



# Projektering av urban vindkraft

Magnus Olsson

Examensarbete, 30 hp för civilingenjörsexamen i energiteknik

Handledare: Umeå Energi, Lars C Johansson  
Umeå Energi, Jonatan Bonthron  
Umeå Universitet, Lars Bäckström

## Sammanfattning

Denna rapport presenterar, på uppdrag av Umeå Energi, projekteringen av ett urbant vindkraftverk. Första delen av rapporten beskriver kortfattat teorin bakom urban vindkraft och dess skillnader mot storskalig vindkraft. Andra delen redovisar projekteringen av ett vindkraftverk placerat på Strömpilenområdet i Umeå. Detta verk är planerat att ingå i projektet *Hållbara Ålidhem*, ett projekt där Umeå Energi samarbetar med AB Bostaden och Umeå kommun med målet att skapa ett tryggare, trivsammare och energisnålare bostadsområde

Urban vindkraft innebär att småskaliga vindkraftverk placeras i bebyggda områden, en ny och växande marknad. Med småskalig avses vindkraftverk med en installerad effekt upp till 100 kW, att jämföra med dagens storskaliga vindkraftverk som har en effekt på runt 2 MW.

Projekteringen av urban vindkraft är problematisk. Placeringen av vindkraftverket är det som till största delen bestämmer huruvida projektet kommer att vara lönsamt eller ej. Vindförhållandena är komplexa i urban miljö på grund av att det ofta är flera hinder som påverkar vinden. Detta ställer höga krav på vindmätningen, men en korrekt vindmätning är oproportionellt dyr i förhållande till investeringskostnaden för småskaliga verk och tar dessutom lång tid. Utöver detta så är programmen för vindkraftprojektering anpassade för storskalig vindkraft och använder beräkningsmetoder som inte ger ett bra resultat för urbana vindar. CFD-program eller vindtunnlar bör istället användas.

Ur en ekonomisk synvinkel är urban vindkraft svår att göra lönsam i Sverige i dag. Kostnaden att installera ett småskaligt verk beräknas vara nästan dubbelt så dyrt i jämförelse med ett storskaligt, beräknat i kronor per installerad kW. Dessutom är vindförhållandena betydligt sämre dels på grund av hinder men även eftersom verken inte når samma höjd ovanför marken som storskaliga vindkraftverk. Urban vindkraft är istället en investering som fungerar som en reklampelare åt projektören och påverkar även inställningen för etablering av övrig vindkraft hos folk, då de tenderar att öka intresset för vindkraft och förnyelsebar energi. Detta skapar positiva värderingar som inte syns i en ekonomisk kalkyl.

I rapporten presenteras två vindkraftverk som möjliga investeringar. Verken är valda för att komplettera varandra väl vad gäller bland annat utseende och storlek, som är viktigt för de som slutligen väljer vilket verk som investeras. Beräkningsprogrammet WindPRO användes för att beräkna verkens årsproduktion, som blev 4,9 respektive 22,7 MWh. En enkel ekonomisk beräkning gav då en pay-off tid på 10 respektive 52 år.

# Planning for urban wind power

## Abstract

This report presents, on behalf of Umeå Energi, the planning of an urban wind turbine. The first part of the report describes briefly the theory of urban wind power and its differences with large-scale wind power. The second part presents the planning of a wind turbine placed on Strömpilen in Umeå. This work is planned to be part of the project *Hållbara Ålidhem*, a project which Umeå Energy have together with AB Bostaden and Umeå Kommun with the objective of creating a safer, more comfortable and energy-efficient residential.

Urban wind power means that small-scale wind turbines are placed in built-up environment, a new and growing market. Small-scale wind turbines has an installed capacity of 100 kW or smaller, compared with today's large-scale wind turbines, which is rated at around 2 MW.

The planning of urban wind power is problematic. The location of the wind turbine often determine whether the project will be profitable or not. Wind conditions are complex in an urban environment because there are often multiple barriers that affect the wind. This places high demands on the wind measurement, but an accurate wind measurement is disproportionately expensive in relation to the investment cost for small-scale works and also takes a long time. In addition, the software is for wind energy project suitable for large-scale wind power and uses assessment methods that do not give a good result for urban winds. CFD programs or wind tunnels should be used instead.

Urban wind power is difficult to make profitable in Sweden today. The cost to install a small-scale wind turbine is estimated to be nearly twice as expensive when compared to a large-scale, calculated in SEK per kW installed. In addition, wind conditions is much worse partly because of obstacles but also because the turbine do not reach the same height above the ground as large-scale wind turbines. Urban wind power is rather an investment that serves as a billboard for the designer and also affects the peoples attitude of additional wind power, as they tend to increase interest in wind power and renewable energy. This creates positive values which are not reflected in an economic evaluation.

This study compares two wind turbines as possible investments. The turbines were selected to complement each other well in terms of appearance and size, which is important for those who ultimately chooses which turbine to invest in. Calculations in WindPRO gave the wind turbines yearly production, 4.9 and 22.7 MWh. Simple economic calculations then gave the pay-off time, 10 and 52 years.

## Förord

Detta examensarbete har genomförts vid Umeå Universitet på Institutionen för tillämpad fysik och elektronik. Arbetet utfördes under hösten och vintern 2010 på uppdrag av Umeå Energi.

Jag skulle vilja tacka mina handledare på Umeå Energi, Lars C Johansson och Jonatan Bonthron, som hjälpt mig med de flesta små och stora problem som jag stött på under arbetet. Även stort tack till min handledare på Umeå Universitet, Lars Bäckström, som tagit sig tid att svara på frågor och kommit med tips när jag fastnat.

Tack även till Raoul Adolfsson på Umeå Energi som har letat upp ålderstigna dokument i arkiven. Jörgen Carlsson som ordnade de inledande detaljerna samt varit en bra person att diskutera med under arbetets gång. Slutligen vill jag tacka Aeolos wind turbine Emily Dong och Urban Green Energy´s Ryan Gilchrist som varit väldigt tillmötesgående när det gäller kontakten med återförsäljare.

Umeå, januari 2011

*Magnus Olsson*

# Innehållsförteckning

1. Inledning .....	1
1.2 Problembeskrivning .....	2
1.3 Metod .....	2
2. Vindförhållanden.....	3
2.1 Energin i vinden.....	3
2.2 Vindprofil.....	4
2.3 Vindfördelning.....	5
3. Vindturbiner .....	7
3.1 Horisontalaxlade vindturbiner .....	7
3.2 Vertikalaxlade vindturbiner .....	9
3.3 Building-Augmented Wind Turbine .....	10
3.5 Generator.....	13
3.6 Effektkurvor.....	14
3.7 Energiberäkningar .....	14
3.8 Inkoppling av småskalig vindkraft.....	15
Projektering .....	16
4.1 WindPRO .....	16
4.2 CFD och vindtunnel .....	17
4.3 Skuggor och reflexer.....	18
4.4 Ljudberäkningar.....	19
5. Tillståndsprövning .....	21
5.1 Miljöbalken.....	21
5.2 Plan- och bygglagen.....	21
6. Positionen för verket.....	23
6.1 Vindförhållanden .....	24
6.2 Byggnaden .....	24
7. Val av vindkraftverk.....	26
7.1 Möjliga investeringar.....	27
7.2 Budget .....	30
8. Diskussion .....	31
9. Slutsatser.....	33
10. Referenser .....	34

# Bilagor

BILAGA 1: Investeringskalkyl

BILAGA 2: Vindförhållanden

BILAGA 3: Konstruktionsritningar

BILAGA 4: Fotomontage

BILAGA 5: Lastberäkningar

BILAGA 6: Effektkurvor

# 1. Inledning

När solen värmer jorden, värms olika delar med varierad hastighet. Temperaturskillnader i luften resulterar i densitetsvariationer som i sin tur ger varierande lufttryck. I ett försök att utjämna denna tryckskillnad kommer luften tvingas röra på sig, denna luft rörelse kallas vind. Genom att cirka 1% av solljuset omvandlas till vindenergi, finns potentiellt 15 miljarder TWh vindenergi att utvinna globalt årligen. Nu är det inte riktigt så enkelt, dagens vindkraftverk kräver platser med kraftfulla vindar för att snurra. Det är ofta en bra projektering som avgör om ett verk kommer att gå med ekonomisk vinst. [2]

Intresset för urban vindkraft, dvs. småskalig vindkraft i tätbebyggda områden, har ökat kraftigt de senaste åren. Till småskalig vindkraft räknas verk med en effekt under 100 kW. Placeringen av urbana verk kan vara mer varierad jämfört med storskaliga verk, de kan placeras på hustak eller på något annat sätt i anslutning till tätbebyggelse. Projekteringen av urban vindkraft är dock problematisk, vindförhållandena är ofta komplicerade i bebyggelse vilket gör det svårt att förutse hur bra en vindturbin kommer att snurra. Ofta saknas dessutom ekonomiska förutsättningar för att genomföra en korrekt vindmätning, något som resulterar i en chansartad projektering. [4][5][7]

## 1.1 Bakgrund

Umeå Energi är ett modernt energiföretag med inriktning mot en säker och klimatvänlig energiproduktion. I två kraftvärmeverk skapar företaget fjärrvärme och el genom eldning av 99% restprodukter. Dessutom har Umeå Energi under 2009/2010 investerat 500 miljoner kronor på vindkraft, som ingår i deras satsning inom hållbar energiproduktion.

I ett samarbete mellan Umeå Energi, AB Bostaden och Umeå kommun drivs ett projekt med mål att skapa ett tryggare, trivsammare och energisnålare bostadsområde. Projektet går under namnet *Hållbara Ålidhem* och syftar till ett utvecklat energisystemtänkande i kalla klimat. Ålidhem är området i Umeå tätort där runt 130 nya energisnåla lägenheter ska byggas upp på nytt efter att de har brunnit ner, dessutom ska ytterligare ca 370 lägenheter renoveras för att kraftigt sänka energibehovet. Genom att ersätta eldrivna apparater med fjärrvärmedrivna lösningar, installera solceller och placera ut lokal vindkraft blir *Hållbara Ålidhem* framtidens bostadsområde som till stor del utnyttjar lokal förnyelsebar energi. Umeå Energi har satt upp följande mål med projektet:

1. Testa förutsättningar för mikrogenerering av el i Umeå tätort (nettomätning, kvalitet mm.)
2. Lokal vindkraftproduktion Installerande av lokal mikro vindkraftverk, utveckla och bidra med kunskap i partnerskap.
3. Takintegrerade solceller, lära av olika tekniker för att utnyttja solenergi för elproduktion. (Omformarteknik, nettomätningar etc.)
4. Fjärrvärmedrivna vitvaror. Sänka primärenergiförbrukningen och CO<sub>2</sub>-emissionerna från området genom att ersätta eldrivna vitvaror med hetvattendrivna dito och därigenom skapa förutsättningar för minskad elanvändning, samt ökad elproduktion i kraftvärmeverken.
5. Energioptimering genom laststyrning. Genom att utnyttja värmetrogheten i bebyggelsen jämna ut effektbehoven på fjärrvärmesystemet och därigenom minska toppeffektuttaget vid spetslast.
6. Utveckla kompetens och kunnande inom organisationen.

## 1.2 Problembeskrivning

Detta projekt ska ingå i Umeå Energis mål för lokal vindkraftproduktion. Målsättningen är att installera lokal vindkraft i anslutning till Ålidhemsområdet samt bidra med kunskap inom området för urban vindkraft.

För att få optimal produktion är vindkraftverket planerat att placeras vid Umeälven på Strömpilenområdet strax söder om Ålidhem, där bättre vindförhållanden råder. Där har Umeå Energi en pumpstation, med möjlighet att koppla in vindkraftverkets elproduktion på elnätet. Pumpstationen omges av en stålkonstruktion där ett vindkraftverk skulle kunna placeras.

## 1.3 Metod

Arbetet uppdelades i två delar, en teoridel om urban vindkraft samt en praktisk projekteringsdel. Teoridelen byggdes på litteraturstudier med information allmänt om vindkraft men där fokus låg på urban vindkraft. Projekteringsdelen bedrevs genom fältstudier, optimering i WindPRO, kontakt med olika återförsäljare samt bearbetning av bygglov. Dessutom skedde ett löpande samarbete med olika avdelningar på Umeå Energi.



## 2. Vindförhållanden

Vind är luft i rörelse, uppkomsten till denna rörelse är skillnaden i tryck som i sin tur beror på temperaturskillnader i atmosfären. Luften strävar efter att utjämna tryckskillnader genom att vandra från högtryck till lågtryck.

### 2.1 Energin i vinden

Ett vindkraftverks uppgift är att transformera vindens rörelseenergi via mekaniskt arbete till elektrisk kraft. Vindens effektinnehåll över en svepyta kan uttryckas

$$P = \frac{\rho}{2} \pi r^2 v^3 \quad [W] \quad (1)$$

*P = effekt [W]*

*$\rho$  = luftens densitet [kg/m<sup>3</sup>]*

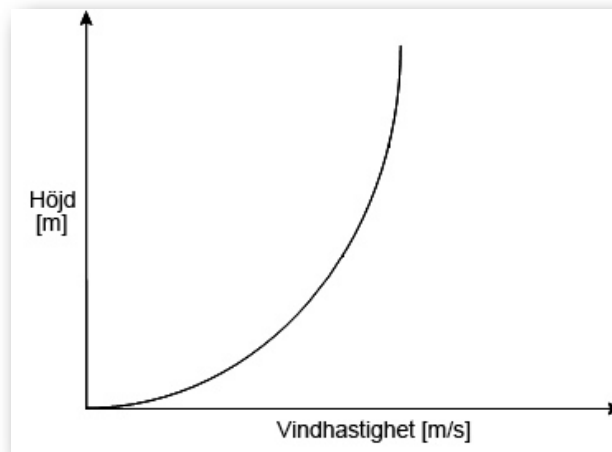
*r = svepytans radie [m]*

*v = vindens hastighet [m/s]*

där svepytan definieras som den area som bildas när vindturbinen roterar. Svepytan beräknas olika beroende på turbinens utseende, se *kapitel 3*. Luftens densitet varierar med temperatur och höjd, men anses ofta vara konstant vid vindkraftsberäkningar. Det är alltså vindkraftverkets svepyta och vindens hastighet som avgör hur mycket energi som ett vindkraftverk kan utvinna. Svepytan är i kvadrat och vindhastigheten i kubik, vilket betyder att vindhastigheten är det viktigaste när det handlar om att er hålla energi ur vinden. Skillnaden i vindhastighet före och efter vindturbinen avgör hur stor del av vindens effekt som kan tas tillvara av vindkraftverket, detta beskrivs med verkets effektkoefficient. En förlustfri vindturbin har en effektkoefficient på högst 59%, enligt Betz lag. [5]

## 2.2 Vindprofil

På grund av markens friktion får vindhastigheten en exponentiell ökning med växande höjd. Vindens hastighet för olika höjder brukar illustreras av en vindprofil, se *figur 1*. Hastigheten blir konstant på mellan 100 och 1000 meters höjd. Markens råhet är ett mått på hur mycket vinden bromsas av terrängen på marken. Den höjd där vinden har hastighet noll kallas nollplanet. Nollplanet ligger vanligtvis på marknivå men höjs upp beroende av olika hinder, t.ex. vid skogsmark genomförs en förskjutning av nollplanet med 75% av skogens medelhöjd. [7]



*Figur 1. Exempel på en vindprofil för ett område med låg markråhet och utan hinder.*

I en urban miljö är en vindprofil betydligt mer komplex. Fler objekt som stör vinden gör att det krävs en mer avancerad nollplansförskjutning. Turbulenta områden och vakområden skapas då vinden passerar hinder, dessutom skapas områden där vinden accelereras. Avståndet mellan olika hinder är avgörande huruvida turbulens eller vak skapas, vidare kommer området av inbromsad vind successivt öka med antalet hinder. Detta gör att det kommer skilja i vindstyrka beroende om det är i utkanten av en stad eller i centrum som verket är tänkt att placeras, trots att höjden och närliggande hinder är den samma. [12]

## 2.3 Vindfördelning

När den årliga energiproduktionen från ett vindkraftverk ska beräknas kan inte vindens medelhastighet användas. Eftersom effekten beror på vindhastigheten i kubik, kan produktionen bli väldigt olika trots att två platser har samma medelvindhastighet. Det vanligaste alternativet är att genom vindmätningar fastställa vindens hastighetsfördelning, dvs. antal timmar som en viss vindhastighet förekommer årligen på den aktuella platsen. Vindens hastighetsfördelning anses vara sannolikhetsfördelad enligt en Weibullfördelning (se figur 2), som beskrivs av följande ekvation

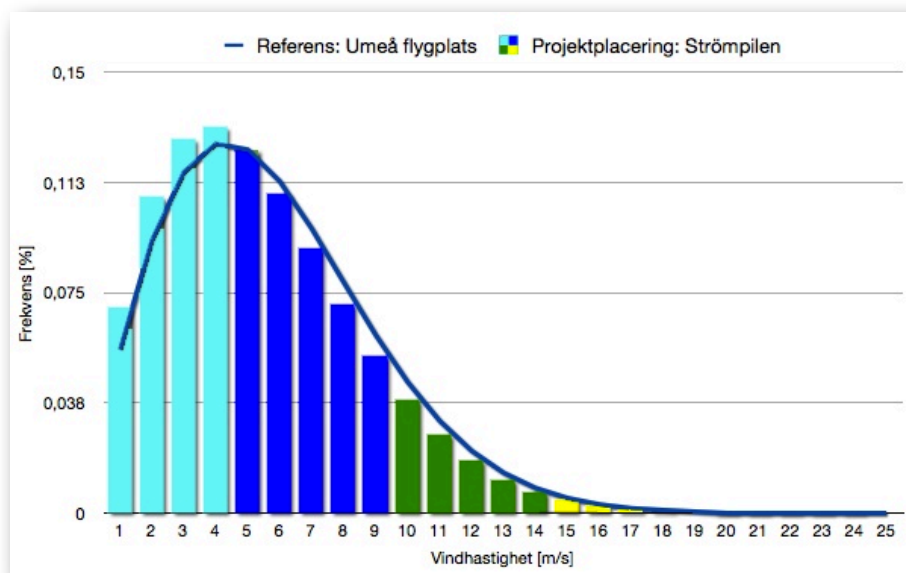
$$f(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{k}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad [h] \quad (2)$$

$k$  = formfaktorn

$C$  = skalfaktorn

$v$  = vindens hastighet [m/s]

Genom att utnyttja weibullfördelningen kan vindens hastighetsfördelning beräknas endast med hjälp av årsmedelvärdet av vindhastigheten, förutsatt att man känner till sannolikhetsfördelningens form- och skalfaktor.



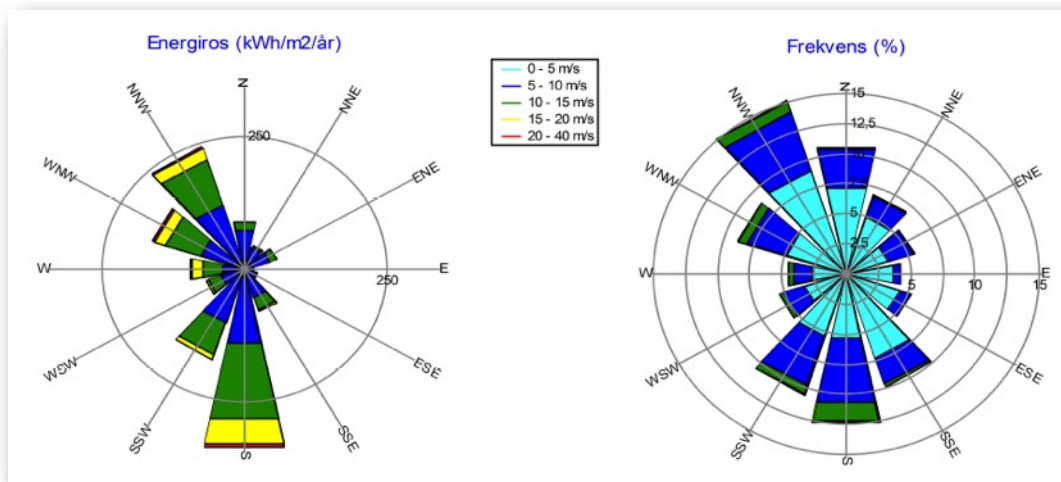
Figur 2. Weibullfördelning på 50 meters höjd, för mätvärden vid Umeå flygplats ( $k = 1,86$  och  $C = 6,5$ ) samt beräknade värden vid Strömpilenområdet ( $k = 1,77$  och  $C = 6,08$ )

För storskalig vindkraft som placeras i öppet landskap används en formfaktor kring 2,0 för att få fram en bra weibullfördelning. Inom urban vindkraft finns inget riktvärde på grund av de komplexa vindar som råder. De få tester som har genomförts visar på en formfaktor lägre än 1,6 i över hälften av de urbana placeringarna. Istället blir en vindmätning ett måste för att erhålla en weibullfördelning för en urban placering.

För en korrekt vindmätning används en mast med vindmätare på flera olika höjder, mätvärden tas sedan under minst ett år. En normalårskorrigerings används sedan för att korrigera mätvärdena med vindens långtidsvariation. Under mättiden bör masten kontrolleras några gånger, för att undvika störningar. Dessutom bör mätutrustningen vara uppvärmd i kallt klimat för att inte instrumenten ska frysa och därmed leda till mätfel. En vindmätning blir dyr i förhållande till produktion av ett urbant vindkraftverk. Följderna blir att urban vindkraftprojektering är problematisk, utan vindmätningar blir

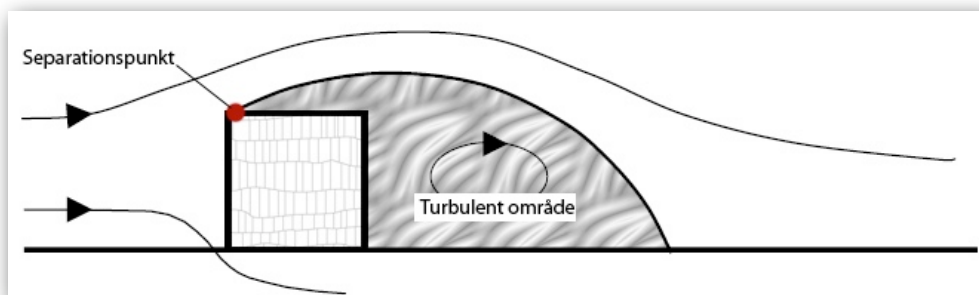
valet av verk och plats chansartat. Det finns företag som erbjuder en billigare vindmätning som är anpassad till småskalig vindkraft, en sådan mätning genomförs under en kortare period och blir därmed billigare men även mindre tillförlitligt. Den kortare mätperioden gör normalårskorrigeringen viktigare för ett bra resultat. [6][7]

När man projekterar vindkraft är det viktigt att känna till vilka vindriktningar som är mest frekventa. Detta brukar illustreras i en vindros, se figur 3. Vindriktningen är av betydelse när storskaliga vindkraftparker projekteras, så att störningen mellan verken ska bli minimal. För urban vindkraft är vindriktningen av yttersta betydelse. Ofta handlar det om att hamna på rätt sida av olika hinder, men även när ett verk ska placeras på ett byggnadstak är det viktigt att veta från vilken riktning vindfrekvensen är störst.



Figur 3. Vindros över energifördelningen från projektplaceringen på Strömpilenområdet. Energirosen till vänster talar om vilken sektor och vilken vindstyrka som ger mest energi, frekvensrosen till höger visar vilken sektor och vindhastighet som är mest förekommande © WindPRO

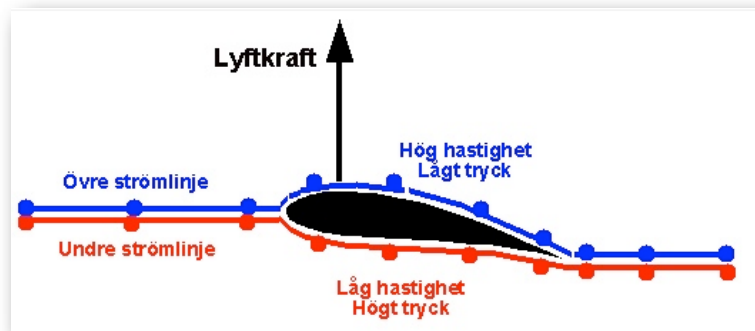
När ett vindkraftverk ska placeras på taket av en byggnad, är det viktigt att känna till vart luftflödet separerar från byggnadsytan, se figur 4. När luftflödet separerar från byggnaden skapas ett turbulent område som är direkt olämpligt för vindkraft, ovanför detta skapas ett område där flödet accelereras och därmed gör det passande för vindkraft. Separationspunkten på kantiga byggnader har liknande placering, däremot kommer vinkeln för vilken separationen följer variera. Separationsvinkeln beror på takets position och avrundning, väggarnas råhet, vindens påverkan från omgivande byggnader samt byggnadens storlek. Ett tak med sfärisk form ökar produktionen från ett vindkraftverk med dubbelt så mycket som ett vanligt kantigt tak kan göra. Dessutom minskar det turbulenta området kraftigt i storlek för ett sfäriskt tak, vilket gör det svårt att placera verket fel. [12]



Figur 4. Vindflödet kring en byggnad, separationslinjen utgår från separationspunkten och markerar det turbulenta området. [14]

### 3. Vindturbiner

Detta arbete behandlar vindkraftverk som bygger på lyftkraft. Det innebär verk med blad som fungerar som en flygplansvinge, se figur 5. Utöver dessa finns även verk som bygger på dragkraft och de som kombinerar lyft- och dragkraft. Turbiner som använder sig av dragkraft använder mycket material samt har lägre verkningsgrad, vilket innebär högre tillverkningskostnad samtidigt som de genererar mindre mekaniskt arbete. [12]



Figur 5. Förklaring av lyftkraft från en flygplansvinge. Den övre strömlinjen kommer, pga. vingens böj, få en längre väg än den under. Det innebär en högre lufthastighet ovanför vingen än under den, tryckförhållandet blir tvärt om. Undertrycket ovanför vingen skapar lyftkraft.

#### 3.1 Horisontalaxlade vindturbiner

Trebladiga horisontalaxlade, se figur 6, vindturbiner är de vanligaste inom både storskalig och småskalig vindkraft idag. Dessa är även de med högst produktions potential, med en effektkoefficient på runt 45%. [7]



Figur 6. Horisontalaxlat storskaligt vindkraftverk.

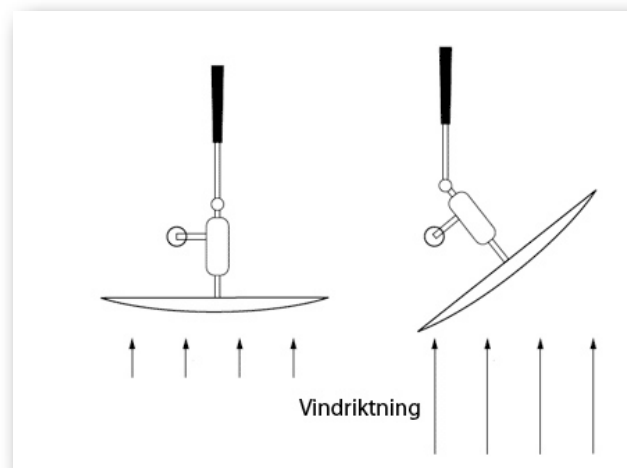
Även tvåbladiga turbiner finns på marknaden. Båda varianterna kräver att verket aktivt vrids vinkelrät mot vindriktningen för optimal produktion. Inom storskalig vindkraft sker detta genom ett samarbete

mellan kontinuerliga vindmätningar och girmotorer, medan det inom urban vindkraft oftast styrs med en enkel styrfena. I urbana miljöer ändras vindriktningen mer frekvent, något som kan innebära att vindkraftverket inte hinner rikta in sig mot vinden, med minskad produktion som resultat. [12]

Inom storskalig vindkraft finns det nästan ingen gräns för hur stor rotordiametern kan vara, längre blad innebär större svepyta och därmed mer energi. Storleken på svepytan har dock stagnerat de senaste åren, problemet är främst produktionskostnaderna. Vid ökad bladlängd växer svepytan med kvadraten medan bladens volym ökar med kuben, den bantning av bladen som har kunnat göras är idag fullständig vilket gör en fortsatt ökning oekonomisk. Nya material eller nya tekniska lösningar kommer troligen att fortsätta öka storleken på vindkraftverken. [7]

Inom urban vindkraft bör däremot rotordiametern begränsas. För att undvika att bladen brister under de turbulenta förhållandena som finns i urban miljö, bör rotordiametern understiga 1/6 av de omgivande byggnadernas höjd. [12]

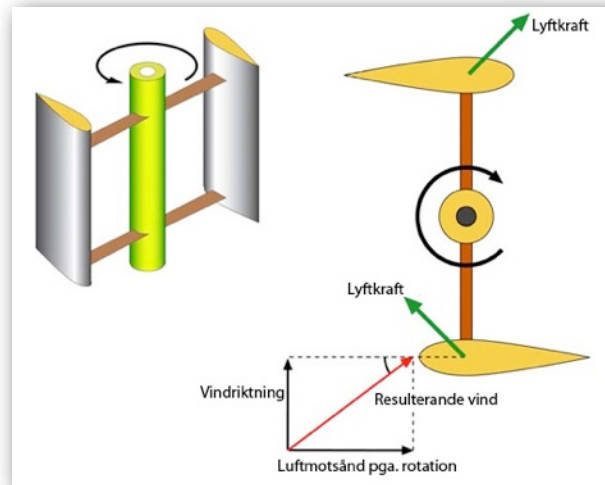
Storskaliga horisontella vindturbiner har effekterreglering där varje blad vrids beroende på vindstyrkan. Detta görs för att optimera produktionen för rådande vindstyrka, men det fungerar även för att skydda verket vid för kraftiga vindar. Urbana vindkraftverk har i de flesta fallen fasta vingar, effekterregleringen och skyddet mot kraftiga vindar sker istället genom att rotorn vrids ur vinden. Antingen så vrids rotorn i horisontalled (se figur 7) eller vrids den i vertikalalled, vid vertikal vridning hamnar rotorn i helikopterläge vid stoppvind. [8]



Figur 7. Exempel på effekterreglering för småskaliga horisontalaxlade vindkraftverk.

### 3.2 Vertikalaxlade vindturbiner

Vertikalaxlade vindturbiner produceras idag endast för den småskaliga marknaden. Den modell som bygger på lyftkraft kallas *Darrieus turbinen* (se figur 8), där varje blad är format som en flygplansvinge. Dessa har en effektkoefficient på 35-40%, vilket betyder att svepytan måste överstiga ett horisontalaxlat verks för att kunna uppnå samma produktion. [9][12]



Figur 8. Funktionsbeskrivning av en Darrieus turbin, bladen har samma form som en flygplansvinge vilket skapar lyftkraft. [19]

Antal blad har visat sig vara viktigt för att en vertikalaxlad vindturbin ska fungera optimalt. För att minimera tillverkningskostnaderna ska så få blad som möjligt användas. Jämt antal blad skapar oönskade ljud samt vibrationer då bladen står i fas mot vinden. Då endast ett blad används krävs det att bladet vrids likt en serpentin, ska då samma svepyta uppnås blir tillverkningen väldigt dyr. Tre blad anses vara optimalt. [12]

För att undvika att ljud och vibrationer samt en ojämn belastning på något av bladen vrids dessa. Med vridna blad kommer den drivande kraften fördelas över bladet när det roterar. Vridningen undviker att det blir tre stötvisa "knuffar" varje varv. Vridningen gör även att bladen bättre tar tillvara på vind som kommer snett underifrån, som uppstår om verket t.ex. är placerat på ett hustak (se kapitel 3.3). Denna helixformade turbin med tre vridna blad kallas för *Turby*, se figur 9. [12]



Figur 9. Vertikalaxlat vindkraftverk av modellen Turby © Urban Green Energy.

Vertikalaxlade vindturbiner har inte samma möjlighet att skydda sig mot extrema vindar som horisontella turbiner, istället så klarar de normalt kraftigare vindar innan de går sönder. De behöver inte ställa in sig efter vindriktningen som ett horisontalaxlat verk, detta innebär att ett vertikalt verk kan vara att rekommendera vid vissa turbulenta områden. Dessutom anses vertikala verk tystare under drift än horisontella, något som kan vara avgörande vid en urban placering. [12]

### 3.3 Building-Augmented Wind Turbine

I städer kan man utnyttja områden där vinden accelereras med hjälp av byggnaders utformning. Dessa vindkraftverk kallas *Building-Augmented Wind Turbine*, eller *BAWT*. Dessa delas upp i tre olika kategorier.

- **Vindkraftverk placeras på taket eller på väggen av en byggnad, se figur 10.**

När man vill placera ett vindkraftverk på ett byggnadstak utnyttjar man att vindseparationen (se *kapitel 2.4*) accelererar vinden vid vissa positioner på taket. Luftflödet kommer då snett underifrån, något som för vridna vertikalaxlade verk ökar produktionen, medan det för horisontalaxlade verk istället minskar produktionen. Placeras verken för lågt hamnar de i det turbulenta området under separationslinjen, medan ett för hög placerat verk hamnar ovanför huvuddelen av den accelererade vinden. [12]

Själva monteringen av vindkraftverket på byggnaden kan vara problematisk. En felaktig montering innebär störande vibrationer och ljud från verket, vilket i värsta fall leder till att verket monteras ned igen. Genom att undvika montering i byggnadsstommen och använda vibrationsdämpande material kan problem förebyggas.



Figur 10. Windpods placerad längs väggen och taket på en byggnad. [21]



- **Vindkraftverk placeras mellan två byggnader som är designade för att samla vinden, så kallade aerodynamiska byggnader, se figur 11.**

Denna variant kan appliceras både på specialdesignade byggnader som redan under byggnadsfasen planerats för vindkraft, eller på någon plats som redan har dessa egenskaper. Metoden bygger på samma sak som för takplacerade verk, med skillnaden att vinden accelereras från två sidor. Även här är det viktigt att verket placeras på ett sådant sätt att turbulens undviks. Svårigheten är ofta att komma upp tillräckligt i höjdd, dvs. att hitta tillräckligt höga byggnader som dessutom är betydligt högre än andra närliggande byggnader. [12]



Figur 11. Bahrain World Trade Center [20]

- **Vindkraftverk placeras i en kanal genom en byggnad, se figur 12.**

Genom att utnyttja det faktum att luftflödet tar den kortaste vägen förbi ett hinder, kan vissa byggnader samla stora flöden luft i en kanal genom själva byggnaden. Alternativet har ekonomiska nackdelar. [12]



Figur 12. Strata Tower i London [22]

Både vad gäller vindkraftverk för aerodynamiska byggnader och kanaler genom byggnader kan olika turbiner användas beroende på platsens unika egenskaper. För båda placeringarna är en horisontalaxlad turbin att föredra. En vertikalaxlad turbin kan inte utnyttja sina fördelar som den annars har i urban miljö, då vindriktningen i detta fall är mer eller mindre låst. Horisontalaxlade verk kan utnyttjas olika beroende av områdets vindförhållande. Verket kan vara fast monterat eller vridbart runt en axel. Om vinden är stark från båda sidor av kanalen kan verket vara försedd med en 180-gradig pitchreglering och en generator som klarar av att generera ström i båda rotationsriktningarna. Då kan vinden utnyttjas från båda vindriktningarna. När vindriktningen ändras vrids bladen 180 grader och rotorn byter rotationsriktning. Verket saknar vridbar axel men kan ändå utnyttja vinden från båda sidor av kanalen. [12]

Vid storskalig vindkraft fokuseras det på att vinden är ostörd (laminär) vilket är en förutsättning för att så mycket energi som möjligt ska kunna tas om hand av verket. För urban vindkraft är det svårt att få helt turbulensfria vindar. Alla tre varianter av BAWT handlar om att accelerera eller koncentrera vinden till en specifik plats.

För att hitta de platser där vinden får en accelererande effekt, används CFD eller vindtunneltester (se *kapitel 4.2*), ofta är dessa platser vindriktningsberoende. Därför är det viktigt att känna till områdets vinddata, helst ska en korrekt vindmätning ha genomförts.

## 3.5 Generator

När vinden träffar bladen på vindkraftverket skapas ett vridmoment, via en axel utnyttjar verkets generator vridmomentet för att alstra elektrisk ström. Generatoren består av två delar, en roterande **rotor** och en stillastående **stator**. När rotorn sätts i rörelse skapas ett magnetfält som statorn utnyttjar för att inducera elektrisk spänning. Vindkraftverk kan använda sig av två olika generatorer, antingen en synkron- eller asynkrongenerator.

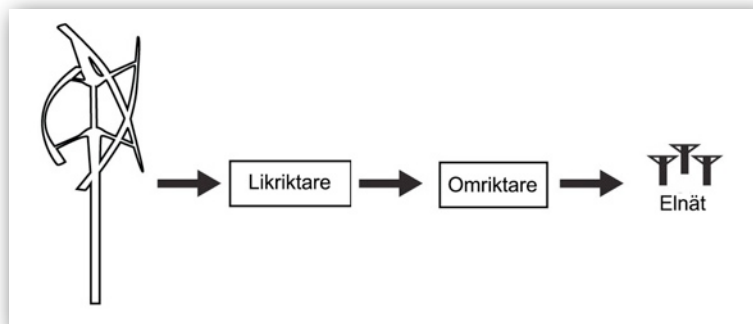
### Asynkrongenerator

En asynkrongenerator styrs av elnätets frekvens där den tar sin magnetiseringsström. Det gör att asynkrongeneratoren drar ström från nätet när vindhastigheten är låg. Då vindhastigheten stiger ökar varvtalet och verket kan börja alstra ström till nätet. Antalet poler bestämmer vilket varvtal som krävs för att ström skall kunna matas ut på nätet. Det svenska elnätet har en frekvens på 50 Hz vilket gör att det krävs ett varvtal på 1500 rpm för att en generator med fyra poler ska börja generera ström. Ett verk med en asynkrongenerator kräver därför en växellåda för att kunna komma upp i dessa rotationshastigheter. Om vinden och därmed vridmomentet fortsätter öka måste rotationen bromsas för att inte generatoren ska överhettas, varvtals reglerande blad eller vridaxel sköter detta men en mekanisk broms installeras också av säkerhetsskäl.

På storskaliga verk används ofta mjukstartsutrustning och kondensatorer till en asynkrongenerator för att undvika att känslig utrustning går sönder när den hämtar ström från nätet vid inkopplingen på elnätet. Sådan utrustning saknas dock på de flesta småskaliga verk som använder sig av asynkrongeneratorer.

### Synkrongenerator

En direktansluten synkrongenerator med en mångpolig ringgenerator går med en konstant varvtal, vilket gör en växellåda överflödig. Detta gör att synkrongeneratoren levererar strömmar med varierande spänning och frekvens. För att fasa in strömmarna på nätet används kraftelektronik (se figur 13), den är väldigt dyr och kan för ett småskaligt verk innebära halva investeringskostnaden. Denna kraftelektronik behövs dock inte då leveransen av elektricitet inte är beroende av konstant frekvens, t.ex vid batteriladdning.

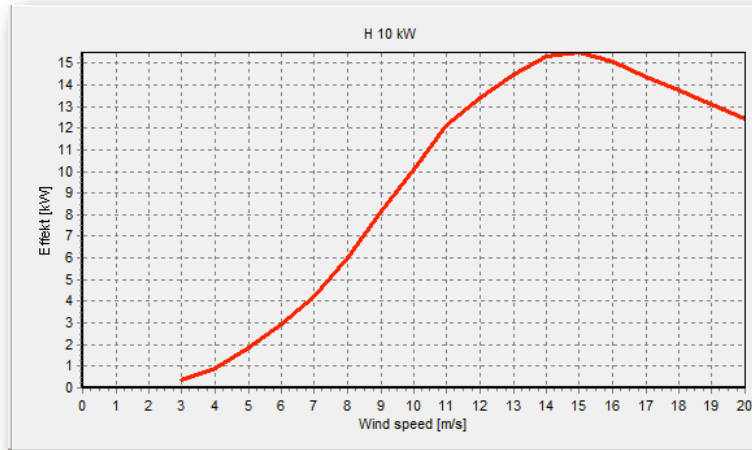


Figur 13. Synkron generator levererar el av blandad kvalitet, vilket betyder att strömmarna först måste likriktas och sedan omriktas tillbaka till trefas växelström för att kunna matas ut på nätet.

Småskaliga vindkraftverk är ibland tänkt att placeras där det inte finns något existerande elnät, t.ex. vid en sommarstuga. Det gör att en asynkrongenerator inte kan användas, då den kräver reaktiv ström från elnätet för att fungera. Synkronageneratorer däremot magnetiserar sig själv och har därför inget nätbehov.

### 3.6 Effektkurvor

För att veta vilket vindkraftverk som passar för en specifik position används verkets effektkurva. Effektkurvan visar hur stor effekt verket producerar vid en viss vindstyrka, se figur 14. Tillsammans med en vindfördelning kan årsproduktionen beräknas.

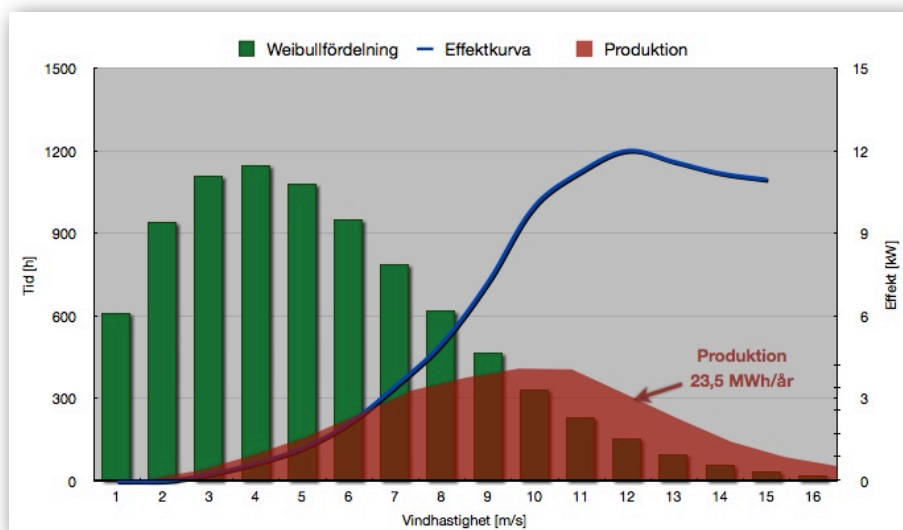


Figur 14. Effektkurva för ett 10 kW's verk, x-axeln visar vindens hastighet i m/s y-axeln visar verkets effekt i kW. © WindPRO

Problemet med effektkurvor inom urban vindkraft är att det inte finns en internationell standard, som det finns för storskalig vindkraft. Det betyder att företaget kan publicera en effektkurva som de själv har testat fram, vilket kan innebära effektkurvor som verken inte klarar av att nå upp till. [6]

### 3.7 Energiberäkningar

Genom att kombinera ihop vindens hastighet och ett vindkraftverks effektkurva, kan ungefärliga energiberäkningar utföras innan ett verk placeras ut. Den årliga vindfördelningen används ihop med verkets effektkurva för att beräkna den årliga produktionen, se figur 15. Verkets effekt vid en viss vindhastighet och navhöjd multipliceras med antalet timmar som den vindhastigheten förekommer på den aktuella platsen. Resultatet blir verkets årliga energiproduktion.



Figur 15. Weibullfördelning ( $k = 1.77$ ,  $C = 6.08$ ), effektkurva samt årlig produktion för LitenVind's 12kW verk. X-axeln visar vindens hastighet i m/s, vänster y-axel hör till stapeldiagrammet och visar antalet timmar per år som det blåser med en viss hastighet, höger y-axel hör till linjediagrammet och visar verkets effektdiagram. Slutligen presenteras verkets årliga produktion vid en viss vindhastighet med ett yt-diagram.

### 3.8 Inkoppling av småskalig vindkraft

Alla vindkraftverk med en effekt under 1,5 MW är fria från nätägarens nättariff, dvs. nätägarens kostnad för drift och underhåll av nätet. Nätägaren tar runt 200 000 kronor per år i nättariff för ett 2 MW verk. [7]

Inom småskalig vindkraft brukar den producerade elen användas på tre olika sätt.

- Verket är kopplat till hushållet och när verket producerar mer energi än vad som förbrukas lagras överskottet i någon form av energilagringssystem. Oftast laddas ett batteri med elöverskottet, som sedan kan användas då verket producerar mindre el än vad som förbrukas. Detta system används med fördel för hushåll som saknar kontakt med elnätet, kan kombineras med t.ex. en dieselgenerator för att få en säkrare elförsörjning.
- Verket är endast kopplat till hushållet, när verket producerar mer energi än vad som förbrukas regleras effekten på verket ner. Även denna används med fördel på hushåll som saknar kontakt med elnätet och kan kombineras med t.ex. dieselgeneratorer för att få en säkrare elförsörjning.
- Verket är kopplat till elnätet precis som ett storskaligt vindkraftverk, sedan bestämmer avtalet som skrivs med nätägaren vilka villkor som gäller. Det mest fördelaktiga system idag är då ägaren av vindkraftverket säljer el för samma pris som elen köps för. Det kallas nettomätning och tillåter vindkraftägaren att kvitta sin konsumtion mot sin produktion.

## 4. Projektering

Tillvägagångssättet för en vindkraftprojektering av storskaliga vindkraftverk är idag välutvecklad, medan bra metoder för att projektera urbana vindkraftverk saknas. I detta kapitel förklaras vilka verktyg som används i dag samt vissa alternativa metoder som finns.

### 4.1 WindPRO

För att jämföra produktionen mellan olika verk används vanligtvis WindPRO, en mjukvara anpassad för projektering av vindkraft. Programmet är designat för storskaliga horisontalaxlade vindkraftverk och därför inte optimal för projektering av urban vindkraft. I övrigt är WindPRO en komplett programvara med moduler som hanterar bl.a. ljud, skuggor, optimering av vindparker, vakeffekter och ekonomikalkyler. [13]

WindPRO kan hantera flera olika vindberäkningsmetoder, under detta projekt användes vindatlasmetoden. Vid vindatlasmetoden använder WindPRO vindmätningar från en eller flera närliggande vindmätstationer tillsammans med områdets terräng för att beräkna vindfördelningen. Terrängens karaktär är ofta en grov uppskattning, det handlar om markens råhet, orografi samt närliggande hinder. Vindens hastighetsfördelning presenteras sedan i form av en weibullfördelning för varje vindriktning (12 sektorer), höjd och råhetsklass. [13]

WindPRO beräknar den producerade energin i varje vindriktningssektor. Sedan används weibullfördelningen från varje sektor som kombineras ihop med verkets effektkurva. Effekten viktas beroende hur mycket det blåser i varje sektor innan den multipliceras med antalet drifttimmar som önskas, ett års drift är standard. Beräkningen kan beskrivas med följande ekvation

$$E = T \cdot \sum_{i=1}^{i=N} F_i \int_{v=v_{ci}}^{v=v_{co}} f_i(v) \cdot P(v) \cdot C_e(v) \cdot dv \quad [Wh] \quad (3)$$

$E$  = energi [Wh]

$T$  = tid [h]

$i$  = vindriktning, sektor

$N$  = antal sektorer

$v_{co}$  = vindkraftverkets cut-out hastighet [m/s]

$v_{in}$  = vindkraftverkets cut-in hastighet [m/s]

$F$  = sektorns vindfrekvens

$f_i$  = sektorns weibullfördelning (2)

$P_i$  = sektorns vindeffekt [W] (1)

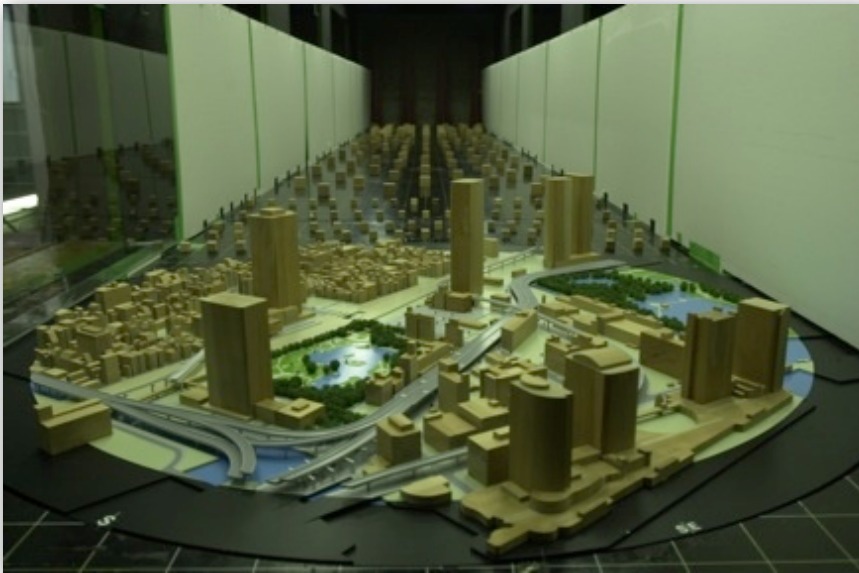
$C_e$  = vindkraftverkets effektivitet vid given vindhastighet

där  $C_e$  är taget direkt från vindkraftverkets effektkurva. [13]

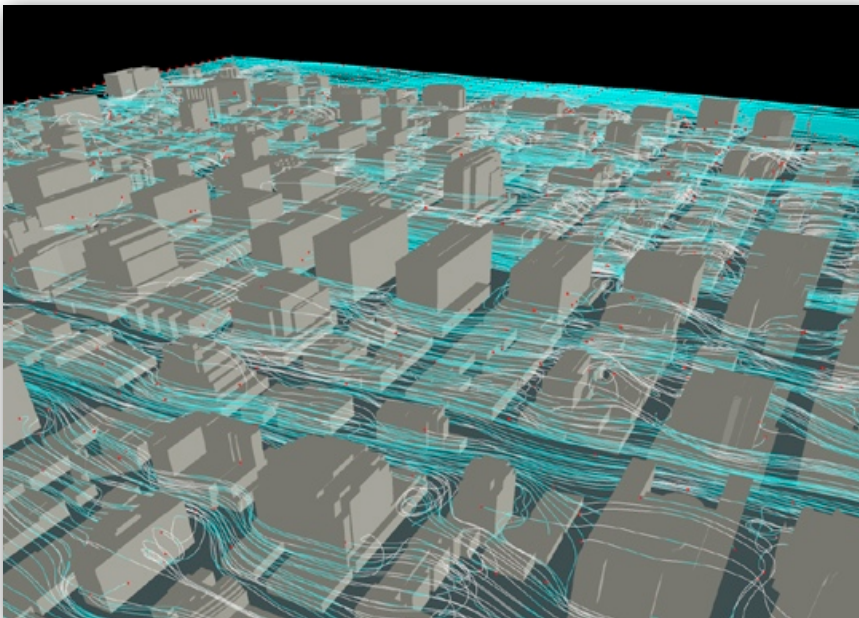


## 4.2 CFD och vindtunnel

En vindanalys i urban miljö kan även genomföras i en vindtunnel (se figur 16) där man byggt upp det aktuella området i mindre skala, sedan blåses rök över området för att markera vindens väg. Alternativet är att bygga upp en kopia av området i datorn och genomföra avancerade CFD-vindberäkningar virtuellt, något som blir allt vanligare. CFD-beräkningar (Computational Fluid Dynamics, se figur 17), är väldigt dator- och tidskrävande. Det krävs även kunskaper inom strömningslära för att kunna få ut något av resultaten från vindtunneltester eller CFD beräkningar. [12]



Figur 16. En stadsdel uppbyggd för att testas i en vindtunnel, de små klossarna i bakgrunden ska motsvara husen i utkanten av staden. [17]

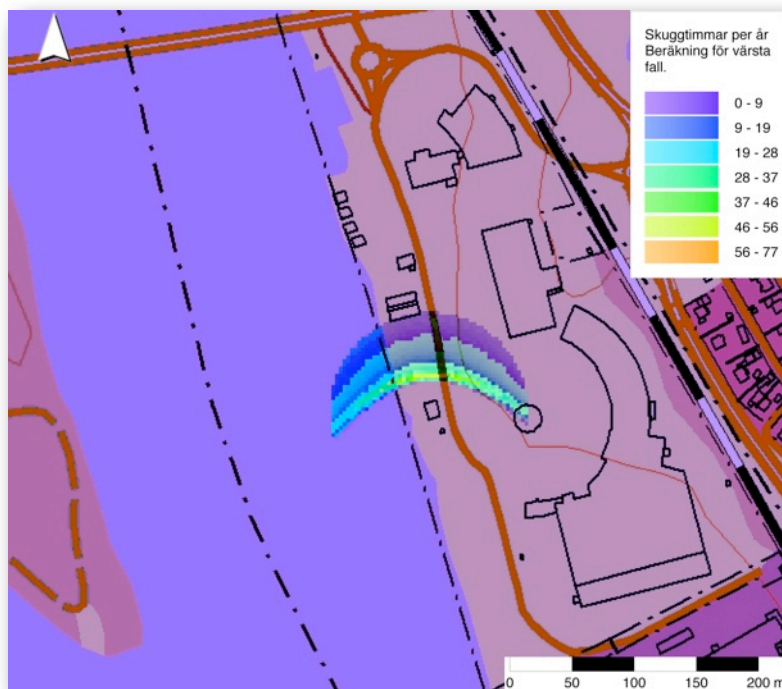


Figur 17. En 3D-stadsmodell i en CFD beräkning med vindlinjer på en specifik höjd. [23]

### 4.3 Skuggor och reflexer

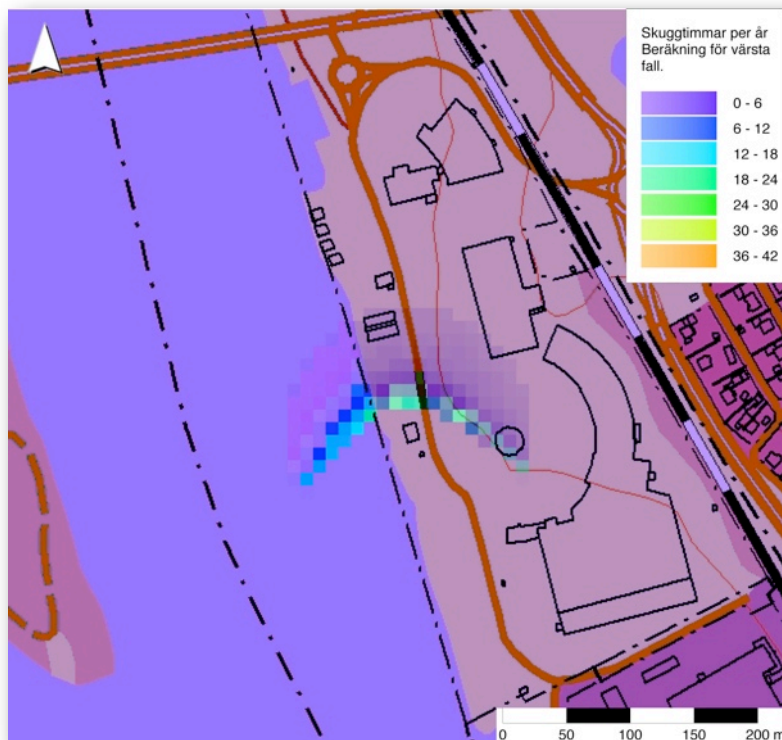
Vindkraftverk skapar roterande skuggor och reflexer när solen träffar verket. Reflexer kan lätt åtgärdas med speciell färg, däremot kan stora störningar skapas av skuggor. Det är roterande skuggor inomhus som skapar störst problem. Även då inga regler finns i Sverige, bör skuggtid över bebyggelse inte överstiga 8 timmar per år eller en halv timme om dagen. Antalet skuggtimmar beräknas i WindPRO. Programmet använder vindkraftverkets position och storlek, tillsammans med den geografiska positionens antal soltimmar och en simuleringsmodell med information om jordens bana och rotation relativt solen. Resultatet blir antal skuggtimmar samt vart dessa hamnar i närområdet, se figur 18 och 19. [13][15]

Hur störande skuggor från vindkraftverk anses vara bygger på verkets navhöjd, verkets rotordiameter, siktförhållanden, vindriktning, topografi, väder samt avstånd. Eftersom ett urbant vindkraftverk placeras lägre, och har mindre rotordiameter, stör dessa mindre än storskaliga. Men då de ofta placeras i områden där folk bor eller jobbar är skuggberäkningar fortfarande viktigt. Skulle skuggbildningar bli ett allvarligt problem för vindkraftverket, kan en ljussensor installeras som stannar verket då solen skiner. [15]



Figur 18. Skuggberäkning genomförd på Aeolos 10 kW och UGE-4K på navhöjd 23 meter, beräkningarna genomförda i WindPRO. © Lantmäteriet Gävle 2010. Medgivande I 2010/0057





Figur 19. Skuggberäkning genomförd på UGE-4K på navhöjd 16 meter (utan torn), beräkningarna genomförda i WindPRO. © Lantmäteriet Gävle 2010. Medgivande I 2010/0057

#### 4.4 Ljudberäkningar

Reglerna vad gäller ljud från vindkraft varierar i olika länder. I Storbritannien och Frankrike är gränserna beroende av bakgrundsljudet för det aktuella området. De svenska reglerna, från naturvårdsverket, säger att ljudnivån inte bör överstiga 40 dBA vid bebyggelse. I friluftsområden och områden med lågt bakgrundsljud är gränsen 35 dBA och vid arbetslokaler är gränsen 50 dBA.

Ljud från vindkraftverk brukar delas upp i två typer; mekaniskt ljud och aerodynamiskt ljud. Mekaniskt ljud har sitt ursprung i växellåda eller generator, dessa kan idag undvikas genom tekniska lösningar och god service. Aerodynamiska ljud uppkommer när bladen rör sig i vinden, ett svischande ljud som påminner om övriga ljud som skapas av vinden, så kallade bakgrundsljud. Ljudnivån avtar när avståndet till vindkraftverket ökar på grund av utbredningsdämpning. Utöver detta påverkas även ljudutbredningen av meteorologiska förhållanden samt av markens egenskaper. [7][15][18]

Det är endast under vissa förutsättningar som vindkraftverk skapar ljud som överröstar bakgrundsljudet; vindbrus, lövprassel och annat. När verket inte snurrar är det tyst och om det blåser över 8 m/s överröstar bakgrundsljudet ljudet från verket. Alltså är det endast under vindhastigheter från verkets startvind (normalt 3-4 m/s) och upp till 8 m/s som vindkraftverket orsakar buller. Det har dock visat sig att det finns tillfällen då all maskering från bakgrunden försvinner, medan vindkraftverket ger ifrån sig ljud som vanligt. Detta inträffar när områden på marknivå hamnar i lä medan det på navhöjd blåser normalt, en företeelse som blir mindre sannolik ju lägre navhöjden är. [7][15][18]

Bladets utformning har ändrats de senaste åren för att minska ljudemissionen, målet är att bakgrundsljudet ska överrösta vindkraftverkets ljud vid alla vindhastigheter. Moderna vindkraftverk klarar av att via inställningar under driften minska sina ljudemissioner, med bekostnad på produktionen. [7][15]

Urbana vindkraftverk placeras på en lägre höjdnivå än storskaliga verk, dessutom finns det fler hinder som gör att ljudutbredningen blir betydligt mindre. Beräkningar av ljudutbredningen blir mer komplex, meteorologiska förhållanden har mindre inverkan. Urbana förhållanden gör även att det finns fler bullerkällor som maskerar vindkraftverkets ljud. I vissa fall kan närliggande buller, t.ex. en väg, göra att vindkraftverkets placering godkänns trots att ljudkraven inte uppfylls. För ett urbant verk är även monteringen på en byggnad viktig för att inte vibrationer eller buller ska uppstå. [18]

Många tillverkare ger ut ljuddata i form av en a-vägd ljudtrycksnivå på ett visst avstånd från vindkraftsverket, för olika vindhastigheter. Med a-vägd innebär att man väger ihop flera olika frekvenser hos ljudet, vilket gör det enklare att beskriva en bullersituation. A-vägningen gör att ljudet kan presenteras med ett enda värde i dB, nackdelen är att man tappar informationen om ljudets karaktär när en a-vägning genomförs.

Det är skillnad på ljudeffektnivå och ljudtrycksnivå. Ljudeffekt mäter förmågan för verket att alstra ljud medan ljudtrycket ger ett värde på det upplevda ljudet. När ljuddata presenteras i vindkraft sammanhang utgår man från ljudeffektnivån. För att räkna om från ljudtrycksnivå till ljudeffektnivå används följande ekvation [24]

$$L_{wA} = L_{Aeq} + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot R^2}{S_0} \right) \quad [dB(A)] \quad (4)$$

- $L_{wA}$  = A-vägd ljudeffektnivå [dB(A)]
- $L_{Aeq}$  = A-vägd ljudtrycksnivå [dB(A)]
- $R$  = Avståndet mellan rotorcentrum och mätpunkten [m]
- $S_0$  = Referens area [m<sup>2</sup>] = 1 m<sup>2</sup>

Ljudutbredningen beräknas i WindPRO. Vindkraftverkets uppmätta ljudeffektnivå används tillsammans med dess navhöjd för att beräkna ljudutbredningen, se figur 20. Beräkningen tar inte hänsyn till närliggande hinder eftersom beräkningsmodellen är anpassad efter storskalig vindkraft. [13]



Figur 20. Ljudberäkning genomförd på Aeolos 10 kW på navhöjd 23 meter, beräkningarna genomförda i WindPRO. © Lantmäteriet Gävle 2010. Medgivande I 2010/0057.

## 5. Tillståndsprövning

För att placera ut ett vindkraftverk krävs tillstånd, placeringen och storleken definierar vilka olika tillstånd som krävs. Antingen behövs tillstånd enligt plan- och bygglagen, miljöbalken eller enligt båda lagarna. För att förenkla utbyggnaden av vindkraft ändras reglerna om vilka tillstånd som krävs frekvent. Detta arbete bygger på regler som fastställdes 1 augusti 2009. [1]

### 5.1 Miljöbalken

Miljöbalken är en övergripande lag som bland annat behandlar miljöfarlig verksamhet, dit vindkraft räknas. Enligt rättspraxis ska hänsyn till estetik, kulturmiljö och landskapsbild tas med i en prövning mot miljöbalken. Det som i regel används som underlag vid en prövning av miljöbalken är kommunens detaljplan över området, eventuellt även kommunens översiktsplan.

Anmälan och tillstånd enligt miljöbalken hanteras av länsstyrelsen eller miljödomstolen och kommunens miljö- och hälsoskyddsnämnd. En miljöanmälan krävs om vindkraftverkets effekt överstiger 125 kW. En utförlig prövning enligt miljöbalken innebär en miljökonsekvensbeskrivning (MKB), som är en mer detaljerad utredning av vilka konsekvenser vindkraftverken skulle innebära för t.ex. växt- och djurliv, även skyddsområden hanteras här. Om någon av följande uppfylls krävs en MKB

- ett vindkraftverk med totalhöjd som överstiger 50 meter,
- två eller flera verk som står tillsammans (gruppstation), eller
- ett vindkraftverk som står tillsammans med ett annat vindkraftverk, om verksamheten påbörjas efter att verksamheten med det andra vindkraftverket påbörjades.

Myndigheterna har dock möjligheten att kräva en MKB, trots att ingen av ovanstående punkter är uppfyllda. [1][16]

### 5.2 Plan- och bygglagen

Plan- och bygglagen omfattar planering av mark- och vattenområden samt bygglovsprövning. Den behandlas av kommunerna och innefattar bygglov, bygganmälan och byggtillsyn.

Bygglov krävs för att uppföra ett vindkraftverk som

- är högre än 20 meter över markytan
- placeras på ett avstånd från tomtgränsen som är mindre än kraftverkets höjd över marken
- monteras fast på en byggnad
- har en vindturbin med en diameter som är större än tre meter.

Det räcker att vindkraftverket uppfyller en av ovanstående förutsättningar för att krav på bygglov ska gälla. De flesta urbana vindkraftverk behöver bygglov eftersom de monteras på byggnader. [1]

Vad som ska ingå i en bygglovsansökan kan variera mellan olika kommuner, följande punkter anses som standard.

- Kommunens anmälningsblankett
- Situationsplan i skala 1:1000 (aktuell och närliggande fastigheter, vägar och planerad elanslutning)
- Ritning vindkraftverket i skala 1:100
- Ljudberäkning

- Skuggberäkning
- Fotomontage
- Uppgifter av grannar (tillstånd från markägaren)
- Viktiga uppgifter om verket

Byggnämnden ska göras för vindkraftverk som är bygglovspliktiga.

För områden där det råder stor efterfrågan på mark för byggnader eller andra anläggningar kan en detaljplan krävas. Detta gäller dels för konkurrens med andra typer av byggnader, samt för konkurrens om vinden med andra vindkraftverk. I urban miljö omfattas de flesta områden av en detaljplan eller av områdesbestämmelser, om stöd för vindkraft inte finns med i planen kan inte bygglov ges. Många detaljplaner idag är föråldrade och kan därför behöva göras om med hänsyn till förnyelsebara energikällor. [16]

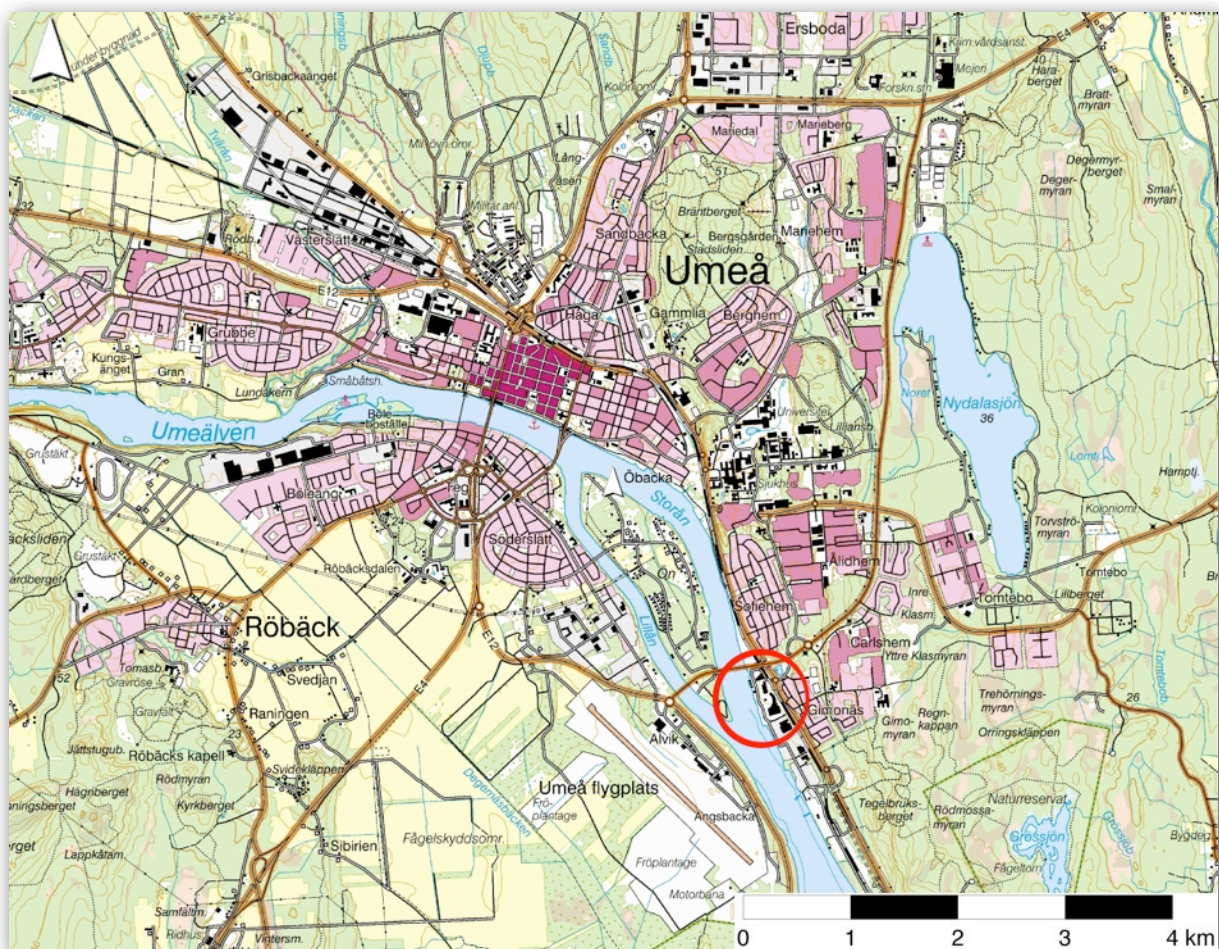
För att boende i närområdet ska få inflytande i beslutsprocessen ordnas samrådsmöten. Samråd höjer kunskapsnivån samtidigt som synpunkter från myndigheter och allmänheten kan föras fram. Informationsspridningen är viktig för att sprida kunskap om vindkraft och dra ett streck över myter inom området. Samrådsmöten bidrar dock till en långsamare beslutsprocess, vilket ger sämre ekonomiska förutsättningar för etablering av vindkraft. [16]



## 6. Positionen för verket

Positionen för verket var bestämd till Strömpilenområdet av följande anledningar:

- Strömpilenområdet (se figur 21), som ligger nära Ålidhem, har betydligt bättre vindförhållanden för vindkraft än Ålidhem området.
- Strömpilen är ett företagsområde, inte ett bostadsområde, vilket innebär lägre krav vad gäller ljud och skuggor från vindkraftverket.
- Umeå Energi äger en pumpstation på strömpilenområdet, där vindkraftverket kan kopplas in på elnätet.
- Ytterligare ett vindkraftverk är planerat att placeras ovanpå ett hustak på Ålidhemsområdet, detta verk kommer lättare förknippas med projektet *Hållbara Ålidhem*. Däremot kommer det troligtvis producera mindre el och synas dagligen av färre människor. Vilket gör att de två verken kompletterar varandra bra.



Figur 21. Umeå, röd ring markerar Strömpilenområdet. © Lantmäteriet Gävle 2010. Medgivande I 2010/0057.

Eftersom projektet inte har fått klartecken från markägaren har ingen bygglovsansökan lämnats in till kommunen. Istället innehåller bilagorna informationen som behövs för en bygglovsansökan.

## 6.1 Vindförhållanden

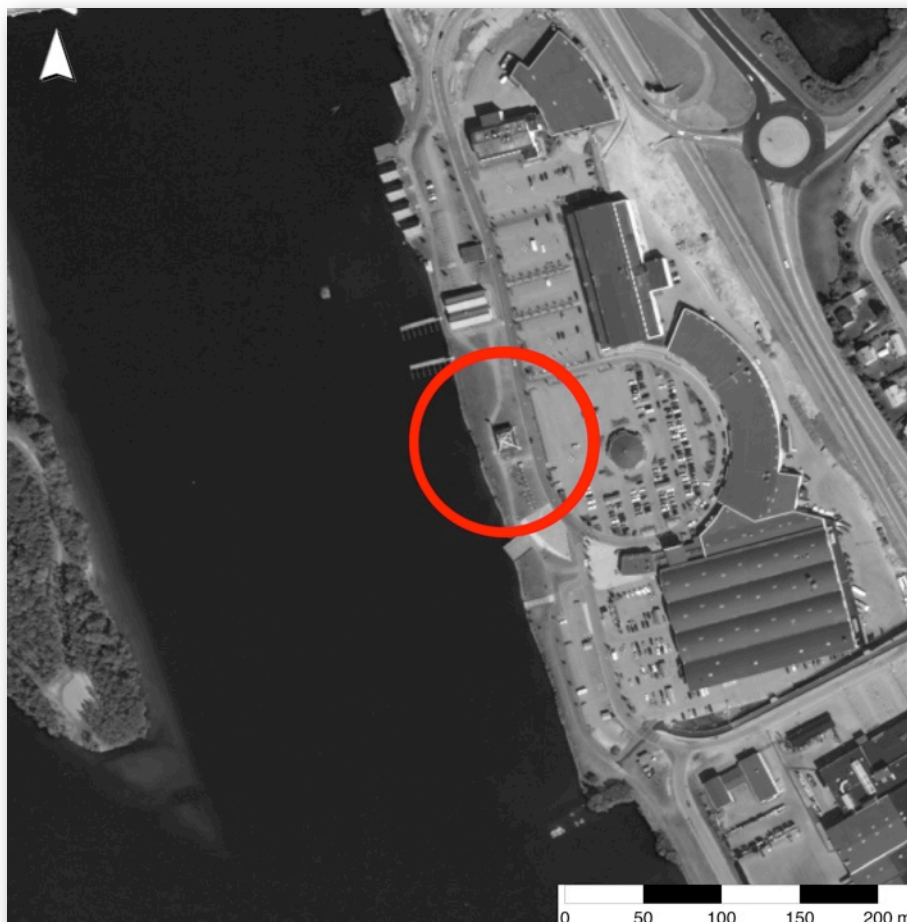
Vindberäkningar genomfördes i WindPRO med data från vindmasten vid Umeå flygplats, som ligger cirka en kilometer ifrån vindkraftverkets planerade placering. Utifrån markens råhet, lutning och närliggande hinder beräknar sedan WindPRO weibullfördelade vindfördelningar för tolv olika vindriktningar. Värdena är normalårs-korrigerade och beräknade för 23 meters höjd.

Pumpstationen har Umeälven på ena sidan och Strömpilens shoppingområde på andra sidan. Placeringen gör att den utvunna energin huvudsakligen kommer via ostörda vindar från älven. Detta gör att fördelarna med vertikalaxlade vindkraftverk inte kommer att gälla för denna placering.

Resultatet av vindberäkningarna presenteras i *bilaga 3*.

## 6.2 Byggnaden

På strömpilen äger Umeå Energi en pumpstation som förser Dåva värmeverken med vatten från Umeälven. Denna byggnad omges av en stålkonstruktion, se *bilaga 3 och 4*. Att placera ett vindkraftverk på toppen skulle innebära att vindkraftverket kommer upp 14 meter från marken och därmed får bättre vindförhållanden. Verkets elproduktion kan kopplas in på elnätet direkt i pumphuset. Dessutom får verket tillsammans med stålkonstruktionen ett unikt utseende som drar till sig uppmärksamhet. Pumphusets position visas i *figur 22*.



Figur 22. Strömpilenområdet, röd ring markerar Umeå Energi's pumpstation, den tänkta platsen för vindkraftverket.  
© Lantmäteriet Gävle 2010. Medgivande I 2010/0057

Stålkonstruktionens fyra ben anses ge tillräckligt stabilitet för att klara av tyngden av de vindkraftverk som undersökts. Det innebär att det är själva fästpunkten som blir den kritiska punkten. I *bilaga 4* presenteras konstruktionsritningar och fotomontage på byggnaden. Själva monteringen av vindkraftverket i toppen av stålkonstruktionen har inte ansetts som något problem, de tänkta montörerna bör ändå konsulteras när torn väljs ut.

På pumpstationen planeras även att placera en display som visar aktuell produktion från vindkraftverket. Sådan display har Umeå Energi redan använt sig av, det ses därför inte som något problem.

## 7. Val av vindkraftverk

Projektets mål har varit att kunna presentera två verk som sedan beslutsfattande personer kan välja mellan. Valet av vindkraftverk har påverkats av följande punkter:

- **Verkets storlek**

Storleken på verket påverkar samtliga övriga punkter, framför allt är storleken viktig för hållfasthetsberäkningar. Stålkonstruktionen klarar inte av att bära upp hur stort verk som helst, men den svaga punkten anses dock vara fästpunkten på toppen av befintlig stålkonstruktion. Den totala vinsten över verkets livstid antas öka med verkets storlek.

- **Verkets utseende**

Eftersom verkets huvudsakliga uppgift är att vara en reklampelare är utseendet viktigt. Om verket inte passar ihop med omgivningen eller stålkonstruktionen är det inget bra alternativ. Verket bör även ha en låg startvind så att det snurrar så mycket som möjligt.

- **Verkets ekonomi**

Verket har en investeringsbudget som ej bör överskridas. Däremot är produktionen av sekundär betydelse. För att bedöma vilket verk som har bäst ekonomiska förutsättningar har pay-off tiden beräknats. En inkomstsammanfattning presenteras i tabell 3 kapitel 7.2.

- **Verkets ljudalstring, skuggbildning och reflektering av ljus**

Verket får inte överstiga gränserna vad gäller ljud, skugga och reflexer. Eftersom det inte finns några bostäder i området ligger gränsen för buller på 50 dBA. Gränsen för skuggor är att roterande skuggor får inte träffa ett fönster mer än 10 timmar om året. Det är väldigt viktigt att allmänheten inte uppfattar vindkraftverket negativt, det ska främst vara en reklampelare för Umeå Energi. Det kan därför bli aktuellt med en väldigt låg torn höjd

- **Certifiering och garanti**

Tredjepartskontroll av småskaliga vindkraftverk är i dag bristfällig. Kravet är att verket är certifierat enligt 61400-2, det är en IEC standard för småskaliga verks säkerhet. Även garanti från tillverkaren är viktigt för att inte verket ska gå sönder på grund av konstruktionsfel.



## 7.1 Möjliga investeringar

Nedan presenteras en sammanfattning av de två vindkraftverk som valts ut som möjliga investeringar. Information om produktion och investeringskostnader för verken visas i tabell 1 och 2. Hållfasthetsberäkningar för verken finns i *bilaga 5*, effektkurvorna redovisas i *bilaga 6*.

Ljudberäkningar presenteras i *kapitel 4.4*, beräkningar genomfördes endast på Aeolos 10 kW. Detta eftersom ljudemissionen från UGE-4K var så pass låg att det inte var intressant. Skuggberäkningar redovisas i *kapitel 4.3*. Antalet skuggtimmar är identisk för de två utvalda verken, detta stämmer inte riktigt men eftersom WindPRO inte tar hänsyn till vertikalexlade vindkraftverk är det endast tornhöjden som skiljer resultaten åt.

### Urban Green Energy - UGE-4K

Urban Green Energy är ett vindkraftföretag som specialiserat sig på vertikala vindkraftverk av typen *Turby*. Företaget har huvudkontor i New York och Peking, och har runt 100 återförsäljare över hela världen varav två i Sverige. Företaget tillverkar helixformade vertikala verk av hög kvalité, vilket innebär en dyr investeringskostnad. En oberoende tredje part certifierar och testar fram effektkurva, ljud- och vibrationsemissioner samt säkerheten. Vingarna är tillverkade i kolfibrer och fiberglas och mäter en höjd av 4,4 meter som skapar en svepyta på 8,8 meter.



Figur 23. UGE-4

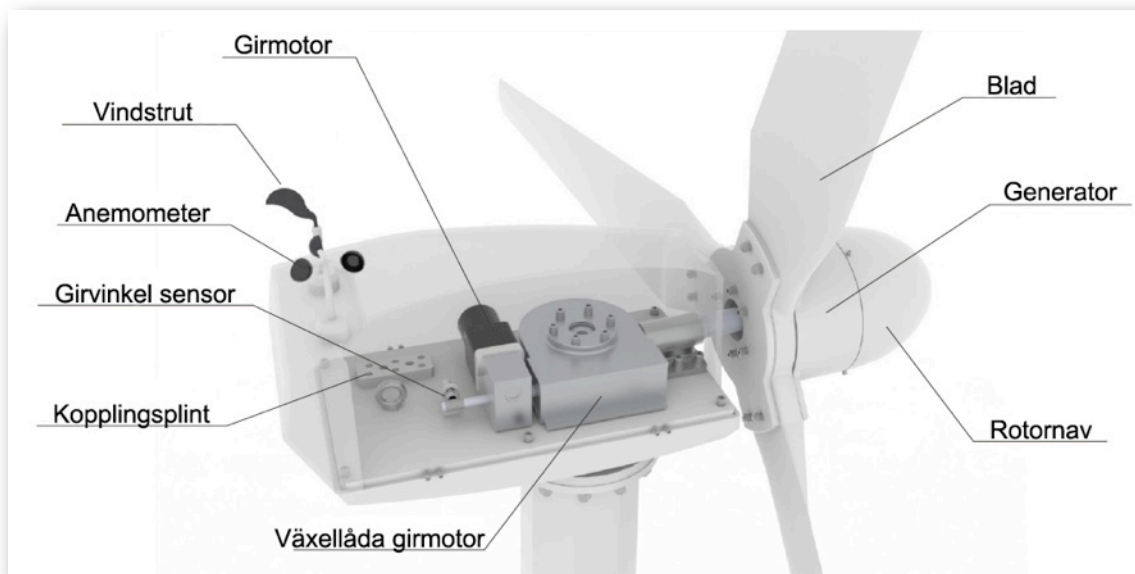
UGE-4K (se figur 23) börjar generera elektricitet vid en vindhastighet på 3,5 m/s och slutar generera när vindhastigheten går över 30 m/s. Verket klarar av kraftiga orkanvindar med hastighet upp till 55

m/s. Generatoren är av synkron modell vilket betyder att strömmarna först måste likriktas och sedan omriktas tillbaka till trefas växelström för att kunna matas ut på nätet, *se figur 13*. Likriktaren och omriktare hjälper till att höja investeringskostnaden ytterligare. Rotationshastigheten på rotorn ligger på 125 varv per minut, vilket är betydligt långsammare än för en horisontalaxlat verk. Den långsammare rotationshastigheten hjälper till att skapa en behagligare föreställning av verket i rörelse. Det gör även verket väldigt tystgående, enligt ljudberäkningar ligger ljudeffektnivån på 38 dBA vid vindhastigheten 12 m/s.

#### Aeolos - 10 kW

Aeolos Wind Turbine är ett företag som startades 1986 i Danmark, de fokuserar på småskaliga vindkraftverk mellan 0,5 och 50 kW. Aeolos tillverkar både vanliga horisontalaxlade vindkraftverk och vertikalaxlade *Darrieus* verk (*se figur 8*). I dag har företaget 480 återförsäljare och sju fabriker över hela världen, huvudkontoret är placerat i London.

Aeolos 10 kW börjar generera elektricitet vid vindhastigheten 3 m/s och slutar generera när vindhastigheten går över 25 m/s. Verket klarar av orkanvindar med hastighet upp till 45 m/s. Vingarna är tillverkade i glasfiber och varje vinge mäter 4 meter. Rotationshastigheten på rotorn ligger på 200 varv per minut. Synkrogeneratoren är placerad i rotornavet (*se figur 24*), alla girkomponenter som sköter verkets vridning är placerade i maskinhuset. Att det horisontalaxlade verket vrids in vinkelrätt mot vindriktningen är viktigt för att produktionen ska vara optimal. Vindstruten kommunicerar med girkomponenterna om aktuell vindriktning.



Figur 24. En genomskärning av Aeolos 10 kW.

Även Aeolos använder en synkrogenerator där strömmarna måste gå genom en likriktare och omriktare för att kunna levereras ut på nätet. Detta är dyra komponenter, 60 000 kronor kostar en likriktare och omriktare hos Aeolos.

Tabell 1 visar basfakta samt beräknad produktion för de två utvalda vindkraftverken. Tornets vikt är inte medtagen i tabellen. Produktionsberäkningarna är genomförda i WindPRO och bygger på vinddata från Umeå flygplats. Båda vindkraftverken har haft 23 meters navhöjd vid beräkningarna, dvs. 9 meters torn placerat på toppen av pumphusets konstruktion.

Tabell 1. Beräknad produktion för de två utvalda vindkraftverken.

	Aeolos wind turbine 10 kW	Urban Green Energy 4 kW
<b>Rotor diameter</b>	7,5 m	3x4,4 m
<b>Generator</b>	Permanent-magnetiserad synkron	Permanent-magnetiserad synkron
<b>Vikt</b>	420 kg	444 kg
<b>Garantitid</b>	5 år	5 år
<b>Årsproduktion<sup>2</sup></b>	22,7 MWh	4,9 MWh

## 7.2 Budget

Inkomsterna för urban vindkraft är betydligt lägre än för storskalig, men andra fördelar som får räknas som en inkomst bör tas med i beräkningarna. Vindkraftverket är tänkt att fungera som en reklampelare för Umeå Energi och *Hållbara Ålidhem* projektet. Det innebär att all form av mediarapportering får ses som uppmärksamhet som annars är svår att uppnå. Dessutom anses vindkraft som man ser dagligen öka folks acceptens till vindkraft överlag, samt öka intresset för förnyelsebar energi. Dessa saker är svåra att räkna om till pengar och hamnar utanför de ekonomiska kalkylerna.

Tabell 2 visar investeringskostnader för de två utvalda vindkraftverken. Priserna är ursprungligen i dollar, de har räknas om via ett dollarpris på 6,85 SEK.

Tabell 2. Investeringskostnader för de två utvalda vindkraftverken.

	Aeolos wind turbine 10 kW	Urban Green Energy 4 kW
<b>Turbin &amp; styrskåp</b>	139 500 kr	161 500 kr
<b>Torn</b>	16 100 kr (9m)	9 400 kr (7m)
<b>Frakt</b>	4 800 kr (Sthlm)	6 800 kr
<b>Total kostnad</b>	160 400 kr	177 700 kr

Utifrån den beräknade produktionen kan en årlig inkomst räknas fram. Inkomsten sattes till 70 öre per kWh. Båda verks livstid är 30 år, enligt tillverkarens uppgifter.

Tabell 3. Inkomstsammanfattning för de två utvalda vindkraftverken.

	Aeolos wind turbine 10 kW	Urban Green Energy 4 kW
<b>Årlig inkomst</b>	15 890 kr	3 430 kr
<b>Livstids inkomst</b>	476 700 kr	102 900 kr
<b>Pay-off tid</b>	10,1 år	52 år
<b>Livstids netto</b>	316 300 kr	-74 800 kr

## 8. Diskussion

Problemet med urban vindkraft är att kunna hitta eller skapa platser med bra vindförhållanden. På grund av hinder blir vindarna oberäknliga och svåra att förutse. En vindmätning som för storskalig vindkraft är oerhört viktig, är för de flesta urbana vindkraftprojekt för dyrt att genomföra. Det finns företag som erbjuder billigare vindmätningar, men dessa blir även mindre tillförlitliga. Ett alternativ kan vara att placera ut ett verk, sedan efter ett års drift göra en utredning huruvida placeringen var lyckad. Var platsen bra kan fler verk placeras ut, var platsen mindre bra kan verket flyttas.

Även valet av vindkraftverk är viktigt i urbana miljöer. Horisontalaxlade vindkraftverk är troligtvis att föredra om ett torn som fästs i marken används samt om vindenergin erhålls från få sektorer. Är dessutom vinden till största delen ostörd kommer ett horisontellt verk producera mer elektricitet. Vertikalaxlade vindkraftverk är att föredra då verket placeras på en byggnad eller på en plats där vindarna är delvis turbulenta och frekvent ändrar riktning. Den modell av vertikalaxlade verk som anses vara bäst, den helixformade *Turby*, är ovanlig och dyr. Dock förväntas priserna sjunka när småskalig vindkraft växer sig större.

Idag är urban vindkraft ett oekonomiskt sätt för företag att visa upp sitt stöd för en så kallad grön energiproduktion. I en stadsmiljö sticker ett vindkraftverk ut ur mängden och syns dagligen av väldigt många, vilket ger bra reklam. Produktionen är emellertid låg, ett 10 kW verk i urban miljö producerar el som räcker till ungefär två normalstora villor.

Ett högre elpris samt ett lägre pris på småskaliga vindkraftverk leder till att urban vindkraft får ökad lönsamhet, vilket kan göra det attraktivt även för privatpersoner. Småskalig vindkraft är fortfarande en växande marknad som kommer att växa i framtiden. 2009 ökade försäljningen av småskaliga vindkraftverk i USA med 15% och globalt med 10%. [25]

Valet av vindkraftverk handlar om prioriteringar. Målsättningen med detta projekt var att placera ut ett verk som ger god reklam för *Hållbara Ålidhem* samt för Umeå Energi. För att uppnå detta ska verket passa in i miljön utseendemässigt samt minimera eventuella störande faktorer. Att vindkraftverket ska passa in i miljön är en smaksak, därför bifogas flera fotomontage för att beslutsfattande personer lätt ska kunna välja verk. Till störande faktorer hör ljud och skuggor, även bladens rotationshastighet kan påverka vissa personers uppfattning av verket. Eftersom tornhöjden påverkar utseendet, ljudspridningen samt skuggornas utbredning är detta en viktig faktor. Högre torn betyder bättre vindförhållanden, men även mer störningar. Prioriteringen bör läggas på alternativet som ger bäst visuellt resultat.

Detta projekt fick problem med att få klartecken från markägaren, vilket hindrade projektet att gå vidare. Istället inriktades arbetet att fungera som ett underlag för en framtida bygglovsansökan. Med målet att det ska vara en så enkel och kort process som möjligt sedan när väl klartecken ges. Vad som ska ingå i denna bygglovsansökan beskrivs i 5.2, men eftersom kraven varierar mellan olika kommuner bör en kontakt med Umeå kommun göras för att veta exakt. Eftersom vindkraftverket inte kommer vara i närheten av några bostäder, sker samråd med markägaren Citycon, Umeå kommun och eventuellt något av företagen placerade närmast pumpstationen.

Valet blev att gå vidare med två vindkraftverk, ett vertikalaxlat och ett horisontalaxlat verk. Båda verken levereras med 5 års garantitid med tillval att förlängas till 10 år. Båda har dessutom en livstid på 30 år, vilket är 10 år längre än de flesta storskaliga verk.

Det vertikallaxlade vindkraftverket, UEG-4K, levereras av Urban Green Energy. Verket är av Turby modell som enligt S. Mertens [12] är det verk som är optimalt för urban miljö. Den urbana miljö som S. Mertens beskriver stämmer dock endast delvis in på vår aktuella placering på Strömpilen, där den största produktionsdelen har sitt ursprung i tämligen ostörda vindar från älven. Resultatet blir att både UEG-4K endast förväntas producera en fjärdedel jämfört med det horisontallaxlade verket (vid samma navhöjd), trots samma investeringskostnad. Det råder även ett litet frågetecken huruvida allmänheten kommer identifiera UEG-4K som ett vindkraftverk, eftersom den inte ser ut som vindkraftverken som folk är van vid. Det horisontallaxlade vindkraftverket, Aeolos 10 kW, är till utseende en nedskalning av ett vanligt storskalig verk.

## 9. Slutsatser

Urban vindkraft är en växande marknad, 2009 växte den globala försäljningen 10%. Ekonomiskt sett är urban vindkraft dock fortfarande väldigt dyr. Investeringskostnaden, i pris per installerad watt, är nästan halverad för ett storskaligt vindkraftverk jämfört med ett småskaligt. Dessutom får vindkraftverk som placeras i urban miljö betydligt sämre vindförhållanden, då dessa har lägre navhöjd och sämre vindar på grund av olika hinder. [25]

Urban vindkraft installeras inte idag först och främst för att producera maximalt med elektricitet. De används istället som reklampelare för företag som vill profilera sig som grön elproducent. Alternativt placeras småskaliga vindkraftverk på platser där inget fungerande elnät existerar, då oftast tillsammans med någon form av energilagringssystem för att göra åtkomsten till el säkrare. I Sverige handlar det mest om sommarstugor, men i utvecklingsländer saknas ofta ett fungerande elnät.

Pumpstationen som Umeå Energi har på Strömpilenområdet anses vara en bra plats att integrera med ett vindkraftverk. På platsen rör sig mycket folk, något som är viktigt då verkets huvudsyfte är att agera skyltfönster åt projektet *Hållbara Ålidhem* och Umeå Energi. Dessutom får platsen bra urbana vindförhållanden eftersom Umeälven ligger endast några få meter från pumphuset. Medelvindhastigheten beräknas till 4,6 m/s på 23 meters höjd. En vind som innebär att ett 10 kW verk producerar elektricitet till ungefär två normalstora villor.

Projektet försenades då det uppstod problem att få klartecken från markägaren *Citycon*. Rapporten fungerar nu som ett underlag för en framtida bygglovsansökan. Två vindkraftverk presenteras i rapporten som möjliga investeringar, dessa har valts ut för att passa den tänkta platsen samt komplettera varandras starka och svaga sidor. Beräkningsprogrammet WindPRO användes för att beräkna verkens årsproduktion, som blev 4,9 respektive 22,7 MWh. En enkel ekonomisk beräkning gav då en pay-off tid på 10 respektive 52 år.

## 10. Referenser

1. Energimyndigheten, "Vindkraft - Bygga och ansluta mindre vindkraftverk för eget bruk", Energimyndigheten, 2008.
2. Energimyndigheten, "Driftuppföljning av vindkraftverk", årsrapport 2009  
<<http://www.vindstat.nu/>>
3. Regeringens proposition [2001/02:143]  
"Samverkan för en trygg, effektiv och miljövänlig energiförsörjning"
4. WSP Sverige, "Småskalig och urban vindkraft" (hämtad 11/9 2010)  
<<http://www.wspgroup.se/sv/Sektorer/Alla/Energi/Smaskalig-och-urban-vindkraft/>>
5. Manwell J.F, MCGowan J.G, Rogers A.L, "Wind energy explained, 2nd ed." John Wiley & Sons Ltd, 2009.
6. Encraft, "Warwick Wind Trials - Final Report" (hämtad 8/9 2010)  
<<http://www.warwickwindtrials.org.uk/resources/Warwick+Wind+Trials+Final+Report+.pdf>>
7. Wizelius T, "Vindkraft i teori och praktik, 2:a uppl." Studentlitteratur, 2007.
8. Cape Fear Community Collage Renewable Energy Lab (hämtad 10/9 2010)  
<<http://ncfusion.com/energylab/windpower.html>>
9. Wineur, "Urban Wind Turbines - Guidelines for small wind turbines in the built environment", (hämtad 4/9 2010) <[http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL\\_WIND\\_TURBINES\\_GUIDE\\_final.pdf](http://www.urban-wind.org/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf)>
10. American Wind Energy Association, "AWEA Small Wind Turbine Global Market Study" (hämtad 21/9 2010)  
<[http://www.awea.org/smallwind/pdf/2010\\_AWEA\\_Small\\_Wind\\_Turbine\\_Global\\_Market\\_Study.pdf](http://www.awea.org/smallwind/pdf/2010_AWEA_Small_Wind_Turbine_Global_Market_Study.pdf)>
11. Vaughn N, "Wind energy : renewable energy and the environment", Taylor & Francis Group, 2009.
12. Mertens S, "Wind Energy in the Built Environment", Multi-Science, 2006.
13. Nielsen P, "WindPRO 2.5 User Guide" EMD International A/S, 2006.
14. Carbon Trust, "Small-scale Wind Energy – Technical Report", Met. Office, 2008
15. Boverket, "Vindkraftshandboken - Planering och prövning av vindkraftverk" Boverket, 2009
16. Hagberg M, "Nya regler för prövning av vindkraft från 1 aug 2009", Högskolan på Gotland, 2010
17. The University of Tokyo, "Facilities at Kato lab.and Ooka lab." (hämtad 8/10 2010)  
<<http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/english/Facilities/facilities.htm>>
18. Naturvårdsverket, "Ljud från vindkraftverk" (hämtad 11/10 2010)  
<<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-6241-7.pdf>>
19. Knowledgerush, "Darrieus wind turbine" (hämtad 12/10 2010)  
<[http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Darrieus\\_wind\\_turbine/](http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Darrieus_wind_turbine/)>
20. Bahrain World Trade Center (hämtad 13/10 2010)  
<<http://www.bahrainwtc.com/>>
21. Windpods, "Windpods Product Brochure" (hämtad 13/10 2010)  
<[http://www.windpods.com/pdf/Windpods\\_Brochure.pdf](http://www.windpods.com/pdf/Windpods_Brochure.pdf)>
22. Strata, "Strata Tower London" (hämtad 9/11 2010)  
<<http://www.stratalondon.com/>>
23. CAEbridge, "CFD for Urban Wind Analysis" (hämtad 13/10 2010)  
<<http://caebridge.com/urban-wind-and-rooftop-turbine-placement>>



24. Risberg T, "ISO 9296" (hämtad 18/10 2010)  
<<http://www.silent.se/dator/iso-9296-se.php>>
25. AWEA, "AWEA Small Wind Turbine Global Market Study" (hämtad 10/11 2010)  
<[http://e360.yale.edu/images/digest/2010\\_AWEA\\_Small\\_Wind\\_Turbine\\_Global\\_Market\\_Study-1.pdf](http://e360.yale.edu/images/digest/2010_AWEA_Small_Wind_Turbine_Global_Market_Study-1.pdf)>

# Bilagor

BILAGA 1: Investeringskalkyl

BILAGA 2: Vindförhållanden

BILAGA 3: Konstruktionsritningar

BILAGA 4: Fotomontage

BILAGA 5: Lastberäkningar

BILAGA 6: Effektkurvor

## Bilaga 1

### Investeringskalkyl



Information		
<b>Tillverkare</b>	Aeolos wind turbine	Urban Green Energy
<b>Märkeffekt</b>	10 kW	4 kW
<b>Rotor diameter</b>	7,5 m	3x4,4 m
<b>Generator</b>	Permanent-magnetiserad synkron	Permanent-magnetiserad synkron
<b>Vikt<sup>1</sup></b>	420 kg	444 kg
<b>Årsproduktion<sup>2</sup></b>	22,7 MWh	4,9 MWh
<b>Garantitid</b>	5 år	5 år
Utgifter		
<b>Turbin &amp; styrskåp</b>	139 500 kr	161 500 kr
<b>Torn</b>	16 100 kr (9m)	9 400 kr (7m)
<b>Frakt</b>	4 800 kr (Sthlm)	6 800 kr
<b>Total kostnad</b>	160 400 kr	177 700 kr
Inkomster		
<b>Årlig inkomst<sup>3</sup></b>	15 890 kr	3 430 kr
<b>Livstids inkomst<sup>4</sup></b>	476 700 kr	102 900 kr
Resultat		
<b>Pay-off tid</b>	10,1 år	52 år
<b>Livstids netto</b>	316 300 kr	-74 800 kr

<sup>1</sup> Vikt utan torn.

<sup>2</sup> Produktionen bygger på den planerade positionen, samtliga är beräknade för 23 meters navhöjd (9 m torn).

<sup>3</sup> 1 kWh beräknas ge 70 öres inkomst.

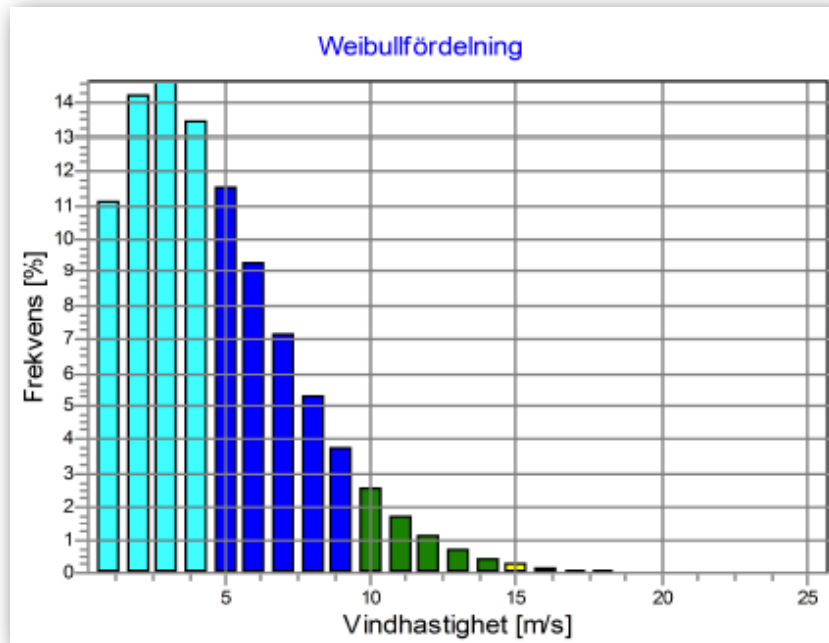
<sup>4</sup> Båda verks livstid är satta till 30 år, enligt tillverkarens uppgifter.

Dollarpriset är satt till 6,85 SEK. Extra kostnader för installation och drift är ej medtaget.

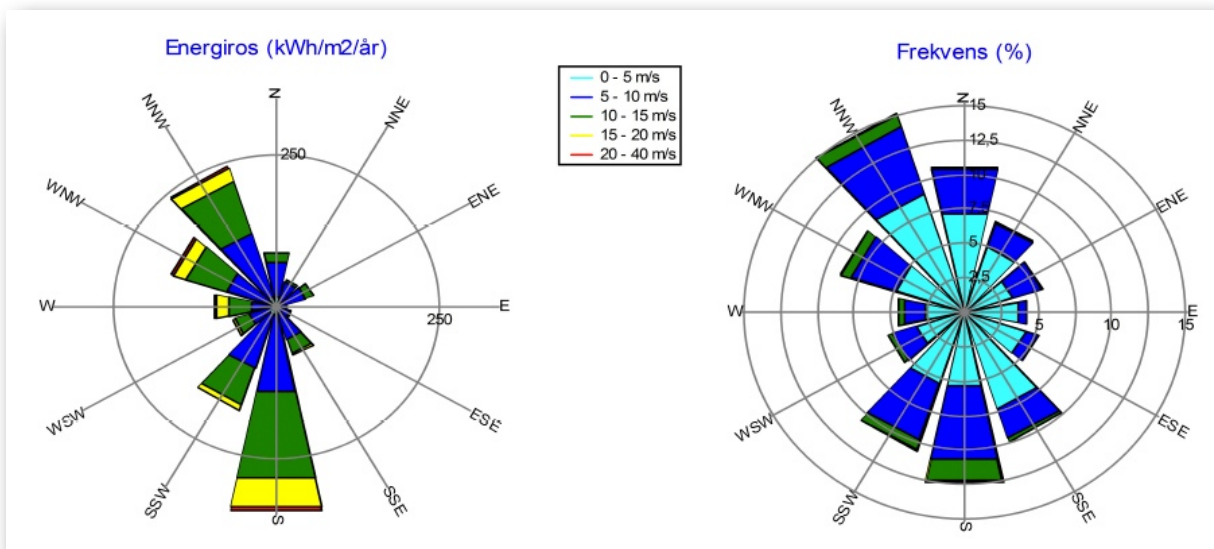
## Bilaga 2

### Vindförhållanden

ATLAS vinddata analys beräknad i WindPRO, med vindstatistik från Umeå flygplats. Beräkningar gjorda för Umeå Energi's pumpstation vid 23 meters navhöjd.



Figur B2.1. Vindens hastighetsfördelning, (weibull data  $A=5,13$ ;  $k=1,57$ ) medelhastighet 4,6 m/s.



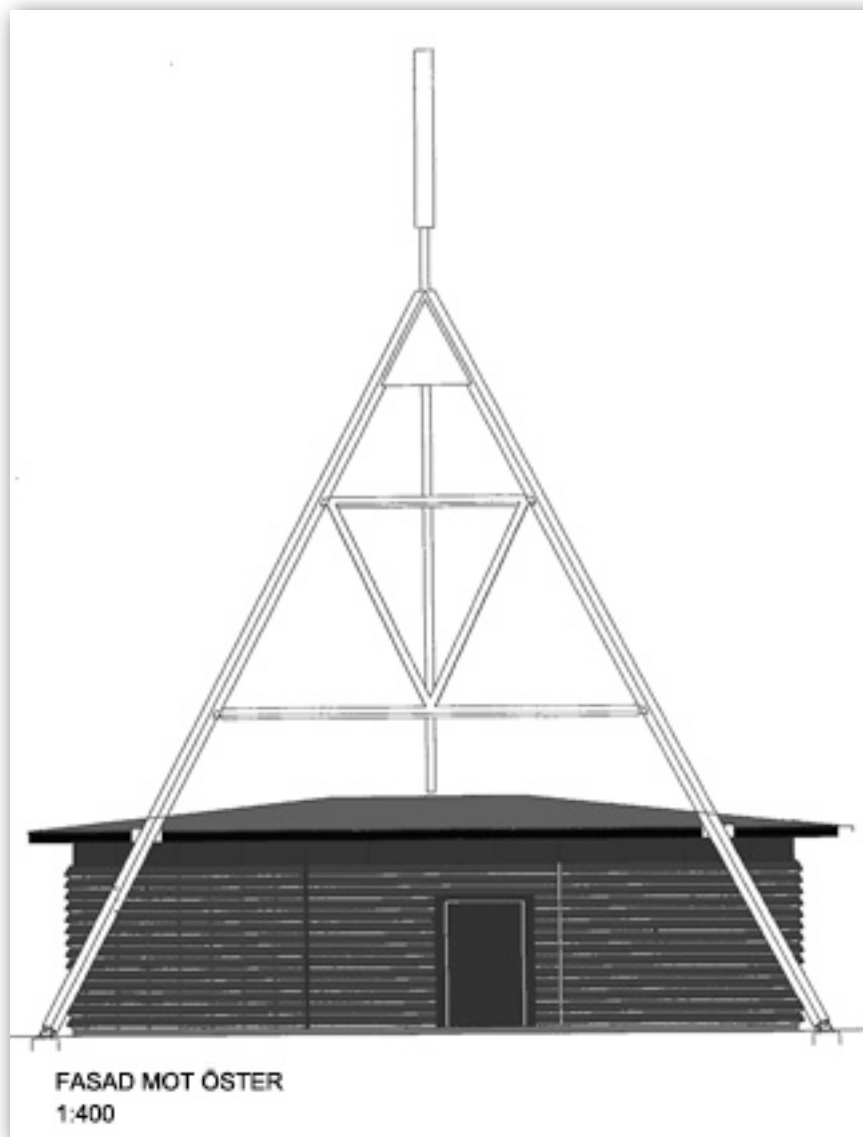
Figur B2.2. Vindros över energifördelningen från projektplaceringen på Strömpilenområdet. Energirosen till vänster talar om vilken sektor och vilken vindstyrka som ger mest energi, frekvensrosen till höger visar vilken sektor och vindhastighet som är mest förekommande © WindPRO

Tabell B2.1. Sektorvis summering av weibull data och vindfrekvensen.

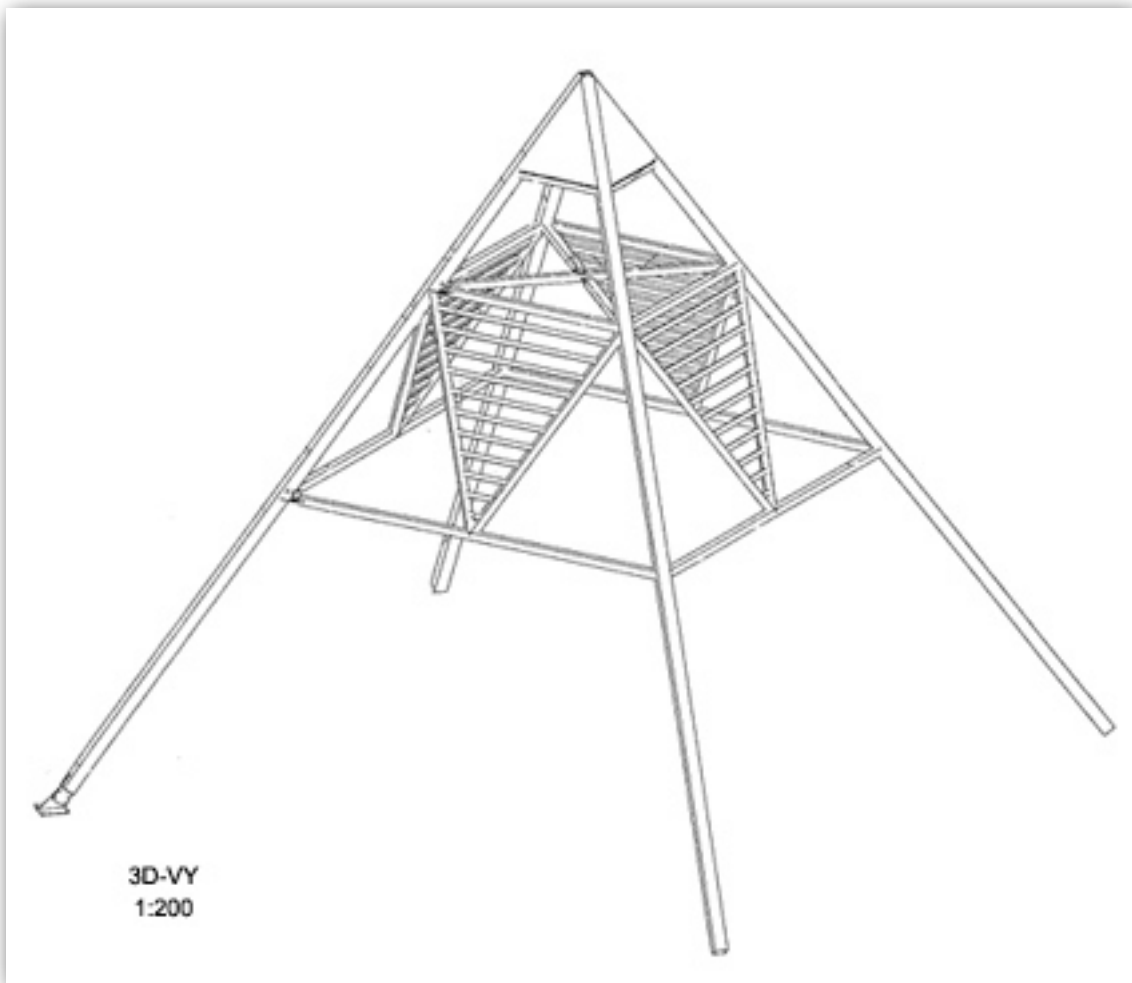
Sektor	Vindhastighet [m/s]	Frekvens [%]	k-parameter	A-parameter [m/s]
N	4,10	10,7	1,799	4,61
NNE	3,88	6,9	1,833	4,37
ENE	4,52	5,5	1,893	5,10
ESE	3,05	4,3	1,722	3,42
SSE	3,13	5,3	1,526	3,48
S	3,66	9,9	1,392	4,02
SSW	6,11	12,7	1,843	6,88
WSW	5,27	10,5	1,866	5,94
W	4,51	5,4	1,593	5,03
WNW	5,01	4,6	1,418	5,51
NNW	5,13	8,9	1,590	5,71
Alla	4,81	15,1	1,577	5,35
	4,61	100,0	1,571	5,13

## Bilaga 3

### Konstruktionsritningar



Figur B3.1. Konstruktionsritning, fasad mot öster, över Umeå Energi's pumpstation vid Strömpilen. Observera att den täckande plåten på överdelen av stålkonstruktionen inte är med i slutresultatet.



*Figur B3.2. Konstruktionsritning, 3D-vy, över Umeå Energi's pumpstation vid Strömpilen.  
Observera att den täckande plåten på överdelen och de parallellgående stängerna i mitten inte är med i slutresultatet.*

## Bilaga 4

### Fotomontage



*Figur B4.1. Fotomontage. Vertikalt vindkraftverk, UGE-4K utan torn, från Urban Green Energy.*



*Figur B4.2. Fotomontage. Vertikalt vindkraftverk, UGE-4K utan torn, från Urban Green Energy.*





*Figur B4.3. Fotomontage. Vertikalt vindkraftverk, UGE-4K med 7 meters torn, från Urban Green Energy.*



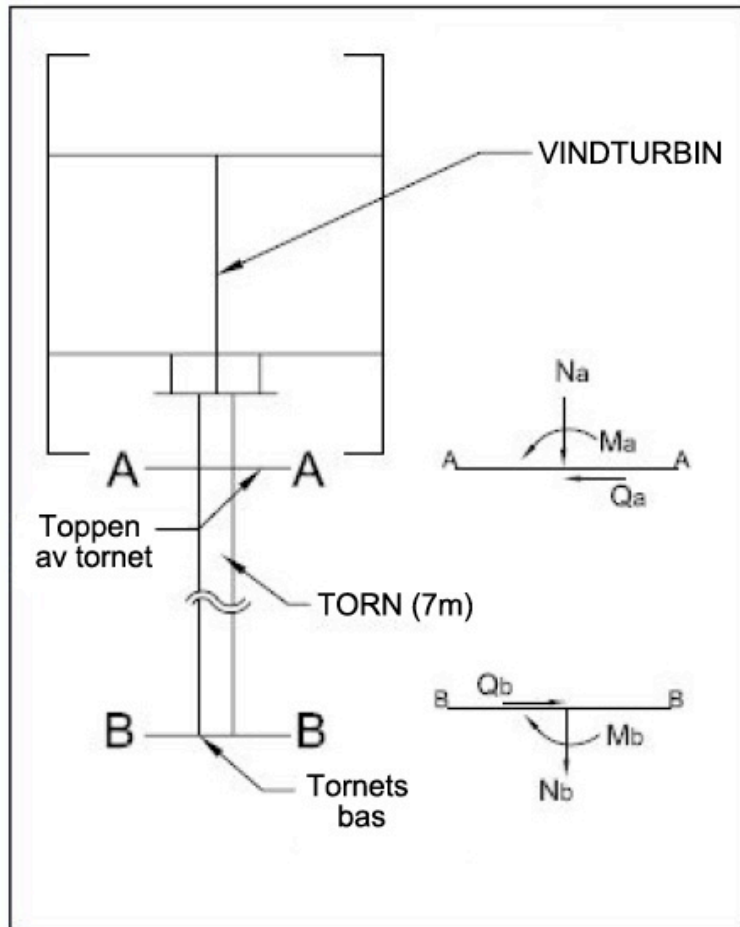
*Figur B4.4. Fotomontage. Horisontellt vindkraftverk, Aeolos 10 kW med 10 meters torn, från Aeolos wind turbine.*



*Figur B4.5. Fotomontage. Horisontellt vindkraftverk, Aeolos 10 kW med 18 meters torn, från Aeolos wind turbine.*

## Bilaga 5

### Lastberäkningar



Figur B5.1. Krafterna som verkar på ett UEG-4K verk med 7 meters torn, på toppen av tornet samt vid tornets bas.

Tabell B5.1. redovisar verkets maximala belastningar.

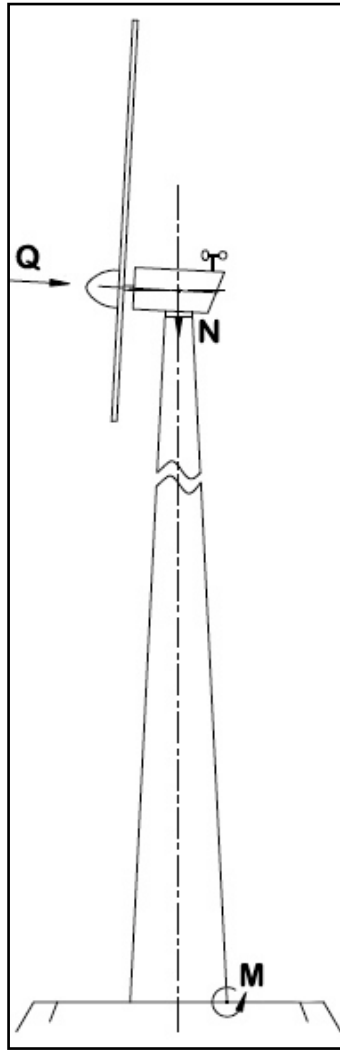
Tabell B5.1. Följande maximala belastningar är beräknade för en vindhastighet på 50 m/s, på ett UEG-4K verk med 7 meters torn.

#### Maximal belastning i A-A planet

$N_a$	4,50 [kN]
$Q_a$	6,50 [kN]
$M_a$	7,60 [kN x M]

#### Maximal belastning i B-B planet

$N_b$	5,80 [kN]
$Q_b$	7,60 [kN]
$M_b$	14,80 [kN x M]



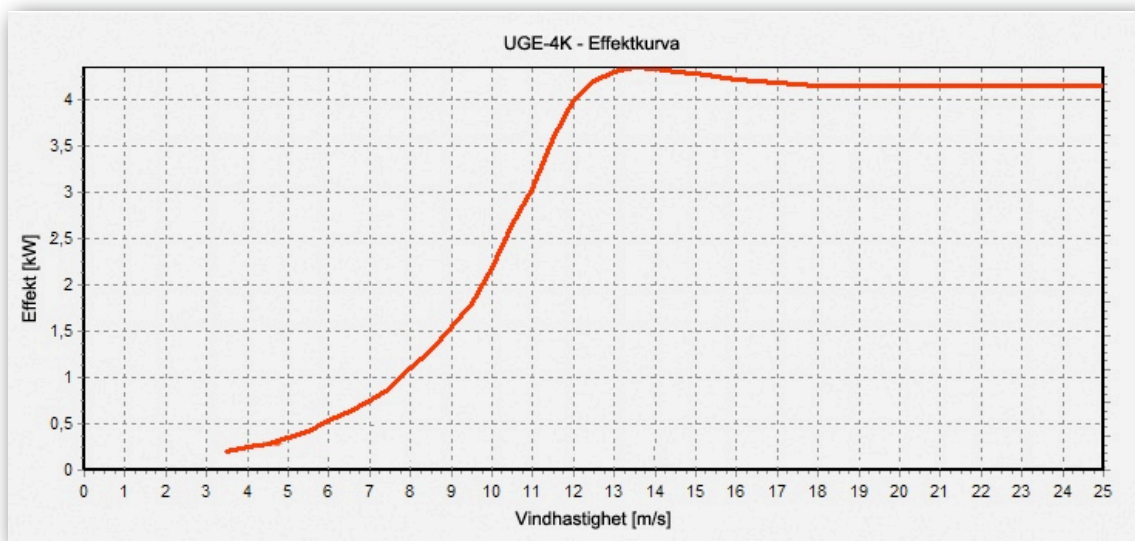
Figur B5.2. Krafterna som verkar på ett Aeolos 10 kW's verk med 18 meters torn.  
 Tabell B5.2. redovisar verkets belastningar vid en vindhastighet på 12 m/s.

Tabell B5.1. Följande belastningar är beräknade för en vindhastighet på 12 m/s, på ett Aeolos 10 kW's verk med 18 meters torn.

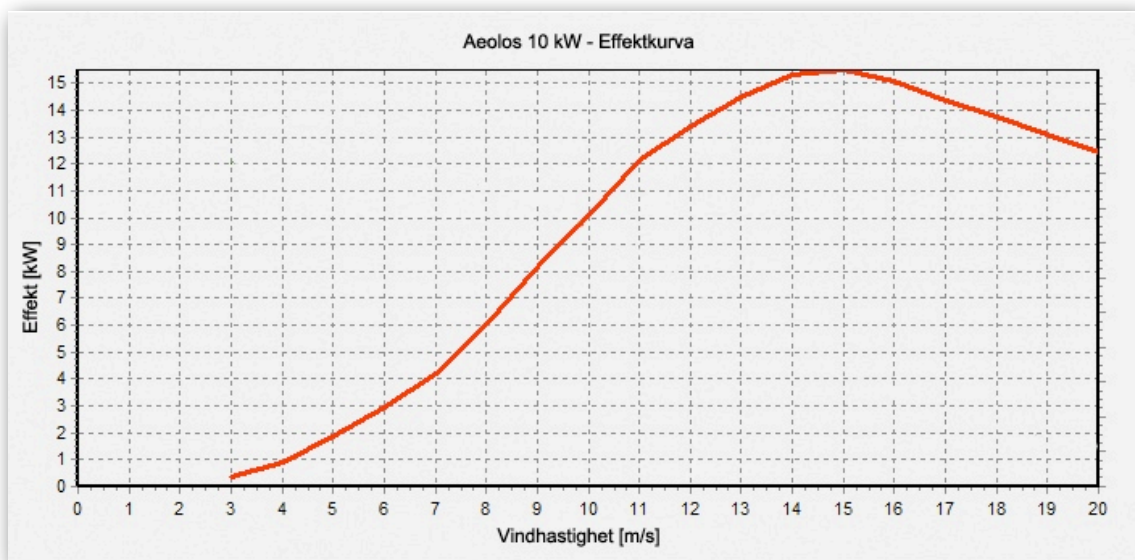
Belastning vid 12 m/s	
N	520 [kg]
Q	3,78 [kN]
M	68 [kN x M]

## Bilaga 6

### Effektkurvor



Figur B6.1. Effektkurva för UGE-4K, fram testad av oberoende tredje part.



Figur B6.2. Effektkurva för Aeolos 10 kW, ett resultat av praktiska tester och teoretisk data från Aeolos wind turbine.