

Småskaliga vindkraftverk i urban miljö



Fahimeh Farhadian

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Förord

Jag utförde mitt examensarbete på uppdrag av Krafringen (tidigare Lunds Energi koncernen) under tiden mellan september 2013 och mars 2014. Jag kontaktade olika aktörer i energibranschen och fick prata med många kunniga och hjälpsamma personer som visade stort intresse och engagemang, vilket jag tackar för. Många ställde upp på utförliga och givande intervjuer via telefon och mail.

Jag vill framförallt tacka mina handledare: Jörgen Svensson (Lektor) på LTH, Ulrika Bergström (Avdelningschef) och Håkan Skarrie (Affärsutvecklare) på Krafringen som gett mig värdefull respons till mitt arbete med bra råd, feedback och insikter.

Jag vill tacka Andreas Olsson (produktutvecklare) på EgenEl, Sven Ruin från företaget Teroc AB med lång bakgrund inom vindkraft och energisystem samt Markus Berg (universitetslektor vid Institutionen för teknikvetenskaper), som alla har tagit sig tid och där jag fick insyn i deras kunskap som var väldigt värdefullt för mitt arbete.

Jag vill också nämna Morgan Widung (InnoVentum AB), Kenneth Lyckholm (Mast- och Tornunderhåll AB), Lennart Carlsen (Windon AB), Andreas Olsson (EgenEl AB), Lars Wikberg (SVIAB AB) och Erik Kyrkander (WindForce AB), som ville dela med sig av sina kunskaper och svarade på enkäten med stort intresse.

Slutligen vill jag tacka all personal på Krafringen som visade stort intresse för mitt arbete och motiverade mig ännu mer för att skriva detta intressanta examensarbete.

Malmö, den 3:e mars 2014

Fahimeh Farhadian

Sammanfattning

Vindkraft är en förnybar energikälla som ur miljösynpunkt är ett bra alternativ jämfört med fossila bränslen, och gör att miljöbelastningen regionalt och globalt minskar. Intresset för småskaliga vind- och solanläggningar för egen elproduktion har ökat under de senaste åren. Småskalig vindproduktion (<100 kW eller 200 m² svept yta, det finns många olika definitioner) är generellt sett ingen stor marknad, speciellt inte i Sverige. Småskaliga vindkraftverk som installerades över hela världen i slutet av 2011 motsvarar cirka 576 MW jämfört med en total kapacitet på 240 GW av stora vindkraftverk.

Den största andelen av små vindkraftverk kan hittas i två länder: Kina (motsvarar 225 MW) och USA (motsvarar 198 MW), följt av de medelstora marknaderna med 2-22 000 installerade enheter (5-50 MW total kapacitet) i Storbritannien, Kanada, Tyskland, Spanien, Polen, Japan och Italien. Det totala antalet installerade verk i Sverige år 2010 beräknades som 1700 enheter.

Produktion av elektricitet med små vindkraftverk påverkas av vissa faktorer. Effekten som finns tillgänglig i vinden är proportionell mot vindhastigheten i kubik. Det innebär att en dubblerad vindhastighet ger åtta gånger så stor effekt. Svepyta (arean som vindkraftverk verkar över) påverkar dock produktionen linjärt. Med detta i åtanke inser man snabbt att vindförhållanden är avgörande för elproduktionen i ett vindkraftverk. I städer finns det flera källor som påverkar dessa förhållanden såsom låga vindhastigheter, för att vinden bromsas på grund av olika objekt (2,5-3,5 m/s för tätt respektive öppen area som kan ha ökat med högre placering upp till 5 m/s). Andra faktorn är turbulens som utformas av olika objekt i omgivning samt själva formen av byggnader med tanke för ett byggintegrerade verk.

För ett byggmonterat småskaligt vindkraftverk måste man utöver plats, höjd och placering på taket som påverkar produktionen från verket, också ta hänsyn till andra faktorer såsom säkerhet och andra regler och krav som måste uppfyllas. Bland dessa finns exempelvis bygglov och krav för skugga, buller, infästningar för att förebygga vibration, stomljud och skador på byggnadens skal. Om detta inte tas i beaktning från början så blir antingen verket felplacerat och producerar väldigt lite el eller så låter det mycket och tvingas stängas av.

Ekonomisk lönsamhet är ett krav: Man vill gärna att ett vindkraftverk med livslängd på 20 år ska återbetala sig efter åtminstone 10 år för att investeringar på verket ska kännas lönsamt,

vilket beror på investeringskostnader och årsproduktion från verket. Dock är den årsproducerade elen som definieras av leverantörer inte tillförlitlig. Detta beror på att den beräknade årsproduktionen oftast gäller för verk vid medelvindhastighet upp till 5-6 m/s, vilket är osannolika förhållanden i en stadsmiljö.

I denna uppsats valdes 6 (1-4 kW) olika verk för att simulera årsproduktion efter tillgängliga vindmätningar från Krafringens vindstation vid Värpinge (öppen area, nära stan) som visade en medelvindhastighet på ca 3,3 m/s. Därefter har det genomförts ett nyckeltals jämförelse (investeringskostnader/ kWh) mellan dessa verk och ett storskaligt vindkraftverk på 2 MW och solpaneler på 3,5 och 4,5 kWp (den topp effekten som solceller kan producera). Det visar sig att småskaliga vindturbiner fortfarande är dyrare jämfört med de andra alternativen på grund av höga investeringskostnader mot lägre elproduktioner.

En ekonomisk analys gjordes sedan baserad på den elproduktion som simulerades fram vid medelvindhastighet på 5 m/s (den rekommenderade medelvind från leverantörer inför installation av ett verk) från 3 utvalda produkter (2 st. horisontella verk som haft lägre nyckeltal än de andra och ett vertikalt verk har valts för att analysen skulle genomföras för både olika typer av vindkraftverk). Den första kalkylen gjordes för dessa verk, utan att ta hänsyn till något ekonomiskt stöd. Det visade sig att inget av alternativen blev lönsamma för att investeringskostnader var för höga och den ekonomiska vinningen från elproduktionen var för låg. Detta berodde på dagens låga elpris och att produktionen från vindkraftverken var för liten.

Det visade sig att en ökning av elpriset (med 100-300%) behövs om dessa ovan nämnda verk ska återbetala sig under 10-11 år för en medelvindhastighet på 5 m/s. Det skulle också behövas ett stöd (feed-in tariff) mellan 1,5-10 kr/kWh för dessa verk, om de ska vara lönsamma (=återbetala sig efter 10-11 år) med antagandet av ett elpris på 43 öre/kWh.

Abstract

Wind power is a renewable energy source that environmentally is the good option compare to the fossil fuels, which reduces the environmental impact regionally and globally. Interest in small-scale wind and solar energy system for the production of electricity has increased in recent years. Small scale wind production (<100 kW or 200 m² swept area, there are many different definitions) has generally not a big market, especially in Sweden. Approximately the total installed small-scale wind turbines around the world was 576 MW by the end of 2011, this one could be compared with a total capacity of 240 GW for large wind turbines.

The most installed small wind turbines can be found in two countries: China (225 MW) and the USA (198 MW) , followed by the medium market with 2- 22000 installed units (from 5 to 50 MW total capacity) which is in the UK, Canada, Germany, Spain, Poland , Japan and Italy. The total number of installed small-scale wind turbines in Sweden was about 1700 units by the end of 2010.

Production of electricity by small wind turbines are affected by certain factors. The available power in the wind is thus proportional to the cube of wind speed. This means that a doubling of wind speed gives eight times more power. Swept area (an area that wind acts over) however, affect the production linearly. It would be realized quickly then, that wind conditions are very important for the production from a wind turbine. In cities, there are several sources that affect these conditions such as low wind speeds (2.5-3.5 m/s for the urban area to open area near the city, that can be increased with higher placement of wind turbine up to 5 m/s), and turbulence formed by different objects from the environment and the actual shape of the building .

For a building mounted small-scale wind turbines must be in addition to location, height and placement on the roof that influence the production, also take into accounts other factors such as safety and other regulations and requirements which must be fulfilled. These included planning application and requirements on the shade, noise, vibration to the building and damage to the building. If you do not take this into account from the beginning, so the turbine would be whether placed wrong and produces very little energy or it would cause too much sound and goes to be turned off.

Economic profitability is a requirement: It would be preferred that a wind turbine with a life

of 20 years could repay itself for at least 10 years, if that investment wants to feel worthwhile. This is due to investment costs and annual production of the plant. However, the produced electricity, which is defined by suppliers, is not reliable. This is because the estimated annual production is usually given at the average of wind speeds by 5-6 m/s, which is seldom happened in an urban environment.

In this essay 6 different models of small scale wind turbine from 1- 4 kW has been selected to simulate the annual production for available wind measurements from Krafringen's wind station at Värpinge (an open area) with an average wind speed of about 3.3 m/s. A metrics comparison (investment costs/kWh) has then been used between these works and a large-scale wind turbine with effect of 2 MW and solar panels on 3.5 and 4.5 kWp. It is seen that small wind turbines are still more expensive than the other options because of the high investment costs and lower electricity production.

An economic analysis was then been made for the three selected products (2 pcs horizontal wind turbines had lower metrics than the others and a vertical wind turbine was also chosen with the idea that the analysis would be conducted for both types of wind turbines). The first analysis was done for these turbines at wind speed of 5 m/s (the recommended average wind from suppliers before installation of a work) without concerning about some types of incitements. It showed that none of the options were profitable because of the high investment costs and the low economic benefits from energy production, which is dependent on the current low electricity price and the low production from wind turbines.

The other analysis showed that the increase of electricity prices around 100- 300 % is needed, if these above mentioned turbines will repay itself in 10 to 11 years for an average wind speed of 5 m/s. It would then be required an incitement (feed-in tariff) between 1.5 to 10 SEK /kWh for these turbines, if they want to be profitable (= pay for itself after 10-11 years) with an electricity cost of 43 öre /kWh.

Innehåll

Förord.....	i
Sammanfattning.....	ii
Abstract.....	iv
1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Metod.....	1
1.3 Avgränsningar.....	2
2 Småskaliga vindkraftverk ur ett helhetsperspektiv.....	3
3 Applikationer och kategorier/definitioner.....	6
3.1 Definitioner.....	6
3.2 kategorier.....	6
3.3 Applikation vid tillgång till öppet landskap och hav.....	7
3.4 Applikation i urban miljö.....	7
4 Teknik och funktion.....	11
4.1 Olika delar av vindkraftverk.....	11
4.2 Olika typer av vindkraft.....	14
4.3 Funktion.....	20
5 Vindförhållanden.....	27
5.1 Vindprofil.....	27
5.2 Nollplan.....	29
5.3 Vind i urban miljö.....	30
6. Placering av småskaliga vindkraftverk i urban miljö.....	37
6.1 Innovativa placeringar av småvindturbiner i urban miljö.....	40
7 Regler och kriterier kring nätanslutning av småskaligt vindkraftverk.....	42
7.1 CE-märkning för vindkraft.....	42
7.2 Miljöaspekter.....	43
7.3 Bygglov.....	45
7.4 Tekniska krav för anslutning.....	46
7.5 Kundernas krav.....	50
8 Marknadsöversikt.....	51
8.1 Intervju med leverantörer.....	51
8.2 Sammanställning av samtliga undersökta verk.....	55
8.3 Erfarenhet från tidigare projekt.....	56

9 Ekonomiska aspekter.....	61
9.1 Lönsamhetskalkyl	65
9.2 Lönsamhetskalkyl utan någon form av stöd.....	68
9.3 Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion	70
9.4 Lönsamhetskalkyl utifrån förväntat elpris.....	72
9.5 Lönsamhetskalkyl med förväntade stöd	73
10 Analys och diskussion.....	76
11 Slutsats och framtidsutsikter.....	83
12 Referenser	84
13 bilagor.....	90
Bilaga A: Känslig analys för olika medelvindhastigheter i Värpinge-Weibullfördelning och beräkning av K& C:.....	90
Bilaga B: Tekniska data på olika vindkraftverk:.....	92
Bilaga C: Effektkurva på de 6 utvalda verk enligt relevanta leverantörer, och dess beräknade Cp:	99
Bilaga D: lönsamhetskalkylverktyg.....	105
Bilaga E: Kalkyl analysen för samtliga utvalda vindkraft i form av tabell.....	108
E1: Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion	108
E2: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade elpris.....	121
E3: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade stöd till inmatade överskottsel:.....	123
Bilaga F: Skickade enkät till relevanta företag och leverantörer:.....	126
Bilaga G: Förklaring av Buck-Boost funktion:.....	127
Bilaga H: Rekommenderade länkar:.....	128

1 Inledning

För att uppnå de uppsatta klimatmålen har energifrågan blivit en viktig del av politiken inom EU som har satt upp ett mål till 2020 som innebär 20 % energieffektivisering, 20 % förnyelsebar energi i energisystemen och 20 % minskning av växthusgasutsläpp. De uppsatta målen innebär att andelen vindenergi troligen måste öka från dagens 7 % till 15-17 % till år 2020 inom EU. Nuvarande diskussion för mål 2030 i Sverige är att öka vindenergin till upp till 28,5 % [1].

Det ställdes bland annat bindande krav år 2009 på att Sverige ska uppnå en andel om minst 49 procent förnybar energi till år 2020. Sveriges senaste rapportering i december 2011 visar att den totala andelen energi från förnybara energikällor uppgick till 47,8 % år 2010 [2].

Sveriges elproduktion produceras i stora anläggningar med långa transmissionsavstånd till konsumenten och består till största del av vattenkraft och kärnkraft som tillsammans svarar för ca 85 procent av den totala elproduktionen [3].

Småskalig elproduktion har på senare tid ökat och möjligheten att producera förnyelsebar el nära konsumenten har blivit bättre. Solceller och småskaliga vindturbiner används uteslutande för att producera förnyelsebar el nära konsumenten. Eftersom det inte finns stora sammanhängande och obebyggda ytor tillgängliga i urbana miljöer kan småskaliga anläggningar integreras i befintliga byggnader. En outnyttjad yta i urbana miljöer är hustak vilket kan användas vid elproduktion [66].

1.1 Syfte

Denna studie syftar till att ge en överblick av småskaliga vindkraftverk samt vilka krav som måste ställas för att anpassa dem till installation i urban miljö. Studien ska också syfta till att undersöka vilka ekonomiska faktorer som påverkar resultatet av investering av småskaligt vindkraftverk i urban miljö och åtgärder för att få ekonomisk lönsamhet.

1.2 Metod

Arbetsgången i detta examensarbete har varit uppdelad i tre huvuddelar. En inledande del, bestående av den information som inhämtades från litteraturstudier, Internet samt intervjuer (under referens) och enkät som skickades till relevanta aktörer. Därefter en del bestående av analys och känslighets analys (olika medelvindhastigheter) över 6 utvalda verk för att simulera riktiga årsproduktioner med hjälp av hämtade vindmätningar och weibullfördelning

samt verkens tillgängliga effektkurva. Det genomfördes även en analys med ett beräkningsverktyg som skapades i Excel för att undersöka faktorer som har en ekonomisk påverkan och som kan påverka att investeringar i vindkraft i urban miljö blir ekonomiskt lönsamt. I den avslutande delen utvärderas resultaten och ges en allmän analys över hela studien.

1.3 Avgränsningar

I studien visas senare att det finns olika definition för små skaliga vindturbiner och därav har storleken på dessa vindkraftverk begränsats till 4 kW. Undersökning och intervju med relevanta leverantörer har utförts för alla verk upp till den ovan nämnda storleken.

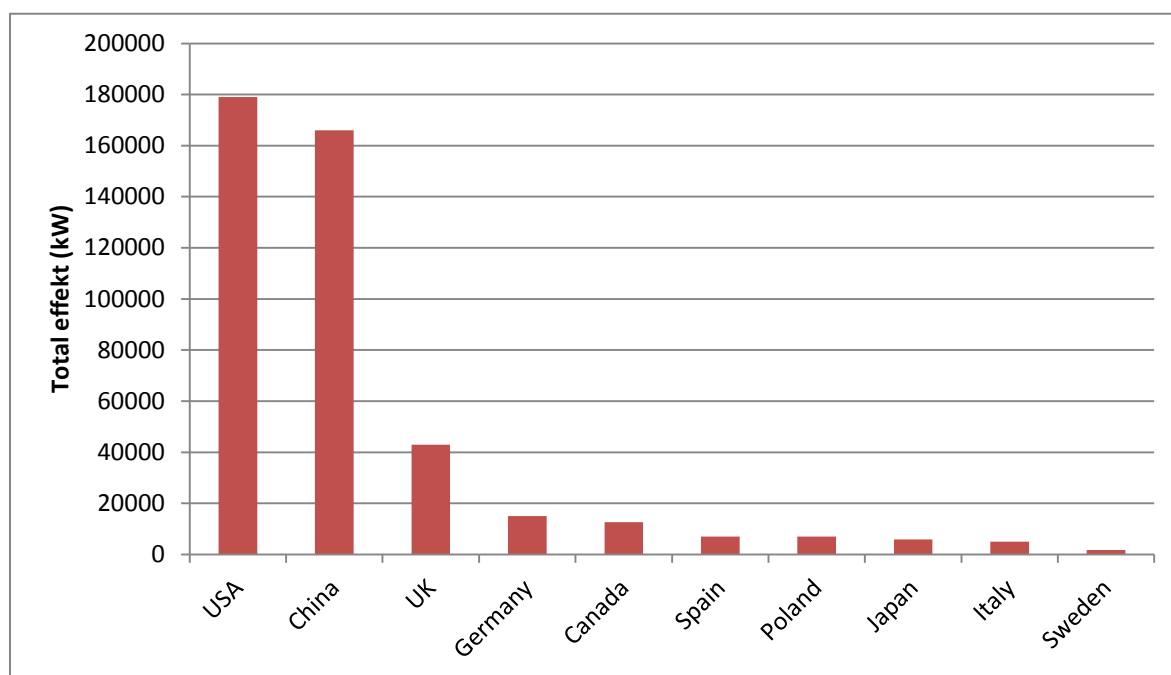
I denna studie var nätanslutna verk av intresse och därför har undersökningar kring krav och simulering och lönsamhets kalkyl utförts för 6 utvalda nätanslutna verk.

Vindmätningar inhämtades från två olika ställen i Lund. Akademiska hus lämnade vindmätningar för ett tätbebyggt område i Lund. Då vinddata från Akademiska Hus visade låga medelvindhastigheter hämtades även mätserier från Krafringens mätstation på Värpinge Norr vilken är en stadsdel i västra Lund. Värpinge Norr är inget bostadsområde, utan består bland annat av jordbruksfält och golfbana. Denna station ligger vid Värpinge Golfbana, och räknas som ett öppet landskap. För samtliga analyser över elproduktion använts weibullfördelning som baseras på medelvindhastigheten. För att beräkna medelvindhastigheten, har vindmätningar valts (för åren 2010-2011) från Värpinge station.

2 Småskaliga vindkraftverk ur ett helhetsperspektiv

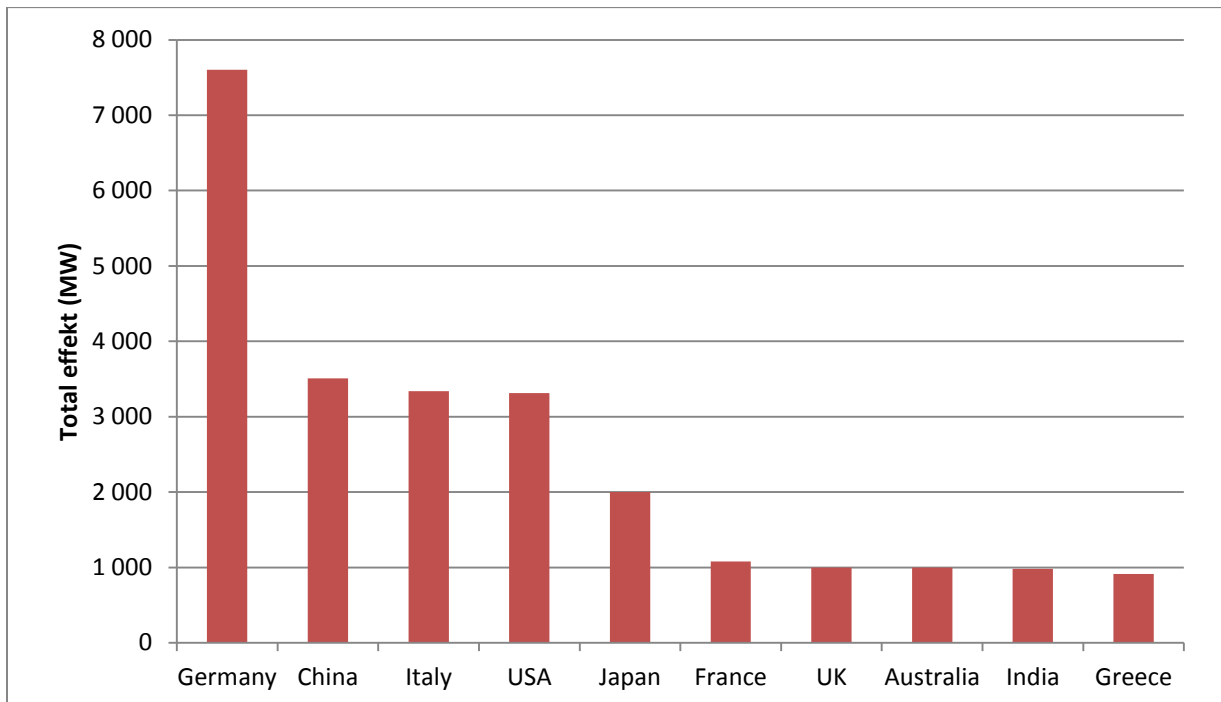
WWEA (World Wind Energy Association) har släppt en uppdaterad version av rapporten ”Small Wind World 2012” [4, 5]. Enligt rapporten var ungefär 730 000 småskaliga vindkraftverk som installerades över hela världen i slutet av 2011. Antalet av totala vindkraftverk var ca 656 000 enheter år 2009. Detta var ca 521000 år 2010, och 460000 enheter under år 2008. Dessa små vindkraftverk motsvarar en total kapacitet på cirka 576 MW (slutet av 2011), jämfört med en total kapacitet på 240 GW av stora vindkraftverk [4].

Figur 1 visar att den största andelen av de små vindkraftverken finns i två länder, Kina och USA, följt av de medelstora marknaderna med 2-22 000 installerade enheter och 5-50 MW total kapacitet i: Storbritannien, Kanada, Tyskland, Spanien, Polen, Japan och Italien. Total installerade småskaliga vindkraftverk i Sverige år 2012 beräknades som 1700 kW. År 2020 räknar WWEA att den totala installerade kapaciteten av små vindkraftverk kommer att nå 5 GW [4].



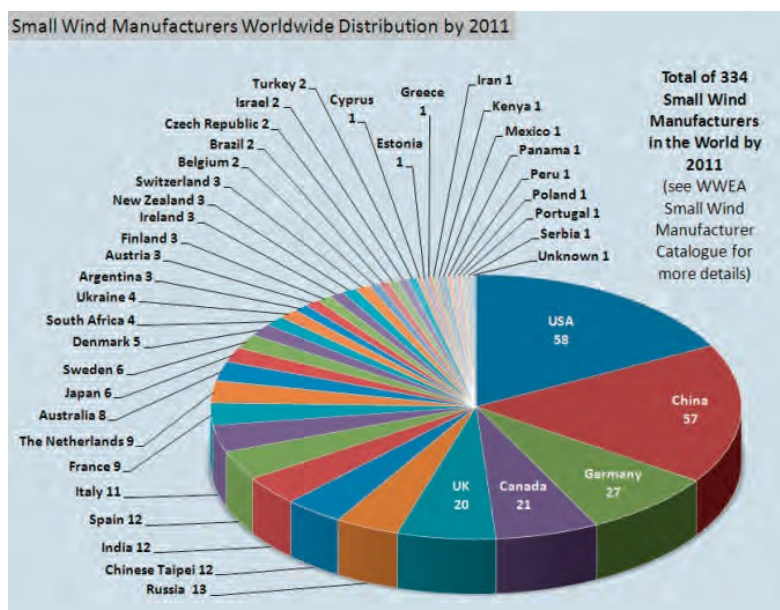
Figur 1: Total installerade effekt på små vindkraftverk vid slutet av 2010 [4].

Figur 2 visar de 10 länder som är störst på solcellsmarknaden. Detta kan ge en bra överblick över två olika alternativ (solceller/vindkraft) för urban miljö. Den total installerade effekt på solceller på den Svenska marknaden år 2012 var 8,4 MW [6,7].



Figur 2: Total installerade effekt på solceller vid slutet av 2012 [6]

Idag finns mer än 330 småskaliga vindkraftstillverkare i 40 länder på alla kontinenter och ytterligare omkring 300 företag som tillverkar utrustning till den lilla vindkraftsindustrin. De flesta av tillverkarna är fortfarande små och medelstora företag. Figur 3 visar att mer än hälften av dessa tillverkare finns i endast fem länder, nämligen i Kina och USA, liksom i Tyskland, Kanada och Storbritannien [4].



Figur 3: Antal småskaliga vindkraftverkstillverkare över världen [4]

Under det senaste årtiondet användes småskaliga vindturbiner (=SWT) allt mer för on-grid (nätansluten) effektgenerering. På Industriländernas marknad år 2009 såldes ca 34,4 MW on-grid vindkraftverk med en effekt mellan 10- 100 kW, jämfört med ca 7,6 MW sålda som off-grid (icke ansluten) system. Trots den stora efterfrågan på SWT i utvecklade västländer, ser marknaden svag ut. Kostnader spelar fortfarande stor roll för etablering av SWT. I USA varierar den installerade kostnaden för en SWT från 3 000 till 6 000 USD per kW (19 200- 38 400 SEK). Detta är när elpris ligger på ca 0,15 till 0,20 USD per kWh (0,96- 1,28 SEK). I Kina däremot ligger det genomsnittliga priset för en SWT på 10 000 CHY(ca 10100 SEK), vilket är en tredjedel av kostnaden i USA [4]. Ett off-grid system kräver mer elektriska justeringar. Ett sådant system består av kontroller vilka är konstruerade för att undvika överladdningar samt batteri som beroende på dess kapacitet och kvalitet, kan variera väldigt med priset, vilket oftast gör ett off-grid system dyrare än nätanslutna verk [72]. Kostnader för ett nätanslutet verk med effekt på 1 kW inklusive växelriktare ligger genomsnitt på ca 68 000- 75 000 SEK. Dessa priser är fortfarande exklusive installation och underhållskostnader [8]. Försäljning och produktion är fortfarande beroende av statliga incitament i form av stödjande politik eller finansiella stödprogram. Dessa har visats under kapitel 8 med hjälp av ett beräkningsprogram.

3 Applikationer och kategorier/definitioner

Efter svaren på enkäten (bilaga F) som skickades till leverantörer, visade det sig att det är allt fler som är intresserad av egen elproduktion via förnybara anläggningar såsom sol och vind.

3.1 Definitioner

Med mikroproduktion från vind pratar man om en grupp vindturbiner som kallas för småskaliga verk. Det saknas en enhetlig definition av ordet "små" i vindkraftsindustrin. Den oklara definitionen har skapat en term som beskriver vindkraftverk med en nominell kapacitet från 6 watt upp till 300 kW[4].

Små vindkraftverk kan definieras av dess ursprungliga egenskaper att producera en liten mängd el för att täcka en del av hushållsbehovet. Om man antar att små vindkraftverk används för att förse de små hushållens konsumtion, begränsas effekten då upp till 100 kW [4].

IEC 61400-2 definierar småskaligt vindkraftverk (SWT) som har en rotor med svept area på mindre än 200 m², vilket motsvarar en nominell effekt på ungefär 50 kW. Detta genererar i sin tur en spänning under 1 000 V AC eller 1500 V DC [4].

För närvarande sätter länder upp sina egna definitioner på små vindkraftverk. Skillnaden i den övre kapacitetsgränsen av små vindturbiner varierar mellan 15 kW till 100kW för de fem största länderna med små vindkraftverk [4].

Enligt ett gemensamt projekt som stöds av EU-programmet "Intelligent Energy Europe" och har utförts av fem organisationer: Axenne och ADEME från Frankrike, IT Power från UK, HORISUN och ARC från Holland, definieras SWT som turbiner med effektivnivå från 1 upp till 20 kW och de småskaliga verken hänvisas till Urbana vindkraftverk [9].

I Sverige förklarades definitionen av SWT dock på Vindlov under 3 kategorier för olika vindkraftsstorlekar [10].

3.2 kategorier

3.2.1 Microverk

Ett så kallat microverk definieras som ett vindkraftverk med en totalhöjd på maximalt 20 m och med en rotordiameter på maximalt 3 m. Efter en genomgång av alla befintliga turbiner (bilaga H) visade det sig att de flesta verk med rotordiameter mindre än 3 m har en effekt på

max 4 kW. De intervjuade leverantörerna satte också en gräns på 4 kW för vindkraftverk som kan installeras i urban miljö. I denna uppsats har därför gränsen satts av micro vindkraftverk upp till 4 kW.

3.2.2 Gårdsverk

Ett så kallat gårdsverk definieras som ett vindkraftverk med en totalhöjd (inklusive mast eller torn) på 20-50 m eller ett verk vars rotordiameter överstiger 3 m. Det vill säga ett verk med motsvarande effekt på 4-50 W.

3.2.3 Medelstora verk

Med medelstora verk menas ett vindkraftverk som har totalhöjd mer än 50 m eller minst två vindkraftverk av gårdsverk typ som står tillsammans.

I de två sistnämnda storlekarna behövs alltid bygglov, men för den första bara om verket skulle installeras på byggnader. Detta förklaras mer i kapitlet 7 under rubriken bygglov.

3.3 Applikation vid tillgång till öppet landskap och hav

Vindkraftverk måste placeras där det blåser. Vindens energiinnehåll ökar med kuben på vindhastigheten. Ett verk vid kusten kan då producera 25-30 procent mer än ett verk några kilometer in på land. Vindtillgången är avgörande om ett installerat vindkraftverk ska bli ekonomiskt lönsamt [11]. I kapitel 9 visas att ett vindkraftverk på 3 kW med bra tillgång till vind (medelvind ca 7 m/s) kan konkurrera ekonomiskt med en solcellsanläggning som har en effekt på 3,5 och 4 kWp. Detta kan väcka intresse för mer satsning på småskaliga vindkraftverk som en förnybar energikälla nära konsumenter i stadsmiljö, speciellt för de områden där det är möjligt att utnyttja vindkraftverk.

3.4 Applikation i urban miljö

3.4.1 Fristående -off grid

På områden som inte ingår i distributionsnätet går det att täcka det lokala elbehovet med små vindkraftverk genom lagring utav el i en batteri bank [68, 72]. Fristående verk används inte så mycket i urban miljö med hänsyn tagen tillgång av elnät. Å andra sidan finns intresse för detta system i vissa reklamskyltar eller parkeringsplatser [68].

Till alla off-grid system (icke ansluten), medföljer normalt en extern controller som automatiskt skyddar batteriet genom en dumplast när spänningen till batteriet uppnått max tillåten spänning. Det finns nu en effektivare controller som är datorstyrd för optimering av

spänningsförhållanden mellan vindturbin och batteri. Controllern reglerar upp spänningen med hjälp av en boost-funktion (bilaga G) för att ladda batterier med låg vindhastighet. Vid hård vind hjälper buck-funktionen till att istället sänka spänningen till laddnivå. Vid tillfällen då batterier är fulla och el-förbrukningen är låg finns en skyddande dumplast som omvandlar energin i värme [12, 13].

3.4.1.1 Hybridanläggning- vind och sol

Hybridsystem bygger på en kombination av vindkraftverk och solceller. Ett krets diagram över en hybridanläggning visas i figur 4, och figur 5 visar en bild på hybridanläggning. Den stora fördelen med vindkraft solar hybrid systemet är att när sol- och vindkraftproduktioner används tillsammans, komplettera de varandra vid olika förhållande. Ofta när det inte finns någon sol kan det finnas gott om vindkraft. Vindhastigheter är ofta låga i perioder (lunchtid & sommar) när solens resurser är som bäst. Å andra sidan är vinden ofta kraftigare i perioder (kvällstid, vår och vinter) när det är mindre solresurser [68, 74].

Tabell 1 visar medelvindhastighet per månad under år 1983- 1993 i Lund. I den ses att medelvindhastigheten under sommartiden är lägre än de andra perioderna, men däremot är solinstrålningen högre i samma period jämfört med höst och vintertiden [24].

Tabell 1: Visar vindhastighet och solinstrålning under perioden 1983-1993 i Lund för varje månad [24]

Variabel	JAN	FEB	MARS	APR	MAJ	JUN	JUL	AUG	SEP	OC	NO	DE
Solinstrålning, kWh/m ² /dag	0.49	1.16	2.34	3.85	5.19	5.43	5.31	4.41	2.86	1.47	0.75	0.39
Klarhet, 0 – 1 ^{a)}	0.33	0.39	0.44	0.48	0.50	0.48	0.49	0.49	0.45	0.38	0.39	0.35
Temperatur, °C	-0.75	-0.43	2.02	6.35	11.87	15.27	17.57	17.32	12.77	8.49	3.05	0.09
Vindhastighet, m/s ^{b)}	5.18	4.53	4.51	4.10	3.83	3.72	3.78	3.77	4.41	4.61	4.42	4.63
Nederbörd, mm	55	34	45	41	43	56	67	62	66	63	71	66
Våta dagar, d	17.3	13.0	14.7	12.6	12.5	12.2	14.2	13.5	14.8	15.2	17.3	17.3

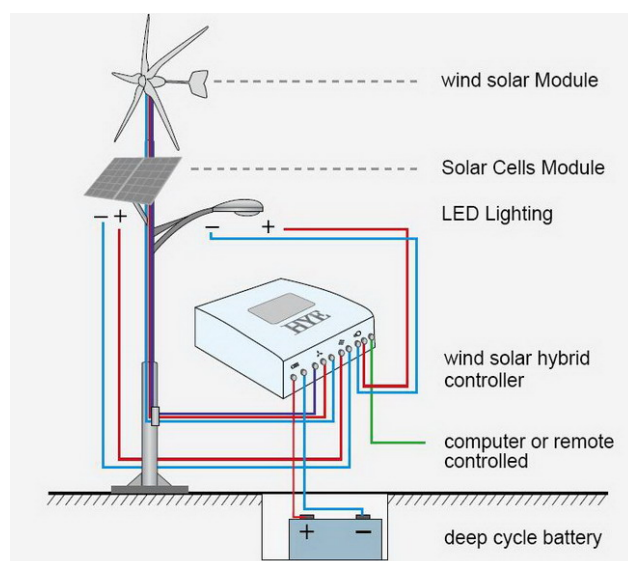
- a) Det är den del av solinstrålning på toppen av atmosfären som når ytan av jorden. 0 = mycket mulet och 1 = soligt.

- b) siffrorna visar genomsnittlig vindshastighet för den månad under en 10 års period (juli 1983-juni 1993). Vindhastighetsvärden är tagna 50 m över jordytan.

Luftens densitet varierar också beroende på temperatur och luftfuktighet. Luftens densitet påverkar energiuttaget ur vinden [16, 17]. Det kan skilja 20-40 % mellan en kall vinterdag och en varm sommardag med samma vindstyrka. Tabell 2 visar några exempel på luftdensitet beroende på temperatur och luftfuktighet (RF) [18].

Tabell 2: Några exempel på luftens densitet [kg/m^3] [18]

Temperatur $^{\circ}\text{C}$	Densitet vid olika relativ fuktighet		
	(torr luft) RF = 0 kg/m^3	Luftens densitet vid RF = 50 % kg/m^3	Luftens densitet vid RF = 100 % kg/m^3
-20	1,3942	1,3939	1,3936
-10	1,3412	1,3405	1,3399
0	1,2921	1,2906	1,2891
+10	1,2464	1,2436	1,2407
+20	1,2039	1,1987	1,1934



Figur 4: Kretsdiaqram över ett hybridsystem (vind- sol)[16]



Figur 5: Bild över en hybridanläggning [16]

3.4.3 Nätanslutna- bygg monterade verk

Tidigare har förklarats under 3.1.1 att storleken på SWT i denna studie begränsades till max 4kW, vilket innebär vindkraftverk som är särskilt utformade för urban miljö och kan placeras på byggnader eller på marken bredvid byggnader.

Med nätanslutna anläggningar menas att man kan försörja en del av sitt eget elbehov och samtidigt mata in överskott av den producerade elen från anläggningen till nätet. Det innebär att kunderna kan tjäna pengar motsvarande den sålda elen till elnätbolaget. Det finns olika typer av dessa vindturbiner på marknaden, det vill säga horisontal- vertikala axlade med speciell design som anpassat till urban miljö, vilket förklaras mer under kapitel 4. Figur 6 visar två olika typer av SWT som är takmonterade.



a) Swift (2,5 KW)



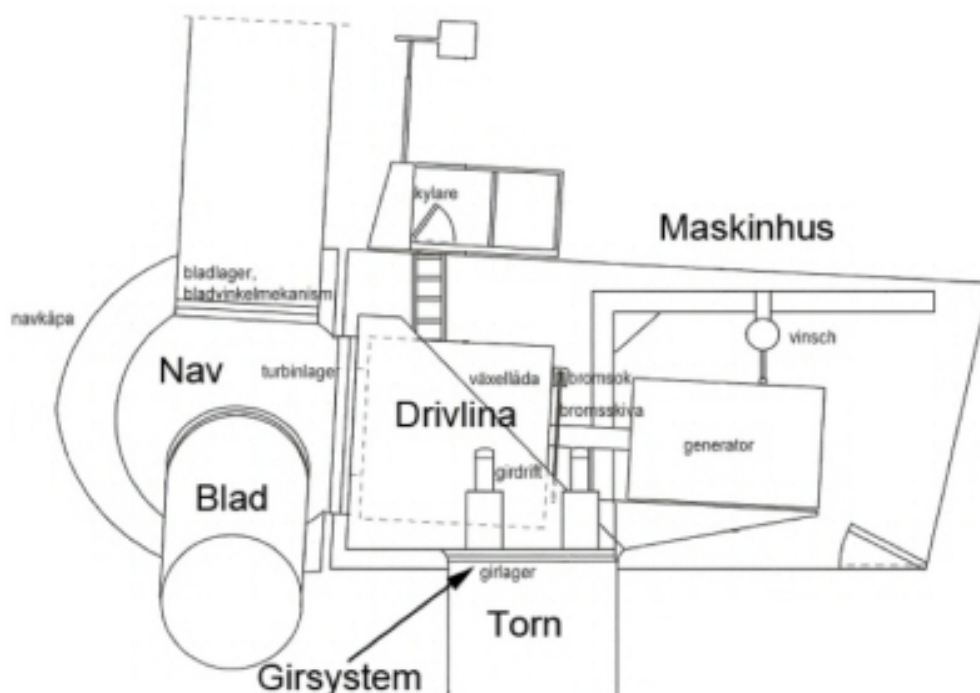
b) Turby (1,9 KW)

Figur 6: Två bilder på små nätanslutna och takmonterade vindkraftverk a) Swift, horisontalaxlat verk, b) Turby, vertikalaxlat verk) [9]

4 Teknik och funktion

4.1 Olika delar av vindkraftverk

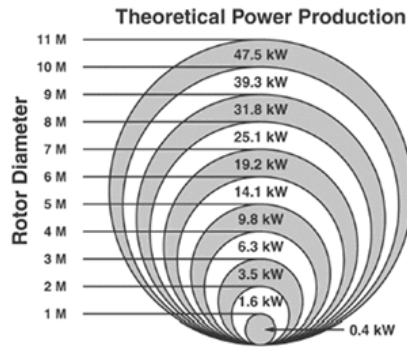
Ett vindkraftverk består i huvudsak av en rotor och ett maskinhus högst upp på vindkraftverkets torn. Rotorn består av blad vilka är monterade i ett nav tillsammans med bladlager. Generatoren och annan känslig utrustning sitter skyddat i den så kallade nacell (maskinhuset). Vinden får rotorbladen att snurra, och rotationen omvandlas till el i generatoren [11]. Figur 7 visar på olika delar av ett vindkraftverk.



Figur 7: Olika delar av ett vindkraftverk [30]

4.1.1 Rotor

Effekten ökar i kvadrat proportional med bladlängden eller nämligen ju längre blad, desto högre möjlig maximal effekt (se ekvation (4.2)). Figur 8 visar en skiss över vindkraftseffekten relativt bladstorleken [22]:



Figur 8: Ökning av vindkraftseffekt beroende på ökning av bladstorleken för ett verk med effekt på 400 W från början [22]

Materialvalet för rotorblad är viktigt med tanke på att de är utsatta för olika vindstyrkor i olika riktningar. Vikt och robusthet är de två viktigaste faktorerna att ta hänsyn till och därför tillverkas de flesta rotorblad idag av glasfiberarmerad polyester eller epoxi och kolfiber. Den sistnämnda ger dessvärre en högre materialkostnad [38].

4.1.2 Maskinhuset

Maskinhuset är den enhet som monteras högst upp på tornet (masten, för små verk). I maskinhuset finns alla delar som ska skyddas, exempelvis generatorm. Här omvandlas mekanisk energi till elektrisk energi [11].

4.1.3 Generator

Generatorm består av två delar, en roterande ”rotor” och en stillastående ”stator”. När rotorn snurrar skapas ett magnetfält som statorn utnyttjar för att inducera elektrisk spänning. Det finns två grundtyper av generatorer, synkron och asynkron för produktion av växelström [67].

4.1.3.1 Asynkrongenerator

En asynkrongenerator styrs av elnätets frekvens. Vid låga vindhastigheter drar generatorm ström från nätet (förbrukar reaktiv effekt). När vindhastigheten stiger ökar varvtalet och generatorm kan börja alstra ström till nätet. Vilket varvtal (synkrona hastighet) som krävs för att strömmen ska matas ut på nätet bestäms av antalet poler. I allmänhet kan den synkrona hastigheten beräknas med ekvation (4.1) [28]:

$$n = 60 \cdot f / (P/2) \quad (4.1)$$

n = Synkrona hastighet i rpm

f = Frekvens i Hz

P = Antal poler

Till exempel har det svenska elnät en frekvens på 50 Hz vilket kräver ett varvtal på 1500 rpm och en generator med fyra poler [67, 39].

En växellåda behövs som ett komplement till en asynkrongenerator för att kunna komma upp i dessa rotationshastigheter. Vid högre vindhastigheter och därmed högre vridmoment, bromsas rotationen med varvtalsreglerande blad eller med vridaxel och mekanisk broms. En kompletterande växellåda och mekanisk broms leder till ökat underhåll och många rörliga delar som kan gå sönder. Dessutom gör de också verket tyngre [39, 67]. Nästan alla vindkraft med en effekt mindre än 5 kW saknar växellåda på grund av onödigt vikt [70].

Under drifttiden producerar verken aktiv effekt men förbrukar reaktiv effekt som måste hämtas från elnätet. Detta orsakar onödigt höga strömmar. Kondensatorer för att minska den reaktiva effektförbrukningen och anordningar för mjukstart behövs för att motverka den onödigt höga strömmen som orsakas av asynkrongenerator. Detta saknas på småskaliga vindkraftverk på grund av höga kostnader [39, 21, 11]. Därför används synkrongeneratorn i de flesta småskaliga vindkraftverken [67].

4.1.3.2 Synkrongenerator

En synkrongenerator levererar ström med varierande spänning och frekvens. Detta är givetvis en fördel med tanke på att vinden inte är konstant. För att fasa in strömmen på nätet används en omriktare, vilken är väldigt dyr och kan för ett småskaligt verk innebära halva investeringskostnaden [70, 72, 21].

Strömmen måste först likriktas och sedan omriktas tillbaka till trefasig växelström för att kunna matas ut på nätet. En permanent magnet synkrongeneratorn kan magnetisera sig själv och har därför inget nätbehov. Det innebär att de kan lätt placeras där det inte finns något existerande elnät, t.ex. vid en sommarstuga. En asynkrongenerator däremot måste vara ansluten till ett elnät för att fungera, eftersom den tar sin magnetisering från nätet och styrs av nätets frekvens. Vidare kräver de synkrona inga avläsningar, anpassningar eller mätningar

årsvis vilket de asynkrona verken kräver. Mekaniskt är en synkron- tystare än asynkrongenerator [39, 21, 67, 11].

Vindkraftverkets generator är avgörande för hur stor effekt verket kan leverera. Andra faktorer såsom vindhastighet och rotorstorleken påverkar produktionen, se ekvation (4. 3). Olika leverantörer ser till att optimera sina verk för olika vindförhållanden [67, 68, 70]. De flesta mikrovindkraftverk på marknaden har synkrongenerator av permanentmagnet typ, som har bättre verkningsgrad än asynkrongenerator [68, 70].

4.1.3.3 Växelriktare/Omriktare

Eftersom synkrongeneratorn går med variabelt varvtal måste strömmen omformas till rätt spänning och frekvens som elnätet. Då måste först den växelströmmen likriktas och sedan formas om till växelström [11, 28].

Vissa asynkrona generatorer tillåter att varvtalet varierar inom vissa gränser. Det kan göras genom att lindningarna i rotorn får högre resistans eller genom att strömmen i rotorlindningen styrs av kraftelektronik. I detta fall behövs också en växelriktare [11, 28].

Priset på de 3fasiga växelriktaren för mikroverk är ganska höga och ibland kostar den lika mycket som en vindturbin [72].

Växelriktarna kan ge upphov till övertoner, både på grund av switchfrekvensen och på grund av att växelriktarna inte alltid ger precis samma sinusform som elnätet. Övertoner genereras i form av strömövertoner. Dessa strömövertoner skapar sedan spänningsövertoner, vilka kan skapa problem på många olika sätt i näten. Genom att använda bättre växelriktare kan risken för problem minimeras [31]. Detta ska förklaras mer i kapitel 7.

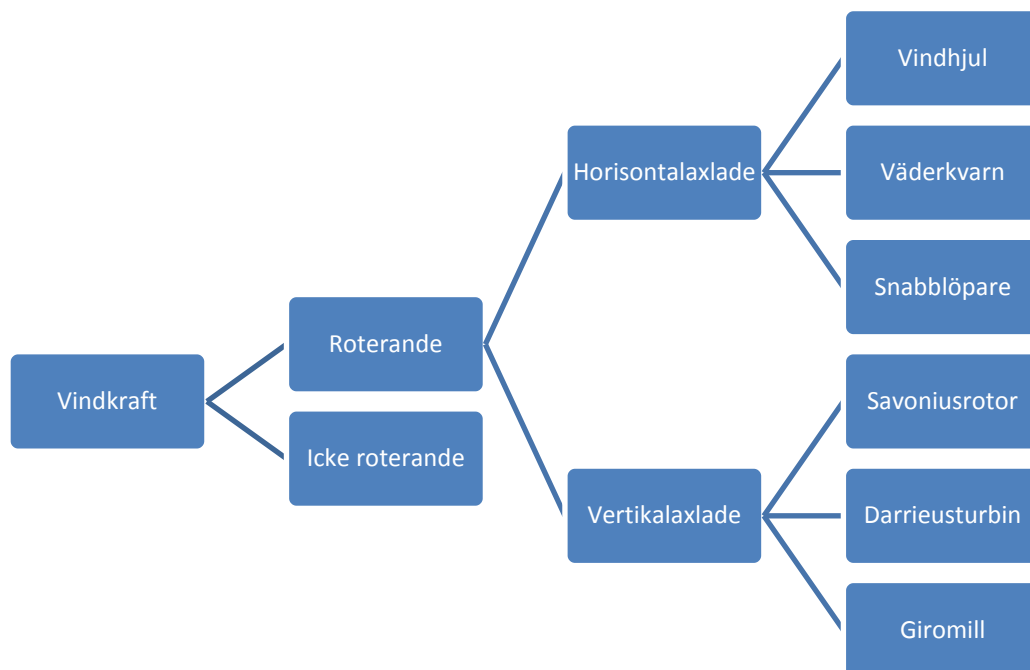
4.1.3.4 Transformator

Vindkraftverk i mindre skal, upp till 300 kW kan anslutas direkt till matarledning från elnätet till en fastighet. I regel ansluts vindkraftverken dock till elnätet via en transformator som ökar spänningen från 690 V till högspänning, vilket är 10 eller 20 kV hos distributionsnätet. För medelstora verk placeras en lämplig transformator på marken intill tornet och på större verk är den inbyggd och ingår i själva vindkraftverk som en komponent [11].

4.2 Olika typer av vindkraft

De flesta vindkraftverk roterar antingen runt en horisontell eller vertikal axel, dock finns s.k. icke roterande som är i utvecklingsfasen [11, 34, 35].

Figur 9 ger en tydlig bild över en rad olika konstruktioner för vindkraftverk.



Figur 9: Olika typer av vindkraft [11, 35]

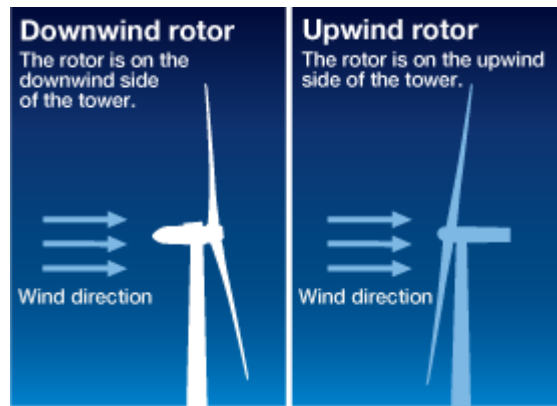
4.2.1 Roterande vindkraftverk

De som kallas roterande vindkraft, roterar antingen runt en horisontell (HAWT) eller vertikal axel(VAWT) vilka skapar de två stora grupperna [11]:

4.2.1.1 HAWT- Horizontal Axis Wind Turbine

Väderkvarnen och vindhjulet är de gamla modellerna som här bara nämns som en variant av HAWT. Den tredje modellen d.v.s. snabblöpare används idag både i små mikroturbiner med 2-6 blad och i stora nätanslutna verk (figur 11). Funktionen hos de trebladiga horisontalaxelkraftverken som används kommersiellt baseras på lyftkraft, vilken är samma kraft som också får flygplanen att lyfta och hållas i luften [11].

Horisontalaxlade verk kan ha rotorn placerad upwind eller downwind. De flesta verk idag har rotorn upwind. Figur 10 förklarar skillnaden mellan upwind- och downwinds- rotor [28].



Figur 10: Bild på upwind och downwind rotor[62]

HAWT (horisontalaxlade verk) är känsliga för förändringar av vindriktning och turbulens. Snabba växlingar och ändringar av vindriktning betyder att ett vindkraftverk eventuellt inte hinner byta riktning och därmed tappar i produktion. De bästa platserna för HAWT är öppna områden med jämnt luftflöde och få hinder [9, 68].

Svepytan för HAWT är $A = \pi \cdot (D/2)^2$, där D är rotordiameter [28].



a)Vindhjul



b)Väderkvarn



c) 5- bladig snabblöpare



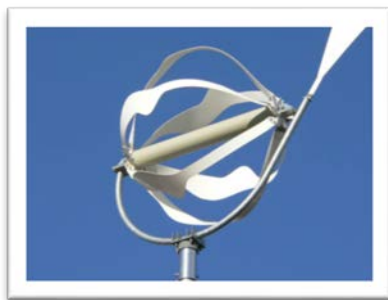
d) 2- bladig snabblöpare

Figur 11: Olika varianter av horisontalaxlade verk. a)Vindhjul, b)Väderkvarn, c) Snabblöpare, 5-bladig, d) Snabblöpare, 2- bladig

4.2.1.1.1 Innovativa designar på horisontalaxlade vindkrafter

Figur 12 visar den innovativa horisontella axelturbinerna Energy Ball och WindWall. Energy Ball, vilken också heter Venturi, är en turbin med svans. Rotorkonstruktionen består av sex halv-runda blad som bildar en sfärisk konstruktion [9].

WindWall är en horisontell axelturbin, där axeln är fäst vid taket så att den kan fånga vinden från bara ett håll. Därför är den endast lämplig för platser där vinden är stark från en riktning [9].



a) Energiball



b) WindWall

Figur 12: Olika design på horisontalaxlade vindturbiner för urban miljö. a) Energiball, b) WindWall [9]

4.2.1.2 VAWT- Vertical Axis Wind Turbine:

Vertikala vindkraftverk roterar runt en vertikal axel. Fördelen med vertikalaxlade verk är att maskinhuset kan placeras på marknivå och de är lätta att sköta och underhålla jämfört med horisontalaxlade verk. Vertikala vindturbiner kan delas in i 3 kategorier[11, 63, 64]:

4.2.1.2.1 Savoniusrotor

Savoniusrotor består av en S-formad yta som roterar kring en centralt placerad axel. De är enkla att underhålla men det krävs mycket material till deras framställning samt att de inte är särskilda effektiva (figur 13). Turbinen roterar mycket långsamt med en spets hastighet som normalt är lägre än vindhastigheten (se 4.3.1). Detta för att verket fungerar med en dragkraftsprincip, vilket betyder att luften drar runt snurrorna och de kan med andra ord inte snurra snabbare än det blåser. Detta ger dåliga aerodynamiska egenskaper. De används framförallt som batteriladdare. Snurrande reklamskyltar är ett annat användningsområde.



Figur 13: Bild på en Savoniusrotor [36]

4.2.1.2.2 Darrieusturbin

Darrieusturbinen kan ha mellan två och fyra blad i en båge från torn toppen till maskinhuset (figur 14). Den kräver lite material jämfört med Savoniusrotor. Däremot behövs starthjälp om den är kopplad till en elgenerator av asynkrontyp som är nätansluten. För att starta turbinen används generatormen även en inbyggd Savoniusrotor kan användas. När den börjar rotera tar vinden snabbt över, vilken i sin tur skapar en lyftkraft i rotationsriktningen. Svepytan hos Darrieusturbin beräknas som $A = \frac{2}{3} D^2$, där D är diametern. De har bättre verkningsgrad jämfört med Savoniusrotor.



Figur 14: Bild på en Darrieusturbin med 2 blad [36]

4.2.1.2.3 Giromill

Giromill är en turbin med två eller flera raka blad i form av ett H som är fästa vid en vertikal axel (figur 15). Den är självstartande under förutsättning att bladen ställs i förhållande till

vindriktningen, vilket kan innebära högre effektivitet. Svepytan är höjden gånger diametern ($A = h \cdot d$). Detta verk är ett vertikalverk med lyftkraftprincip, vilket innebär att rotorn kan gå snabbare än vinden och därför har dessa verk betydlig högre verkningsgrad än en dragkraftssnurra av samma storlek. En giromill är något effektivare än en darrieusturbin och savoniusrotor och har bredare löptalsområde (förklaras mer i 4. 3), men är inte lika effektiv som en horisontalaxlad snabblöpare. En jämförelse av effekterna för olika vindturbiner visas i figur 19.



Figur 15: Bild på giromill med 5 blad [37]

De vertikala verken passar bättre i urban miljö ty de avger mindre buller. Deras effektivitet är dock mindre än för de horisontala verken på grund av aerodynamiska egenskaper [70]. I kapitel 9 har årsproduktionen simulerats för några utvalda SWT. En tydlig skillnad på C_p (effektfaktorn) erhöles. För HAWT blev C_p 30-45 % och 20-30 % för VAWT (bilaga C).

4.2.2 Icke roterande

Icke roterande vindkraftverk är fortfarande i experimentstadiet. Ett exempel är "Windbelt". Denna består av en spänd rem med små linjärgeneratorer vid ändarna. När vinden blåser vibrerar remmen och ett elektriskt fält uppstår (figur 16) [34].



Figur 16: Bild på Windbelt [34]

Verket finns i mikro, medium och stora storlekar. Tanken med de stora storlekarna är att använda dem för urban miljö. Dessa paneler har designats i form av en ram på 1m x 1m, vilka består av 1m långa remmar i rad. Tester och beräkningar av data, visar att panelen ger en månads elproduktion som motsvarar 7,2 kWh vid medelvindhastighet 6 m/s [34].

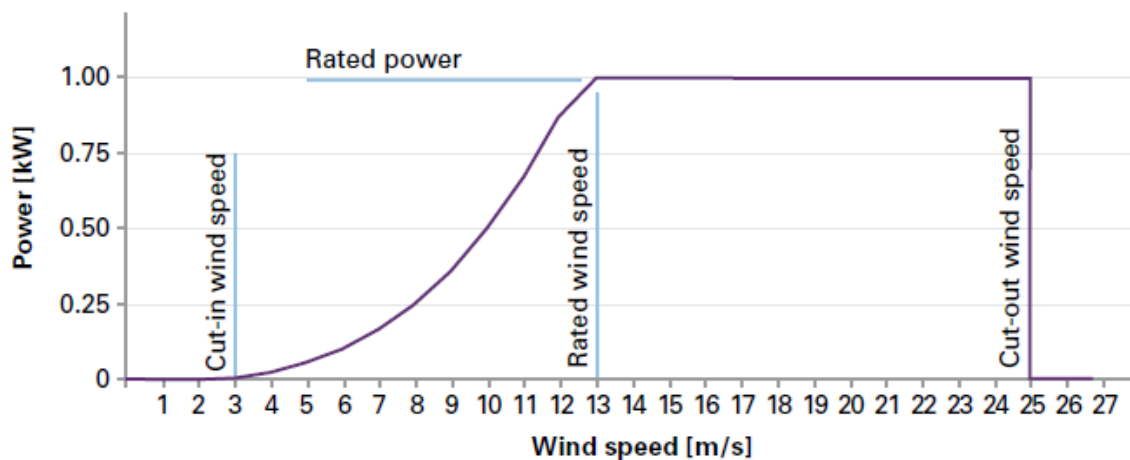
4.3 Funktion

Ett vindkraftverk börjar producera el vid 3-4 m/s (cut-in/startvind) och fortsätter att producera el upp till vindstyrkor på ca 25-30 m/s (cut-out), då bladen av säkerhetsskäl bromsas och vrids ur vinden. Den maximala effekten (märkeffekten), uppnås vanligtvis vid vindhastighet på 12-14 m/s [28] och effekten hålls relativt konstant tills maskinen stängs av vid höga vindhastigheter. Det finns en bladvinkelmekanism till rotorn (ett mekaniskt eller elektriskt) som används för att både vrida bladen och skydda verket från höga vindstyrkor samt för att få ut maximal elproduktion [11].

Startvinden, märkeffekten och vilka vindstyrkor ett verk kan tåla varierar för olika modeller och definieras av tillverkare i ett relevant datablad. Det är inte ekonomiskt lönsamt att bygga vindkraftverk för högre vindhastigheter vid platser för elproduktion nära konsumenten i stadsmiljö. Eftersom dessa vindhastigheter sällan inträffar i urban miljö. Enligt olika leverantörer i Sverige ska vindmöjligheterna på de platser som ett vindkraftverk installeras helst vara 5-5,5 m/s. Däremot under kapitel 5 visas att de riktiga medelvindhastigheterna i ett tätområde med olika hinder ligger på 2,5-3,5 m/s. Det betyder att det är helst av intresse att ett litet vindkraftverk uppnår sin märkeffekt redan vid vindhastigheter på 5-7 m/s.

Figur 17 visar en typisk effektkurva för ett vindkraftverk. När märkeffekten uppnås, hålls effekten konstant tills maskinen stängs av. I (4.3.1) förklaras att vindkraftverks effekt beror på

rotorstorleken, vindhastigheten och rotorns effektkoefficient (C_p).



Figur 17: Typisk effektkurva för ett vindkraftverk. Cut -in speed och cut-out samt märkeffekt kan variera för olika vindkraftverk [26]

All information tillhörande ett vindkraftverk brukar sammanställas av tillverkare och leverantör i en s.k. datablad. Figur 18 visar ett exempel på datablad för ett vindkraftverk av modellen Windstar 3000 från tillverkaren Windforce, se även bilaga B.

Rotordiameter:	3 m
Vikt netto/brutto:	70/84 kg
Startvind:	2,5m/s
Laddvind (cut-in):	3m/s
Märkeffekt:	3000W vid 12m/s
Max effektuttag:	3500W vid 14m/s
Max tillåten vindstyrka:	50m/s
Spänning:	DC 48V för batteridrift, DC 110V för nätdrift
Generator:	3-fas permanentmagnet typ
Övervarningsskydd:	Elektromagnetisk och aerodynamisk vridmomentskontroll
Styrenhet: (batteridrift)	Extern Sol-Vind Hybrid Controller:
	- Kapacitet för inkoppling av 1000W solpaneler till styrenheten utöver Windstar 3000

	LCD Display som visar:
	- Spänning (V) från Windstar 3000, solceller och batteri
	- Strömstyrka (A) från Windstar 3000 och solpaneler
	- Effektuttag (W) från Windstar 3000 och solpaneler
	- Batteristatus: Under och överladdning samt kortslutning
Riktningkontroll:	Rodersystem
Monteringsdiameter:	105mm

Figur 18: Datablad över Windstar 3000 från leverantören Windforce [13]

4.3.1 Årsproduktion

4.3.1.1 Energin i vinden

Vindens effektinnehåll kan uttryckas enligt ekvationen nedan [28]:

$$P_{\text{vind}} = \rho/2 \cdot \pi \cdot r^2 v^3 \text{ [W]} \quad (4.2)$$

$$P = \text{Effekt [W]}$$

$$\rho = \text{Luftens densitet [kg/m}^3\text{]}$$

$$r = \text{Svepytans radie [m]}$$

$$v = \text{Vindens hastighet [m/s]}$$

Det är alltså vindkraftverkets svepyta och vindens hastighet som avgör hur mycket energi ett vindkraftverk kan utvinna. Energin beror linjärt på svepytan och i kubik på vindhastigheten, vilket betyder att vindhastigheten är det viktigaste när det handlar om att erhålla energi ur vinden [28, 11]. Luftens densitet ($1,225 \text{ kg/m}^3$) anses ofta vara konstant vid vindkraftsberäkningar [28].

Skillnaden i vindhastighet före och efter vindturbinen avgör hur stor del av vindens effekt som kan tas tillvara av vindkraftverket. Olika turbiners konstruktion och olika stora förluster i energiomvandlingen gör att det blir omöjligt att avgöra ett vindkraftverks elproduktion endast genom att t.ex. mäta rotorstorleken och multiplicera med vindhastigheten. Detta beskrivs med

verkets effektkoefficient/ verkningsgrad ($C_p \cdot \eta$). Ekvationen nedan används för att beräkna effekten för ett vindkraftverk [28]:

$$P = 1/2 \rho \cdot A \cdot C_p \cdot \eta \cdot v^3 \quad (4.3)$$

$P =$ Effekt [W]

$\rho =$ Luftens densitet [kg/m³]

$A =$ Svepytan [m²]

$v =$ Vindens hastighet [m/s]

$C_p =$ Rotor effektkoefficient (rotor effekt/vind effekt)

$\eta =$ Övriga komponents verkningsgrad

C_p ändras av två faktorer (λ , β). Hur snabbt rotorn roterar i förhållande till vindens hastighet spelar en viktig roll för hur effektivt energin i vinden kan utnyttjas. Det mått som används för detta kallas löptal (λ) och anger förhållandet mellan bladets spets hastighet och den ostörda vindens hastighet. Olika typer av vindkraftverk har olika löptal, exempelvis har de storskaliga horisontalaxlade verken ett löptal omkring 7. Det innebär att en vindhastighet på 5 m/s ger en vingspets hastighet på kring 35 m/s, se ekvation (4.4) [11, 28]:

$$\lambda = v_{spets} / v_o \quad (4.4)$$

$\lambda =$ löptal

$v_{spets} =$ vindens hastighet vid bladspetsen

$v_o =$ Ostörda vindens hastighet

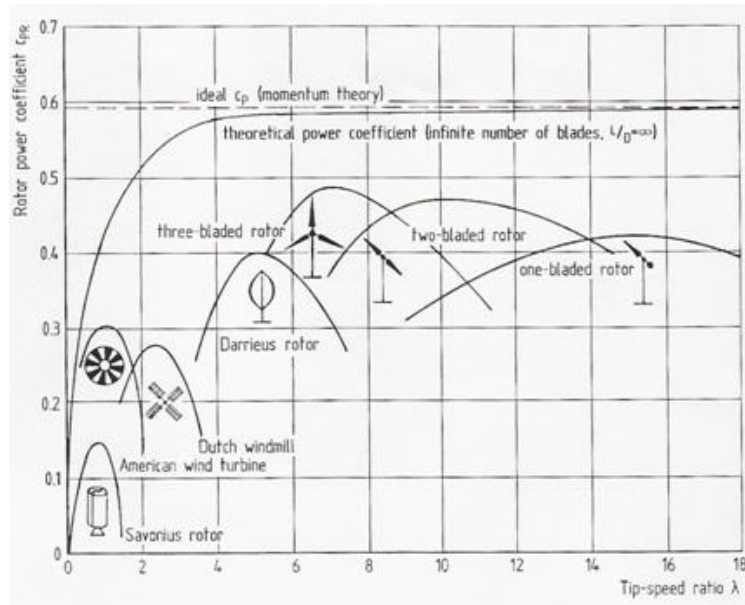
V_{spets} i sin tur beror på rotorns radie och varvtalet [11]:

$$V_{spets} = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot R / 60 \quad (4.5)$$

$n =$ Varvtal (varv/min) [RPM]

$R =$ rotorns radie [m]

Figur 19 visar sambandet mellan löptal och effektkoefficient för några olika typer av vindkraftverk.



Figur 19: Effektkoefficient för några typer av vindkraftverk [33]

C_p beror även på bladvinkel (β). För att få en lämplig anfallsvinkel ställs bladen hos vindkraftverkets rotor in i en vinkel i förhållande till rotationsplanet. Den vinkeln kallas bladvinkel (kan kallas pitchvinkel också). Anfallsvinkeln (α) definieras som vinkeln mellan bladkordan och den resulterande vindens anblåsningsriktning. Med en stor anfallsvinkel, minskar lyftkraften hos bladet, och luftströmmen släpper i en s.k. avlösningspunkt och börjar virvla runt. Denna egenskap utnyttjas för att minska effektuttaget när vindens hastighet ökar för mycket. I figur 17 ökar C_p med ökning av vindhastighet (från startvind till vindhastighet vid märkeffekt). Efter att märkeffekten uppnås, minskas C_p igen på grund av funktion av pitchvinkel på det sättet att bladen vrids ur vinden. I detta fall hålls effekten konstant tills vindkraftverket stängs av [11, 28].

Enligt Betz lag är den maximala effektkoefficienten för ett vindkraftverk 59,3 % [28].

Slutligen fås elproduktionen från ett vindkraftverk genom att multiplicera effektuttaget med antalet timmar som verket är i drift [28]:

$$W = \bar{P} \cdot 8760 \quad (4.6)$$

$W =$ elproduktion [KWh/år]

$\bar{P} =$ Medeleffekt [W]

Medeleffekten för vindkraftverk kan beräknas av ekvation (4.3) genom att ha tillgång till medelvindhastigheten och att beräkna medel C_p från verkens effektkurva. Det finns ett förenklat sätt också att beräkna den ungefärliga medeleffekten för storskaliga vindkraftverk som baseras på medelvinden [28, 76]:

$$\bar{P} = [\rho (2D/3)^2 \bar{V}^3] \cdot [1/2,2] \quad (4.7)$$

$$\bar{P} = \text{Medeleffekten [kW]}$$

$$D = \text{Rotordiameter [m]}$$

$$\bar{V} = \text{Medelvindhastighet [m/s]}$$

Om den konstanta delen (1/2,2) tas ut från ekvation (4.7), skiljer sig den beräknade medeleffekten från ekvation (4.3) och (4.7) mycket. Genom att tillägga den konstanta delen i ekvation (4.7), kommer medeleffekten från båda ekvationer att ligga nära varandra. Men den konstanta delen kommer att ändras när det gäller småskaliga vindkraftverk [76].

Under kapitel 9 har en analys utförts för 6 utvalda småskaliga vindkraftverk för beräkning av medeleffekt samt elproduktion för samtliga verken. Resultaten har använts här för att det hade varit av intresse att hitta den konstanta delen i ekvation (4.7) anpassande efter de verken. Resultaten visade att denna siffra skiljer sig mellan horisontala- och vertikalaxladeverk. Den beräknade konstanta siffran för horisontellaxladeverk ligger på ca 1/2,7 (se ekvation (4.8)) och ligger på 1/4,6 (se ekvation (4.9)) för vertikalaxladeverk (se tabell 8 och bilaga C).

$$\bar{P} = [\rho (2D/3)^2 \bar{v}^3] \cdot [1/2,7] \quad (4.8)$$

$$\bar{P} = \text{medeleffekten för horisontellaxlade verk [kW]}$$

$$D = \text{Rotordiameter [m]}$$

$$\bar{V} = \text{Medelvindhastighet [m/s]}$$

$$\bar{P} = [\rho (2D/3)^2 \bar{v}^3] \cdot [1/4,6] \quad (4.9)$$

$$\bar{P} = \text{medeleffekten för vertikalaxlade verk [kW]}$$

$$D = \text{Rotordiameter [m]}$$

$$\bar{V} = \text{Medelvindhastighet [m/s]}$$

4.3.2 Nyckeltal för vindkraftverk

I driftuppföljningen av vindkraftverk används några olika nyckeltal. Några av dem förklaras nedan. I alla fallen används årsproduktion [11, 28].

4.3.2.1 Energi per effekt

Energi per effekt är ett nyckeltal, dock ger inget särskild bra mått på ett verks effektivitet.

Nyckeltalet kan beräknas enligt ekvation nedan:

$$\text{Energi per effekt} = \text{Årsproduktion} / \text{märkeffekt} \quad (4.10)$$

4.3.2.2 Kapacitetsfaktorn

Kapacitetsfaktorn är ett nyckeltal som beror både på verkets funktion och prestanda samt vindenergin på platsen. Den ligger på ca 20-30 % för storskaliga landbaserade vindkraftverk (1-2 MW) [28, 76]. Den däremot ligger på ca 1-10 % för småskaliga vindkraftverk (1-4 kW) i urban miljö. Se tabell 5. Kapacitetsfaktorn kan beräknas enligt följande [11]:

$$\text{Fullasttimmar} = \text{Årsproduktion} / \text{märkeffekt} \quad (4.11)$$

$$\text{Kapacitetsfaktorn} = \text{Fullasttimmar} / 8760 \quad (4.12)$$

4.3.2.3 Kostnadseffektivitet

Kostnadseffektivitet är ett ekonomiskt nyckeltal. Det avgör vilket verk som bör väljas för en given plats, eftersom det ger en indikation på vilket verk som blir mest lönsamt [11]. I kapitel 9 visas hur detta nyckeltal används för att välja de lämpliga vindkraftverken för vidare analys.

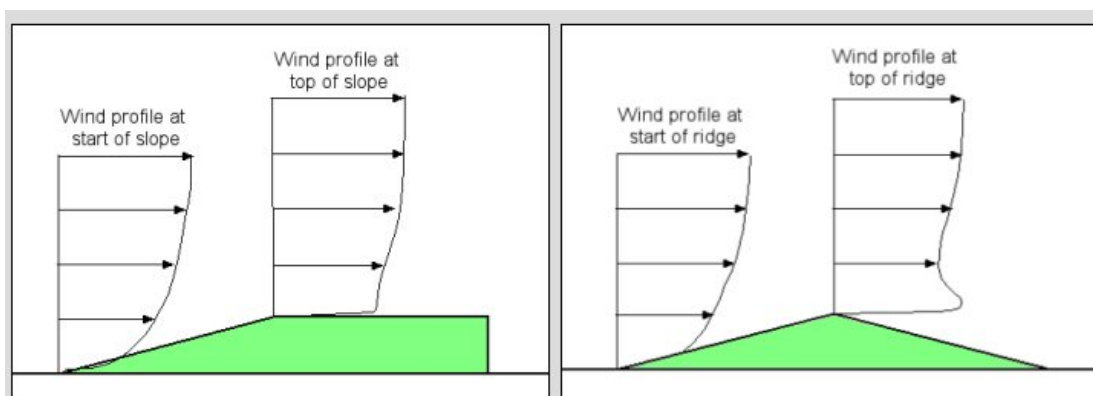
$$\text{Kostnadseffektivitet} = \text{Investeringskostnad} / \text{årsproduktion} \quad (4.13)$$

5 Vindförhållanden

Vind uppstår efter temperaturskillnaden i luften som in sin tur ger varierande lufttryck. Luften tvingas att röra på sig för att utjämna tryckskillnaden, och denna luftrörelse kallas för vind. Ett vindkraftverk omvandlar sedan rörelseenergi ur vinden till el [11].

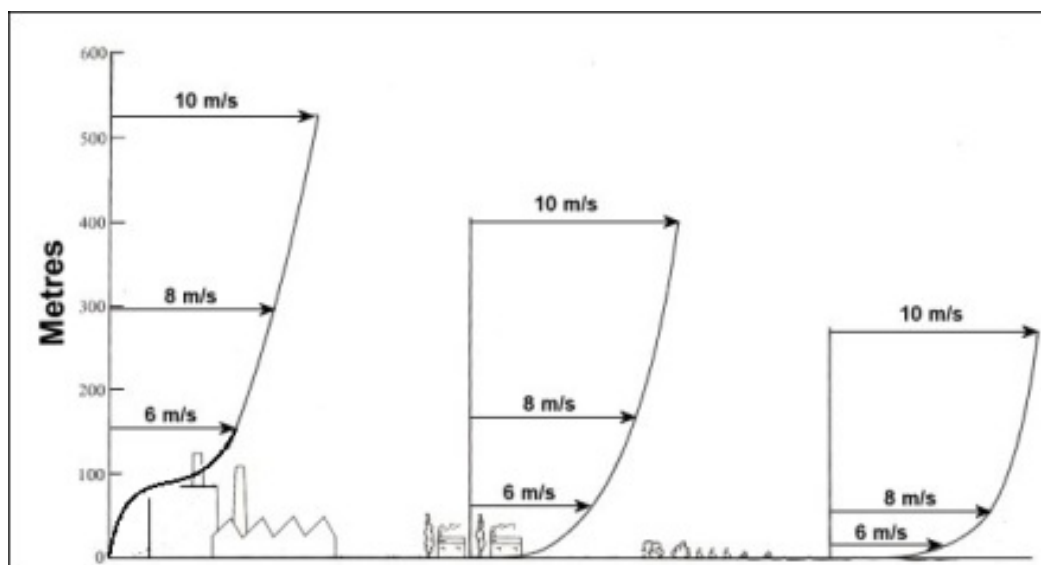
5.1 Vindprofil

Det finns två effekter som påverkar formen på vindhastighetens profil. Den första är terrängen. En stigande terräng, såsom en brant kommer att producera en mer fullständig profil vid toppen av lutningen jämfört med profilen av vinden närmare sluttningen [20]. Figur 20 ger en tydligare bild på terräng begreppen:



Figur 20: Vindprofil över en brant [20]

Den andra effekten som har en stark påverkan på vindprofilen är den aerodynamiska "råheten" av terrängen uppströms. Det kan vara naturliga ojämnheter som skog eller byggnader. Figur 21 visar ett exempel på en situation där den övre vinden har en hastighet på 10 m/s, vilken passerar med en helt annan "råhet". I centrum av en tätort kan en genomsnittlig hastighet på 6 m/s inte nås förrän 100 m över marken. På en plan gräsyta däremot får vinden en hastighet på 6 m/s vid höjd av bara 10 m över marken [20].



Figur 21: Vindprofil efter olika råhet [20]

5.1.1 Vindhastigheten vid olika höjder

Vindhastigheten och elproduktion kan beräknas och jämföras vid olika höjder. Denna kan erhållas ur ekvationen nedan enligt Power Law Profile [28]:

$$U(z)/U(z_r) = (z/z_r)^\alpha \quad (5.1)$$

$U(z)$ = Vindhastighet vid höjden z

$U(z_r)$ = Vindhastighet vid höjden z_r

α = En variabel

α kan beräknas från ekvationen (5.2):

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016 (\log_{10} z_0)^2 + 0,24 \quad (5.2)$$

Z_0 = Råhetslängden

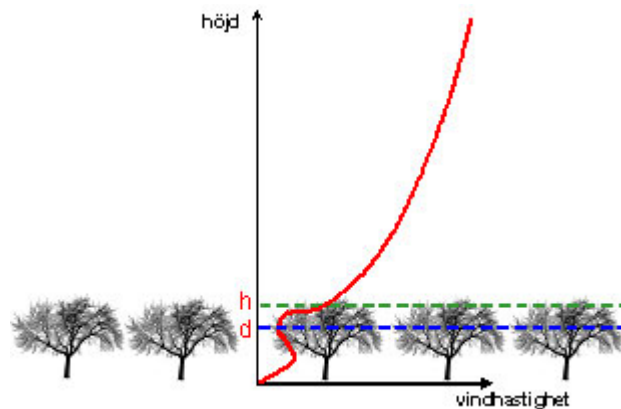
Råhetslängden varierar beroende på olika typer av terräng. Tabell 3 visar att råhetslängden (Z_0) i stora städer med olika hinder ligger på 1,6 m [29].

Tabell 3: Råhetslängden och råhetsklass för olika terränger [29]

Råhetsklass	Råhetslängd z_0 (m)	Karaktär	Terräng	Hinder	Byggnader	Skog
0	0,0002	Sjöar och hav	Öppen vattenyta	-	-	-
1	0,03	Öppet landskap med utspridda byggnader	Slätt eller flacka kullar	Låg vegetation	-	-
2	0,1	Landsbygd med en blandning av öppen terräng, vegetation och byggnader	Slätt med kullar	Små skogspartier, alléer	Enstaka byar och småstäder	-
3	0,4	Småstäder eller landsbygd med gott om jordbruk, skog och andra hinder	Böljande terräng	Gott om skog, vegetation och alléer	Frekventa byar, småstäder eller förorter	Låg skog
4	1,6	Stora städer eller hög, kompakt skog	Böljande terräng	-	Stora städer	Hög, kompakt skog

5.2 Nollplan

Den höjden där vindhastigheten räknas som noll kallas nollplan, d.v.s. vinden i marknivå. I ett öppet landskap är denna nivå lika med marken och i övrig terräng förskjuts nollplanen med hänsyn till höjden av vegetation och byggnader. Detta innebär att vindarna inte är uträknade för höjden ovanför marken utan för höjden ovanför den höjd som upplevs som marknivå för vindens gränsskikt [21]. Nollplansförskjutningen har markerats med d och kan uppskattningsvis sättas till tre fjärdedelar av vegetationens höjd (figur 22).



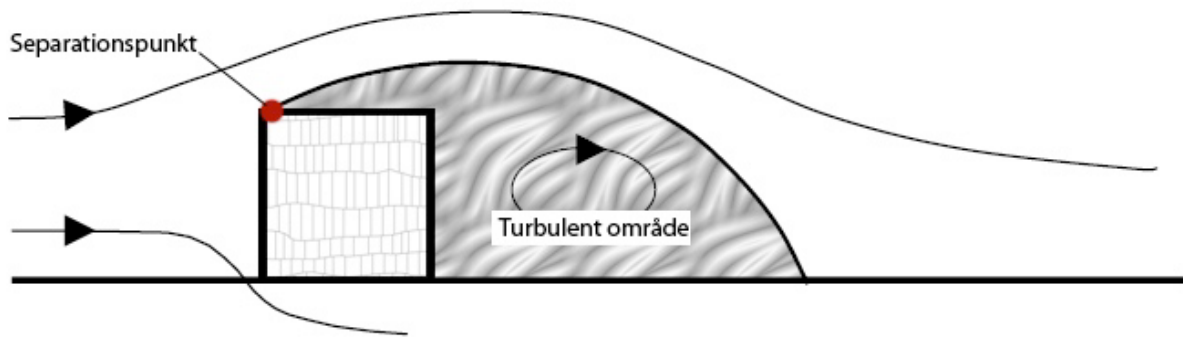
Figur 22: Bild över nollplansförskjutning [22]

5.3 Vind i urban miljö

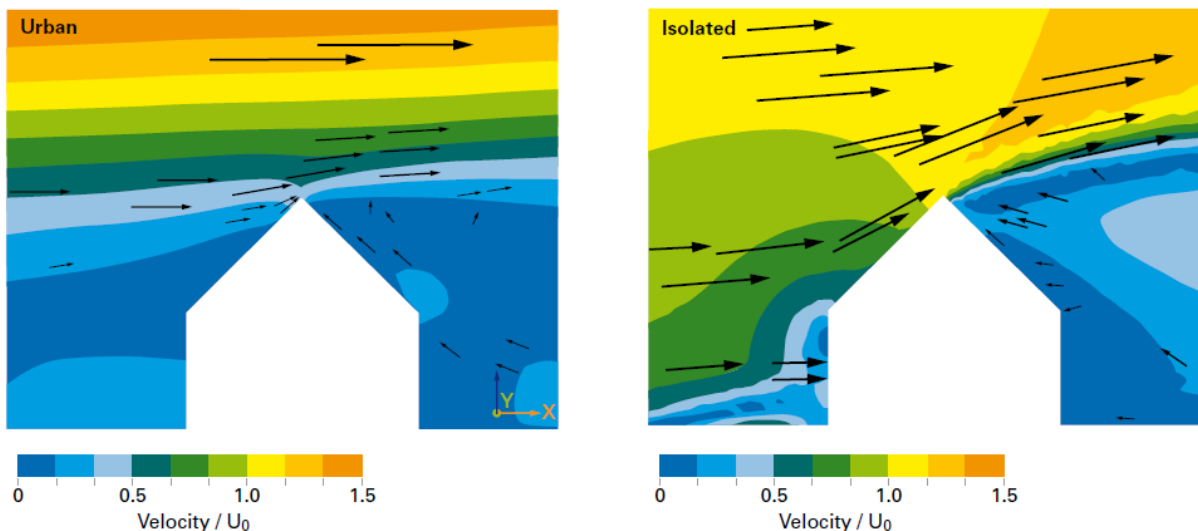
5.3.1 Turbulens

I urban miljö ska nollplanen förskjutas beroende på olika hinder och faktorer såsom byggnader och träd. Dessutom påverkar byggnaders former och avståndet mellan hinder graden av turbulens och ger ett svårbestämt vindförhållande. För en rätt placering av vindturbin inom urban miljö måste byggnadens och andra hinders inverkan på vindens karaktär beaktas, t.ex. flödet över ett tak kan dels bestå av turbulent och inbromsad vind och dels av accelererat luftflöde. Dessutom kan takets utformning orsaka en ändring av vindens vinkel. Totalt påverkas luftflödet av ytråheten kring byggnaden, vindriktningen och höjden över taket. Genom en CFD- analys (Computational fluid dynamics) kan karaktären och storleken på luftflödet runt en byggnad bestämmas [23].

För att visa hur turbulens kan uppstå vid en byggnad, visar figur 23 och 24 några exempel för bättre överblick. Bilderna visar turbulens och vindflöde på ett område på platt/ snett tak och i närheten av byggnaderna:



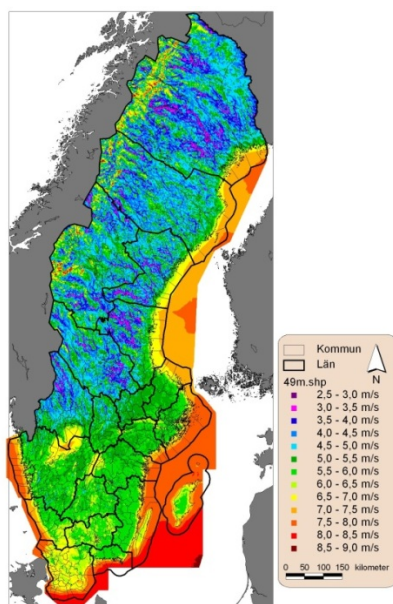
Figur 23: Vindflödet kring en byggnad. Separationslinjen utgår från separationspunkten och markerar det turbulenta området[21]



Figur 24: Resultat av CFD modellering av vindflöden runt byggnader med snett tak i urban miljö (vänster bild) och i öppet landskap (höger bild) [26]

5.3.2 Lägre medelvindhastighet

Tillgång till medelvindhastighet är avgörande för att beräkna årsproduktion från en liten vindturbin. Dock blir en vindmätning dyr i förhållande till produktion från ett urbant vindkraftverk. Det finns en vindkarta över landet som kan uppskatta den ungefärliga medelvindhastigheten i den stad som man bor. De är dessvärre inte användbara i stadsmiljö då vinden påverkas av olika hinder och bromsas [68,70]. Figur 25 visar årsmedelvinden på höjden 49 m ovanför nollplanskjutningen för varje kommun i Sverige. Figuren visar att medelvindhastigheten på denna höjd i Lund är ca 5,5- 6,5 m/s [22].



Figur 25: Årsmedelvind på höjden 49 m ovan nollplanförskjutningen [22]

5.3.3 Vinndata från olika källor

Vindmätningar inhämtades från två olika platser i Lund. Akademiska hus lämnade vindmätningar för ett tätbebyggt område i Lund. Eftersom vinndata från Akademiska Hus visade låga medelvindhastigheter hämtades även mätserier från Krafringens mätstation på Värpinge Norr.

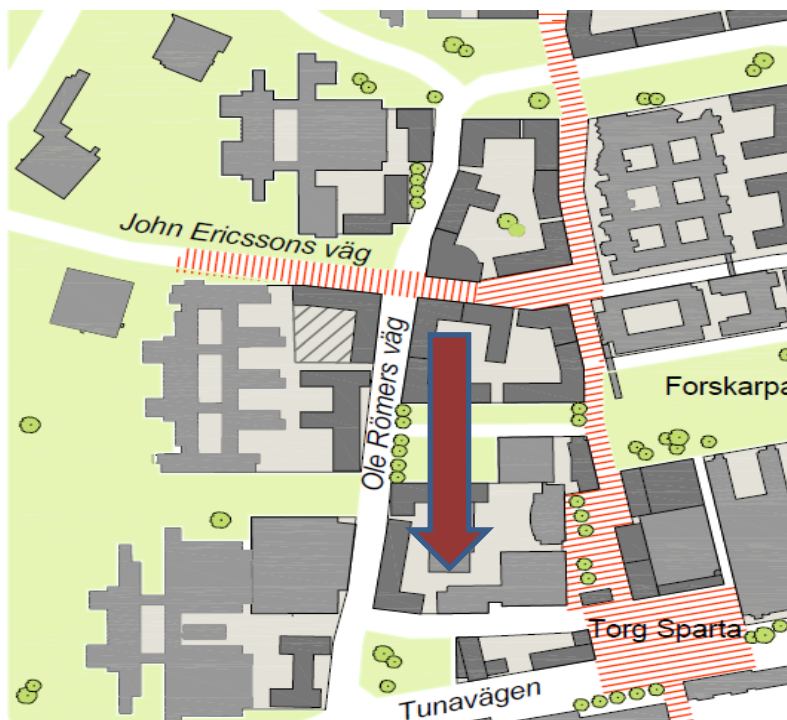
5.3.3.1 Akademiska Hus

Det har installerats en vindmätare på 10 m höjd ovanför marken på taket av Akademiska Hus i Lund vid Ole Römers vägen 2 (figur 26). Den mätaren sitter vid kanten av huset och är tyvärr inte så högt över taklinjen. Själva huset är ca 9 m högt. Vindmätningarna visar ett dåligt resultat på medelvindhastighet vilken ligger på 2,6 m/s. Dessa vindmätningar utfördes under 13755 timmar från 2008-05-07 kl.18:00 till 2009-12-31 kl.19:00 [65]. Det dåliga resultatet kan bero på turbulens och påverkan av själva formen på huset samt dålig placering av mätare dvs. mätare sitter inte tillräckligt högt över taket.

Det hade förväntats ett bättre resultat för medelvindhastigheten om mätaren hade suttit på 5-6 meter höjd ovanför taklinjen. Kalkylen från ekvation (5.2) ger $\alpha = 0,5$. Z och Z_r anses vara höjden på 10 m (den befintliga höjden på mätaren) respektive 16 m över marken (den önskade höjden). Enligt ekvation (5.1) och samtliga data, kunde medelvindhastigheten ökas med 1.26,

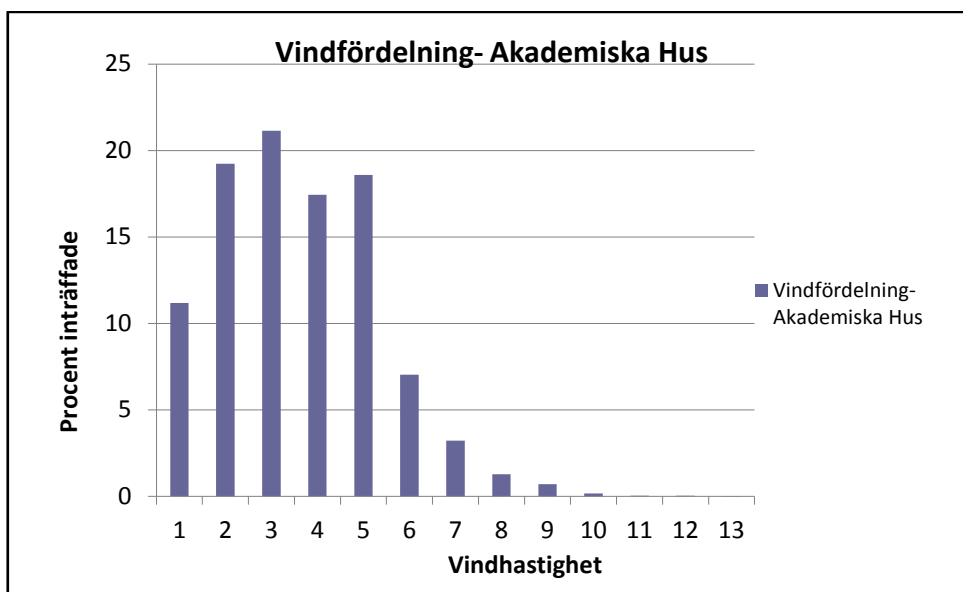
om vindmätaren hade suttit 6 meter högre, vilket motsvarar ca 3,28 m/s. Detta ger en ca fördubbling av årsproduktion.

En annan kalkyl för $Z=25$ m (15 meter högre) visar att medelvindhastigheten blir 4 m/s i detta tätområde.



Figur 26: Karta över området runt Akademiska Hus och placering av vindmätning [25]

Figur 27 (weibullfördelning (bilaga A)) visar att vindhastigheten på Akademiska Hus varierar oftare mellan 2-5 m/s under mätperiod och högre vindhastighet (6- 12 m/s) inträffar bara 0-2% av hela den perioden.



Figur 27: Vindfördelning enligt vindmätningar från Akademiska Hus under 1,5 år.

Enligt tillgänglig vinddata, kan K- och C-faktorerna beräknas för weibulldistribution (bilaga A). Enligt medelvindhastigheten på Akademiska Hus beräknade K till 1,6 och C till 2,9. K- och C- faktorer behövs för att beräkna weibulldistribution, som i sin tur med hjälp av effektkurvan för ett verk förenklar kalkylen för den riktiga årsproduktionen. K är relaterad till ojämnheter i terrängen som är helt beroende på formen av omgivande byggnader och andra hinder samt höjden över taklinjen. För storskalig vindkraft som placeras i öppet landskap har K det ungefärliga värdet 2,0 [21, 27].

Enligt en genomförd studie i urban miljö från U.K. beräknades K-faktorn till 1,6, vilket bekräftar den beräknade K-faktorn från vinddata på Akademiska Hus [27].

5.3.3.2 Vindmätningar på Värpinge

Vindmätningarna kommer från Krafringens vindstation, vilken ligger i Värpinge Norr. Denna stadsdel är inget bostadsområde, utan består bland annat av jordbruksfält och en golfbana.

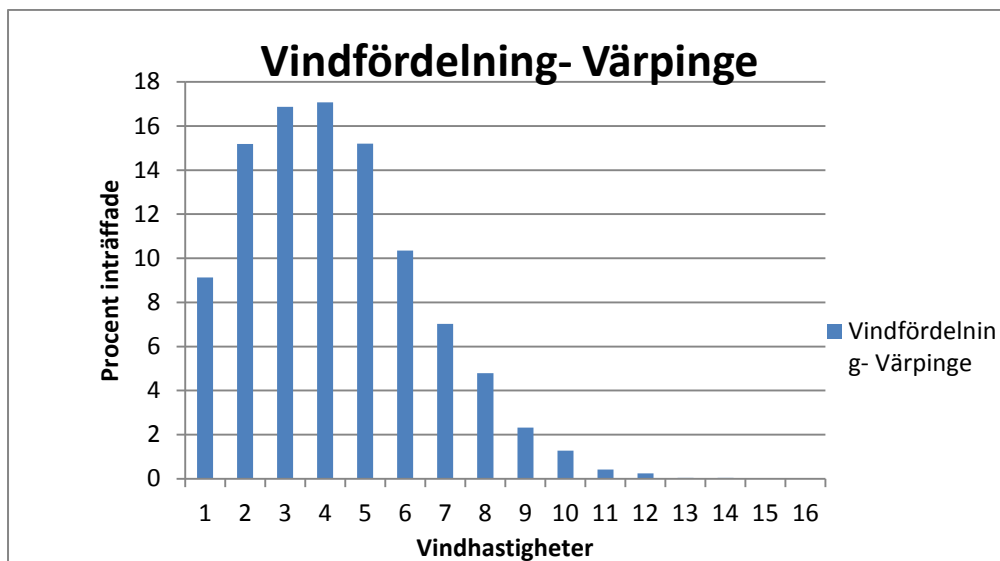
Sidan: 34

Det är på Värpinge golfbana som stationen är belägen (figur 28) [69]. Vindmätaren sitter på 5 m höjd i ett öppet landskap och den beräknade årsmedelvinden ligger på 3,26 m/s. Det förväntades en högre medelvindhastighet på grund av att området inte innehåller några hinder. Dock finns det buskar i närheten av mätaren vilka troligtvis skapar turbulens och följaktligen kan påverka medelvindhastigheten.



Figur 28: Karta över Värpinge där mätaren sitter(*googlemap*)

Figur 29 visar vindfördelningar enligt tillgängliga data från Krafringens vindstation under perioden 2012-09 till 2013-09 [75].



Figur 29: *Vindfördelning (weibullfördelning)- Värpinge*

Enligt tillgänglig vinddata beräknades K- och C-faktorer till 1,5 respektive 3,6. Känsliga analyser har gjorts i studien under kapitel 9 för att visa hur årsproduktionen förändras med 1-4 m/s högre medelvindhastighet. Samtliga beräkningar för K och C under olika medelvindhastigheter enligt vindmätningar på Värpinge visas i bilaga A.

Värpinge Norr är ett öppet landskap i närheten av Lund som har en råhetsklass på 3, det innebär att $Z_0 = 0,4$. Genom användning av ekvation (5.1) och (5.2), kan

medelvindhastigheten för en vindmätare på en höjd av 20 meter beräknas. Detta ger en medelvindhastighet på 5 m/s istället.

5.3.4 Vindmätningar enligt leverantörer

Angående vindmätningar i urban miljö intervjuades några säljare och leverantörer. Det var av intresse för hur de bedömer att en plats passar bra för installation av ett vindkraftverk. De flesta menade att det är dyrt med exakta vindmätningar under ett år för ett sådant litet vindkraftverk. Därför rekommenderar de kunderna att skaffa vanlig vindmätare (figur 30) som kan köpas överallt för att kolla medelvinden under 3 månader. Om medelvindhastigheten ligger på 5m/s, då kan man satsa på ett vindkraftverk [70, 71].



Figur 30: Bilder på vindmätare och relevant display som kan köpas i vanliga affärer [32]

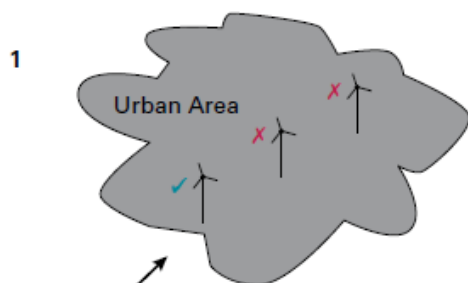
6. Placering av småskaliga vindkraftverk i urban miljö

Vind i urban miljö utsätts för olika hinder, vilket påverkar karaktären och storleken på luftflödet, se kapitel 5 för mer utförlig beskrivning. Genom en CFD-analys (Computational fluid dynamics) kan rätt placering på taket bestämmas. Denna analys är väldigt dyr att genomföra.

Småskaliga vindkraftverk kan monteras fristående nära bostaden eller på byggnadens tak och vägg. Man måste ha lite koll på vindriktningar i det området som man bör med tanke på installation av ett vindkraftverk. Om man har ett platt tak bör man placera verket så nära kanten som möjligt mot vindriktning, men för vind som inte blåser bara från en riktning är den bästa placering högt upp på mitten av det platta taket [70]. Om det finns olika bostäder och hinder är det bättre att placera verket upp till 10 meter ovanför alla hinder. I en öppen area däremot går det bra att installera verket med en höjd av 3 m ovanför alla hinder i omgivningen. För hus med gavel bör verket placeras på den sidan av gaveln som det blåser mest [68, 70, 72].

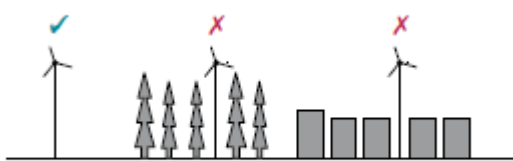
I kapitel 5 under figurer 23 och 24 visades det turbulenta området kring olika byggnader med platt tak och snett tak. Figur 31 visar riktlinjer och tumregler för lokalisering av små vindkraftverk enligt en engelsk studie från WindPower program [26].

Sammanfattning av riktlinjer för placering av småskaliga vindkraftverk enligt den engelska studien [26]:



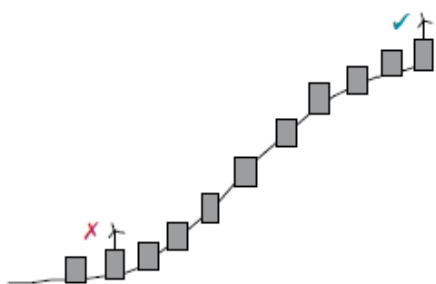
1. Vindkraftverk bör placeras nära kanten av uppbyggda eller skogsområden i preferens till centrala lägen. Det är bäst att välja en plats där vinden blåser mest.

2



2. Placera SWT på landet, i stället för uppbyggda eller skogsområden.

3



3. Placera SWT nära toppen av jämna backar. Kraftigt varierande lutningar, såsom klipporna, kan orsaka turbulens. För branta backar, ska turbinen placeras på högsta punkten eller på sidan av vinden, om toppmötet inte är ett alternativ.

4



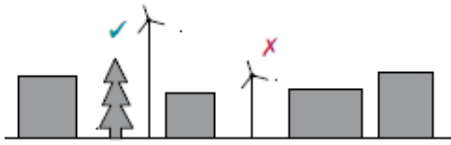
4. Placera inte SWT i närheten av hinder (t.ex. ett höghus inom ett område med generellt en eller två våningar bostäder), där som hinder bromsar vinden och skapa turbulens. Antingen längre bort än 3 till 10 gånger den hinderhöjden, eller högre än 1 till 2 gånger hinderhöjden.

5



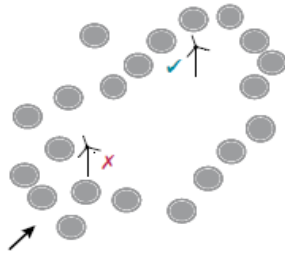
5. Placera SWT så högt som praktiskt möjligt eller tillåtet.

6



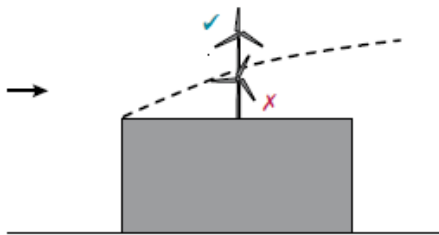
6. Placera turbinen ovanför höjden av närliggande träd eller byggnader.

7



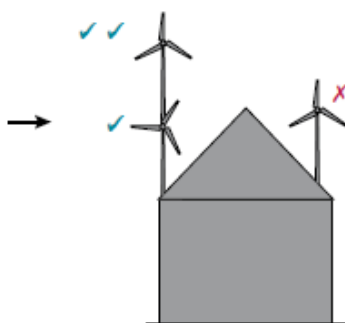
7. Om praktiska överväganden förhindrar att placera SWT ovanför höjden av närliggande träd eller byggnader, se till att det finns en klar sikt på den sidan av den rådande vindriktningen.

8



8. SWT som ska placeras på ett platt tak bör installeras ovanför turbulensen till följd av luftströmmen.

9



9. För SWT ska monteras på byggnader med lutande tak som redan sträcker sig över de omgivande hindren (t.ex. andra byggnader, träd, osv), se till att: Antingen turbinens höjd ovanför taket är åtminstone hälften av den vertikala djup av taket (bas till topp), eller vindkraftverk är monterad framför den topp ur den rådande vindriktningen (och helst båda).

Figur 31: Tumregler och riktlinjer för placering av småskaliga vindkraftverk på en byggnad (bilderna från 1-9). Pilarna visar vindriktning [26]

Själva byggnadens material och konstruktion kan påverka installationsprocessen och kostnader samt efterkommande problem till följd av montering av verket. Till dessa hör exempelvis vibration och ljud i byggnaden. För att förebygga detta kan gummi i vissa fästningar samt vibrationsdämpande material användas. Dessutom ska installation av verket på byggnadens stomme undvikas [68, 70, 74]. Vid de flesta takmonteringar behövs en specialkran vid montering, vilket gör att installationskostnader blir mycket större. Ibland kan en installation ligga på 20 000-30 000 SEK [70, 72].

Figur 32 visar olika placeringar av småskaliga vindturbiner i ett projekt som utfördes år 2008 i UK. Syftet med projektet var att göra en analys över hur placering av ett vindkraftverk påverkar energiutgången [27].



Figur 32: Olika placeringar av små vindturbiner på byggnader i urban miljö [27]

6.1 Innovativa placeringar av småvindturbiner i urban miljö

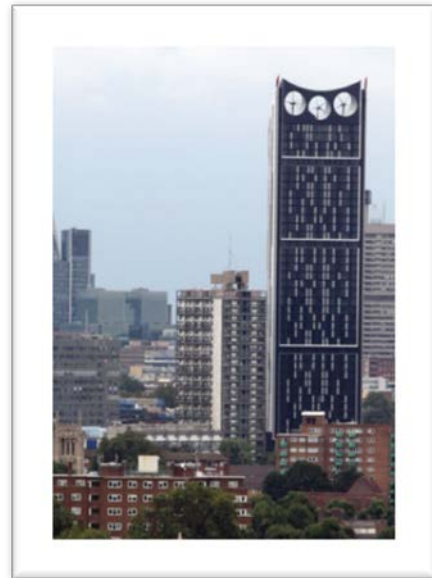
Småskaliga vindkraftverk kan monteras fristående nära bostaden eller på byggnadens tak och vägg. Installation av en turbin med effekt på max 4 kW kan täcka bara en del av el för konsumenten. Innovativa lösningar för placering av vindkraftverk på byggnader som kan leda till mer elproduktion och ekonomiska besparingar är av stort intresse. Figur 33a visar en sammankoppling av små vindturbiner som placerad längs väggen och tak på en byggnad, vilket betyder mer effekt. Med högre effekt kan det täckas större del av kundens elanvändning. Figur 33b visar en samman koppling och placering av 3 små vindkraftverk i en kanal genom en byggnad. Vinden kan accelereras från båda sidor av kanalen. Den typen av placering är mer intressant på grund av säkerhetskäl. Figur 33c visar igen en sammankoppling av två småskaliga vindkraftverk som placeras mellan två höga byggnader. Denna variant kan appliceras på speciell designade byggnader som redan under byggnadsfasen planerats för

vindkraft. Vinden kan accelereras från två sidor. Problemet är att hitta tillräckligt höga byggnader som dessutom är högre än alla andra närliggande byggnader [21].



a) Vindturbiner som placerad längs väggen

Och tak på en byggnad



b) Starta Tower i London (sammankoppling av

Tre småskaliga vindkraftverk i en kanal)



c) Bahrain World Trade Center

Figur 33: Innovativa placeringar av vindturbiner i urban miljö [21]

7 Regler och kriterier kring nätanslutning av småskaligt vindkraftverk

Det finns olika kategorier och regler för de som vill producera el för egen förbrukning. Den första kallas för ”Egen producent” och hänvisas till kunder som har en s.k. mikroproduktionsanläggning på max 43 kW som kan anslutas till en max 63 A säkring. Anläggningen måste producera mindre el än kunden förbrukar under ett år. Överskottselen kan dock matas in på nätet. I det här fallet betalar kunden inga särskilda mät- eller inmatningsavgifter och elnätbolaget kommer att byta mätutrustning kostnadsfritt. Detta är för att mätningar måste göras på både inmatningar och uttagningar till/från nätet [40].

Den andra gruppen kallas för ”Inmatningskund”, vilket betyder större anläggning. kunden kan därmed delta i elhandeln med sin överskottsproduktion och debiteras en årlig fast avgift från elnätbolaget som motsvarar kostnader för mätningar, avräkningar och rapportering till myndigheter [40].

7.1 CE-märkning för vindkraft

Vindkraftverk tillhör de produkter som ska vara CE märkta. På det sättet garanterar tillverkaren att varan överensstämmer med kraven i myndigheternas föreskrifter. I CE- märkningen ingår bland annat kravet att anläggningen inte får störa eller blir störd av andra elektriska utrustningar, den så kallade elektromagnetiska kompatibilitet [40, 41].

Certifieringssystemet bör omfatta beständighetsprov och kvalitetsverifiering. I bästa fall bör alla viktiga parametrar i verket provas under fältförhållanden. En komplett certifiering, vilket innebär testning, strukturella säkerheter och överensstämmelse med standarder i IEC 61400-serien, får endast granskas av ackrediterade institutioner som är dyra [68]. Den mest kända certifikatutfärdare är DNV (Det Norske Veritas) och det tyska GL (Germanischer Lloyd) [9, 42].

Det finns ett gemensamt internationellt certifieringssystem för stora verk, vilket ännu saknas för de småskaliga vindkraftverken. Detta beror på till stor del är den höga kostnaden. I dagsläget gäller standarden SS-EN 61400-2 för mindre vindkraftverk där turbindiameter är mindre än 16 meter [9, 40, 42].

Det internationella energioorganet IEA håller på att skapa en sådan internationell och gemensam konsumentmärkning för småskaliga vindkraftverk med en sveparea mindre än 200 m² [43,68]. Gruppen inom IEA, vilken ansvarar för frågan, heter IEA Wind – Task 27 och består av expertis från flera länder däribland Sverige. De har nämligen skapat något som kallas för “Recommended practices”. Detta beskriver en metod för hur märkningen skapas och därmed också vilka tester som ska genomföras. I Figur 34 visas ett förslag på märkning av småskalig vindkraft, vilken IEA Wind – Task 27 tagit fram. Märkningen antogs av IEA Wind den 22 juni 2011[43]:

Test Results	
Manufacturer	Manufacturer
Model	Model
Reference Annual Energy <small>at 5 m/s average wind speed, actual production will vary depending on site conditions</small>	### kWh/yr
Declared Sound Power Level <small>at 8 m/s</small>	## dB(A)
Turbine Test Class <small>(I-IV or S for Special)</small>	II
Tested by	Test Organisation
Published Date <small>(Year-Month-Day)</small>	2011-03-04
<small>For more information, see the Task 27 section of www.ieawind.org</small>	

Figur 34: Exempel på konsumentmärkning av småskalig vindkraft[43]

7.2 Miljöaspekter

Vindkraftverk utnyttjar den förnybara vinden som energikälla och ger inga utsläpp som påverkar miljön. Det innebär att risken för skador genom försurning, övergödning, marknära

ozon och därmed de relevanta konsekvenserna för jordbruk, skogar, sjöar och människors hälsa minskar. Däremot när verken är i drift alstrar de ett visst ljud. Dessutom kan de ge upphov till skuggor, vilka rör sig från väster till öster mellan solens upp- och nedgång [11].

7.2.1 Buller

Vindkraftverk alstrar två olika typer av ljud. Ett mekaniskt som är från maskinhuset (växellåda, generator och andra rörliga mekaniska delar) och dels ett aerodynamiskt från rotorbladen.

Vid ljudmätningar skiljer man på ljudemission och ljudimmission. Det värde som brukar redovisas av tillverkaren är ljudemissionen från rotornavets centrum. Denna mätning utförs när det blåser 8 m/s på tio meters höjd hos ett verk som är placerat i en träng med en råketslängd på 0,5 [11, 21]. Se ekvation 7.1 nedan [28].

$$L_{WA} = 50(\log_{10} V_{Tip}) + 10(\log_{10} D) - 4 \quad (7.1)$$

L_{WA} = A-vägd ljudeffektnivå [dB(A)]

V_{Tip} = Spets hastighet vid rotorblad [m/s]

D = Rotordiametern [m]

Ljudimmission är det värde som uppmätas i dBA på ett visst avstånd från verket. Det är ljudimmission från verket som avgör hur långt avståndet till närmaste fastigheter måste vara. Det är nämligen det ljudet som hörs hos boende i fastigheten [11, 21]. Se ekvation 7.2 [28].

$$L_p = L_w - 10 \log_{10} (2 \cdot \pi \cdot R^2) - \alpha R \quad (7.2)$$

L_p = Ljudtrycksnivå [dB]

L_w = Ljudeffektnivå från källan [dB(A)]

R = Avstånd från a bullerkälla [m]

α = Absorptionskoefficient (0,005 dB(A) m⁻¹)

Enligt ekvation 7.2 upplever boende en ljudtrycksnivå på ca 20 dB i en fastighet på 5m avstånd från ett vindkraftverk som har en ljudeffektsnivå på 40 dB.

Definitionen av buller är störande ljud. De högsta värden som är tillåtna för vindkraftverk är 40 dBA vid bostäder och 35 dBA vid fritidsbebyggelser och områden där naturupplevelse är en viktig faktor. Hos de verk som tillverkas idag har maskinbullret minimerats med hjälp av

ljuddämpare. Aerodynamiska ljud har också minskats kraftigt genom utveckling av bladens form. I vissa fall kan det ljudet sänkas även 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 risken är störst att närboende upplever störande buller [44, 11].

Bullerfrågan är viktig, speciellt i stadsmiljö eftersom den är avgörande för om verket får vara i drift eller inte. I projektet Warwick Wind Trials som genomfördes i UK, fick 6 av 25 vindkraftverk stängas av på grund av för hög ljudnivå [9]. För att ta reda på ett vindkraftverks ljuddata är det 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 själva har gjort mätningarna [68].

7.2.2 Skuggning och reflexer

Vindkraftverk kan ge upphov till skuggor och reflexer under året. Vissa parametrar såsom rotordiameter, navhöjd och solstrålningsvinkel mot horisontalplanet kan påverka skuggans utbredning. Reflexer kan avhjälpas med antireflexbehandlade rotorblad [11].

Risken för skuggstörningar är större för bebyggelser närmare till vindkraftverk och speciellt om de är placerade vid sydost och sydväst om verket. Dessa rörliga skuggor som upplevs av närboende kan vara störande och påverka livskvaliteten [11].

Exakta tidpunkter för skuggor går att beräkna med hjälp av datorprogram. Dessa kan redovisas grafiskt i diagram eller i form av en kalender [11].

Enligt boverket ska den faktiska skuggtiden inte överstiga 8 timmar per år eller max 30 minuter om dagen [45].

7.3 Bygglov

Enligt Vindlov (kapitel 3) krävs inget bygglov för att bygga ett vindkraftverk av typen microverk. Däremot måste en anmälan enligt 6 kap.5§pkt 7 plan- och byggförordning göras. Grannarna måste även informeras oavsett om verket kräver något myndighetstillstånd eller inte [46].

Ägaren måste också ta reda på eventuella fornlämningar och naturvärden. Denna information kan erhållas från kommunen och även länsstyrelsen. Man får vända sig till kommunen och även länsstyrelsen för information. Många kommuner har behandlat vindkraftsfrågorna i sin

översiktsplan, vilken kan innehålla policy och stadsbyggnadsprinciper som berör även miniverk [46, 68].

Totalt sätt krävs bygglov för följande när ett vindkraftverk ska installeras [46]:

- Om vindkraftverkets turbindiameter är större än 3 meter;
- Om vindkraftverket är fast monterad på en byggnad;
- Om vindkraftverket är placerat närmare tomtgränsen än verkets höjd.

En bygglovsansökan skickas till kommunen. Den skickas sedan vidare till myndigheter och andra organisationer för att pröva ansökan och platsens lämplighet för vindkraft. I första hand är det Försvarsmakten, Luftfartsstyrelsen och teleoperatörer, vilkas mobilmaster eller länkstråk kan tänkas störas. Normalt uppstår inga problem för ett vindkraftverk med totalhöjd under 40 meter (torn plus en bladlängd) [41].

7.4 Tekniska krav för anslutning

7.4.1 Det svenska elnätet

Stommen i det svenska elnätet består av stamnätet med en spänning på 400 eller 230 kV. Nästa nivå på elnätet består av regionnät, med 130 eller 70 kV spänning, som används för att överföra el från stamnätet till lokala distributionsnät. Det har 40, 20 eller 10 kV spänning. Mellan distributionsnätet och kunderna transformeras spänning ner till lågspänning 400 V [31, 42]. I Sverige har elnätet en konstant frekvens på 50 Hz, och såväl spänning som frekvens hos konsumenterna måste hållas på en jämn nivå.

7.4.2 Nätanslutning

7.4.2.1 Anslutning till elnätet

Elnätsföretaget har ansvar för elsäkerhet och leverans kvalitet och det ska garanteras att alla anslutna produktionsanläggningar fullföljer standarder och säkerhetskravet. Eltekniska uppgifter som behövs för anslutning till nätet lämnas in till elnätsföretaget. Detta kan ske genom att vindkraftverksleverantören fyller i en blankett som kallas för AMP- blanketten (Anslutning av mikroproduktionsanläggningar till elnätet). Ett småskaligt vindkraftverk skall anslutas till det lågspända lokalnätet (400 V). Ledningarna mellan närmaste transformator och verket får inte vara längre än ca 500 m, på grund av elnätets säkerhet [41, 42].

Av säkerhetsskäl är det viktigt att vindkraftsanläggningen är fast inkopplad och att det inte tillåter någon stickproppsinkoppling. Det är otroligt viktigt att vindkraftverkets

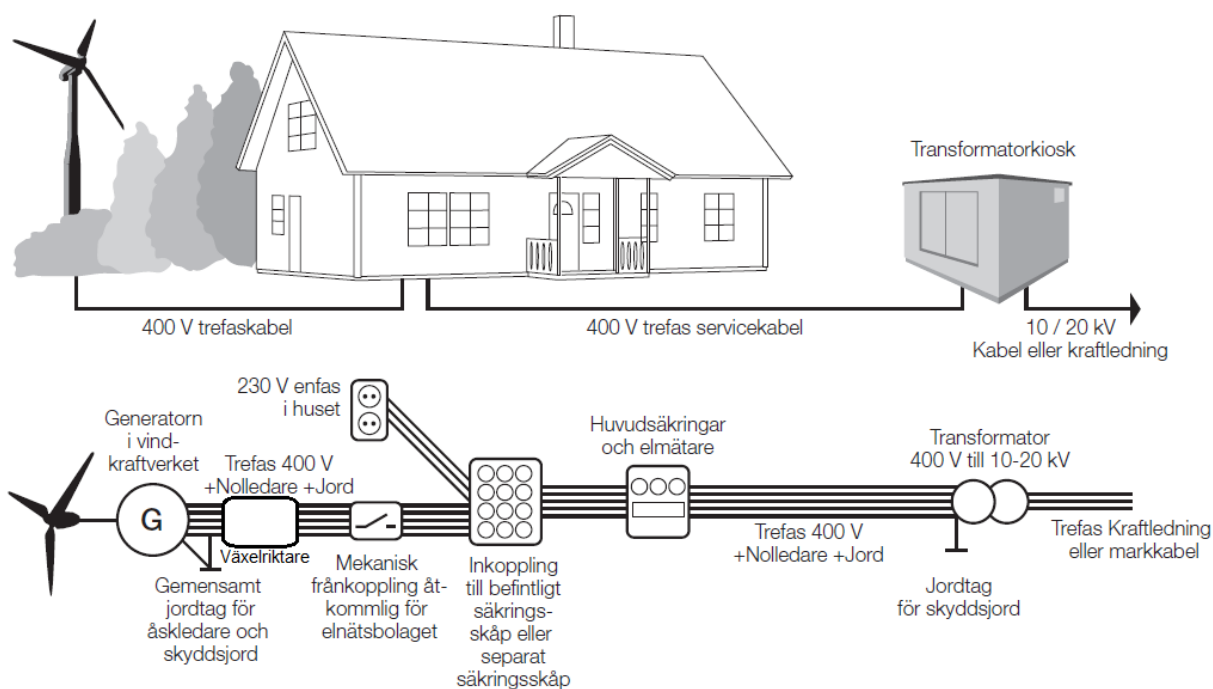
säkerhetssystem automatiskt kopplar bort vindkraftverket och elnätet från varandra vid feluppträdande. Detta kan annars resultera i att nätmatningen, spänningen eller frekvensen inte stämmer in på de normala värdena i elnätet. Nästan alla växelriktare har skyddskretsar för bortkoppling. Ett sådant skydd kan också installeras separat från växelriktare [41, 42].

Den elektriska anslutningen till elnätsföretagets nät ska göras av behörig elektriker. Åskledare och tillhörande jordning är också viktigt för att säkra omgivningarna vid åskväder [41, 42].

7.4.2.2 Anslutning inom den egna elinstallationen

Det kan vara fördelaktigt att ansluta vindkraftverket inom den egna, befintliga. Därigenom kommer produktionen att i första hand täcka det egna behovet. Elmätaren registrerar bara den el som utbyts med elnätet d.v.s. det som är överskott och exporteras till nätet eller det som är underskott och täcks från nätet. Tidigare förklaras i början av kapitel 7 när en anläggning ansluts inom den egna installationen, behöver elnätsföretaget enligt ellagen inte göra några ändringar i det anslutande elnätet så länge som utmatningen av effekt inte överstiger den effekt som abonnemanget redan omfattar. Ett lågspänningsabonnemang definieras av mätarsäkringarnas storlek, som bestämmer den maximala ström och därmed den effekt de tillåter [41].

Figur 35 visar en bild på inkoppling av vindkraftverk till egen bostad och elnätet.



Figur 35: Skiss på inkoppling av vindkraftverk till egen bostad och elnät [41]

7.4.3 Störningar till elnätet

Vid anslutning av mikroproduktion är det viktigt att säkerställa att produktionsanläggningen inte kommer att ge upphov till störningar eller dålig elkvalitet för den kund som ansluter produktionsanläggningen eller för någon annan kund i nätet.

7.4.3.1 Störning vid olämplig kortslutningseffekt

Elnätets kapacitet sätter en gräns för hur mycket vindkraft som kan anslutas till en elledning. Enligt de rekommendationer som anges i AMP (Anslutning av mikroproduktionsanläggningar till elnätet) ska kortslutningseffekten i anslutningspunkten vara minst 20 gånger större än vindkraftverkets effekt. Kortslutningseffekt definieras som ledningens nominella spänning multiplicerad med den maximala felström som kan gå igenom ledningen vid kortslutning av alla tre faserna. När spänningen faller bort ökar strömmen som kan skada ledningarna om den är för stark [11]. Det är därför att anslutning av produktionsanläggning till elnätet måste godkännas av elnätsföretaget i området [40, 42].

7.4.3.2 Övertoner

Vidare visades i kapitel 4 att övertoner är ett potentiellt problem med tanke på den variation som finns i den levererade elkvalitén hos växelriktare. Det finns standard för strömövertoner från trefasiga växelriktare, dock det inte räcker för att hålla nere de enskilda spänningsövertonerna på tillåtna nivåer om alla kunder i nätet använder dem. Den bästa riktlinjen är att totala strömövertoner från växelriktare ska vara mindre än 3 % [31].

7.4.3.3 Kortvariga spänningsändringar

Kortvariga spänningsändringar kan delas upp i enstaka snabba spänningsändringar och flimmer. De måste ändå begränsas på grund av deras risk att förstöra eller skada utrustningar. [42, 31].

7.4.3.3.1 Enstaka snabba spänningsändringar

Risken för problem med enstaka snabba spänningsändringar uppstår vid in- och urkopplingar av vindkraftverk. Antalet dessa kopplingar behöver inte begränsas för generatorer med max effekt enligt följande:

- 16-25 A, Enfasigt med max effekt på 2 kW
- 16-25 A, Trefasigt med max effekt på 12 KW

För generatorer större än angivet i ovanstående, bör antalet in- eller urkopplingar generellt sett begränsas till max 6 gånger per dygn [42].

7.4.3.3.2 Flimmer

Vindkraftverk kan ge upphov till flimmer, som uppstår till följd av variationer i inmatad eller uttagen effekt. Dessa ger till exempel irriterande och synliga variationer i ljuset från t.ex. en glödlampa [31, 42]. AMP (anslutning av mikroproduktion) anger vilka rekommendationer som gäller för flimmer [42].

7.4.3.4 Långvariga spänningsändringar

Långvariga spänningsändringar uppkommer främst på grund av de spänningsförändringarna som uppstår i transformatorer, ledningar och kablar då de belastas med ström. De tillåtna spänningsförändringarna kontrolleras genom att beakta två extremfall, maximal belastning och ingen produktion samt minimal belastning och full produktion. Skillnaden i spänning mellan de två extremfallen rekommenderas då vara max 5 % i nätet [31, 42].

7.5 Kundernas krav

Kunderna brukar kategoriseras efter sitt intresse för installation av ett vindkraftverk. De kan delas in i grupper för intresse av att bli självförsörjande eller de som har intresse för förnybar energi och bryr sig om miljö och vissa vill ha icke varierande elpris. Men för alla kunder är det lika viktigt att satsa på något säkrare och enkelt verk utan att utsätta sig och sina grannar för något farligt eller riskabelt verk. Ekonomiska aspekter och årsproduktion är också viktigt för kunderna [68,70].

Sammanfattningsvis brukar kunderna ställa följande krav från säljare av vindkraftverk [41, 68,76]:

- Ett verk som kan vara ekonomiskt lönsamt (återbetala sig under 10-11 år) och behöver inga särskilda underhåll av drift under sin livstid;
- Produkten är CE- märkt och det framgår för vilka vind- och klimatförhållande verket är konstruerat för;
- Effektkurvan på verket och den förväntade årsproduktionen vid lägre medelvindhastighet;
- Uppgifter om ljudnivå;
- Säkerhetsanvisningar, ritningar och annan dokumentation som krävs för installation och underhåll;
- De eltekniska uppgifter som behövs till elnätsföretag för anslutning till nätet.

8 Marknadsöversikt

Svensk vindkraftförening har sammanställt en rapport angående leverantörer och säljare av små vindkraftsverk i Sverige. Den nuvarande sammanställningen är från 2011 men en ny uppdatering ska påbörjas inom kort [66].

Aktörerna (10 företag) delar in sig i tre olika kategorier på den svenska marknaden [47]:

- 1) Svenska tillverkare med egen utveckling och konstruktion;
- 2) Svenska tillverkare som importerar vindkraftverk men säljer under eget namn.
- 3) Svenska återförsäljare (8 företag) som säljer vindkraftverk från 0,16 kW upp till 80 kW generatoreffekt.

Totalt finns 10 företag i kategorin 1 och 2. Vindturbiners effekt i dessa företag sträcker sig från 0,75 KW upp till 45 KW;

8.1 Intervju med leverantörer

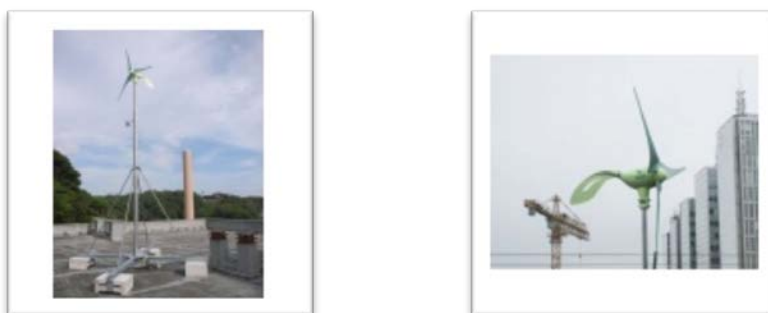
För att få en bredare förståelse över befintliga marknaden gjordes en undersökning, där sakkunniga personer från utvalda företag intervjuades. Intervjuerna syftade till att få svar på frågor som sammanstälts om bland annat mikroproduktion, utvalda mikrovindkraftverk i uran miljö samt möjliga problem med installation av dessa verk. Urvalet av dessa företag var enligt en lista över befintliga leverantörer och säljare av småskaliga vindkraftverk, vilken sammanställdes av Svensk vindkraftförening [47]. En enkät har dock skickats till alla dessa företag och enkäten är bifogad i bilaga F. Efter kontakten med alla utnämnda företag i denna lista, framgick att de flesta bara levererar större verk bland annat i en skala som gårdsverk. Två företag gick inte att ta kontakt med. Ett företag har lagt ner försäljning av vindkraftverk och säljer bara solceller istället. Eftersom vindkraftverks storlek har begränsats till 4 kW i denna studie (beskrevs i kapitel 3), kommer nu resultatet efter intervju med de företag som levererar nätanslutna småskaliga vindkraftverk i denna begränsade effektnivå.

De företag som deltagit i undersökningen är Egen El AB, SVIAB AB, WindForce AB, Inno Vantum AB. Nedan följer en sammanfattning av svaren från företagen.

8.1.1 Kontakt med Egen El i Stockholm

Vindhastigheten har stor betydelse för elproduktion för ett vindkraftverk. I urban miljö är det svårt att uppnå den höga märkeffekten. Ett verk ska nå märkeffekt vid vindhastigheten 5,5 m/s eller mindre för att installation av ett sådant verk ska bli ekonomisk lönsamt [70].

Den mest sålda vindturbinen på svenska marknaden och som följer denna regel bättre, är Airdolphin 1kW (figur 36). Ett problem som kan uppstå med verket är buller vid vissa vindhastigheter. Turbinen tillverkas i Japan och passar framförallt bäst där det är fritt, som ska monteras där det är stora ytor, öppet runtom med stadiga vindar [48, 70].



Figur 36: Bild på Airdolphin 1 KW [48]

Tyvärr hade 75 % av alla sålda vindturbiner i hela världen dålig funktion och de verkliga resultaten stämde inte alls med de tekniska data som man får från tillverkarna [70].

Av de horisontala verken förutom Airdolphin, är Pegasus (figur 37) ett väldigt nytt verk på marknaden. Efter installationen av Pegasus i Katrineholmsparken sedan maj 2013, följer detta verk i stort effektkurvan och årsproduktionen av tillverkares. Total bedömning efter installationen är att verket är väldigt tyst och har en stabil produktion. Tillverkaren är Hyenergi i Kina. Detta verk är ganska jämförbart med Airdolphin när det gäller effekt och årsproduktion. Fördelen är att det producerar el redan vid mindre vindhastighet, dock lite mindre vid hög vindhastighet jämfört med Airdolphin (se bilaga B) [70].



Figur 37: Bild på ett Pegasusverk, en 5-bladig turbin designad för låga vindflöden, vilket gör att den kan producera el redan vid 3,5 m/s [49].

8.1.2 Kontakt med SVIAB i Vettershaga söder om Norrtälje

SVIAB har sysslat med utveckling, produktion och försäljning av små vindkraftverk av typen VK240 sedan 1978. Idén av småskalig vindkraft i Sverige började hos Erik Wikberg som är grundaren till detta företag. Verket användes från början till fritidshus i skärgården [71].

VK240 har en effekt på 750 W, och årsproduktion på 1400 kWh/ år vid medelvindhastighet 5 m/s. Verket är avsett att ladda batterier men kan anslutas till nät också. Produkten har levererats till projekt i flera olika länder. Den har installerats på tak i Uppsala universitet sedan 10 år tillbaka. Tillsammans med Uppsala universitet har SVIAB utfört tester på verket och därmed hittat lösningar på problem som buller och vibrationer i byggnaden efter installation på taket [71].

Detta vindkraftverk börjar producera el vid vindstyrka på 2-3 m/s [71].



Figur 38: VK240 med effekt på 750 W från SVIAB [50]

8.1.3 Kontakt med Windforce i Göteborg:

Enligt kontaktpersonen på företaget är ett vindkraftverk med bra effekt vid 2-3 m/s av stort intresse i urban miljö men de finns tyvärr inte ännu på marknaden. Erfarenhetsmässigt passar vertikala verk bättre i urbana miljöer av säkerhetsskäl och bullernivå [72].

Ett vertikalt vindkraftverk producerar mer energi vid låga vindhastigheter och är jämnare än ett horisontellt vindkraftverk eftersom de vertikala inte behöver söka upp vindriktningen och dessutom är mindre känsliga för turbulent vind. De har en tystare och jämnare gång, ett relativt lågt varvtal men samtidigt ett högt vridmoment som gör att de producerar mer energi än motsvarande horisontella vindkraftverk i låga vindhastigheter [72].

Windforce har designat ett nytt vertikalt verk som är under utveckling och. Två rekommenderade verk från företaget heter WindStar 3000, vilket har monterats på Ekedalens skola Tidaholm och Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Andra verk som är i mindre skala (1kW) heter WindStar 1000, se figur 39 [72].

När det gäller kostnader följer en hög kostnad till omriktare. Denna kan ibland kosta lika mycket som själva turbinen eller installationen [72].



a) Windstar 3000



b) Windstar 1000

Figur 39: Två rekommenderade produkter från Windforce ,a) Windstar 3000, b) Windstar 1000)

8.1.4 Kontakt med InnoVentum i Malmö

I Sverige finns intresse för småskalig vind- och solenergiproduktion. Framförallt är det elproduktion från solceller på grund av enkelheten, men vind är också av intresse. Marknaden är inte så stor för små vindturbiner och intresse finns först hos människor som bor på öar eller

stora gårdar. Vissa företag och organisationer vill också profilera sig miljömässigt och är väldigt intresserade av att skaffa en typ av förnybar energikälla för egen elproduktion [74].

Vibration och ljud kan uppstå på en byggnad efter montering, men risken för vibrationer minimeras med träorn istället för ståltron. Träorn kan också absorbera icke luftburet ljud på ett bättre sätt. InnoVentum använder en speciell design av den här typen av torn vid varje installation [74].

De två rekommenderade vindkraftveken från Inno Ventum, vilka är anpassade till urban miljö är Turbo Beetle och Beetle S. Se figur 40 [74]:



a) Beetle S (3,7 KW)-Horisontal [19]



b) Turbo Beetle (1,7KW)-Horisontal [19]

Figur 40: Två rekommenderade horisontalaxlade verk, a)Beetle S, b) Turbo Beetle

8.2 Sammanställning av samtliga undersökta verk

Tekniska data över de följande verken har bifogats i bilaga B.

Tabell 4: Sammanställning av samtliga utvalda verk enligt relevanta leverantörer

	Air-dolphin	Pegasus	WindStar 1000	WindStar 3000	Beetle S	Turbo Beetle	VK 240
Märkeffekt	609 W	1,6 kW	1 kW	3 kW	3 kW	1,7-2,2 kW	750 W
Märkeffekt vid	11 m/s	12 m/s	12 m/s	12 m/s	12 m/s	13,5 m/s	12 m/s
Rotor diameter	1,8 m	2,05 m	2 m	3 m	4,05 m	1,5 m	2,4 m
Cut-in	2,5 m/s	2,5 m/s	2,5 m/s	3 m/s	3 m/s	2,9 m/s	3 m/s
Generator typ	3 fas PMSM	3-fas PMSM	3- fas PMSM	3-fas PMSM	3-fas PMSM	3-fas PMSM	3-fas synkron

Kontroll system	Säkerhetskontroll, yawkontroll, riktningskontroll	Elektromagnetisk & aerodynamisk, riktningskontroll	Elektromagnetisk & aerodynamisk	Elektromagnetisk och aerodynamisk, riktningskontroll	Elektrisk	Elektrisk	Turbinvrids automatisk ur vinden
Vikt	20 kg	46 kg	28/32 kg	70/84 kg	185 kg	110 kg	

8.3 Erfarenhet från tidigare projekt

Det grundläggande problemet i stadsmiljö är låga medelvindhastigheter och för mycket turbulens. Energiutbytet för ett vindkraftverk bestäms då nästan helt av rotorns diameter (se den holländska forskningen under 8.3.1) och plats (se den engelska studien under 8.3.2).

8.3.1 Test av 12 olika verk i Holland:

År 2008 utfördes ett test i Zeeland, vilket ligger i Holland och är en mycket blåsig. Tolv små olika vindkraftverk placerades i en rad på en öppen slätt (figur 41). Deras energiutbyte mättes under ett år (01-04-2008 – 31-03-2009) [51].

Den genomsnittliga vindhastigheten under dessa 12 månader var 3,8 m/s. Den uppskattade medelvindhastigheten efter vindkarta i Zeeland (på en höjd av tio meter) var istället 6 m/s [51]. Under testperioden gick tre turbiner sönder (se tabell 5) [52].



Figur 41: Test av 12 olika små vindkraftverk i Holland under tidsperioden 2008-2009 [51]

Tabell 5: Resultaten för de testade vindturbinerna på provfältet och deras verkliga årsproduktion efter ett års mätning i Zeeland [52]

Turbiner	Typ av SWT	Plats	Effekt kW	Rotor diameter	Produktion Vid 3,8 m/s
Amapair	HAWT	2	0,7 vid 11 m/s	1,7 m	325 kWh
Turby	VAWT	3	2,5 vid 14 m/s	2,1 m	225 kWh
Fortis Montana	HAWT	4	5,8 vid 17 m/s	5 m	2700 kWh
Fortis Passaat	HAWT	5	1,4 vid 16 m/s	3,12 m	600 kWh
Energi ball	HAWT	6	0,1 vid 10 m/s	1,1 m	75 kWh
WRE 030	VAWT	7	3 vid 14 m/s	2 m	600 kWh
DonQi	HAWT	Inte längre på provfältet	2,2 vid 12,5 m/s	2 m	-
Airdolphin	HAWT	9	3,2 vid 20 m/s	1,8 m	400 kWh
Skystream	HAWT	10	2,4 vid 13 m/s	3,7 m	2100 kWh
WRE 060	VAWT	11	6 vid 14 m/s	3,3 m	500 kWh
Raum	HAWT	Inte längre på provfältet	1,3 vid 10 m/s	2,9 m	-
Swift	HAWT	Inte längre på provfältet	1,5 vid 15 m/s	2,1 m	-

Vid en första anblick tyder resultaten på hur utformningen av vindturbiner kan vara viktig. Kombineras dessa siffror med rotordiameter blir det tydligt att de vindkraftverk som får högst poäng (de två gulmarkerade) helt enkelt är de största och av typen HAWT. Men å andra sidan passar vindturbiner med en rotordiameter på 4 eller 5 m inte på de flesta tak och är dessutom inte lätta att integrera i tätbebyggelser [51].

8.3.2 Erfarenhet från test på 5 olika verk i 26 olika platser i urban miljö – UK

Encraft Warwick Wind Trials Project har samlat information om elproduktion av 5 olika vindturbiner på 26 platser över hela Storbritannien. Detta gjordes från oktober 2007 till oktober 2008 och resultaten publicerades i januari 2009. Turbinerna placerades i tätbebyggd miljö. Den ena hälften var fästa vid fasaden eller på taket av småhus och den andra hälften var

fästa på tak av flerbostadshus. Till skillnad från testet i Zeeland, var avsikten inte att undersöka hur vindturbinerna fungerar i förhållande till varandra. Utan studien skulle visa hur bra eller dåligt små vindkraftverk fungerar i en specifik miljö. Turbinerna som använts i studie i Storbritannien, visas i tabell 6 [51, 27].

Tabell 6: *De turbiner som användes i Encraft Warwick Wind Trials Project [27]*

Turbin	Effekt
Ampir	600 W
Airdolphin	1 kW
StealthGen	400 W
Windsave	1 kW & 1,25 kW

Encrafts beräkningar visar mycket lägre medelvindhastighet än vindkartan. Vindkartans uppgifter i den brittiska studien är hämtad från NOABL-databasen (i Sverige motsvarat av SMHI:s vindkartor). Det visade sig också att den så kallade kapacitetsfaktorn (se i avsnitt 4.3.2.2) i medel var lägre än 1 % (0,85 %) jämfört med ett fristående storskaligt vindkraftverk med en kapacitetsfaktor på 20-30 % [51, 27].

Det bästa resultatet kommer från ett verk monterat på toppen av en 45 meter hög lägenhetsbyggnad som ligger på en backe. Detta levererade 869 kWh per år. Det sämsta resultatet är ett verk som är fäst på fasaden av ett småhus. Verket levererade endast 15 kWh per år. Dessa resultat visar tydligt att platsen är av avgörande betydelse eftersom att samtliga verk har i princip ca samma effekt [51].

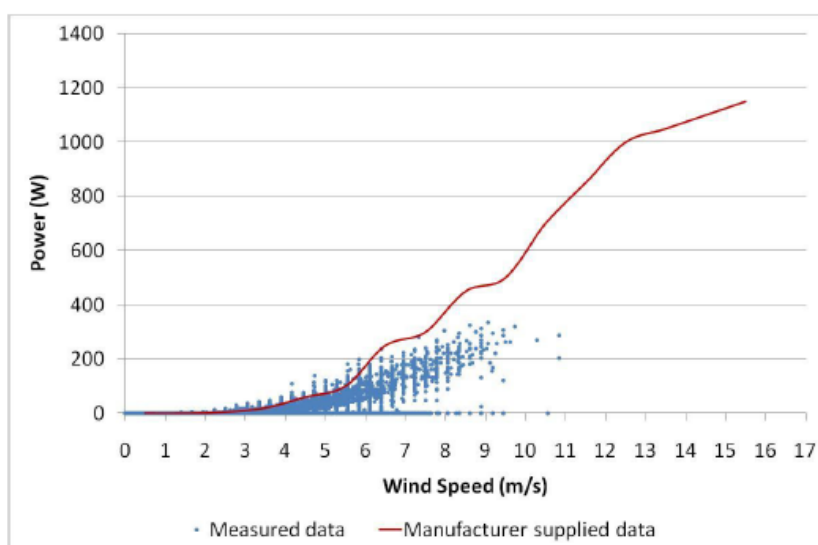
Samtidigt visar Encrafts undersökning att tillverkarna av småskaliga turbiner har en tendens att överdriva vindeffektkurvorna och därmed framställa sina produkter i bättre ljus. I tabell 7 och figur 42 visas problemet med dessa osäkra produktuppgifter för de utvalda platser och turbiner i UK projektet samt hur stor betydelsen uppskattningen av de lokala vindförhållandena för en noggrann prognos av energiproduktion är [51]:

Tabell 7: Jämförelse av riktig årsproduktion från små vindkraftverk för de utvalda platser i den Britiska studien under ett år. Siffrorna erhålls enligt definierade effektkurva från leverantör och riktig effektkurva efter testperiod [52].

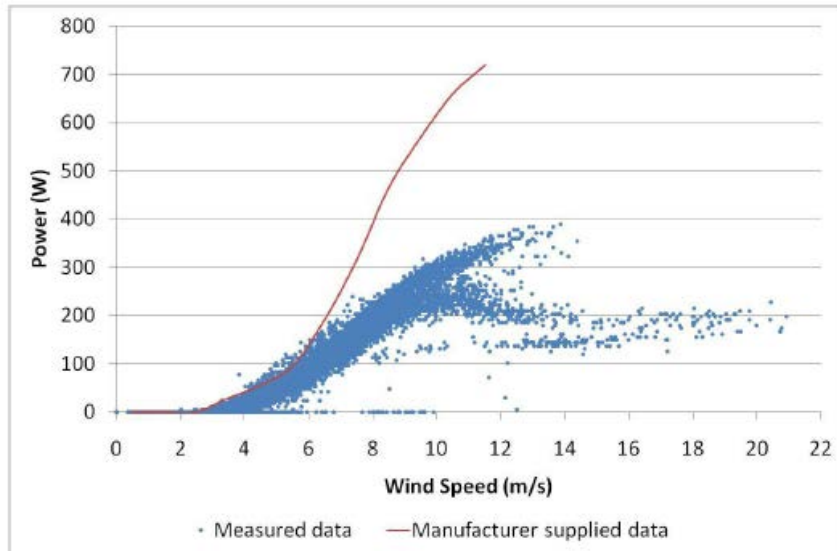
Plats	Med NOABL:s vindhastigheter och leverantörers effektkurva (kWh)	Med uppmätt vind och leverantörers effektkurva (kWh)	Uppmätt vind och den riktiga effektkurvan (kWh)
Lillington Road	819	88	52
Bird Hills	574	135	48
Leicester	1101	217	64
Daventry Town Hall	650	166	69

I figur 42 nedan visas de effektkurvor som framställts av mätdata på två olika platser med två olika modeller av turbiner. Den röda kurvan i varje graf är tillverkarens medföljande effektkurvan medan de blå datapunkterna är riktiga mätdata i varje provfält. Diagrammen visar att effektkurvor bara instämmer närmare med tillverkarens medföljande data vid låga vindhastigheter [52]:

Zephyr Air Dolphin Z1000 - Leicester



Ampair 600 – Misty Farm



Figur 42: Effektkurva för två utvalda platser. Den röda kurvan är leverantörens effektkurva och de blå punkterna är riktiga mätdata i varje provfält efter ett års mätningar [52]

Den brittiska studien ger också siffror för elförbrukning av elektronik som används i vindkraftverken. I genomsnitt förbrukar varje vindkraftverk 29 kWh/ år (varierande från 3 kWh till 136 kWh/ år). Detta innebär att en del av de små vindkraftverken förbrukar mer el än vad de levererar [51].

9 Ekonomiska aspekter

I avsnitt 7.2 visades resultatet på befintliga och intressanta produkter på marknaden enligt leverantörer i tabell 4. Från denna ses att de horisontalla verken fortfarande är dominerande på marknaden. I detta avsnitt har det valts ut 6 olika verk av typen horisontal- och vertikalaxlat (figur 43) för vidare ekonomisk och teknisk analys (beräkning av årsproduktion och beräkning av effektfaktor).

De utvalda verken enligt leverantörer uppfyller dagens förutsättningar och krav inför installation (se kapitel 7). Det viktigaste att ta hänsyn till enligt leverantörerna är att verket inte har störande ljud vid vissa hastigheter. Dessutom spelar säkerheten en stor roll när det gäller urban miljö.

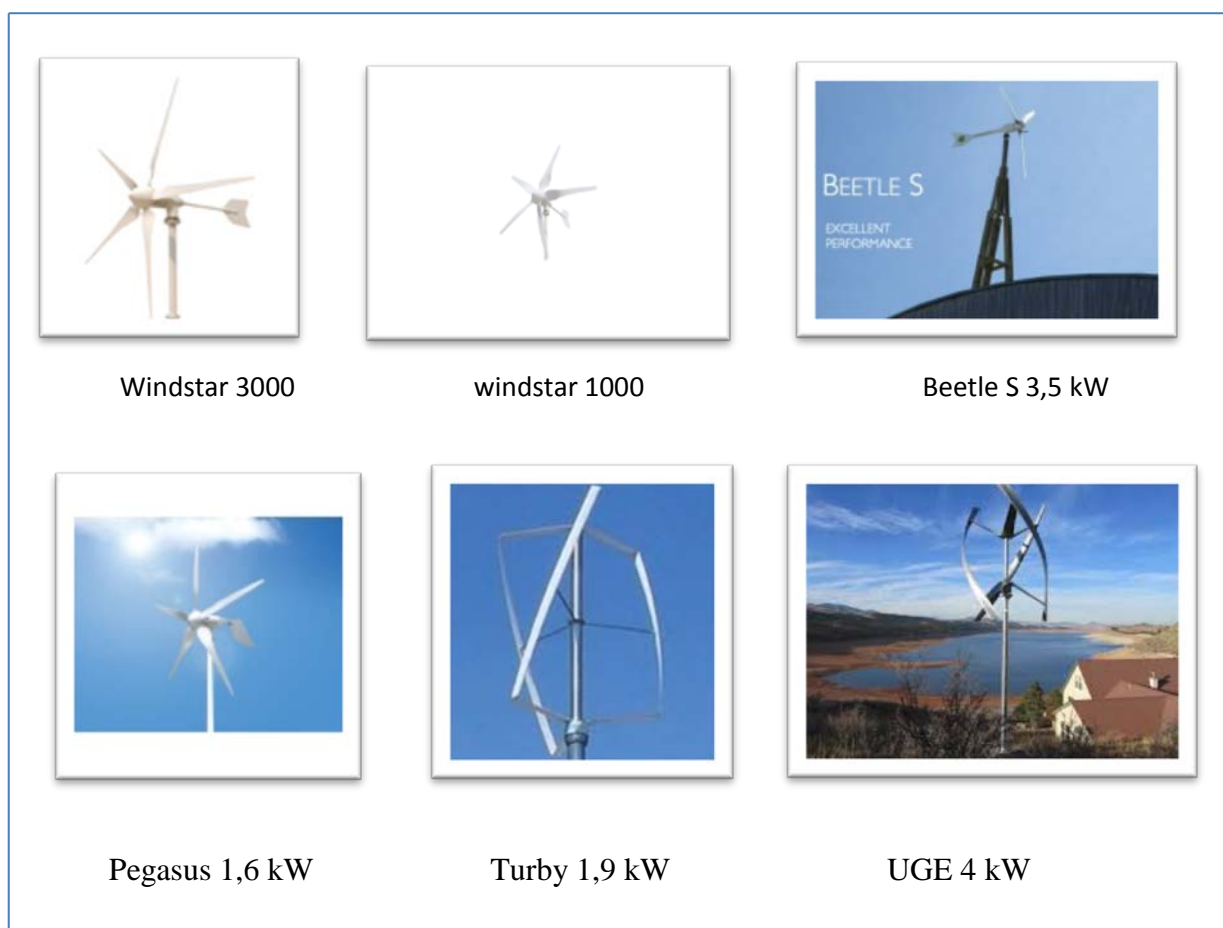
Det finns inte särskilt många tillgängliga referenser och information om vertikala verk i Sverige. För att välja ett lämpligt verk (VAWT) har det tittats närmare på ett gemensamt projekt som stöds av EU-programmet "Intelligent Energy Europe". Detta program har utförts av fem organisationer (Axenne och ADEME från Frankrike, IT Power från UK samt HORISUN och ARC från Nederländerna). Den mest sålda produkten enligt rapporten är Turby med effekt på 1,9 kW, vilken tillverkas i Nederländerna [9, 53].

Det andra vertikala verket som har valts heter UGE och har en effekt på 4 kW. Detta verk har installerats tidigare på Läkerol Arenas tak i Gävle [23]. Anledningen till valet av det här verket var att visa en tydlig skillnad på effektutgången från ett vertikalt verk med ett horisontalt verk i ungefär samma storlek. Dessutom att jämföra hur stor investeringskostnaden och årsproduktion är mellan dessa typer av verk.

I simulering av årsproduktion för de 6 utvalda verk användes tillgänglig vinddata från Värpinge (se kapitel 5). Vidare för att beräkna årsproduktionen har tillgänglig effektkurva för varje verk och dess tekniska data hos leverantörer tagits ut. Med hjälp av de kurvorna beräknades respektive koefficientfaktor och dessa sattes sedan in i ekvation (4.3) (se bilaga C). Slutligen har en weibullfördelning använts för att få fram den årliga elproduktionen.

Tabell 8 nedan är en sammanställning av de utvalda verken. I den ses bland annat energiproduktionen för varje verk vid olika medelvindhastigheter. Som tidigare visats i

kapitel 5 ligger medelvindhastighet för Värpinge på 3,2 m/s, men känslighetsanalysen har också gjorts för samtliga vindkraftverk för att beräkna årsproduktionen vid medelvindhastighet på 4,5,6 och 7 m/s.



Figur 43: Bilder på de 6 utvalda verken. De horisontella små vindturbinerna rekommenderades av svenska leverantörer.

Tabell 8: Årsproduktion vid olika medelvindhastigheter hos de 6 utvalda verken samt deras pris

Turbin modell	Pris kr	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s
Beetle S 3,5 kW	134 000	3216 kWh	5886 kWh	8593 kWh	12370 kWh
Turby 1,9 kW	175 000	1056 kWh	1933 kWh	3111 kWh	4061 kWh

Windstar 3kW	75 000	2383 kWh	4362 kWh	7022 kWh	9166 kWh
Windstar 1kW	38 000	852 kWh	1559 kWh	2510 kWh	3277 kWh
Pegasus 1,6 kW	46 000	1137 kWh	2082 kWh	3351 kWh	4375 kWh
UGE 4 kW	204 000	3036 kWh	5556 kWh	8945 kWh	11677 kWh

Den rekommenderade medelvindhastighet på platsen där en småskalig vindturbin ska installeras bör vara minst 5 m/s för att installation av ett småskaligt vindkraftverk ska kunna vara ekonomiskt lönsamt [68,70,74].

En metod baserad på nyckeltal (se avsnitt 4.3.2.3) har använts för att välja ut två verk för vidare analys av ett lönsamhetskalkylsprogram. Enligt metoden har investeringskostnader/kWh beräknats för samtliga turbiner med medelvindhastighet på 5 m/s. Årsproduktion vid den vindhastigheten har tagits ur tabell 8 (det har gulmarkerats i tabellen). Investeringskostnader för produkter är själva produktens pris exklusive moms plus installationskostnader.

Tabell 9: Nyckeltal (kostnadseffektivitet och energi per effekt) för utvalda vindturbiner vid medelvindhastighet på 5 m/s

Turnib model	Investerings Kostnader (pris på paket+installation)	kr/ kWh (kostnadseffektivitet = investeringskostnader per årsproduktion)	kr /kW (energi per effekt)
Beetle S 3,5 kW	134 000	22,8	38 285,7
Turby 1,9 kW	175 000	90,6	92 105,3
Windstar 3 kW	75 000	17,2	25 000
Windstar 1 kW	38 000	24,4	38 000
Pegasus 1,6 kW	46 000	22	28 750
UGE 4 kW	204 000	36,7	51000

De två verk som har bättre kostnadseffektivitet (investeringskostnader per årsproduktion är lägre än de andra) har valts för vidare ekonomisk analys i kalkylprogrammet. Båda verken är av typen HAWT (horisontalaxlade verk). UGE 4 kW, vilken är ett vertikalaxlat verk har också valts. Anledningen till detta är för att utföra en analys innehållande både HAWT och VAWT.

Förnybar energi i urban miljö och egen elproduktion är utmärkande för solceller också. I dagsläget finns ett stort intresse för solcellspaket som erbjuds ifrån olika energibolag i Sverige. Vissa leverantörer som har blivit intervjuade, presenterar både solcellspaket och vindturbiner för egen elproduktion till kunderna. En jämförelse av kostnadseffektivitet för småskaliga vindkraftverk vid medelvindhastighet på 5 och 7,5 m/s med storskaligt vindkraftverk vid medelvindhastigheten på 7,5 m/s samt med solceller på 3 och 4,5 kWp visas i tabell 10.

Solcellspaketens priser enligt Krafringen redovisas i figur 44. Investeringskostnader för ett stort vindkraftverk på 2 MW ligger på 35 MSEK. Verkets årsproduktion är ca 6 GWh/år vid medelvindhastighet på 7,5 m/s (data har hämtats av författarens inlämning på vindkraftkursen på LTH).

Anläggningstyp	Lilla Solen	Stora Solen	Hela Hemmet	Kraftverket
Effekt	3 kWp	4,5 kWp	6 kWp	7,5 kWp
Ungefärlig yta	20 kvm	30 kvm	40 kvm	50 kvm
Produktion	2 850 kWh/år	4 300 kWh/år	5 700 kWh/år	7 125 kWh/år
Andel av hushållsel för en normalvilla på årsbasis	60 %	85 %	120 %	150 %
Pris exkl moms. (prisvariationer kan förekomma)	56 000 kr	82 000 kr	108 000 kr	135 000 kr
CO ₂ -reducering per år (baserat på residualmix)	873 kg/år	1 310 kg/år	1 745 kg/år	2 182 kg/år
Estimerad CO ₂ -reducering under livstid (30-35 år)	26-30 ton CO ₂	39-46 ton CO ₂	52-61 ton CO ₂	65-76 ton CO ₂
Garanti	25 år*	25 år*	25 år*	25 år*

*25 års effekttaranti från tillverkaren

Figur 44: Solcellspaket som presenteras av Krafringen. Samtliga priser är exklusive moms [54].

Tabell 10: Jämförelse av kostnadseffektivitet på småskaligt- och storskaligt vindkraftverk samt solcellspaket med effekt på 3 och 4,5 kWp

Turbin modell	Investering kostnader (kr)/kWh Vid 5 m/s	Investerings kostnader (kr)/ kWh Vid 7 m/s	Investerings kostnader för stora verket vid 7m/s (kr)/kWh	Investeringskostnader för solcellsanläggningen på 3 kWp (kr)/ kWh	Investeringskostnader för solcellsanläggning på 4,5 kWp (kr)/ kWh
Beetle S 3,5 kW	22,8	10,8	5,8	19,6	19
Turby 1,9 kW	90,6	43	5,8	19,6	19
Windstar 3 kW	17,2	8,2	5,8	19,6	19
Windstar 1 kW	24,4	11,6	5,8	19,6	19
Pegasus 1,6 kW	22	10,5	5,8	19,6	19
UGE 4 kW	36,7	17,4	5,8	19,6	19

När nyckeltalet jämförs för dessa produkter i tabell 10 ovan visar det att småskaliga vindturbiner är fortfarande väldigt dyra jämfört med stora verk på grund av höga investeringskostnader och lägre elproduktioner. Däremot kan Windstar med effekt på 3 kW vid medelvindhastighet på 7 m/s (=bra vindläge) konkurrera med både solcellsanläggningar (17,2 kr/kWh jämfört med 19,6 respektive 19 kr/kWh).

9.1 Lönsamhetskalkyl

Lönsamhetskalkylen har beräknats med hjälp av Excel där beräkningar gjorts över alla intäkter och kostnader. För samtliga beräkningar justerades inflation till 2 % och kalkylränta valdes till 6, 3 och 2 %. Ett annat mått som måste användas i programmet är årsproduktionen som tagits från tabell 8. Livslängden antas 20 år för samtliga småskaliga vindkraftverk.

Den ekonomiska analysen baseras på årsproduktionen från dessa verk vid medelvindhastighet på 5 m/s. I kapitel 5 visades att den möjliga vindhastigheten i urban miljö på 20-25 meters höjd ligger på 4-5 m/s. Vindhastigheter som 6 eller 7 m/s uppstår sällan. Samtidigt

rekommenderas en medelvindhastighet på 5 m/s till kunderna från leverantörerna om installationen av en liten vindturbin ska bli ekonomiskt lönsam.

Enligt lönsamhetskalkylen måste olika lösningar åtagas för att installation av vindturbiner ska bli ekonomiskt lönsamma (återbetala sig efter 10-11 år). Dessa åtgärder kan vara sänkning av investeringskostnader, ökning av elpris eller andra ekonomiska stöd. I bilaga D visas ett exempel på Windstar 3000 med en kalkylränta på 3 %, för att läsaren ska få en snabb överblick över kalkylverktyget.

9.1.1 Intäkter

Intäkter för ett småskaligt vindkraftverk består av försäljning av överskottsel, elcertifikat, nätnytta och uteblivet köp av el till följd av egen elproduktion. Därtill kan subvention i form av skattereduktion tillkomma, se kapitel 9.1.2. När kalkylen utfördes motsvarade 1 euro 8,7 SEK [57].

9.1.1.1 Elpris

Typisk rörliga kostnader för inköp av el i ett lågspänningsabonnemang består av själva priset på elen, energiskatt, avgifter till elnätsföretag, elcertifikat och moms. Kostnaden för inköp av el ligger på ungefär 1,08 kr/kWh i dagsläget [41, 73].

Elpriserna varierar under året [41]. Efter år 2012 har elpriset sjunkit kraftig jämfört med tidigare år. Det genomsnittliga elpriset under kommande 10 år kan förutspås genom market priser och Nord pool spot. Detta elpris har användas i vidare beräkningar. Det genomsnittliga elpriset ligger på 0,34 kr/kWh den kommande 10-årsperioden [55, 56, 73].

Eftersom produktionen från småskaliga vindkraftverk är så liten i förhållande till det egna behovet kan det antas att huvuddelen av produktionen används i hushållet. I energimyndighetens broschyr antas att ca 75 % av elproduktionen från ett verk med effekt på 2 kW går till eget behov och resten kan matas ut till nätet [41]. I denna studie har det antagits att 70 % används till eget behov och 30 % skickas till nätet för de tre utvalda verken på 4, 3 och 1,6 kW. Då de årliga intäkterna för dessa 3 små vindturbiner blir:

- Intäkter från produktion som ersätter inköp från elnätet = $70 \% \times \text{årsproduktion} \times 1,08(\text{inköp elpris})$
- Intäkter från produktion till elnätet = $30 \% \times \text{årsproduktion} \times 0,34$ (såld el= själva elpriset)

9.1.1.2 Elcertifikat

Elcertifikat kan fås för producerad el från förnybara energikällor. Dessa certifikat kan sedan säljas till elhandelsföretag, vilka är tvungna att redovisa certifikat för staten i proportion till sin försäljning. Priserna på certifikaten har sedan introduktionen 2003 varierat mellan 16 och 25 öre/kWh. En anläggning kan få certifikat under 15 år och systemet gäller fram till 2030. För att anslutas till elcertifikatsystemet måste anläggningen godkännas av Energimyndigheten [41].

För att få elcertifikatsersättning för all den el som produceras (=både egen förbrukning och utmatad på nätet) behövs en extra timmätning vid generatoren. Den bekostar kunden själv med ca 3000-5000 SEK/år [40]. Däremot kan elcertifikat fås för överskottselen som skickas ut till elnätet utan att extra mätare och abonnemang anskaffas [69].

Elcertifikatspriser som har använts i kalkylen är baserad på det genomsnittliga priset för de kommande 5 åren. Priset ligger på 23 öre/kWh och har tagits fram av Svensk Kraftmäklare [58,73].

9.1.1.3 Nätnytta

En elproducent har rätt till ersättning för den ”nytta” som den lokala produktionen medför i form av minskade förluster från eltransporter. Denna ersättning kallas för ”nätnytta” och varierar med hur det lokala nätet ser ut [41]. Ersättningen varierar också för olika bolag. I denna studie är värdet på nätnyttan 0,005 kr/kWh, vilket har tagits från Krafringen [69].

9.1.1.4 Skattereduktion

”Regeringens utredare Rolf Bohlin överlämnade till finansminister Anders Borg den 14 juni sitt betänkande ”Beskattning av mikroproducerad el m.m.” [SOU 2013:46]. Utredningens förslag innebär att mikroproducenter ska få en skattereduktion om max 6 000 kr per år. Skattereduktionen är ungefär samma som man skulle få i ett s.k. nettodebiteringssystem som inte är förenligt med EU:s regler om moms. Utredningen föreslår även att elnätsföretagen ska vara skattskyldiga för elskatt istället för elhandelsföretagen. Vidare föreslås att de särskilda skattereglerna för egenförbrukning av vindkraftproducerad el tas bort.” [59]

Anledningen till detta är för att skillnaden på inköpt el och själva elpriset ska jämnas ut. Om det antas att inköpspriset på el är 1 kr/kWh och elpriset för såld el ligger på 0,4 kr/kWh blir intäkterna av överskottselen som matas ut till nätet $0,4 \text{ kr/kWh} \times \text{överskott el (kWh)}$. Ett

skattereduktionssystem på 0,6 kr/kWh kan därmed hjälpa till att priset på den sålda elen närmar sig inköpspriset [69]. Denna siffra har använts i senare beräkningar i kapitel 9.1.2.

9.1.2 kostnader

9.1.2.1 Drift och underhåll

Drift och underhåll i allmänhet kostar minst 10 öre/kWh för de stora vindkraftverken med effekt på några hundra kW. I Energimyndighetens broschyr används schablonmässigt 10 öre/kWh, vilket utvärderas till lågt räknat med hänsyn tagen att de inte har så stor årsproduktion och där denna kalkyl ger en liten total summa per år [41].

Enligt enkätundersökningen som skickades till leverantörerna, anser de flesta att det bara behövs några tusenlappar under ett år för kostnader till drift och underhåll.

9.1.2.2 Elcertifikat och Cesar-konto

När en anläggning är godkänd för tilldelning av elcertifikat utfärdas elcertifikaten av Svenska Kraftnät. Utfärdandet baseras på den elproduktion som sker i anläggningen. Elcertifikaten registreras på producentens konto i Svenska Kraftnäts kontoförningssystem, Cesar, med en årlig avgift på 200 kr [60,73].

9.1.2.3 Ursprungsgaranti

Lagen om ursprungsgarantier gäller från och med den 1 december 2010. Det innebär att elproducenter får en garanti av staten för varje producerad megawattimme (MWh) el, vilken sedan kan säljas på en öppen marknad [61]. Elproducenter betalar 0,05 kr per utfärdad ursprungsgaranti [60]. Den lilla kostnaden påverkar inte riktigt kostnaderna, och därför har den utelämnats i samtliga kalkyler.

9.2 Lönsamhetskalkyl utan någon form av stöd

I detta avsnitt genomförs beräkningar för de 3 utvalda verken utan hänsyn till någon form av stöd, vilket är den verkliga marknaden för SWT i dagsläget. För att göra beräkningar i kalkylprogrammet har värden tagits respektive verk. Se också avsnitt 9.1. Livslängden på vindkraftverk har antagits 20 år. En återbetalning mer än 10-11 år antyder på olönsamheten av verket. Det maximala värdet på återbetalningstid som visas i kalkylprogrammet är 30 år. I vissa fall kan det dock vara på riktigt mer än 30 år.

9.2.1 Lönsamhetskalkyl för Windstar 3000

Tabell 11: Resultat på lönsamhetskalkyl för Windstar 3000 med årsproduktion vid 5 m/s (utan skattereduktion)

Medelvindhastighet: 5 m/s Windstar 3000, Årsproduktion: 4362 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elcertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter nuvärde kr	Kostnader nuvärde kr	NV _k
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6 %	30 år	57651	8 602	0,65
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3 %	30 år	73 745	10 769	0,84
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	2 %	30 år	80 671	11821	0,92

9.2.2 Kalkyler till Pegasus

Tabell 12: Resultat på lönsamhetskalkyl för Pegasus med årsproduktion vid 5 m/s (utan skattereduktion)

Medelvindhastighet: 5 m/s Pegasus 1,6 kW, Årsproduktion: 2082 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elcertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter nuvärde kr	Kostnader nuvärde kr	NV _k
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6 %	30 år	27 516	5 320	0,48
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3 %	30 år	35 197	6 649	0,62
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	2 %	30 år	38 502	7 210	0,68

9.2.3 Kalkyler till UGE

Tabell 13: Resultat på lönsamhetskalkyl för UGE med årsproduktion vid 5 m/s (utan skattereduktion)

Medelvindhastighet: 5 m/s UGE 4kW, Årsproduktion: 5556 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elsertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter nuvärde kr	Kostnader nuvärde kr	NV _k
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6 %	30 år	73 432	10 322	0,31
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3 %	30 år	93 932	13 060	0,40
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	2 %	30 år	102754	14 237	0,43

Inga av de 3 verken kan återbetala sig enligt nuvarande kostnader och elpris. Windstar 3000 med räntan på 2 % har bäst nuvärdeskvot 0,92 jämfört med Pegasus (0,68) och UGE (0,43). UGE är därmed långt ifrån lönsamt.

9.3 Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion

I samtliga kalkyler nedan har en skattereduktion tillkommit. Det har antagits att elpris och elcertifikat bara ökas med max 10 %, vilket kan anses som en rimlig förändring på befintliga priser [73].

Resultatet av dessa kalkyler för varje vindturbin med årsproduktion på 5 m/s är sammanställt i tabell 14. Tydligare ekonomisk analys visas i form av tabeller i bilaga E. Tabellerna visar också en analys över samtliga verk med data från deras årsproduktion på 4, 5, 6, 7 m/s.

9.3.1 Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion för Windstar 3000

Lönsamhetskalkylen visar att vindturbinen återbetalar sig efter ca 8-9 år vid medelvindhastighet på 7 m/s vid utvalda räntor (6, 3, 2 %). Vid vindhastighet på 6 m/s är

investeringar lönsamma med ränta på 2-3 %. För andra vindhastigheter och ränta på 6 % krävs minskning av investeringskostnader.

Ökning av elcertifikat påverkade inte intäkterna så mycket eftersom elcertifikatersättning bara varar i 15 år och endast för den mängden energi som matas ut till nätet (30 % av total elproduktion), vilket är väldigt lågt. Vid vindhastigheter på 4-5 m/s blir skillnaden mellan intäkter och kostnader för elcertifikat nästan noll. Elcertifikatskostnad betyder den årliga kontoavgiften på 200 kr under vindkraftverkets livstid.

9.3.2 Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion för Pegasus

Kalkylen visar att verket kan återbetala sig efter ca 10 år vid medelvindhastighet på 7 m/s och med ränta på 2-3 %. Vid en genomsnittlig medelvind på 5 m/s måste investeringskostnader minskas med ca 50 % och elpris ökas med 10 % för att verket ska betala tillbaka sig efter 10 år.

Kostnader för elcertifikat är något högre än intäkter för medelvindhastigheter på 4, 5 och 6 m/s. Vid medelvind på 7 m/s är intäkterna från elcertifikat nästan lika med kostnaderna. Detta innebär att mindre verk bidrar till mindre produktion och därmed mindre överskottsel matas ut till nätet. Intäkterna av såld elcertifikat är därför så liten.

9.3.3 Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion för UGE

UGE- turbinen har betydligt högre investeringskostnader, vilket gör det olönsamt att satsa på den i urban miljö. De två andra turbinerna kunde återbetala sig vid vindhastighet på 7 m/s men investeringskostnader för UGE ska minskas kraftig för att verket ska återbetala sig vid medelvindhastighet på 7 m/s. Montering av detta verk kan bara vara av intresse för att testa funktion av vertikalaxlade verk eller när det gäller estetiska egenskaper och investeringskostnader inte är så viktigt. Till exempel har två UGE- turbiner valts och installerats för en projekteringsfas på Läkerol Arenas tak i Gävle. I detta projekt prioriteras de estetiska egenskaperna framför prestanda på grund av att Gävle Energi ser dem som en marknadsföringsprodukt [23].

Tabell 14: Sammanställning av samtliga kalkyler för minskning av investeringskostnader för de 3 utvalda turbinerna (skattereduktion inkluderad). Årsproduktionen är beräknad med en medelvind på 5 m/s. Se bilaga E.

Vindturbin	Pris	Procentuell minskning av investeringskostnader enligt nedanstående räntor (skattereduktion inkluderad)		
		6 %	3 %	2 %
Windstar 3000 (3 kW)	75 000 kr	45 %	40 %	35 %
Pegasus (1,6 kW)	46 000 kr	59 %	52 %	50 %
UGE (4 kW)	204 000 kr	74 %	71 %	70 %

9.4 Lönsamhetskalkyl utifrån förväntat elpris

I detta avsnitt studeras hur elpriset ska varieras hos de 3 utvalda verken för att de ska bli ekonomiskt lönsamma och kan återbetala sig efter 10-11 år. Därmed har inget ekonomiskt stöd lagts till i beräkningarna. Detta är bara en dimension, för att visa hur långt ifrån småskaliga vindkraftverk ligger på marknaden för att bli ekonomiskt lönsamma. Elcertifikatet antas vara oförändrat och ligger fortfarande på 23 öre/kWh. Tydligare analys och siffror över samtliga verk finns i bilaga E, se avsnitt E2.

Ändring av elpris på samtliga verk visar att ökning av nuvarande elpris med 100-350 % har stor påverkan på intäkter, vilket gör att verken med nuvarande pris och kostnader återbetalar sig efter 10 år vid de utvalda räntorna. Av dessa verk är Windstar 3000 mest lönsamt. För att Windstar ska kunna återbetala sig behövs det göras en ökning av elpriset på 100 %, vilket kan jämföras med 170 och 300 % för Pegasus respektive UGE. Resultatet av dessa kalkyler för varje vindturbin är sammanställt i tabell 15.

Tabell 15: Sammanställning av samtliga kalkyler för ökning av elpris för de 3 utvalda turbinerna. Årsproduktionen är beräknad med en medelvind på 5 m/s.

Vindturbin	Pris	Procentuell ökning av elpris med enligt nedanstående räntor		
		6 %	3 %	2 %
Windstar 3000 (3 kW)	75 000 kr	140 %	100 %	100 %
Pegasus (1,6 kW)	46 000 kr	200 %	170 %	170 %
UGE (4 kW)	204 000 kr	350 %	300 %	300 %

9.5 Lönsamhetskalkyl med förväntade stöd

I kapitel 9.3 visades det att en skattereduktion på 60 öre/kWh för den elen som matas ut till nätet inte är tillräcklig, om turbinen ska återbetala sig efter 10 år vid en vindhastighet på 5 m/s utan det behövs också en minskning av investeringskostnader för samtliga verk med ca 35- 75 % beroende på räntan.

Här ska visas vilket stöd som behövs för den överkottsel som matas ut till nätet för att de utvalda verken ska återbetala sig under 10-11 år, med antagande av ökning av elpris med 25 % och befintliga investeringskostnader för samtliga verk. Anledningen till antagandet av en ökning av elpris med 25 % är att det genomsnittliga elpriset från 2006 till 2011 har legat på 43 öre/kWh. Det har dock sänkts kraftigt de senaste åren och därför är en ökning med 25 % rimligt [73]. Elcertifikat beräknas ligga konstant på 23 öre/ kWh för samtliga kalkyler. Tydligare analys och siffror över samtliga verk finns i bilaga E, se avsnitt E3. Resultatet av dessa kalkyler för varje vindturbin är sammanställt i tabell 16.

Tabell 16: Sammanställning av samtliga kalkyler för förväntade stöd till inmatade överskottsel för de 3 utvalda turbinerna med årsproduktion vid 5 m/s.

Vindturbin	Pris	Stöd till utmatad överskottsel enligt nedanstående räntor		
		6 %	3 %	2 %
Windstar 3000 (3kW)	75 000 kr	2,5 kr	1,8 kr	1,5 kr
Pegasus (1,6 kW)	46 000 kr	4,5 kr	4 kr	4 kr
UGE (4 kW)	204 000 kr	10 kr	9 kr	8 kr

Stödsystemet för utmatade överskottsel till nätet är lägre för Windstar än för de andra verken, vilket är mellan 1, 5-2, 5 kr/kWh beroende på räntor. Pegasus är ett mindre verk med effekt på 1,6 kW, vilket innebär mindre inmatning på nätet och därmed krävs ett högre stöd (4- 4,5 kr/kWh). UGE kräver ett högre stöd på 10-8 kr/kWh om verket ska vara ekonomiskt lönsamt för en installation. Detta beror på höga investeringskostnader för verket.

Smarta åtgärder för att uppmuntra användning av förnybara energikällor som SWT för egen försörjning spelar en viktig roll i tillväxten av denna industri. Tabellen nedan visar några exempel på befintliga feed-in tariff (inmatningstariffer) för SWT i Kina, Italien, UK och USA [51]:

Tabell 17: Feed-in tariff prissättning för några länder

Land	Effekt	EUR /kWh
UK	< 1,5 kW	0,421
	1,5 - 15 kW	0,326
	15-100 kW	0,295
Italien	< 15 kW	0,25
China	1-10 kW	0,182
USA (Hawaii)	< 100 kW	0,103

I Sverige finns inget stöd i form av feed-in tariff för elproduktion från småskaliga vindkraftverk [69]. Tidigare på 90-talet fanns ett investeringsstöd på upp till 30 % för vissa storlekar över 50 kW. Stödet kunde fås under förutsättningen att en offentlig presentation över drift och uppföljning av verk göras. Målet var att se vilka verk som är bättre än de andra men stödet lades ner efter ett tag. Därefter fanns inget stöd under flera år inom denna industri [66, 68].

10 Analys och diskussion

I denna avslutande del analyseras samtliga kapitel och svaren från alla leverantörer diskuteras. Samtliga frågor i enkäten bifogas i bilaga F.

Första problemet som uppstår med installation av småskaliga vindkraftverk i urban miljö är vindförhållanden, se kapitel 5. Vinden bromsas mer och påverkas av olika objekt, vilket medför en så kallad turbulens som i sin tur påverkar förväntade effektuttag vid vissa vindhastigheter. Mer turbulenta förhållanden leder till att vinden får en annan karaktär och en mer varierad riktning. Detta gör att vindförhållandena i urban miljö blir väldigt svårbedömda. Tillgång till exakta vinddata behövs under ett år vid ett ställe för att kolla om placering av ett verk lyckas eller inte. Dessutom är genomförandet av vindmätningar för småskaliga turbiner dyrt.

I ekvation (4.3) visades att vindhastigheten har den största påverkan på elproduktionen följt av rotordiameter och generator för hur stor effekt kraftverket kan leverera. Vissa företag rekommenderar åtminstone vindmätningar via enkla instrument under 3-5 månader för prognos av medelvindhastighet till sina kunder. Dessa är dock inte helt tillförlitliga. Rekommendationen för installation av småskaligt vindkraftverk är en medelvindhastighet på minst 5-5,5 m/s men i kapitel 9 visades att även en minskning av investeringskostnader behövs för att verket ska kunna återbetala sig efter 10.

Medelvindhastigheten i denna studie utvärderades på två olika ställen i Lund. Dels vid ett tätbebyggt område med olika byggnader och träd i närheten och dels på ett öppet landskap i närheten av själva staden. Vindmätningarna visar en låg medelvindhastighet på 2,6 respektive 3,3 m/s för det tätbebyggda och öppna området. Det visade dock att medelvindhastigheten kan ökas med en högre placering av verket, se ekvation (5.1). De flesta leverantörer var eniga över att verket bör installeras minst 10 m högre än alla hinder för att slippa turbulens och uppnå bättre vindförhållanden.

Efter att lämplig plats är bestämd för verket ska typ av vindkraftverk väljas. Eftersom SWT finns i många olika former och storlekar och varje typ av SWT fungerar bäst under olika förhållanden, bör valet av SWT- modell för en potentiell installationsplats studeras noggrant[68]. I denna studie begränsades storleken på SWT upp till 4 kW. Naturligtvis ger en

större effekt högre elproduktion men det blir också svårare att installera större verk i urban miljö, bland annat på grund störd utsikt.

Horisontalaxlade verk har bättre effekt jämfört med vertikalaxlade verk i samma storlek. Detta innebär mer elproduktion vid ostörd vind. C_p har beräknats för samtliga 6 verk, se bilaga C. HWAT har C_p på 30-47 % medan VAWT ligger på 20-30 %, vilket beror på de aerodynamiska egenskaperna.

Däremot föredras vertikalaxlade verk vid placering på en byggnad eller på en plats där vindarna är turbulenta eller om vindriktningen varierar oftare. Det beror på att VAWT (vertikalaxlat verk) är mindre känsliga än HAWT (horisontalaxlade verk). Dock när det gäller ekonomisk lönsamhet, visade analysen i kapitel 9 att de vertikala verken har mindre produktion än horisontella i nästan samma storlek. Samtidigt är investeringskostnaderna för dessa verk mycket högre än för HAWT. Detta gör de olönsamma eller ointressanta för investeringar i urban miljö. VAWT (vertikalaxlat verk) kan vara av intresse för de ställen där estetiska egenskaper väger tyngre än prestanda.

I kapitel 4 och 8 visades att större blad och därmed större verk ger mer produktion. Det kan vara av intresse att tillverka verk med större blad, till exempel på de vertikalaxlade verken för att skapa större svepyta [76]. Hänsyn måste också tas till att större verk belastas mer av blåst och längre blad betyder mer material, vilket genererar tyngre verk och extra. Dessutom bör rotordiametern begränsas inom urban miljö för att undvika skador om bladen brister under de turbulenta förhållandena som råder här[68]. Materialvalet för rotorblad är viktigt med tanke på att de är utsatta för olika vindstyrkor och riktningar. Vikt och robusthet är de två viktigaste faktorerna att ta hänsyn till. Därför tillverkas de flesta rotorblad idag av glasfiberarmerad polyester eller epoxi och kolfiber. Tyvärr ger den sista nämnda en högre materialkostnad.

Andra delar av vindkraftverket är generatorn som delas på två grupper, synkron och asynkron. Även dessa påverkar hur stor effekt kraftverket kan leverera och diskuterades i kapitel 4. Det svenska elnätet har en frekvens på 50 Hz, vilket kräver en asynkron generator med varvtal på 1500 rpm och fyra poler. Detta innebär en låg verkningsgrad så länge motorn inte körs på fullvarv. Asynkron generator orsakar onödigt höga strömmar på grund av att den hämtar reaktiv ström från nätet för att fungera. Det här kan leda till att lampor blinkar och känslig utrustning gå sönder. Därför behövs en mjukstartsutrustning och kondensatorer för att

motverka detta, vilket tyvärr ses sällan på de mindre vindkraftverken eftersom det resulterar i höga kostnader. dessutom måste en asynkron generator kompletteras med en växellåda, vilket innebär mer underhåll, tyngre verk och högre ljud.

De flesta befintliga verken har därmed synkron generator, vilka är mer effektiva och kan magnatisera sig själv. En synkrogenerator levererar strömmar med varierande spänning och frekvens. Detta är givetvis en fördel med tanke på att vinden inte är konstant. För att fasa in strömmen på nätet används en omriktare, vilket är väldigt dyrt och kan för ett småskaligt verk innebära halva investeringskostnaden. Å andra sidan är de mycket tystare än asynkrogenerator, vilket anpassar de bättre till urban miljö. Sammankoppling av 3-4 SWT:s (småskaliga vindturbiner) med lägre effekt kombinerad med en omriktare kan leda till både ekonomiska besparingar och ökning av elproduktion [76].

Vidare gäller ett antal krav som måste vara uppfyllda för att installationen av verket ska bli godkänt. Innan verket köps måste det kontrolleras om verket är certifierat enligt 61400-2, vilken är en IEC standard för säkerheten hos småskaliga. Trots det saknas ibland uppgifter i databladet på verk från tillverkaren eller leverantören.

Det finns olika standarder när det gäller ljud och effekt samt för säkerhetskontroll till olika vindhastigheter. Dessa kategoriseras under olika kalasser av en tredjepart. Sådana utförande är tidskrävande och kostsamma. Ibland kan det hända att leverantören enbart har data på ljudnivån för vissa vindhastigheter, vilket har resulterat i att verket tvingats monteras ner på grund av uppkommande buller vid andra. Kravet för ljudnivån är 40 dB men den gränsvärden kan skilja sig lite om verket är installerat i ett villaområde eller i en starkt trafikerad innerstad på ett höghus.

Årsproduktion är en av de viktigaste uppgifterna som en kund har rätt att veta. Tyvärr är de flesta effektkurvor och årsproduktionsmått vid vissa vindhastigheter som ges av leverantörerna inte tillförlitliga, detta förklarades under kapitel 7 och 8.

Effektkurvan på de flesta verk visar en cut-in vindhastighet på 3-4 m/s och de uppnår märkeffekten vid 12-13 m/s. En weibullfördelning på vindmätningar i urban miljö visar att de flesta vindhastigheterna under ett år inträffar vid medelvindhastighet på 2-6 m/s. Enligt detta borde verket ha en effektkurva som börjar producera el redan vid 2 m/s och uppnår sin

märkeffekt vid 3-5 m/s, för att få ut bättre effekt från vinden. Detta beror på teknisk utveckling och forskning i industri för småskaliga vindkraftverk.

Montering av vindkraftverket på byggnaden kan vara problematisk och har sina svårigheter, både tekniskt och ekonomiskt. De flesta verk är tunga och behöver speciell kran och liftmaskiner för att installeras på tak, vilket innebär extra höga kostnader. En felaktig montering kan också orsaka störande vibrationer och ljud från verket. Genom att undvika montering i byggnadsstommen och dessutom använda vibrationsdämpande material kan problemet förebyggas till viss del.

Extra fokus vid montering av verk bör läggas på takplaceringen. Vinden accelererar vid vissa positioner på taket och skapar turbulens. Detta inträffar närmare taklinjen och kallas för separationslinjen. Placeras verket för lågt hamnar det i turbulent område under separationslinjen medan ett för högt placerat verk hamnar ovanför och i det område där vinden accelereras. Mätningar och analyser kan dock utföras på luftflödet där verken ska monteras men de är väldigt kostsamma för små. Istället efterföljs att antal tumregler. Exempelvis ska verket placeras högre än alla hinder och längre ner på kanten på ett platt tak eller helst på den gaveln som är mest riktad mot vinden. Installation på stommen ska undvikas. Se kapitel 6 för mer information.

En analys på samtliga 6 utvalda verk (1,6-4 kW) har gjorts i kapitel 9. Analysen visar att verken har ett högre nyckeltal än ett större verk med effekt på 2 MW. En jämförelse av småskaliga verk med solceller i tabell 10 visar att Windstar 3000 kan konkurrera med solceller om medelvindhastigheten är 7,5 m/s. I urban miljö är det ändå säkerheten som är viktigast. En vindturbin är ett rörligt verk, vilken kan utsättas för olika väderförhållanden. Solcellspaneler däremot sitter fast på taket och skapar inga ljud eller vibrationer. Med en riktig genomgång och analys av platsen där solceller ska installeras fås en jämnare årsproduktion, vilken bara beror på solinstrålning och vinkel av panelerna (de påverkas ju av väderförhållandena, t.ex. är det mulet blir det mindre produktion, däremot påverkas de inte av vindförhållanden och olyckor kan ju i princip inte ske med dem [68]).

En lönsamhetskalkyl har genomförts för de verk som hade lägre investeringskostnader/kWh vid vindhastigheten 5 m/s samt också för ett vertikalt verk. Dessutom har en känslighetsanalys gjorts för elproduktionen vid olika vindhastigheter för dessa verk. En högre

medelvindhastighet ökar årsproduktionen och ger i sin tur mer intäkter både från såld el men också från mindre inköpt el, vilket är förväntat.

Windstar verkar vara ett verk som återbetalar sig efter 8-9 år vid medelvindhastighet på 7 m/s och vid olika räntor. Vid medelvindhastighet på 6 m/s, återbetalar sig verket efter 10 år med en ränta på 2 %. För räntor på 6 % och 3 % behövs en minskning av investeringskostnader med 10-20 %. Enligt kalkylprogrammet ska investeringskostnader minskas med 50,40 och 35 % vid medelvindhastigheten 5 m/s. Kalkylen visar också att Windstar är olönsamt när medelvindhastigheten är 4 m/s och det behövs en kraftig minskning av investeringskostnaden om det bli ekonomiskt lönsamt.

Pegasus med en effekt på 1,6 kW återbetalar sig efter ca 10 år när vindhastigheten är 7 m/s och räntan är 2-3 %. För andra vindhastigheter, krävs en minskning av investeringskostnader samt ökning av elpris med 10 %. Minskningen av investeringskostnaden hos Pegasus måste vara mer än hos WindStar vid samma vindhastigheter. Detta beror på att Pegasus har mindre effekt än Windstar och därmed en mindre årsproduktion.

UGE 4KW har en betydligt högre investeringskostnad än Windstar och Pegasus, vilket innebär att en kraftig minskning av investeringskostnaden måste tillföras för att UGE ska bli konkurrenskraftig med de två övriga verken.

Ökning av ersättning på elcertifikat verkar inte ha någon betydelse för Pegasus eftersom elcertifikat gäller bara i 15 år efter det att verket startat. Samtidigt är ersättningen bara på den mängden av elen som matas ut till nätet (30 % av total elproduktion), vilket är en väldigt liten summa.

Kostnaderna för att erhålla elcertifikat för all produktion skulle vara betydligt högre. För detta behövs en extra elmätare och abonnemang, vilket kunden måste stå för alla kostnader. Analysen visar också att elcertifikat med hänsyn till kostnader och intäkter, fungerar bättre för större verk.

En ökning av elpris med 100-300 % behövs om dessa ovan nämnda verk ska återbetala sig under 10-11 år med nuvarande investeringskostnader. Ökning av elpris har den största påverkan på lönsamheten eftersom det påverkar både intäkter på överskottsdel som matas ut på nätet samt den del av elen som skulle behöva köpas från elbolaget för egen förbrukning.

Det också behövs ett stöd mellan 1,5- 10 kr/kWh för Windstar, Pegasus och UGE om dessa verk ska vara lönsamma med ett elpris på 43 öre/ kWh.

Allt detta betyder att en understödjande politik och ekonomiska incitament bör finnas för en vidare utveckling av den lilla vindkraftsindustrin, vilken fortfarande befinner sig i början av sin utveckling. Dessutom bör kostnaderna på nätanlutna verk minskas kraftigt för att väcka intresse för egen elproduktion i urban miljö. Däremot visar det sig att småskaliga verk är av stort intresse där elnätet saknas och där det är lönsamt.

För fristående off grid-system där elnätet saknas behövs en komplettering av stora batterier. Solceller kan bara producera el under dagen när det finns solinstrålning, vilket betyder att stor lagringskapacitet behövs ty det är oftast under kvällen som mest el används. Ett vindkraftverk är mest av intresse vid bättre vindförhållande eftersom det genererar el under hela dagen och inga batterier behövs.

Slutligen ska det tilläggas att icke-roterande verk i form av panel kan komma att bli kommersiella i framtiden. Detta verk är av intresse för innovativ lösning för egen elproduktion i stadsmiljö. Verket är dock för nuvarande under en test- och utvecklingsfas.

En sammanställning av hela analysen är formulerad nedan.

SWT i urban miljö	
Teknik	Ekonomi
1) Låga vindhastigheter (ca 3-5 m/s) och turbulens, vilket innebär mycket mindre årsproduktion än vad som förväntas enligt uppgifter från leverantörer.	1) Fortfarande höga investeringskostnader per kWh.
2) HAWT är effektivare ($C_p= 30- 45\%$) jämfört med VAWT ($C_p= 20-30\%$).	2) Enligt leverantören behöver minsta vindhastigheten vara 5 m/s på stället där verket ska monteras.
3) VAWT är tystare än HAWT	3) Utföring av vindmätningar och luftflödesanalys är dyra för SWT.
4) VAWT är mindre känslig för turbulens.	4) SWT är dyrare per kWh jämfört med storskaliga verk och med solceller i ungefär samma effektstorlek som SWT.
5) De flesta verk har en generator av typ permanentmagnet synkron generator, vilken	

<p>är effektivare än de andra typerna. Asynkrongenerator ska vara utrustad med växellåda, vilket betyder tyngre verk med extra oljud på grund av växellåda och extra underhåll jämfört med synkrongenerator. 6) Ju större blad med samma generator, desto bättre effekt</p>	<p>5) Höga investeringskostnader och underhåll behövs varje år. 6) Bättre effekt med större blad för samma generator men detta betyder mer kostnader och materialanvändning.</p>
Tekniska problem	Ekonomiska lönsamheter
<p>1) Effektkurva för de flesta verk är inte pålitliga, eftersom de inte har testats i verkligheten och har inte blivit godkända från tredje part. 2) De flesta verk har inte testats i laboratorium under olika vindhastigheter och därmed saknas information på buller från verket vid olika vindhastigheter. 3) Rätt placering av verk 4) Uppkommande vibrationsproblem vid fel placering på en byggnad. 5) Vindkraft är ett rörligt verk, vilket kräver en extra säkerhet i urban miljö.</p>	<p>1) Det krävs kraftig minskning av investeringskostnader med nuvarande elpris och elcertifikat. 2) Elcertifikatskostnader är högre än intäkter för mindre verk (< 3kW) vid vindhastigheter lägre än 7 m/s. 3) Dyra kostnader på omriktare, nästan lika mycket som själva turbinen. 4) Det krävs en kraftig ökning av elpris med ca 100-300 % om SWT (småskaliga vindturbiner) ska vara lönsamt med nuvarande investeringskostnader. Ökning av elpris kommer att påverka lönsamheten mest på grund av högre intäkter (både köpt och såld el). 5) Stödsystem i form av köp av överskott el för minst 1,5- 2,5 kr behövs för att ett SWT kan återbetala sig under 10-11 år. 6) Lönsamt där elnät saknas</p>
Framtida åtgärder	
<p>1) Sammankoppling av mindre skalor (< 1 kW) med bara en omriktare. 2) Bättre design för en säkrare installation inom stadsmiljö. 3) Utveckling av verk (icke- roterande) i form av en panel. 4) Vertikala verk med högre blad, för större svepyta och därmed högre effekt.</p>	

11 Slutsats och framtidsutsikter

Intresset för småskalig vind- och solanläggning för egen elproduktion har ökat under de senaste åren och det har visats att installation av småskaliga vindkraftverk över hela världen ökar.

Placering av småskaliga vindkraftverk i urban miljö är tyvärr inte ekonomiskt lönsamma med hänsyn till deras höga investeringskostnader och dåliga vindförhållanden, vilket innebär mindre elproduktion. Dessutom består små vindkraftverk av rörliga delar som gör säkerhetsaspekten känsligare för elproduktion i stadsmiljö. Detta leder till att speciell design behövs för en riskfri installation.

SWT (1-4 kW) kan bara täcka en mindre del av elförbrukning per år med placering i stadsmiljö. Det är bara större verk som har kapacitet att täcka hela elförbrukningen. Å andra sidan passar större vindturbiner med en rotordiameter på 4 eller 5 m inte på de flesta tak och är inte lätta att integrera i tätbebyggelser. En sammankoppling av dessa små vindturbiner kan dock leda till mer produktion och besparing av kostnaderna genom att bara en omriktare används för alla dessa verk. En omriktare är väldigt dyr och kan stå för halva investeringskostnaden.

En weibullfördelning på vindmätningar i urban miljö visar att de flesta vindhastigheterna under ett år är vid 2-6 m/s och vindhastigheter mellan 8-15 m/s inträffar sällan. Enligt detta borde verket ha en effektkurva som börjar producera el redan vid 2 m/s och uppnår sin märkeffekt vid 3-5 m/s. Detta beror på den tekniska utveckling och forskning i småskalig vindkraftverk industri.

Vissa typer av små vindkraftverk (HAWT= horisontalaxlade verk) med nuvarande elpris och investeringskostnader kan bara återbetala sig när medelvindhastigheter är 6-7 m/s och räntor är 2-3 %. Dessa vindhastigheter inträffar sällan i urban miljö. Ökning av elpris däremot har den största påverkan på ekonomisk lönsamhet. Detta beror på att den påverkar både intäkter från försäljning av överskottsel, vilken matas ut på nätet, men också att el för egen förbrukning inte behöver köpas från elbolaget. Analysen visar dock att en kraftig ökning av elpriset (100-400 %) eller införing av ekonomiska incitament till utmatad överskottsel till elnätet (1,5–10 kr/kWh) behövs om SWT:s ska återbetala sig efter 10-11 år.

12 Referenser

1. The European Wind Association, hemsida:
<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/2030.pdf>. Hämtad den 10 november 2013.
2. Regeringskansliet, hemsida:
<http://www.regeringen.se/sb/d/2448> . Hämtad den 10 november 2013.
3. Ekonomi fakta, hemsida:
<http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Elproduktion/>. Hämtad den 10 november 2013.
4. New energy, Small wind world report, 2012
<http://www.wwindea.org/webimages/WWEA%20Small%20Wind%20World%20Report%20Summary%202012.pdf> . Hämtad den 26 september 2013.
5. World Wind Energy Association small wind, hemsida:
<http://small-wind.org/wwea-releases-2013-small-wind-world-report-update/>. Hämtad den 26 september 2013.
6. Masson, G. PVPS Report A Snapshot of Global PV1992-2012, Preliminary information from the IEA PVPS Programme, 2013. Hemsida: [http://www.iea-pvps.org/index.php?id=1&no_cache=1&sword_list\[\]=1992-2012](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=1&no_cache=1&sword_list[]=1992-2012). Hämtad den 20 oktober.
7. Lindahl, J. National Survey Report of PV Power Application in Sweden-2012, Ångström sol center, Uppsala University, 2013.
8. Eco profile, hemsida:
<http://www.ecoprofile.se/smaskalig-vindkraft>. Hämtad den 20 september 2013.
9. Cace, J. Guidelines For Small Wind Turbines In The Built Environment, 2007.
http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf
10. Vindlov, hemsida:
<http://www.vindlov.se/sv/Steg-for-steg/Gardsverk/Definition-av-klassen/>. Hämtad den 10 oktober 2013.
11. Wizelius. T, Vindkraft i teori och praktik, studentlitteratur 2003, ISBN 91-44-02055-4.
12. Windy Nation, hemsida:
<http://www.windynation.com/products/accessories/dump-loads/>. Hämtad den 7 augusti 2013.
13. Wind Force, hemsida:
<http://www.windforce.se/vindkraft-windstar3000.php> . Hämtad den 8 augusti 2013.
14. Mohan, Underland, Robbins, Power electronics, Second edition, ISBN 0-471-58408-8

15. Rogers, E. Understanding Buck-Boost Power Stages in Switch Mode Power Supplies, Texas Instruments, 2002.
16. Hyenergy, hemsida:
<http://www.hyenergy.com.cn/Solutions.asp?id=753>. Hämtad den 7 augusti 2013.
17. Windforce, hemsida:
<http://www.windforce.se/egenel.php>. Hämtad den 7 augusti.
18. Hannevind, hemsida:
<http://hannevind.com/effekt.htm>. Hämtad den 27 augusti.
19. InnoVentum, hemsida:
<http://www.innoventum.se/>. Hämtad 15 oktober 2013.
20. WindPower program, hemsida:
<http://www.wind-power-program.com/windestimates.htm>. Hämtad den 9 augusti 2013.
21. Olsson, M. Projektering av urban vindkraft, institution för tillämpad fysik och elektronik, examensarbete, Umeå Universitet, 2011. . http://www.umeaenergi.se/Om-Umeaa-Energi/Jobb-Skola-Personal/pdf/Projektering-av-urban-vindkraft_Magnus-Olsson%20.pdf . Hämtad den 2 september 2013.
22. Hannevind, hemsida:
<http://hannevind.com/kartor.htm>. Hämtad 1 oktober 2013.
23. Andersson, E. Småskalig elproduktion i urban miljö, Fallstudie av elproducerande system på ett handelscentrum, examensarbete, Uppsala Universitet, 2013.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:609518/FULLTEXT01.pdf>. Hämtad den 1 november 2013.
24. GAISMA, hemsida:
<http://www.gaisma.com/en/location/lund.html>. Hämtad 20 augusti 2013.
25. Stads byggnad kontoret, RAMPROGRAM, Ideon och Pålsjöföretags område, 2010
26. Wind Power, Small-scale wind energy, Policy insights and practical guidance, 2008.
<http://www.wind-power-program.com/Library/Policy%20and%20planning%20documents/Carbon-Trust-Small-Scale-Wind-Report.pdf> . Hämtad den 2 oktober 2013.
27. Warwick wind trails (rapport), hemsida:
<http://www.warwickwindtrials.org.uk/resources/Warwick+Wind+Trials+Final+Report+.pdf> . Hämtad 2 september 2013.

28. Manwell.J.F,Mcgowan J.G, Rogers. A.L, Wind energy explained, theory, design and application, Second edition, ISBN 978-0-47001-500-1.
29. Wallberg, L.E. Vindkraft under utveckling, examensarbete, Uppsala Universitet, 2009.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:232596/FULLTEXT01.pdf>
30. Wikipedia, Värpinge, hemsida:
<http://sv.wikipedia.org/wiki/V%C3%A4rpinge> . Hämtad den 12 november 2013.
31. Berg, N och Estenlund, S, Solceller i elnät, examensarbete, Lunds tekniska högskola, 2013. http://www.iea.lth.se/publications/MS-Theses/Full%20document/5314_full_document.pdf. Hämtad den 12 februari 2014.
32. Urban Green Energy, hemsida:
<http://www.urbangreenenergy.com/products/uge-first-step/features>. Hämtad den 25 augusti 2013.
33. Lopez, M och Vannier J-C, Stand alone wind energy conversion system with maximum power transfer control, ISSN 0718-3291, 2009.
<http://www.redalyc.org/pdf/772/77212231006.pdf>. Hämtad den 10 oktober 2013.
34. Humdingerwind, hemsida:
http://www.humdingerwind.com/index.php#/wi_large/. Hämtad 20 oktober 2013.
35. Eco profil, hemsida:
<http://www.ecoprofile.se/thread-1080-vindkraftverkstyper.html>. Hämtad den 18 augusti.
36. Gesundes Huse, hemsida:
<http://www.gesundes-haus.ch/windkraftanlagen/kleinwindanlagen.html>. Hämtad 9 september.
37. Wind Turbine Projekts Run Into Resistance, hemsida:
http://article.wn.com/view/2010/08/27/Wind_Turbine_Projects_Run_Into_Resistance_u/#/related_news . Hämtad den 12 augusti 2013.
38. Nätverket för vindbruk, hemsida:
<https://www.natverketforvindbruk.se/sv/Fakta/Vindkraftverk-och-delar/Rotor/>. Hämtad den 20 augusti 2013.
39. Windon, hemsida:
http://www.windon.se/se/asynkron_vs_synkron.asp. Hämtad den 4 oktober 2013.
40. Sveriges Energiförening Riks Organisation, Nätanslutning av småskalig elproduktion, broschyr, hemsida:
<http://www.se.ro.se/Filer/Startsidan/BroschyrNatanslutningA5slutversion110503.pdf>. Hämtad den 15 oktober 2013.

41. Energimyndigheten, Vindkraft- bygga och ansluta mindre vindkraftverk för eget bruk, broschyr, 2008.
<http://webbshop.cm.se/System/TemplateView.aspx?p=Energimyndigheten&view=all&cat=/Broschyrer&id=f456c268797f4798bb5d6784740a25b2>. Hämtad den 20 oktober 2013.
42. Anslutning av mikroproduktion till konsumtionsanläggningar – MIKRO Utgåva 1, december 2011
43. IEA, Wind RP for Consumer Labelling of Small Wind Turbines , 2011
44. Boverket. Energimyndigheten. Naturvårdsverket, Ljud från vindkraftverk, ISBN 91-620-6241-7, 2001, <http://www.acuvib.com/620-6241-7.pdf>. Hämtad den 28 oktober 2013.
45. Naturvårdsverket, hemsida:
<http://www.naturvardsverket.se/Stodmiljoarbetet/Rattsinformation/Rattsfall/Vindkraft/Ljud-och-skuggor/> . Hämtad den 4 november 2013.
46. Vindlov, hemsida: <http://www.vindlov.se/Steg-for-steg/Miniverk/Provningsprocessen/Informera-grannar-om-eventuella-storningar/> . Hämtad den 1 november 2013.
47. Svensk Vindkraftförening, Marknadsöversikt små vindkraftverk i Sverige, 2011.
<http://www.tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/%C3%96rjan-Hedblom-Small-scale-wind-turbines-market-study.pdf>. Hämtad den 10 augusti 2013.
48. Egen EL-Varuhuset, hemsida:
<http://varuhuset.etc.se/sv/product/155/Airdolphin-1KW>. Hämtad den 12 september 2013.
49. Hyenergy, hemsida:
http://www.hyenergy.com.cn/product_show.asp?b=97&id=757. Hämtade den 25 augusti 2013.
50. SVIAB, hemsida:
<http://home.swipnet.se/sviab/produkter.html>. Hämtad den 10 augusti 2013.
51. Resilience, hemsida:
<http://www.resilience.org/stories/2010-09-16/real-world-tests-small-wind-turbines-netherlands-and-uk>. Hämtad den 11 november.
52. Provincie Zeeland, hemsida:
http://provincie.zeeland.nl/milieu_natuur/windenergie/kleine_windturbines/de_turbines. Hämtad den 12 november.

53. Better Energy, hemsida: <http://www.bettergeneration.co.uk/wind-turbine-reviews/turby-vawt-wind-turbine.html> . Hämtad den 1 oktober 2013.
54. Krafringen, hemsida: <http://krafringen.se/Foretag/Solceller/Vara-solcellspaket/> . Hämtad den 10 november.
55. Nasdaq omx, hemsida: <http://www.nasdaqomx.com/commodities/markets/marketprices>. Hämtad den 4 oktober 2013.
56. NordPool spot, hemsida: <http://www.npspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/>. Hämtad den 4 oktober 2013.
57. Riksbanken, hemsida: <http://www.riksbank.se/sv/Rantor-och-valutakurser/>. Hämtad den 4 oktober 2013.
58. Svensk Kraftmäkling, hemsida: <http://www.skm.se/priceinfo/>. Hämtad den 4 oktober 2013.
59. Svensk Energi, hemsida: <http://www.svenskenergi.se/Pressrum/Nyheter/Mikroproducenter-av-el-far-arlig-skattereduktion-med-max-6000-kronor/>. Hämtad den 5 oktober 2013.
60. Svenska Kraftnät, hemsida: <http://certifikat.svk.se/Lists/PublicPages/AboutElCertificates.aspx>. Hämtad den 4 oktober 2013.
61. Energimyndigheten, hemsida: <http://www.energimyndigheten.se/Foretag/ursprungsgarantier/>. Hämtad den 4 oktober 2013.
62. Hitachi (upwind och downwind rotor), hemsida: <http://www.hitachi.com/products/power/wind-turbine/feature/rotor/index.html>. Hämtad den 21 november 2013.
63. 24volt, vertikalaxlade vindturbiner, hemsida: <http://24volt.eu/vindkraftverk.php>. Hämtad den 21 november 2013.
64. D' Ambrio, M. Medaglia, M, Vertical Axis Wind Turbines: History, Tehnology and Applications, examensarbete, Halmstad Högskolan, 2010. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:326493/FULLTEXT01.pdf>. Hämtad den 22 november 2013.

Intervjuer och majlkontakt:

65. Möller, Helen, Akademiska Hus. (Helen.moller@fmgeo.se)
66. Jäven, Anna, Svensk Vindkraft. 30 augusti 2013. (Anna@Jiven.se)
67. Berg, Markus, Uppsala Universitet. 29 augusti 2013. (Tel:018 471 53 15)
68. Ruin Sven, TERO AB. (Sven.ruin@teroc.se)
69. Skarrie, Håkan, Krafringen AB. (hakan.skarrie@krafringen.se)
70. Olsson, Andreas, Egen EL AB. (andreas.olsson@egenel.se)
71. Wikeberg, Lars, SVIAB AB. 29 augusti 2013 (Tel: 0176 264 224)
72. Kyrkander, Erik, Windforce AB. (info@windforce.se)
73. Ahlman, Roger, Krafringen AB. (roger.ahlman@krafringen.se)
74. Widung, Morgan, InnoVentum AB. (Morgan@innoventum.se)
75. Persson, Daniel, Krafringen. (Daniel.Persson@Krafringen.se)
76. Jörgen Svensson, Lunds Universitet. (jorgen.svensson@iea.lth.se)

13 bilagor

Bilaga A: Känslig analys för olika medelvindhastigheter i Värpinge-Weibullfördelning och beräkning av K& C:

Weibullfördelningen har två parametrar nämligen K och C, och beräknas ur ekvationen nedan [28]:

$$P(U) = (k/c) (U/c)^{k-1} \exp[-(U/c)^k]$$

$P(U)$ = Energin i vinden

K kallas för formparametern ty den förändrar fördelningens form. K kan beräknas från ekvationen nedan [28]:

$$k = (\sigma_u / \bar{U})^{-1,086}$$

K = Formparametern

\bar{U} = Medelvindhastighet

σ_u = Fördelningens standardavvikelse

σ_u kan beräknas av ekvationen nedan [28, 76]:

$$\sigma_u = \sqrt{[(1/N-1) \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{U})^2]}$$

N = Antal timmar (8760 under ett år)

u = Vindhastigheten

C kallas för skalparametern ty den förändrar fördelningens utsträckning över X-axeln. Den kan beräknas av ekvationen nedan [28]:

$$C = \bar{U} (0,568 + 0,433/k)^{-1/k}$$

Tabell A: Känslig analys för olika medelvindhastigheter i Värpinge

Vindhastighet	σ - u	K-weib	C- weib
3,3	2,2	1,5	3,6
4	2,3	1,8	4,5
5	2,8	1,9	5,6
6	3,6	1,8	6,7
7	4,3	1,7	7,8

Bilaga B: Tekniska data på olika vindkraftverk:

Airdolphin GTO	
Model Number	Z-1000-250
Wind Turbine Type	Horizontal axis, Up-wind
Rotor Diameter	1800 mm
Mass	20 kg (44.1 lbs.)
Tower Diameter	48.6 mm (1-15/16")
Number of Blades	3
Blade Construction	Carbon fiber laminate over solid foam core
Blade Mass (per piece)	380 g (13 oz)
Blade Method	Interlock hub mounting
Body Material	Aluminum diecast
Body Construction	Block puzzle structure
Product Finish	Powder coating
Generator	Three-phase power generator with permanent neodymium iron boron magnet
Control Systems	<ol style="list-style-type: none"> 1. Power Assist System 2. Maximum Output Management 3. RPM Control 4. Safety Control 5. Data Communication
Protection Circuit	Built-in
Yaw Control	Free yaw (360 degrees)
Direction Control	Original Swing-Rudder System
Cut-in Wind Speed	2.5 m/s
Rated Power	609W (Wind Speed: 11m/s) * 1
DC Output of Wind Turbine	1.1kW (Wind Speed: 12.5m/s), 742W (Wind Speed: 11m/s)
Annual Energy Production	800kWh (Annual Mean Wind Speed: 5m/s) * 1
Maximum Rotor Speed	1,280 rpm
Rated Output Voltage	DC260V
Communication System (Signal Output)	RS-485
Battery Capacity Recommendation	-
Wind Turbine Class	JIS Class II

Källa: http://www.zephyreco.co.jp/en/products/airdolphin_gto.jsp

Technical Specifications- HYE 1500 (Pegasus) :

Model	HY-1500	
Rated Output	1500W	
Peak Output	1800W	
Rated Voltage	off-grid: DC48/110V	On-grid: DC120/180V
Start-up Speed	2 m/s or 4.5mph	
Cut-in Speed	2.5m/s or 5.6mph	
Rated Wind speed	12m/s or 26.8mph	
Working Temp. range	from -40°C to 60°C	
Survival Max. wind	50m/s or 110mph	
Over-speed control	Electromagnetic & blade aerodynamic braking	
Number of Blades	5	
Rotor Diameter	2.05m	
Swept Area	3.3m ²	
Blade Material	Nylon fiberglass reinforced composite	
Generator Type	Brushless 3-phase PMA with high performance Neodymium Magnets	
Tower-top Weight	35kg	
Tower Type	self-supporting, guyed, tilt-up tower or rooftop mounting etc.	
Controller Type	PWM	
Applications	wind solar hybrid power system, grid-tied system etc.	
Product Life	20 years	
Warranty (years)	5 years	
Years on Market	1 year	
Certificate	CE, RoHS, ISO9001:2008, ISO14001	
Measurement	112*70*30cm	
Gross Weight	46kg	

Källa: http://www.hyenergy.com.cn/product_show.asp?id=757&b=97

Teknisk data Windstar 3000:

Rotordiameter:	3m
Vikt netto/brutto:	70/84 kg
Startvind:	2,5m/s
Laddvind (cut-in):	3m/s
Märkeffekt:	3000W vid 12m/s
Max. effektuttag:	3500W vid 14m/s
Max. tillåten vindstyrka:	50m/s
Spänning:	DC 48V för batteridrift, DC 110V för nät drift
Generator:	3-fas permanentmagnet typ
Övervarningskydd:	Elektromagnetisk och aerodynamisk vridmomentskontroll
Styrenhet: (batteridrift)	Extern Sol-Vind Hybrid Controller:
	- Kapacitet för inkoppling av 1000W solpaneler till styrenheten utöver Windstar 3000
	LCD Display som visar:
	- Spänning (V) från Windstar 3000, solceller och batteri
	- Strömstyrka (A) från Windstar 3000 och solpaneler
	- Effektuttag (W) från Windstar 3000 och solpaneler
	- Batteristatus: Under och överladdning samt kortslutning
Riktningssystem:	Rodersystem
Monteringsdiameter:	105mm

Källa: <http://www.windforce.se/vindkraft-windstar3000.php>

Teknisk data Windstar 1000

Rotordiameter:	2m
Vikt netto/brutto:	28/32 kg
Startvind:	2 m/s
Laddvind (cut-in):	2,5 m/s
Märkeffekt:	1000W vid 12m/s
Max. effektuttag:	1200W vid 14m/s
Max. tillåten vindstyrka:	50m/s
Spänning:	DC 24V, 48V
Generator:	3-fas permanentmagnet typ
Övervarningskydd:	Elektromagnetisk och aerodynamisk vridmomentskontroll
Styrenhet: (batteridrift)	Extern Sol-Vind Hybrid Controller med MPPT:
	- Kapacitet för inkoppling av 690W solpaneler till styrenheten utöver Windstar 1000
	LCD Display som visar:
	- Spänning (V) från Windstar, solceller och batteri
	- Strömstyrka (A) från Windstar och solpaneler
	- Effektuttag (W) från Windstar och solpaneler
	- Batteristatus: Under och överladdning samt kortslutning
Riktningssystem:	Rodersystem
Monteringsdiameter:	70mm

Källa: <http://www.windforce.se/vindkraft-windstar1000.php>

Tekniska data SVIAB:

Max uteffekt	750 W
Vindstyrka där laddning börjar	2-3 m/s
Maxeffekt vid vindstyrka	11-12 m/s
Turbindiameter	2,4 m
Antal turbinblad	3 st
Turbinbladsprofil	NACA 4412-24
Material i turbinblad	Polyuretan
Generatorspänning	24V eller 12V
Generatortyp, antal poler	3-fas synkron, 6 pol.
Generatorrotor	Lindningsfri, saknar släpringar och borstar
Kapslingsklass	IP 44
Maskinram	Gjuten aluminiumlegering
Giraxel	Av stål med fettsmorda koniska rullager
Pendelfena	Galvaniserat och målat stål
Färg	Svart (annan färg på begäran)
Effektreglering	Turbinen vrids automatiskt ur vind Vid vindstyrka över 10 m/s
Laddningsreglering	Elektronisk laddningsregulator medföljer
Överskottsenergi	Kan användas för uppvärmning
Garanti	3 år, om mast enligt SVIABs specifikationer används

Källa: <http://home.swipnet.se/sviab/prbl240s.pdf>

Tekniska data Turby:

Nominal power	1,9 KW
Nominal wind speed	12 m/s
Start wind speed	3,5 m/s
Stop wind speed	14 m/s
Maximum rotation	420 RPM
Safty	Electro-magnet brake
Number of blade	3
Material blades	Carbon epoxy
Voltage (AC)	230 V
Noise at 25 m distance with 10 m/s	50 DB
Life time	20 years
Standards	IEC 61400-2 NEN 1014

Källa: http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf

Telniska data UGE:

Performance	Metric	Imperial
Rated Power	4 kW	
Rated Wind Speed	12 m/s	26 mph
Operating Range	3-25 m/s	6 - 55 mph
Maximum Wind Speed	50 m/s	111 mph
Noise Level at 3 Meter Distance		
With wind speed below 7 meters/second	< 27 DB	
With wind speed between 7-10 meters/second	< 32 DB	
With wind speed between 10-13 meters/second	< 37 DB	
Physical Parameters		
Mill Size	4.2m x 2.75m	13'9" x 9'0"
Tower Height (standard)	5.5m	18 ft
Gross Weight w/o Tower	200 kg	440 lbs
Gross Weight w/ tower	500 kg	1120 lbs
Gross Weight w/ Roof Mount	350 kg	770 lbs
Generator		
Permanent magnet Direct Drive DC Generator		
Rated Temperature	-40C - 115C	-40F - 239F
Wind Interface Box (Power-One Aurora PVI-7200)		
Output	0-600Vdc	
Grid Tie Inverter (Power-One Aurora PVI-6000)		
Input (DC)	50-580V DC	
Ordered to meet local grid specifications. Battery Backup is available as an option.		

Källa: <http://www.etcgreen.com/vertical-axis-wind-turbine-4kw-2ndgen>

Tekniska data Turbu Beetle:

Rated Max power output	1,75 KW/ 2,25 KW
Type	Horizontal axis venturi with turbine
Estimated annual energy yield	1800 KWh at 6 m/s
Rotor diameter	1,5 m
Number of blades	3 m
Blade material	Nylon, glass fiber reinforced
Blade type	3D CFD optimized
Expected lifetime	20 years
Rated wind speed	13,5 m/s
Rated rotating speed	1100 RPM
Cut-in wind speed	2,9 m/s
Cut-out windspeed	25 m/s
Braking method	Electric brake
Anti-twist mechanism	Trape zoidal screw mechanism
Duct diameter (max)	2 m
Turbine weight	110 Kg
Tower type	12 m Dali XII wooden Tower

Källa: <http://www.innoventum.se/wp-content/uploads/2011/09/turbo-Beetle-Brochure.pdf>

Tekniska data Beetle S:

Rated Max power output	3,5 KW
Type	Horizontal axis
Estimated annual energy yield	7800 KWh at 6 m/s
Rotor diameter	4,05 m
Number of blades	3 m
Blade material	Polyster resin reinforced with fiberglass
Anticorrosion protection	Sealed design+ e-coat +anodizing+ UV resistant paint
Expected lifetime	20 years
Rated wind speed	12 m/s
Rated rotating speed	250 RPM
Cut-in wind speed	3 m/s
Power control method	Passive centrifugd variable pitch system with shock absorber
Braking method	Electric brake
Anti-twist mechanism	Slip ring
Noise level at 8 m/s	37 db(A) at 60 m
Turbine weight	185 Kg
Tower type	12 or 16 m Dali wooden Tower
Grid feeding	120/240 VAC- 50 HZ- 1 phase

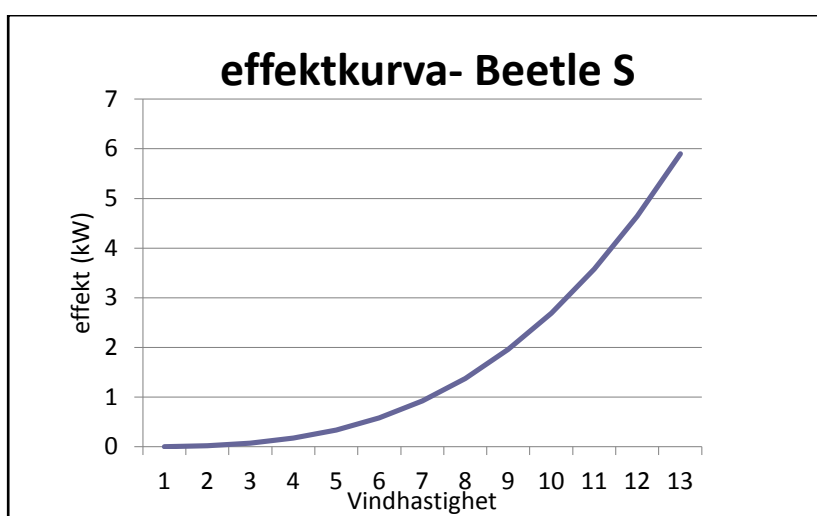
Källa: http://www.innoventum.se/wp-content/uploads/2012/05/Beetle-S-Brochure_SE.pdf

Bilaga C: Effektkurva på de 6 utvalda verk enligt relevanta leverantörer, och dess beräknade Cp:

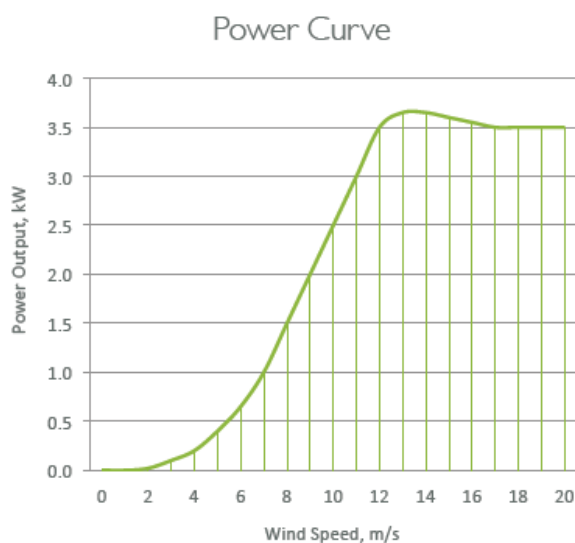
För att beräkna den ungefärliga C_p har effektkurvan respektive verk använts. Y-axel visar totalt effekt och X-axel visar vindhastigheten. Man kan välja ut några punkten på kurvan och därmed beräkna dess C_p enligt ekvation (4.3).

$$C_p = P / 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (C.1)$$

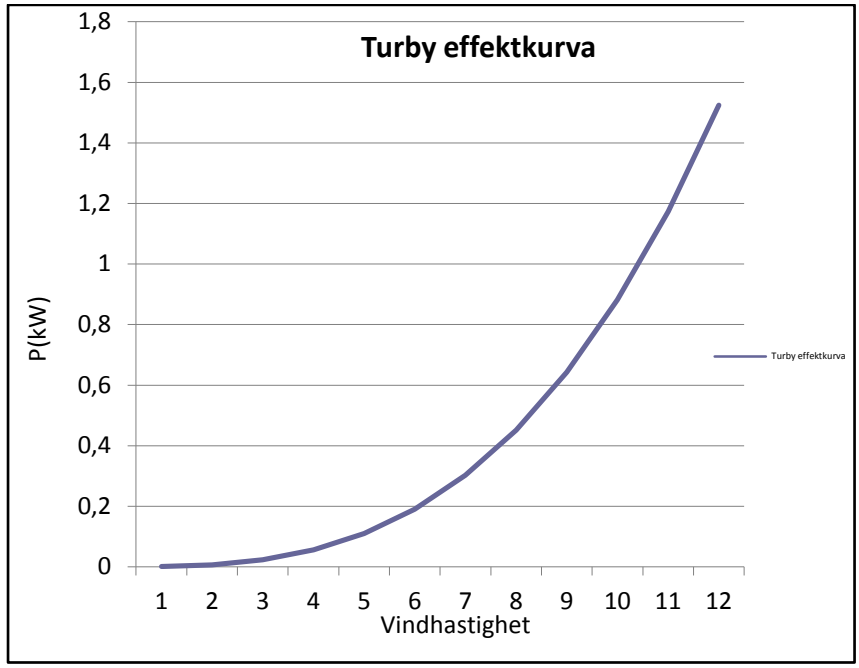
En genomsnittlig värde för C_p kan beräknas efter 4-5 utvalda punkter på kurvan



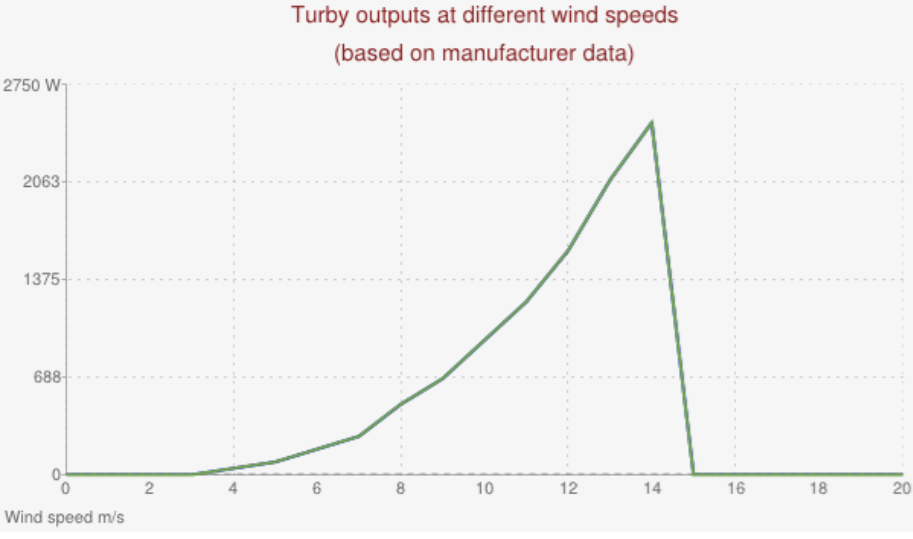
$$C_p = 0,34$$



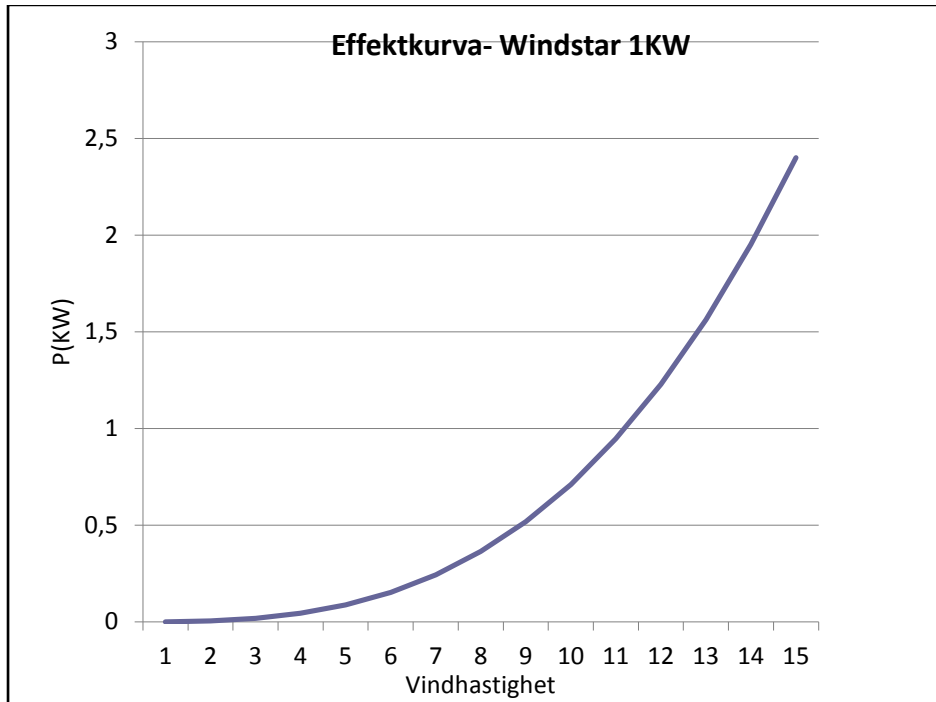
Källa: http://www.innoventum.se/wp-content/uploads/2012/05/Beetle-S-Brochure_SE.pdf



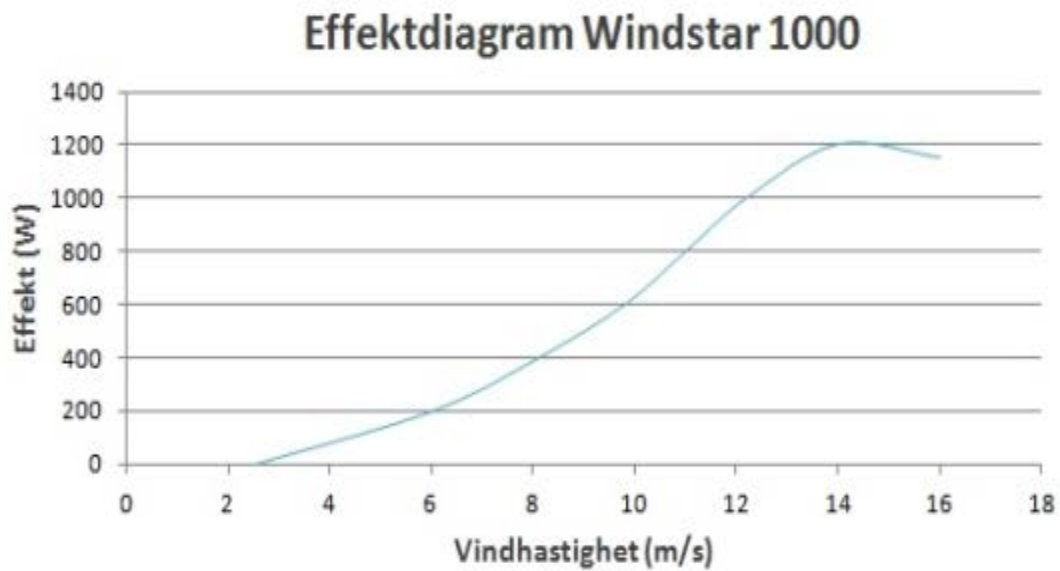
Cp= 0,21



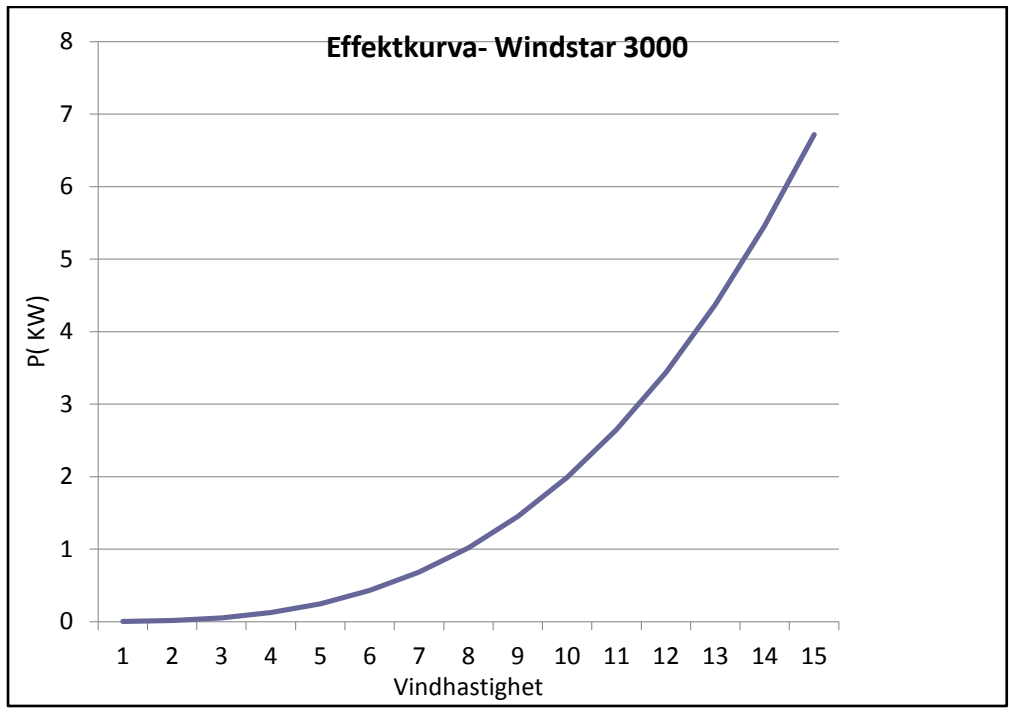
Källa: <http://www.bettergeneration.co.uk/wind-turbine-reviews/turby-vawt-wind-turbine.html>



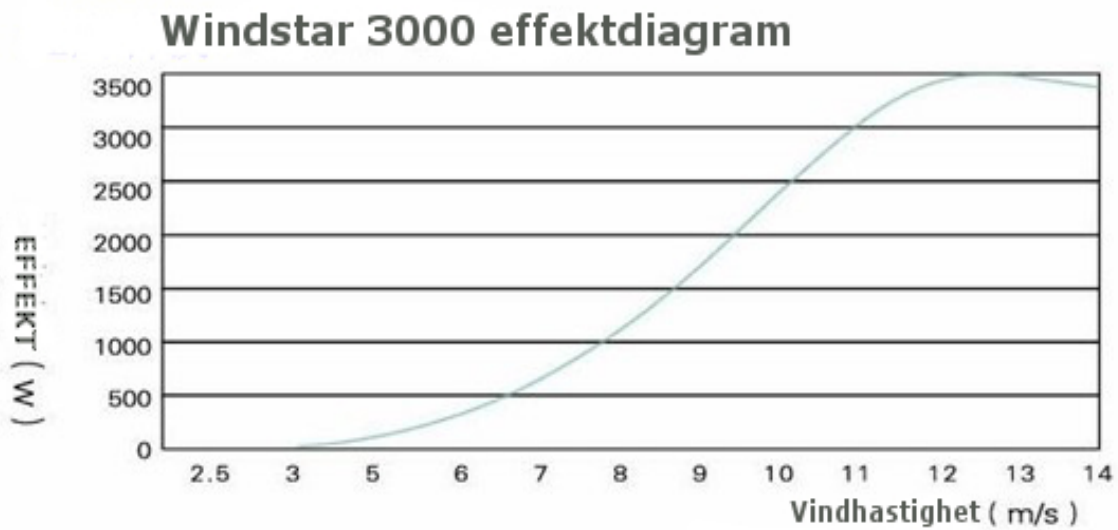
$C_p = 0,37$



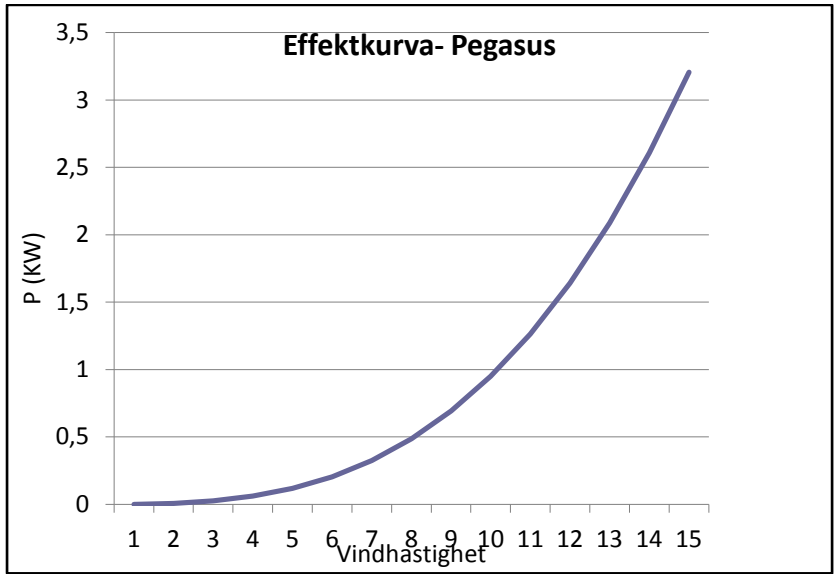
Källa: <http://www.windforce.se/vindkraft-windstar1000.php>



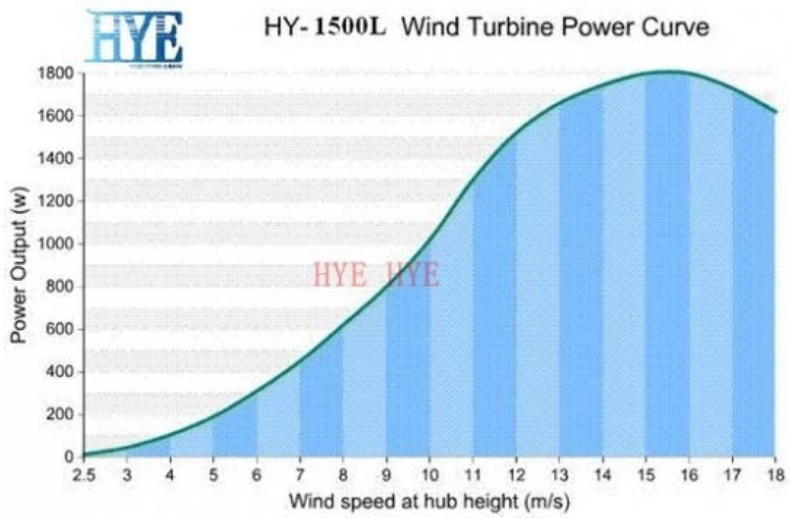
Cp= 0,45



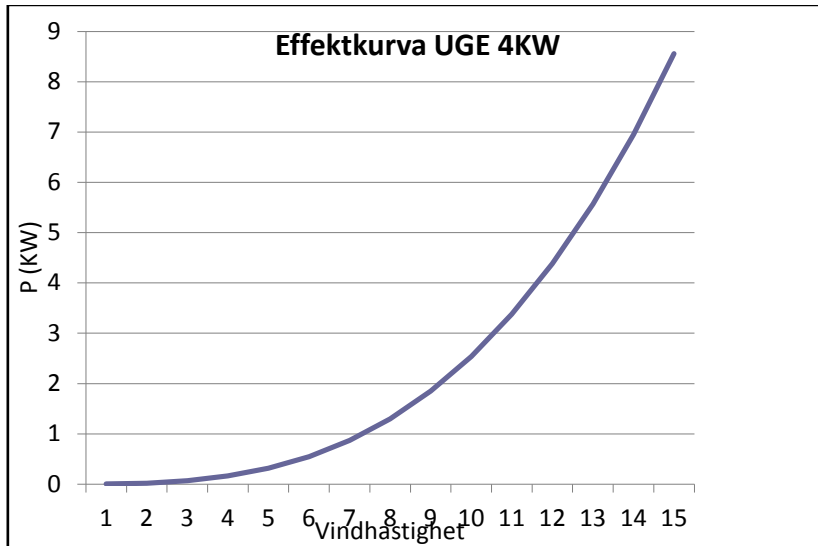
Källa: <http://www.windforce.se/vindkraft-windstar3000.php>



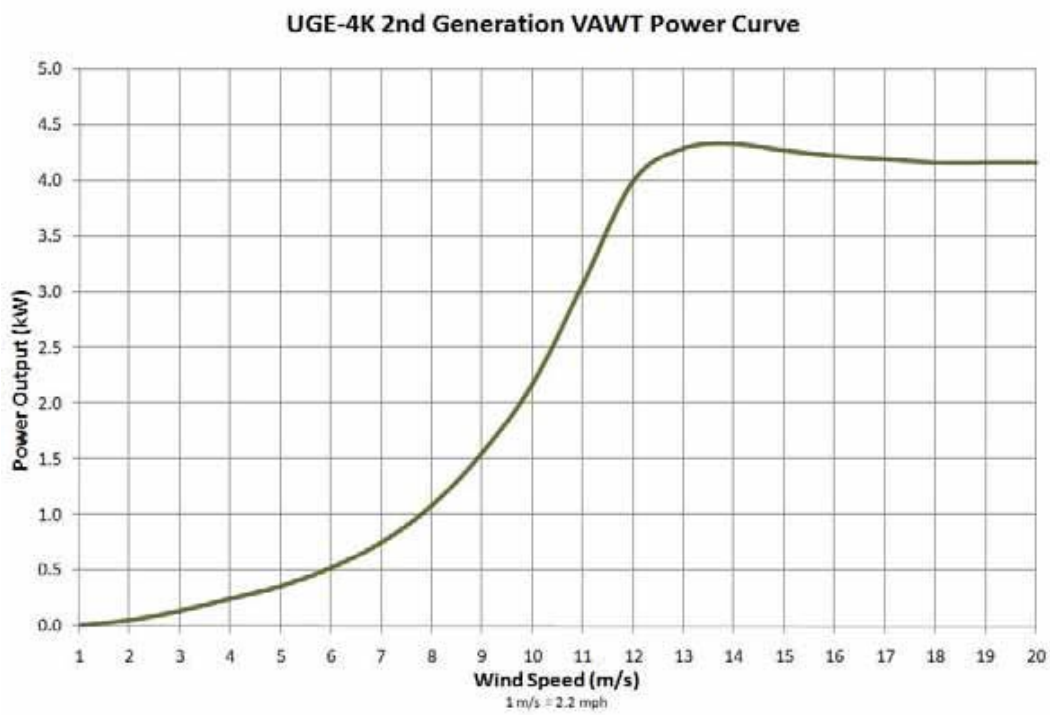
Cp= 0,47



Källa: http://www.hyenergy.com.cn/product_show.asp?b=97&id=757



Cp= 0,30



Källa: <http://www.etcgreen.com/vertical-axis-wind-turbine-4kw-2ndgen>

Bilaga D: lönsamhetskalkylverktyg

Lönsamhetskalkyl genomförs här för Windstar 3000 med nuvärdes- och payback-metoden. kalkylränta är 3 % och årsproduktion beräknas för en medelvindhastighet på 5 m/s. Hänsyn till något form av stöd och skattereduktion har inte tagits.

	Indata		Beräkning
År	Enhet	Summa	
Inflation	%		2%
Inflationsfaktor			1,000
Kalkylränta	%		3%
Nuvärdesfaktor			1,000
INVESTERING			
Investeringar	kr	75 000	75 000
Nominellt	kr	75 000	75 000
Nuvärde nominellt	kr	75 000	75 000
INTÄKTER			
Elhandel, försäljning (realt)			
Elproduktion, (30 % av total produktion)	kWh		1 309
Elpris, sälj	kr/kWh		0,34
Skatte reduktion (stöd)	h		0,00
Intäkt	kr	8 901	445
Slipper att köpa el			
Elproduktion (70% av total produktion)			3053
Elpris, sälj till bolaget			1,08
		65944,8	3297,24
Elcertifikat			
INMATADE PRODUKTION= 30% AV TOTAL	KWh		1 309
Elcertifikat pris	kr/kWh		0,23
Intäkt	kr	4 516	301
Elnät, nätavgift			
INMATADE PRODUKTION= 30% AV TOTAL	kWh		1 309
Nätnytta enligt LundsEnergi	kr/kWh		0,050
Intäkt	kr	1 309	65

SUMMA INTÄKTER				
Realt	kr	80 671		4 109
Nominellt	kr	97 725		4 109
Nuvärde nominellt	kr	73 745		4 109
KOSTNADER				
Elhandel, inköp				
Kostnad	kr	0		
Elnät, nätavgift				
Kostnad	kr	0		
Drift och underhåll				
Årlig kostnad	kr			4 362
				0,10
Kostnad	kr	8 724		436
Elcertifikat				
				1 309
fast årskostnad för cesarkonto				200,000
ursprungliga garanti/KWh				0,000
Kostnad	kr	3 000		200
SUMMA KOSTNADER				
Realt	kr	11 724		636
Nominellt	kr	14 057		636
Nuvärde nominellt	kr	10 769		636
RESULTAT				
Realt	kr	68 947		3 473
Nominellt	kr	83 668		3 473
Nuvärde nominellt	kr	62 977		3 473
SAMMANSTÄLLNING NUVÄRDE				
Investering	kr	75 000		
Intäkter	kr	73 745		
Kostnader	kr	10 769		
Resultat	kr	62 977		
Nuvärdeskvot		0,84		Nuvärdeskvot >1 => Investering lönsam över anläggningens livslängd
SAMMANSTÄLLNING PAYBACK, ACKUMULERAT KASSAFLÖDE				
Ej diskonterat, real				-71 527
Återbetalningstid:		30	år	

Ej diskonterat, nominell		-71 527
Återbetalningstid:	18 år	
Diskonterat		-71 527
Återbetalningstid:	30 år	

Bilaga E: Kalkyl analysen för samtliga utvalda vindkraft i form av tabell.

E1: Lönsamhetskalkyl med antagandet av skattereduktion

Tabeller nedan visar den procentuella minskade investeringskostnaden som krävs för att utvalda verk ska uppnå lönsamhet inom 10 år vid olika räntor. Kalkylen också utförs för dessa verk vid årsproduktion 4, 5, 6 och 7 m/s.

Tabell E1.1: Lönsamhetskalkyl till Windstar 3000 med antagandet av skattereduktion för elproduktion vid 4 m/s.

Medelvindhastighet: 4 m/s Windstar 3000, Årsproduktion: 2383 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NVc
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	37597	5 754	0,42
20 250 (-73%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	37597	5 754	1,57
21 000 (-72%)	0,37 såld 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	38 804	5 754	1,57
21 000 (-72%)	0,37 såld 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	38 970	5 754	1,58
75 000	0,34 sälj 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	48 122	7 206	0,55
22 500 (-70%)	0,34 sälj 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	48 122	7 206	1,82
24 000 (-68%)	0,37(sälj) 1,188(köpt (+10%)	0,23	3%	10 år	51 803	7 206	1,86
24 000	0,37(sälj)	0,25	3%	10 år	52 003	7 206	1,87

(-68%)	1,188(köpt (+10%))	(+10)					
75 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	52 653	7 820	0,6
22 500 (-70%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	52 653	7 820	1,99
24 000 (-68%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	2%	10 år	54 349	7 820	1,94
24 000 (-68%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	2%	10 år	54 564	7 820	1,95

Tabell E1.2: Lönsamhetskalkyl till Windstar 3000 med antagandet av skattereduktion för elproduktion vid 5 m/s.

Medelvindhastighet: 5 m/s Windstar 3000, Årsproduktion: 4362 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	68 813	8 602	0,8
37 500 (-50%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	68 813	8 602	1,61
41 250 (-45%)	0,37 såld 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	74 060	8 602	1,59
41 250 (-45%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	74 364	8 602	1,59

75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	19 år	88 075	10 860	1,03
41 250 (-45%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	88 075	10 860	1,87
45 000 (-40%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	3%	10 år	94 860	10 860	1,87
45 000 (-40%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	3%	10 år	95 179	10 860	1,87
75 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	17 år	96 367	11821	1,13
45 000 (-40%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	96 367	11 821	1,88
48 750 (-35%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	2%	10 år	103747	11 821	1,89
48 750 (-35%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	2%	10 år	104140	11 821	1,90

Tabell E1.3: Lönsamhetskalkyl till Windstar 3000 med antagandet av skattereduktion för elproduktion vid 6 m/s.

Medelvindhastighet: 6 m/s					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Windstar 3000, Årsproduktion: 7022 kWh							
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV-k
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	13år	110709	12 432	1,31
60 000 (-20%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	110772	12 432	1,64

64 750 (-15%)	0,37 såld 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	119220	12 432	1,65
64 750 (-15%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	119709	12 432	1,66
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	11 år	141780	15 772	1,68
67 500 (-10%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	141780	15 772	1,87
75 000	0,34 såld 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	155129	17 201	1,84

Tabell E1.4: Lönsamhetskalkyl till Windstar 3000 med antagandet av skattereduktion för elproduktion vid 7 m/s.

Medelvindhastighet: 7 m/s					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Windstar 3000, årsproduktion: 9166 kWh							
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV-k
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	9år	144611	15519	1,72
75 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	8 år	185092	19 733	2,2
75 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	8 år	202518	21538	2,41

Tabell E.1.5: Lönsamhetskalkyl till Pegasus med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 4 m/s.

Medelvindhastighet: 4 m/s- Pegasus 1137,2 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	17 939	3 961	0,30
8 280 (-82%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	17 939	3 961	1,69
8 740 (-81%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	18514	3961	1,67
8740 (-81%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	18594	3961	1,67
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	22 960	4 905	0,39
9 200 (-80%)	0,34 sälj 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	22 960	4 905	1,96
10 120 (-78%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	3%	10 år	23 699	4 905	1,86
10 120 (-78%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	3%	10 år	23 795	4 905	1,87
46 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	25 122	5 300	0,43
10 120 (-78%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	25 122	5 300	1,96
10 580 (-77%)	0,37(såld) 1,188köpt	0,23	2%	10 år	25 931	5 300	1,95

	(+10%)						
10 580	0,37(såld)	0,25	2%	10 år	26 034	5 300	1,96
(-77%)	1,188(köpt (+10%))	(+10)					

Tabell E.1.6: Lönsamhetskalkyl till Pegasus med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 5 m/s.

Medelvindhastighet: 5 m/s- Pegasus 2082 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV-k
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	32 839	5 320	0,6
17020 (-63%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	32 839	5 320	1,62
18 400 (-60%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	6%	10 år	35 343	5320	1,63
18 860 (-59%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	6%	10 år	35 488	5320	1,6
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	42 031	6649	0,77
19 780 (-57%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	42031	6649	1,79
21620 (-53%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	3%	10 år	45246	6649	1,86
22080 (-52%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	3%	10 år	45421	6649	1,76

46 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	45 989	7 210	0,84
10 120 (-55%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	45 989	7 210	1,87
23 000 (-50%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	2%	10 år	49 510	7210	1,84
10 580 (-50%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	2%	10 år	49 698	7210	1,85

Tabell E.1.7: Lönsamhetskalkyl till Pegasus med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 6 m/s.

Medelvindhastighet: 6 m/s- Pegasus 3351 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV:k
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	52869	7148	0,99
27600 (-40%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	52869	7148	1,66
30820 (-33%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	6%	10 år	56901	7148	1,61
18 860 (-30%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	6%	10 år	57135	7148	1,55
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	15 år	67669	8993	1,28
33580 (-27%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	67669	8993	1,75

35880 (-22%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,23	3%	10 år	72845	8993	1,78
36880 (-20%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,25 (+10)	3%	10 år	73127	8993	1,74
46 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	14 år	74040	9777	1,40
34500 (-25%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	74040	9777	1,86
38180 (-17%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,23	2%	10 år	79710	9777	1,83
38180 (-17%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,25 (+10)	2%	10 år	80120	9777	1,84

Tabell E.1.8: Lönsamhetskalkyl till Pegasus med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 7 m/s.

Medelvindhastighet: 7 m/s- Pegasus					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
4374,5 kWh							
Investering kr	Elpris kr/KWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NVk
46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	13 år	69010	8621	1,31
38180 (-17%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	69010	8621	1,58
41 400 (-10%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,23	6%	10 år	74272	8621	1,59

46 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	11 år	88327	10884	1,68
46 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	96643	11874	1,84

Tabell E.1.9: Lönsamhetskalkyl till UGE med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 4 m/s.

Medelvindhastighet: 4 m/s- UGE					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
3035,5 kWh							
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV_k
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	47900	6694	0,2
26520 (-87%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	47900	6694	1,55
30600 (-85%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	6%	10 år	51553	6694	1,47
30 600 (-85%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	6%	10 år	51764	6694	1,47
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	61308	8412	0,26
32 640 (-84%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	61308	8412	1,62
34680 (-83%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	3%	10 år	65998	8412	1,66
34 680 (-83%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	3%	10 år	66253	8412	1,67

204 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	67081	9140	0,28
34680 (-83%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	67081	9140	1,67
36720 (-82%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,23	2%	10 år	72217	9140	1,72
36720 (-82%)	0,37(såld) 1,188(köpt (+10%))	0,25 (+10)	2%	10 år	72491	9140	1,73

Tabell E.1.10: Lönsamhetskalkyl till UGE med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 5 m/s.

Medelvindhastighet: 5 m/s- UGE 5556 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NVk
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	88 013	10322	0,38
48960 (-76%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	88013	10322	1,57
53040 (-74%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	94343	10322	1,58
53040 (-74%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	94731	10322	1,59
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	112031	13066	0,49
53040 (-74%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	112031	13066	1,88
57120	0,37(såld)	0,23	3%	10 år	120779	13066	1,89

(-72%)	1,188 köpt (+10%)						
59160	0,37(såld)	0,25	3%	10 år	121246	13066	1,83
(-71%)	1,188 köpt (+10%)	(+10)					
204 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	123227	14237	0,53
57120	0,34 (sälj)	0,23	2%	10 år	123227	14237	1,91
(-72%)	1,08(köpt)						
61200	0,37(såld)	0,23	2%	10 år	132161	14237	1,93
(-70%)	1,188(köpt) (+10%)						
61200	0,37(såld)	0,25	2%	10 år	132661	14232	1,94
(-70%)	1,188(köpt) (+10%)	(+10)					

Tabell E.1.11: Lönsamhetskalkyl till UGE med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 6 m/s.

Medelvindhastighet: 6 m/s- UGE					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
8944,5 kWh							
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NVkr
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	141112	15200	0,62
81600	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	141112	15200	1,54
(-60%)							
85680	0,37(såld)	0,23	6%	10 år	151873	15200	1,60
(-58%)	1,188 köpt (+10%)						
85680	0,37(såld)	0,25	6%	10 år	152497	15200	1,60
(-58%)	1,188(köpt) (+10%)	(+10)					

204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	30 år	180612	19324	0,79
91800 (-55%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	180612	19324	1,76
95880 (-53%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	3%	10 år	194428	19324	1,83
95880 (-53%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	3%	10 år	195181	19324	1,84
204 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	30 år	197617	21090	0,87
97920 (-52%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	197617	21090	1,8
102 000 (-50%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,23	2%	10 år	212751	21090	1,88
102 000 (-50%)	0,37(såld) 1,188(köpt) (+10%)	0,25 (+10)	2%	10 år	213556	21090	1,89

Tabell E.1.12: Lönsamhetskalkyl till UGE med antagandet av skattereduktion med elproduktion vid 7 m/s.

Medelvindhastighet: 7 m/s- UGE 11676,5 Wh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	30 år	184231	19133	0,81
102000 (-50%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	6%	10 år	184231	19133	1,62
108120 (-47%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	6%	10 år	198281	19133	1,66
108120 (-47%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	6%	10 år	199095	19133	1,67
204 000	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	19 år	235802	24370	1,04
122400 (-40%)	0,34 såld 1,08 köpt	0,23	3%	10 år	235802	24370	1,73
128580 (-37%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,23	3%	10 år	253839	24370	1,79
128580 (-37%)	0,37(såld) 1,188 köpt (+10%)	0,25 (+10)	3%	10 år	254822	24370	1,80
204 000	0,34(såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	17 år	258003	26616	1,13
128520 (-37%)	0,34 (såld) 1,08(köpt)	0,23	2%	10 år	258003	26616	1,80
132600	0,37(såld)	0,23	2%	10 år	277761	26616	1,89

(-35%)	1,188(köpt (+10%))						
132600	0,37(såld)	0,25	2%	10 år	278812	26616	1,90
(-35%)	1,188(köpt (+10%))	(+10)					

E2: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade elpris

Samtliga kalkyler har genomförts för utvalda vindturbiner med årsproduktion vid 5 m/s med räntor på 2, 3 och 6 %. Elcertifikat är på 0,23 kr/kWh.

Tabeller nedan visar det elpris som krävs för att uppnå lönsamhet inom 10 år vid olika räntor.

Tabell E.2.1: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade elpris för Windstar 3000:

Medelvindhastighet: 5 m/s Windstar 3000, Årsproduktion: 4362 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter- kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elsertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NVk
75 000	0,82 såld 2,3 Köpt (+140%)	0,23	6%	10 år	132163	8602	1,65
75 000	0,68 såld 2,16 Köpt (+100%)	0,23	3%	10 år	142074	10860	1,75
75 000	0,68 såld 2,16 köpt (+100%)	0,23	2%	10 år	155517	11821	1,92

Tabell E.2.2: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade elpris för Pegasus

Medelvindhastighet: 5 m/s Pegasus 1,6 kW, Årsproduktion: 2082 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
46 000	1,02 såld 3,24 köpt (200%)	0,23	6%	10 år	78 318	5320	1,59
46 000	0,92 såld 2,9 köpt (170%)	0,23	3%	10 år	90 635	6 649	1,83
46 000	0,92 såld 2,9 köpt (+170%)	0,23	2%	10 år	99 228	7 210	1,83

Tabell E.2.3: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade elpris för UGE

Medelvindhastighet: 5 m/s UGE 4 kW, Årsproduktion: 5556 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Elscertifikat kr/ kWh	Ränta	Återbetal- ningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
204 000	1,53 såld 4,86 köpt (+350%)	0,23	6%	11 år	310709	10322	1,47
204 000	1,36 såld 4,32 köpt (+300%)	0,23	3%	11 år	355038	13066	1,68
204 000	1,36 såld 4,32 köpt (+300%)	0,23	2%	10 år	388764	14237	1,84

E3: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade stöd till inmatade överskottsel:

Det har antagits att elpris ligger ungefär i samma pris som år 2006 (43 öre/kWh), som är ungefär 25 % av nuvarande elpris i marknaden. <http://www.npspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/>.

Tabeller nedan visar det förväntade stöd till överskottsel som krävs för att uppnå lönsamhet inom 10 år vid olika räntor. Årsproduktion för samtliga verk är vid 5 m/s. Räntor är 2, 3 och 6 %.

Tabell E.3.1: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade stöd till inmatade el på elnätet för Windstar 3000

Medelvindhastighet: 5 m/s Windstar 3000, Årsproduktion: 4362 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Stöd till inmatade el kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
75 000	0,43 såld 1,35 Köpt (+25%)	2,5	6%	11 år	117498	8602	1,45
75 000	0,43 såld 1,35 Köpt (+25%)	1,8	3%	11 år	133848	10860	1,64
75 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	1,5	2%	11 år	138653	11821	1,69

Tabell E.3.2: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade stöd till inmatade el på elnätet för Pegasus

Medelvindhastighet: 5 m/s Pegasus 1,6 kW, Årsproduktion: 2082 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Stöd till inmatade el kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
46 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	4,5	6%	11 år	73865	5320	1,49
46 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	4	3%	10 år	88996	6 649	1,79
46 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	4	2%	10 år	97433	7 210	1,96

Tabell E.3.3: Lönsamhetskalkyl utifrån förväntade stöd till inmatade el på elnätet för UGE

Medelvindhastighet: 5 m/s UGE 4 kW, Årsproduktion: 5556 kWh					Nuvärdeskvot= (intäkter-kostnader)/ investering		
Investering kr	Elpris kr/kWh	Stöd till inmatade el kr/ kWh	Ränta	Återbetalningstid	Intäkter kr	Kostnader kr	NV _k
204 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	0	6%	30 år	90383	10 322	0,39
204 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	10	6%	10 år	327461	10322	1,55
204 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	0	3%	30 år	115694	13 066	0,50

204 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	9	3%	10 år	389626	13066	1,85
204 000	0,43(såld) 1,35(köpt) (+25%)	0	2%	30 år	126591	14 237	0,55
204 000	0,43 såld 1,35 köpt (+25%)	8	2%	10 år	393311	14237	1,86

Bilaga F: Skickade enkät till relevanta företag och leverantörer:

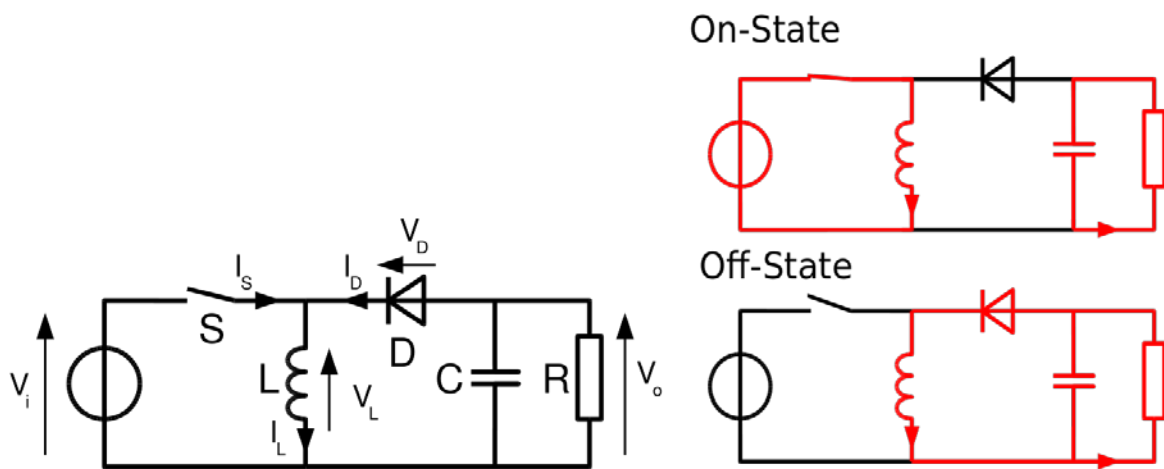
Företagets namn:.....

- 1) Hur ser efterfrågan ut i dagsläget? Och inom vilka sektioner (privata, företag)?
- 2) Hur har marknaden utvecklats under de senaste åren?
- 3) Vilket land och företag köper ni era produkter ifrån?
- 4) Hur kategoriserar ni småskaliga verk? (I vilka skalor)
- 5) Vilka av era produkter passar bättre i urbanmiljö och för byggmontering?
- 6) Vilka är de förutsättningar som man måste ta hänsyn till före installation av ett verk?
- 7) Uppfyller verken dagens förutsättningar och krav inför installation (säkerhet, buller, skuggning, vibrationer osv.)
- 8) Vilka problem kan uppstå efter montering av ett verk i stadsmiljö/ på en byggnad?
- 9) Vad anser ni vara en lämplig plats för installation av Micro turbin?
- 10) Hur kollar ni vindmöjligheterna innan installation av ett verk åt era kunder?
- 11) Hur går anslutning av verket till nätet till?
- 12) Hur ser behovet av drift och underhåll ut för verket?
- 13) Vad är kostnaderna för investering, drift och underhåll?
- 14) Har ni några referenser över de installerade verken? (Hur ser resultat och årsproduktion ut för dessa verk?)
- 15) Vad ska hända för att investering på småskaliga verk ska bli ekonomiskt lönsamt?
- 16) Hur ser ni på utvecklingen av marknaden under de kommande åren?

Bilaga G: Förklaring av Buck-Boost funktion:

Buck-boost-omvandlare (step up/step down) tillämpas när utspänning är lägre eller högre än inspänning. Funktionen beskrivas här nedan:

När switchen är stängd, den inspänningen tillföra ström till spole och dioden blir backspänd, och kapacitans tillföra strömmen till utgång belastning (batteri). När switchen öppnas, matar induktorn ström till lasten (batteri) via dioden [14]



Figur F1: Kretsdiagram över buck-boost omvandlare och funktion [15]

Reglering utförs via ekvationen nedan [14]:

$$V_o / V_i = D (1 / 1 - D) \quad (\text{G.1})$$

V_o = utspänning

V_i = inspänning

D = tiden som switchen är stängd (t_{on})

delat med total tiden ($t_{on} + t_{off}$)

Detta tillåter utspänningen att vara högre eller lägre än ingångsspänning baserad på D förhållande.

Bilaga H: Rekommenderade länkar:

Lista över alla befintliga småskaliga vindkraftverk i världen:

<http://www.allsmallwindturbines.com/>

Lista över tillverkare och säljare av småskaliga vindkraftverk i Sverige:

<http://www.tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/%C3%96rjan-Hedblom-Small-scale-wind-turbines-market-study.pdf>