



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS13010

Examensarbete 30 hp
Februari 2013

Småskalig elproduktion i urban miljö

Fallstudie av elproducerande system på ett
handelscentrum

Emil Andersson



UPPSALA
UNIVERSITET

Teknisk- naturvetenskaplig fakultet
UTH-enheten

Besöksadress:
Ångströmlaboratoriet
Lägerhyddsvägen 1
Hus 4, Plan 0

Postadress:
Box 536
751 21 Uppsala

Telefon:
018 – 471 30 03

Telefax:
018 – 471 30 00

Hemsida:
<http://www.teknat.uu.se/student>

Abstract

Small scale electricity production in an urban environment – Case study of an electricity generating system mounted on a shopping center *Emil Andersson*

This thesis investigates if a system for small scale electricity production located in an urban environment can be profitable. The work has been divided up into two parts, one extensive literature study and one case study. The purpose of the literature study was to investigate the area, resulting in a choice of which technology to be studied in depth in a case study.

In the case study a system containing small scale wind turbines and photovoltaics mounted on Gränby Centrums roof was examined. From data containing wind power, wind direction and total irradiation, possible production from a system were simulated. Three products of each technology were examined in the simulations. From the simulated production an economic analysis was carried out, this to investigate if a system is profitable. The two alternatives that showed the best economic result formed the optimal system.

The economic analysis showed that none of the investigated alternatives were profitable, this because the capital costs exceeded the revenues. The revenues from the wind turbines were low because of the poor wind conditions in an urban environment and the revenues from the photovoltaics were low because of the low electricity price.

Handledare: Peter Ekström
Ämnesgranskare: Joakim Widén
Examinator: Elisabet Andrésdóttir
ISSN: 1650-8319, UPTEC STS13010

Populärvetenskaplig beskrivning

Dagens energiproduktion karaktäriseras av att produktionen sker i större antal anläggningar på ett stort avstånd till konsumenterna, som är koncentrerade till större samhällen och städer. För att samhället skall kunna utvecklas på ett hållbart sätt krävs det att elproduktionen decentraliseras, det vill säga att punkterna där produktion sker sprids ut till flera mindre punkter nära konsumenterna.

De energiproducerande anläggningar som används idag kräver stora ytor för sin verksamhet, liknande ytor finns inte tillgängliga nära konsumenter. För att kunna sprida ut produktionen närmare konsumenterna krävs det att de producerande anläggningarna blir mindre. En yta som då går att utnyttja i städerna är fatigheters tak, vilket är en yta som oftast inte används till något speciellt.

Vid produktion av elektricitet med vindkraftverk och solcellspaneler krävs det att förhållandena för platsen är fördelaktiga, i städer finns det flera källor som påverkar dessa förhållanden. Det är främst förhållandena för vindkraftverken som får störst påverkan i stadsmiljö, förhållandena påverkas mest av turbulensen som uppstår när vinden påverkas av ett objekt.

Examensarbetet utfördes på uppdrag av Grontmij AB. De ville undersöka en anläggning för småskalig elproduktion i stadsmiljö, bestående av vindkraftverk och solcellspaneler. Denna anläggning skulle vara monterad på en fastighets tak, vilket är en förutsättning för att kunna installera en sådan anläggning i stadsmiljö. För att undersöka om installation av en anläggning är möjligt att genomföra ekonomiskt sett gjordes en fallstudie i vilken en anläggnings möjliga produktion simulerades utifrån data över förhållandena på den undersökta platsen.

I fallstudien undersöktes tre olika vindkraftverk och tre olika solcellspaneler. En ekonomisk analys gjordes sedan baserat på den produktionen som simuleras fram från varje produkt. De produkterna som uppvisade de bästa ekonomiska resultatet valdes sedan att ingå i det system som bildar den optimala anläggningen. Den ekonomiska analysen består främst av ett nuvärde som visar vad investeringen är värd när produkternas livslängd uppnås. Produkternas livslängder var alla 20 år.

Den ekonomiska analysen visade att ingen utav produkterna som undersöktes gav ett positivt nuvärde, vilket hade indikerat att produkten är ekonomiskt lönsam. Detta gjorde i sin tur att en anläggning bestående av småskaliga vindkraftverk och solceller inte heller det blev lönsamt. Det som gjorde att inget av alternativen blev lönsamt var att investeringen var för stor och den ekonomiska vinningen från energiproduktionen var för låg. Den ekonomiska vinningen blev låg på grund av att dagens elpris är lågt och att produktionen från främst vindkraftverken var låg.

Trots de dåliga ekonomiska resultaten för de olika produkterna, visar en närmare undersökning av det ekonomiska resultatet att en anläggning med endast solceller i framtiden potentiellt kan bli lönsam. Det som i så fall skulle krävas är att elpriset ökar eller att en utveckling av tekniken minskar investeringskostnaderna.

Innehållsförteckning

I Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Problemformulering	2
2 Bakgrund	3
2.1 Elnätet i Sverige	3
2.2 Inkoppling av egen elproduktion	4
2.2.1 Elcertifikat	5
2.2.2 Energimyndighetens stöd till solceller	5
2.2.3 Energiskatt	5
2.3 Befintliga anläggningar	6
2.3.1 Solcellsanläggningen på Gränby Centrum	6
2.3.2 Vindkraftverk på Läkerol Arena	7
3 Metod	10
3.1 Arbetsgång	10
3.2 Litteraturstudie	10
3.3 Intervjuer	10
3.4 Förutsättningar för fallstudien	11
3.4.1 Systemet som har undersökts	12
3.4.2 Systemgränser	12
3.4.3 Antaganden i fallstudien	13
3.4.4 Krav på produkterna vid val av dem	13
3.5 Simulering	14
3.5.1 Simulering av solceller i PVsyst	15
3.5.2 Simulering av vindkraft i Matlab	16
3.6 Analys och diskussion.....	18
4 Vind	20
4.1 Energi i vinden	20
4.2 Vindförhållanden	21
4.2.1 Vindfördelning	21
4.2.2 Omgivningens påverkan på vindförhållanden	23
4.2.3 Vindförhållanden i urban miljö	24
4.3 Vindkraftverk	26
4.3.1 Horisontalaxlade vindkraftverk	27
4.3.2 Vertikalaxlade vindkraftverk	28
4.3.3 Störningar från vindkraftverk	29
5 Sol	32
5.1 Energi i solinstrålningen	32
5.1.1 Solinstrålningen i Sverige	32
5.2 Utvinning av energi från solinstrålningen	33
5.2.1 Solceller	34
5.2.2 Omgivningens påverkan på solceller	37

6 Fallstudien	39
6.1 Studieobjektet	39
6.2 Systemets placering	41
6.2.1 Placering av solcellerna	41
6.2.2 Placering av vindkraftverken	41
6.3 Produkterna som har undersökts	43
6.3.1 Vindkraftverken	43
6.3.2 Solcellerna	45
6.3.3 Växelriktare	46
6.4 Data	47
6.5 Simulering	49
6.5.1 Simuleringen av solceller i PVsyst	49
6.5.2 Simuleringen av vindkraft i Matlab	50
6.6 Ekonomisk analys	54
7 Resultat	56
7.1 Vindkraft	56
7.2 Solceller	57
7.3 Det optimala systemet	57
8 Diskussion	61
9 Slutsats	65

I Inledning

Under 2009 satte regeringen upp ett mål att Sverige skall ha 50 procent förnyelsebar energi i landets energimix år 2020. Detta mål sattes upp som ett led av ett EU-direktiv för att främja nyttjandet av förnyelsebara energikällor. En del av målet är att elproduktionen från förnyelsebara källor ska öka med 25 TWh till år 2020, jämfört med produktionen år 2002. Två energikällor som lyfts fram för att kunna uppnå målet till 2020 är vindkraft och solceller, vilket regeringen uppger i informationsmaterialet kring målet. Dessa två energislag har regeringen premierat genom styrmedel, solceller genom ett investeringsstöd och elcertifikatsystem för förnyelsebara energikällor i allmänhet har gynnat vindkraften. (Regeringen, 2012)

För att möjliggöra en övergång till en energimix med en ökad grad förnyelsebara energikällor krävs det att energisystemet blir mer decentraliserat. Detta på grund av att de förnybara produktionskällorna i regel är mindre och kräver en spridning, då förutsättningarna för dem varierar beroende på platsen. Då går energiproduktionen från att produceras i stora anläggningar med långa transmissionsavstånd till konsumenten, till att den produceras i småskaliga anläggningar nära konsumenten. (Andersson, A., telefonintervju, 2012) Dagens energisystem karaktäriseras därmed av en centraliserad elproduktion och långa transmissionssträckor. Den centraliserade genereringen i form av stora anläggningar som står för större delen av elproduktionen, anläggningar som kärnkraftverk och vattenkraftverk. Dessa två energislag producerar ungefär 85 procent av all elektricitet som produceras i Sverige. Den övriga delen av elproduktionen består främst av förbränning av fossila bränslen, kraftvärme och vindkraft. (Svensk energi, 2012a) Den långa transmissionen kommer ifrån att de flesta produktionsanläggningarna är lokaliserade långt ifrån konsumenterna. Lokaliseringen beror på att förhållanden för det energislaget kräver en specifik placering, att anläggningarna kräver stort utrymme och att konsumenter inte vill bo nära dessa anläggningar. (Vattenfall, 2012a)

Eftersom det inte finns stora sammanhängande och obebyggda ytor tillgängliga i urbana miljöer kan småskaliga anläggningar integrerade i befintliga byggnader bli en möjlig lösning på problemet att decentralisera energisystemet. Intresset för småskalig elproduktion har på senare tid ökat och möjligheten att producera förnyelsebar el i städer spås en spännande framtid. En yta som då kan utnyttjas är hustak, detta frigör en stor yta i urbana miljöer som kan användas till att producera elektricitet på. Det finns mer och mer exempel på hur hustak utnyttjas till elproduktion, detta främst genom att installera solceller på taken. (Gustafsson, M., intervju, 2012) Men det finns även exempel med småskaliga vindkraftverk uppsatta på hustak i urban miljö.

Förhållandena för solceller i urban miljö jämfört med rural miljö skiljer sig inte mycket. Det som skiljer sig är att det finns en högre grad av störningskällor i urban miljö. (Sidén, 2009) För solcellerna finns det mer objekt som kan skugga själva cellerna och påverka produktionen. När det gäller vindkraft på tak i urban miljö skiljer sig förhållandena avsevärt mycket mer än i rural miljö. Det finns avsevärt flera faktorer som påverkar vindförhållandena och gör dessa intrikata att förutse och bedöma. (Wizelius, 2007)

En fastighetstyp som har potentialen att vara lämpliga för en installation av både solceller och småskalig vindkraft är köpcentrum. Ett köpcentrum kan vara lämpligt på grund de ofta är placerade i utkanten av städerna, vilket är positivt för förhållandena på platsen. Dessutom kan en installation av ett system med förnyelsebar energiproduktion fungera som en god

marknadsföringsprodukt, som ger köpcentrummet möjlighet att profilera sig som ett miljövänligt alternativ. Förutom detta har ett köpcentrum en hög och stabil lägsta förbrukning över dygnet och året vilket leder till att det installerade systemet kan dimensioneras utifrån detta. (Kotilainen, intervju, 2012) Köpcentrummen har även ofta en hög energiförbrukning vilken har potentialen att minskas vid en installation av egen energiproduktion i anslutning till det.

Grontmij AB jobbar på ett spår som de benämner hållbar samhällsutveckling och därför var det intressant för dem att undersöka möjligheter för småskalig energiproducering i urban miljö. Uppdraget från Grontmij var då att undersöka om en sådan lösning är lönsam, vilket skulle kunna leda till marknadsföring av ett koncept till fastighetsägare innehållandes ett system för småskalig energiproducering. Köpcentrum identifierades som en potentiell målgrupp för ett sådant koncept, på grund av marknadsföringsfördelarna som köpcentrat potentiellt skulle kunna få från en installation av ett sådant system.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka om ett system bestående av en kombination av småskalig vindkraft och solceller monterade på en fastighets tak är ekonomiskt lönsamt i en urban miljö.

Detta är viktigt att undersöka då en ökad andel förnyelsebara energikällor i Sveriges energimix kräver en ökning av småskalig elproduktion nära konsumenterna. Eftersom de flesta konsumenterna finns koncentrerade till städer och större orter krävs det lösningar som kan prestera i urbana miljöer.

För att undersöka om det tilltänkta systemet är ekonomiskt hållbart i urban miljö har en inledande litteraturstudie genomförts där teknikerna studerats och en fallstudie på Gränby centrum i Uppsala där simuleringar av möjlig produktion från ett system har gjorts.

1.2 Problemformulering

I detta examensarbete har ett antal produkter undersökts, vilka skapar ett system för småskalig elproduktion i urban miljö. De problemformuleringar som har besvarats genom denna undersökning presenteras nedan.

Vilka undersökta produkter bildar det optimala systemet för småskalig elgenerering i urban miljö med avseende på de ekonomiska faktorerna?

Vilka ekonomiska faktorer är det som har störst påverkan på resultatet av en investering i ett system för småskalig elproduktion i urban miljö?

Hur påverkar dessa faktorer det ekonomiska resultatet?

2 Bakgrund

I detta avsnitt kommer information om det svenska elnätet, distribuerad generering, inkoppling av distribuerad generering och befintliga anläggningar att presenteras. Denna bakgrundsinformation är viktig för att förstå förutsättningarna för nästkommande avsnitt och fallstudie. I den sista delen av detta avsnitt kommer två befintliga anläggningar att presenteras. Dessa två är en solcellsanläggning på Gränby centrum och två vindkraftverk uppsatta på Läkerol arena.

2.1 Elnätet i Sverige

I Sverige är elnätet uppbyggt i fyra nivåer som möjliggör och uppfyller olika syften, dessa fyra nivåer skiljs åt av att de har olika spänningsnivåer. Mellan dem transformeras spänningen till önskad nivå med hjälp av transformatorer i större transformatorstationer eller mindre enskilda transformatorer. Nivån med högst spänning är stamnätet som har den högsta spänningen, mellan 220 kV och upp till 400 kV. Funktionen för detta nät är att transportera elektriciteten över långa sträckor från produktionsanläggningarna till regionerna med hög koncentration av konsumenter med en hög förbrukning.(Svensk energi, 2012b) När sedan stamnätet har levererat elektriciteten till regionerna, transformeras spänningen ner i stora transformatorstationer till mellan 70 kV eller 150 kV för att distribueras till kunderna i regionerna och större städer via regionnätet.(Wizelius, 2007 s.280-284) När sedan elen har nått ut till städer och samhällen i regionerna transformeras spänningen ner ytterligare en nivå för att distribueras inom staden eller samhället, denna nivå på nätet kallas distributionsnät eller lokalnät, och har normalt en spänningsnivå på 10 eller 20 kV. Spänningen transformeras ner ytterligare en nivå för att förse kvarter och mindre områden inom städerna och samhälle. Det är denna nivå på 400 volt som kopplas in i fastigheterna. Större förbrukare som industri och större fastigheter kan vara inkopplade på lokalnätet och vissa elintensiva industrier kan till och med vara inkopplade på regionnätet. (Svensk energi, 2012b)

Karakteren i det svenska kraftsystemet är att produktionen sker i större produktionsanläggningar långt ifrån konsumenterna och transmissioneras till dem över stora avstånd. Tydligt går det också att se att större delen av produktionen sker i de norra delarna av landet och konsumtionen sker i de södra delarna av landet.(SVK, 2011) Detta beror på att vattenkraften är en stor producent och de floder som är utbyggda med stor energiproduktion ligger i de norra delarna(Wizelius, 2007. s.280-282) och att en stor del av befolkningen är koncentrerad till de södra delarna av landet.(SCB, 2012) Även den produktion som sker i de södra delarna av landet är koncentrerad till större anläggningar som ligger på ett visst avstånd från konsumenterna. Detta betyder att produktionen är centraliserad till vissa punkter medan förbrukningen är spriden över en mängd punkter. På grund av detta kan en obalans uppkomma i nätet vid höglasttillfällen och kan då skada nätet.(Vattenfall, 2011)

Den centraliserade produktionen kan även ge upphov till stora förluster i elnätet på grund av de långa transmissionsavstånden och transformationen mellan de olika spänningsnivåerna.(Wizelius 2007. s.287-290) År 2008 uppgick de totala nätförlusterna i Sverige till 7,5 procent av den totala elproduktionen. (Semper, 2009) Genom att decentralisera produktionen kan en viss del av förlusterna förhindras, genom att minska transmissionsavstånden och minska antalet transformeringar mellan de olika spänningsnivåerna. (Wizelius 2007 s.287-290)

Genom att sprida ut produktionen till de perifera delarna av nätet, där också stor del av konsumtionen finns, kan denna obalans motverkas och förlusterna minskas. Konceptet med

produktion i de perifera delarna nära konsumenterna kallas *distribuerad generering*. Distribuerad generering är ofta små anläggningar som utnyttjar förnyelsebar teknik för elproduktion. (Nirmal-Kumar och Zhang, 2009) STRI definierar även en distribuerad generering beroende av effekten på de enheter som producerar elen, de definierar det som en generande enhet som har effekt mellan en kW till ett fåtal MW.(STRI, 2011)

Distribuerad generering är således mindre decentraliserade produktionskällor nära konsumenterna. Vindkraft och solceller är två goda exempel på distribuerad generering. (Wizelius 2007. s.288-290)

Ett faktum som är förknippat dessa två energikällor och andra förnyelsebara energikällor är att det är väldigt svårt att prediktera produktionen och styra den. Detta för att produktionen beror på yttre förutsättningar som inte går att styra eller förutspå. De är så kallade variabla energikällor. På grund av den stora variationen som finns hos dessa energikällor kan de inte användas som baskraft, vilket kräver hög och stadig produktion. De kan inte användas som reglerkraft, då det inte går att förutspå eller öka produktionen om det krävs. Intermittenta energikällor passar inte heller till spetskraft, då det krävs snabb inkoppling och produktionsökning av den. (MIT s. 7-10) Distribuerad generering kan användas som komplement till alla dessa, dock krävs det reglerkraft som kan reglera toppar och dalar i produktionen. En hög grad av distribuerad generering i kraftsystemet kan orsaka vissa problem, det är just variationen hos många distribuerade genereringskällor skapar problemen. På en högre nivå i nätet kan det uppstå problem med reglernivån i nätet. På en lägre nivå i nätet kan det främst skapa problem med kapaciteten och spänningsnivån i nätet, som en följd av att de snabba förändringarna i genereringen inte hinner regleras.(STRI, 2011) Dessa problem uppkommer främst i delarna av nätet som är svagare, exempelvis i de yttre delarna av nätet långt ifrån en stor produktionskälla Dock menar Mattias Gustafsson (2012) projektledare på Gävle Energi att i mer robusta nät, som till exempel i städer, kommer det krävas en väldigt hög grad av distribuerad generering för att det ska påverkas negativt. Idag har Gävle energi en relativt hög grad intermittent generering i sina nät och de har inte upplevt några problem med elkvaliteten. (Gustafsson, intervju 2012)

2.2 Inkoppling av egen elproduktion

Det är elnätsföretaget som bestämmer om en producerande anläggning får kopplas in på deras nät, detta eftersom de skall kunna garantera säkerheten i sina nät. Risker som finns är att det kan uppkomma så kallad bakspänning om anslutna anläggningar matar ut energi till nätet utan deras vetskap. (Elsäkerhetsverket 2012) Tillståndet från nätägaren måste fås även om inkopplingen sker på inom det egna interna elsystemet, detta av säkerhets- och ansvarsskäl. Beroende på hur stor anläggningen som installeras är och hur den ser ut kan det krävas bygglov från kommunen. Säkerhetskraven som en anläggning måste uppfylla konstitueras av Elsäkerhetsverket. Ett viktigt krav är att alla olika produkter i anläggningen skall vara CE-märkta, vilket anger att producenten ansvarar för att de använda produkterna uppfyller de krav som finns rörande elektromagnetiska störningar och säkerhet. (Energimyndigheten, 2012a) Något som också kan bli aktuellt vid inkoppling av egenproducerad el på nätet är att elavtalet med nätägarna kanske måste omförhandlas, detta krävs främst om en uppgradering av fastighetens huvudsäkring behövs. Detta medför hårdare regler för säkerhet och uppföljning. En uppgradering av elavtalet har potentialen att bli en stor kostnad beroende på hur stort system som installeras. (Lundqvist, intervju 2012) Om elnätsföretaget anser att säkerhetsåtgärderna som de kräver av en installation är uppfyllda är de skyldiga att koppla in

producenten. Detta sker mot en skäligen inkopplingskostnad. Vid inkoppling av egen elproduktion på nätet finns det olika stödsystem för att främja dessa inkopplingar och utnyttjandet av förnybar elproduktion.

2.2.1 Elcertifikat

Vid installation av förnyelsebar elproduktion blir producenten berättigad till elcertifikat för den energi de producerar. (Lönnfält, 2013) Elcertifikaten är ett marknadsbaserat stödsystem som syftar till att öka andelen förnyelsebar energiproduktion. En producent får ett elcertifikat per producerad MWh som denne sedan kan sälja på en öppen marknad. Detta skapar en extra intäkt utöver den elektriciteten som producenten kan sälja. (Energimyndigheten 2012b) Det som skapar incitament för en aktör att köpa elcertifikat är att storkonsumenter och producenter måste täcka den så kallade kvotplikten. Kvotplikten uppfylls genom att aktörerna köper elcertifikat på den öppna marknaden eller täcker den med egna elcertifikat. Om man producerar egen energi som berättigar elcertifikat måste man behålla den kvot som man är skyldig till att täcka. Producenten är berättigad till elcertifikat under 15 år, efter denna period är aktörerna fortfarande skyldiga att täcka sin kvot. (Lönnfält 2013) Det är Energimyndigheten och Svenska kraftnät som sköter det svenska elcertifikatsystemet. Sverige och Norge har en gemensam marknad för elcertifikat. (Energimyndigheten 2012b) Under 2012 var snittpriset för ett elcertifikat 250 kronor. Elcertifikaten säljs genom en programvara liknande en som används för att handla aktier. Beroende på hur mycket som man vill få ut av ett elcertifikat beror på fluktuationerna i priserna, dock går det att ställa in ett pris om önskas, vilket gör att det är enkelt och inte tidskrävande att sälja ett elcertifikat. (Lönnfält 2013) Kvotplikten är en bestämd procentsats som gäller i 30 år och procentsatsen för kvotplikten uppdateras i intervall om några år. (Energimyndigheten 2012b)

2.2.2 Energimyndighetens stöd till solceller

Sedan 2009 kan privatpersoner och företag ansöka om ekonomiskt stöd från Energimyndigheten vid investering i en solcellsanläggning. Stödet har genomgått en viss revision under slutet av 2012, vilket har resulterat i att möjliga andelen av investeringskostnaden som kan fås från Energimyndigheten nu är 35 procent och upp till 1,5 miljoner kronor för en investering. Till 2013 budgeterade regeringen 210 miljoner kronor som skall räcka under en fyraårsperiod och när denna budget är slut finns det inget mer stöd att söka förrän regeringen avsätter ny medel till budgeten. (Energimyndigheten 2013)

2.2.3 Energiskatt

All elektrisk kraft som förbrukas i Sverige är skattepliktig, enligt Lagen om skatt på energi (1994:1776) 11:e kapitlet paragraf 1. Detta betyder att konsument är skyldig att betala en energiskatt på den el som denne förbrukar, även om elen är egenproducerad. Det finns vissa undantag som gäller att en specifik typ av användare har en lägre energiskatt än andra. (Lagen om skatt på energi (1994:1776) 11 kap, 1§)

Sedan finns det även ett annat undantag och det gäller för egenproducerad el från vindkraft. Detta enligt samma lag 11:e kapitlet paragraf 2 punkt 1, som säger att skattepliktigheten undantags om den elektriska kraften har framställts i ett vindkraftverk. (Lagen om skatt på energi (1994:1776) 11 kap, 2§ 1pt)

År 2013 uppgick energiskatten till 36,63 öre per kWh inklusive moms. (Vattenfall, 2012b)

2.3 Befintliga anläggningar

De befintliga anläggningarna presenteras för att de har bidragit till erfarenheter om liknande system som undersökts i detta examensarbete och är en god grund att stå på för att skapa sig en bild om hur ett system kan se ut.

2.3.1 Solcellsanläggningen på Gränby Centrum

I september 2011 monterades en solcellsanläggning på taket över östra ingången på Gränby centrum, detta i samband med att ingången byggdes om. Enligt Juha Kotilainen(2012), teknisk förvaltare på Gränby Centrum, installerades den för att Gränby centrum skulle kunna profilera sig som ett miljövänligt handelscentrum. Med två stycken monitorer visas den momentana produktionen, produktion under dagen och total ackumulerad produktion sedan anläggningen installerades. Detta för att exponera anläggningen mycket som möjligt och göra kunderna medvetna om att den finns där och hur mycket den har bidragit med.(Kotilainen, intervju 2012)

Anläggningen har en topp effekt på 62 kW, den består av 264 paneler monterade i tre rader på två uppställningsenheter riktade mot söder. Anläggningen dimensionerad utifrån vilken yta som fanns tillgänglig på taket. För att kunna uppnå maximal produktion har panelerna vinklats 40 grader från horisontlinjen. (Kotilainen, intervju 2012) Panelerna är av märket Sanyo och har modellnamnet HIT-N235SE10, vilket är Sanyos mest moderna paneler och de använder en kombination av monokristallint och amorft kisel i cellerna. De är mindre känsliga för temperaturökningar än andra solceller på marknaden och fungerar bra vid diffus instrålning. Detta har gjort att de har en verkningsgrad som är 19 procent.(Sanyo 2012) Under det året som anläggningen har suttit uppe har den producerat ungefär 62 000 kWh, vilket är något högre än den förväntade produktionen som angavs vid projekteringen av anläggningen. (Kotilainen, intervju 2012)



Figur 1. Solcellsanläggningen på Gränby centrum.

För att konvertera likströmmen som anläggningen producerar till växelström används fyra stycken växelriktare som heter Sunny Tripower 15000TL (Kotilainen, intervju 2012), dessa växelriktare har en maxeffekt på 15260 watt likströmseffekt (SMA 2012). Detta innebär att fyra stycken krävs för att klara av anläggningens totala effekt. Gränby centrum använder sig inte av

någon mjukvara för att övervaka produktion, utan den informationen går direkt från inverterarna till informationstavlorna inne i handelscentrummet. (Kotilainen, intervju 2012)

Panelerna är uppdelade i två rader och är uppsatta på aluminiumstativ som Gränby centrum själva byggde i samband med utbyggnaden av den delen av handelscentrummet. Sedan har entreprenörer monterat själva panelerna och gjort den elektriska installationen. I och med att anläggningen monterades i samband med utbyggnaden betydde det att inget specifikt bygglov söktes för själva anläggningen, utan den fanns med i bygglovet för utbyggnaden. (Kotilainen, intervju 2012)

Elen som anläggningen producerar används till Gränby centrums kylmaskiner. Inledande var det också tänkt att eventuellt överskott skulle levereras ut på nätet. Dock har inte den situationen uppstått någon gång. Då Gränby centrums förbrukning är mycket högre än vad den installerade anläggningens produktion är. Eftersom Gränby centrums interna elsystem har hög kapacitet krävdes det ingen modifikation av det för att klara av en installation. De har inte heller upplevt några störningar i det till följd av installationen av anläggningen. (Kotilainen, intervju 2012)

När investeringen i anläggningen gjordes fick Atruim Ljungberg 45 procents investeringsstöd från energimyndigheten och de har inte räknat med några underhållskostnader då panelerna är underhållsfria. (Kotilainen, intervju 2012) Den totala projektkostnaden för anläggningen var 1 900 000 kronor inklusive investeringsstödet. (Direct energy, 2012)

2.3.2 Vindkraftverk på Läkerol Arena

På Läkerol arenas tak i Gävle har två vindkraftverk monterats, de har snart suttit uppe i två år. Det var ett samarbete mellan arenan och Gävle energi som möjliggjorde installationen av dem. Främst var det krafter inom Gävle energi som trodde väldigt mycket på småskalig vindkraft och ansåg det viktigt att undersöka detta. Dessutom påverkade det faktum att mycket människor rör sig i området och att arenan syns från stora delar av staden valet att sätta upp dem på arenan, Gävle energi fick stor exponering. (Jensen, intervju 2012)

Vindkraftverken är av märket Urban Green Energy och har en effekt på 4 kilowatt. De är vertikalaxlade och valdes tidigt i projekteringsfasen eftersom de estetiska egenskaperna prioriterades framför prestanda, detta på grund av att Gävle energi ser dem som en marknadsföringsprodukt. Tanken var att infotavlor skulle installeras i och utanpå arenan för att öka exponeringen ytterligare, men oväntade kostnader gjorde att dessa lades på is. Verken var även vid den tidpunkt som projekteringen gjordes de enda vertikalaxlade på marknaden som hade blivit grundligt testade och tilldelats säkerhetscertifieringar. (Gustafsson, intervju 2012)



Figur 2. Vindkraftverken på Läkerol arena.

Som ett led i projekteringen gjordes det ett examensarbete av två masterstudenter från Gävle högskola. Det syftade till att undersöka vilken placering som var den bästa sett till produktionen. I arbetet gjordes det en "computational fluid dynamics"- analys där luftens flöde kring byggnaden undersöktes i vindtunnel. Detta ledde fram till att den optimala placeringen av verken var på framsidan av arenan. Där de även får störst exponering. (Gustafsson, intervju 2012)

I projekteringsfasen ägnades inte risken för vibrationer och ljud någon större tanke, eftersom arenan är en industrilokal och har hög tolerans när det gäller vibrationer och ljudstörningar. Dock var man orolig för iskastning, Gävle får under vintrarna stora mängder nederbörd, dock har inga tendenser till iskastning observerats under den vintern som de har varit i drift. Dessutom har dessa verk låg rotationshastighet, 125 varv per minut, vilket gör att risken för iskastning blir mindre och eventuell effekt av den minskar. (Gustafsson, intervju 2012) Under drift har endast små vibrationer upplevts, vilka inte har påverkat något eller några. I princip inget ljud har upplevts inne i byggnaden, men utanför har det under dagar med höga vindhastigheter uppfattats ljud som låter som vindbrus. Detta har inte stört någon då även bakgrundsljudet från den närliggande skogen ökar då vindhastigheten ökar. (Jensen, intervju 2012) Redan tidigt i planeringsfasen involverades kommunen och en dialog hölls kontinuerligt under arbetet, detta gjorde att bygglovsprocessen gick smidigt. (Gustafsson, intervju 2012)

Verken är stumt monterade på arenans stålstomme och inte direkt på taket, detta på grund av att arenan har ett mjukt tak. Detta gjorde att en specialtillverkad ställning krävdes och en genomföring i taket krävdes för att kunna montera verken, vilket har lett till att installationskostnaderna blev höga. (Jensen, intervju 2012) Även takets utformning med ett lägre tak över entrén gjorde att en specialkran krävdes vid montering. Detta gjorde att installationskostnaderna blev mycket större än själva investeringen av verken, som kostade 200 000 kronor styck. (Gustafsson, intervju 2012)

Ingen övervakning av produktionen har gjorts vilket lett till att varken Peter Jensen, driftchef på Läkerol arena, eller Mattias Gustafsson på Gävle energi vet hur stor produktionen har varit. Dock var den projekterade totala produktionen, i examensarbetet, för ett år ungefär 8 000 kWh, vilket Mattias Gustafsson (2012) anser var en ganska överdriven prognos.(Gustafsson, intervju 2012)

Gävle energis tankesätt och arbetsgång med dessa två vindkraftverk har varit "learning by doing", detta eftersom de inte hade någon egentlig erfarenhet av denna typ av anläggning. Denna anläggning fungerade även som en test-site, för två vindkraftverk som var planerade att monteras på bostadshuset Fullriggarens tak.(Gustafsson, intervju 2012)

3 Metod

I detta avsnitt kommer en genomgång av det arbete som har lett fram till denna examensrapport. Avsnittet behandlar den litteraturstudie som har gjorts, intervjuerna och hur information från studien och intervjuerna har behandlats. Även grundläggande beskrivning av den utförda fallstudien går igenom, genomgången består av hur valet av studieobjekt gjordes, hur data införskaffades, grundläggande preferenser för simuleringen och den ekonomiska analysen som har genomförts.

3.1 Arbetsgång

Arbetsgången i detta examensarbete har varit uppdelad i tre huvuddelar. En inledande del bestående av den information som inhämtades under litteraturstudien, en del bestående av fallstudien som gjorts och en avslutande del där resultatet från fallstudien har analyserats och utvärderats. Övergripande har arbetsgången följt den så kallade trattmodellen, med ett inledande brett angreppssätt för att senare smalna av till en mer preciserad analys av ett fall. Detta för att kunna utgå med en bred kunskapsbas att stå på för att sedan smalna av för att senare anpassa analysen till ett specifikt fall och då kunna uppfylla syftet med detta examensarbete.

3.2 Litteraturstudie

I den inledande litteraturstudien behandlades grundläggande information angående de områden som undersöktes i detta examensarbete. Denna information skapade den breda grund som krävdes för att gå vidare med arbetet och applicera teorier på ett enskilt fall. Det undersöktes även vilken tidigare forskning som har gjorts på området berörande elproduktion i urban miljö. Detta för att kunna identifiera vissa aspekter som tidigare forskning inte har tagit upp och då kunna rikta detta examensarbete mot dessa aspekter för att göra så att det tillför något nytt. All information som bearbetades under litteraturstudien resulterade inte i direkta källor till examensrapporten utan en stor del av informationen behandlades för att bygga upp en grundläggande förståelse för delarna i det komplexa system som urban elgenerering är.

3.3 Intervjuer

Under hela arbetets gång har det löpande genomförts ett antal intervjuer. Intervjuerna har syftat till att bidra med information, både till litteraturstudien och till fallstudien. Intervjuerna har varit av semistrukturerad karaktär med öppna frågor som respondenten kunde resonera och reflektera kring. Vissa intervjuer innehöll även vissa frågor som var mer styrda. De öppna frågorna syftade till att respondenten skulle ge beskrivande svar utifrån deras kunskap och åsikter om området. De mer styrda frågorna ställdes för att specifik information om exempelvis teknikerna söktes. Då det tilläts, spelades intervjuerna in samtidigt som anteckningar gjordes. Detta för att intervjuerna skulle kunna transkriberas direkt efter intervjuerna utan att egna åsikter och värderingar lades till respondenternas svar, vilket kan riskeras om transkriberingen sker en tid efter intervjun.

Respondenterna till intervjuerna valdes ut dels genom rekommendation från handledare, tidigare respondenter och dels genom att de identifierats sitta inne på relevant kunskap. Tre intervjuer har utförts med personer som har insyn i redan befintliga anläggningar för att information och erfarenheter från drift av liknande anläggningar som undersöks i detta

examensarbete. De tidigare redovisade redan befintliga anläggningarna är en med solceller på Gränby centrum i Uppsala och två stycken vindkraftverk monterade på Läkerol arena i Gävle.

Ett antal av intervjuerna gjordes via telefon på grund av den geografiska positionen på den aktuella respondenten eller att intervjuerna var kortare och inte krävde ett besök hos respondenten.

Tabell 1. Lista på intervjuer som utförts under detta examensarbete.

Respondent	Titel, företag	Datum	Kontakt
Juha Kotilainen	Teknisk förvaltare, Gränby centrum	2012-10-08	Platsbesök
Peter Jensen	Driftchef, Läkerol Arena	2012-10-16	Platsbesök
Jose Lundqvist	Vattenfall eldistribution storkund	2012-10-17	Telefon
Arne Andersson	Tidigare Energimyndigheten	2012-10-22	Telefon
Juha Kotilainen	Teknisk förvaltare, Gränby centrum	2012-10-22	Telefon (uppföljning)
Jose Lundqvist	Vattenfall eldistribution storkund	2012-10-22	Telefon (uppföljning)
Niclas Sandqvist	Energikonsult, Grontmij	2012-10-24	Telefon
Mattias Gustafsson	Projektledare, Gävle energi	2012-11-15	Platsbesök
Mattias Gustafsson	Projektledare, Gävle energi	2012-11-23	Telefon (uppföljning)
Lars Hedström	VD, Direct energy	2012-12-05	Telefon
Joakim Stavegren.	Egen el	2012-12-05	Telefon

I vissa fall krävdes det uppföljningsintervjuer, då vissa frågetecken behövde redas ut, detta gjordes över telefon då det endast var ett mindre antal frågor som respondenten behövde besvara.

Alla intervjuer har inte renderat i direkta källor i denna examensrapport, utan vissa har endast syftat till att ge bakgrundsinformation om ett område.

Under hela arbetsgången har tillgång till Grontmij's breda kunskapsdatabas funnits, i vissa fall har detta utnyttjats till intervjuer och i vissa fall har informella samtal med medarbetare förts vid snabba möten i korridoren eller över fikapausen. De korta samtalen har varit viktiga för arbetet då frågor har besvarats och värdefulla tips har erhållits, det "lokala buzzet" på kontoret kunde utnyttjas.

3.4 Förutsättningar för fallstudien

Fallstudien består i en simulering av möjlig elproduktion av ett system bestående av småskalig vindkraft och solceller. Simuleringen har gjorts med utgångspunkten att systemet var monterat på taket på ett handelscentrum i Uppsala, Gränby centrum. Valet av studieobjekt föll på Gränby centrum, på grund av att mätdata kunde tillgängliggöras via Uppsala universitet och att författaren är familjär med området och förutsättningar på plats. Gränby centrum har i dagsläget en solcellsanläggning installerad på taket, vilken i viss mån har fungerat som ett referensobjekt.

I diskussionen om val av studieobjekt kom även andra handelscentrum på tal, det mest aktuella alternativet var Mall of Scandinavia som i skrivande stund precis har börjat byggas. Valet föll på Gränby centrum för att ett redan existerande handelscentrum ansågs som ett lämpligare studieobjekt. Detta på grund av att det fanns bättre möjligheter att tillhandahålla data om elförbrukningen från ett redan existerande köpcentrum än ett som håller på att byggas och därför inte har varit i drift. Eftersom valet av studieobjekt föll på Gränby centrum kunde förbrukningsdata tillhandahållas både från driftcentralen i Gränby centrum och från Vattenfall Eldistribution. Data från Gränby centrums driftcentral var på månadsbasis, vilket inte är att föredra när en jämförelse mellan förbrukning och produktion skall göras. Detta då förbrukningen varierar över dygnet och det blir därför svårt att exakt bestämma lägsta förbrukning utifrån månadsdata. Istället kunde data på timbasis tillhandahållas av Vattenfall Eldistribution, som är äger det nät som Gränby centrum är inkopplade på. Insamling av förbrukningsdata från Vattenfall skedde med tillåtelse från Gränby centrum. Just erfarenhet från personal på ett befintligt handelscentrum spelade stor roll i valet av Gränby Centrum.

3.4.1 Systemet som har undersökts

För att finna det optimala systemet har tre produkter av varje teknik studerats och simulering har gjorts för varje produkt individuellt. Resultatet av simuleringen har sedan använts till att utföra en ekonomisk analys för produkterna. De produkterna från varje teknik som uppvisade det bästa ekonomiska resultatet bildade sedan det optimala systemet.

Det system som undersöktes har bestått av fyra rader med solcellspaneler och fem stycken vindkraftverk placerade på Gränby centrums tak. Givetvis består systemet av flera andra komponenter som påverkar hur det ser ut, framför allt är det de växelriktare som används. De andra komponenterna är samma för de olika alternativen som undersöks, de komponenterna är kablarna som kopplar ihop hela systemet, inkopplingen på elsystemet, mätare och så vidare.

3.4.2 Systemgränser

För att kunna bestämma vad systemet skall bestå av och för att kunna undersöka det har systemgränser bestämts. Systemgränserna har även syftat till att begränsa det undersökta systemet på en storlek som tidsramen för detta examensarbete har tillåtit.

En gräns som har stort inflytande är den tillgängliga ytan på taket, detta påverkar hur många vindkraftverk och rader med solcellspaneler som systemet kan bestå av. Den tillgängliga ytan på Gränby centrums tak har tillåtit att fyra rader med solcellspaneler och fem stycken vindkraftverk placerats ut.

Studieobjektets interna elsystems kapacitet är ytterligare en systemgräns som kan begränsa storleken på systemet, detta för att det interna elsystemet inte skall behöva en uppgradering. En investering som följer vid en eventuell uppgradering av det interna elsystemet kan bli väldigt stor, vilket leder till att en installation av ett system inte blir möjlig. Den installerade anläggningens effekt eller produktion skall inte vara större än fastighetens effekt eller förbrukning. Detta för att förhindra att någon energi levereras ut till nätet, vilket om det händer kan leda till att ett nytt uppgraderat elavtal med nätägaren måste förhandlas fram. Ett uppgraderat elavtal kan leda till ökade kostnader för fastighetsägaren.

För att ytterligare begränsa att storleken på systemet kommer det anpassas utifrån nätägarens krav på effekten hos ett system som ansluts till deras nät. Det är Vattenfall som är nätägare till

det nät som Gränby centrum är anslutet till och de har olika nätavtal beroende på vilken effekt som en ansluten anläggning har, för vilken gränsen ligger på 300 kW. När ett anslutet system överstiger denna gräns går kunden från att vara mikroproducent till att vara småskalig elproducent. Detta medför att högre avgifter måste betalas till Vattenfall för anslutningen och att de ställer andra krav på säkerheten vilket ökar kostnaden för installationen.(Vattenfall 2013)

3.4.3 Antaganden i fallstudien

Vid arbetet med denna fallstudie har vissa antaganden gjorts för att möjliggöra en analys och i vissa fall förebygga oklarheter som inte gick att besvara utan att mätningar och kostnadsberäkningar gjorts på ett fysiskt testsystem.

Ett antagande som har gjorts är att taket är förberett för en installation av ett system från början, vilket leder till att kostnaden för detta inte tas med i den ekonomiska analysen. Detta för att en installation av ett system skulle kunna tänkas är mer aktuellt vid en nybyggnation, tillbyggnad eller ombyggnad av ett handelscentrum och då förberedelsen av platsen blir enklare och mindre kostsam. Att endast förbereda ett befintligt tak för en installation har potentialen att medföra höga kostnader, en utdragen installationsprocess och oväntade skador på taket. Detta påpekade Mattias Gustafsson (2012) vid Gävle energi att de fick erfara vid installationen av vindkraftverken på Läkerol arena, där kostnaderna för ombyggnad av tak och montering av verken vida översteg kostnaderna för själva verken. Vid installationen av den befintliga solcellsanläggningen på Gränby centrum förbereddes taket under en ombyggnad, vilket enligt Juha Kotilainen (2012) minskade kostnaderna avsevärt.

Då det antas att taket är förberett för en installation vid exempelvis en ombyggnad, antas det också att installationen av ett system omfattas av bygglov för ombyggnationen. Alltså att inget separat bygglov söks för installationen. Detta antagande görs för att det är olika förutsättningar för de olika produkterna som undersöks och det inte går att på förhand sätta ett fast belopp som ett separat bygglov skulle kosta. Dessutom var detta fallet när Gränby centrum installerade den befintliga solcellsanläggningen för ett och ett halvt år sen.

3.4.4 Krav på produkterna vid val av dem

På produkterna som har valts har ett antal krav ställts, som skiljer sig åt mellan vindkraften och solcellspanelerna. Detta för att de olika teknikerna har olika egenskaper och potentiell påverkan på omgivningen. Den största skillnaden är att vindkraftverken har rörliga delar till skillnad från solcellspanelerna, vilket gör att säkerhetsaspekten blir en viktig faktor i valet av vindkraftverk och inte lika stor i valet av solcellspaneler.

Säkerhetskravet som har ställts på produkterna är att de skall vara CE-märkta, detta är en märkning där tillverkaren intygar att produkten uppfyller alla krav i de relevanta EU-direktiven för den produktkategorin. CE-märkningen gör att tillverkaren bär ansvaret för att kraven uppfylls och eventuella följder om de inte uppfyller dessa. (Olsson, 2011) Viktigt har också varit att produkterna och installationen uppfyller Elsäkerhetsverkets krav för inkoppling av egen produktion på elnätet och det interna elsystemet. Det finns även andra certifieringar eller märkningar som vindkraftverken kan uppfylla, specifika för olika länder eller regioner. Vindkraftverk med flera certifieringar eller märkningar har premierats och valts framför andra, då detta tyder på att de har blivit testade mer grundligt av flera oberoende parter.

Efter säkerhetsaspekten har den viktigaste egenskapen på valda produkter, främst vindkraftverken, varit de estetiska egenskaperna hos dem. Enligt Mattias Gustafsson och Peter Jensen fungerar småskaliga vindkraftverk i urban miljö i dagsläget främst som en marknadsföringsprodukt. För att ett företag skall kunna profilera sig, öka medvetandet och ändra opinionen om vindkraft.

En annan aspekt som har påverkat val av produkter har varit att de ska vara lätta att underhålla. Vid anläggningen på Läkerol arena har underhållskostnaderna varit stora vilket har påverkat den kalkylerade lönsamheten. Mattias Gustafsson på Gävle energi menar att om man skall kunna hävda att man arbetar aktivt med säkerheten i anläggningen krävs det regelbundna underhåll av den, även om tillverkarna menar att minimalt underhåll krävs. (Gustafsson, intervju 2012) Vidare påpekade Mattias Gustafsson (2012) att ett antal mindre vindkraftverk med totalt lika stor effekt som ett större är att föredra utifrån underhållsaspekten, då ett mindre verk är lättare att ta ner för underhåll. Önskvärt är också att masten som verken är monterade på kan fällas, vilket underlättar underhåll ytterligare. (Gustafsson, intervju 2012) Vid valet av solcellspaneler har underhållsfrågan inte varit aktuell, detta eftersom många tillverkare av solcellspaneler uppger att deras paneler är underhållsfria. De har inga rörliga delar som kräver regelbunden översyn vilket minimerar underhåll och eftersom de flesta solcellspanelerna är självrengörande krävs det ingen regelbunden tvätt. Skottning är heller inte något som krävs då viss del av solljuset kan ta sig igenom snötäcket och då värms panelen upp vilket gör att snötäcket enkelt glider av dem. Naturligtvis finns det extremfall som kan kräva ett visst underhåll. Det som skulle kunna kräva ett underhåll är exempelvis om någon panel inte fungerar som den ska eller att den blir täckt med löv som inte faller bort när det blåser.

3.5 Simulering

Simuleringen delades upp efter energislag, då två olika program har använts för simulering av produktion solceller respektive vindkraft. För simulering av produktion från solceller har ett program som heter PVsyst version 5.63 använts. Programmet användes för att det är ett etablerat program som många företag använder sig av i projekteringen av solcellsanläggningar. I programmet importeras data från Meteonorm version 5 för att sedan kunna designa ett system av solceller utifrån önskade preferenser. Inbyggt i programmet finns det information om tusentals paneler och växelriktare som idag finns tillgängliga på marknaden. Simuleringen av produktion från vindkraftverken har gjorts i Matlab R2012b som är ett tekniskt beräknings- och analysverktyg. Även till denna simulering har data importerats från Meteonorm. Data angående verkens effektkurvor har insamlats från de tekniska specifikationerna på varje studerat verk. En effektkurva ger uttagbar effekt vid en viss vindhastighet, denna uttagbara effekt jämfördes med antal timmar en viss vindhastighet var förekommande, vilket gav den totala möjliga elproduktionen för ett verk. En mer detaljerad genomgång och beskrivning av data och arbetsgången i simuleringen finns i kapitel 6 av rapporten som behandlar fallstudien.

3.5.1 Simulering av solceller i PVsyst

Informationen i detta avsnitt har hämtats från PVsysts användarhandbok som finns tillgänglig på leverantörens hemsida.

För att en installation av solceller skall kunna simuleras så exakt som möjligt krävs det att förutsättningarna som råder på undersökta platsen ställs in. Detta för att en simulering skall kunna representera ett verkligt system på bästa sätt.

Vid uppstart av ett nytt projekt väljs den geografiska plats som skall undersökas. I PVsyst finns det cirka 300 platser i en databas, dessa platser har även tillhörande meteorologiska data. I detta examensarbete krävdes det att den platsen som skulle undersökas lades till i denna databas, en plats läggs till i PVsyst genom att platsens koordinater anges och dess höjd över havet. Koordinaterna används för att kunna göra en syntetisk fil för platsen, som sedan kan användas i simuleringen. Till platsen krävs det även att meteorologisk data kopplas på grund av att varje plats skall ha medelvärde på instrålningen för varje månad. De data som krävs för att kunna definiera en ny geografisk plats är global solinstrålning till horisontalplanet, diffus instrålning och temperatur. Som meteorologiskdata kan det antingen väljas att använda redan existerande data som finns inlagt i programmets databas eller att använda data från en extern källa.

En inställning som är viktig att ställa in för simuleringen är hur själva systemet är orienterat med avseende till solens instrålning, det vill säga vilken azimuthvinkel och vinkel från horisontalplanet en panel har. För att dessa vinklar skall kunna ställas in och optimera instrålningen till solcellerna finns det en inbyggd hjälp i PVsyst. Optimeringen kommer ifrån att transpositionsfaktorn visas som en funktion av azimuthvinkeln och vinkeln från horisontalplanet. Transpositionsfaktorn är en faktor mellan instrålningen till planet som utgörs av solcellspanelen och den globala instrålningen till horisontalplanet. Utifrån dessa två kurvor kan då de optimala vinklarna på systemet bestämmas. Denna funktion kan även användas om taket som solcellerna skall monteras på inte är horisontellt för att visa hur produktionen påverkas av lutningen.

För att ytterligare precisera simuleringen kan omgivningens påverkan på solcellsmodulerna anpassas, detta görs genom att en skuggningsfaktor kan läggas till. Detta kan göras genom att antingen en modell för skuggningsprofilen laddas in i programmet, eller att omgivningen ritas upp i det inbyggda ritverktyget. Ritverktyget ger en tredimensionell analys av skuggningen. När omgivningen och solcellsmodulerna är uppritade tas skuggningsfaktorn fram genom att solens bana simuleras och skuggningens påverkan på panelerna tas fram. I varje given position för solen tas faktorn ut geometriskt och analytiskt. Skuggningsfaktorn visas sedan i en tabell där den presenteras för solens olika vinklar, den kan även visas i en graf. Skuggningsfaktorn visar inte bara hur omgivningen påverkar panelerna utan också hur de påverkar varandra mellan de olika raderna.

I PVsyst definieras installationen som en uppsättning komponenter som utgörs av solcellerna, växelriktarna och nätanslutningen. Designen av installationen görs uppdelat för varje rad som skall ingå i den. Vid designen av en rad anges ett antal krav, som baseras på hur installationen skall se ut. Kraven som anges är önskad nominell effekt alternativt tillgängligt område för panelerna, önskade solcellspanel och växelriktare att använda. Utifrån dessa krav anpassar och föreslår programmet automatiskt en optimal lösning för hur raden skall konfigureras. Vilka produkter som önskas användas, både panelerna och växelriktarna, finns i programmets

omfattande databas över tillgängliga produkter på marknaden. Programmet anger även hur många paneler som bör seriekopplas i en rad. Rekommendationen om hur panelerna och växelriktarna skall konfigureras baseras på att programmet vill minimera de förväntade förlusterna på grund av överbelastning. Detta leder ofta till att den nominella effekten för en rad ligger på en lägre nivå än vad växelriktarna tillåter. Alla villkor och krav som har angivits presenteras och utifrån rekommendationen kan raden anpassas till användaren är nöjd.

När designen och omgivningen är anpassad på ett önskat sätt och programmet anger att anpassningen inte innehåller någon inställning som strider mot varandra kan simuleringen genomföras. Simuleringen i PVsyst sker på timbasis och utgår från vald meteorologisk datafil kopplad till den geografiska platsen som undersöks. Programmet kan dock inte hantera resultatet från simuleringen på timbasis utan resultatet presenteras på månadsbasis. Programmet tillåter användaren att själv välja vilka parametrar som denna vill simulera, det finns standardinställningar som gör att programmet tar med de parametrar som är viktiga.

Simuleringen följer ett specifikt mönster när den utförs, först läses data in från den meteorologiska datafilen. Om data för diffus instrålning saknas räknas denna ut med Liu-Jordans korrelationsmodell. Data transformeras till att instrålningen görs med panelens vinkel, för att åstadkomma detta används Perez modell för att anpassa instrålning till vinklade plan. Det som sker i transformationen är att solvinkeln ändras och anpassas till den geografiska plats som simuleringen utförs på. Den anpassade skuggfaktorn adderas till den globala instrålningen för de olika vinklarna som solen står i. Efter modifikationen av meteorologiska data som detta renderar i, fås den totala energin som når den totala solcellsytan. När den totala instrålningsenergin är modifierad och solcellernas driftförhållande har bestämts kan möjlig energi som levereras till nätet räknas ut. Hänsyn tas då till de förluster som finns i installationen.

Resultatet av simuleringen kan i PVsyst presenteras på ett antal olika sätt, resultatet kan presenteras kort i en övergripande rapport som skapas automatiskt, i tabeller och grafer. Det finns förinställda tabeller och grafer för de viktigaste parametrarna, men det går även att ta fram grafer och tabeller över önskade parametrar. Några utav de resultat som har använts i detta examensarbete är total årsproduktion, specifik produktion, förluster i installationen och den dagliga produktionen under året. Den totala årsproduktionen är den kumulativa produktionen för varje dag under året. Den specifika produktionen beskriver hur mycket energi (kWh) per installerad effektenhet (kW) som har producerats under året.

3.5.2 Simulering av vindkraft i Matlab

Simuleringen av de olika vindkraftverkens produktion utfördes i programmet Matlab. Den programmerade kod som har använts under simuleringens gång finns i sin helhet i appendix I.

I Matlab skapades ett enkelt simuleringsprogram, baserat på egenskapade funktioner, inbyggda funktioner i programmet och en funktion hämtad från Mathworks hemsida. För att detta simuleringsprogram skall kunna köras krävs det att data om vindförhållanden på platsen för simuleringen laddas in. Den första delen av programmet anpassade vindförhållandena till den specifika platsen som simuleringen skall utföras på. Den anpassning som har gjorts är att räkna ut en ny vindhastighet som baseras på den höjden undersökta vindkraftverk är uppsatta på och takets påverkan på hastigheten genom den turbulens som uppkommer.

Anpassningen till den höjd som vindkraftverken är uppsatta beror på vilken ytråhet som vinden har utsatts för. Beroende på vilken karaktär som det område från vilket vinden har kommit

ifrån, har vinden utsatts för varierande ytråheter. Detta har medfört att beroende på från vilket område som vinden har kommit ifrån har olika ytråheter använts i den empiriska vindprofilagen (vilken visas i ekvation 7) för att räkna om vindhastigheten till andra höjder. Områdena som vinden har kommit ifrån har delats in efter ett flygfoto över Gränby centrum och egen kännedom om platsen. Varje indelat område tilldelades en råhetsfaktor utifrån klassificeringen som tas upp i teoriavsnittet. I Matlab gjordes uppdelningen med hjälp av if-satser, med uppsatta villkor. Dessa villkor gjorde att rätt faktor för ytråheten användes till rätt område i den empiriska vindprofilagen.

På samma vis programmerades påverkan från taket in i samma funktion. Med en if-sats som villkorades med den riktningen som vinden färdats över taket från. För att räkna ut påverkan från taket har en koncentrationsfaktor bestämts utifrån resultaten från examensarbete *Case study wind turbine at Läkerol Arena* skrivet av *Damien Charreron och David Moreno* vid Gävle universitet. I koncentrationsfaktorn tas hänsyn till den turbulensen som skapas från taket. Den anpassade vindhastighetsvektorn plottas för att en uppfattning över hur vindförhållandena ser ut på den undersökta platsen och även årsmedelvärde för vindens hastighet tas fram i funktionen.

Vindrosen för den undersökta platsen togs fram genom en funktion som laddats ner från Mathworks hemsida, denna funktion skapades av en doktorand vid det federala universitetet i Bahia, Brasilien. (Mathworks 2010) Från denna funktion tas en vindros fram och en matris med vindhastighetsfördelningen från ett önskat antal riktningar räknas ut. Funktionen krävde viss anpassning för att rätt dimensioner skall fås i vindrosen och matrisen. Matrisen summerades för att få den totala hastighetsfördelningen för den undersökta platsen. Den kunde summeras för att mätningarna är gjorda på timbasis och vindkraftverken anses kunna ändra riktning tillräckligt snabbt (på ett fåtal sekunder) så att resultatet inte påverkas nämnvärt.

Vindkraftverkens effektkurva har lästs in för hand till vektorer utifrån de grafer som presenterats i informationsmaterialet om verken på tillverkarnas hemsidor. För att kontrollera hur de inlästa värdena för effektkurvorna stämmer överens med det som tillverkarna uppger plottades de inlästa kurvorna och jämfördes. Jämförelsen har även gjort att mindre förändringar har möjliggjorts för att förbättra de inlästa effektkurvorna. Utifrån verkens inlästa effektkurvor och vindhastighetsfördelningen på platsen räknas ett verks totala årsproduktion ut.

Produktionen räknas för ett verk och för en installation med fem stycken verk förinställt genom att multiplicera ett verks produktion med fem. Utifrån verkets placering kommer de att påverka varandra negativt vid vissa vindriktningar, det kommer maximalt vara tre verk som påverkas av de andra vid något tillfälle. För att exakt kunna ta reda på hur ett verk påverkas av ett annat krävs det att mätningar görs på en fysisk situation. Eftersom detta inte var möjligt har en bedömning gjorts om hur mycket årsproduktionen sänks med i procent för hela systemet av att tre verk påverkas av de andra. Utifrån vindrosen går det att avläsa hur ofta vindens riktning gör att verken påverkar varandra negativt. Detta resulterade i att ett procenttal togs fram för hur stor del av tiden som vindkraftverken påverkar varandra och ett procenttal för hur stor denna påverkan är.

Den totala produktionen för ett undersökt alternativ returneras tillbaka till Command Window i variabeln vindprod. I variabeln är den totala årsproduktionen för de fem undersökta vindkraftverken i ett alternativ.

3.6 Analys och diskussion

Utifrån den simulerade produktionen för de olika undersökta alternativen görs en ekonomisk analys och en prestandaanalys. Den ekonomiska analysen syftade till att ta fram det optimala systemet utifrån de alternativen som presterade bäst ekonomiskt sett. Prestandaanalysen gjordes för att bistå den ekonomiska analysen.

Prestandaanalysen baseras främst på den så kallade utnyttjandegraden. Utnyttjandegraden är viktig för resultatet eftersom intäkterna hos ett system beror på den producerade energin och utnyttjandegraden beror på hur mycket energi som produceras från ett system i förhållande till den installerade effekten. En hög utnyttjandegrad visar då att ett system ger en högre produktion i förhållande till systemets installerade effekt än en låg utnyttjandegrad. Denna fås av att dividera den faktiska produktionen med den maximala produktionen som kan uppnås. Utnyttjandegraden ser olika ut beroende på om det är vindkraftverk eller solcellspaneler som undersöks, för vindkraften är den maximala teoretiska produktionen den nominella effekten multiplicerat med antal timmar under året. Medans för solcellspaneler är den maximala teoretiska produktionen den totala installerade ytan i ett system multiplicerat med den globala instrålningen på planet. Denna skillnad presenteras i ekvationerna 1 och 2 nedan.

$$UG_{\text{vindkraft}} = \frac{E_{\text{ut}}}{(P_{\text{nom}} 8766)} \quad (1)$$

$$UG_{\text{solceller}} = \frac{E_{\text{ut}}}{(H A_{\text{tot}})} \quad (2)$$

Där UG är utnyttjandegrad, E_{ut} är levererad effekt, P_{nom} är vindkraftverkets nominella effekt, H är den globala instrålningen per m^2 och A_{tot} är den totala solcellsytan.

Det blir en viss skillnad i utnyttjandegraden mellan de båda teknikerna, då den för solceller beror på ytan och inte panelens effekt. Utnyttjandegraden för solcellerna blir en form av en total verkningsgrad från det att solens instrålning träffar jorden tills det att energin levereras från installationen. Medan utnyttjandegraden för vindkraft beror den av verkets nominella effekt och inte ytan. Detta gör att utnyttjandegraden för vindkraften och solcellerna blir inkommensurabel.

Den ekonomiska analysen syftar till att kunna bestämma vilka alternativ av produkter som skall ingå i ett optimalt system. Alltså är den optimala lösningen den som har de bästa ekonomiska förutsättningarna. I analysen har en ekonomisk utvärdering av alternativen gjorts, denna utvärdering har baserats på ett systems simulerade produktion, som är möjlig på platsen. Detta för att kunna finna det alternativ som medför hög produktion med låga kostnader.

Intäkterna för ett system har baserats på den kostnadsminskning som den producerade elen kan ge upphov till. Kostnadsminskningen har räknats ut från det aktuella priset som betalas för den elen som, utan det installerade systemet, Gränby centrum annars skulle behövt köpa från sin elleverantör. Den ekonomiska analysen av de olika alternativen har gett ett nuvärde för

varje alternativ. Det nuvärde som har använts är det nuvärde för det framtida kassaflödet baserat på en kalkylränta.

$$NV = \sum_{k=1}^n \frac{KF(k)}{(1+r)^k} \quad (3)$$

Där NV är nuvärdet, $KF(k)$ är kassaflödet av år k och r är den använda kalkylräntan.

Eftersom nuvärdet baseras på kassaflödet, har det påverkats av investeringskostnaden, elpriset och kalkylräntan. En känslighetsanalys utfördes på dessa faktorer för att kunna se hur nuvärdet förändras om det sker en förändring i dessa faktorer. Känslighetsanalysen visar vilken eller vilka av dessa parametrar som är signifikanta för resultatet på nuvärdet. Detta är intressant att undersöka då det visar vilken parameter som bör visas mest hänsyn till vid en eventuell framtida projektering av liknande system. Känslighetsanalysen utförs på nuvärdet för det system som uppvisade det bästa ekonomiska resultatet. Även denna analys har varit uppdelad för de olika teknikerna, detta på grund av att parametrarna kan ha olika signifikansnivå för de olika teknikerna. De två alternativen för respektive sol- och vindkraft som uppvisade det lägsta nuvärdet bildar det optimala systemet.

Även ett brytpris togs fram för varje alternativ, detta brytpris indikerar vilket pris per producerad kWh som vid investeringstillfället ger ett nuvärde som blir noll. Brytpriset kan ses som en punkt i känslighetsanalysen för hur elpriset påverkar nuvärdet. Om brytpriset för ett alternativ är lägre än det aktuella elpriset visar det att alternativet kommer att gå med vinst. Om brytpriset är högre än det aktuella elpriset visar det hur mycket elpriset måste höjas till för att det alternativet skall bli lönsamt. Brytpriset togs fram med den inbyggda funktionen målsökning i Excel, där ett önskat värde för en cell anges och värdet i en annan cell varieras för att uppnå det önskade värdet.

Den ekonomiska analysen har utförts i Excel, där har en färdig mall för ekonomisk projektering av elproduktion använts. Denna mall tillhandahölls av Energi och Elkraftsgruppen på Grontmij AB, som använder denna vid projektering av vindkraft. En djupare genomgång av denna finns i det avsnittet som behandlar tillvägagångssättet i analysen under fallstudien.

4 Vind

I detta avsnitt kommer inledningsvis de fysikaliska bakgrunderna för vind och hur energi utvinns ur den att gås igenom, för att sedan övergå i hur vinden påverkas av förhållandena runt om kring. Därefter övergår det i en beskrivning av vilka störningar som kan uppkomma av själva energiutvinningen från vinden och de två tekniker som används för att göra det.

4.1 Energi i vinden

Energiinnehållet i vinden är den kinetiska energin som skapas när tryckskillnaderna i två luftmassor jämnar ut sig, alltså en luftmassa m som har en hastighet v , vilket visas i ekvation 4

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

Vad som sedan blir intressant att titta på när det gäller utvinning av energin i vinden är effekten som rör sig genom en tvärsnittsarea vinkelrätt mot vinden. Vindens effekt presenteras i ekvation 5, där ρ är luftmassans densitet, A är tvärsnittsarean och v är vindens hastighet.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)\rho A v^3 \quad (5)$$

Utifrån ekvation 5 är det tydligt att det är vindhastigheten som är den faktor som betyder mest i fråga om energiinnehåll i vinden. Hastigheten följer ett kubiskt förhållande i ekvationen, detta gör att om vindhastigheten fördubblas blir vindens energiinnehåll åttadubblat. (Wizelius 2007)

Det är skillnaden i kinetisk energi som ett vindkraftverk utnyttjar vid energiutvinning, verkets blad fångar upp vinden och det resulterar i att viss energi övergår till rörelsemoment i rotorn. Den utvunna energin från vinden blir den skillnad i vindhastigheten före och efter rotorn. Det är fysikaliskt omöjligt att utvinna all energi som vinden innehåller, detta på grund av att då skulle vindhastigheten bakom verket bli noll och luften helt stillastående. (Siden 2009) Om luften var helt stillastående bakom rotorn skulle inte någon ny luft kunna flöda genom rotorn. Det teoretiskt maximala energiuttaget sker då hastigheten bakom verket har sjunkit till ungefär en tredjedel av hastigheten innan. Detta betyder att man kan ta ut 16/27-delar ur vindens energi. (Hodge 2010) Detta förhållande kan ses i ekvation 6.

$$P_{\text{verk,max}} = \frac{16}{27} P_{\text{vind}} \quad (6)$$

Ekvation 6 är den så kallade Betz lag och är den maximala teoretiska effekten som ett vindkraftverk kan utvinna ur vinden. Den effekt som behandlas i ekvation 6 är den mekaniska effekten som rotorns dragkraft påverkar huvudaxeln med. För att beskriva den elektriska effektuttaget från vinden krävs det att förlusterna i överföring och omvandling i verket tas i åtanke. Dessa kan uppkomma i exempelvis lager, strömriktare och generator. (Sidén 2009)

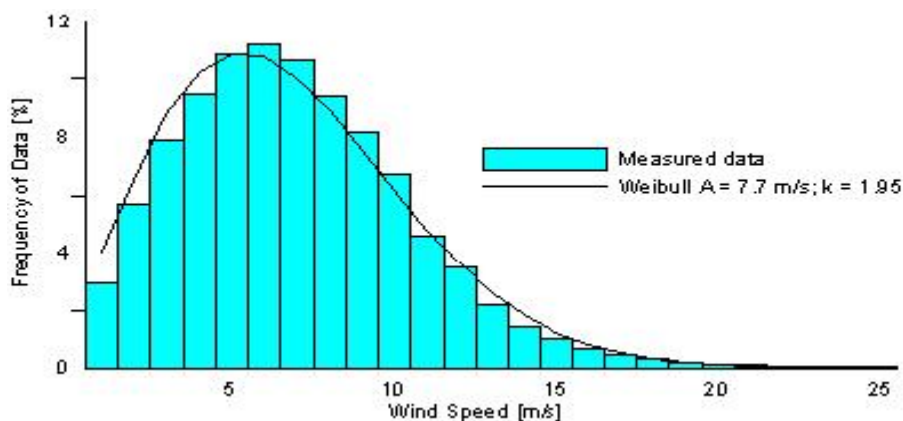
4.2 Vindförhållanden

För att kunna bestämma hur mycket energi som kan utvinnas på en specifik plats krävs det att vindförhållandena på den platsen kan förstås och beskrivas.

4.2.1 Vindfördelning

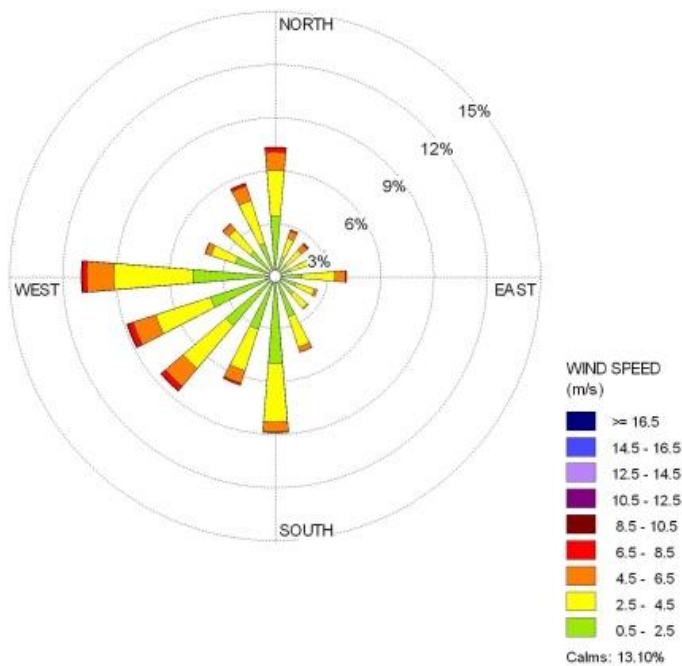
Vindhastigheten, över tid, i ett fritt flöde, kan beskrivas som en sannolikhetsfördelning i form av en Weibullfördelning. Ur denna fördelning, vilken visas i ekvation 7, fås med vilken frekvens som en viss vindhastighet förekommer. (Sidén 2009 s.83) Det fria flödet uppnås i det övre av de två gränsskikten och går att skala om från det undre gränsskiktet. (Mertens 2006 s.29)

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (7)$$



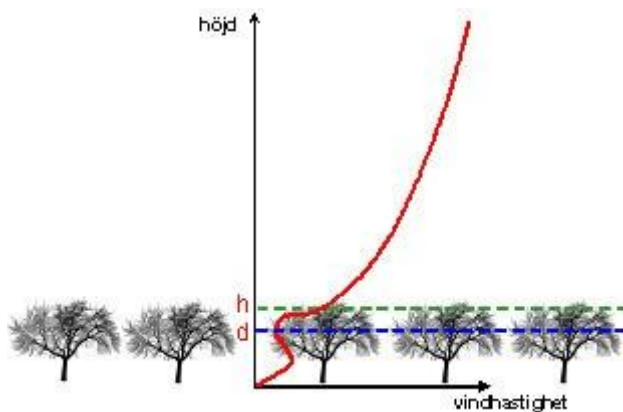
Figur 3. Exempel på en Weibullfördelning uppskattad från mätdata. (Bildkälla: EMSD 2007)

Parametern k är till för att forma kurvan och A är till för att kunna anpassa skalan på kurvan. Rätt anpassning av dessa parametrar ger en bra beskrivning av vindförhållandet på en viss plats. (Sidén 2009 s.83) Beskrivningen av vindförhållandet på en viss plats, genom Weibullfördelningen, utökas oftast och med fördel av en vindros som beskriver från vilka riktningar vinden kommer ifrån. Även i vindrosen visas hur stor del av vinden som kommer från varje riktning baserat på Weibullfördelningen. (Christianson och Olenmark 2009 s.5-6) En vindros presenteras i figur 4.



Figur 4; Vindros som visar vindförhållandena uppdelat på 16 riktningar. (bildkälla: SMHI 2010)

För att beskriva den horisontella vindhastigheten används en så kallad vindprofil, där hastigheten ökar med höjden.



Figur 5. Vindprofil. (Bildkälla: Energimyndigheten 2010)

Vindprofilen följer ett logaritmiskt förhållande i teorin, men det finns även ett förhållande som användas i större utsträckning då det är enklare att använda matematiskt. Detta förhållande baseras på empiriska mätningar och kallas den empiriska vindprofilagen. (Emeis och Turk 2007 s. 61-64) Vilken visas i ekvation 8 nedan.

$$u(Z) = u(Z_A) \left(\frac{Z}{Z_A} \right)^n \quad (8)$$

Där Z_A är den höjden som mätdata finns för, $u(Z_A)$ är den uppmätta vindhastigheten. Z är den höjden där vindhastigheten skall extrapoleras, $u(Z)$ är den extrapolerade vindhastigheten. n är Hellman exponenten och det är den råhetsfaktor (vilken beskrivs nedan) som ytan har där vindhastigheten skall extrapoleras. (Emeis och Turk 2007. S.61-64)

4.2.2 Omgivningens påverkan på vindförhålladen

Vindens hastighet påverkas av allting som kan stå i vägen för luftmassan som är i rörelse, det kan vara hinder som lägivare, byggnader, skog och dylikt. Även karaktären på terrängen kan påverka vindhastigheten och då fungera som ett hinder. Ju större friktion som vinden utsätts för från hinder och terräng, desto mer saktas vinden ner. Termen *yråhet* används för att beskriva det skikt som bildas över ojämnheterna och som utsätter vinden för friktionen som påverkar den. Detta skikt kan vara från några enstaka centimetrar till flera meter högt, beroende på karaktären på terrängen och hindren. På grund av detta har *yråhet* delats upp i några olika klasser, dessa klasser presenteras i tabell 2.

Tabell 2: Råhetsklasser. Wizelius T.(2007)

Råhets klass	Karaktär	Terräng	Lägivare	Gårdar	Tätorter	Skog
0	Hav, sjöar, fjordar	Öppet vatten	-	-	-	-
1	Öppet landskap, med lite vegetation och bebyggelse	Platt till jämt kuperat	Endast låg småvegetation	0-3 gårdar per km ²	-	-
2	Landsbygd med en blandning av öppna ytor, vegetation och bebyggelse	Platt till kuperat	Skogsdungar, alléer är vanliga	Upp till 10 st gårdar per km ²	Byar och små tätorter förekommer	-
3	Mindre tätorter eller landsbygd med många gårdar, dungar och lägivande hinder	Platt till starkt kuperat	Många dungar, vegetation och alléer/träridåer	Många gårdar, mer än 10 per km ²	Många byar, små tätorter eller förstäder	Låg skog
4	Större städer eller hög tät skog	Platt till starkt kuperat	-	-		Hög tät skog

Vindstyrkan varierar över tiden, även över korta tider då den ideligen på ett oregelbundet och stötvis sätt. (SMHI 2009 a) Detta beror på karaktären på terrängen och eventuella hinder, det vill säga yråhetsskiktet. Vid olika klasser i yråheten bromsas vinden upp och då bildas det luftvirvlar. Dessa luftvirvlar påverkar luftmassan runt om och då uppkommer *turbulens* i luftmassan.(Wizelius 2007) Turbulensen kan även uppkomma i områden och skikt med stora temperaturvariationer. Beroende på yråheten blir turbulensen olika kraftig, även vindens hastighet påverkar hur kraftig turbulensen blir och hur tjockt skiktet som påverkas av turbulensen är. Turbulensen avtar oftast över en kilometers höjd. (SMHI. 2009) Även om vinden har samma medelhastighet på två olika platser, kan det förekomma olika grad av turbulens. Turbulensens effekt på utvinnandet av energi från vinden är negativ och kan ge lägre produktion. Detta på grund av att utvinnandet av energi kräver ett flöde av luftmassan och turbulensen stör detta flöde. (Siden 2009 s98)

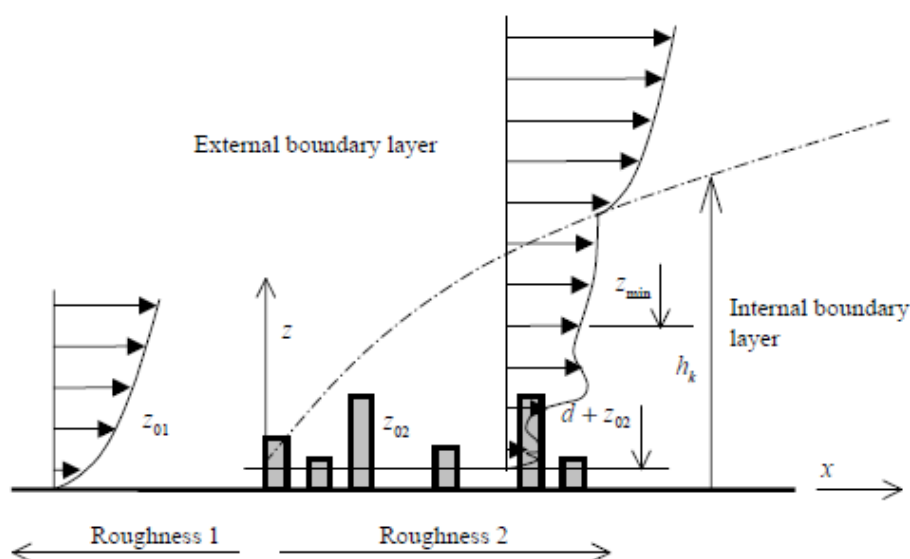
Vindprofilen för en yta med högre yråhet blir flackare och hastigheten ökar snabbare med höjden, dock blir den totala vindhastigheten för en yta med lägre yråhet högre. (Mertens 2006 s18-19) I vindprofilen måste hänsyn tas till vilken nivå som vindens hastighet sägs vara noll vid, denna nivå kallas *nollplan*. Denna nivå beror på terrängen och eventuella hinder och nollplanet

förskjuts då till den höjden som vindens gränsskikt upplever som marknivå, detta kallas för nollplansförskjutning. Den luftmassa som är ovanför nollplansförskjutningen heter atmosfäriskt gränsskikt och den turbulens som uppkommer utifrån ytråheten påverkar hur lagret set ut. (Walker 2011) Nollplansförskjutningen används främst när vinden skall kartläggas i så kallade vindkartor, då kunskapen om typen av markanvändning är kända men inte den verkliga höjden på exempelvis ett skogsparti. (Sidén 2009 sid 96-97)

4.2.3 Vindförhållanden i urban miljö

När vinden kommer in i urbana miljöer utsätts den för mer hinder än i rurala miljöer. Detta leder till att urbana miljöer naturligt har en högre ytråhet. Dessutom varierar hindrens storlek och form i en allt högre grad, vilket gör att nollplansförskjutningen blir väldigt intrikat att ta fram. (Mertens 2006 s.19) På grund av den ökade ytråheten, som den ökade graden av hinder ger, kommer det i urbana miljöer förekomma mycket mer turbulens än i rurala miljöer. De mer turbulenta förhållandena leder till att vinden får en annan karaktär, vinden rör sig på ett ryckigare sätt och med mer variation i riktning. (Walker 2011) Detta gör att vindförhållandena i urban miljö blir väldigt svårbedömda.

Övergången från en yta med låg ytråhet till en yta med hög ytråhet delar upp atmosfäriskt gränsskikt i två nya lager, externt och internt gränsskikt vilka kan ses i figur 6. (Mertens 2006 s.21-22)

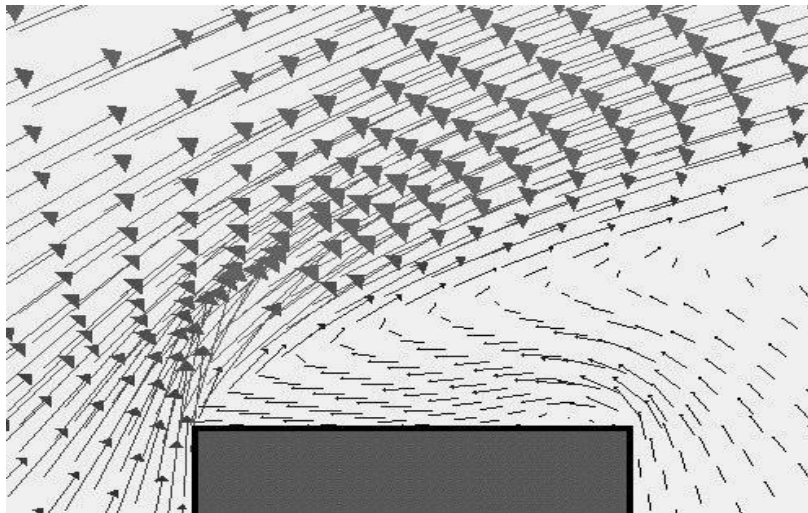


Figur 6. Bild över hur vindprofilen förändras vid övergången från en yta med låg ytråhet till en med hög. (Bildkälla: Mertens 2006)

Gränsen mellan de båda lagren påverkas och bestäms av skillnaden i ytråheten och av den ökade turbulensen. Effekten av det ökade steget i ytråheten påverkar inte hela det ursprungliga lagret utan är begränsad höjden h_k till det interna gränsskiktet som efter ett tag avtar. (Mertens 2006 s22)

Luftflödet kring en byggnad påverkas av hur byggnaden är utformad, byggnader designade för att ha goda aerodynamiska egenskaper påverkar luftflödet mindre än byggnader som inte är designade med den utgångspunkten. Dock kan de aerodynamiska egenskaperna bero på från vilken vinkel som vinden kommer ifrån. När vinden utsätts för ett hinder, såsom en byggnad,

uppkommer det gränsskikt kring detta hinder. Runt en byggnad med aerodynamiska egenskaper skapas det ett väldigt litet gränsskikt, medan för en byggnad utan aerodynamiska egenskaper(exempelvis en kantig byggnad) uppkommer det ett större och mer komplicerat gränsskikt. Under det nybildade gränsskiktet skapas det en separationsbubbla med turbulens, storleken på denna separationsbubbla bestäms av vindens hastighet. (Mertens 2006 s23-24)



Figur 7. Vindflöde kring en kantig byggnad. Bildkälla: Mertens 2006

För att bestämma karaktären och storleken på luftflödet runt en byggnad görs en så kallad "Computational fluid dynamics"-analys, vilket visas i figur7. Ur en sådan analys tas luftflödet i olika punkter kring en byggnad i beaktningen och utifrån denna analys kan placeringen på ett vindkraftverk bestämmas.(Christianson och Olenmark 2009 s5) I Mertens (2006) identifieras ett antal faktorer som påverkar utseendet på gränsskiktet på taket ser ut, vilka presenteras nedan.

- Takets positionering.
- Ytråheten på fasaden.
- Byggnadens storlek.
- Avrundningen på takkanter.
- Ytråhet innan byggnaden.

Om det är högre ytråhet innan en byggnad kommer den så kallade stagnationspunkten, som är den punkt där trycket från luftflödet på byggnaden är som störst, att vara högre upp på byggnaden. Det luftflöde som ligger ovanför stagnationspunkten är det flöde som kommer att vända uppåt och gå över byggnadens tak.(Mertens 2006 s.32-34)

Byggnaden kan ha en koncentrerande och accelererande effekt på vinden, Mertens (2006) menar att den effekten påverkas av byggnadens utformning, ytråheten kring byggnaden, vindriktningen och höjden över taket. I Mertens(2006) gjordes det en CFD-analys där luftflödet analyserades i tre olika punkter lokaliserade på ett tak på en byggnad med skarpa kanter. Punkterna var placerade på; mitten, ena kanten på långsidan och i ett utav hörnen. Resultat från denna undersökning visade att en lokalisering av ett vindkraftverk på mitten utav taket var att föredra, på grund av att luftflödet i den punkten hade mindre variation än i de andra punkterna. Dock är mätpunkten i mitten belägen högre upp från taket än de andra två punkterna, vilket

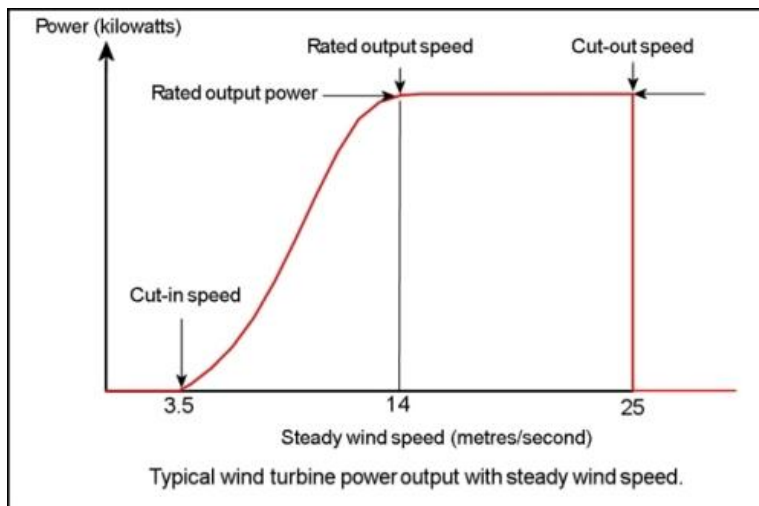
har påverkat resultatet. Mittenpunkten är placerad tillräckligt högt för att vara belägen över det gränsskikt som bildas i luftflödet över taket. (Mertens 2006 s.70-72) Vilket han tidigare påpekat att vid placeringen av ett vindkraftverk på taket på en byggnad bör själva rotorn vara placerad ovanför byggnadens gränsskikt. (Mertens 2006 s.33) I examensarbetet Case study wind turbine at Läkerol Arena har författarna tagit fram en koefficient som de kallar koncentrationskoefficient. Denna har de tagit fram genom en luftflödesanalys med mätningar i olika punkter på taket på Läkerol arena. Koefficienten talar om vilken påverkan taket har på vindhastigheten. Koefficienten multipliceras med den ursprungliga vindhastigheten för att få fram vindhastigheten med takets påverkan inlagd. Författarna tar fram en koncentrationskoefficient för alla undersökta vindriktningar och multipliceras med vindhastigheten som kommer från den vindriktningen. Koefficienten i den undersökningen varierade mellan 0,77 och 0,97. (Charreron och Moreno 2010 s.32-33)

Turbulensen som uppkommer från en byggnad påverkar inte bara vinden direkt vid själva byggnaden utan även vinden bakom byggnaden kommer att innehålla en viss grad av turbulens. Hur långt efter en byggnad som vinden fortfarande har en viss grad av turbulens beror på hur hög byggnaden är. (Mertens 2006) Denna turbulens är det som blir åtskillnaden mellan de två gränsskikten som bildas när vinden träffar en byggnad, när turbulensen har ebbat ut har gränsskiktet gått tillbaka till den höjden som det hade innan byggnaden. Om det är en fristående byggnad ligger gränsskiktet återigen vid marken. Vilken höjd gränsskiktet har efter en byggnad beror givetvis på vilken ytråhet som området bakom den har.

4.3 Vindkraftverk

Gemensamt för alla vindkraftverk är att rotorn är den komponent som bestämmer hur mycket energi som kan utvinnas ur vinden. Den så kallade svepytan är den maximala ytan som rotorn spänner upp när den roterar, svepytan är den yta som vinden flödar genom. Detta betyder att ju större rotorstorlek, desto större svepyta och större energiuttag ur vinden. (Wizelius 2007 s.44-45) Det kan ses som om ett vindkraftverks svepyta är parametern A i ekvation 5.

Alla vindkraftverk har en märkeffekt, som är ett dimensionerat mått på hur mycket belastning ett verk klarar av. Märkeffekten är den maximala effekten som ett verk kan nyttiggöra, den uppnås vid en bestämd vindhastighet. Vid hastigheter över denna hastighet regleras effekten ner, genom bromsning av rotorn, så att den inte blir för hög och kan skada verket. (Wizelius 2007 s.113) Märkeffekten kan utläsas i vindkraftverkens effektkurva. En effektkurva visar hur mycket effekt som utvinnas från vinden av ett specifikt verk. Kurvan visar hur stor effekt som verket ger vid en viss vindhastighet. Sådana kurvor räknas ut utifrån verkets komponenters olika verkningsgrader och kompletteras sedan med mätningar på uppbyggda verk. (Wizelius 2007 s.148)



Figur 8. En typisk effektkurva för ett vindkraftverk. (Bildkälla: Wind power program)

För att sedan räkna ut möjlig produktion från ett verk på en projekterad plats krävs det att man vet vindens hastighetsfördelning på just den platsen. När effektkurvan multipliceras med hastighetsfördelningen, Weibullfördelningen, fås produktionen. (Wizelius 2007) Vindkraftverken kräver att det blåser med en viss hastighet för att kunna starta upp och sedan när vinden blir tillräckligt hög kopplas verket in i drift, dessa två hastigheter heter; "start-up speed" och "cut-in speed". När sedan vindkraftverket har nått sin maximala effekt bromsas rotorn upp så att effektuttaget blir jämnt. Av säkerhetsskäl finns det även en övre hastighet då rotorn bromsas och stannar. Detta som en följd av de stora påfrestningarna som materialet skulle utsättas för om verken var i drift vid höga vindhastigheter. Dessa vindhastigheter uppkommer sällan, men bromssystem skall finnas på verken av säkerhetsskäl. (Wind power program)

För att utvinna energi ur vinden finns det olika tekniker som i dagsläget används i varierande utsträckning. Teknikerna klassificeras efter hur rotoraxeln är placerad, horisontell eller vertikal. Sett till installerad effekt är verk med horisontell axel överrepresenterade, detta på grund av att horisontalaxlade vindkraftverk (HAWT) generellt klarar av att leverera en högre effekt på en större skala. (Hodge 2010 s.56-59) De vertikala vindkraftverken (VAWT) kan delas in i två typer beroende på vilken princip de använder sig av att utvinna energi ur vinden, lyftkraften på bladet eller tryckkraften på bladen. (Hodge 2010 s.59) De två olika typerna av vindkraftverk, HAWT och VAWT, har varierande egenskaper som gör att de får olika fördelar gentemot varandra i olika förhållanden.

4.3.1 Horisontalaxlade vindkraftverk

Horisontalaxlade vindkraftverk (HAWT) är i dagsläget en etablerad teknik och utvecklingen går mot att göra det tekniskt möjligt att bygga större och effektivare verk. Det faktum att det är en mogen teknik gör att det i dagsläget finns många kommersiella lösningar i olika skala, från stora vindkraftsparker med flera hundra verk till mindre lösningar för den enskilde konsumenten. (Andersson, intervju, 2012)

För att ett HAWT på ett optimalt sätt skall kunna utnyttja energin i vinden måste rotorn vara horisontell mot vindens riktning. Detta gör att verk med fast rotorhus där rotorn inte kan rikta in sig mot vinden blir mindre effektiva på platser där vindriktningen varierar mycket. Dock finns det teknik för att förhindra detta, nämligen genom så kallad "yaw-kontroll" som riktar

verket mot vinden. Denna teknik blir effektiv när vindriktningsförändringarna är relativt långsamma. I större verk krävs det en motor för att sköta "yaw-kontrollen". I småskaliga krävs det ofta ingen motor för att sköta "yaw-kontrollen", utan det kan vinden göra om det finns en riktningsskena av något slag. (Sidén 2009) Det finns två sätt som ett HAWT kan ha rotorn i förhållande till maskinhuset, placerat mot vinden eller på läsidan av det. Majoriteten av vindkraftverken i Sverige har rotorn placerade mot vinden. (Wizelius 2007 s.95)



Figur 9. Ett typiskt vindkraftverk med horisontell axel. (Bildkälla: Windturbine installer)

Idag används två typer av generatorer i horisontalaxlade vindkraftverk, synkrogenerator och asynkrogenerator. En asynkrogenerator är relativt billig att fabricera på grund av att det inte krävs någon kraftelektronik för att fasa in den på nätet, dock krävs det en växellåda och en mekanisk broms för att varvtalet inte får bli för stort i generatoren. (Sidén 2009) Detta leder till att antalet rörliga komponenter ökar och därför även kravet på underhåll ökar. Dessutom är risken större att störande ljud uppkommer i de rörliga delarna. På grund av att axeln sitter horisontellt krävs det att de mekaniska komponenterna är placerade uppe i rotorhuset. Detta gör att underhållet av HAWT blir en komplicerad process, med många risker. En synkrogenerator klarar av att generera ström över ett bredare varvtalsregister, men detta leder till att den levererade energin är av varierande kvalitet. Emellertid finns det kraftelektronik som kan behandla detta och att det då går att fasa in den på nätet. Kraftelektroniken är relativt dyr och kan utgöra nästan hälften av kostnaden för verket. Dock krävs det ingen växellåda och mekanisk broms, vilket leder till mindre komponenter som kräver underhåll och nästan ljudlös drift. Eftersom en synkrogenerator kan arbeta under varierande varvtal kan en sådan generator hantera turbulens på ett bättre sätt än en asynkrogenerator. (Windon)

4.3.2 Vertikalaxlade vindkraftverk

Vertikalaxlade vindkraftverk (VAWT) är en teknik som inte har uppnått samma mognadsgrad som HAWT, dock finns det ett stort antal lösningar på marknaden. Merparten av de lösningar som idag finns på marknaden är av en mindre skala. En tveksamhet när det gäller VAWT är att det finns ett begränsat antal undersökningar som är gjorda av tredje part. (Sidén 2009) Detta har gjort att det finns begränsad oberoende kunskap om hur VAWT presterar över tid och hur de påverkar omgivningen genom exempelvis störningar.

Den stora skillnaden mot ett HAWT är att axeln och rotorn hos ett VAWT är vertikal, detta leder till att generatoren och komponenterna kan placeras mer åtkomligt på marken istället för

längst upp i tornet. Detta gör att underhållet blir mycket mindre komplicerat, dessutom använder sig många tillverkare av synkrongeneratorer vilket leder till mindre rörliga komponenter.(Winton) Användandet av synkrongeneratorer leder även till att många tillverkare hävdar att deras verk är i princip ljudlösa under drift, med undantag från vindljudet som genereras när rotorn rör sig genom luftmassan.(Sidén) Därtill är den viktigaste skillnaden, mellan ett VAWT och HAWT, att ett VAWT kan fånga upp vinden oberoende vilken riktning den kommer från, vilket leder till att rotorn inte behöver riktas mot vinden. Dessutom blir då ett VAWT mindre känsliga för snabba förändringar i vindriktningar som förknippas med turbulens i urban miljö. Detta måste givetvis också kopplas samman med att många tillverkare av VAWT använder sig av en synkrongenerator. Dock är det teoretiska effektuttaget i ett VAWT lägre än i ett HAWT. (Dursun och Sağlam 2012)

VAWT:s kan utformas på olika sätt med avseende på utformningen och konfigurationen av rotorn, dessa beror på vilken fysikalisk princip som används av verket för att utvinna energi ut vinden; lyft- eller tryckkraft verkande på bladen.(Hodge 2010 s.59) Exempel på dessa två typer av VAWT visas i figur 10 nedan.



Figur 10. Ett vindkraftverk med vertikal axel. (Bildkälla: Vindkraftkultur. 2010)

Mertens (2006) skriver att en rotor som använder lyftkraft har högre verkningsgrad och lägre materialåtgång än en rotor som använder sig av tryckkraften på bladen.(Mertens 2006 s.7)

4.3.3 Störningar från vindkraftverk

Det finns ett antal störningar som kan uppkomma från själva vindkraftverken. Störningarna i urban miljö är varken fler eller färre än i rural miljö, det som blir skillnaden mellan störningar i urban och rural miljö är att det är fler personer som kan utsättas för störningarna. Det finns heller ingen egentlig skillnad på störningarna från ett stort verk jämfört med ett småskaligt.(Gustafsson, intervju, 2012)

En av de vanligaste störningsmomentet från ett vindkraftverk är att det i drift avger ljud. Detta ljud kan delas in i två kategorier; mekaniskt från de rörliga delarna i verkets hus och vindbruset som uppkommer när rotorbladen rör sig genom luftmassan.(Jensen, intervju, 2012) Det mekaniska ljudet varierar beroende på vilken typ av generator som används för att utvinna energin ur vinden, en asynkrongenerator har mer mekaniska delar då den kräver en växellåda för att hålla varvtalet konstant till generatorn medans en synkrongenerator inte har många

rörliga mekaniska delar. Detta gör att ett verk som använder asynkrongenerator ger ifrån sig mer ljud och till en högre styrka, än ett verk som använder en synkrongenerator.(Mertens 2006) Ljudet som kommer ifrån rotorerna har stora likheter med ljud från vinden en blåsig dag, ljudnivån påverkas av hastigheten på rotern och vindhastigheten. Detta ljud uppfattas ofta som mindre störande än det mekaniska. (Naturvårdsverket, 2012a)

Eftersom ljuden kan verka störande på sin omgivning finns det riktlinjer från Naturvårdsverket (NVV) som begränsar hur högt ljudet från ett vindkraftverk får vara. Begränsningarna beror på karaktären av bakgrundsljudet på platsen. Ett riktmärke som NVV anger, finns i ett av många tillståndsbeslut för vindkraftsverk, är att ljudet inte får överstiga 40 dBA i närheten av bostäder och 35 dBA i områden med svagt bakgrundsljud. dBA är en viktning av ljudstyrkan och hur bra en människa kan höra en viss frekvens, att jämföra med dB som bara är ett mått på ljudstyrkan över hela frekvensspektrumet. (Naturvårdsverket, 2012b)

En annan störning som kan uppkomma från ett vindkraftverk är vibrationer, dessa uppkommer när en massa rör sig genom ett flöde av något slag. Något som blir uppenbart i ett vindkraftverk då rotorbladen rör sig genom ett flöde av luft. Dessa vibrationer i rotern kan sedan fortplanta sig ner i tornet och vidare ner i fundamentet.(Vattenfall 2012b) I rural miljö blir påverkan av vibrationer mindre på grund av att vindkraftverken inte får byggas närmare än 300 till 1000 meter från bebyggelse.(Naturvårdsverket, 2012a) I urban miljö däremot kommer verken betydligt närmare bebyggelsen och är till och med monterade på byggnader. Risken är då att vibrationerna fortplantar sig till eller ner i byggnaden, då kan dels vibrationer i stommen och även ljud från vibrationerna kan uppkomma (så kallade stomljud). Det som påverkar hur mycket vibrationerna påverkar byggnaden är hur verket är infäst. (Gustafsson, intervju, 2012)

Det finns åtgärder för att försöka ta bort vibrationerna som kan uppkomma, dock är det svårt att helt kunna försäkra sig mot att vibrationer inte ska fortplanta sig ner i byggnaden. De verken som är uppsatta på Läkerol arena har monterats stumt i stommen, där har man upplevt vibrationer och ljud till viss del. Dock klassas arenan som en industrilokal vilket betyder att viss grad av vibrationer är acceptabla. (Gustafsson, intervju, 2012) Det finns även ett vindkraftverk som är monterat på taket till en gymnasieskola i Gävle, ett verk med effekten tre kilowatt.(Jensen, intervju, 2012) Det verket sitter uppe på en stålkonstruktion fastbultad i betongplattan på taket, med flertalet tunna gummiplattor mellan taket och infästningen. Detta har gjort att inga vibrationer eller ljud har upplevts sedan det monterades i början av 2009. (Gustafsson, intervju, 2012) Även Mertens(2006) menar att en stum uppställningsanordning har potentialen att minska påverkan av vibrationer från ett vindkraftverk.

En annan störning som kan uppkomma av ett vindkraftverk är en skuggningseffekt beroende på verkets placering. Den uppenbarar sig som en statisk skuggning från tornet och rotor när verket inte roterar. Dessutom uppkommer det en stroboskopliknande skuggning när verket är i gång och rotern roterar. Utbredningen av skuggorna påverkas av hur högt verket är, rotordiameter, solstånd, vindriktning, molnighet. (Naturvårdsverket 2012c) Även skuggningen är en störning som kommer att upplevas av ett större antal personer om verket är placerat i urban miljö och det är samma faktorer som här påverkar utbredningen av skuggningen. Dock är vindkraftverk i urban miljö oftast inte av samma storlek som i rural miljö, vilket gör att utbredningen av skuggorna från dem inte blir lika stor. Även verkets placering på taket och takets utformning kan påverka hur skuggningen utbredd och därigenom påverkan från verket i urban miljö.

Vid vissa specifika meteorologiska omständigheter kan is bildas på ett verks rotorblad, både när de står still och under drift. Den bildade isen kan vid ett senare tillfälle under driften lossna och slungas iväg stora avstånd, vilket kallas för iskastning. Avståndet som isen kan kastas beror på hur högt rotorn sitter ovanför marken, dess storlek och vilken hastighet den har. Enligt Vattenfall lossnar den största delen av isen på bladen av vid start av ett verk. (Vattenfall, 2012b)

Vid projekteringen av vindkraftverken på Läkerol arena diskuterades det mycket kring risken för iskastning, dock gjordes bedömningen att denna skulle vara minimal och inte kunna komma någon till skada. Verken som monterades valdes delvis för att deras varvtal är relativt lågt, vilket enligt Mattias Gustafsson betyder att risken för iskastningen minimeras. Vindkraftverken har nu suttit uppe och varit i full drift under en kall och nederbördsrik vinter utan minsta tecken på iskastning. (Gustafsson, intervju, 2012)

Störningarna från vindkraftverk påverkar inte bara dess omgivning utan kan även påverka andra vindkraftverk om de är placerade i varandras närhet, i en vindkraftspark exempelvis. Detta eftersom de dels utviner en del av vindens energi och dels uppkommer det turbulens efter dem. Turbulensen sprids över en yta bakom verket, för att luftflödet strävar efter att flöda fritt som det gjorde innan det passerade rotorn. Detta kallas för wake-effekt, den påverkar verken bakom negativt eftersom vindförhållandena försämrats. Utifrån rotordiameter finns det en tumregel för hur vindkraftverk skall placeras för att minimera den negativa påverkan av wake-effekten. Enligt denna tumregel ska verken placeras på ett avstånd med 6-8 gånger rotordiametern mellan varandra. (Manwall, McGowan och Rogers 2009 s.421-423)

5 Sol

I detta avsnitt kommer inledningsvis de fysikaliska bakgrunderna för solinstrålning och hur energi utvinns ur den att gås igenom, för att sedan övergå i hur den påverkas av förhållandena runt omkring. Därefter övergår det i en beskrivning av vilka tekniker som används för att utvinna energi ur instrålningen

5.1 Energi i solinstrålningen

De flesta energikällor har sitt ursprung i den strålning som nått jorden från solen. Inte bara förnyelsebara energikällor som exempelvis vind utan också lagrad solenergi i koncentrerad biomassa som har omvandlats till fossilenergi. (Chen, 2011 s. 1-4) Utvinning av energi direkt från solinstrålningen har högre potential än de andra energislagen tillsammans. Den genomsnittliga energin som når atmosfären från solen är 1336 W/m². (SMHI 2009b) All solstrålning når inte jordens yta, utan cirka 30 procent reflekteras ut i rymden av atmosfären och cirka 20 procent absorberas av moln och molekyler i luften. Lägg till detta att ungefär tre fjärde delar av jordens yta är vatten. Om ungefär 10 procent av den av den totala solstrålningen som träffar jorden går att utnyttja krävs det endast 0,1 procent av denna för att tillgodose världens hela energibehov. (Chen, 2011 s.1-4)

I strålningen är det fotonerna som är energibärarna. Energiinnehållet hos en foton beror på dess våglängd och frekvens, detta förhållande visas i ekvation 9.

$$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda} \quad (9)$$

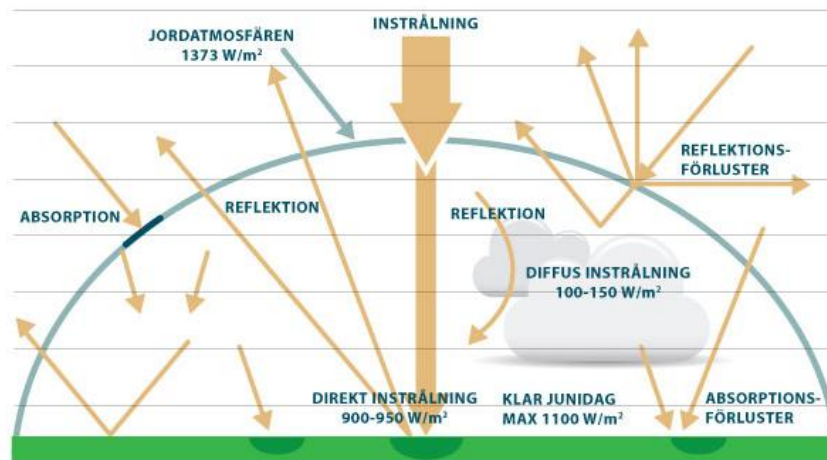
E är fotonens energi, h är Plancks konstant, c är ljusets hastighet och λ är fotonens våglängd.

5.1.1 Solinstrålningen i Sverige

I Sverige är intensiteten av den årliga solinstrålningen mot horisontella ytor i norr omkring 800 kWh/m² och omkring 1000 kWh/m² i de södra delarna av landet. Eftersom solinstrålningen aldrig träffar Sverige vinkelrät krävs det en yta som är vinklad mot solen för att uppnå en maximal instrålningsnivå. I Sverige är denna vinkel från horisontalplanet cirka 45 grader. (Sidén 2009 s.43-45) Dessutom sker det stora variationer i instrålningen mellan årstiderna när jordaxelns vinkel mot solen varierar. (SMHI 2009b). Det är inte bara vinkeln mot horisontalplanet som är viktig, utan även vinkeln ytan är vriden från söder påverkar hur mycket instrålning som träffar ytan, denna vinkel benämns azimuth-vinkel. (Chen 2011 s.77-79)

Den totala solinstrålningen som når jordytan varierar kraftigt, detta genom att den växelverkar med gaserna i atmosfären, molnen och partiklar i luften. En viss del av energin absorberas av gaserna och emitteras sedan. Det är den långvågiga delen av strålningen som har en tendens att absorberas. Solinstrålningen sprids och reflekteras av luftens beståndsdelar, molnen och partiklarna. Solinstrålningen som träffar vattenmolekylerna och partiklarna förlorar inte någon energi, utan dess riktning förändras. (SMHI 2009b) Den strålning som har påverkats på sin väg mot jordytan kallas för diffus solinstrålning. Även den diffusa strålningen bidrar till genrereringen, dock inte i lika stor utsträckning. Den står för ungefär tio procent av den totala instrålningen som når jordytan under ett år. (S-solar) Den instrålning som inte påverkas av moln eller andra partiklar i luften kallas för direkt solinstrålning. Det som påverkar storleken på den direkta solinstrålningen är främst väder- och atmosfärsförhållanden. Under en klar och torr dag

reduceras den direkta instrålningen upp till tio procent och på en mulen och fuktig dag upp till 100 procent. (eere.energy.gov)



Figur 11. Instrålningen som träffar jorden. (Bildkälla: S-solar, 2010)

All solinstrålning som når jordens yta absorberas inte av den utan en viss del reflekteras tillbaka ut i atmosfären och vidare ut i rymden. Olika material kan reflektera strålningen olika mycket. Snö och is reflekterar väldigt stor del av instrålningen medan asfalt har liten reflektion. För att ange hur mycket en yta reflekterar används en reflexionskoefficient som heter albedo. (NASA) Reflektionen kan bidra till en ökad solinstrålning mot vinklade ytor, i urbana miljöer är det genomsnittliga albedot 0,2 under året förutom under vintermånaderna då det är 0,7 på grund av snötäcket. På detta sätt kan ytor framför anläggningar bidra med en liten ökning av strålningen till panelerna. (Solelprogrammet)

Även tiden på dygnet påverkar vilken intensitet solinstrålning som träffar jordytan har. Solens vandring över himlen från öster till väster gör att vinkeln mellan horisontplanet och solen ändras över dygnet. När vinkeln är liten, det vill säga när solen precis går upp eller ner, sprids instrålningen över en större yta och intensiteten är då mindre. När vinkeln är som störst, mitt på dagen, är intensiteten i instrålningen också som högst. Detta gör att elproduktionen i solceller följer en tydlig dygnsrytm. Det är även en stor variation i produktionen över året, då antal soltimmar under dygnet varierar kraftigt mellan årstiderna. (SMHI 2009b) Den optimala vinkeln som solen kan ha är vinkelrät mot jordytan, men i Sverige uppnås aldrig den vinkeln på grund av landets geografiska läge på jordklotet. Den högsta solhöjden som uppnås i Sverige, i Stockholm, är 54,5 grader över horisonten och inträffar den 21:a juni när det är sommarsolstånd. Den lägsta solhöjden inträffar under vintersolståndet och är endast 7,7 grader över horisonten. Eftersom solhöjden blir lägre på vintern måste strålningen passera en längre sträcka genom atmosfären och strålningen sprids också över en större yta till följd av minskad vinkel, vilket leder till att intensiteten i instrålningen blir mindre. (Sidén 2009 s.45)

5.2 Utvinning av energi från solinstrålning

Det finns främst två sätt att utvinna den energin som finns i solinstrålningen som når jordytan, solfångare och solceller. Solfångare utvinner energin genom att värma upp en yta och sedan föra över denna värme till ett medium som i sin tur värmer exempelvis ett hus. Det finns storskaliga anläggningar som utnyttjar värme koncentrerad från solinstrålningen för att generera el. (Sidén s. 22-24) Dock finns det ingen sådan lösning på småskalig nivå vilket gör att en

avgränsning från denna lösning har gjorts, då endast elgenerering undersöks. Solceller utnyttjar den energi som fotonerna har för att alstra elenergi. (Hodge 2010 s.225) Det finns två typer av tekniska lösningar för solceller som idag är tillgängliga på marknaden, kristallina solceller och tunnfilmssolceller, vilka går igenom nedan.

Gemensamt för de olika typerna är att solcellerna i sig är relativt små. I de kristallina är de cirka en kvadratdecimeter och tunnfilmscellen har ungefär samma yta men är mer avlång. Cellerna har låg spänning och låg effekt, därför monteras dessa till en modul, som i sin tur kan monteras till uppställning som kallas för en "array" (som i denna rapport kallas för rad). Solcellerna fungerar precis som en likströmskrets, om de parallellkopplas ökar den alstrade strömstyrkan och ligger på en konstant spänningsnivå och tvärtom om de seriekopplas. (Hodge 2010 s.233-237)

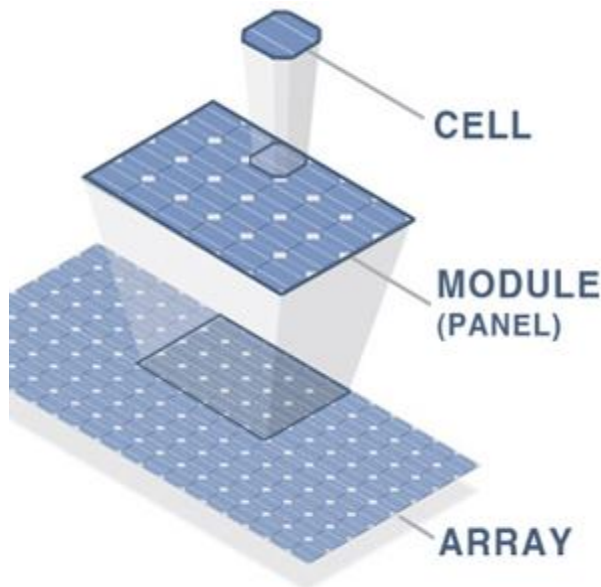
Generellt är solcellerna uppbyggda av två skikt med halvledarmaterial som absorberar energin ur solljuset och omvandlar den till ström. Till det ena skiktet har ett ämne lagts till, vanligtvis fosfor, för att göra detta skikt till en negativ laddningsbärare, detta skikt blir n-dopat. Till det andra skiktet tillsätts ofta bor och då skapas ett "hål" (en avsaknad av en elektron i kristallen), skiktet blir en positiv laddningsbärare och kallas p-dopat. (Sidén 2009 s.51-52) Det n-dopade skiktet heter ledningsband och det p-dopade heter valensband. Till de två skikten ansluts det varsin kontakt, till ledningsbandet i form av ett finmaskigt nät och till valensbandet en heltäckande platta. Om en last ansluts till dessa kontakter uppstår det en potentialskillnad mellan skikten. När en foton med tillräckligt mycket energi träffar en elektron i den p-dopade skiktet exciteras denna och övervinner potentialskillnaden. När potentialskillnaden har övervunnits flyttar sig elektronerna från valensbandet till ledningsbandet och en likström har uppkommit. (Chen 2011 s.177-180)

Beroende på fotonens våglängd innehåller den olika mängd energi och detta påverkar om den kan excitera en elektron, eller ej. Innehåller fotonen för lite energi kan den inte det, om den innehåller rätt mängd exciteras elektronen och om fotonen innehåller mer energi än nödvändigt så exciteras elektronen och överskottsenergin omvandlas till värme. (Sidén 2009 s.54-55) Mellan skikten finns det ett så kallat *bandgap*, beroende på halvledarmaterial i skikten och avståndet mellan dem krävs det olika våglängd på fotonen för att elektronerna skall exciteras. (Chen 2011 s.177-180) Beroende på hur bandgapet ser ut krävs det olika energi hos fotonerna för att de skall kunna excitera en elektron. Bandgapets karaktär påverkar därför hur mycket av solinstrålningens energi som kan tas upp, den teoretiskt högsta verkningsgraden för en solcell är ungefär 30 procent. Detta för att den specifika energin hos en foton som krävs för ett bandgap endast finns i en viss andel instrålningens spektrum. (Sidén 2009 s.54-55) Denna skillnad i bandgapsstorlek kan utnyttjas i så kallade tandemceller, där olika halvledarmaterial kombineras för att täcka en större del av spektrumet. I sådana celler kan den teoretiska verkningsgraden vara över 40 procent. (Chen 2011 s.207-208)

5.2.1 Solceller

Solcellen är en del i det system som skall producera el till nätet, individuella solceller sätts ihop till en modul, antingen seriekopplade eller parallellkopplade. Då cellerna har en väldigt låg spänning, 0,5 V, seriekopplas de nästan alltid för att få upp spänningsnivån. Även modulerna kopplas vanligtvis i serie. (Solelprogrammet) Solcellerna monteras på en platta och lamineras ihop med två vinylacetatskikt. Till detta läggs en antireflexbehandlad glasskiva som skyddar cellerna. Detta monteras i ett metallhölje som bildar modulens ram. Dessa moduler kopplas

sedan ihop och bildar en array som ställs upp på den plats där den skall generera el. Detta visas i figur 12. Även modulerna kan serie- eller parallellkopplas. (Hodge 2010 s.233-234) En solcell producerar endast likström, vilket gör att det krävs en växelriktare för att göra om likströmmen till växelström innan de ansluts på nätet. Växelriktaren anpassar även den genererade spänningen till rätt nätspänning. (Svensk solenergi)



Figur 12. Uppbyggnaden av en rad med solceller. (Bildkälla: Northamerican solar store)

Tillverkare uppger en nominell effekt på sina produkter och denna effekt kan variera kraftigt beroende på vilken teknik som används för att skapa bandgapet. Den nominella effekten anges under normaliserade testförhållanden (STC, "Standard Test Conditions"), det vill säga under dessa förhållanden opererar solcellen med den effekten som tillverkaren anger som nominell effekt. Dessa förhållanden är 1000 W/m^2 instrålning till planet, solcellens opereringstemperatur är 25 grader Celsius och ljuset har 1,5 AM spektrum. 1,5 AM spektrum är solens normaliserade spektrum vid havsnivå. (PVsyst help)

5.2.1.1 Kristallina solceller

2010 utgjorde solceller med kisel som halvledarmaterial 80 till 90 procent av marknaden. Fördelen med att använda kisel är att det främst är en beprövad teknik och tillgången på kisel i världen är stor, kisel är det näst vanligaste förekommande grundämnet efter syre. (Chen 2011 s.200-201) Trots de stora tillgångarna på kisel i världen kan det också bli en stor flaskhals för solcellsindustrin i framtiden, detta på grund av den omfattande och dyrbara renings- och förädlingsprocessen som ämnet måste genomgå innan det kan användas i en solcell. Trenden visar dock att priset för kisel sjunker. (Sidén 2009 s.49-50) Ytterligare en stor fördel med att använda kisel som halvledarmaterial är att bandgapet blir nästintill optimalt med avseende på solstrålningens spektrum, vilket leder till en bra verkningsgrad nära den teoretiskt möjliga. Vissa massproducerade moduler har nått en verkningsgrad på 20 procent. (Chen 2011 s.200-201) Dock beror verkningsgraden inte endast av valet av halvledarmaterial, utan även av yttre omständigheter. (EERE 2011)

Dessa solceller heter kristallina kiselsolceller för att kiselatomerna ordnas i en kristallinsk struktur vid förädlingen. Det finns två typer av kristallina kiselsolceller, polykristallina och

monokristallina celler. Monokristallina celler har kiselatomerna i perfekt symmetri i kristallen, vilket resulterar i en högre verkningsgrad. Detta på grund av att en stor ren kristall används vid tillverkning, till skillnad från polykristallina som består av många små kristaller. Detta leder dock till att monokristallina solceller blir svårare att tillverka och därför betyder det också att sådana moduler har en högre produktionskostnad. (Sidén 2009 s.56-58) Eftersom polykristallina celler innehåller flera mindre kristaller med kisel blir inte dess yta perfekt vilket leder till lägre möjlig produktion per kvadratmeter. Dock blir priset per kWh ungefär den samma för de båda typerna av kristallina cellerna på grund av kostnadsskillnaden i produktionen. Utseendet på själva cellen påverkas också av hur kristallen ser ut, monokristallina celler är enfärgade medan polykristallina ofta är blåskimrande med ljusare fläckar, vilket visas i figur 13. (Sidén 2009)



Figur 13. Två typer av kristallina solceller.

5.2.1.2 Tunnfilmssolceller

Tunnsfilmceller är den typen av celler som i dagsläget konkurrerar med kristallina. Dessa är relativt nya på marknaden vilket gör att det finns ett begränsat antal tillverkare. Principen för tunnsfilmssolceller är den samma som för kristallina kiselceller, nämligen att två halvledarmaterial bildar en PN-övergång med en potentialskillnad. (Chen 2011 s.204-206) Dock är de uppbyggda på ett annorlunda vis då det p-dopade halvledarmaterialet fästs på ett substrat som oftast är en glasskiva och mellan dem har en baskontakt fästs. Nästa del som adderas är det n-dopade skiktet, varpå det fästs en genomskinlig ledare och allt innesluts sedan av en till glasskiva som är antireflexbehandlad. (Sidén 2009 s.57-58) På grund av att det aktiva lagret kan göras mycket tunt, ungefär fem mikrometer mot kristallina celler 200 mikrometer, kan materialåtgången minskas och produktionskostnaderna vid massproduktion blir mindre än för kristallina kiselceller. (Chen 2011 s.204-206) Dock har tunnsfilmcellerna uppvisat en verkningsgrad som är lägre än motsvarande kristallina kiselceller på marknaden. Eftersom det är en relativt ny teknik finns det i dagsläget bara tre material som används till tunnsfilmssolceller som har nått tillräckligt långt i utvecklingen att de massproduceras. De tre olika typerna av material är amorft kisel, koppar indium gallium selenid (så kallade CIGS) och kadmium tellurid. (Sidén

2009 s.58) Dessa olika typer av tunnfilmsceller tas inte upp individuellt då funktion och tillverkning i princip är den samma, fast med olika aktiva material.

Eftersom tunnfilmsceller inte är individuella skivor som i kristallina solceller definieras en cell utifrån de olika mönstringsmetoderna som finns, mönstren appliceras mellan varje skikt. Beroende på hur mönstret ser ut skiftar konfigurationen i seriekopplingen av cellerna i modulen. Mönstringen görs från kant till kant i modulerna i långa ränder, utifrån de resistiva förlusterna i cellen optimeras dess bredd. Bredden brukar ligga mellan 5 och 10 millimeter. (Solelprogrammet)



Figur 14. Tunnfilmssolcell

5.2.1.3 Andra typer av celler

Det finns även andra typer av solceller som använder andra tekniker, dock är dessa typer fortfarande tidigt i utvecklingsstadiet. De huvudsakliga typerna är; tandemsolcell och Grätzelceller. Tandemsolcell utnyttjar mer än ett ljusabsorberande skikt med olika bandgap för att fånga upp så stor del av ljusets energispektrum som möjligt. En Grätzelcell består av en elektrolyt och två elektroder varav den ena täcks med ett färgämne som absorberar solljuset. (Sidén 2009 s.59) Dessa har inte ägnats någon mer uppmärksamhet då det i dagsläget inte finns några eller väldigt få kommersiella och konkurrenskraftiga lösningar på marknaden.

5.2.2 Omgivningens påverkan på solceller

En solcell kan utsättas för olika störningar som inverkar på produktionen, den störning som påverkar mest är skuggning av modulen. Enligt Solelprogrammet kommer den stora påverkan från: "att effekten av skuggningen av moduler blir större än den rent geometriska förlusten av instrålad energi mot den ytan där modulerna är installerade". (Solelprogrammet) Skuggningarna kan komma från alla fysiska objekt som ligger i linjen för instrålningen, det kan vara andra byggnader, skorstenar, moln, växter med mera. Beroende på hur modulerna sätts upp kan de även de delvis skugga andra moduler vid vissa tidpunkter. När solens vinkel från horisonten blir mindre ökar även risken att flera objekt kan komma i vägen för strålningen och skugga modulerna. Det är dessa objekt som bildar den så kallade horisonten i närheten av modulerna, vilken måste tas i åtanke när en anläggning byggs. Horisonten påverkar graden av skuggningen

olika mycket under året, detta då solen har en mindre vinkel under vinterhalvåret. (Sandqvist, intervju, 2012)

Det finns egentligen ingen skillnad mellan solinstrålningen i urban jämfört med rural miljö. Den skillnad som kan uppkomma är det finns fler objekt som kan påverka utseendet på horisonten i urban miljö. Vilket kan leda till en minskad produktion då cellerna kan utsättas för potentiellt mer störningar. (Gustafsson, intervju, 2012)

När väl en solcell utsätts för skuggning tappar den i effekt, det samma gäller för en hel panel om den blir skuggad. Eftersom solcellerna är seriekopplade i panelen kan det vid partiell skuggning påverka effekten i högre grad, detta på grund av att om en cell i serien tappar effekt till följd av skuggning kommer den maximalt uttagbara effekten från den serien som cellen sitter i endast vara lika hög som i den skuggade cellen. Detta problem kan göra att om tio procent av panelen är skuggad kan dess effekt minska med 100 procent. Detta problem kan lösas genom att seriekoppling av mindre antal celler med varandra, mot att den uttagbara effekten i panelen blir lägre. Det som många tillverkare använder sig av idag är att dioder (en så kallad bypass-diod) ansluts med jämna mellanrum i seriekopplingen av cellerna. Det resulterar i att seriekopplingen delas upp i färre element. Vilket resulterar i att påverkan av skuggningen blir mindre. Beroende på vilken typ av solcell det är blir påverkan av skuggningen annorlunda och även hur effekterna av skuggningen kan minskas, dessa går igenom senare då de olika typerna av solceller beskrivs. (Solelprogrammet)

Under vintern finns risken att en modul blir täckt av snö, vilket påverkar produktionen. Dock har tester visat att instrålningen till modulen endast minskat med tre procent under ett år med en snörik vinter i södra Sverige. Detta beror på att modulerna oftast täcks av snö när det är mulet väder, då instrålningen ändå inte är så stor. (Solelprogrammet) Dessutom när det väl är sol kommer alltid lite energi leta sig ner till cellen och värma denna vilket leder till att snötäcket glider av modulen, om den inte är horisontellt placerad. (Energimyndigheten 2011) Även test på hur smuts påverkar produktionen visar att kravet på skötsel är minimal. En daglig rengöring av en modul gav endast en ökad instrålning med en procent jämfört med en modul som inte rengjordes. (Solelprogrammet) Detta följer av att vind och regelbundna regn rengör modulerna. Dessutom är många moduler behandlade med beläggningar som gör att de är självrengörande. (Energimyndigheten 2011)

Från solcellerna i sig kan det inte komma några stora störningar på samma sätt som för vindkraften, detta för att det inte finns några rörliga delar i en anläggning. Det kan tänkas att de skulle kunna ge störningar in på en byggnads egna elsystem, på grund av de snabba förändringarna i generation som kan uppkomma. Detta problem uppvägs av växelriktaren som även gör spänningen jämn innan den matas in på nätet. Gävle energis erfarenhet av detta är att interna elsystemet inte tar skada av en installation (Gustafsson, intervju, 2012) Inte heller Gränby centrum har inte sett något exempel på att deras interna elsystem har påverkats negativt av installationen av solceller. (Kotilainen, intervju, 2012)

6 Fallstudien

För att undersöka om en lösning med småskalig förnyelsebar energiproduktion i en urban miljö är ekonomiskt hållbar har en fallstudie gjorts ett handelscentrum i stadsdelen Gränby i Uppsala. Denna fallstudie består av simulering av möjlig produktion utifrån data om vindförhållanden och solinstrålning, på den plats där handelscentrummet står. De undersökta lösningarna består av en kombination av vindkraftverk och solceller, tre produkter av respektive teknik har undersökts.

Nedan presenteras förutsättningarna för denna fallstudie, studieobjektet, produkterna som har undersökts, data som har använts, hur simuleringen gick till och resultatet av den.

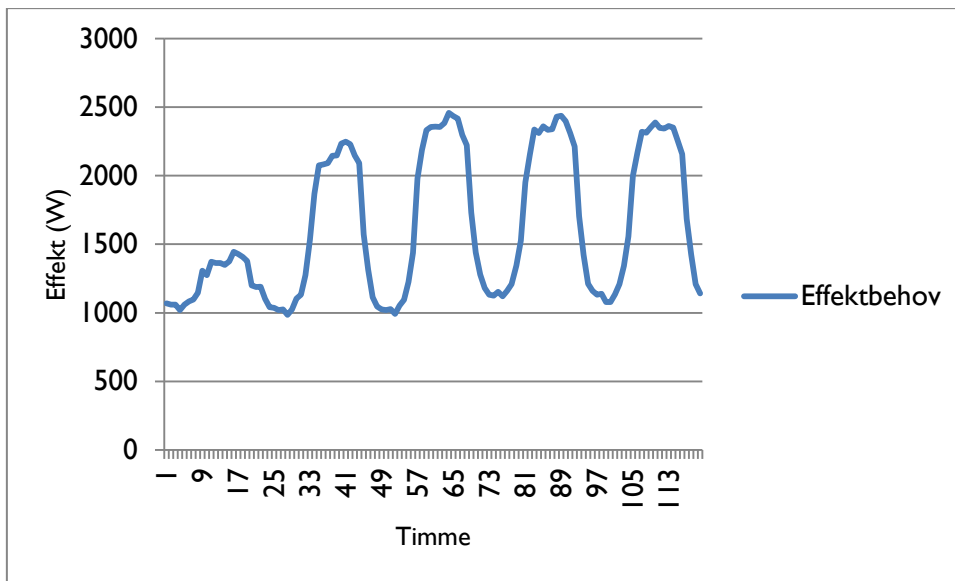
6.1 Studieobjektet

Gränby centrum ligger i stadsdelen Gränby i nordöstra Uppsala. Handelscentrummet öppnade under 1971 och har byggts om några gånger under årens lopp. Under de senaste fyra åren har nya utbyggningar gjorts i tre etapper.(Kotilainen, intervju, 2012) Idag är den uthyrbara handelsytan 40 300 kvadratmeter, det finns 86 stycken butiker och varje år besöks Gränby centrum av mellan 6,8 till sju miljoner personer.(Atrium Ljungberg a)

Det är fatighetsbolaget Atrium Ljungberg som idag äger Gränby centrum och de har som mål att alla deras fastigheter skall uppnå BREEAM miljöcertifiering. (Atrium Ljungberg b) Gränby centrum var tidiga med att arbeta för miljön och de var en av de första platserna i Uppsala som kunde erbjuda mottagning för källsorterat material som metall, plast och batterier. Det har sedan starten anordnat regelbundna miljödaggar i centrummet. År 2009 installerades fyra stycken laddstolpar för elbilar på Gränby centrums parkering och detta var då Sveriges första parkeringsplats med laddstolpar.(Gränby centrum) Som ett ytterligare led i miljöarbetet installerades en solcellsanläggning på taket under 2011 och den togs i drift i slutet av augusti 2011.(Kotilainen, intervju, 2012)

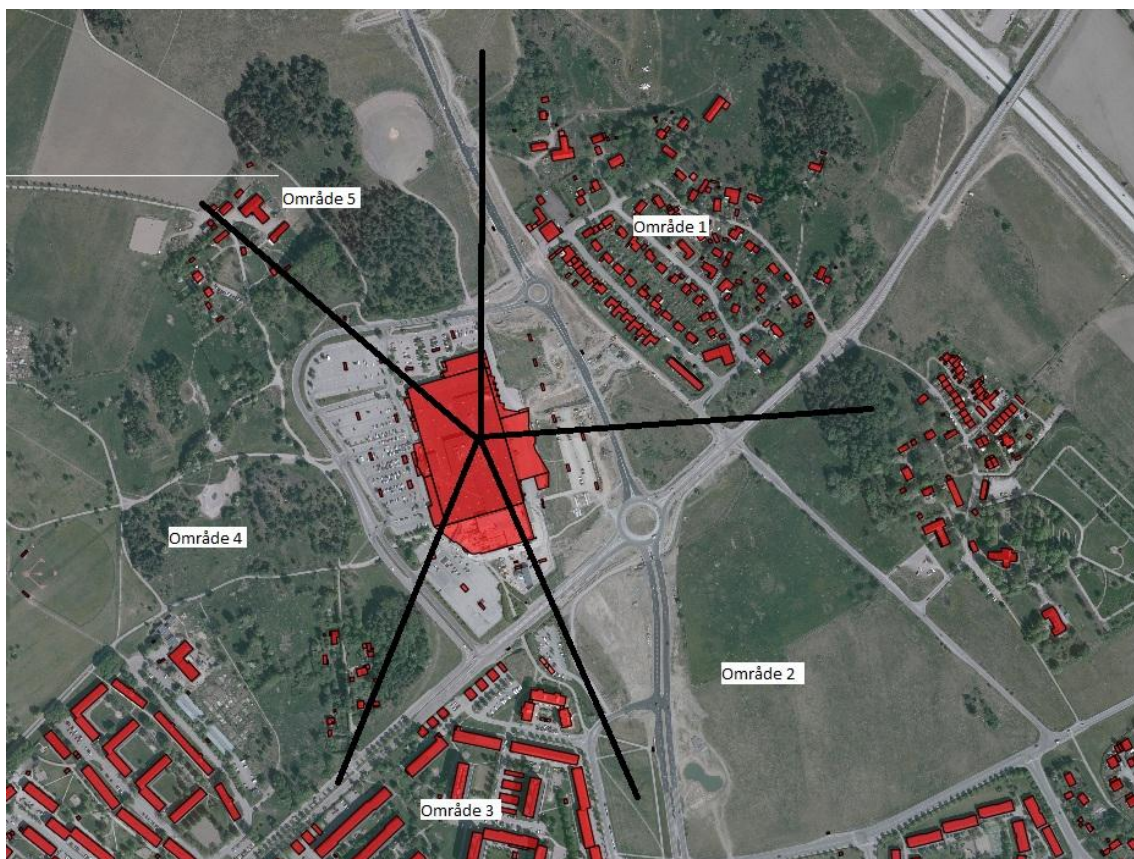
Utifrån data om Gränby centrums elförbrukning, erhållen från Vattenfall, har årsförbrukningen räknats ut till 14,6 gigawattimmar. Man kan tydligt se att förbrukningen är relativt jämn under året, förutom under vissa av sommarmånaderna då kylbehovet är stort. Gränby centrum har tre stora kylaggregat installerade för att kunna tillgodose behovet av kylning på sommaren. Under de kalla vintermånaderna sker det ingen höjning av elförbrukningen då Gränby centrum använder fjärrvärme för uppvärmning av fastigheten. Detta gör att de större förbrukningstopparna infaller då även genereringen från solcellerna når sin topp. (Kotilainen, intervju, 2012)

Även förbrukningen över dygnet följer en tydlig rytm med förbrukningstoppen ligger under öppettiderna på dygnet och lägsta förbrukning inträffar då centrummet håller stängt. Enligt Juha Kotilainen (2012) beror detta på att två ventilationsaggregat som är igång under de tider köpcentrat har öppet är avstängda under natten (Kotilainen, intervju, 2012). Vad som tydligt går att utläsa att effektuttaget aldrig är mindre än 740 kW och utifrån detta bestäms en övre systemgräns som den installerade anläggningens effekt inte får överstiga. Detta för att ingen alstrad effekt skall levereras ut på nätet, vilket skulle innebära att ett nytt elavtal med nätägaren skulle behöva tecknas.



Figur 15. Effektbehovet per timme under fem dagar.

I Figur 16 nedan visas ett flygfoto på Gränby centrum med indelade områden runtomkring och den råhetsklass som områdena har tilldelats. De olika områdenas karaktär och tilldelade råhetsklass presenteras i tabell 3 nedan.



Figur 16. Områdes indelning kring Gränby centrum.

Tabell 3. Karaktär och bedömd råhetsklass kring Gränby centrum.

Område	Karaktär	Terräng	Byggnader	Skog	Avstånd till närmsta hinder	Tilldelad råhetsklass
1	Mindre villaområde	Platt	Villor och mindre lokaler	Enstaka träd	Ca 150 m	3
2	Öppet fält	platt	inga	Inga	Ca 600 m	1
3	Stadsområde	Platt	Många fler-våningsbyggnader	Enstaka träd	Ca 180 m	4
4	Gles skog med enstaka byggnader	Platt till kuperat	Enstaka	Gles skog – många dungar	Ca 100 m	3
5	Tät skog	Platt	Inga	Tät	Ca 80 m	4

Bedömningen av karaktärerna hos områdena kring Gränby centrum baseras på egen kännedom om platsen, observationer på plats och flygfoto från Uppsala kommuns kartverktyg, som heter Uppsalakartan. Beskrivningen av karaktärerna har hållits kort och följt beskrivningarna i tabell 2 i teorin om vindens påverkan av omgivningen. Avståndet till de närmsta hindren i områdena baseras på det inbyggda mätverktyget som finns i Uppsalakartan och de är uppmätta från den närmaste punkten på fastigheten till de närmsta hindren.

6.2 Systemets placering

Utifrån systemgränserna har placeringen av systemet delats upp på så sätt att vindkraftverken är placerade över den östra ingången och raderna med solcellspaneler är placerade vid den södra ingången. Detta för att maximal exponering skulle uppnås. Dessutom påverkar de inte varandra och det går att ha ett gemensamt utrymme för elektroniken, så som växelriktarna med mera.

6.2.1 Placering av solcellerna

Den tillgängliga ytan vid södra ingången tillåter att fyra rader med solcellspaneler placerades ut med 10 meters mellanrum. Exakta mått för varje rad varierar lite beroende på vilken märke på panel som används, då de har olika mått. Raderna placeras snett bakom varandra för att minska skuggningen sinsemellan och möjliggöra att de kan placeras närmare varandra för att minska använd yta. Dessutom gör detta att solcellerna får en ökad exponering. Se placeringen i figur 17 nedan.

6.2.2 Placering av vindkraftverken

Vindkraftverken placerades ovanför den östra ingången då denna plats ansågs ge den största exponeringen då de kan ses från tre ankomstriktningar till Gränby centrum och till viss del från E4:an som går förbi i närheten. Ett antal placeringar sinsemellan har varit aktuella och efter en

kort och grundläggande analys som gjordes för hand framstod alternativet att placera dem som ett W det bästa, med tre verk ut mot ingången och två längre in på taket. Detta för att verkens påverkan på varandra minimeras, då avståndet mellan dem blir stort och att maximalt tre verk påverkas negativt av de andra vid något tillfälle. För att uppnå maximal exponering hade det bästa alternativet varit att alla fem verken skulle suttit på rad vid takets kant. Dock hade detta lett till att fyra verk påverkats negativt vid vissa vindriktningar. Se placering i figur 17 nedan.



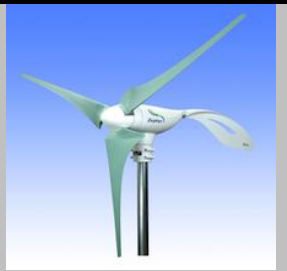
Figur 17. Systemets placering på Gränby centrum's tak.

6.3 Produkterna som har undersökts

Nedan presenteras de produkter som har valts att användas, först presenteras vindkraftverken, sedan solcellspanelerna och till sist vilken växelriktare som har använts.

6.3.1 Vindkraftverken

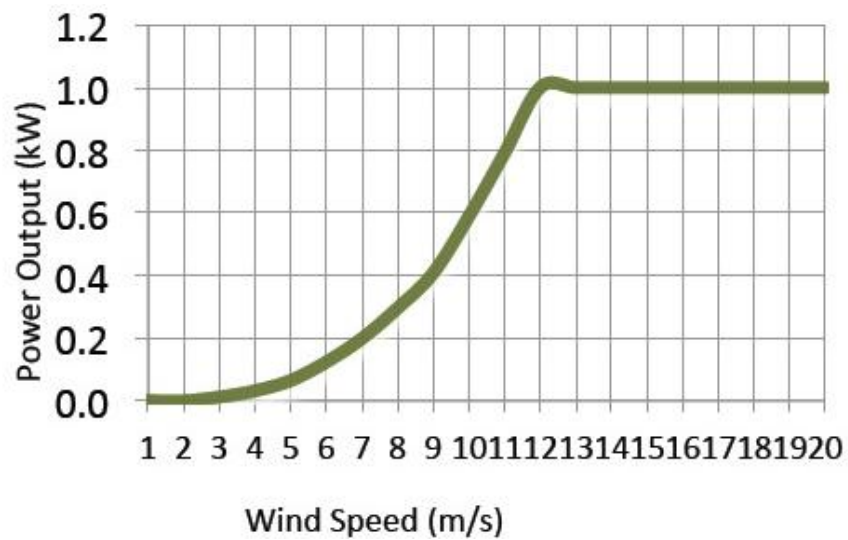
Tabell 4; presentation av använda vindkraftverk. Informationen har inhämtats från tillverkarens hemsidor, tekniska specifikationer från tillverkare, Egenels broschyr.

Namn	Eddy GT	Airdolphin GTO	Skystream 3.7
			
Tillverkare	Urban Green Energy	Zephyr	Southwest Windpower
Typ	VAWT	HAWT	HAWT – läsidan av rotorhuset
Märkeffekt	1 kW	1,1 kW	2,1 kW
Märkhastighet	12 m/s	13 m/s	11 m/s
Svepyta	4,62 m ²	2,545 m ²	10,87 m ²
Cut in speed	3,5 m/s	2,5 m/s	3,0 m/s
Masthöjd	7 m	10 m	10 m
Cut out speed	30 m/s (rotorn bromsas)	Ingen (Reglerar ner varvtalet vid hög vindhastighet)	Ingen (Reglerar ner varvtalet vid hög vindhastighet)
Överlever vindhastighet	55 m/s	Ingen uppgift	63 m/s
Varvtal	180 rpm (märkvarvtal)	1280 rpm (maxvarvtal vid 20 m/s)	50 – 300 rpm
Ljudnivå	38 bd(A) (märkvind)	Ingen uppgift	53,9 db(A) (8,0 m/s)
Vikt	175 kg	20 kg	77 kg
Material i rotorbladen	Fiberglas	Kolfiberlaminat över fast skum	Fiberglasförstärkt komposit
Yaw-kontroll	Krävs ingen	Free yaw (fena som riktar verket m.h.a vinden)	Automatisk (genom att ha rotorn på läsidan av rotorhuset)
Pris (angivna exklusive arbetskostnad)	125 000 kr (inklusive: mast, växelriktare, controller, dumpload)	89 000 kr (inklusive: mast, växelriktare och anslutning)	119 000 kr (inklusive: mast)
Kommentarer	Estetiskt tilltalande, minimala vibrationer, större modell finns uppsatta på Läkerol Arena	Bra verkningsgrad (ca 50 %), låg vikt leder till att den ändrar riktning snabbt, har testats grundligt under Warwick Wind Trails.	Bra verkningsgrad, inbyggd växelriktare, finns mer än 7000 stycken installerade världen över.

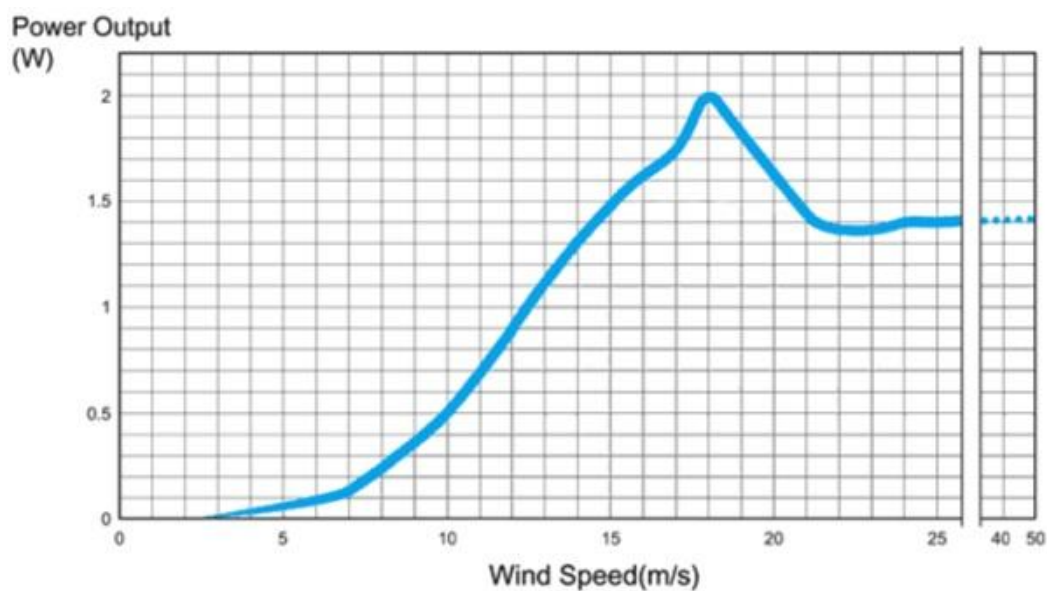
Endast leverantören av Eddy GT uppger att deras verk är CE-märkta. Alla produkter antas ha en sådan märkning då de säljs på den svenska marknaden. Direct energy uppger även de på sin

hemsida att Eddy GT och Skystream 3.7 är certifierade enligt SS EN 61400-2, vilket innebär att de uppfyller Elsäkerhetsverkets säkerhetskrav. (Direct energy b)

Nedan presenteras de olika verkens effektkurvor.



Figur 18. Effektkurva för UGE EddyGT.



Figur 19. Effektkurva för Airdolphine GTO.



Figur 20. Effektkurva för Skystream 3.7.

6.3.2 Solcellspaneler

Tabell 5; presentation av använda solcellspaneler. Information har inhämtats från Direct energy:s hemsida.

Modellnamn	HIT-235	Polysol 235 LS	SL2
Tillverkare	Sanyo	IBC	Solibro
Typ	Kombination av kristallint och amorft kisel	Polykristallin	Tunnsfilm - CIGS
Effekt	235 W	235 W	120 W
Nominell spänning	43 V	30,1 V	76,9 V
Nominell ström	5,48 A	7,81 A	1,56 A
Verkningsgrad(panel)	18,6 %	15 %	12,8 %
Mått (längd/bredd/höjd)	1580/798/35 mm	1653/995/45 mm	1190/789,5/7,3 mm
Vikt	15 kg	20 kg	16,5 kg
Färg	Svart	Blå	Svart
Självrengörande	Ja	Ja	Ja
Testade för snö	Ja	Ja	Ja
Pris (motivering angiven nedan)	4040 kr	4300 kr	2060 kr
Kommentar	Har ett skikt med kristallint kisel och två skikt med amorft kisel ovanför och under det. En kombination av kristallincell och tunnsfilms-cell.	Bra livslängd.	Har inte en ram runt panelen på samma sätt som de andra. De mindre måtten leder till mindre skuggning av mellan raderna och att fler får plats på samma yta.

Alla använda solcellspaneler säljs av Direct energy i Sverige. De säljs även av IBC solar i Tyskland som både tillverkar egna solcellspaneler och säljer andra fabrikat.

Då priser på solcellspaneler i dagsläget varierar väldigt mycket och då priserna ofta beror på hur stor anläggningen som installeras är så används standardpriser i den ekonomiska analysen för en hel anläggning istället för individuella priser per panel. Dessa standardpriser hämtas dels från Direct energy, dels från EgenEl och dels från IEAs rapport "National Survey Report of PV Power Applications in Sweden". I rapporten behandlas hela den svenska solcellsmarknaden för 2011. Det som främst användes från denna rapport är de delar som behandlar prisutvecklingen för solceller, solcellspaneler och solcellssystem under 2011.

Priserna som använts har enheten kr/W. Detta används som standard i rapporten ovan och vid samtal med Hedström (2012) på Direct energy nämndes priser även där i denna enhet. Priset har satts till 25 kronor per installerad watt exklusive moms, inklusive moms är priset som använts 31,25 kronor per installerad watt. Detta pris gäller för en nyckelfärdig anläggning, det vill säga allting ingår i detta pris. Solcellsanläggningens totalpris fås då av att multiplicera detta pris med anläggningens totala effekt. Direct energy räknar med att totalkostnaden för en anläggning delas upp på följande sätt:

Tabell 6; de olika kostnadsposterna för en solcellsanläggning

Solcellspanelerna	55 %
Växeriktare	15 %
Övrigt material	10 %
Arbete	20 %
Totalt	100 %

6.3.3 Växeriktare

För att kunna ansluta distribuerad generering till nätet eller en byggnads egna elsystem krävs det att en växeriktare används, på grund av att elen som leveras vid anslutningen måste vara växelström. Solceller genererar likström och vissa småskaliga vindkraftverk genererar likström medan andra genererar växelström, dock är denna växelström inte tillräckligt ren för att kunna leveras direkt ut på nätet. Växeriktarens funktion är just att omforma likströmmen till växelström för att möjliggöra inkoppling på elnätet. Detta genom att anpassa spänningsprofilen, frekvensen och strömmen till det förhållandet som råder på det systemet där inkopplingen sker. (SMA)

Många växeriktare har även säkerhetsfunktioner som slås på vid vissa specifika situationer som kräver det. Ett viktigt skydd är det som finns när det blir strömbrott, då risken finns att anläggningen levererar till elnätet, även om den interna effekten hos systemet är större än anläggningens, så kallad ö-drift. Det som kan vara farligt vid en sådan situation är om reparatörer inte vet att nätet är strömsatt. Detta kan en växeriktare skydda mot då den automatiskt kan bryta tillförseln när nätet blir strömlöst. (Lundqvist, intervju, 2012) Den kan även skydda verken mot att strömmen går i fel riktning, alltså från nätet till anläggningen. Om ström skulle komma från nätet till exempelvis ett vindkraftverk kan denna börja fungera som en motor och det finns riska att komponenter i det tar skada. (SMA)

Dimensionen på växeriktaren anges med en märkeffekt som är den effekt som växeriktaren kan omvandla och leverera ut på nätet. Märkeffekten är inte den effekten som är den maximala som kan anslutas till växeriktaren utan den har en maxeffekt som får anslutas innan den tar

skada och funktionen försämras, denna maxeffekt ligger vanligtvis några hundra watt över märkeffekten. Växelriktaren måste alltså dimensioneras utifrån det system som den skall kopplas till. (SMA) Till en anläggning med solceller kan en växelriktare med hög märkeffekt användas, detta då produktionen från solcellerna är relativt enhetlig och periodisk. Många strängar av solcellspaneler kopplas ihop och önskad effekt uppnås. Det är inte att rekommendera att ansluta en växelriktare med hög märkeffekt till ett system med ett antal mindre vindkraftverk, utan en mindre växelriktare per verk är att föredra. Detta eftersom verken seriekopplas om en större växelriktare används, den ojämna produktionen begränsar den effekt som levereras ut till nätet då det verk som producerar minst effekt begränsar de övriga i seriekopplingen. (Hedström, intervju, 2012)

Växelriktarna som medföljer vindkraftverken är av märket SMA och tillhör deras produktlinje för just vindkraft; Windy boy. Eftersom det inte specificeras vilka växelriktare som medföljer alternativen för vindkraften (utan de står listade som nyckelfärdiga lösningar) kommer dessa inte att presenteras, utan de antas vara dimensionerade efter det vindkraftverk de medföljer. Den växelriktaren som har använts till solcellsanläggningen är också tillverkad av SMA. Den heter Sunny Tripower I5000TL. För enkelhetens skull användes enbart en typ av växelriktare, vilket har inneburit att i vissa fall är växelriktarnas kapacitet en aning överdimensionerad.

Tabell 7: Presentation av den växelriktare som använts till raderna med solcellerna. (SMA)

SMA Sunny Tripower I5000TL	
Max DC effekt in	15260 W
Max spänning in	1000 V
Max ström in	36 A
Märkeffekt	15000 W
Max skenbareffekt	15000 VA
Nominell AC-spänning	230 V/400 V
Märkfrekvens/nätspänning	50 Hz/230V
Max ström ut	24 A
Verkningsgrad	98,3 %

6.4 Data

Data angående vindförhållanden och solinstrålning har tillhandahållits från Uppsala universitet, data och dessa har tillhandahållits från programmet Meteonorm. Två filer med data har varit centrala i detta arbete, en fil kompatibel med programmet PVsyst och en textfil med vinddata i, som behandlades i Matlab. PVsyst-filen ägnas ingen närmare beskrivning här då den endast laddas in i programmet PVsyst och behandlas av det. Textfilen behandlades i matlab och den innehöll information om vindhastighet, vindriktning, temperatur, lufttryck, år och dag. Ett utdrag följer i tabell 8 nedan.

Tabell 8; Utdrag ur textfilen med vinddata.

y	m	dm	h	hy	DD	p	FF	Ta
1995	1	1	1	1	218	1010	2.1	3.5
1995	1	1	2	2	252	1010	1.7	3.2
1995	1	1	3	3	249	1010	1.3	3.0
1995	1	1	4	4	265	1010	1.7	2.7
1995	1	1	5	5	263	1010	1.6	2.5
1995	1	1	6	6	252	1010	1.9	2.3
1995	1	1	7	7	276	1010	1.6	2.0
1995	1	1	8	8	237	1010	2.2	1.8
1995	1	1	9	9	259	1010	1.9	1.5
1995	1	1	10	10	298	1010	3.7	1.9
1995	1	1	11	11	185	1010	2.9	1.9
1995	1	1	12	12	271	1010	2.9	1.8
1995	1	1	13	13	235	1010	3.2	2.2
1995	1	1	14	14	148	1010	3.7	2.3
1995	1	1	15	15	190	1010	2.9	2.1
1995	1	1	16	16	266	1010	4.4	2.0
1995	1	1	17	17	81	1010	3.2	1.9
1995	1	1	18	18	200	1010	3.7	1.8
1995	1	1	19	19	187	1010	2.7	1.7
1995	1	1	20	20	236	1010	2.7	1.7
1995	1	1	21	21	249	1010	2.9	1.6
1995	1	1	22	22	210	1010	1.9	1.5
1995	1	1	23	23	265	1010	1.4	1.4
1995	1	1	24	24	216	1010	1.3	1.3

I tabellen visas data från det första dygnet under år 1995, kolumn DD är vindriktningen i grader och FF är vindhastigheten i meter per sekund. Data är uppmätta 10 meter över marken.

Data är registrerat på timbasis, vilket betyder att mätningar har gjorts under en timme och medelvärde under den timmen blir data för den specifika timmen. Sedan har denna procedur utförts för årets alla timmar. Detta gör att det sällan uppkommer höga vindhastigheter, över 13 meter per sekund, i data. Den högsta vindhastigheten som inträffade under året som mätningarna har gjort var 13,8 meter per sekund. Vindhastighetens medelvärde under mätåret var 3,287 meter per sekund.

I kolumnen DD presenteras vindriktningen, det vill säga vilken riktning som vinden kom ifrån under specifik timme. Även detta är ett medelvärde över en timme. Vinkeln 0 på vindriktningen betyder att vinden kommer norrifrån och 180 grader söderifrån. Vinkeln ökar medurs, vilket gör att öster är 90 grader och väster är 270 grader. Även vindriktningen är ett medelvärde under en timme.

Data från Meteonorm bedömdes vara bäst att använda i denna fallstudie. Även tillgång till data från SMHI fanns även att tillgå och den var över flera år 2006 till 2011. Dock var data från SMHI på tretimmarsbasis, vindriktningen uppdelad på hela tiotal och vindhastigheten i heltal. Detta gjorde att data från Meteonorm, som är på timbasis, vindriktningen i ental och vindhastigheten i tiondelar, bedömdes vara av bättre kvalitet.

Meteotest är företaget som ligger bakom Meteonorm och de skriver i handboken för programmet att data och algoritmer som används har genomgått utförliga tester för att säkra kvaliteten på data. Exempelvis berättar de att standardavvikelsen av den interpolerade måntagliga instrålningen är sju procent och att instrålningen mot horisontella ytor är marginellt överskattad med mellan noll till tre procent.

6.5 Simulering

I detta avsnitt presenteras hur simuleringen har gått till i PVsyst och i Matlab. Det som tas upp är de parametrar som har använts och hur resultatet har fått fram. Resultatet som fås fram genom simuleringarna presenteras i kapitel 8 Resultat.

6.5.1 Simuleringen av solceller i PVsyst

Den geografiska plats som skapades i PVsyst för att kunna ladda in de meteorologiska data som användes i simuleringen döptes till Uppsala. Till platsen valdes koordinaterna som Uppsala ligger på, norr 59 grader 50 minuter och öster 17 grader 40 minuter. Även Uppsalas höjd över havet ställdes in till 21 meter över havet.

För alla de undersökta produkterna användes samma anpassning av omgivningen, detta gjorde att för de olika simuleringarna krävdes det endast att valet av solcellspaneler förändrades i designen av raderna. Vilket i sin tur ledde till att skillnaden blev antal solcellspaneler som användes på varje rad och vilken effekt raden hade. Utifrån den inbyggda hjälpen i programmet för att hitta den optimala orienteringen av raderna, med avseende till solinstrålningen i horisontalplanet, bestämdes en optimal azimuthvinkel på noll grader och den optimala vinkeln från horisontalplanet bestämdes till 45 grader. Detta gjorde att en transpositionsfaktor kring 1,1 erhöles.

Det antogs att horisonten kring Gränby centrum inte var tillräckligt hög eller var på ett sådant avstånd att den inte skuggade panelerna vid något tillfälle. Detta gjorde att den enda skuggningen av solcellerna som uppkom var den som raderna framför skapade. För att en rättvisande skuggningsfaktor skulle kunna tas fram skapades en enkel tredimensionell modell av installationen. Denna modell skapades utifrån en redan existerande modell och det som krävdes var att anpassa storleken på raderna. Utifrån denna modell togs skuggningsfaktorerna ut för solens olika infallsvinklar, vilka presenteras i tabell 9 nedan.

Tabell 9. Skuggningsfaktorerna.

Shading factor table (linear), for the beam component																			
Azimuth	-180°	-160°	-140°	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
Height																			
90°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
80°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
70°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
60°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
50°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
40°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30°	Behind	Behind	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	Behind	Behind
20°	Behind	Behind	Behind	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	Behind	Behind	Behind
10°	Behind	Behind	Behind	Behind	1.000	1.000	1.000	0.874	0.780	0.744	0.757	0.851	1.000	1.000	1.000	Behind	Behind	Behind	Behind
2°	Behind	Behind	Behind	Behind	Behind	0.951	0.618	0.492	0.427	0.387	0.359	0.399	0.535	0.919	Behind	Behind	Behind	Behind	Behind

Shading factor for diffuse: 0.957 and for albedo: 0.443

Vid designen av de olika alternativen för installationen användes fyra subfält i programmet, dessa subfält motsvarade en rad i installationen. Varje rad dimensionerades utifrån vilken yta med solceller som raden kunde ha, vilket var 180 m². De produkter som utgjorde de olika alternativen som undersöktes valdes från PVsysts inbyggda databas för solceller, vilket presenterades i tidigare avsnitt. Önskad växelriktare valdes också från programmets databas. Programmet anpassade raderna utifrån dessa önskemål och tog fram den optimala konfigurationen av paneler och växelriktare. Även hur panelerna skulle seriekopplas föreslogs. Gemensamt för de olika undersökta alternativen var att varje rad krävde två växelriktare, för vissa alternativ blev dock växelriktarna något överdimensionerade.

The screenshot shows the 'Grid system definition' window in PVsyst. The 'Global System configuration' tab is active, showing 4 sub-fields. The 'Global system summary' table indicates 504 modules, 699 m² area, 8 inverters, 118 kWp nominal PV power, 111 kWdc maximum PV power, and 120 kWac nominal AC power. The 'Sub-field #1' configuration shows 'Presizing Help' with 'Enter planned power' set to 30.0 kWp and 'or available area' set to 177 m². The 'Select the PV module' section shows 'Sanyo HIT-235HDE4' selected. The 'Select the inverter' section shows 'Sunny Tripower15000 TL' selected. The 'Design the array' section shows 'Nb. modules' as 126 and 'Area' as 175 m². The 'Operating conditions' table shows Vmpp (60°C) as 653 V, Vmpp (20°C) as 738 V, and Voc (-10°C) as 981 V. The 'Plane irradiance' is 1014 W/m². The 'Array nom. Power (STC)' is 29.6 kWp. The 'Nb. modules' is 126 and 'Area' is 175 m². The 'Nb. of inverters' is 2. The 'Global Inverter's power' is 30.0 kWac. The 'Inverter with 2 MPPT' is selected. The 'Nb. of modules' is 126 and 'Area' is 175 m². The 'Nb. of inverters' is 2. The 'Global Inverter's power' is 30.0 kWac. The 'Inverter with 2 MPPT' is selected. The 'Nb. of modules' is 126 and 'Area' is 175 m². The 'Nb. of inverters' is 2. The 'Global Inverter's power' is 30.0 kWac. The 'Inverter with 2 MPPT' is selected.

Figur 21. Systemdesignsrutan i PVsyst, visas här med Sanyo HIT-235 inställt.

De resultat som har använts från simuleringarna i PVsyst har främst var en installations totala årsproduktion och den specifika produktionen som ett alternativ frambringade.

6.5.2 Simuleringen av vindkraft i Matlab

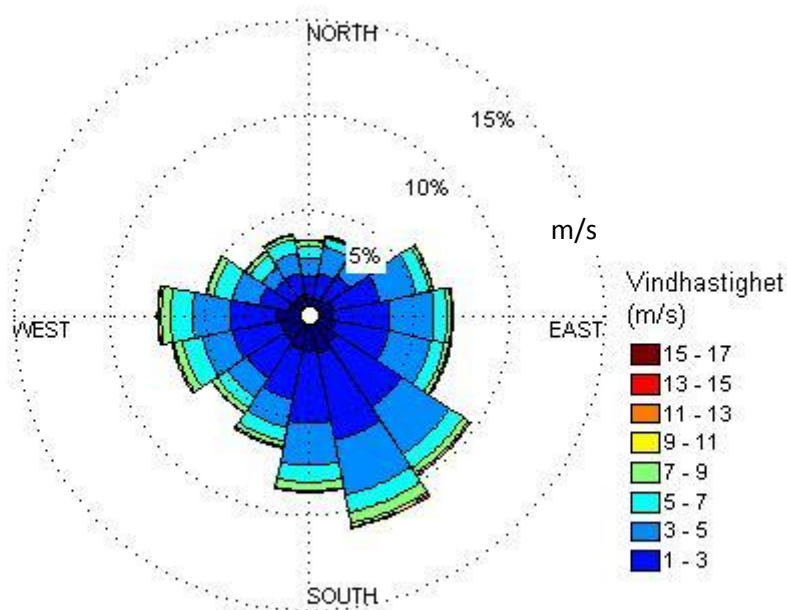
De vektorer som laddades in i Matlab från datafilen var vektorerna innehållande de uppmätta vindhastigheterna och vindriktningarna. Dessa två vektorer heter FF och DD vilket även användes som namn i simuleringsprogrammet. De nya vindhastigheterna anpassades till höjderna 24 och 27 meter, detta för att taket på den undersökta platsen är 17 meter högt och verken har master som är tio eller sju meter höga. Utifrån indelningen av områdena kring Gränby centrum och yråhetsklassificeringen av dem bestämdes råhetsfaktorerna, vilka presenteras i tabell 10 och områdena är de samma som i figur 16.

Tabell 10. Råhetsfaktorer för områdena kring Gränby Centrum.

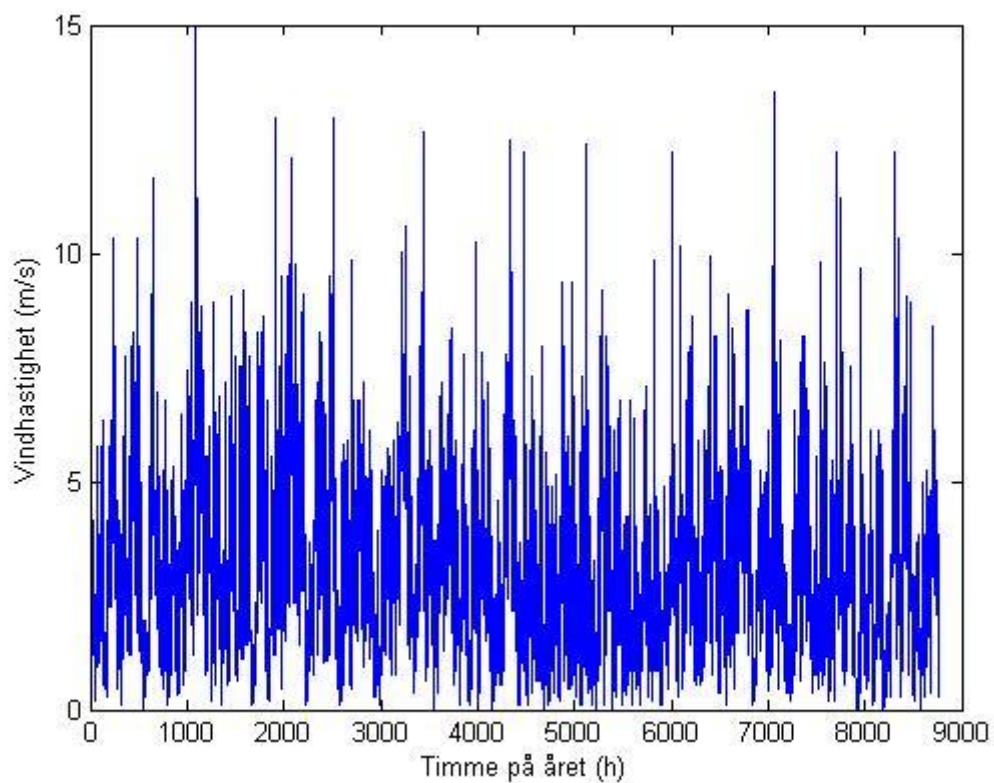
Område	Råhetsfaktor
1	0,25
2	0,1
3	0,45
4	0,4
5	0,5

För anpassningen av vindhastigheten hos vinden som kommer in över fastighetens tak sattes en generell koncentrationsfaktor för hela taket. Givetvis finns det riktningar där faktorn är högre och lägre, men för att underlätta simuleringen sattes en generell faktor. Denna faktor bestämdes till 0,85, vilket innebär att vinden som kommer in över taket påverkas negativt. Vinden från riktningen 160 grader till 360 grader påverkas av taket, alltså västerifrån. Från de övriga riktningarna kommer inte vinden hinna att påverkas av byggnadens tak. Detta på grund av att verken kommer att vara uppsatta över byggnadens gränsskikt som uppkommer när vinden kommer från de vinklarna.

Efter anpassningen av vindhastigheten blev årsmedelvärdet för 27 meters höjd och 3,184 m/s och för 24 meters höjd 3,13 m/s. Eftersom det inte blev en så stor skillnad presenteras bara graferna gällande vindrosen och vindhastigheten under ett år, för höjden 27 meter.

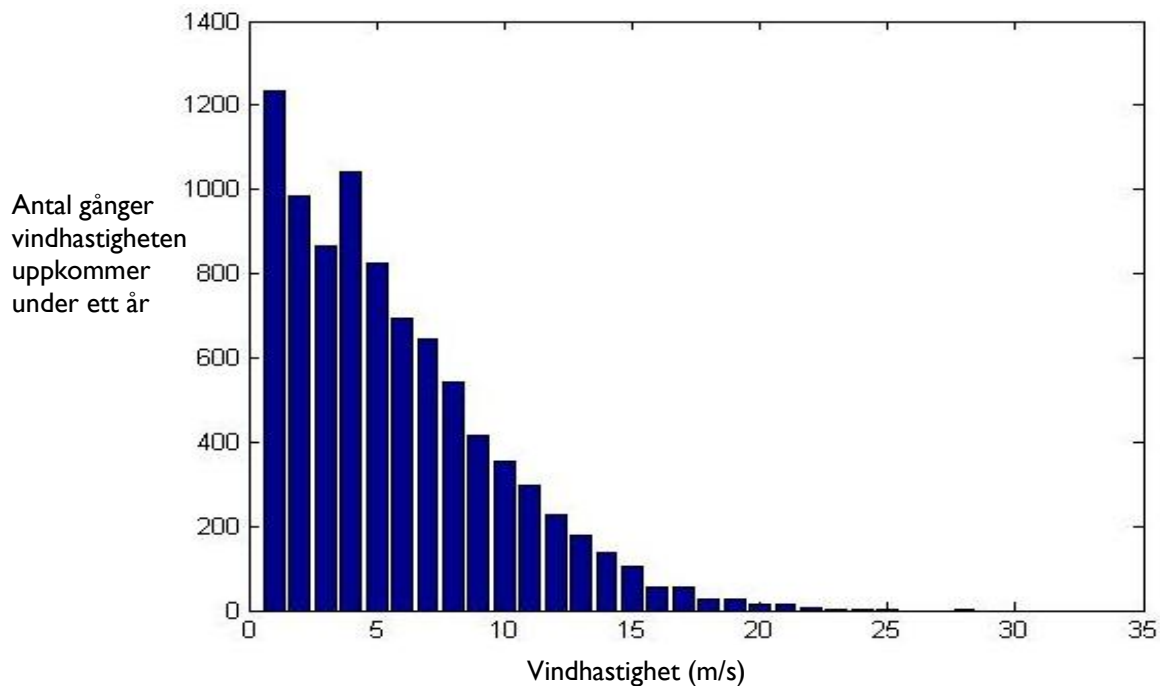


Figur 22. Vindros för 27 meters höjd.



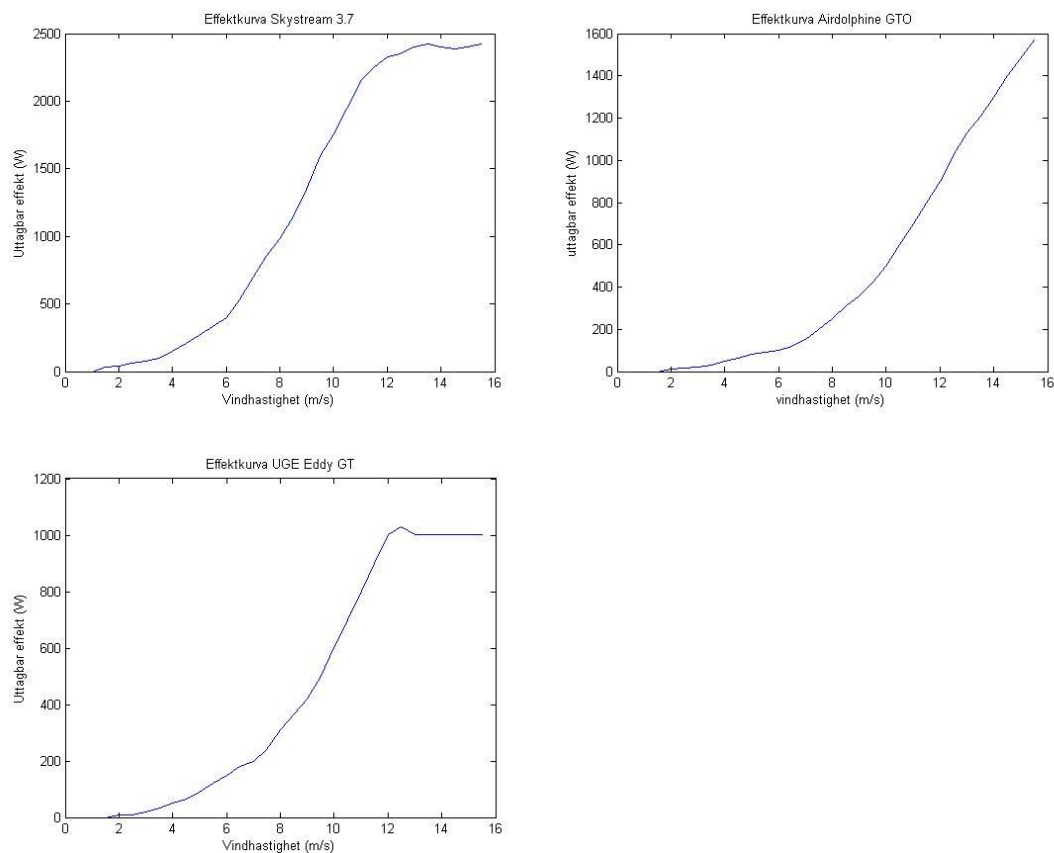
Figur 23. Vindhastigheten för mätåret.

Summering av den resulterande vindmatrisen gav följande fördelning av vindhastigheten över året då mätningarna skedde, detta visas i figur 24.



Figur 24. Vindhastighetens fördelning.

Inläsning av de olika verkens effektkurvor gav tre grafer, vilka visas i figur 25-27. Multiplikering av vektorn med de inlästa effektkurvorna och vektorn med vindhastighetens fördelning gav ett verks årsproduktion.



Figur 25-27. De inlästa effektkurvorna.

Från uppdelningen av vindrosen kan det utläsas att vindkraftverken kommer att påverka varandra när vinden kommer från sex olika riktningar. Dessa riktningar förekommer mellan 3 till 10 procent av tiden, se tabell 11 nedan. Verken anses vara placerade med ett sådant avstånd att det för övriga vindriktningar inte sker någon negativ påverkan mellan verken.

Tabell 11. Utifrån de riktningar som vinden kommer ifrån påverkas verken.

Riktning	Antal verk som påverkas	Procent av tiden
1	2	3
2	2	7
3	3	11
4	2	6
5	2	5
6	3	3
Totalt	-	35

Utifrån tabell 11 går det att se att 35 procent av tiden kommer vindkraftverken påverka varandra negativt. Utifrån teorin i Wind energy explained har verken placerats på ett avstånd att påverkan minskas, vilket ger en reduktion av produktionen med 30 procent för två eller tre verk 35 procent av tiden. Detta betyder att hela systemet med fem verk producerar

maximalt under 65 procent av tiden medans det producerar 70 procent av max under 35 procent av tiden.

6.6 Ekonomisk analys

Den ekonomiska analysen gjordes i Excel med hjälp av en mall som Energi och Elkraftsgruppen på Grontmij använder när de projekterar vindkraftverk. I samråd med medarbetare på denna grupp förenklades denna och vissa poster i den togs bort som inte skulle gälla vid denna analys.

Mallen räknar ut vilka intäkter som kommer att komma utifrån en given produktion, produktionskostnader och kapitalkostnader. I mallen ställer användaren in parametrarna själv och i många fall baseras parametrarna på erfarenhetsmässigt antagna värden. I tabell 12 nedan presenteras vilka parametrar som kan ställas in och hur dessa har valts under denna ekonomiska analys.

Tabell 12 visar vilka parametrar som skall ställas in i mallen och hur de har ställts in. Alla priser är inklusive moms.

Parametrar som kan ställas in	Hur de ställdes in
Hur stor investeringen är	Beror på vilken produkt som undersöktes
Hur många procent av investeringen som är i form av banklån	100 %
Bankränta	5 %
Livslängd	20 år
Amortering	20 år
Produktion i GWh	Beror på vilken produkt som undersöktes
Medelinflation	1,02
Elpris	0,535 kr/kWh
Elprisinflation	1,03
Elcertifikat	0,25 kr/kWh
Energiskatt	0,3663 kr/kWh (endast med i kalkylen av vindkraft)
Diverse kostnader	Olika för vindkraft och solceller

I den ekonomiska analysen antas det att företaget tar ett banklån för att täcka hela investeringskostnaden till en antagen ränta på 5 procent. Amorteringar kommer att ske löpande under hela livslängden för produkterna, vilket innebär att amorteringstiden har ställts in till 20 år för alla produkterna.

Medelinflationen sattes till 2 %. Detta värde används av Energi och Elkraftsgruppen på Grontmij vid projektering av vindkraft under 2012. Elpriset antas öka något mer än inflationen, elprisinflationen sattes till 3 %. Elpriset har satts till 53,5 öre/kWh, då det antas vara ett rimligt pris gällande Gränby centrum. Ersättningen för elcertifikaten baseras på snittpriset för dem under 2012 som var 250 kr/MWh.

Den ekonomiska analysen har gjorts i ett antal olika fall då förutsättningarna skiljde mellan vindkraftverken och solceller. Vid installation av solceller kan man som nämnts tidigare erhålla ett ekonomiskt stöd från energimyndigheten. Detta har resulterat i två fall för varje produkt, beroende på om stödet har erhållits eller om det inte har erhållits. I den ekonomiska analysen av vindkraftverken har energiskattereduktionen använts.

Diversekostnaderna har antagits vara olika beroende på om det är vindkraftverken eller solcellerna som har undersökts, antagna värden är 10 000 kronor för vindkraftverken och 5 000 kronor för solcellerna. Skillnaden uppkommer på grund av att vindkraftverken kräver underhåll i större utsträckning än solcellerna, dock är inte underhållskostnaden exakt samma under åren, utan det är ett medel utslaget på livslängden. Även kostnaden för att anställd skall spendera tid till att sälja elcertifikaten en gång per år finns med i de diversekostnaderna. Dock antas denna del vara ganska liten då inte mycket tid krävs till att göra just detta, då det är ganska få certifikat att sälja och ingen pristopp behöver bevakas eller väntas in för att få ut det maximala beloppet.

Parametern som fördes in angående energiskatten var för vindkraft 0,3663 kr/kWh och för solceller lämnades denna parameter tom. Detta på grund av att en reduktion av energiskatten får göras om elen produceras med ett vindkraftverk och inte om den är producerad med solceller. Detta leder alltså till att för elen producerad av vindkraftverken kan den energiskatt som annars skulle betalas kan dras av och detta resulterar i att den kan läggas in i kalkylen som en intäkt.

När alla dessa parametrar har ställts in presenteras ett kalkylblad med siffror för varje år under produktens livslängd. I kalkylen summeras hur mycket ersättning som fås per producerad kWh, eventuell energiskattereduktion och hur mycket kvotplikten reducerar ersättningen från elcertifikaten. Sedan görs det en uträkning av intäkterna där beloppen för dessa utifrån simulerad årsproduktion summeras till hur mycket intäkter som erhålls. Produktionskostnaderna summeras även de i en post, dock är de enda produktionskostnaderna i denna analys diverse kostnader. Utifrån storleken på investeringen, räntan och under hur lång tid som amorteringarna skall göras räknas kapitalutgifterna ut. Sedan dras produktionskostnaderna och kapitalutgifterna från intäkterna och ett kassaflöde fås för varje år under produktens livslängd. I appendix 2 visas ett exempel på ett kalkylblad.

I alternativen för solceller är arbetskostnaden inräknad i systempriset, vilket gör att den finns med i den ursprungliga investeringen. För vindkraftverken däremot var arbetskostnaden inte med i de prisuppgifter som togs fram. Detta ledde till att, i samråd med handledare, installationspriset bestämdes till 60 000 kr för UGE Eddy GT och 40 000 kr för de andra. Priset baseras på att två mannar får arbeta i två dagar för att installera verken till en timkostnad på 1 000 kr/h, plus inhyrande av en lyftkran för att kunna montera produkterna. Kranen antas kosta 12 000 kronor att hyra för de två dagarna. Skillnaden ligger i att UGE Eddy GT väger mera och därför är svårare att installera vilket antas kräva arbete under ytterligare en dag.

Utifrån kalkylen har sedan ett nuvärde räknats upp med hjälp av Excels inbyggda funktion NETNUVÄRDE. Denna funktion används för att räkna ut nuvärdet på en serie betalningar med en bestämd kalkylränta. I den här analysen har diskonteringsräntan satts till 6,2 procent, vilket är ett erfarenhetsmässigt antagande som Grontmij bland annat använder vid ekonomisk kalkylering av vindkraftverk. Det är kassaflödet i kalkylen som är den serie betalningar som används i funktionen.

Ett brytpris togs fram för varje alternativ genom att anpassa elpriset tills det att nuvärdet blev lika med eller i närheten av noll.

7 Resultat

I nedanstående avsnitt presenteras resultatet av simuleringarna av vindkraftverken och solcellerna och den ekonomiska analysen. Resultatet består av möjlig produktion under ett år, investeringskostnad, samt årskostnad. För solcellerna presenteras även hur en installation skulle se ut i fråga om antal paneler, antal parallellkopplade paneler, antal seriekopplingar och total panelyta. Sedan presenteras resultatet av känslighetsanalysen.

7.1 Vindkraft

Tabell 13. Presentation av resultatet från simuleringen för de olika vindkraftverken.

	UGE Eddy GT	Airdolphine GTO	Skystream 3.7
Årsproduktion (kWh)	2 020,5	1 931	6 739
Total effekt (kW)	5	5,5	10,5
Utnyttjandegrad (i %)	4,6	4	7,3
Kostnad för utrustningen (kr)	625 000	445 000	595 000
Arbetskostnader (kr)	60 000	40 000	40 000
Total investering (kr)	685 000	485 000	635 000
Nuvärde (kr)	- 729 840	- 548 010	- 615 700
Brytpreis (kr)	25,8	20,4	6,93

7.2 Solceller

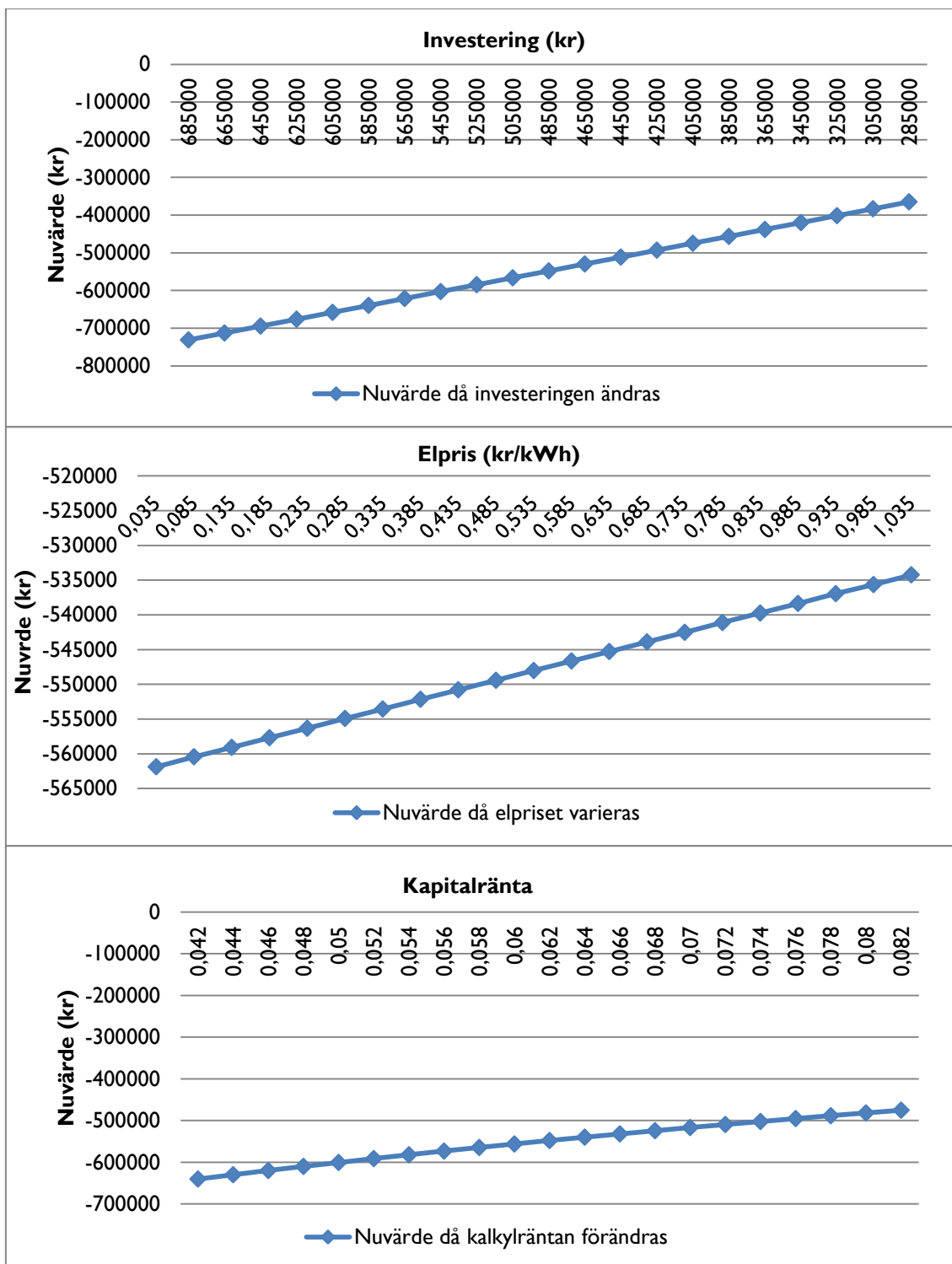
Tabell 14. Presentation av resultatet från simuleringen av de olika alternativen för solcellspanelerna

	Sanyo HIT-235	IBC Polysolar 235 LS	Solibro SL2
Årsproduktion (kWh)	124 000	99 540	93 800
Produktion per installerad effekt och år (kWh/kW/år)	1 048	1 038	1 062
Systemets effekt (kW)	118	96	88
Total modularea (m²)	699	679	692
Utnyttjandegrad (den globala instrålningen var 1293 kWh/m²) (i %)	13,7	11,3	10,5
Antal moduler i systemet	504	408	736
Antal parallellkopplade moduler i antal seriekopplingar per rad	21 x 6	17 x 6	8 x 23
Investeringskostnad (utan stöd)	3 700 000	3 000 000	2 750 000
Investeringskostnad (med stöd 35%)	2 406 000	1 950 000	1 789 000
Nuvärde utan stöd (kr)	- 2 257 400	-1 852 500	- 1 678 900
Nuvärde med stöd (kr)	- 1 072 500	- 891 000	- 799 000
Brytpris utan stöd (kr)	1,81	1,838	1,787
Brytpris med stöd (kr)	1,142	1,162	1,132

7.3 Det optimala systemet

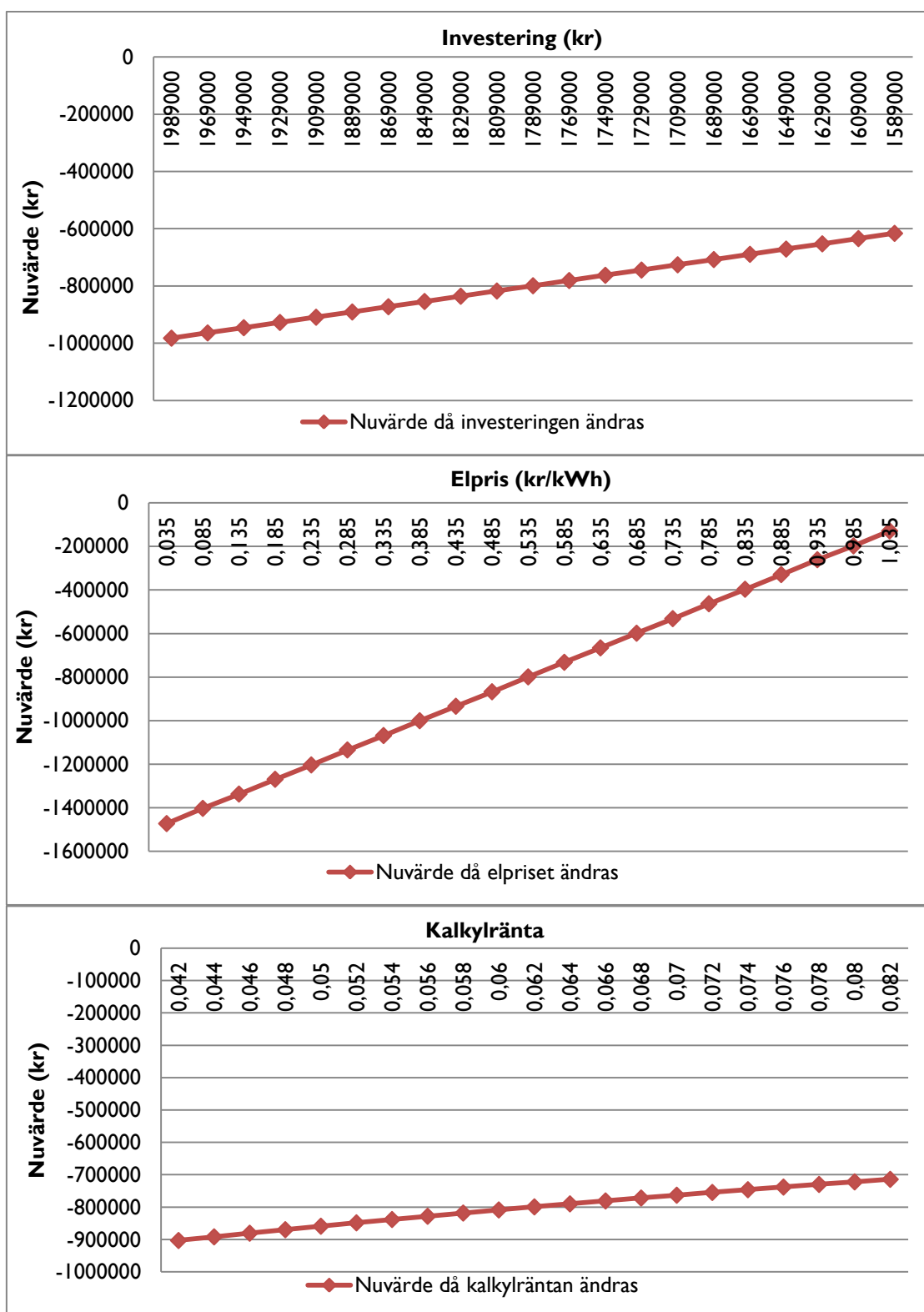
Utifrån resultaten som presenteras i tabellerna ovan identifieras det optimala systemet bestående av vinkraftverken Airdolphine GTO och solcellerna Solibro SL120. Systemet består av fem stycken vindkraftverk och 736 stycken solcellspaneler, med den totala arean på 692 m². Systemets totala effekt blev 98,3 kW och en total simulerad årsproduktion blev 95,7 kWh. Då investeringen för solcellerna beror på ett eventuellt stöd från Energimyndigheten kommer antas det att stödet för solceller från Energimyndigheten har erhållits. Detta leder till att den totala investeringskostnaden för det optimala systemet blev 3 235 000 kronor och nuvärdet av denna investering blev negativt; -1 347 000 kronor.

Utifrån den känslighetsanalys som gjorts för alternativen som bildar det optimala systemet går det att se att nuvärdet följer ett linjärt förhållande med de undersökta parametrarna. Nedan presenteras graferna från känslighetsanalysen. De presenteras för varje parameter som ändrades i analysen.



Figur 28, a-c. Graferna visar nuvärdet förändras för Airdolphine GTO då parametrarna varierar.

Utifrån graferna går det att utläsa att den parametern som har störst signifikansnivå för nuvärdet är storleken på investeringen. Storleken på investeringen påverkar kassaflödet väldigt mycket då räntekostnaderna och amorteringarna ökar vid en större investering. Känslighetsanalysen visade även att nuvärdet alltid ligger på en lägre nivå än storleken på investeringen förutom vid känslighetsanalysen med avseende på kalkylräntan. Det går även tydligt att utläsa att produktionen för detta alternativ är för låg för att elpriset skall få någon egentlig signifikans hos nuvärdet.



Figur 31-33. Graferna visar hur nuvärdet förändras för Solibro SLI 20 då parametrarna varierar.

Utifrån graferna ovan går det att se att elpriset har högst signifikansnivå för nuvärdet hos alternativet för solcellerna, dock har storleken på investeringen även den en ganska hög signifikansnivå. Till skillnad från alternativet för vindkraftverken producerar solcellerna

tillräckligt mycket för att nuvärdet skall ligga på en klart lägre nivå än storleken på investeringen. Påverkan av en förändring av kalkylräntan blir jämfört med de andra två parametrarna inte signifikant.

8 Diskussion

Som det kan ses i resultatet blir inget alternativ ekonomiskt lönsamt. Detta på grund av att förhållandena på plats gör att produktionen inte blir tillräckligt stor, vilket leder till att kostnaderna överstiger intäkterna. Det som gör att kostnaderna blir stor och påverkar resultatet negativt är att investeringen är stor. Eftersom kostnaderna främst består av amorteringar och räntekostnader får detta stor inverkan på nuvärdet, vilket leder till att en stor investering renderar i ett stort negativt nuvärde.

När kostnaderna ställs mot intäkterna blir det tydligt att större produktion leder till större intäkter, dock visar den ekonomiska analysen att ett alternativ med högre produktion kräver en högre investering. Detta leder i sin tur till att räntekostnaderna och amorteringarna ökar. Då elpriset ligger på den nivå som det gör i analysen ger en ökning av produktionen ingen förbättring av nuvärdet. På grund av detta ger en stor investering ett sämre nuvärde än en mindre investering. Vilket går att utläsa i det ekonomiska resultatet för solcellerna, ett alternativ med högre installerad effekt krävde en högre investering.

Om investeringen skulle kunna genomföras med likvida medel skulle kassaflödet påverkas positivt, eftersom amorteringar och räntekostnader inte krävs. Detta kan leda till att nuvärdet blir positivt och investeringen blir lönsam. Om investeringen blir lönsam då beror på hur stor produktionen är, för solcellerna skulle ett positivt värde kunna uppvisas på grund av en stor produktion. Medan för vindkraften kommer inte intäkterna från produktionen överstiga de diverse kostnaderna i kalkylen. Till detta skall dock det tilläggas att företaget skulle gå miste om ränteintäkter som de investerade tillgångar annars skulle genererat.

Även brytpriset är starkt kopplat till hur mycket energi som ett alternativ genererar. Då produktionen är låg krävs ett högre brytpris för att uppnå ett nuvärde som blir positivt, samtidigt som ett alternativ med hög produktion krävs ett lägre brytpris. Alternativen för solcellerna uppvisar ett brytpris som ligger relativt nära dagens elpris, vilket innebär att en framtida ökning av det kan göra en investering i solceller lönsam. Dock bör påtalas att elpriset har under de senaste åren legat stabilt på en låg nivå. Resultatet visar att vid en ökning av elpriset har solceller en klar fördel jämfört med vindkraften.

I dagsläget premieras teknikerna med olika lösningar för ekonomiskt stöd, vindkraften genom energiskattereduktion och energimyndighetens investeringsstöd för solceller. Utan dessa ekonomiska stöd blir utgången av nuvärdet sämre. Ett system av solceller påverkas i större grad än ett med vindkraftverk, detta på grund av att stöden ser olika ut. Påverkan blir större för ett system med solceller då stödet beror på investeringens storlek och kostnaderna blir därför högre om stödet inte kan utnyttjas. För vindkraften beror bidraget av energiskattereduktionen på hur stor produktionen är, vilket leder till att påverkan blir större om produktionen blir större. Detta kunde ses i det ekonomiska resultatet då ett alternativ med högre produktion än de andra påverkades mest.

Utifrån den ekonomiska analysen blir det tydligt att någon form av ekonomiskt stöd är en nödvändig förutsättning för att det fortsatt skall vara intressant att satsa på installation av solceller eller småskalig vindkraft i framtiden. Om ytterligare stöd skulle betalas ut i dagsläget skulle detta ha potentialen att kunna ge lönsamhet, dock skulle stödet i dagsläget behöva vara anpassat till vilken teknik det ges till. Om stödet för solcellerna utökas och även skulle gälla vindkraft och energi producerad från solceller skulle berättigas skattereduktion, skulle

nuvärdet förbättras och även brytpriset skulle bli lägre för alla alternativen. Trots detta skulle inget utav alternativen bli lönsamt, dock skulle endast en mindre ökning av elpriset krävas för att alternativen skall uppvisa positivt nuvärde.

För att något av alternativen skall kunna bli lönsamma i framtiden krävs det att antingen elpriset ökar eller att produkterna utvecklas så att priserna sjunker. Den teknik som har bäst förutsättningar för att bli lönsam inom en snar framtid är solcellerna, då brytpriset för dem är relativt lågt och skalfördelarna skulle bli betydliga om kostnaderna för tekniken sjunker.

Känslighetsanalysen för nuvärdet på investeringen av vindkraftverken visade vad som kunde förväntats, nämligen att storleken på investeringen var den parametern som påverkar nuvärdet mest. Detta på grund av att investeringskostnaden som nämndes tidigare påverkar kassaflödet mest, vilket följer av att produktionen från verken är låg. Den låga produktionen leder i sin tur till att nuvärdet för detta alternativet för vindkraftverken alltid ligger över investeringen, förutom för kalkylräntan. Eftersom intäkterna från produktionen är lägre än de diverse kostnaderna gör det att nuvärdet aldrig kommer att gå över investeringen, detta leder också till att detta alternativ aldrig kan uppnå lönsamhet. Detsamma gäller för det första alternativet för vindkraftverken. För det bästa alternativet prestandamässigt ligger nuvärdet under storleken på investeringen, vilket gör att det alternativet har potential att bli lönsamt. Dock krävs det en drastisk ökning av elpriset eller minskning av den investeringen som krävs.

I känslighetsanalysen för den delen av systemet som består av solcellerna identifierades elpriset som den mest signifikanta parametern, detta blir fallet eftersom produktionen är hög. I känslighetsanalysen med avseende på elpriset uppnås bästa alternativets brytpris. Även storleken på investeringen har en betydande påverkan på nuvärdet, detta på grund av att investeringen har stor betydelse för hur kostnaderna ser ut. Inom ramarna för känslighetsanalysen uppnås nästan lönsamhet för det bästa alternativet. Om elpriset och storleken på investeringen ändras kommer lönsamhet att kunna uppnås med mindre förändring individuellt för de olika parametrarna. Det blir en viss påverkan av en förändring hos kalkylräntan, dock är denna påverkan avsevärt mycket mindre än de andra två parametrarna.

Utnyttjandegraden för vindkraften var väldigt låg i denna undersökning, den varierade mellan 4 och 7,3 procent för de olika alternativen. På land i Sverige är ett standardmått på utnyttjandegrad 25 procent (Elektricitetslära). Vid uträknande av utnyttjandegrad för vindkraft ställs den faktiska produktionen mot att verket producerar maximalt under årets alla timmar. Detta gör att vindförhållandena inte tas i beaktning så att måttet blir viktat till den plats som verket är installerat på. Vilket leder till att verk på platser med sämre vindförhållanden visar upp en sämre utnyttjandegrad, vilket är en anledning till att utnyttjandegraden för vindkraftverken i denna undersökning blev låg. Vindförhållandena på platsen var väldigt dåliga, medelhastigheten var ungefär 3,1 meter per sekund vilket till och med är lägre än ett utav alternativens "cut-in speed". Redan vid en granskning av vindförhållandena innan en anpassning gjordes kunde det anas att förhållandena var svaga och eventuellt inte tillräckligt bra.

För solcellerna ligger utnyttjandegraden på mellan 10,5 till 13,7 procent, detta är ungefär vad om kunde förväntas. Standardvärdet för ett systems utnyttjandegrad ligger ungefär kring detta värde, 10 till 12 procent (Elektricitetslära). Vid uträknande av utnyttjandegrad för solceller ställs den faktiska produktionen mot den totala globala instrålningen som träffar den totala installerade ytan. Detta leder till att måttet beror på hur förhållandena ser ut på plats. Lägg därtill att måttet innehåller flera delar som påverkar produktionen. Dessa delar är exempelvis

elektriska förluster i systemet, verkningsgraden hos solcellerna, skuggning med mera. Det faktum att utnyttjandegraden håller samma nivå som standardvärdet för det säger att förhållandena på platsen uppvisar goda förutsättningar för att producera elektricitet med solceller.

Data om vindförhållandena på platsen anses hålla hög kvalitet, då dessa kommer från ett etablerat program som används i stor utsträckning. Dock finns det vissa osäkerheter i anpassningen av data till de exakta förhållandena som råder på platsen. Som tidigare har nämnts i rapporten krävs det mätningar på plats under en lång tid och även en luftflödesanalys i en vindtunnel för att kunna beskriva vindförhållandena med största noggrannhet. På grund av tidsbegränsningen som fanns för detta examensarbete har gjort att detta inte varit möjligt, dock har erfarenheter från sådana studier analyserats och applicerats på detta fall. Detta har gjort att det förekommer vissa osäkerheter i simuleringarna, då risken har funnits att vindförhållandena över- eller undervärderats. Dock har arbetsgången anpassats för att minska osäkerheterna och vindförhållandena som har använts till simuleringen anses återspegla de verkliga förhållandena på ett bra sätt.

Trots att det finns många potentiella källor till osäkerheter i resultatet av simuleringen, anses resultatet ligga på en rimlig nivå utifrån de förutsättningar som finns på platsen där de är uppsatta. Som nämnt tidigare har tidigare undersökningar visat att uppgifter om produktion från småskaliga vindkraftverk tenderar att överdrivas av leverantörerna och att det krävs mätningar på befintliga verk på en specifik plats för att exakt kunna utvärdera produktionen. Utifrån detta anses att simuleringen av produktionen från vindkraftverken är rimlig, den är varken överdrivet låg eller hög. Dessutom är vindförhållandena på platsen så pass dåliga att en hög produktion inte kunde förväntas. Skulle ett vindkraftverk sättas upp på en plats med optimala vindförhållanden kan ett verk med 1 kW effekt ungefär en årlig produktion på 3000 kWh.

Något som inte går att simulera är vindkraftverkens påverkan på byggnaden, om vibrationer eller stomljud uppstår. Trots att åtgärder har vidtagits vid installationen för att minska vibrationerna går det inte att förutse om de uppkommer vid drift direkt eller efter några år. Detta är ett element som skapar stor osäkerhet kring en investering av vindkraftverken. Det finns exempel där ett vindkraftverk monterades ner efter några veckor i drift för att boende klagade på vibrationer. Mattias Gustavsson på Gävle energi påpekade att deras tillvägagångssätt till detta vid installationen av vindkraftverken på Läkerol arena var en form av experimentell. Om det skulle uppkomma vibrationer som stör i framtiden får de ta hand om dem då.

Resultaten från simuleringen av produktionen med solceller anses vara rimlig, då PVsyst är ett vida använt program som i flera fall testats mot mätningar på existerande installationer. Även rimligheten i data anses vara hög, även här är det etablerat program som har använts för att erhålla data. Till skillnad från vindkraften krävdes det ingen anpassning av förhållandena på plats, vilket minimerar osäkerheten när det gäller data. Givetvis finns det källor till osäkerheter i simuleringen i programmet som kommer från antaganden som har gjorts inför analysen. En av dessa är antagandet att det inte finns någon horisont som påverkar, dock skulle en eventuell påverkan av horisonten blivit låg då solen står lågt och intensiteten i instrålningen är låg. Dessutom skuggas de bakomliggande raderna av den första raden.

En faktor som möjligt har gett ett missvisande resultat är hur priset har satts på solcellsanläggningen. Priset sattes till 31,2 kronor per installerat antal watt. Detta har gjort att en

installation med låg effekt har krävt en mindre investering än en installation med hög effekt. Vilket ledde till att det alternativet med lägst effekt blev det som uppvisade det bästa resultatet ekonomisk sett, trots att det alternativet uppvisade lägst produktion. Detta visar att det egentligen inte spelar någon roll vilket märke panelen har, utan det som spelar roll är vilken effekt den har. På grund av att prissättningen är gjord som den är blev resultatet framför allt beroende av hur stort system som installerades. En sak som förloras vid en sådan prissättning är skalfördelarna av en stor installation. Hedström (2012) på Direct energy påpekade att varje installation är unik med varierande förutsättningar och att detta leder till att de inte har något exakt pris på deras produkter utan att de väger in olika faktorer och sätter ett systempris. Hade ett exakt pris per panel kunnat användas kan det antas att en panel med hög effekt till ett lågt pris hade vart det bästa alternativet att använda i en installation.

En osäkerhet som inte går att försäkra sig mot i en sådan här simulering eller anpassning av data är framtiden. Det går aldrig att veta om en yta framför en fastighet kommer att bebyggas eller ändras på och att det leder till att förhållandena förändras kraftigt. Dock finns det övergripande planer för hur områdena får byggas ut och hur de planerar att byggas ut hos kommunens stadsbyggnadskontor. Detta kan vara en faktor som kan tas med vid projekteringen av ett system och som kan påverka den avsevärt.

En faktor som fanns med i åtanke tidigt vid val av undersökta produkter var dess estetiska egenskaper, då ett viktigt resultat av installationen skall vara maximal exponering. Dock är det nästintill omöjligt att mäta vilket alternativ som ger bäst exponering. Ny och spännande teknik kan potentiellt få större genomslagskraft om ett infotek eller liknande upprättas i fastigheten för att öka exponeringen. En ökad exponering ger ökade marknadsföringsfördelar och företaget kan profilera sig som miljövänligt. Det kan tänkas att vindkraften har en större genomslagskraft än solcellerna, detta på grund av att de är i rörelse och att de sticker ut mer än en rad med solceller.

9 Slutsats

Utifrån simuleringen och den ekonomiska analysen är det inte ekonomiskt hållbart att i dagsläget installera ett system bestående av solceller och småskaliga vindkraftverk i urban miljö. Ett system bestående av endast en av teknikerna blir inte heller det ekonomiskt hållbart i dagsläget, trots att det går att erhålla ekonomiskt stöd.

Ett system bestående av endast solceller kan i framtiden bli lönsamt om elpriset stiger, tekniken blir billigare eller ytterligare stöd kan garanteras. Detta kan utläsas från resultatet av känslighetsanalysen, där elpriset och storleken på investeringen påverkade nuvärdet.

För vindkraften är det svårt att se det skall kunna bli lönsamt i framtiden, mest på grund av att vindförhållandena i urban miljö generellt är svaga. Detta kan utläsas ur känslighetsanalysen då nuvärdet visar upp ett så dåligt resultat. Dessutom förloras skalfördelarna när verken blir mindre för att kunna monteras i urban miljö. Detta visar sig i storleken på investeringen, som blir den mest signifikanta parametern i känslighetsanalysen. Lägg till de stora osäkerheterna som finns kring ett vindkraftverks påverkan på den kringliggande miljön och byggnaden. Allt detta leder till att en investering i vindkraftverk monterade på tak i urban miljö inte rekommenderas.

10. Källförteckning

10.1 Tryckta källor

Ayhan, Dursun och Saglam, Safak (2012) A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. I Renewable and Sustainable Energy Reviews. Sid. 1040-1049. Januari 2012

Charreron, Daimen och Moreno, David (2010) Case study wind turbine at Läkerol Arena. Examensarbete: Energy systems, University of Gävle

Emeis, Stefan och Turk, Matthias (2007) Comparison of Logarithmic Wind Profiles and Power Law Wind Profiles and their Applicability for Offshore Wind Profiles. I Pienke, J., Schaumann, P. och Barth, S. Wind energy. Sid 61-64. Berlin: Springer Berlin Heidelberg

Hodge, B. K. (2010) Alternative energy systems and applications. Hoboken, NJ: Wiley

Lindhal, Johan (2012) National Survey Report of PV power applications in Sweden 2011. Uppsala: Ångström Solar Center. På uppdrag av IEA och Energimyndigheten.

Manwell J.F, MCgowan J.G, Rogers A.L.(2009) Wind Energy explained: Theory, design and application. Chichester: Wiley

Mertens, Sander (2006). Wind Energy in the Built Environment: Concentrator Effects of Buildings. Essex: Multi-Science

Sidén, Göran (2009). Förnybar energi. Lund: Studentlitteratur.

Wizelius, Tore (2007). Vindkraft i teori och praktik, 2:a uppl. Lund: Studentlitteratur.

Walker, Sara Louise (2011). Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale: a review of methods of estimating urban wind resource. I Energy and Buildings, sid 1852-1862. Elsevier 2011-04-04

10.2 Muntliga källor

Andersson, A. (2012) Tidigare Energimyndigheten. Intervjuad av Emil Andersson [Telefon] 2012-10-22.

Gustafsson, M. (2012) Projektledare, Gävle energi . Intervjuad av Emil Andersson [platsbesök] Gävle energi, 2012-11-15.

Hedström, L. (2012) VD, Direct energy. Intervjuad av Emil Andersson [telefon] 2012-12-05.

Jensen, P. (2012) Driftchef, Läkerol arena. Intervjuad av Emil Andersson [platsbesök] Läkerol arena, 2012-10-16.

Lönnfält, J. (2013) medarbetare på Grontmij AB. Intervjuad av Emil Andersson [korta samtal vid varierande tillfällen]

Sandqvist, N. (2012) Energikonsult, Grontmij. Intervjuad av Emil Andersson [telefon] 2012-10-24

Kotilainen, J. (2012) Teknisk förvaltare, Gränby Centrum. Intervjuad av Emil Andersson [platsbesök] Gränby Centrum, 2012-10-08.

10.3 Elektroniska källor

Christianson, Sophia och Olenmark, Mikael (2009) Urban vindkraft: dagens kunskapsläge. [Elektronisk] Examensarbete: LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Lunds universitet.

MIT (2011) Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables. [Elektronisk] MIT Energy Initiative symposium. Massachusetts Institute of Technology 20 april 2011. USA

Nirmal-Kumar, C. Nair och Zhang Lixi (2009) SmartGrid: Future networks for New Zealand power systems incorporating distributed generation. [Elektronisk] I Energy Policy, september. Tillgänglig:

<<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.its.uu.se/science/article/pii/S0301421509001694>> [2013-02-02]

Olsson, Kajsa (2011) Vindkraft och säkerhet [Elektronisk] Nätverket för vindbruk. Tillgänglig: <<http://www.natverketforvindbruk.se/sv/Aktuellt/Nyheter/Vindkraft-och-sakerhet/>> [2013-02-04]

Semper, Kaianders (2009). Så höga är förlusterna i elnätet. [Elektronisk] Nyteknik, 18 november. Tillgänglig: <http://www.nyteknik.se/popular_teknik/teknikfragan/article265620.ece> [2013-02-02].

10.4 Internetkällor

Atrium Ljungberg/ Våra områden och fastigheter/ Uppsala/ Gränby Centrum. Nacka: Atrium Ljungberg. Tillgänglig: <<http://www.atriumljungberg.se/Varaomradenochfastigheter/Uppsala/Granbycentrum/>> [2013-02-04] (A)

Atrium Ljungberg/ Om oss/ Hållbart företagande/ BREEAM. Nacka: Atrium Ljungberg. Tillgänglig: <<http://www.atriumljungberg.se/Omoss/NY-Ansvarsfullt-foretagande/BREEAM/>> [2013-02-04] (B)

Direct energy/ installationer/ mer om våra anläggningar/ Gränby centrum. Tillgänglig: <http://directenergy.se/dokument/granby_centrum.pdf> [2013-02-02] (A)

Direct energy/ Produkter. Tillgänglig: <http://directenergy.se/produkter.html> [2013-02-04] (B)

Earth Observatory/ Features/ Atmosphere/ Clouds. Goddard: NASA. Tillgänglig: <<http://earth-observatory.nasa.gov/Features/Clouds/>> [2013-02-04]

EERE/ Energy basics/ Renewable energy/ Photovoltaic cells (senast uppdaterad 2011-12-08) U.S Department of Energy. Tillgänglig: <http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cells.html> [2013-02-04]

Elektricitetslära/ Forskningsprojekt/ WavePower/ Lysekilsprojektet. Uppsala: Uppsala universitet, institutionen för elektricitetslära. Tillgänglig: <<http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet.html>> [2013-02-04]

Elsäkerhetsverket/ Förnybar energi/ Inkoppling och drift (senast uppdaterad 2012-01-07) Kristinehamn: Elsäkerhetsverket. Tillgänglig: <<http://www.elsakerhetsverket.se/sv/Fornybar-energi/Vad-du-ska-tank-pa/>> [2013-02-02]

EMSD/ Information (senast uppdaterad 2007) Hong Kong: EMSD. Tillgänglig: <http://wind.emsd.gov.hk/Wind_Resource_Information.html> [2013-02-04]

Energimyndigheten/ Hushåll/ Producera din egen el (senast uppdaterad 2012-06-25). Eskilstuna: Energimyndigheten. Tillgänglig: <<http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Producera-din-egen-el/>> [2013-02-02] (A)

Energimyndigheten/ Företag/ Elcertifikat/ Om elcertifikatsystemet (senast uppdaterad 2012-05-30). Eskilstuna: Energimyndigheten. Tillgänglig: <<http://energimyndigheten.se/sv/Foretag/Elcertifikat/Om-elcertifikatsystemet/>> [2013-02-02] (B)

Energimyndigheten/ Hushåll/ Aktuella bidrag och stöd du kan söka/ Stöd till solceller (senast uppdaterad 2013-01-31) Eskilstuna: Energimyndigheten. Tillgänglig: <<http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Aktuella-bidrag-och-stod-du-kan-soka/Stod-till-solceller/>> [2013-02-02]

Energimyndigheten/ Om oss/ Vår verksamhet/ Främjande av vindkraft/ Vindkartering/ Vindkartering (senast uppdaterad 2010-02-08) Eskilstuna: Energimyndigheten. Tillgänglig: <<http://energimyndigheten.se/Om-oss/Var-verksamhet/Framjande-av-vindkraft/Vindkartering/>> [2013-02-04]

Energimyndigheten/ Företag/ Energieffektivt byggande/ Lokaler och flerbostadshus/ Bygga och renovera/ Solceller. (senast uppdaterad 2011-03-02) Eskilstuna: Energimyndigheten. Tillgänglig: <<http://www.energimyndigheten.se/sv/Foretag/Energieffektivt-byggande/Lokaler-och-flerbostadshus/Bygga-och-renovera/Solceller/>> [2013-02-04]

Gränby Centrum/ Om Gränby centrum. Uppsala. Tillgänglig: <<http://www.granbycentrum.se/index.php?pagel=15>> [2013-02-04]

Matworks/ sökord: windrose (senast uppdaterad 2012-11-26) Tillgänglig: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17748-windrose>> [2013-02-02]

Naturvårdsverket/ Verksamheter med miljöpåverkan/ Buller/ Vindkraft (senast uppdaterad 2012-06-27) Stockholm Naturvårdsverket. Tillgänglig: <<http://www.naturvardsverket.se/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Vindkraft/>> [2013-02-04] (A)

Naturvårdsverket/ Verksamheter med miljöpåverkan/ Buller/ Vindkraft/ Mätning och beräkning av ljud från vindkraft (senast uppdaterad 2012-06-19) Stockholm Naturvårdsverket. Tillgänglig: <<http://www.naturvardsverket.se/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Vindkraft/Matning-och-berakning-av-ljud-fran-vindkraft/>> [2013-02-04] (B)

Naturvårdsverket/ Verksamheter med miljöpåverkan/ Energi/ Vindkraft/ Vindkraft- ljud och skuggor (senast uppdaterad 2012-06-28) Stockholm Naturvårdsverket. Tillgänglig: <<http://www.naturvardsverket.se/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Energi/Vindkraft/Webbvagledning-om-MKB-for-vindkraftprojekt/Ljud-och-skuggor/>> [2013-02-04] (C)

Newsroom Vattenfall/ Fakta och fiktion/ Sverige delas in i elområden (senast uppdaterad 2011-09-29) Stockholm: Vattenfall. Tillgänglig: <<http://newsroom.vattenfall.se/2011/09/29/sverige-delas-in-i-elomraden/>>

Northamerican solar stores/ Solar electric PV/ How solar PV works (senast uppdaterad 2012) Tillgänglig: <<http://www.northamericansolarstores.com/how-solar-pv-works.php>> [2013-02-04]

PVsyst help/ Glossary/ STC. Tillgänglig: <<http://files.pvsyst.com/help/stc.htm>> [2013-02-04]

Regeringen/ Ansvarsområden/ Miljö, energi och klimat/ Energi/ Förnybar energi (senast uppdaterad 2012-09-25). Stockholm: Näringsdepartementet. Tillgänglig: <<http://regeringen.se/sb/d/2448>> [2013-02-01]

S-solar/ Solenergi 2010/ Energifakta Del I/ Solinstrålning. Stockholm: S-solar. Tillgänglig: <<http://www.ssolar.com/Solenergi2010/EnergifaktaDELIbrSolenFramtidensbasenergi/Solinstr%C3%A5lning/tabid/608/Default.aspx>> [2013-02-01]

Sanyo/ Commercial/ Solar/ Sanyo HIT Technology (senast uppdaterad 2013) Tillgänglig: <<http://us.sanyo.com/Solar/SANYO-HIT-Technology>> [2013-02-02]

SCB/ Hitta statistik/ Artiklar/ Varannan svensk bor nära havet (senast uppdaterad 2011-05-24) Stockholm: Statistiska centralbyrån. Tillgänglig: <http://www.scb.se/Pages/Article____334172.aspx> [2013-02-02]

SMA/ Products/ Solar Inverter without Transformer/ SUNNY TRIPOWER 15000TL/20000TL ECONOMIC EXCELLENCE. Tillgänglig: <<http://www.sma.de/en/products/solar-inverter-without-transformer/sunny-tripower-15000tl-20000tl-economic-excellence.html#Technical-Data-8585>> [2013-02-02]

SMHI/ Kunskapsbanken/ Meteorologi/ Turbulens (senast uppdaterad 2009-08-19) Stockholm: SMHI. Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/turbulens-1.6067>> [2013-02-04] (A)

SMHI/ Kunskapsbanken/ Meteorologi/ solstrålning (senast uppdaterad 2009-07-13) Stockholm: SMHI. Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/solstralning-1.4186>> [2013-02-04] (B)

SMHI/ Professionella-tjanster/ Professionella-tjanster/statistik-och-data/vindrosor (senast uppdaterad 2010-12-03) Stockholm: SHMI. Tillgänglig: <<http://www.smhi.se/Professionella-tjanster/Professionella-tjanster/statistik-och-data/vindrosor-1.13999>> [2013-02-04]

Solelprogrammet/ Projekteringsverktyg/ Energiberäkningar. Stockholm: Elforsk. Tillgänglig: <<http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/energiberakningar/>> [2013-02-04]

STRI/ Svenska/ Konsulttjänster/ Elkraftintegrering/ Distribuerad generering (senast uppdaterad 2011) Ludvika: STRI. Tillgänglig: <<http://www.stri.se/index.pl?iid=6756&isa=Category>> [2013-02-02]

Svensk solenergi/ Fakta om solenergi/ Solel. Stockholm: Svensk solenergi. Tillgänglig: <<http://www.svensksolenergi.se/fakta-om-solenergi/Solel>> [2013-02-04]

Svensk energi/Elfakta/Elproduktion (senast uppdaterad 2012-11-08) Stockholm: Svensk energi. Tillgänglig: <<http://svenskenergi.se/sv/Om-el/Elproduktion>> [2013-02-01] (A)

Svensk energi/Om el/Elnätet (senast uppdaterad 2012-08-21) Stockholm: Svensk energi. Tillgänglig: <<http://www.svenskenergi.se/sv/Om-el/Elnatet>> [2013-02-02] (B)

SVK/ energimarknaden/ el/ elområden (senast uppdaterad 2011-11-07) Stockholm: Svenska Kraftnät. Tillgänglig:< <http://www.svk.se/energimarknaden/el/Elomraden/> > [2013-02-02]

Vattenfall/Om Vattenfall/Energikunskap/Om elektricitet/ Elproduktionssystemet (senast uppdaterad 2012-12-20) Stockholm: Vattenfall. Tillgänglig: < <http://www.vattenfall.se/sv/sa-har-fungerar-elproduktions.htm>> [2013-02-01] (A)

Vattenfall/ Om Vattenfall/ Vattenfall i Norden/ Så fungerar elmarknaden/ Energiskatter (senast uppdaterad 2012-12-20) Stockholm: Vattenfall. Tillgänglig: <<http://www.vattenfall.se/sv/energi-skatter.htm> > [2013-02-02] (B)

Vattenfall/ Om Vattenfall/ Vår verksamhet/ Vår elproduktion/ Om vindkraft/ Frågor och svar om vindkraft (senast uppdaterad 2012-12-20) Stockholm: Vattenfall. Tillgänglig: <<http://www.vattenfall.se/sv/miljopaverkan---fragor-och-sv.htm>> [2013-02-04] (C)

Vattenfall/ Privat/ Elnät/ Elproduktion upp till 300 kW (Senast uppdaterad 2013-01-15) Stockholm: Vattenfall. Tillgänglig: <http://www.vattenfall.se/sv/elproduktion-upp-till-300-kw.htm?WT.ac=search_success > [2013-02-02]

Vindkraft + kultur (senast uppdaterad 2010-05-12) Tillgänglig: <<http://vindkraft-kultur.blogspot.se/2010/05/vertikal-vindkraft.html>> [2013-02-04]

Wind Power Program/ 14. Wind turbine power output variation with steady wind speed. Tillgänglig: <http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm> [2013-02-04]

Windon/ Vindkraft/ Asynkron eller Synkron generator. Windon. Tillgänglig: <http://www.windon.se/se/asynkron_vs_synkron.asp> [2013-02-04]

Windturbuine installer. Tillgänglig: <http://www.windturbineinstaller.co/> [2013-02-04]

Appendix I

Första delen av simuleringsprogrammet för vindkraften.

```
% Detta program räknar om vindhastigheten från 10 meter till önskad höjd kring Gränby centrum.  
% Även vindriktning kommer att räknas ut och hur många timmar som  
% specifik hastighet inträffar från en riktning.  
% Invariabeln är den önskade höjden, hur många vindriktningar man vill  
% undersöka och hur uppdelningen av vindhastigheten. Dessutom krävs det att  
% data är invariabler!!!!  
% Utvariabler är en matris med hur många timmar som specifik vindhastighet  
% kommer från respektive vindriktning. Plus en plot av en vindros med  
% fördelning av vindhastigheten.  
% Vinddatat måste vara inladdat i Workspace för att programmet ska  
% fungera!!  
% För att kalla på detta program skriv: [FF_ny, vind_matris, vindsum] = vind(höjd, antal vindriktningar,  
hur många uppdelade hastigheter, DD, FF)
```

```
function [FF_ny, vind_matris, vindsum] = vind(z, v_r, v_u, DD, FF)
```

```
% För att kunna räkna ut en ny vindhastighet har olika ytråhet  
% fördefinierats i programmet. Dessa ytråheter måste appliceras på olika  
% områden kring Gränby centrum.
```

```
FF_ny=zeros([length(FF),1]);
```

```
for k = 1:length(FF);
```

```
    if DD(k)<=100;  
        FF_ny(k)=FF(k)*((z/10)^(0.25));  
    elseif 101<=DD(k)<=180;  
        FF_ny(k)=FF(k)*((z/10)^(0.1));  
    elseif 181<=DD(k)<=215;  
        FF_ny(k)=FF(k)*((z/10)^(0.45));  
    elseif 216<=DD(k)<=330;  
        FF_ny(k)=FF(k)*((z/10)^(0.4));  
    elseif DD(k)<=360;  
        FF_ny(k)=FF(k)*((z/10)^(0.5));  
    end  
end
```

```
for k = 1:length(FF);  
    if 166<=DD(k)<=360;  
        FF_ny(k)=FF_ny(k)*0.85;  
    end  
end
```

```
figure(1)  
plot(FF_ny);  
mean(FF_ny)
```

```
figure(2)  
[H, vind_matris]=wind_rose(DD, FF_ny, 'dtype','meteo', 'n',v_r,'di',v_u);
```

```
vindsum=sum(vind_matris);
```

Andra delen av simuleringsprogrammet för vindkraften.

% För att detta program skall fungera gäller det att vindsum är i rätt
% dimensioner och att de inläddade arrayerna med effektkurvorna har samma
% dimension.

```
function[vindprod]=proddd(summa,x, cutinspeed);
```

```
if cutinspeed == 2.5;  
    prodd=summa(4:30)*x(4:30);  
elseif cutinspeed== 3;  
    prodd=summa(5:30)*x(5:30);  
else  
    prodd=summa(6:30)*x(6:30);  
end
```

```
sysprod=prodd*5; % full produktion utan de andra verkens påverkan.
```

```
sysprod_full=sysprod*0.65;%produktion under den tiden som V-verken INTE  
%påverkar varandra
```

```
sysprod_pverkan=sysprod*0.35*0.6; %produktion under den tiden som V-verken  
%påverkar varandra
```

```
vindprod=sysprod_full+sysprod_pverkan;  
%total produktion med reducering tillgad
```

Appendix 2

Exempel på ett utav kalkylbladen som använts i den ekonomiska utvärderingen.

[illegible]