter:

- Kommunens ansökningsblankett ska innehålla uppgifter om sökande och på vilken fastighet som vindkraftverket ska uppföras.
- Situationsplan i skala 1:1 000 där aktuell fastighet, närliggande fastigheter, vägar och planerad elanslutning visas.
- Förenklad ritning av vindkraftverket i skala 1:100.
- Beräkningar av ljud och skuggor.

---

<sup>131</sup> Förordning (1998:899)

<sup>132</sup> PBL, Plan- och bygglagen (SFS 1987:10), 8 kap. 2§,

<sup>133</sup> Energimyndigheten (2008) 1

- Fotomontage som visar anläggningens utseende i omgivningen från regelbundet besökta platser så som en kyrka, badplats eller en fornlämning.
- Uppgifter om grannar och gärna intyg att de inte har något emot vindkraftsanläggningen.
- Höjd, diameter och annan betydelsefull information för att anläggningens effekt på omgivningen ska kunna bedömas.<sup>134</sup>

## 6.2 Anslutning till elnätet

Elnätsföretag har så kallad nätkoncession vilket innebär att de har tillstånd av regeringen att bygga och använda elektriska starkströmsledningar.<sup>135</sup> De måste på grund av säkerhetsskäl godkänna anslutningen av ett vindkraftverk även om det sker inom den egna byggnadens elinstallation.<sup>136</sup> Detta beror på att elnätsföretagen måste kunna stänga av all produktion på ett säkert sätt vid arbete på ledningsnätet.<sup>137</sup> Därför måste de även ha möjlighet att kontrollera den tekniska utformningen på anslutningen eftersom de har såkallat strikt ansvar för elnätet.<sup>138</sup>

För att elnätsföretagen ska kunna vägra att, på skäliga villkor, ansluta en anläggning som tekniskt sett är fullgod krävs dock synnerliga skäl. En sådan vägran kan överklagas till nätmyndigheten.<sup>139</sup>

Vid en förfrågan om nätanslutning bör följande uppgifter framgå:

- Vindkraftverkets placering utritat på en karta med koordinater alternativt anläggnings-ID som är den sifferkombination som identifierar anslutningen.
- Tidpunkt då inkoppling önskas.
- Vindkraftverkets märkeffekt
- Teknisk beskrivning av vindkraftverket och dess eltekniska egenskaper. Se *6.2.1 Tekniska krav för anslutning* nedan.<sup>140</sup>

<sup>134</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>135</sup> Ellagen (SFS 1997:857), 2 kap. §1

<sup>136</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>137</sup> Ellagen (SFS 1997:857), 9 kap. §2a

<sup>138</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>139</sup> Ellagen (SFS 1997:857), 3 kap §6-7

<sup>140</sup> Energimyndigheten (2008) 1

### 6.2.1 Tekniska krav för anslutning

Vindkraftverket måste ha ett skyddssystem som automatiskt kopplar bort det från elnätet om ett fel skulle inträffa så som att det blir utan nätmatning eller om frekvensen och spänning i nätet avviker från det normala. Frånskiljande utrustning ska möjliggöra säkert underhållsarbete på både elnät och vindkraftsverk och elektriska skydd och brytare ska fungera i två riktningar. På så sätt skyddas både vindkraftsägaren och elnätsägaren. Behörig elektriker ska utföra den elektriska anslutningen fram till elnätsföretagets nät.

Vindkraftverkets höjd innebär att det är starkt utsatt för åska. Åskledare och tillhörande jordning måste därför utföras rätt för att människor i närheten inte ska utsättas för livsfara.<sup>141</sup>

### 6.2.2 Anslutning inom den egna elinstallationen

Om vindkraftverket ansluts bakom den egna elmätaren, det vill säga inom den egna befintliga elinstallationen, registrerar elmätaren bara det överskott eller underskott av el som utbyts med elnätet. Detta får bara göras om vindkraftverket finns på samma fastighet och i omedelbar närhet av bostadshuset.<sup>142</sup>

Så länge som utmatningen av effekt inte överstiger den effekt som abonnemanget redan omfattar så behöver elnätsföretaget som regel inte göra några ändringar i det anslutande elnätet. Ett lågspänningsabonnemang bestäms av mätarsäkringarnas storlek, som i sin tur bestämmer den maximala ström och därmed även den effekt som tillåts.<sup>143</sup>

Om vindkraftverket som planerats att uppföra är större än vad mätarsäkringarna tillåter bör elnätsföretaget frågas om abonnemanget kan utvidgas utan ändringar i det anslutande elnätet. Ett större abonnemang innebär i sig en avgift men om ytterligare åtgärder på elnätet krävs så tillkommer ytterligare kostnader för detta.<sup>144</sup>

När ett vindkraftverk installeras behöver ofta elmätaren bytas eftersom vanliga elmätare registrerar elen lika, oavsett riktning. Detta innebär att utan byte skulle även elen som levereras till nätet debiteras.<sup>145</sup>

### 6.2.3 Försäljning av el

En innehavare av en produktionsanläggning ska betala en engångsavgift för anslutningen till elnätet. Dessutom ska innehavaren betala en årlig avgift till elnätsföretaget som motsvarar kostanden för mätning, beräkning och

---

<sup>141</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>142</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>143</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>144</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>145</sup> Energimyndigheten (2008) 1

rapportering av den el som levereras till elnätet, ett så kallat inmatningsabonnemang.<sup>146</sup> Denna kostnad innebär att försäljning till elnätet nästan alltid blir en förlustaffär. Därför erbjuder vissa elnätsföretag så kallade nollprisavtal som innebär att de inte tar betalt för att mäta men inte heller betalar för utmatad el.<sup>147</sup>

I utredningen *Bättre kontakt via nätet – om anslutning av förnybar elproduktion* föreslås möjligheten att tillämpa schablonmätning istället för timvis mätning just för att slippa denna kostnad.<sup>148</sup> Se 7.1 *Framtida bestämmelser*.

### 6.3 Buller från vindkraftverk

Turbinbladens rörelse genom luften och maskineriets eventuella kuggväxel och generator ger hörbart ljud. De riktvärde som finns idag för buller från vindkraftverk har satts utifrån externt industribuller och störningsstudier gjorda på vindkraftverk. De följer den praxis som vuxit fram och lagts fast i domar från Miljööverdomstolen.<sup>149</sup>

Enligt Naturvårdsverkets skrift *SNV RR 78:5 Externt industribuller - Allmänna råd* bör en ljudnivå på 40 dBA inte överskridas utomhus vid bostäder vilket är en ljudnivå som ligger under ljudnivån för normalt tal.<sup>150</sup> Denna ljudnivå ska skärpas med 5 dBA om ljudet innehåller tydligt hörbara tonkomponenter.<sup>151</sup>

### 6.4 Skuggning, stroboskopeffekten och reflexer

Vissa tider på dygnet och under året kan vindkraftverk ge upphov till skuggor och reflexer. Skuggornas utbredning påverkas av, rotordiameter, navhöjd, avstånd solstånd, väder, vindriktning, siktförhållanden och topografi. Reflexer kan avhjälpas med antireflexbehandlade rotorblad.<sup>152</sup>

Vilka tider skuggan från ett vindkraftverk faller inom ett visst område och hur länge den befinner sig där är olika för olika platser. Risken för skuggstörning är störst för bebyggelse placerade sydost och sydväst om vindkraftverket.<sup>153</sup>

SMHI har statistik över hur stor andel av dagens ljusa timmar som solen skiner från klar himmel i medeltal på olika platser.<sup>154</sup> Exakta tidpunkter för skuggor kan även beräknas med datorprogram vilka kan redovisas grafiskt i diagram eller i form av en kalender.<sup>155</sup>

---

<sup>146</sup> Ellagen (SFS 1997:857), 4 kap., §10

<sup>147</sup> Ny-teknik (2009)

<sup>148</sup> Näringsdepartementet. (2008)

<sup>149</sup> Naturvårdsverket, (2006)

<sup>150</sup> Energimyndigheten (2008) 1

<sup>151</sup> Naturvårdsverket (2009)

<sup>152</sup> Wizelius T. (2007) s.205-208

<sup>153</sup> Wizelius T. (2007) s. 208

<sup>154</sup> Boverket (2009)

<sup>155</sup> Wizelius T. (2007) s. 207



Skuggorna från den snurrande rotorn kan ge en stroboskopliknande effekt när de passerar ett fönster.<sup>156</sup> Dessa rörliga skuggor kan efter en tid ge stressreaktioner och bör därför uppmärksammas såväl för bostäder som för arbetsplatser. I en studie i Tyskland har det konstaterats att försökspersoner som utsatts för mer än 15 timmar skuggtid per år kände sig väldigt störda och ansåg att deras livskvalitet hade försämrats betydligt.<sup>157</sup>

---

<sup>156</sup> Wizelius T. (2007) s. 206

<sup>157</sup> Boverket (2009)

Det har i praxis arbetats fram en rekommendation eftersom det inte finns några riktvärden för skugg effekt från vindkraftverk. Rekommendationen kommer ursprungligen från Tyskland och går ut på att det totala antalet skugg timmar i störningskänslig bebyggelse inte bör överskrida 30 timmar per år. Dessa siffror gäller för det värsta fallet och motsvarar en faktisk skuggning på 8 timmar per år eller max 30 minuter på en dag.<sup>158</sup>

## 6.5 Tekniska krav på vindkraftverk

Vindkraftverk ska vara CE-märkta vilket innebär att tillverkaren eller importören garanterar att varan uppfyller myndigheternas krav. Energimyndigheten rekommenderar att köparen av ett vindkraftverk bör kräva följande dokumentation från säljaren:

- Uppgifter där det framgår för vilka vind- och klimatförhållanden som verket är konstruerat. Uppgifter ska helst vara typcertifierat enligt t.ex. IEC.
- Bruksanvisning med säkerhetsanvisningar, ritningar och sådan dokumentation som krävs vid installation, användning och underhåll av anläggningen.
- Vindeffektkurva.
- Information om verkets ljudeffektnivå.
- De eltekniska uppgifter som elnätsföretaget behöver för att kunna lämna en offert vid anslutning av vindkraftverket till elnätet.<sup>159</sup>

---

<sup>158</sup> Boverket (2009)

<sup>159</sup> Energimyndigheten (2008) 1

## 7 Marknaden för urban vindkraft

Uppgifter om energiproduktionen från projekt med UWTs är idag bristfälliga och några definitiva slutsatser kan därför inte dras om deras effektivitet. Detta innebär att effektiviteten bara kan uppskattas och att jämförelser mellan olika typer av UWT inte kan göras.<sup>160</sup>

Däremot har det konstaterats att storskalig vindkraft är lönsammare än urban vindkraft vilket inte är överraskande eftersom omständigheterna skiljer sig väldigt mycket. Det inte är troligt att urban vindkraft någonsin kommer att nå samma avkastning som storskalig vindkraft eftersom vindresurserna i urban miljö inte är lika förmånliga.<sup>161</sup>

Å andra sidan är UWT fortfarande i en utvecklingsfas vilket återspeglas i det stora antalet tillverkare, leverantörer och pilotprojekt. Detta innebär att kostnaderna kan förväntas minska och att effektiviteten komma att förbättras avsevärt. Tillverkare av UWTs i Nederländerna och Storbritannien räknar med en prisreduktion på omkring 40 % vid en ökad produktion på minst 500 turbiner per år. Erfarenhet visar även att turbinerna blir allt bättre med avseende på effektivitet och ljudalstring.<sup>162</sup>

UWTs passar för småskalig energiproduktion där det inte finns plats för storskalig vindkraft. Urban vindkraft ska inte ses som ersättare för storskalig vindkraft utan som ett komplement.<sup>163</sup>

### 7.1 Framtida bestämmelser

Regeringen kom i mars 2009 ut med propositionen *Prövning av vindkraft*. Syftet var att snabba på och förenkla processen från projektering till uppföljning av vindkraft. Ytterligare en anledning var att en kraftig utökning av vindkraften planeras. En av de viktigaste förändringarna i propositionerna är förslaget om att ta bort den dubbelprövning som ofta sker när storskalig vindkraft ska uppföras. Då krävs nämligen både bygglov och anmälan eller tillstånd enligt miljöbalken.<sup>164</sup>

Propositionen behandlar till största del storskalig vindkraft, den del som rör småskalig vindkraft är förslaget om ändring av *Plan- och Bygglagen*. Det föreslås att bygglov även ska krävas när vindkraftverket är högre än 20 meter över markytan. Däremot ökas vindturbinens diameter från 2 till 3 meter för att bygglov ska krävas. De nya reglerna föreslås träda i kraft 1 augusti 2009.<sup>165</sup>

---

<sup>160</sup> Wineur (2007)

<sup>161</sup> Wineur (2007)

<sup>162</sup> Wineur (2007)

<sup>163</sup> Wineur (2007)

<sup>164</sup> Prövning av vindkraft Informationsblad om proposition; 2009

<sup>165</sup> Prövning av vindkraft Informationsblad om proposition; 2009



I utredningen *Bättre kontakt via nätet – om anslutning av förnybar elproduktion* som skrivits på uppdrag av regeringen föreslås en rad förändringar som ytterligare kan påverka den småskaliga vindkraften. Ett av förslagen är att tillämpa nettomätning istället för timvis mätning. Detta innebär att om vindkraftverket producerar ett överskott kan detta tillgodoräknas nästa gång det produceras ett underskott. Eftersom det idag kostar mer att köpa än att sälja el skulle nettomätning medföra att en producent tjänar på att ”sälja el till sig själv”. Detta gäller i förslaget enbart om säkringsabonnemang är på högst 63 ampere. Enligt Lennart Söder, författaren till utredningen, borde denna avgränsning dock ändras med tanke på att exempelvis bostadsrättsföreningar som ofta har högre säkringsabonnemang då inte har rätt att tillämpa nettomätning.<sup>166</sup>

Den höga kostnad som nätbolagen tar ut för hanteringen av timvis mätning för små produktionsanläggningar står inte i proportion till den ringa mängd el som produceras i anläggningarna. Därför är denna kostnad ett avgörande hinder för investeringar i småskalig elproduktion. För att avskaffa denna kostnad föreslås ett undantag som innebär att produktionsanläggningar som är anslutna till lågspänning med en säkerhetsnivå om högst 63 ampere inte behöver mätas och rapporteras över tiden. Istället ska en schablonmetod tillämpas.<sup>167</sup>

I utredningen föreslogs även att en producent inte ska behöva betala för två abonnemang när denna både köper och säljer el. Den av nettokonsumtionen respektive nettoproduktionen som uppnår högst effekt på årsbasis ska istället bestämma vilken abonnemangsnivå som ska gälla.<sup>168</sup>

## 7.2 Otillförlitlig information

Ett problem med marknaden för urban vindkraft är att det finns väldigt lite oberoende information. Majoriteten av information kommer från leverantörer eller tillverkare och har inte verifierats. Information om förväntad energiproduktion och genererad ljudnivå är ofta allt för optimistisk. Om detta fortsätter kommer det att leda till allt fler besvikna kunder och i sin tur en ohållbar marknad.<sup>169</sup>

För närvarande finns enbart den tekniska kvalitetsstandarden IEC 61400-2 för HAWTs från 2006. Det finns ingen standard för ljudalstring och energiproduktion eller certifikat för säkerhet, dynamiskt beteende, hållbarhet eller kvalitet varken för VAWTs eller för UWTs. Detta beror till stor del på den kostnad som en certifiering skulle innebära för småskaliga vindkraftverk.<sup>170</sup> Den Amerikanska organisationen SWCC, Small Wind Certification Council, kommer under sommar 2009 att börja certifiera alla småskaliga vindkraftverk, inklusive

---

<sup>166</sup> Söder, Lennart, (2009)

<sup>167</sup> Näringsdepartementet. (2008)

<sup>168</sup> Näringsdepartementet. (2008)

<sup>169</sup> Wineur (2007)

<sup>170</sup> Wineur (2007)

UWT, med avseende på uppskattad årlig produktion, effekt och ljudalstring. Alla kostnader för certifieringen får dock tillverkaren själv stå för.<sup>171</sup>

### 7.2.1 Erfarenheter

Resultatet från projektet *Warwick Wind Trials* var blandat men sammanfattningsvis överskattades vindkraftverkens energiproduktion. Det var inte bara vindhastigheterna på platserna som överskattades. Det visade sig nämligen att även den beräknade energiproduktionen som erhöles genom plottning av turbinernas effektkurvor mot de uppmätta vindhastigheterna var överskattad jämfört med den faktiska energiproduktionen. Detta innebär att tillverkarnas effektkurvor var överskattade.<sup>172</sup>

Vidare visade det sig att effektkurvorna överensstämde bäst vid låga vindhastigheter och att energiproduktionen avtog vid höga hastigheter jämfört med effektkurvans förutspådda energiproduktion. En förklaring kan vara att turbinerna inte reagerar tillräckligt snabbt på förändringar i vindhastigheten vilket innebär att den inte kan tillgodogöra sig turbulenta vindar. Av projektet dras slutsatsen att det krävs en industriell standard som normaliserar sättet för tillverkare att ta fram effektkurvor.<sup>173</sup>

## 7.3 Bristande erfarenhet

Erfarenheterna från projekt med urban vindkraft är idag få och det konstateras att det krävs mer arbete för att skapa en tillförlitlig metod vid uppskattning av medelvindhastigheten i urban miljö.<sup>174</sup> UWTs placeras nämligen ofta på olämpliga platser, för lågt eller bakom hinder. Därför behöver ett enkelt verktyg skapas som kan hjälpa exploitörer.<sup>175</sup>

Monteringen av ett vindkraftverk på taket av Polhemsskolan i Gävle gjordes helt i utbildningssyfte för att visa att det fungerar med vindkraft i stadsmiljö. Platsen valdes trots att den inte är optimal med tanke på genererad energimängd. Då verket bara skulle fungera som demoverk gjordes aldrig några vindmätningar. Förstudier i form av vindmätningarna skulle å andra sidan ha kostat lika mycket som installationen av vindkraftverket. Eftersom syftet inte är att projektet ska bli lönsamt beräknades inte heller pay-off tiden. Däremot är det med den mediala uppmärksamhet som verket har fått redan avbetalat. Att projektet aldrig kommer bli lönsamt beror framförallt på installationskostnaden för monteringen. Kostnad för vindkraftverket var betydligt mindre än monteringen.<sup>176</sup>

---

<sup>171</sup> Small Wind Certification Council

<sup>172</sup> Encraft (2009)

<sup>173</sup> Encraft (2009)

<sup>174</sup> Encraft (2009)

<sup>175</sup> Wineur (2007)

<sup>176</sup> Gustafsson, Mattias, (2009) 2

## 8 Diskussion

### 8.1 Vindkartering

Vindmätningar är tidskrävande och oproportionellt dyrt i jämförelse med vad det kostar att sätta upp ett urbant vindkraftverk. De flesta vindmodelleringsprogram som finns är framtagna för att beräkna vindresurser för storskaliga vindkraftverk. De är därför inte tillräckligt anpassade för att kunna användas för att beräkna vind i städer. De flesta program ger bra geografisk täckning men detta är ointressant för urban vindkraft då det är vindförhållandet på den lokala nivån som är relevant.

Vindmodelleringsprogram kan bara ge en indikation på om vindresurserna i staden är bra eller dåliga på höga höjder. Vinden kan sedan skalas ner med hjälp av skalfaktorer från beräkningsprogrammet för att bättre anpassas till vindförhållandet i urban miljö. Metoden kan användas till att jämföra vindresurserna i olika städer. Den kan däremot inte användas till att lokalisera lämpliga platser i staden eftersom den bara kan ge en antydning om hur vindförhållandena kan se ut på regional nivå. För att få mer detaljerad information är det i så fall CFD-modeller som teoretiskt sett skall kunna vara användbara i och med den utvecklingen av 3D-modeller över städer som pågår för närvarande.

Det bästa alternativet för närvarande är den beräkningsmodellen som presenteras i kapitlet *3.5 Handberäkningsmodell för vind och höjd över tak* eftersom den är snabb, billig och ger en indikation om på vilken höjd vindkraftverket bör placeras. Det är en approximativ metod men det är en bra utgångspunkt då den tar upp de faktorer som kan förväntas påverka vinden. Se *bilaga 11.3 Beräkningsexempel*.

### 8.2 Framtidsutsikter

Marknaden måste tillåtas att utvecklas, tekniken kan inte förväntas vara lika utvecklad som för storskalig vindkraft. Projekten med de första urbana vindkraftverken kommer att vara de dyraste eftersom det är då som alla misstag måste göras. För att få tillräcklig erfarenhet behövs därför fler pilotprojekt. Det är först då som riktlinjer kan arbetas fram och en standardiserad beräkningsgång för vind i urban miljö kan utvecklas.

Oavsett om ett vindkraftverk har de perfekta vindförhållandena och möjligheten att producera stora mängder energi har det visats sig att kvaliteten på urbana vindkraftverk varierar väldigt mycket och många effektkurvor som leverantörer och tillverkare tillhandahåller är otillförlitliga. Som exploitör är det viktigt att kunna lita på den information som ges. Det krävs därför en standard så att de urbana vindkraftverken kan certifieras. Fortsätter trenden med överdriven data kommer den urbana vindkraften bli en ohållbar marknad att investera i och

riskan är att den bara betraktas som en fluga. Förutsättningarna som skulle kunna gynna lönsamheten är om förslagen om nettomätning och tillämpning av schablonmetod istället för timvis mätning godkänns av riksdagen.

Om inte hänsyn redan från början tas till val av plats, höjd, placering på taket, infästningar och ljudutbredning har det visat sig att vindkraftverken inte sällan blir helt felplacerade och knappt producerar någon energi eller låter för mycket och tvingas stängas av. Ska man satsa på urban vindkraft bör man se till att förhållanden är de rätta genom att göra en grundlig projektering, alltså göra rätt från början.



## 9 Slutsatser

Syftet med arbetet var att göra en studie över kunskapsläget om urban vindkraft med förhoppningen om att finna tumregler som kan följas i projekteringsfasen. Allt eftersom arbetet fortskred visade det sig att erfarenheterna var få och att resultatet även blev en sammanställning av de kunskapsluckor som finns. Nedan summeras de slutsatser som har konstaterats tidigare i rapporten.

### 9.1 Tumregler om vind

Generellt gäller att ju högre placering över taket desto bättre är vindresurserna och desto mindre turbulent är vinden. Vindkraftverket ska placeras högre än omgivande bebyggelses medelhöjd. En tumregel är att utgå från vindkraftverkets siktlinje och se till att den är fri. I de fall då detta inte kan åstadkommas bör den dominerande vindriktningen kontrolleras så att inga hinder finns i dess väg.

Vad gäller vindkraftverkets höjd över taket har vindtunneltest visat att en höjd på minst 1,5 meter över nocken vid branta tak rekommenderas trots att det turbulenta området kan nå så högt som 4,5 meter över taket. Resultat från CFD-mätningar visar däremot att en placering över nocken på minst 3 meter är mer lämplig. Om vindkraftverket placeras vid takfoten krävs en högre höjd över taket än om det hade placerats vid nocken. En annan tumregel är att turbinens höjd över ett lutande tak ska vara minst halva höjden av skillnaden mellan takfot och nock. Branta tak uppvisar dock ofta lägre vindhastigheter medan vindflödet över flacka tak är jämnare eftersom de orsakar mindre turbulens.

Den omgivande bebyggelsen sänker vindhastigheten jämfört med om vindkraftverket hade varit placerat på ett fristående hus. Men byggnader påverkar vindhastigheten minst när de står nära. Därefter är det inte förrän på ett avstånd kring 5-7 byggnadshöjder som vindhastigheten börjar öka igen.

Gällande vindhastighetsfördelningen i städer visar olika erfarenheter på olika siffror för formfaktorn  $k$  i Weibullfördelningen som är vindens sannolikhetsfördelning. Värdena 1,6, 1,85 och 2 har rekommenderats. Det poängteras att mer arbete borde göras inom detta område för att vindhastighetsfördelningen i urban miljö lättare ska kunna förutses.

### 9.2 Infästningar

Vad det gäller infästningarna konstateras att det är en väldigt viktig aspekt att beakta för att förhindra stomljud och vibrationer samt undvika skador i byggnadens skal. Det finns dock inga tumregler att tillgå eftersom infästningarna måste utformas specifikt för varje fall på grund av att förutsättningarna skiljer sig för olika hus. Det krävs därför riktlinjer för att underlätta i projekteringen. Att använda vibrationsdämpande material och undvika stumma infästningar är två förebyggande åtgärder.

### **9.3 Akustik**

Att beakta vindkraftverkets ljudnivå är en viktig aspekt eftersom den är avgörande för om vindkraftverket får vara i drift eller inte. Många vindkraftverk har fått stängas av på grund av störande ljud. Därför är det väldigt viktigt att veta vad vindkraftverket har för ljuddata. Vindhastigheter på 8 m/s som anses maskera ljud från vindkraftverk på grund av bakgrundsljud är ovanliga i städer.

Bakgrundsljudet från trafik är däremot högre, men inte på nätterna och därför kan maskering från trafik inte tillgodoräknas.

### **9.4 Marknaden**

Ett problem med marknaden för småskalig vindkraft är att den information som tillverkarna tillhandahåller sällan är verifierad av tredje part. Tester har visat att tillverkarnas effektkurvor sällan stämmer överens med hur vindkraftverkens effektkurvor ser ut i verkligheten. Även tillverkarnas ljuddata har visat sig vara väl optimistisk ibland. Det borde därför finnas en standard för hur effektkurvor och ljuddata tas fram. Ett problem är att det inte finns någon europeisk standard.

Urban vindkraft kommer aldrig att blir lika effektivt eller nå samma lönsamhet som storskalig vindkraft och ska därför ses som ett komplement och inte som en ersättning. Men marknaden är i sin utvecklingsfas och vindkraftverken blir allt effektivare. Även lönsamheten kan bli bättre i framtiden om efterfrågan ökar så att priserna pressas.

## 10 Referenser

### 10.1 Artiklar

- Anemometer – Sonic Anemometer (2009) Tillgänglig på  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer#Sonic\\_anemometers](http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer#Sonic_anemometers)> Hämtat 090604
- Bennie, Mols (2005) "Turby – Sustainable urban power from roof tops", Delft outlook 2005:2, [www]. Tillgänglig på  
<<http://www.tudelft.nl/live/ServeBinary?id=32943b78-dabd-4087-9cd9-b071f0c96cd3&binary=/doc/Outlook052-18-22.pdf>>. Hämtat 090519
- Bergström H. (2008), "Syntesrapport, Meteorologi – vindkraft", Elforsk Feb 2008,
- Bergström H. (2007) 1, "Säkrare beräkningar av vindtillgång" Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper 2007
- Bergström, H. (2007) 2, "Vindpotential i Sverige på 1 km-skala" Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper v. 2007, [www]. Tillgänglig på  
< [http://www.energimyndigheten.se/Global/Filer%20-%20Om%20oss/Vindkraft/Vindpotentialen%20i%20Sverige%20p%C3%A5%201%20km%20skala\\_2007.pdf](http://www.energimyndigheten.se/Global/Filer%20-%20Om%20oss/Vindkraft/Vindpotentialen%20i%20Sverige%20p%C3%A5%201%20km%20skala_2007.pdf)>. Hämtat 090519
- Bergivik Skog AB "Vindkraft" [www]. Tillgänglig på  
<<http://www.bergvikskog.se/templates/page.aspx?id=606>>. Hämtad 090526
- Berkelder M. (2003) "Elpriser", Västerbottens Kuriren 2003-08-27 Tillgänglig på  
<<http://www.exergi.se/Elpris20030821.doc>>. Hämtat 090526
- Best M., Brown A., Clark P., Hollis D., Middleton D., Rooney G., Thomson D. and Wilson C. (2008) "Small-scale Wind Energy - Technical Report", MET office Juli 2008 [www]. Tillgänglig på  
< <http://www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/6A29EA3A-C9B1-4129-849A-554030DEA081/0/SmallscaleWindEnergyTechnicalReport.pdf>>. Hämtat 090519
- Blackmore, Paul (2009) "Siting micro-wind turbines on house roofs", BRE Trust, FB 18 2009, ISBN 978-1-84806-022-78
- Boverket (2009) "Vindkraftshandboken" Tillgänglig på  
<<http://www.boverket.se/Global/Webbokhandel/Dokument/2009/Vindkraftshandboken.pdf>>. Hämtat 090526



Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, (2001) "Ljud från vindkraft, Rapport 6241", dec 2001, ISBN 91-620-6241-7 även [www]. Tillgänglig på <<http://www.naturvardsverket.se/sv/Nedremeny/Webbokhandeln/ISBN/6000/91-620-6241-7/>>. Hämtat 090519

Bussel v. GJ. W. & Mertens S. (2005) "Small wind turbines for the built environment" EACWE4, Prag 11-15 Juli 2005. [www]. Tillgänglig på <<http://www.lr.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=3dcbe092-4334-4d47-9f82-dff9ed15ab5e&lang=en&binary=/doc/2005Small%20wind%20turbines%20for%20the%20built%20environment.pdf>>. Hämtad 090526

Dutton A G, Halliday J A, Blanch M J (2005) "The Feasibility of Builing-Mounted/Integrated Wind Turbines (BUWTs): Achieving their potential for carbon emission reductions Final Report", Energy Research unit, 4 maj 2005, [www]. Tillgänglig på <[http://www.eru.rl.ac.uk/pdfs/BUWT\\_final\\_v004\\_full.pdf](http://www.eru.rl.ac.uk/pdfs/BUWT_final_v004_full.pdf)>. Hämtat 090519

Ellagen (SFS 1997:857). Stockholm: Näringsdepartementet. Tillgänglig på <<http://www.notisum.se/rnp/SLS/LAG/19970857.htm>>. Hämtat 090519

Encraft (2009), "Warwick Wind Trials – Final Project" [www]. Tillgängligt på <<http://www.warwickwindtrials.org.uk/resources/Warwick+Wind+Trials+Final+Report+.pdf>>. Hämtat 090519

Energimyndigheten (2008) 1 "PRIVATPERSON Vindkraft, Bygga och ansluta vindkraftverk för eget bruk" [www]. Tillgänglig på <[http://www.lst.se/NR/rdonlyres/C813D3FE-6A53-49F2-8869-524317941B8C/97496/Vindkraft\\_handbok\\_mindre\\_verk.pdf](http://www.lst.se/NR/rdonlyres/C813D3FE-6A53-49F2-8869-524317941B8C/97496/Vindkraft_handbok_mindre_verk.pdf)>. Hämtat 090519

Energimyndigheten (2008) 2 "Vindkartering" [www]. Tillgänglig på <<http://www.energimyndigheten.se/sv/Om-oss/Var-verksamhet/Framjande-av-vindkraft1/Bygga-vindkraftverk-/Vindkartering/>>. Hämtat 090526

Favonius "Om vindkraft"[www]. Tillgänglig på <<http://www.favonius.se/vindkraft.php>>. Hämtat 090526

Förordning (SFS 1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd, Stockholm: Miljödepartementet. Tillgänglig på <<http://www.notisum.se/rnp/SLS/fakta/a9980899.htm>>. Hämtad 090526

Johansson Å. & Sandberg J. (2006) "Vind i Bebyggd Miljö" Malmö högskola institutionen för samhälle och teknik (maj 2006).

Markovic S., Osbeck F. (2008) ”Vindkraftetablering i skog”, Högskolan i Halmstad Energi ingenjörprogrammet 2008, [www]. Tillgänglig på <<http://hdl.handle.net/2082/2074>>. Hämtat 090526.

Naturvårdsverket (2006) ”Konsekvensutredning av Naturvårdsverkets förslag till Allmänna råd om buller från vindkraftverk (till 2 kap. miljöbalken)”. Tillgänglig på

<[http://www.naturvardsverket.se/Documents/remisser/2006/allmanna\\_rad\\_om\\_buller\\_fran\\_vindkraftsverk/konsekvensutred.pdf](http://www.naturvardsverket.se/Documents/remisser/2006/allmanna_rad_om_buller_fran_vindkraftsverk/konsekvensutred.pdf)>. Hämtad 090526

Naturvårdsverket (2007) ”Vindens kraft – 15 vanliga frågor och svar om vindkraft”, 29 jan 2007, [www]. ISBN 91-620-8274-4 även Tillgänglig på <<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8274-4.pdf>>. Hämtat 090519

Naturvårdsverket (2009) ”Riktvärde för ljud från vindkraft”, 21 april 2009, [www]. Tillgänglig på

<<http://www.naturvardsverket.se/sv/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Buller-fran-vindkraft/Riktvarden-for-ljud-fran-vindkraft/>>. Hämtat 090519

Ny-teknik (2009) ”Tjäna tusenlappar – på rätt nätbolag”, 4 mars 2009, [www]. Tillgänglig på

<[http://www.nyteknik.se/nyheter/energi\\_miljo/energi/article529385.ece](http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/energi/article529385.ece)>. Hämtad 090526

Näringsdepartementet. (2008) ”Bättre kontakt via nätet – om anslutning av förnybar elproduktion”: betänkande. Stockholm: Söder L. 2008. Statens offentliga utredningar 2008:13, ISBN 978-91-38-22914-9 även Tillgänglig på <<http://www.regeringen.se/sb/d/9991/a/98514>>. Hämtat 090519

PBL, Plan- och bygglagen (SFS 1987:10). Stockholm: Miljödepartement. Tillgängligt på

<<http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/19870010.HTM>>. Hämtat 090519

Philips R., Blackmore P., Anderson J., Clift M., Aguiló-Rullán A. och Pester S. (2007) “Micro Wind Turbines in Urban environment – An assessment” BRE Trust FB 17 2007, ISBN 978-1-84806-021-0

Prövning av vindkraft Informationsblad om proposition; 2009. Regeringens proposition 2008/09:146. Tillgänglig på

<<http://www.regeringen.se/content/1/c6/12/26/44/04c23b3d.pdf>>. Hämtat 090519

Santamouris M. (2006) ”Environmental design of urban buildings”, Tillgänglig på

<<http://books.google.se/books?id=c-v7OSaxGSsC&pg=PA100&lpg=PA100&dq=urban+complicated+wind&source=bl&ots=XSZR73U2ai&sig=568T1GnKyEF4f7S2->

IXHoENZwcl&hl=sv&ei=1JInSuuUDYSK\_Qa40OXpAg&sa=X&oi=book\_result&ct=result&resnum=1#PPA100,M1>. Hämtad 090604

Small Wind Certification Council "For manufacturers", [www]. Tillgänglig på <<http://www.smallwindcertification.org/manufacturers.html>>. Hämtad 090526



Siroccoenergy, ”Vindfakta – lite fakta och de vanligaste frågorna och svaren”, [www]. Tillgänglig på <<http://www.siroccoenergy.se/Vindfakta.html>>. Hämtat 090519

SMHI (2007) ”Vindros”, [www]. Tillgänglig på <<http://www.smhi.se/cmp/jsp/polopoly.jsp?d=9291&a=26512&l=sv>> Hämtat 090519

SMHI (2004) ”Vindstatistik från 1961-2004”, Tillgänglig på <[http://www.smhi.se/content/1/c6/01/96/48/attachments/meteorologi\\_121-06.pdf](http://www.smhi.se/content/1/c6/01/96/48/attachments/meteorologi_121-06.pdf)>. Hämtad 090526

SV Energi AV (2008), ”Energiproduktionen i ett VVKV”, 25 sep 2008, [www]. Tillgänglig på <[http://www.egenvindkraft.se/PDF/Energiprod\\_VVKV.pdf](http://www.egenvindkraft.se/PDF/Energiprod_VVKV.pdf)> Hämtat 090519

SEK Svensk Elstandard, ”IEC” [www]. Tillgänglig på <<http://www.elstandard.se/om/iec.asp>>. Hämtad 090526

Sveriges Kommuner och Landsting (2008) ”Laserscanning och 3D hantering av data”, 21 okt 2008, [www]. Tillgänglig på <<http://www.skl.se/artikel.asp?A=54626&C=4909>>. Hämtat 090526

Vindkompaniet (2008) ”Fakta om vindkraft”, jan 2008, [www]. Tillgänglig på <[http://www.vindkompaniet.se/format/fakta\\_vindkraft.pdf](http://www.vindkompaniet.se/format/fakta_vindkraft.pdf)>. Hämtat 090526

Vindmølleindustrier (2006) ”Weibullfordelingen” [www]. Tillgänglig på <<http://www.windpower.org/composite-615.htm>>. Hämtat 090526

Wineur (2007) “Urban Wind Turbines – Guidelines for small wind turbines in the built environment” Feb 2007, [www]. Tillgänglig på <[http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL\\_WIND\\_TURBINES\\_GUIDE\\_final.pdf](http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf)>. Hämtat 090519

## **10.2 Böcker**

Glaumann M, Westerberg U. (1988), ”Klimatplanering vind”, Svensk byggtjänst

Mertens S. (2006) “Wind Energy in the Built Environment”, Brentwood: Multi Science, ISBN 0906522 35 8

Wizelius T. (2007) ”Vindkraft i teori och praktik”, Ungern: Tore Wizelius och Studentlitteratur upplaga 2:1, ISBN 978-9-44-02660-2

### **10.3 Mailkontakt**

Gustafsson, Mattias, (2009) 1 Gävle Dala Energikontor, e-mail 17 april 2009

Larsson, Karin, (2009) GIS-centrum, email 24 mars 2009

Lundmark Gunnar, (2009) Lundmark Akustik & Vibration, e-mail 14 maj 2009

Sandberg, Göran, (2009) professor Bygghvetenskaper LTH, e-mail 29 mars 2009

Wern, Lennart, (2009) 1 SMHI, e-mail 23 mars 2009

Wern, Lennart, (2009) 2 SMHI, e-mail 20 april 2009

### **10.4 Intervjuer**

Gustafsson, Mattias, (2009) 2 Gävle Dala Energikontor, telefonintervju 18 maj 2009

Loodin, Fredrik, (2009) WSP, samtal 2 april 2009

Pettersson, Mattias, (2009) Familjebostäder i Göteborg, samtal 2 april 2009

Scheuer, Johan, (2009) WSP Akustik, telefonintervju, 25 mars 2009

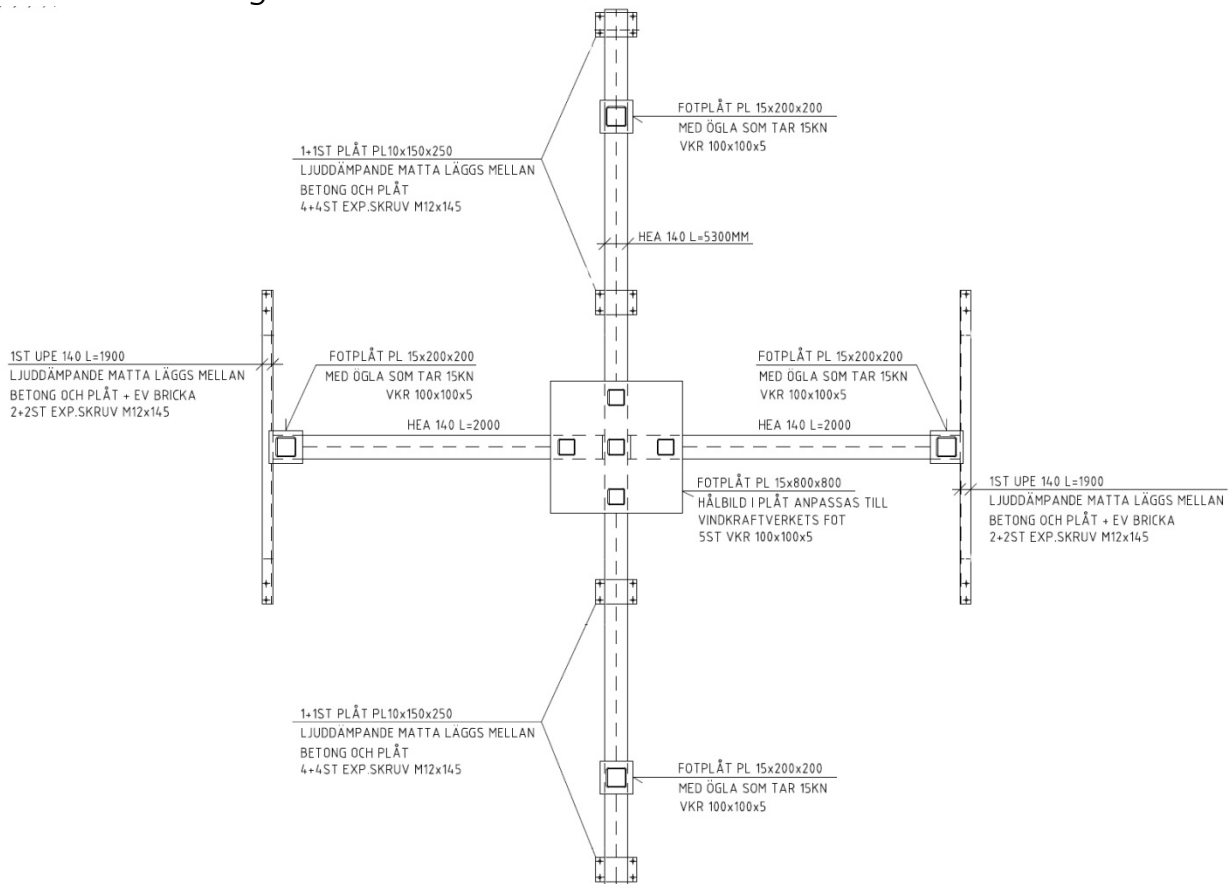
Söder, Lennart, (2009) Prof. i elkraftsystem KTH, telefonintervju 25 mars 2009

Åkesson, Lars, (2009) PitchWind Systems AB, samtal 2 april 2009

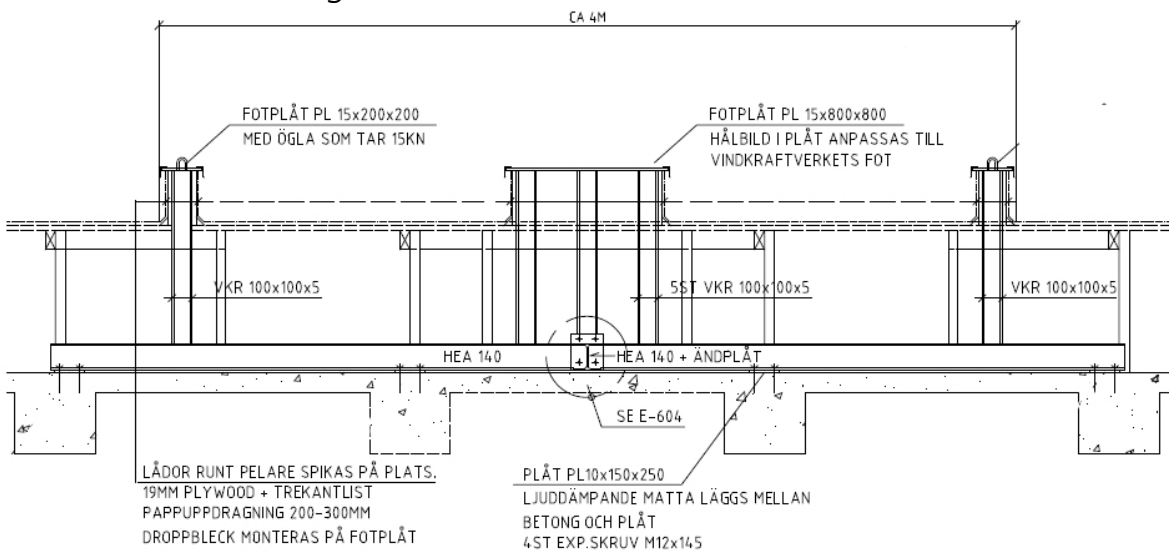


## 11.2 Exempel på infästning

### 11.2.1 Planritning



### 11.2.2 Sektionsritning



## 11.3 Beräkningsexempel

Ett beräkningsexempel görs för Familjebostäders takmonterade vindkraftverk på Siriusgatan i Göteborg med förutsättningarna enligt *tabell 5*. Den bebyggda arean,  $A_H$  och avståndet till yråhetskiftet,  $x$ , uppskattas med hjälp av karta. Värderna för  $z_{01}$  och  $z_{02}$  har hämtats ur *tabell 4*. Resterande indata har WSP Systems bidragit med. Eftersom huset ligger på en höjd är omkringliggandes byggnaders medelhöjd lägre, speciellt i dominerande vindriktning. Vindkraftverket är monterat i urban miljö och är ett kinesiskt VAWT med en märkeffekt på 6 kW.

Indata för familjebostäder	Enhet
Bredd	15 m
Längd	50 m
Höjd	20 m
$A_H$	0,25 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
$z_{01}$ , rural miljö	0.03 m
$z_{02}$ , urban miljö	0.8 m
H, medelhöjd	5 m
Avstånd till råhetskifte, $x$	5000 m
Potentiell vindhastighet <sup>177</sup>	4.1 m/s

Tabell 5, Indata för beräkningsexempel

### 11.3.1.1 Nollplansförskjutning

Nollplansförskjutningen,  $d$ , på grund av kringliggande byggnader fås av *ekvation 4* nedan.

$$d = \bar{H} - 4,3 \cdot z_{02} \cdot (1 - A_H) = 5 - 4,3 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,25) = 2,42m \quad (4)$$

Den nya nollnivån ligger på 2,42 m över marknivån. För att *log-law* förhållandet ska gälla måste  $z_{min}$  vara mindre än höjden till turbinen enligt *ekvation 5* nedan.

$$z_{min} = 1,5 \cdot d = 1,5 \cdot 2,42 = 3,63m \quad (5)$$

Eftersom huset höjd är 20 meter kommer avståndet till turbinen överstiga  $z_{min}$ , 3,63 meter, därför kan *log-law* för urban miljö, *ekvation 3*, användas. Innan medelvindhastigheten kan bestämmas måste dock höjden till turbinen beräknas.

### 11.3.1.2 Byggnadsutformningens påverkan på vinden

För att bestämma höjden på det turbulenta vindområdet över taket måste den karakteristiska byggnadsstorleken beräknas. Den faktor som bestäms av höjden, i detta fall  $D_{small}$  då denna är den minsta av längden och höjden, ska reduceras med nollplansförskjutningen,  $d$ . Sedan beräknas den karakteristiska storleken,  $D$ , på byggnaden enligt *ekvation 7* nedan. Med den karakteristiska storleken kontrolleras om turbinen är placerad i det turbulenta området eller i det parallella

<sup>177</sup> SMHI (2004)

flödet. Då vindkraftverket är placerat mitt på byggnaden kommer det största avståndet till kanten vara  $x=7,5$  meter, bredden dividerat med två, när långsidan är anblåst.

$$\begin{aligned}
 D_{large} &= 50m \\
 D_{small} &= \bar{H} - d = 20 - 2.42 = 17,58m \\
 D &= 17,58^{2/3} \cdot 30^{1/3} = 21,0m \quad (7) \\
 L_c &= 0,9 \cdot 21,0 = 18,9m \\
 L_c &= 18,9m > x = 7,5m \rightarrow \text{inom turbulensområdet}
 \end{aligned}$$

Turbinen hamnar inom det turbulenta flödet när långsidan är anblåst. För att kontrollera om turbinen står i parallellt flöde när kortsidan är anblåst görs samma beräkning för kortsidan.

$$\begin{aligned}
 D_{large} &= 20 - 2,42 = 17,58m \\
 D_{small} &= B = 15m \\
 D &= 15^{2/3} \cdot 17,58^{1/3} = 15,8m \quad (7) \\
 L_c &= 0,9 \cdot 15,8 = 14,2m \\
 L_c &= 14,2m > x = 25m \rightarrow \text{i parallellt flöde}
 \end{aligned}$$

Då huset är 50 meter långt är avståndet  $L_c$  mindre än  $x$  när gavelsidan är anblåst. Det innebär att när vinden blåser mot kortsidan kommer turbinen att arbeta i ett flöde parallellt med hustaket. Eftersom avståndet till turbinen däremot ligger inom turbulensområdet när långsidan är anblåst blir därför denna dimensionerande för höjden till turbinen. Med hänsyn till turbulensområdet över taket, *ekvation 8* nedan, beräknas det vertikala avståndet till vindkraftverkets rotors nedersta kant.

$$y = 0,28 \cdot D^{2/3} \cdot x^{1/3} = 0,28 \cdot 21,0^{2/3} \cdot 7,5^{1/3} = 4,17m \quad (8)$$

Detta innebär att vindkraftverket minst måste placeras på en höjd där rotorns underkant är 4,17 meter över taket.

Vinden som träffar vindkraftverket kommer att vara vinklad mot horisontalplanet. Denna vinkel bestäms med derivatan av *ekvation 8*, det vill säga *ekvation 10*, samt *ekvation 11* nedan.

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = 0,28 \cdot D^{2/3} \frac{x^{-2/3}}{3} = 0,28 \cdot 21,0^{2/3} \cdot \frac{7,5^{-2/3}}{3} = 0,185 \quad (10)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \tan^{-1}(0,185) = 10,5^\circ \quad (11)$$

*Diagram 4* visar att denna vinkel kan ge ett tillskott i energiproduktionen för en VAWT. Då dessa mätningar var gjorda för en annan typ av VAWT än Familjebostäderna kommer vi inte ta hänsyn till detta. Vad som är intressant är att

se att vissa vindkraftverk kan lämpa sig bättre i stadsmiljö och att de till och med kan utnyttja takets utformning för att producera mer energi.

Ett annat sätt att beräkna höjden till underkant rotor är med *ekvation 2*.

$$y = 0,28 \cdot \min(W_B^{7/9} \cdot H_B^{2/9}, W_B^{5/9} \cdot H_B^{4/9}) \quad (2)$$

$$W_B^{7/9} \cdot H_B^{2/9} = 50^{7/9} \cdot 20^{2/9} = 40,8$$

$$W_B^{5/9} \cdot H_B^{4/9} = 50^{5/9} \cdot 20^{4/9} = 33,3$$

$$y = 0,28 \cdot 33,3 = 9,3m$$

Denna höjd motsvarar nästan halva husets höjd och är inte rimligt att utgå ifrån, därför väljs istället den tidigare uträknade höjden till underkanten av rotorn på 4,17 meter. Familjebostädens vindkraftverk placerades på en navhöjd på 5 meter vilket även gör detta värde mer intressant.

### 11.3.1.3 Beräkning av vind- och energiresurs

Första steget är att beräkna höjden på det interna gränsskiktet vilket ges av *ekvation 6* nedan.

$$h_k = 0,28 \cdot z_{0,max} \cdot \left(\frac{x}{z_{0,max}}\right)^{0,8} = 0,28 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{3000}{0,8}\right)^{0,8} = 162 m \quad (6)$$

Den approximativa vindhastigheten i den urbana miljön beräknas enligt *ekvation 3* nedan. Den valda höjden,  $z$ , är här 20+4,17 meter över marken vilket är lägsta nivå till underkant rotorspets och den potentiella vindhastigheten på tio meters höjd är 4,1 m/s.

$$u(z) = 1,31 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_k}{z_{01}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_{02}}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_{01}}\right) \cdot \ln\left(\frac{h_k-d}{z_{02}}\right)} \cdot u_p \quad (3)$$

$$u(24,17) = 1,31 \cdot \frac{\ln\left(\frac{162}{0,03}\right) \cdot \ln\left(\frac{24,17-2,42}{0,8}\right)}{\ln\left(\frac{60}{0,03}\right) \cdot \ln\left(\frac{162-2,42}{0,8}\right)} \cdot 4,1 = 3,78 m/s$$

Eftersom turbinen är placerad centralt på taket påverkar byggnaden vindflödet över taket med faktorn  $C_{r,i}$  mellan 1,1 och 1,2 för alla vindriktningar enligt *diagram 1*. Det vill säga att den beräknade vinden ska förstöras enligt *ekvation 12* nedan.

$$u_{0,i} = 3,78 m/s$$

$$C_{r,i} = \frac{1,1 + 1,2}{2} = 1,15$$

$$u_i = C_{r,i} \cdot u_{0,i} = 1,15 \cdot 3,78 = 4,4m/s \quad (12)$$



Resultatet visar att den beräknade vindhastigheten på 4,4 m/s är ungefär 17 % lägre än den, av WSP Systems, uppmätta som ligger på 5,3 m/s på den aktuella platsen. I detta fall underskattades den beräknade vinden jämfört med den uppmätta. En anledning till detta kan vara att vindmätningarna inte är normalårskorrigerade och är därför för optimistiska. Ytterligare en anledning kan vara att Siriusgatan ligger på en höjd med bättre vindresurser vilket inte beräkningen tar hänsyn till. I *figur 14* beskrivs att en höjd orsakar en ökning av vindhastigheten med en faktor på cirka 1,4 vilket skulle ge en vindhastighet på 6 m/s. Vindmätningstationen där vinden uppmätts sitter även 3 meter högre än den beräknade höjden vilket kan ge bättre vindförhållanden.

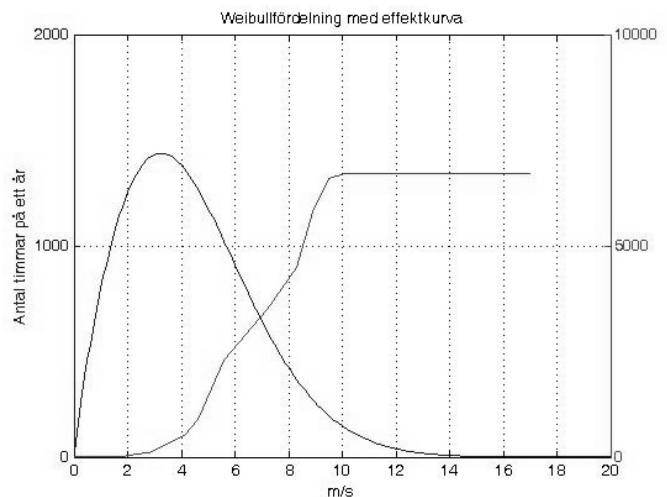
Eftersom vindenergin beror av kuben av vindhastigheten orsakar en liten minskning eller ökning av vinden en stor skillnad i den faktiska energiproduktionen. För att bestämma den årliga energiproduktionen för vindkraftverket används effektkurvametoden, enligt kapitel 2.7 *Beräkning av energi*. En Weibullfördelning för vind i städer kan uppskattas med ett A-värde på 1,12 multiplicerat med medelvindhastigheten och ett k-värde på 1,85 enligt kapitel 3.6.1.4 *Parametrar för Weibullfördelning*. Detta ger en Weibullfördelning som framgår i *diagram 7*.

$$A = 1,12 \cdot u_i = 1,12 \cdot 4,4 = 4,92$$

$$k = 1,85$$

Effektkurva för det VAWT som Familjebostäder monterade på huset redovisas i *diagram 7*. Vindkraftverket har en startvind vid 1,8 m/s och stoppvind efter 17 m/s.

Genom att jämföra Weibullfördelningen med den effektkurva som leverantören har angett kan vindkraftverkets årliga produktion beräknas, se *diagram 7*. Summeras antal timmar för varje vindhastighet multiplicerat med respektive effekt fås den totala energiproduktionen. I detta fall ska verket producera ca 13 000 kWh/år under givna förutsättningar. Då flertalet projekt i Storbritannien har visat att de angivna effektkurvorna inte överensstämmer med de verkliga effektkurvorna för vindkraftverk placerade i stadsmiljö är det inte rimligt att anta att denna produktion kommer att uppnås.



**Diagram 7**, Effektkurvametoden med effektkurvan från Familjebostäders VAWT och en Weibull-fördelning med parametrarna;  $A=4,92$  och  $k=1,85$ .