



CHALMERS

Vägen mot ett förnyelsebart svenskt elsystem

Visualisering av modelleringar för ett virtuellt elsystem med realtidsdata

JENNY ANDERSSON
KRISTINE AHLBORG DELVIN
ARSLAN FAROOQI
ERNAD MEHINAGIC
JOEL SCHELANDER
EVA SKVOR

KANDIDARARBETE 2018 (SEEX15-18-08)

Vägen mot ett förnyelsebart svenskt elsystem

Visualisering av modelleringar för ett virtuellt elsystem med realtidsdata

JENNY ANDERSSON
KRISTINE AHLBORG DELVIN
ARSLAN FAROOQI
ERNAD MEHINAGIC
JOEL SCHELANDER
EVA SKVOR



CHALMERS

Institutionen för Rymd-, Geo- och Miljövetenskaper
Avdelningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Vägen mot ett förnyelsebart svenskt elsystem
Visualisering av modelleringar för ett virtuellt elsystem med realtidsdata
JENNY ANDERSSON
KRISTINE AHLBORG DELVIN
ARSLAN FAROOQI
ERNAD MEHINAGIC
JOEL SCHELANDER
EVA SKVOR

© JENNY ANDERSSON, KRISTINE AHLBORG DELVIN, ARSLAN FAROOQI,
ERNAD MEHINAGIC, JOEL SCHELANDER, EVA SKVOR, 2018.

Handledare: Viktor Johansson, Institutionen för Rymd-, Geo- och Miljövetenskaper
Examinator: Mikael Odenberger, Institutionen för Rymd-, Geo- och Miljövetenskaper

Kandidatarbete 2018 (SEEX15-18-08)
Institutionen för Rymd-, Geo- och Miljövetenskaper
Avdelningen för Energiteknik
Chalmers Tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon: +46 31 772 1000

Förord

Genom detta kandidatarbete har några utomstående personer varit av stor betydelse.

Vi vill tacka vår handledare Viktor Johansson som givit oss stöd genom hela arbetet.

Även vår examinator Mikael Odenberger samt Emil Nyholm och Lisa Göransson har alla haft betydelsefulla bidrag till arbetet, vare sig det har varit ren kod eller värdefulla svar på frågor.

Stort tack!

Sammandrag

Dagens svenska elsystem väntar stora utmaningar i en energiomställning för att nå regeringens mål om 100 % förnyelsebar el. För att kunna motivera dessa omställningar av det svenska elsystemet utan fossila bränslen och kärnkraft behövs exempel från datorsimuleringar. Dessutom måste relevanta resultat kunna presenteras lättillgängligt och begripligt för allmänheten, eftersom medborgarens deltagande visat sig viktiga i förnyelsebara frågor.

Detta kandidatarbete har som huvudsyfte att på ett lättbegripligt sätt visualisera resultat från energitekniska modelleringar av ett nutida Sverige med enbart förnyelsebara elkällor på en hemsida. Arbetet har således delats in i tre relativt omfattande delar: modellering av ett virtuellt elsystem, automatisering med realtidsdata och visualisering på en hemsida.

För att få kunskap om hur det svenska elsystemet hade sett ut om det enbart hade använt förnyelsebara energikällor har en redan befintlig kod i mjukvaran GAMS modifierats till en investeringsmodell och en automatiserad modell. Investeringsmodellen har byggt ett virtuellt elsystem för typåret 2012 med en elproduktionskapacitet bestående av enbart förnyelsebara elkällor.

Den automatiserade modellen programmerad i Python använder sedan den nya elproduktionskapaciteten, lägger till meteorologiska data i realtid och behandlar utdata. Resultaten är en genererad elproduktionsmix aktuell för var tredje timme med realtidsdata för sol, vind och elbehov för år 2018. Resultaten har sedan databehandlats för att kunna presenteras på en hemsida.

För att visualisera resultat från investeringsmodellen och den automatiserade modellen har denna hemsida byggts genom en webbsidebyggare kallad wix.com. Hemsidan skulle presentera relevanta data på ett akademiskt trovärdigt, användarvänligt och lättillgängligt vis. För att presentera relevant data utfördes en enkät som skickades ut i olika Facebookgrupper på Chalmers tekniska högskola. Svaren på enkäten hjälpte att identifiera speciellt fem myter som cirkulerar kring förnyelsebara energikällor kunde identifieras.

Resultaten från investeringsmodellen över ett år har använts för att jämföra det virtuella elsystemet med dagens elsystem. Den automatiserade modellen måste köras under en längre tidsperiod för att kunna se om det virtuella elsystemet kan möta efterfrågan timme för timme. Resultaten från investeringsmodellen visar på en stor utbyggnad i vindkraft, vikten av vattenkraftens reglerande kapaciteter och att kärnkraftens baslast inte behövas. Utifrån detta har slutsatsen kunnat dras att Sverige har möjlighet att ersätta kärnkraft och fossila bränslen med förnyelsebar el.

Abstract

Towards a renewable electric power system

Visualisations of a virtual electric power system through modeling and simulations with real time data

The Swedish electric power system of today faces great challenges in adapting to renewable sources in order to reach the government's vision regarding 100 % renewable electricity. These adjustments to the electric power system must be motivated, which can be done through modeling and computer simulations. The results must also be presented in an accessible and comprehensible manner, as the involvement of the citizens has been shown to be important in these decisions.

The main purpose of this bachelor's thesis is to present the results obtained from modeling and simulating the Swedish electric power system with only renewable sources of electricity. This project was therefore divided into three parts: modeling, automation and presentation.

Already existing models were obtained through Chalmers Technical University, which were further modified in order to obtain a model for electricity investment and another dispatch-model. The investment model produced a virtual electricity sector with only renewable electricity sources, based on meteorological data for year 2012.

The programming language Python was then utilized to produce an automatically updating dispatch-model in which real time meteorological data was used as input for the model. The obtained through the dispatch-model was an electricity production mix, which was generated every third hour. The results were further processed in order to present them in a simple manner on the website.

In order to properly present the results from the investment model and the dispatch model, a website was designed with the web design tool wix.com. The purpose of the website was to present relevant data in a simple yet comprehensible mannner and with great academic credibility. To determine which kind of data was deemed relevant, a survey was carried out amongst people at Chalmers and Gothenburg University. The results of the survey assisted in identifying, in particular five myths regarding renewable electricity sources.

The results obtained from the investment model were compared to the data of today's electric power system in Sweden. They showed that the virtual electric power system was dominated by wind power. Due to the intermittent nature of wind power, the results also showed the importance of hydropower and its ability to compensate for the fluctuating wind power. It was also shown that the base load produced by nuclear power and cogeneration (biomass and waste incineration) was not needed in order to satisfy the electricity demand, as long as hydropower was controlled accordingly. This leads to the conclusion that Sweden has the possibility to replace nuclear power and the minute amounts of fossil fuel with renewable sources of electricity.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Teori om modellering av energisystem	4
3	Teori om det svenska elnätet	5
3.1	Energikällor	6
3.1.1	Kärnkraft	6
3.1.2	Vindkraft	7
3.1.3	Solenergi	7
3.1.4	Vattenkraft	8
3.1.5	Bioenergi	9
3.2	Utmaningar med förnyelsebara, intermittenta energikällor	11
3.3	Tekniska strategier för att möta utmaningar med intermittent el	12
3.3.1	Energilager	12
3.3.2	Användarflexibilitet (DSM)	12
4	Metod	14
4.1	Modifieringen av 1-nods-modellen	14
4.1.1	Investeringsmodellen - miniELIN	14
4.1.2	Den timvisa uppdateringen (miniEPOD)	15
4.1.3	Känslighetsanalys	16
4.2	Automatisering - Python	16
4.3	Uppbyggnad av hemsida	17
5	Resultat och analys	18
5.1	Investeringsmodellen - miniELIN	18
5.2	Den timvisa uppdateringen - miniEPOD	21
5.3	Resultat från känslighetsanalyserna	21
5.3.1	Elbehovet	22
5.3.2	Elproduktion från vattenkraft	23
5.4	Hemsidan	24
6	Diskussion	25
6.1	Jämförelse av miniELINs virtuella elsystem och dagens elsystem	25
6.2	Automatiserad timvis uppdatering med realtidsdata	25
6.3	Modellerings giltighet	26
6.3.1	Virtuell handel	26
6.3.2	Virtuellt elbehov	27
6.3.3	Virtuell vindkraft	27
6.3.4	Virtuell vattenkraft	27
6.3.5	Virtuell solenergi	28
6.3.6	Virtuell biogASFörbränning samt CCS	28
6.4	Visualisering - hemsida och myter	28
6.4.1	“Det krävs en stabil energikälla som inte påverkas av väder.”	29
6.4.2	“Kärnkraft kan inte bytas ut”	30
6.4.3	“Det blir dyrare med ett förnyelsebart energisystem”	30
6.4.4	Utbyggnad av förnyelsebara energikällor	31
7	Framtida arbeten	32
8	Slutsats	33
	Bilagor	I
A	Lista över miniELIN och miniEPOD	I
B	Resultat från enkäterna	II

1 Inledning

Det moderna samhället är starkt beroende av säkra och prismässigt tillgängliga elkällor. Sveriges elförbrukning var cirka 140 TWh år 2016 [1]. Globalt sett står energisektorn för ungefär 60 % av världens utsläpp av växthusgas och när människors livsstandard ökar globalt, ökar även den redan höga energiförbrukningen [2].

Det finns stora internationella och nationella drivkrafter för ett förnyelsebart elsystem. I "De Globala hållbarhetsmålen" som Förenta Nationerna formulerade 2015 är omställning till förnyelsebar energi ett av 17 mål. Syftet med detta mål är att få både industrialiserade länder och utvecklingsländer att arbeta mot en ökad andel förnyelsebar el, ökad effektivitet av energitillförseln och ökad global tillgång för energi [2]. Inom Europeiska Unionen (EU) har de globala hållbarhetsmålen konkretiserats till att innan år 2020 ha en andel av 20 % förnyelsebar energi i energisystemet, jämfört med en andel av 9.8 % tio år innan. I Sverige har målet formulerats till att ha en andel av 49 % förnyelsebar energi till 2020 [3] och en elproduktionen med 100 % förnyelsebara källor, det vill säga utan kärnkraft, till 2040 [4].

De förnyelsebara källorna till elektricitet ges av vattenkraft, vindkraft, solenergi samt bioenergi (förbränning av biogas och biomassa). Dessa energikällor bidrar varken till utarmning av jordens icke-förnyelsebara resurser eller till växthuseffekten. I de flesta delar av världen är även de förnyelsebara energikällorna prismässigt fördelaktiga när behovet för kapacitet ökar [5]. En implementering och utveckling av dessa energikällor i Sverige och världen kunna vara vägen för att uppnå bland annat Parisavtalet.

Det finns dock stora utmaningar med att ställa om från kärnkraft och fossila energikällor eftersom de idag är dominerande och har en sedan länge utbyggd infrastruktur [6]. Det tillkommer även andra begränsningar med en omställning till ett förnyelsebart elsystem och det finns flera diskussionspunkter, som i denna rapport benämns som myter, om hur detta hade påverkat det svenska elsystemet. Frågetecken existerar bland annat kring förnyelsebara energikällors intermittenta¹ egenskaper orsakade av deras beroende av väder, kring möjligheten av utbyggnad av förnyelsebar energi och kring behovet av en stabil baslast².

För att visa på möjligheterna till ett svenskt elsystem utan fossila bränslen och kärnkraft behövs datorsimuleringar [7]. Relevanta resultat av dessa modelleringar måste kunna presenteras lättillgängligt och begripligt för allmänheten. Medborgares deltagande i förnyelsebara frågor kan vara viktiga och för ett engagerat deltagande krävs lättillgänglig information [8].

¹Intermittenta energikällor är energikällor med varierande energiproduktion.

²En elproduktionsteknik som ligger på kontinuerligt hög drift.

Syfte och mål

Syftet med detta projekt är att på ett lättbegripligt sätt visualisera resultat från energitekniska modelleringar av ett virtuellt, förnyelsebart elsystem i Sverige och jämföra med Sveriges elsystem idag. Målet är att modelleringarna ska automatiseras och använda realtidsdata (dagens meteorologiska data och elbehov) i syfte att timvis jämföras mot det verkliga elsystemet i Sverige idag. Projektet delas upp i tre områden med delsyften och delmål för att ge en konkret bild av projektets omfattning: modellering, automatisering och visualisering.

Syftet med modelleringen är att få kunskap om hur det svenska elsystemet hade sett ut om det enbart hade använt förnyelsebara energikällor. Målet med modelleringen är att först bygga upp ett virtuellt svenskt elsystem enbart baserat på förnyelsebara energikällor. Modelleringen ska sedan göra timvisa uppdateringar av modellen med realtidsdata för att erhålla vilka kraftverk som används i elsystemet med dagens väderförhållanden.

Automatiseringens syfte är att koppla samman realtidsdata, modelleringen och visualiseringen. Målet med automatiseringen är programmera ett skript i Python som möjliggör att databearbetning och dataöverföring mellan modelleringen och visualiseringen sker automatiskt.

Syftet med visualiseringen är att jämföra dagens elsystem med modelleringens virtuella, förnyelsebara elsystem. Syftet är även att diskutera kring myter om förnyelsebar el med hänsyn till etiska aspekter såsom kraftverks påverkan på sin omgivning. Målet är att skapa en lättillgänglig och transparent hemsida som gör resultatet från modelleringen tillgänglig för allmänheten. Hemsidan ska även vara akademisk trovärdig och användarvänlig.

Problemformulering

Nedan formuleras frågeställningar samt strategier för att nå de syften och mål vilka utformats för detta projekt. På grund av projektets omfattning delas det in i tre områden i enlighet med uppdelningen under föregående rubrik.

Det första området behandlar modelleringen i programmeringsspråket GAMS. Där kan följande frågor formuleras:

- Hur skulle ett förnyelsebart energisystem i Sverige kunna se ut?
- Skulle detta energisystem fungera om det kopplas till realtidsdata för väder och elbehov istället för ett typår?

För att hantera dessa frågor modifieras befintlig modell i GAMS; för projektet irrelevanta parametrar och ekvationer eliminerades, egna ekvationer för relevanta fenomen tillades och indata modifierades för att lättare kunna behandlas.

Den andra delen behandlar sammankopplingen mellan och automatiseringen av modelleringen och visualiseringen. Frågeställningen blir därmed:

- Hur automatiseras körningen av GAMS lämpligast?
- Hur behandlas data från modelleringen för att vara förstälilig för en bred folkmängd?
- Hur överförs resultat från modelleringen till hemsidan?

För att hantera dessa frågor krävs baskunskap i Python samt kunskap i web-scraping, vilket handlar om

att hämta data från hemsidor.

Den tredje delen i detta projekt behandlar visualiseringen av de resultat som erhålls från modelleringen av det virtuella energisystemet genom en hemsida. De frågeställningar som visualiseringen har är:

- Vilken information är relevant att visualisera för allmänheten?

Användbara tillvägagångssätt för att hantera dessa problem är att studera befintliga, vetenskapliga hemsidor och hur de riktar sig åt olika målgrupper.

2 Teori om modellering av energisystem

För att analysera hur förnyelsebara energikällor kan tillämpas och hur de påverkar resten av energisystemet behövs datorverktyg. Det finns en mängd redan utvecklade energitekniska modelleringar med olika tillvägagångssätt och fokus [7]. En programvara som kan användas för att skapa dessa modeller är *General Algebraic Modeling System* (GAMS) [9]. På Chalmers Energitekniska avdelning används GAMS för att lösa så kallade linjära optimeringsproblem för forskning inom matematisk modellering av energisystem.

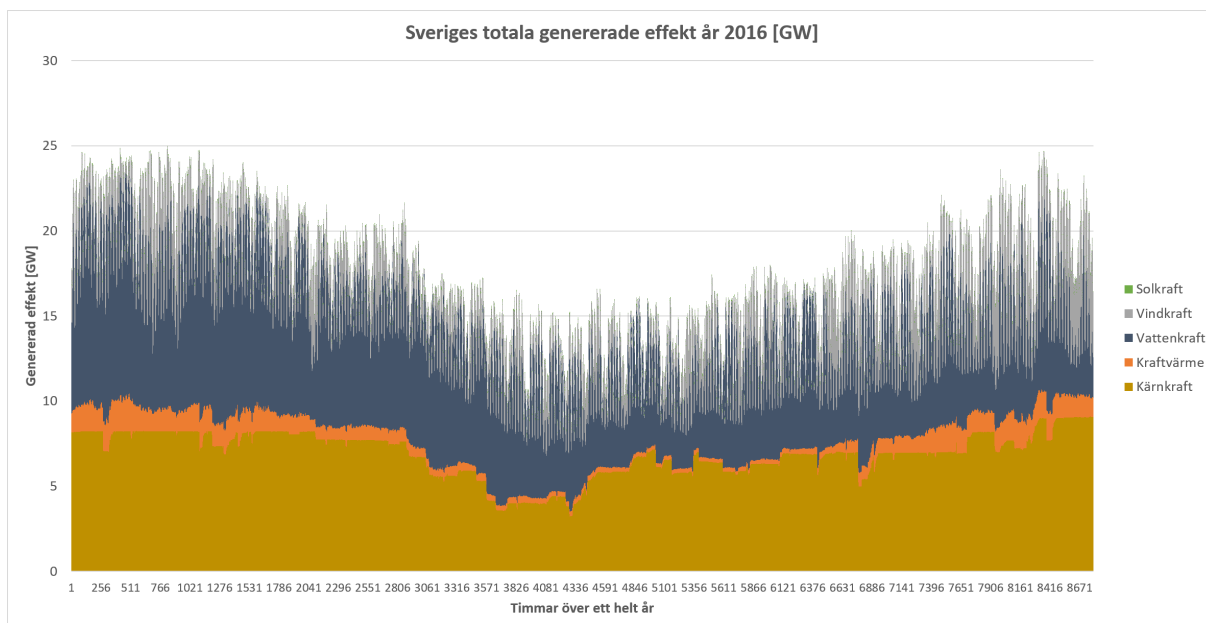
Linjärprogrammering innebär att alla ekvationer som beskriver en modell approximeras som linjära för att problemet ska bli optimeringsbart. En av ekvationerna definieras till en målfunktion och de resterande blir krav på optimeringen [10]. Genom minimering eller maximering av målfunktionen söks en optimal lösning i en skärningspunkt av de linjära approximationerna. Ekvationerna kan vara beroende av en valfri mängd variabler där varje variabel adderar en extra dimension. Programvaran GAMS modellerar de linjära approximationerna, identifierar hur de interagerar med varandra och hittar en optimal lösning genom iterationer.

Den modell som har modifierats i detta arbetet är utvecklad av Göransson et al. [11] och kommer, i denna rapport, kallas 1-nods-modellen. Modellen bortser från redan utbyggd kapacitet och investerar i ett nytt elsystem med den minsta årliga kostnaden som uppfyller ett timvist elbehov, resursbegränsningar, och krav på CO₂ utsläpp [12]. Investeringar kan väljas att göras i olika energikällor såsom vattenkraft, förbränning av biomassa, solenergi, vindkraft, förbränning av biomassa med CCS, gasturbiner, kärnkraft, och svartkolsförbränning. Dessutom kan användarflexibilitet och olika sätt att lagra energi, såsom batterier och pumplagring, inkluderas.

1-nods-modellen använder så kallat "Perfect Foresight", vilket innebär att den har kännedom om hela årets väderdata och elbehov i varje tidssteg. En annan simplificering av verkligheten modellen använder är End-of-Life-kriteriet som innebär att sista och första timman av det modellerade året är det samma.

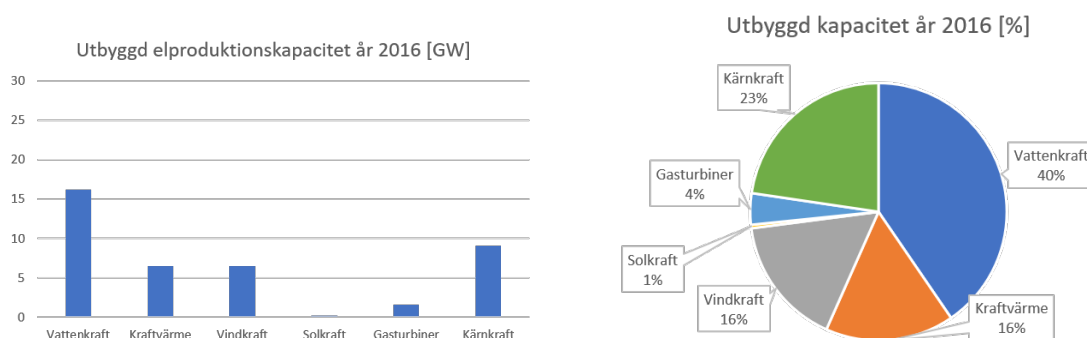
3 Teori om det svenska elnätet

Sveriges totala genererade effekt var 2016 ungefär 152 TWh och fördelningen visas i Figur 1 [1]. Kärnkraft och kraftvärme är baslaster och ligger därför som relativt stabila laster i botten på grafen. Orsaken till detta är att kärnkraft och kraftvärme bör ligga på konstant drift ur ett ekonomiskt perspektiv och effektivitetsperspektiv. Med kraftvärme avses förbränning av fossila bränslen, biobränslen och avfall. De övriga energikällorna körs reglerande och har därför större variationer i mängden el de producerar.



Figur 1: Den genererade effekten år 2016.

Den installerade effekten är mängden effekt en energikälla kan generera på maxdrift. Sveriges installerade effekt av elproduktionstekniker år 2016 visas i Figur 2, där det observeras att kärnkraft och vattenkraft är de dominerande produktionsteknikerna [1].

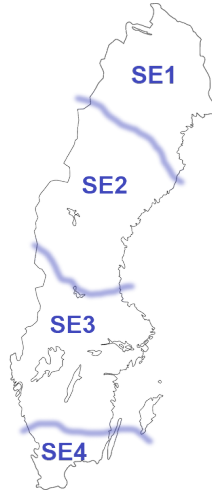


Figur 2: Totala kapaciteten från data år 2016 illustrerat både i GW och procentandelar. Notera här att den installerade effekten och den producerade elmixen inte nödvändigtvis behöver vara densamma.

Det svenska elnätet består av tre nivåer: stamnätet, regionnätet och lokalnätet. Stamnätet, även kallat transmissionsnätet, är landstäckande och kopplar ihop regionnätet, stora elproduktioner, såsom vattenkraftverk och kärnkraftverk, och internationella nät [13]. Den internationella kopplingen medför att el kan importeras och exporteras på den internationella marknaden vid under- eller överskott av el i Sverige. Detta sker på elbörsen Nord Pool Spot [14]. Vid perioder av överproduktion av el kan ett land välja att exportera överskottet till närliggande länder.

Regionnätet sänder el från stamnätet till det lokala nätet, som leder elen till slutanvändarna, samt i

vissa fall till konsumenter som räknas till de större el-användarna. Vissa energikällor kan kopplas till regionnätet, exempelvis vindkraftparker [15]. Regionnätet delas in i fyra regioner vilka visas i Figur 3. Varje region har olika geografiska förutsättningar, vilket även påverkar hur väl lämpade kraftverken är för regionerna. Även elbehovet varierar; till exempel innehåller region SE3 både Göteborg och Stockholm och har därför ett högt elbehov relativt de andra regionerna.



Figur 3: Regionsnätets uppdelning i Sverige. Bildkälla: Pixabay [16] (CC-sa)

System som är byggda på en balans mellan ett utflöde och inflöde behöver reglering för stabilitet. Fördröjningar inträffar i både automatiska och manuella reglerprocesser och sker så fort en obalans kan konstateras tills regleråtgärderna har genomförts. En buffert (med variation inom vissa gränser) är därför ett krav för att kunna ha ett stabilt kraftsystem. Dagens system har den roterande svängmassan som den här bufferten [17].

3.1 Energikällor

Elproduktion definieras som icke förnyelsebar eller förnyelsebar beroende på vilken energikälla de har. De huvudsakliga förnyelsebara energikällorna är vatten-, vind-, sol- och bioenergi. I Sverige har idag cirka 50 % av elen ursprung från förnyelsebara källor där vattenkraften är märkbart dominant vilket kunde utläsas i Figur 2 [1]. Icke förnyelsebara energikällor har ändliga tillgångar eller återbildas mycket långsamt [18]. Ett typiskt exempel på en icke förnyelsebar energikälla är fossila bränslen som står för endast en liten andel av den totala svenska elproduktionen, cirka 9,6 % . Kärnkraften, som även är icke förnyelsebar, står för ungefär 40 % av den totala svenska elproduktionen [1]. Således skulle den stora omställningen för ett Sverige med förnyelsebar elproduktion vara ersättningen av kärnkraften.

3.1.1 Kärnkraft

När den svenska kärnkraften byggdes upp under 1950-talet var syftet att fortsätta utvecklingen av det svenska elnätet efter vattenkraftens färdigutbyggnad och minska beroendet av importerade energikällor [19]. Energiutvinningen från kärnkraft sker genom fission då uranisotoper innehållande kärnbränsle klyvs, vilket ger mycket energi. Ett gram kärnbränsle ger praktiskt sett effekten 0.04 MW under ett dygn [20]. Enligt Energimyndigheten var förluster i kärnkraft 115 TWh år 2016, vilket motsvarar 65 % [1]. Kärnkraft har inga koldioxidutsläpp och kan följa lastförändringar i elnätet. I exempelvis Tyskland var kärnkraftens reglerbidrag viktigt vid implementeringen av mer intermittenta energikällor som vindkraft [21].

Kärnkraften är idag ett omdebatterat ämne där kärnkraftsförespråkare och -motståndare lyfter olika argument för dess fortsatta utveckling. Uranbrytning görs exempelvis genom dagbrott och underjordsgruvor som kan orsaka skador på miljö och ekosystem [22]. Dessutom måste det radioaktiva avfallet från kär-

energiutvinningen slutförvaras i upp till 100 000-tals år [23]. Slutförvaringsanläggningar kan innebära ingrepp på närliggande miljö vid dess uppbyggnad [24]. Slutförvaringen kritiseras även etiskt utifrån hur dagens samhälle kan lämna efter sig farligt radioaktivt avfall över denna långa tidsperiod. Därtill har flertalet kärnkraftsolyckor inträffat sedan kärnenergens uppkomst, vilket skapar etisk debatt kring säkerhetsfrågor. Exempelvis har Tyskland beslutat att avveckla kärnkraften till följd av kärnkraftsolyckan i Fukushima år 2011 [25].

3.1.2 Vindkraft

Vindkraft är en förnyelsebar energikälla som utvinnet el ur luftens rörelseenergi då en vindturbin med tre tillhörande blad anpassas efter vindriktningen och därmed roterar [26]. Beroende på vädret i Sverige består cirka 10 % av den totala elproduktionen av vindkraft. År 2016 var den totala elproduktionen från vindkraft 15,5 TWh [1]. Vindkraftverk är en intermittent energikälla då produktionen beror på hur mycket det blåser. För att anpassa energiproduktionen utifrån efterfrågan och Sveriges intermittenta energikällor används lättreglerade energikällor som vattenkraft [26].

Vindkraft har gått från att främst vara beläget i södra Sverige till att nu vara fördelade över hela landet. De flesta vindkraftverk är belägna på land, vilket beror på den ekonomiska skillnaden mellan landbelägna och havsbelägna vindkraftverk [27]. Energimyndigheten utför undersökningar om riksintresseområden för vindbruk, där förutsättningarna för vindkraftverk analyseras ur ett nationellt perspektiv. De riksintresseområden för vindkraftverk som pekats ut idag är 284 landbelägna och 29 havs- eller sjöbelägna [28].

Vindkraftverken placeras ungefär fem turbindiametrar ifrån varandra för att inte påverka varandras elproduktion [26]. De använder en relativt liten landareal och är höga med stora rotorblad. Vindkraftverk har höga investeringskostnader, men låga driftkostnader [29]. Enligt naturvårdsverket kan vindkraftverk ha både visuell och auditiv inverkan på de som bor i närheten av kraftverken. Om vindkraftverken syns från bostaden är det större risk att de boende irriteras av vindkraftverken då den visuella rörelsen gör att även ljudet uppmärksammas. Även miljön som vindkraftverken är placerade i tycks ha betydelse för de boendes intryck av vindkraftverk. Till exempel upplevs vindkraftverk som mer störande på landsbygden i jämförelse med i närheten av tätorter, vilket kan grunda sig i att det finns andra störande moment i tätorter som dämpar intrycket av vindkraftverken [30].

Enligt en rapport från naturvårdsverket antas fem till tio fåglar förolyckas för ett genomsnittligt vindkraftverk per år. Småfåglar löper något högre risk och står för 62,5 % av de förolyckade fåglarna. Däremot finns det specifika, större fågelarter såsom rovfåglar, måsar och trutar som dör i större grad. I Tyskland visade en analys att vissa rovfågelarter dog i den grad att det fanns risk för minskning av arternas antal [31].

3.1.3 Solenergi

Solkraft är en intermittent, förnyelsebar energikälla som på olika sätt absorberar solljus för att producera elektricitet. Solkraftssystem som genererar el direkt från solljus utan att använda sig av värme kallas för en fotovoltaisk cell, ofta förkortat som PV (photovoltaics). Dessa solceller delas upp i två olika grupper, de organiska och de oorganiska. De organiska cellerna använder sig av kolbaserade föreningar. De mest använda solcellerna av de två grupperna är dock de oorganiska solcellerna, vilka även är mest tillgängliga för solkraftsbaserad elproduktion. Oorganiska solceller använder kisel och dess halvledande egenskaper [32].

De mest förekommande oorganiska solcellerna på marknaden har en verkningsgrad kring 15 %, vilket leder till att 1 m² producerar 150 W en solig svensk dag. En anläggning på 1 kW med oskuggad yta i söderläge där lutningen ligger på 30-50 grader producerar i Sverige ungefär 950 kWh årligen och behöver en yta på cirka 7 m². Installationspriset kan fluktuera en hel del men har under senare år haft en stadig

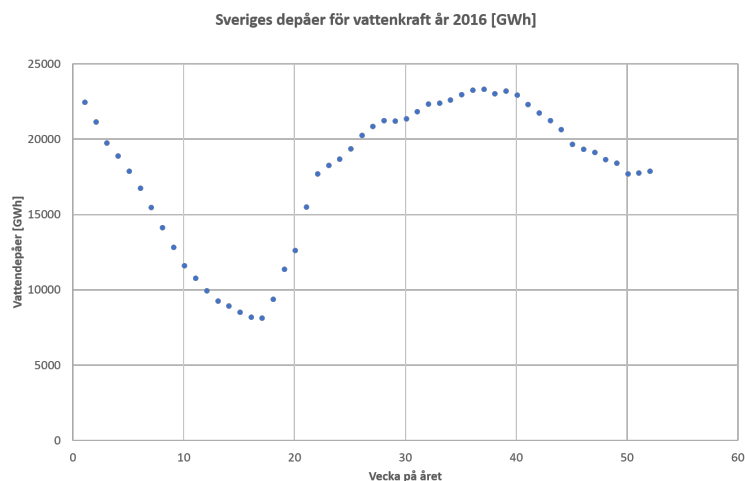
nedgång på grund av att priserna på den globala marknaden har fallit [33]. I Sverige står solkraften för cirka 0.09 % av den totala elproduktionen [18].

Ett alternativ till solceller är olika typer av solfångare som fokuserar solljuset för att bilda intensiv värme. Den insamlade värmen används för att producera mekanisk energi i en ångturbin som i sin tur driver en elgenerator. I Sverige finns det inte någon sådan teknologi som kan klassas som användbar. En solfångare kräver en väldigt hög instrålning och i Sverige ligger solstrålningen på 1000 kWh/m^2 vilket inte är tillräckligt för elproduktion [34].

3.1.4 Vattenkraft

Energiomvandling från vattenkraft erhålls när rörelse- och lägesenergi från vattenmassor omvandlas. År 2016 stod vattenkraft för 61.7 TWh vilket är ungefär 40 % av den totala elproduktionen i Sverige [1]. Idag finns det omkring 2000 vattenkraftverk i Sverige med en elproduktion på omkring 65 TWh el under ett normalår. Ett våtår producerar upp emot 80 TWh och ett torrår runt 50 TWh [35].

Vattentillgångarna i Sverige varierar över året, vilket är varför vattenkraften måste regleras med det i åtanke. Detta innebär exempelvis att vattendepåerna måste minskas i början av året för att klara av den tillrinning som sker under sommaren. I Figur 4 visas hur vattendepåerna för den svenska vattenkraften varierade år 2016 [36].



Figur 4: Figuren illustrerar hur reservoarerna för vattenkraft varierade under år 2016. Data hämtad från NordPool.

Vattenkraft har en reglerkapacitet som är mycket viktig för energisystemet genom dess kompensation av varierande last [37]. Vid låg efterfrågan lagras vattenmassor i reservoarer och vid hög efterfrågan omvandlas dessa till el genom att öppna dammarna. Enligt Svenska kraftnäts systemutvecklingsplan har de flesta vattenkraftverk som syfte att balansera dygnsvariationen i elanvändningen [38]. Minskad planerbar elproduktion, från exempelvis vind och sol, kräver mer balanserande reglering av vattenkraften [38]. Vid exempelvis torrår kan regleringsmöjligheterna minska och måste då kanske kompenseras med elimport [29], vilket även konstateras under rubrik 3.2 Utmaningar med förnyelsebara, intermittenta energikällor.

Energimyndigheten, Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten redovisar i rapporten "Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet" vattenkraftverkens värde för ett stabilt elsystem. Vattenkraftverken delas in i tre olika klasser beroende på reglerbidrag där klass ett innebär ett relativt reglerbidrag³ på 0.03 % eller mer, klass två mer än 0.01 % men inte mer än 0.03 % och klass tre mindre än 0.01 %. I Tabell 1 utläses att störst andel av installerad effekt innehar vattenkraftverken av klass ett, vilka även har största andel reglerbidrag. Vattenverk av klass tre är flest till antal och majoriteten av dessa kraftverk hittas i södra Sverige. Deras bidrag till den totala installerade effekten är dock liten jämfört med de stora kraftverken i norra Sverige [35, 39].

Tabell 1: Antal kraftverk, effektandel och reglerbidrag för vattenkraftverk i olika klasser formulerade av Energimyndigheten, Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten. Med anledning av Sveriges elexport kan summa av procentandelarna bli över 100 %. [35]

Klass	1	2	3
Antal vattenkraftverk [st]	255	78	1667
Andel av installerad effekt från vattenkraft [%]	98	1.3	0.7
Andel av totalt antal kraftverk [%]	12.8	3.9	83.3
Andel av reglerbidraget för 365 dygn [%]	98.3	3.1	1.1
Andel av reglerbidraget för 28 dygn [%]	97.9	0.9	0.4
Andel av reglerbidraget för 1 dygn [%]	98.0	0.4	0.1

Utifrån rapporten *Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet* konstaterades att kraftverken av klass tre skulle kunna avvecklas till fördel inom miljöaspekterna [35], på grund av dess knappa bidrag till den totala effekten och minimala reglerbidrag.

Vattenkraften har sen dess utbyggnad kritiserats för den negativa miljöpåverkan som dammar och vattenturbiner orsakar [19, 40]. Vattenkraftverk med dammar gör stora ingrepp på ekosystem i närområdet och turbinerna hindrar laxfiskars lek. Miljöbalken skyddar numera flertalet älvar för utbyggnad. Utbyggnad kan dock godkännas om ett rikstäckande energiintresse anses vara av större vikt [39].

3.1.5 Bioenergi

I Sverige har biobränslets vikt som energibärare ökat kraftigt sen 1980-talet och står idag för nästan en fjärdedel av både energitillförseln och av energianvändningen [1]. Av landets totala bioenergianvändning på 139 TWh användes 14 TWh till elproduktion enligt Energimyndighetens statistik för 2016 [1]. Mestadelen av energin från förbränning av biobränsle går till värme snarare än till elproduktion [41].

En anledning bakom ökningen är att den teknologiska utvecklingen har möjliggjort bättre verkningsgrad hos kraftvärmeverk [6]. En annan anledning är att biobränsle i stor utsträckning ersatt fossila bränslen till följd av ökad medvetenhet och lagstiftning kring koldioxidutsläpp. Biobränsle är enligt bland annat WWF ett bra förnyelsebart substitut för fossila bränslen eftersom energin kan omvandlas på liknande sätt som fossila bränslen [37]. Biomassa kan omvandlas till gas, flytande samt fast form och genom detta kan redan befintlig teknik för fossila bränslen användas för biobränslen. Exempelvis kan fluidiserade bäddpannor användas för fasta biobränslen vid storskalig elproduktion [42]. Syngas⁴, vilket framställs vid förgasning av biomassa, kan förbrännas i ett gaskombiverk alternativt endast en gasturbin [43].

³Begreppet "relativt reglerbidrag" beskriver hur elproduktionen i ett specifikt vattenkraftverk följer nettoanvändningen, residuallasten [35].

⁴En gasmix av bland annat metan, vätgas och kolmonoxid.

Bioenergiressurser delas in i biomassa som innehåller vedämnen, energigrödor som inte innehåller vedämnen, akvatisk biomassa och organiskt avfall [42]. Framförallt biomassa med och utan vedämnen kräver ofta stora areor för odling vilket kan komma i etisk konflikt med matförsörjning. Till elproduktion används främst biomassa innehållande vedämnen och organiskt avfall [1].

Biomassa innehållande vedämnen

Sverige har mycket god potential för energiutvinning av vedrik biomassa tack vare en stor mängd skog [44]. Vid avverkning av skog är det till största del grenar, toppar och restprodukter som sågspån som används till bioenergi. Det är inte lönsamt varken ekonomiskt eller energimässigt att avverka högkvalitativ och långsamt växande skog för endast energiutvinning [45]. Snabbt växande och mindre kvalitativ skog är lönsam att avverka men kan skada skogsområdets biologiska mångfald [44]. För att skydda biologisk mångfald och ekosystemtjänster ska minst 20 % av Sveriges land- och färskvattenområden bevaras enligt de internationella Aichimålen [46]. Enligt International Energy Agency *IEA* finns stor utvecklingspotential för att maximera utnyttjad skogsareal om hållbar skogsförvaltning implementeras [45].

Ved innehållande ämnen har på grund av kemisk sammansättning ett högre initialt koldioxidutsläpp än kol [45]. Växande skog står för en global koldioxidbuffert. Tidsförskjutningen mellan avverkning, förbränning och nyplantering av skog orsakar fluktuation i denna buffert [47]. Eftersom det vid förbränningen släpps ut en lika stor mängd CO_2 som träden bundit in under sin livslängd är både förbränningen av snabbt växande och långsamt växande skog koldioxidneutral [45].

Avfallsförbränning

Svenska kommuner måste enligt Miljöbalken samla in hushållsavfall, vilka delas upp i rent organiskt avfall och brännbart hushållsavfall. Organiskt avfall kan komposteras eller jäsas för produktion av biogas [48] och resterande kan energiåtervinnas genom förbränning. Förbränning av avfall minskar volymen, steriliserar och ger möjlighet till energiomvandling [41].

I Sverige energiåtervinns avfall i största möjliga mån istället för att föras till avfallsdeponi som en konsekvens av EUs mål att avfall ska återvinnas och utnyttjas som energi [49, 50]. Knappt 1 % av Sverige hushållsavfall går på deponi. Med dagens förbränningsteknik blir utsläppen av koldioxidekvivalenter dessutom mindre av förbränning än om de skulle läggas på deponi [51]. Enligt en rapport från 2016, utgiven av branchorganisationen "Avfall Sverige", energiåtervinns 48,5 % av Sveriges hushållsavfall som samma år var ungefär 2 miljoner ton [48]. I Sverige importeras hushållsavfall och eventuella satsningar för utbyggnad av hushållsavfallsförbränning debatteras [52].

Förbränningen av organiskt avfall är koldioxidneutralt och förnyelsebart eftersom de organiska organismerna ingår i kolkretsloppet. Den koldioxid som bildas vid förbränning av biologiskt avfall motsvarar således den koldioxid som bundits under livstiden. Fullständig förbränning av metangas från metanjäsning ger endast koldioxid och vatten som restprodukter och kompost kan användas till gödsel [48, 41]. Förbränning av övriga brännbara hushållsavfall är däremot inte förnyelsebart. Avfallet kan innehålla plast som utvinns ur fossila källor. När avfall innehållande plastrika ämnen förbränns sker även utsläpp av persistenta organiska pesticider, så kallade POPs-ämnen [41]. Detta ställer således stora krav på rökgasrening.

Koldioxidlagring (CCS)

Koldioxidlagring (Carbon Capture and Storage, CCS) är en teknik som innebär avgasrening med avsikt att ta bort CO_2 . Den grundläggande principen innefattar avskiljning, transport och lagring av koldioxid [53]. Avskiljning av koldioxid kan genomföras före eller efter förbränning samt genom en befintlig koldioxidavskiljande process [54]. Transport av koldioxid kan ske genom till exempel rörledningar och fartyg, en infrastruktur som redan används för fossila bränslen [54, 6]. Koldioxiden kan lagras i flertalet olika geologiska formationer som exempelvis akviferer och uttömda olja- och gasreservoarer [54, 53]. Avskiljningen står för största kostnaden medan lagring av koldioxid innebär mest förändringar i lagstiftning och policy.

En implementering av CCS med biomassa skulle kunna minska koldioxidhalten i atmosfären [53]. Tekniken skulle även kunna användas för områden utan möjlighet att utvinna energi ur till exempelvis vind eller andra intermittenta elkällor. Modelleringar av Johnsson et al. visar att CCS med naturgas skulle kunna vara en bra baslast [55]. Teknikens lastföljande funktion i områden med mycket intermittenta elkällor kan dock vara bristande [55].

3.2 Utmaningar med förnyelsebara, intermittenta energikällor

Det är en utmaning att kunna hålla en balans i systemet då intermittenta energikällor integreras i elsystemet. Produktionen måste vara i balans med konsumtionen. Med produktionskrafter som är väderberoende, till exempel sol och vind, är det svårt att göra precisa prognoser. Överproduktion kan ske i områden med stor andel förnyelsebar el vid gynnsamma förhållanden. Om överföringskapaciteten i elnätet är låg blir det svårt att transportera el som tillkommer vid överproduktion. För att skapa balans i systemet kan det krävas mer reglerbar kraft alternativt mer reglerbar efterfrågan [56].

På kort sikt, sekunder och upp till minuter, har sol och vindkraft i allmänhet mindre tröghet än andra produktionsanläggningar. Lägre tröghet i nätet gör att frekvensen i nätet påverkas snabbare av produktionsförändringar och förbrukningsbalansen. I en något längre tidshorisont, timmar och upp till ett dygn, kan det uppstå obalans mellan konsumtion och produktion vilket kan leda till lägre kvalitet på elen i form av spänningsvariationer och frekvens. I detta fall har elkraftssystemets tröghet påverkan på hur stor känslighet systemet har för obalanser. Tidshorisonter som är lite längre, till exempel dygn, har sina utmaningar i att den planerade kapaciteten har som krav att möta konsumtionen. Begränsningar i överföringskapacitet kan skapa problematik för områden med mycket sol och vindkraft. Prognosfel kan skapa ett tillfälligt underskott eller överskott av el. Ur ett långt perspektiv såsom veckor till säsonger ligger problemet i att kunna möta behovet under längre perioder [56]. Det måste finnas kapacitet så att det räcker för att livnära den förväntade lasten, vilket med andra ord kan benämnas som energitillgänglighet [57].

Vattenkraft har ett viktigt bidrag i balansregleringen vad gäller både långa och korta tidshorisonter. Upp till sekunden reglerar vattenkraft svängmassa, och på längre sikt reglerar vattenkraft elnätet [58]. De flesta vattenkraftverken byggdes innan vind- och solkraft byggdes ut och således finns tvivel om de kan reglera en utbyggnad av mer intermittenta elkällor [38]. En studie utförd av Söder visar dock att vattenkraft kan, vad gäller energilagring, balansera ett 100 % förnyelsebart elsystem i Sverige likväl som ett land som har en liten del vattenkraft och biobränsle. Studien pekar även på att kostnader för minskat överskott och för att producera tillräckligt med el vid stor last även blir låg, 0,3 Eurocent/kWh, då sol- och vindkraftsproduktionen är låg [59].

Mängden intermittent el som integreras i elsystemet har enligt Steen et al. inte några stora tekniska begränsningar. Utmaningarna ligger i att anpassa elnätet efter de nya förhållandena. Exempelvis kan spänningsökningar, överbelastning av systemkomponenter och stockning mellan områden i stamnätet ske. För att lösa det sistnämnda kan exempelvis transmissionskapaciteten mellan områden ändras, lagring ske (se rubrik 3.3.1) eller användarflexibilitet (se rubrik 3.3.2) användas. Med en integration av intermittent el skulle förluster i elsystemet kunna reduceras, då integrationen för exempelvis vindparker ofta sker i regionnätet, vilket är närmare konsumenten än stamnätet [60].

Placering av vindkraftverk har betydelse i både tekniska och ekonomiska aspekter. Enligt Steen et al. är "...vindturbiner oftast placerade i blåsiga områden och inte där det är mest lämpligt för elnätet" (fritt översatt av författarna) [61]. Då vindkraftverk inte placeras med hänsyn till elnätet krävs även investeringar i transmissionsledningar. I en studie utförd av Norwood et al. beror investering i vindkraft fram till 2050 på huruvida kraftverken kan placeras i blåsiga områden. Om installation av vindkraft begränsas i blåsiga områden påverkas den ekonomiska potentialen för vindkraftverk negativt [62].

I en rapport från 2015 utförd av SVK ansågs Danmark inte alltid kunna reglera balansen i elnätet, så kallad balansreglering. Vindkraft stod för cirka 33 % av den totala elproduktionen. Denna slutsats drogs då elpriserna exempelvis vid ett tillfälle 2012 var -200 euro/MWh, vilket är det lägsta priset som elbörsen

Nord Pool Spot tillåter. Det låga elpriset berodde på att Danmark överproducerade el, bland annat på grund av att äldre vindkraftverk användes som var inte var enkla att stoppa produktionen på. Vid tillfället kunde överskottet inte överföras till grannländerna, vilket hade avlastat situationen. [63].

3.3 Tekniska strategier för att möta utmaningar med intermittent el

Det finns ett flertal strategier för att möta de utmaningar som beskrivs under föregående rubrik, såsom att reglera elkonsument. Nedan nämns de tekniska strategier som är relevanta för modelleringen och diskussion om modelleringen.

3.3.1 Energilager

Tillgång till energilager medför att överskottsenergi som bildas vid särskilda tidpunkter kan lagras för att sedan användas då det är underskott av energi. Energilager är behövligt vid belastningsminskningar i elnätet när elproduktionen varierar från till exempel sol och vindkraft. Olika typer av energilager gör det möjligt att kunna lagra över olika långa perioder. Batterier är ett exempel på lagring av elektrisk energi. På grund av dess kostnad har dock batterier inte använts i storskaliga projekt [64].

Litiumbatterier har visat möjligheter för lagring av energi. Utvecklare letar efter ett sätt att hitta lägre underhållskostnader och driftkostnader, öka effektiviteten och att kunna garantera en kontroll över stora batterilagringar. Litiumbatterier har som uppgift att vid användning utföra energihanteringstjänster samt att reglera [64].

Förutom litiumbatterier används även flödesbatterier, vilka har en laddningsbar förmåga. Flödesbatterier innehåller elektrolyter som består av en eller flera upplösta elektroaktiva arter. Dessa flödar genom en elektrokemisk cell där en omvandling från kemisk energi till elektrisk energi sker. Utöver det lagras fler elektrolyter i en extern tank där de pumpas genom cellen för att bilda elektrisk energi. Flödesbatterierna har snabb laddningstid då elektrovätskan kan bytas ut. Den utbytta vätskan kan sedan återvinnas [64].

Ett annat sätt att lagra energi är pumplagring där pumpkraftverk används för att lagra elektrisk energi i form av potentiell energi. Den potentiella energin uppnås genom att pumpa vatten upp till en viss höjd i en reservoar. Vattnets potentiella energi kan sedan användas för att driva en turbindriven generator. Pumpkraftverk kan användas för att lagra överskottsenergin och dessutom hjälpa till med att möta det efterfrågade behovet [65]. Den här typen av lagring är hjälpsam vid integrering av förnyelsebar energi då den hjälper till med att upprätthålla balansen i nätet. Pumplagring är lämplig för områden med liten möjlighet till andra lagringsmöjligheter eller handel [66]. Andra viktiga faktorer är tillgängliga vattendrag samt naturliga reservoarer med höjdskillnad.

3.3.2 Användarflexibilitet (DSM)

Användarflexibilitet, även kallat DSM (Demand Side Management), skapar möjligheter för elkonsumenterna att kunna styra sin egen elanvändning med hjälp av yttre signaler, alternativt låta någon utifrån styra specifika laster i dennes hushåll. Eftersom sol och vindkraft är intermittenta kraftkällor och har en varierande elproduktion över dygnet kan användarflexibilitet utnyttjas för att få en balans mellan elproduktion och konsumtion [57].

Exempel på strategier som används idag är realtidprissättning (Real Time Pricing, RTP), effekttariff (Power Tariff) och direkt laststyrning (Direct Load Control, DLC). Realtidsprissättning innebär att konsumenten får se det faktiska elpriset vid en specifik tidpunkt och därför eventuellt välja att minska sin förbrukning då elpriset är högt. Effekttariff innebär att priset som kunder betalar är baserat på den högsta effekttoppen vid en viss tidsperiod. Detta uppmuntrar kunden till att minska effektförbrukningen. Direkt laststyrning innebär att elnätbolaget kan utföra styrningar, exempelvis styra ned elförbrukningen i vissa laster, som uppvärmningen, hos kunden som i sin tur blir ekonomiskt kompenserad. Exempel på laster som kan styras på detta sätt är diskmaskiner, tvättmaskiner och elektrisk värme [57, 67].

4 Metod

I detta kapitel beskrivs arbetsgången för de tre områden som definierades i inledningen. Modelleringen består av två modifierade versioner av befintlig kod (1-nods-modellen). Automatiseringen består av databearbetning, datahämtning samt dataöverföring mellan modelleringen och visualiseringen. Visualiseringen består av att visa den överförda datan, från modelleringen via automatiseringen, på en hemsida samt undersöka vilka myter som finns om ett förnyelsebart energisystem. Utöver detta utfördes även en känslighetsanalys på modelleringen för att undersöka dess giltighet och data för dagens elsystem sammanställdes.

4.1 Modifieringen av 1-nods-modellen

För att modellera ett virtuellt, förnyelsebart elsystem i Sverige användes 1-nods-modellen, vilken beskrivs närmare i Kapitel 2. Teori om modellering av energisystem. Denna modell modifierades till två versioner som i fortsättningen av rapporten kommer kallas miniELIN och miniEPOD⁵. miniELIN är en investeringsmodell som bygger upp det virtuella elsystemet. miniEPOD använder detta elsystem för att modellera med realtidsdata. Modifieringarna beskrivs närmare i detta kapitel och i bilaga A redovisas en sammanfattad lista på hur modellerna är byggda.

4.1.1 Investeringsmodellen - miniELIN

miniELIN är en modifiering av 1-nods-modellen och bygger upp ett elsystem genom att bortse från redan uppbyggd kapacitet och istället investera i ett nytt elsystem med den minsta årliga kostnaden som uppfyller ett timvist elbehov, resursbegränsningar, och krav på CO₂ utsläpp.

Den största modifieringen av 1-nods-modellen som gjordes för att skapa miniELIN var att lägga till handel mellan de olika regionerna SE1, SE2, SE3 och SE4 enligt Figur 3. Nödvändiga ekvationer och parametrar skrevs till. För att närma sig dagens läge valdes att begränsa handelskapaciteten utefter data från "Svenska kraftnät" (SVK) som visas i Tabell 2 [68].

Tabell 2: I tabellen redovisas transmissionsskapaciteten i GW mellan de olika regionerna SE1-SE4 [68].

	SE4	SE3	SE2	SE1
SE4	0	4	0	0
SE3	4	0	7	0
SE2	0	7	0	3
SE1	0	0	3	0

⁵Namnen har inspirerats av två större energitekniska modeller, ELIN (Electricity Investment) och EPOD (European Power Dispatch).

För modelleringen valdes endast förnyelsebara elkällor och CO₂-kravet sattes till noll för ett koldioxidneutralt elsystem. Därmed tilläts miniELIN att investera i följande tekniker:

- **Vindkraft**

Vindkraftverkens rotorblad antogs vara belägna 100 m över marken och hade en specifik effekt⁶ på 200 W/m². Den levererade effekten ur vindhastigheten beräknades med hjälp av *Powerfunktionen*, skapad av Thorson och Johansson [69]. Den potentiella arean att bygga ut vindkraft på valdes till 10 % av den arean som blir kvar efter att städer, sjöar, floder och nationalparker räknas bort.

- **Vattenkraft med lagring (dammar)**

Vattenkraften modellerades för ett normalår med en total elproduktion av 65 TWh. Vattenkraftens installerade effekt antogs vara densamma som dagens installerade effekt i Sverige. Det minimala kravet på vatten som måste släppas ut för att undvika uttorkning av floder sänktes från 10 % till 1 % för att kunna ha samma krav för alla fyra regioner.

- **Solceller**

Solkraften modellerades utgående från resultatet av Emil Nyholms arbete på området [70]. En punkt per region modelleras och solceller med optimal vinkel jäntemot solen, som inte följer solens gång valdes. Priserna för investering i solkraft antogs vara minskade och ha samma värde som de förutspås ha 2050.

- **Förbränning av biogas och biomassa**

Modellen tilläts investera i förbränning av biogas och biomassa.

- **Batterier**

Litiumjonbatterier och kemiska flödesbatterier tilläts att investeras i.

4.1.2 Den timvisa uppdateringen (miniEPOD)

Modellen miniEPOD skapades för att visa vilka kraftverk som skulle användas idag ifall Sveriges elsystem hade sett ut såsom det virtuella elsystemet miniELIN byggt ut ser ut. Den börjar därmed utifrån de förväntade värden som miniELIN har modellerat men skriver sedan över värdena med resultat på timbasis. I praktiken innebär detta att alla investeringskostnader och ekvationer för utbyggnad av nya kraftverk eliminerades ur koden och i stället fixerades den installerade kapaciteten till det virtuella systemet miniELIN genererat.

För varje körning ersattes, med hjälp av Python, meteorologisk data (för sol och vind) samt det timvisa elbehovet från år 2012 med datan för den aktuella timmen. Utdatan av varje körning sparades som fixerade värden, för att förhindra att modellen optimerar redan förfluten tid. Om exempelvis en viss mängd vatten använts för en timme, är denna mängd nu fastställd, även om det vid senare tillfälle visas ha varit ett sämre beslut. Efter att ha kört miniEPOD ett helt år kommer alltså all data vara överskriven och året som modelleras kommer vara det undersökta året, i detta fall år 2018.

Utöver detta skapades även en så kallad "backstop". Ifall det virtuella elsystemet skulle visa sig inkapabelt till att möta timmens elbehov används backstop:en vilket ger en varning om att elproduktionen för den timmen inte är tillräcklig. Backstop:en tillsattes som en elgenererande teknologi och fick en hög installerad effekt, en hög möjlighet att producera el, men även ett väldigt högt pris. Detta innebar att backstop:en

⁶Producerad effekt per propellerarea.

endast kommer tas med i körningen ifall det inte finns något annat alternativ för att möta behovet, men kommer i så fall kunna möta det utan större problem.

Som nämnt under rubrik 2. Teori om modellering av energisystem, har 1-nods-modellen "Perfect Foresight", vilket även miniEPOD har. Detta betyder att modellen inte tar hänsyn till osäkerheten kring framtiden. Med andra ord så kommer modellen, ifall data för en timme i mars sökes, ta lika stor hänsyn till faktisk data från januari och februari som till den fiktiva typårsdatan från november och december och därifrån bestämma den optimala körningen. Förutom detta är modellen byggd så den ger första och sista timmen på året samma värden.

4.1.3 Känslighetsanalys

För att testa vilken påverkan olika sorters ändringar har på miniELIN, gjordes en känslighetsanalys. En känslighetsanalys i linjär programmering innebär att en ändring av värdet på en parameter görs för att se vilken påverkan den har på själva lösningen på optimeringsproblemet. Känslighetsanalyserna gjordes utgående från data till en äldre version av 1-nods-modellen. I denna version modellerades även havs- och sjöbelägna vindkraftverk. Detta bör dock inte påverka resultatet i större grad.

I den första känslighetsanalysen sattes det nationella elbehovet som parameter då elbehovet förväntas öka under de kommande åren. På grund av att modelleringen använder år 2012 valdes elbehovet från detta år som utgångspunkt. I den andra känslighetsanalysen sattes vattenflödet som parameter, då elproduktionen från vattenkraft beror på vattenflödet och varierar från år till år där 50 TWh räknas som ett torrår, 65 TWh som ett normalår och 80 TWh som ett våtår. De två parametrarna valdes att jämföras mot den totala, årliga systemkostnaden⁷ och investerad kapacitet av vindkraft, solkraft och biogas.

4.2 Automatisering - Python

För att automatisera och uppdatera det modellerade energisystemet i realtid användes programmeringsspråket Python. Python ansågs vara mest lämpligt för denna uppgift, då det är ett enkelt men samtidigt kraftfullt språk för inhämtning, hantering och behandling av data.

Initialt programmerades ett skript för web-scraping och lagring av sol- och vindförhållanden från SMHI [71, 72]. Vidare byggdes skriptet ut för att köra MATLAB med den erhållna datan från web-scraping, vilket genererade dataprofiler för solkraften. Skriptet sparade sedan dessa dataprofiler i Excelfiler vilka avläses vid modelleringen av det virtuella elsystemet. Sedan programmerades ett skript med syftet att starta GAMS och påbörja modelleringsprocessen, för att slutligen behandla modelleringens resultat och göra det presentabelt på en hemsida. En funktion skapades som visar när backstop:en i miniEPOD går igång för att kunna demonstrera vilka timmar modellen inte kan möta elbehovet. Syftet med det producerade Pythonskriptet var att timvis utföra de ovan beskrivna uppgifterna, för att erhålla en dynamisk modell. På grund av begränsad beräkningskapacitet hos den tillgängliga modelleringsdatan blev tidsupplösningen var tredje timme, istället för varje timme.

Realtidsdata för väder fanns ej tillgängligt för detta projekt, vilket ledde till att väderdata för föregående dag fick hämtas och behandlas. Utöver det fanns för detta projekt endast vinddata på marknivå tillgänglig. Vindhastigheten på marknivå skiljer sig markant från vindhastigheten vid rotorn hos en vindturbin. För att kompensera för detta beräknades en approximativ omvandlingsfaktor som sedan användes för att beskriva vindhastigheten vid vindturbinrotorn.

⁷Systemkostnaden är den totala kostnaden för installation och drift, mätt i EUR/år, och gäller för den investerade teknikens livslängd.

4.3 Uppbyggnad av hemsida

För att visualisera resultaten från modelleringen skulle en hemsida byggas upp. Detta gjordes genom att använda en hemsidesbyggare. Ett antal krav ställdes på webbsidesbyggaren. I första hand skulle den vara användarvänlig med enkla metoder för design av hemsidor. Hemsidesbyggaren skulle även ha tillgång till flexibel kodning eftersom extern data skulle importeras från Python. Ett annat krav på hemsidesbyggaren var även flexibilitet av presentationsverktyg då presentationen av resultatet inte skulle begränsas och därmed riskera att utesluta data. Då kraven för hemsidesbyggaren identifierats undersöktes olika hemsidesbyggare och utifrån kraven valdes wix.com. wix.com har ett enkelt gränssnitt och flera verktyg för att koppla in extern information samt interagera med besökare på hemsidan (backend-kodning). Med dessa funktioner förenklades arbetet för att uppfylla de syften och mål som formulerats för visualiseringen.

Designen för hemsidan undersöktes dels genom att titta på hemsidor så som www.ne.se och www.sustainergies.se, men främst genom kreativitet och användning av teori om design från kursen Människamaskinsystem på Chalmers tekniska högskola. Information som skulle presenteras på hemsidan var enligt syftet utdatan från modelleringen och relevant information för allmänheten. För att identifiera denna information skapades en enkät med frågor baserade på utdatan för GAMS samt från teorin. Enkäten delades främst i Facebookgrupper för olika sektioner på Chalmers tekniska högskola, men även på personliga sidor. Frågorna var följande:

- Tror du att Sverige kan gå runt på enbart förnyelsebar el? (dvs utan kärnkraft och fossila bränslen)
Varför? Varför inte?
- Kan du tänka dig att ha förnyelsebar energi på eller i närheten av dina ägor nu eller i framtiden?
- Kan du tänka dig att betala mer för att använda förnyelsebar energi?
- Hade du velat veta hur många procent av olika energikällor bidrar till din el?
- Hade du velat veta ditt elpris kontinuerligt?
- Om jag hade fått information om elpris och ursprungskälla för el en gång i timmen, hade jag kunnat tänka mig att...
 - ...vara flexibel och använda viss elektronik när energin främst är från förnyelsebara källor.
 - ... vara flexibel och använda viss elektronik när elen är som billigast.
 - ... minska min elförbrukning.
 - ... prioritera min elektronik så att viss elektronik stängs av om elen inte räcker.
 - ... bli mer medveten om min elkonsumtion.
 - ... att fortsätta med min elkonsumtion som den är idag.

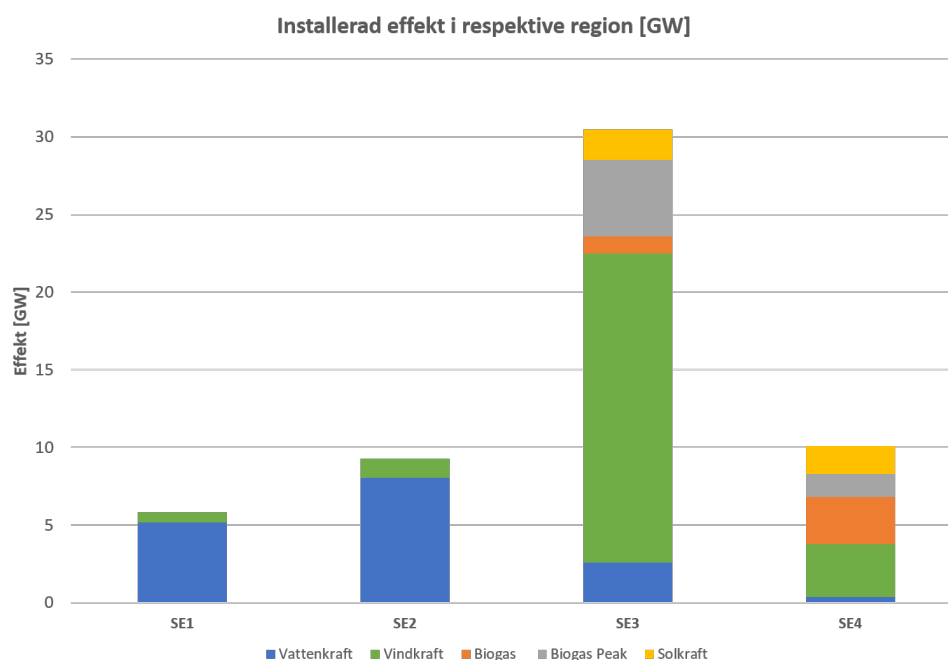
Då informationen för hemsidan definierats byggdes hemsidan upp enligt målen för visualiseringen. Det innebar att innehållet på hemsidan gjordes väl underbyggt med referenser och med ett korrekt språk. Däremot användes inte fackspråk eftersom det inte var i linje med målet om användarvänlighet. För att göra hemsidan enkel att orientera sig uppdelades ämnena i tydliga flikar.

5 Resultat och analys

I detta kapitel presenteras de resultat som projektet erhöll. Utdata från simuleringar av investeringsmodellen miniELIN används för att jämföra det virtuella elsystemet med dagens elsystem presenterat i kapitel 3. Teori om det svenska elnätet. Hemsidan designades och myter arbetades fram för att presenteras på hemsidan.

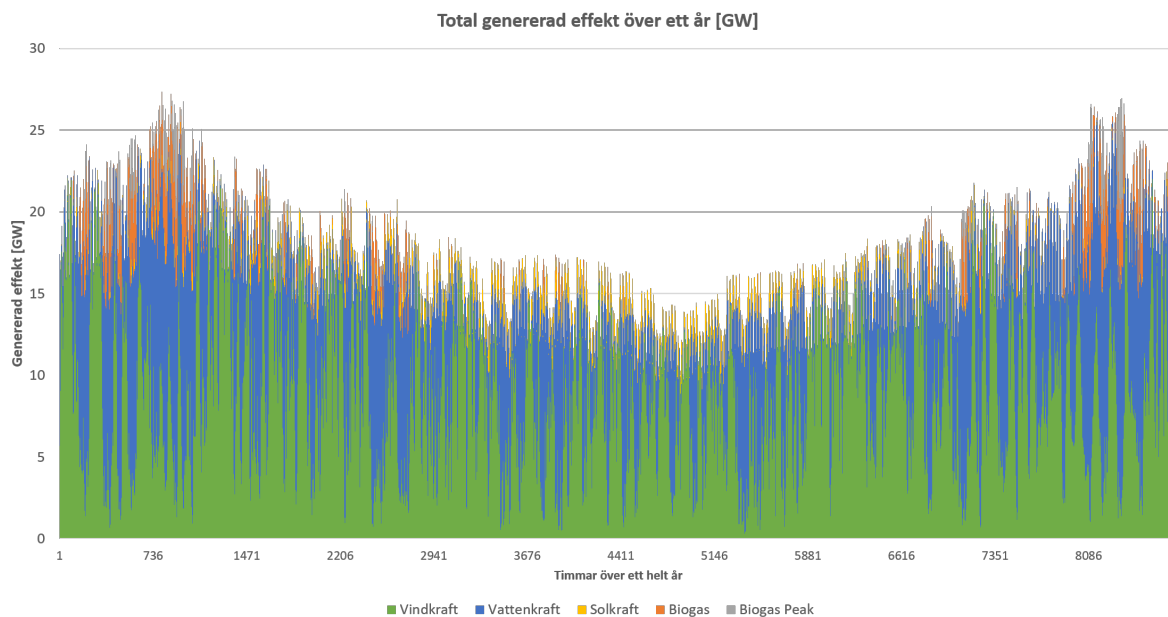
5.1 Investeringsmodellen - miniELIN

Figur 5 illustrerar den installerade effekten av respektive modellerad produktionsteknik för varje region i Sverige. I regionerna SE1 och SE2 dominerar vattenkraften, vilket överensstämmer väl med verkligheten då förutsättningarna för vattenkraft är bäst i de norra delarna av landet. Figuren visar även att modellen investerar största del installerad effekt i region SE3, vilket anses vara rimligt då region SE3 är den mest befolkningstäta och därmed den region med högst elkonsumtion. I denna region är förutsättningarna för vindkraft goda och det finns bra möjligheter till handel mellan intilliggande regioner SE2 och SE4. Figuren visar även två olika biogas-tekniker installerade i region SE3 och region SE4; biogas och biogas peak. Biogas syftar på förbränning av syngas producerad via förgasning av biomassa, i ett gaskombiverk, medan biogas peak syftar på förbränning i endast en gasturbin. Det leder således till att biogas peak har en billig investeringskostnad, men är samtidigt dyrare i drift. Slutligen observeras i Figur 5 att solceller endast har installerats i region SE3 och region SE4.



Figur 5: Installerad effekt av de modellerade teknikerna i Sveriges fyra regioner.

Figur 6 visar den timvisa genererade effekten i Sverige över ett helt år, genererad av miniELIN. I figuren observeras en tydlig trend där elbehovet är som högst under de kalla perioderna av året. Figuren påvisar även vindkraftens intermittenta natur, då den i figuren fluktuerar kraftigt. För att täcka elbehovet de timmar vindkraftens genererade effekt är låg, krävs en aggressiv reglering av vattenkraften, vilket är varför även den fluktuerar.



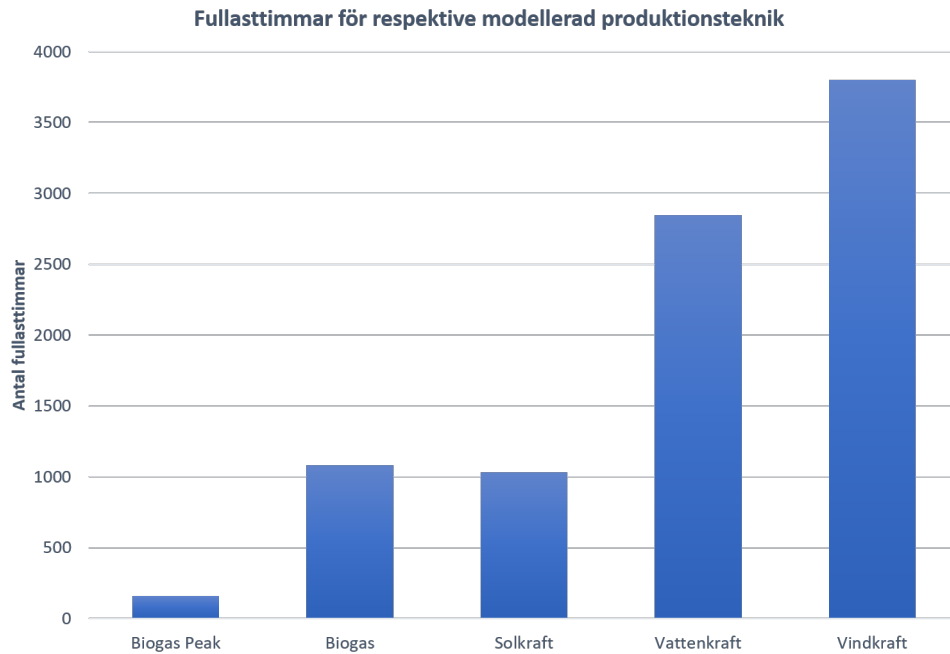
Figur 6: Det timvisa elbehovet i Sverige över ett helt år.

Jämförs Figur 6 med Figur 1, vilken visar den timvisa genererade effekten för år 2016, noteras skillnader. Den största skillnaden är givetvis kärnkraften som ur ett kostnadseffektivt perspektiv bör vara i konstant drift och därmed ge en baslast som det virtuella elsystemet saknar. En likhet som observeras mellan Figur 6 och Figur 1 är att båda figurerna följer samma trend; elproduktionen är som högst under vintertiden och sjunker kraftigt under sommaren.

En ytterligare skillnad mellan investeringsmodellen och verkligheten är att modellen avgränsade sig från handel med andra länder. Detta innebär att för investeringsmodellen motsvarar elproduktionen exakt konsumtionen av el, vilket inte stämmer i det verkliga fallet. I verkligheten kan det överskott som produceras exporteras till närliggande länder, och detta kan förklara ytterligare skillnader mellan Figur 6 och Figur 1.

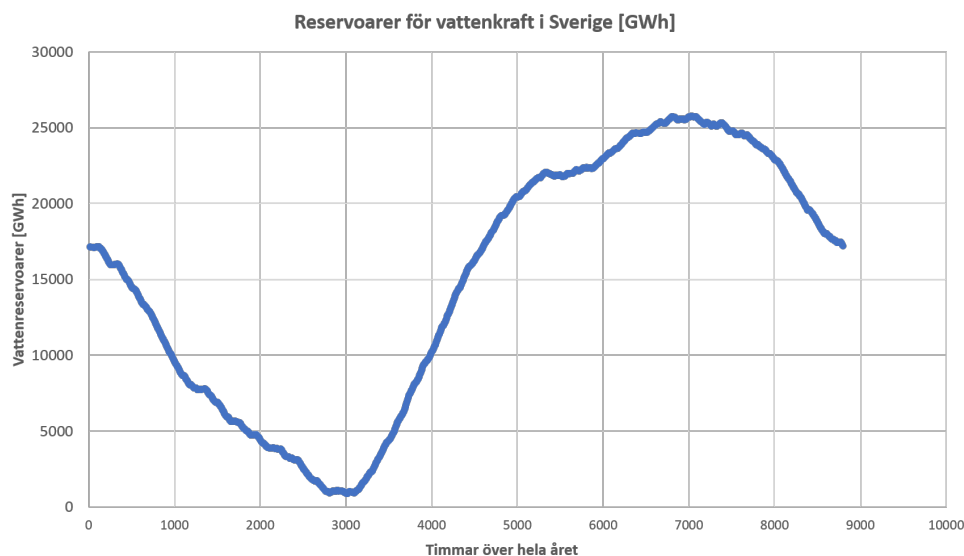
I Figur 7 presenteras antal fullasttimmar⁸ för de modellerade produktionsteknikerna. I figuren observeras att fullasttimmarna för biogas, framförallt biogas peak, är få relativt de andra teknikerna. Detta beror på att biogas är en stabil men, jämfört med de andra förnyelsebara energikällorna, dyr källa till el. Det kan i Figur 5 observeras att den installerade effekten för biogas peak i region SE3 är mycket högre än den för biogas, samtidigt som det i Figur 7 visas att fullasttimmarna är få. Detta kan förklaras med att modellen investerar i en hög installerad effekt av biogas samt biogas peak för att säkerställa att elbehovet kan mötas de dagar då behovet är som högst samtidigt som de intermittenta källorna genererar endast små mängder el. Under de resterande dagarna på året, vilka inte är lika krävande, undviks förbränning av biogas. Denna hypotes styrks även av Figur 6 där det tydligt syns att biogasförbränningen är som högst i början och slutat av året, vilket motsvarar de perioder på året där elbehovet är som störst.

⁸Fullasttimmar är kvoten mellan producerad el och installerad effekt. Om en vindturbin med effekten 1 MW producerar 2000 MWh på ett år är antal fullasttimmar för det året 2000.



Figur 7: Antal fullasttimmar för respektive modellerad teknik. Medelvärde för hela Sverige.

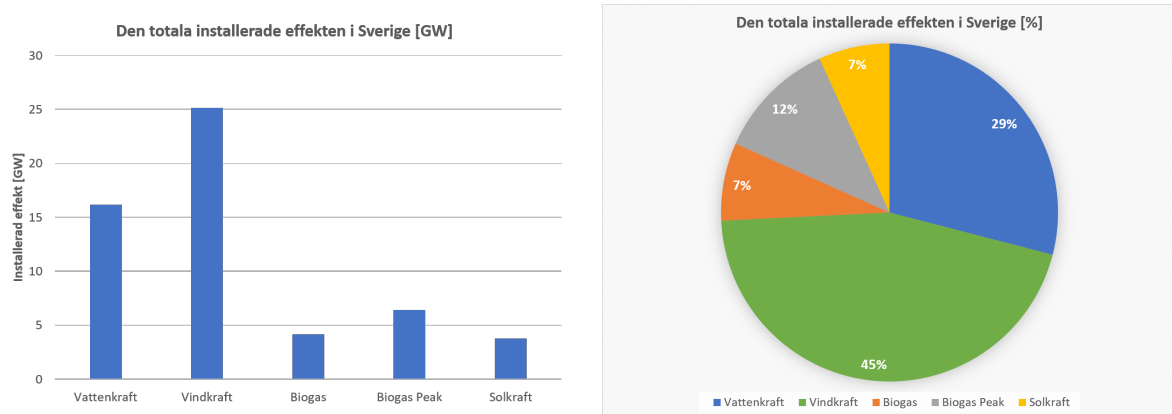
Figur 8 illustrerar hur reservoarerna för vattenkraften i investeringsmodellen betar sig över ett helt år. Jämförs denna figur med Figur 4, vilken visar vattendepåerna över år 2016, syns tydliga likheter. Båda figurerna följer samma trend där en stor del av depåerna töms i början av året. Detta görs av två anledningar: för att elbehovet är stort under denna period och för att tömma depåerna inför den tillrinning som sker under vår och sommar. Det faktum att den modellerade trenden följer den verkliga kan användas som argument för att höja trovärdigheten för investeringsmodellen.



Figur 8: Vattendepåernas variation över ett helt år för investeringsmodellen.

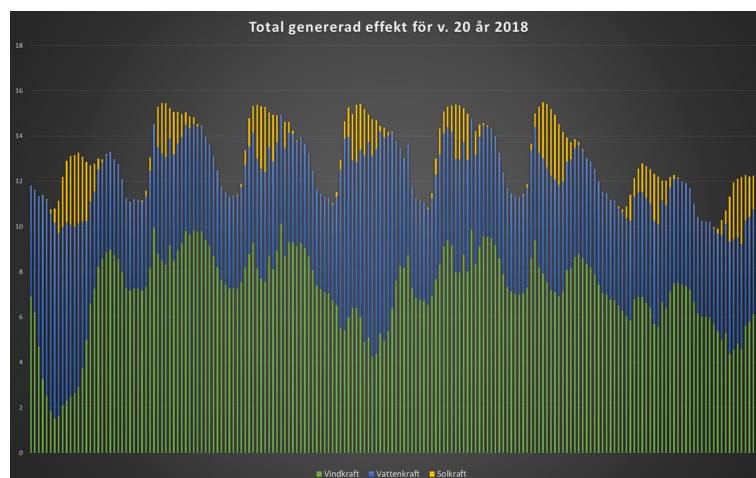
Eftersom modellen vet hur året ser ut och kopplar första och sista timmen kan den nästan helt tömma vattenreservoarerna i april/maj vid 3000 timmar. Detta är inte fallet i verkligheten och det syns tydligt då året inte börjar och slutar med samma mängd vatten i reservoarerna. Att helt tömma dammarna hade kunnat vara riskfyllt i händelse av ett torrår. Detta hade kunnat skada balansen i nätet eftersom vattnet har viktigt reglerbidrag.

I Figur 9 presenteras den totala installerade effekten för hela Sverige erhållen från investeringsmodellen. Vid jämförelse med Figur 2 observeras ett antal tydliga skillnader. I det modellerade elsystemet dominerar vindkraften, och det finns ingen installerad kärnkraft. Utöver detta är den totala installerade effekten mycket högre än den i Figur 2. Detta beror till stor del på att det modellerade elsystemet förlitar sig på intermittenta elkällor som vindkraft. Kärnkraft är en stabil källa till el vilket innebär att elproduktionen från denna teknik inte fluktuerar och kan ligga på hög drift kontinuerligt. Med ett elsystem där vindkraft är den dominerande elproduktionstekniken krävs en högre installerad effekt för att garantera en hög genererad effekt under tillfällen där vindhastigheten är låg.



Figur 9: Den totala installerade effekten för respektive modellerad teknik i hela Sverige i GW och procent.

5.2 Den timvisa uppdateringen - miniEPOD



Figur 10: Resultat av en veckas körning av miniEPOD.

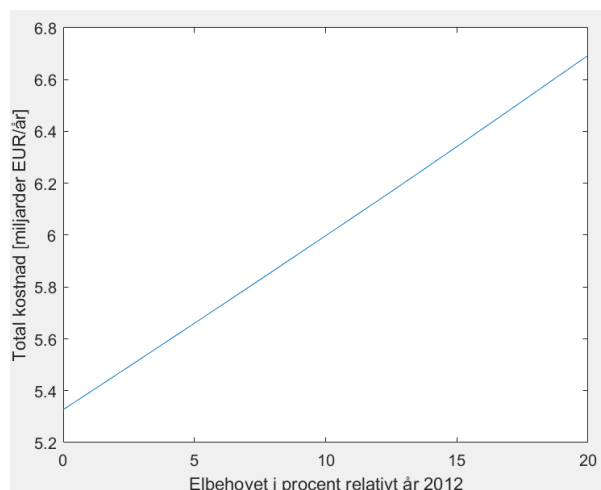
Figur 10 visar resultaten från miniEPOD för vecka 20 år 2018. Behovet möts mestadels av vindkraft och vattenkraft samt solkraft under dagstimmarna.

5.3 Resultat från känslighetsanalyserna

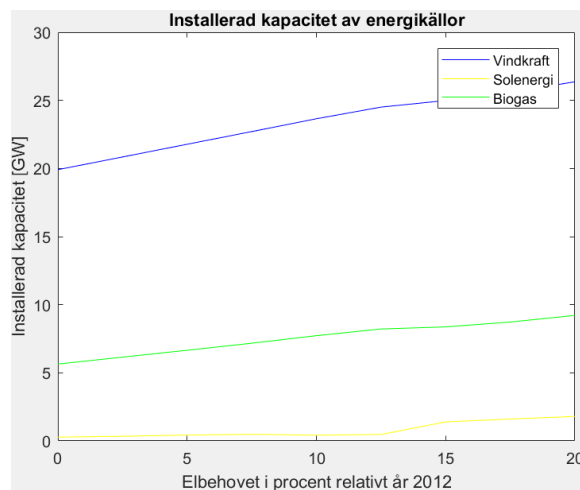
De två parametrar som identifierades som relevanta att utvärdera ansågs vara det nationella elbehovet och den årliga elproduktionen från vattenkraft, som är beroende av vattenflödet. Resultatet av känslighetsanalyserna baserade på dessa parametrar visas nedan.

5.3.1 Elbehovet

I Figur 11 framgår det att den procentuella ökningen av elbehovet medför en ökning av den totala systemkostnaden. Då elbehovet ökar med 20 % sker en ökning av kostnaden från cirka 5,3 miljarder EUR/år till cirka 6,7 miljarder EUR/år. Det motsvarar en kostnad på cirka 0,07 miljarder EUR/år per procentuellt ökning av elbehovet. Figur 12 visar hur miniELIN ökar den installerade kapaciteten av vindkraft och biomassa tills elbehovet är 13 % större relativt år 2012. Vid denna punkt visar utdata från miniELIN att investeringar i havs- och sjöbelägna vindkraftverk börjar. Därefter stabiliseras den installerade kapaciteten för vindkraft och biomassa något. Vid ett elbehov som är ungefär 13 % större än för år 2012 kommer miniELIN påbörja en investering i solenergi.



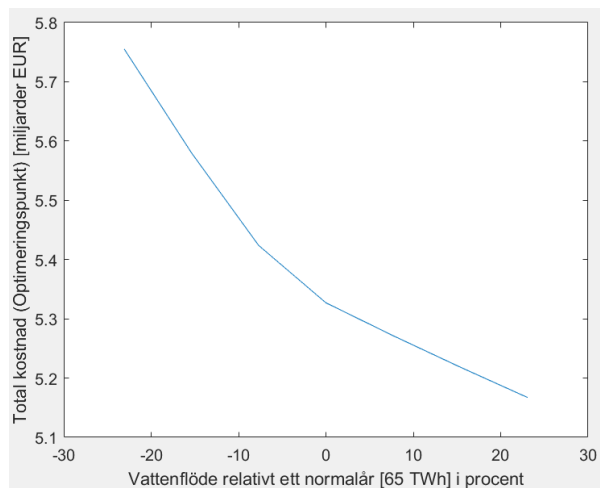
Figur 11: Elbehovets påverkan på den totala årliga systemkostnaden för elsystemet



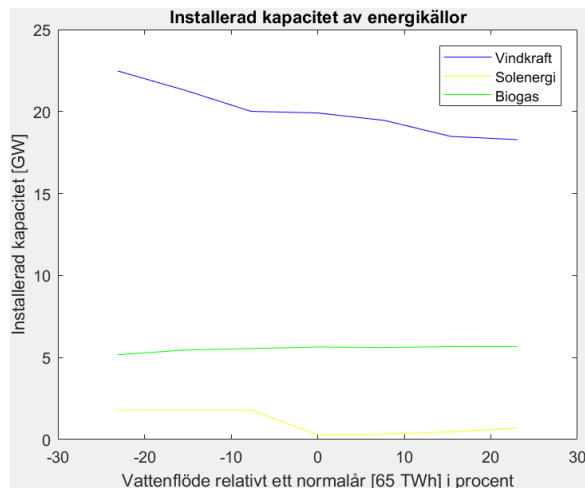
Figur 12: Elbehovets påverkan på den installerade kapaciteten, investerat av modellen

5.3.2 Elproduktion från vattenkraft

I Figur 13 kan utläsas att systemkostnaden ökar med cirka 8 % vid ett torrår och minskar med 3 % vid ett våtår, där ett torrår är cirka 50 TWh och ett våtår är cirka 80 TWh. Figur 14 visar att miniELIN vid ett torrår kommer investera i vindkraft och solkraft i små men noterbara mängder. Vid ett våtår kommer miniELIN enligt analysen investera något mindre i vindkraft och inte alls i solkraft. Detta är rimligt då ett torrår ger en minskad elproduktion från vattenkraft och ett våtår ger en ökad elproduktion från vattenkraft. Biogas påverkas inte nämnvärt av en varierande elproduktion från vattenkraft.



Figur 13: Elproduktionen från vattenkraft och dess påverkan på den totala årliga systemkostnaden för elsystemet



Figur 14: Elproduktionen från vattenkraft och dess påverkan på den installerade kapaciteten, investerat av modellen

5.4 Hemsidan

Hemsidans startsida visas i Figur 15 och länken till den är <https://kristinead.wixsite.com/virtuelltelsystem>. I hemsidans första flik beskrivs projektet. I den andra fliken jämförs det nuvarande svenska elsystemet med utdata från modellen. Exempelvis jämförs energikällors kapacitet. Denna information hämtas från automatiseringen genom ett skript programmerat i webbsidebyggarens backend-funktion. I hemsidans tredje flik presenteras ett quiz som har skapats utifrån myter, se nedan. I den sista fliken presenteras projektmedlemmarna.

Myterna identifierades utifrån resultatet från enkäterna som visas i bilaga B. Totalt svarade 156 personer på enkäten. På grund av att frågorna endast delats på projektmedlemarnas Facebooksidor förväntas personer som svarade vara främst studenter (Chalmerister). På frågan "Tror du att Sverige kan gå runt på enbart förnyelsebar el? (dvs utan kärnkraft och fossila bränslen) Varför?" svarade 61,3 % ja, 37,5 % nej och 1,2 % att de inte hade egen åsikt. På varför svarade hela 106 personer med egen text på frågan. Denna fråga lade i stor grad grund till myterna, som formulerades utifrån frekvent återkommande ämnen till följande:

- Kärnkraft kan inte bytas ut.
- Det krävs en stabil energikälla som inte påverkas av väder.
- Det blir dyrare med ett förnyelsebart energisystem.
- Vi har många outnyttjade resurser.
- Att byta till förnyelsebar energi kommer påverka omgivningen och elsystemet.

Dessa myter kan vara både sanna och falska. Diskussion om och eventuellt svar på myterna utifrån teorin och de resultat som erhållits finns under rubriken 6.4 Visualisering - hemsida och myter .



Figur 15: Bild på hemsidans startsida.

6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras de erhållna resultaten utifrån den teori som har presenterats i tidigare kapitel. För modelleringen innebär det en tolkning och jämförelse av resultaten, men även en diskussion kring modellens giltighet och olika felkällor. Även för hemsidan diskuteras felkällor angående exempelvis webbsidebyggaren, men främst förs en diskussion kring de myter som fastställs i resultatet.

6.1 Jämförelse av miniELINs virtuella elsystem och dagens elsystem

Syftet med miniELIN var att modellera ett virtuellt, svenskt elsystem med enbart förnyelsebar och koldioxidneutral elektricitet, vilket utfördes och redovisas bland annat i Figur 5. Detta tyder på att regeringens mål om 100 % förnyelsebar el är möjligt. De genererade resultaten kan tydligt presenteras på hemsidan, se rubrik 5.4 Hemsidan, och bidra till ökad förståelse för Sveriges möjligheter till utbyggnad av förnyelsebar el.

I enlighet med de krav som ställts i GAMS är den totala installerade kapaciteten av vattenkraft identisk för både miniELINs och dagens elsystem. Vattenkraften har även en tydlig lastföljande funktion för både dagens elsystem och det virtuella elsystemet. Här skiljer dock modellerna sig eftersom fluktuationerna för det virtuella systemet är mycket större. Den aggressiva regleringen av vattenkraften, vilken syns i Figur 6, uppstod till följd av att den, i modelleringen, tilläts variera fritt från 0 % till 100 % av den maximala kapaciteten.

Vid en närmare analys av resultaten från miniELINs genererade effekt över året i Figur 6 används biogas främst under vintern. Förbränningen görs i reglerande syfte då behovet är som högst eftersom produktionsteknikens driftkostnader är höga och undviks om behovet inte finns. Det är därför inte gynnsamt att kontinuerligt förbränna biogas som baslast. Det virtuella elsystemet tar inte heller med avfallsförbränning eftersom koldioxidneutralitet har satts som krav och modellen avgränsade sig från värmesektorn. I fallet att avfallsförbränning skulle tas med skulle den ligga som baslast, vilket syns tydligt för det verkliga fallet i Figur 1.

En viktig sak att poängtera är att investeringsmodellen har tillgång till all meteorologisk data för hela året och utför investeringsmetoden utifrån denna data. I verkligheten är det praktiskt taget omöjligt att ha kännedom om framtiden på samma vis, vilket betyder att den investering miniELIN utför inte nödvändigtvis reflekterar hur investeringar görs i verkligheten.

6.2 Automatiserad timvis uppdatering med realtidsdata

Ett av målen med projektet var att modelleringarna av det förnyelsebara elsystemet skulle automatiseras. För att uppnå syftet att timvis jämföras mot det verkliga elsystemet i Sverige idag användes dagens meteorologiska data och elbehov. Skriptet hämtar meteorologisk data, databehandlar och skriver om utdata till en fil som sedan kan presenteras på hemsidan. För att kunna göra en grundlig analys av resultaten behöver den timvisa uppdateringen vara i drift under flera veckor. Detta på grund av att ändringarna annars inte ger en markant skillnad från typåret då bara en mindre mängd datapunkter skrivs över.

Det finns en del utvecklingspotential utifrån de svårigheter som konfronterats under projektet. Ett problem var att hitta realtidsdata för varje timme. Data om vattenkraften fanns till exempel bara tillgänglig på veckovis basis och vinddatan fanns bara på marknivå. För vinddatan kunde dock vindhastigheten vid högre höjder approximeras.

Utöver detta fanns inte tillgång till en tillräckligt stark dator för modellering av elsystemet med en timmes tidsupplösning. Istället fick tidsupplösningen bli var tredje timme. Detta resulterade i åtta datapunkter per dag, vilket var tillräckligt för en jämförelse av elmixens produktionskällor. Däremot var det inte tillräckligt för en jämförelse av till exempel elpriser, som antas fluktuera med högre frekvens. Enligt de enkätresultat som erhöles svarade dock hälften att de endast hade intresse av denna information en gång i månaden. För vidare undersökning om möjligheten att tillämpa tekniker inom användarflexibilitet, se rubrik 3.3.2 Användarflexibilitet, hade en uppdatering varje timme kunnat vara fördelaktig.

6.3 Modelleringens giltighet

Ett flertal antaganden som gjorts i modelleringen kan ha påverkat hur det virtuella elsystemet är uppbyggt, vilket diskuteras nedan. Eftersom miniEPOD använder den virtuella värld som miniELIN modellerar finns det även risk för följdfel.

Både miniELIN och miniEPOD utgår från typåret 2012. Det innebär bland annat att båda modellerna är säkra på exakt hur året kommer se ut och tar inte med osäkerheter som är kopplade till framtiden. Förutom detta använder båda modellerna, som tidigare nämnt, Perfect Foresight och End-of-Life-kriterium. För miniEPOD innebär detta att modellen optimerar driften för den tid på det aktuella året som passerat samt den kvarvarande meteorologiska datan för året, från år 2012. Därmed kommer varje meteorologisk avvikelse från typåret bidra till små fel i optimeringen av driften. Perfect Foresight märks även tydligt i jämförelsen av vattenreservoarerna i Figur 4 och 8, där det noteras att modellerna vet hur året ser ut och därför nästan helt tömmer vattenreservoarerna vid 3000 timmar, vilket motsvarar april/maj, för optimal körning. Dessutom är vattenståndet identiskt på sista och första timmen vilket inte är verklighetens utfall.

6.3.1 Virtuell handel

I modellen tillåts endast intern handel och Sverige antas därmed vara isolerat. Detta är en stor förenkling av verkligheten, där Sveriges elnät är ihopkopplat med grannländernas för kontinuerlig handel av el. Orsaken till att inte handel med grannländerna modelleras beror dels på den omfattande kodning som det skulle innebära, men även på intresset att se hur Sverige skulle klara sig självständigt.

I en värld där majoriteten av elsystemen baserar sin elproduktion på intermittenta källor, skulle handeln kunna vara ett otillförlitligt verktyg för hantering av över- och underskott av el. Detta kan bero på att det finns risker om att grannländerna inte alltid kan bistå med att balansera under- och överproduktion av el om de inte använder sig av någon sorts lagrings- eller reglersystem. På grund av detta kan det vara relevant att få kunskap om hur Sverige hade hanterat elsituationen utan handel.

Även om handeln inte är modellerad efter verkligheten, utan utifrån ett självständigt Sverige, påverkar den balansen på det svenska elnätet som om Sverige hade arbetat som en enhet⁹.

⁹Exempelvis ELIN/EPOD

6.3.2 Virtuellt elbehov

Eftersom investeringsmodellen avgränsar sig från handel med andra länder överensstämmer som tidigare nämnt elbehovet och elproduktionen fullständigt. Det är därför viktigt att diskutera modellens känslighet vid förändringar av elbehovet. Enligt den utförda känslighetsanalysen har elbehovet en viss påverkan på både installerad kapacitet och elpriset enligt Figur 11 och Figur 12.

Elbehovet kan väntas öka gradvis, bland annat med tanke på en ökande befolkningens mängd. Förändringarna förväntas ske långsamt vilket tillåter den tekniska utvecklingen och kapacitetsutbyggnad i energisektorn att anpassa sig. Därför finns inte någon större risk för stora förändringar i elbehovet på ett kort tidsintervall. Vid stora elomställningar under kort tid, exempelvis i fallet att elbilar helt skulle ersätta bensin- och dieseldrivna bilar, skulle miniELINs modell kanske inte vara applicerbar. Sådana snabba elbehovsomställningar är mindre troliga än en gradvis ökning. Därför kan modelleringens resultat ses som trovärdiga trots att den installerade effekten är direkt beroende av elbehovet.

6.3.3 Virtuellt vindkraft

Teknologin för vindkraft som modelleras är av typ 200 W/m^2 vilket är vanligt för nyare modeller av vindkraftverk [12]. I verkligheten finns det turbiner med både högre och lägre effekt och användandet av endast 200 W/m^2 i modellen kan därmed ses som en förenkling. I dagens elsystem finns både landsbelägna och havsbelägna vindkraftverk. Dock saknades meteorologisk realtidsdata för vindhastigheten till havs. Samtidigt finns det enligt Energimyndigheten större intresse för landsbelägna vindkraftverk, vilket även beskrivs i 3.1.2 Vindkraft. Detta medförde att endast landsbelägna vindkraftverk modellerades.

Ett problem med modelleringen av den virtuella vindkraften är, som tidigare nämnt, insamlingen av data gällande vindhastigheten. Vindhastigheten som uppskattades i 4.2. är inte optimal, men bedömdes som god nog och i linje med projektets syfte. För framtida arbeten hade vindhastigheter för högre höjd kunnat öka giltigheten på modellen.

6.3.4 Virtuellt vattenkraft

Vattenkraften finns i flera olika klasser som tidigare nämnts i teoridelen 3.1.4 Vattenkraft. I modelleringen är de dock representerade av endast de största vattendammarna samt reducerade till en gemensam parameter. Deras förmåga att generera el ökas i modelleringen för att kompensera för bortsedda bidrag från mindre kraftverk. Det är däremot möjligt att vattenkraftverk av klass tre, de minsta kraftverken, skulle kunna avvecklas, vilket gör modellens antagande rimligt.

Typåret 2012 har definierats till att vara ett normalår vad gäller vattenflödet. Om 2018 visar sig vara ett våtår eller ett torrår kan valet att modellera ett normalår medföra att resultaten från miniE-PODs modelleringar är felaktiga. Även avvikelser mellan överskriven data och data för ett typår kan i modelleringarna av miniEPOD bli problematisk om det blir en för stor differens mellan de två profilerna. I känslighetsanalysen undersöktes hur den totala årliga systemkostnaden och hur den installerade kapaciteten för tre olika energikällor förändrades vid varierande vattenflöde. Den totala årliga systemkostnaden förändrades mer vid ett torrår än ett våtår antagligen på grund av den ökade investeringen i vindkraft och solkraft. Därmed är parametrarna känsligare för torrår än våtår.

Ett annat antagande är att endast 1 % av vattnet i vattendammarna måste släppas igenom. Avsikten är egentligen att modellera det till 10 % så att älvarna inte torkar ut, men det är inte möjligt för SE4. Detta kan bero på att miniELIN endast modellerar dammar, men det finns inte några sådana i SE4. Enligt teoriavsnittet 3.1.4 Vattenkraft har SE4 i södra Sverige varken stor andel installerad kapacitet eller höga reglerbidrag av sin vattenkraft. Intressant för framtida arbete hade varit att installera en annan reglerande teknologi, som exempelvis energilagring eller DSM, än vattenkraft i just denna region och se om 10 % då skulle kunna släppas igenom för de andra regionerna.

Modellen antar även att regleringen av vattendragens genomflöde är mer flexibla än vad de är. Egentligen skall en begränsande ekvation inkluderas för hur snabbt elproduktionen ur vattenkraft kan variera, men i modellen antas produktionen kunna gå från 0 % till 100 % på en timme.

6.3.5 Virtuellt solenergi

Som beskrivs i metoden 4.1.1 är kostnaden för solceller lägre än dagens kostnad, vilket ökar chansen att miniELIN bygger ut solkraftverk jämfört med verkligheten. I 3.1.3 Solkraft konstateras dock att kostnader för solceller sänkts de senaste åren, vilket innebär att detta antagande inte nödvändigtvis är orimligt.

En brist med solkraft i modelleringen är att data om mängden sol är inkluderad för endast en punkt per region. För framtida arbeten hade det varit bättre med ett flertal punkter per region.

Det finns flera olika sorters solpaneler, men modellen inkluderar endast de som inte vrider sig efter solen eftersom det eventuellt är sådana privatpersoner använder på vanliga bostadshus. Resultatet från enkäten, se bilaga B, visar att det allmänt finns en positiv inställning till solpaneler: 96,9 % kan tänka sig ha solceller på taket.

6.3.6 Virtuellt biogasförbränning samt CCS

Modelleringen som utfördes undersökte, som nämnt, endast elsystemet. För att få med hela bilden av Sveriges energisystem skulle även värmesektorn och transportsektorn behöva inkluderas, eftersom alla tre delarna i energisystemet är sammanvävda. Speciellt är Sveriges avfallsförbränning kopplad till denna fråga. I nuläget tas den inte med i modellen, delvis på grund av att det inte är en CO₂-neutral eller förnyelsebar energikälla. Däremot hade en modellering där avfallsförbränning inkluderats givit ett mer verklighetsbaserat elsystem, eftersom Sverige med stor sannolikhet inte kommer sluta förbränna avfall i den närmaste framtiden. Speciellt avfallsförbränning med CCS vore intressant för projektet, men den teknologin finns i nuläget inte modellerad i miniELIN.

CCS är en teknik som går att tillämpa även på biogasförbränning, vilket är inkluderat i modelleringen. Förbränning av biogas med CCS hade kunnat ge en negativa CO₂-utsläpp, vilket globalt är i linje med att hålla Parisavtalet. Utbyggnad av biogas med installerad CCS tilläts, men miniELIN byggde inte ut detta. Det beror på att modelleringen optimerat efter kostnad med kravet på CO₂-neutralitet, och eftersom CCS är en dyrare teknik än exempelvis vindkraft har miniELIN helt enkelt inte satsat på CCS. Detta är de två delarna av modelleringen som inte har ändrats från 1-nods-modellen.

6.4 Visualisering - hemsida och myter

Visualiseringen hade som mål att visa modelleringens resultat på en hemsida, vilken skapades i hemsida-byggaren wix.com då projektgruppen inte hade kompetens inom webbdesign. För att uppdatera resultatet i enlighet med modelleringen behövdes backend-kodning. wix.com har dock en begränsad backend-kodning och använder exempelvis inte språket PHP, vilket används för att hämta data på servrar. Detta fick lösas

genom att ta en omväg och använda andra språk som var möjliga för uppgiften, men inte direkt lämpliga. Det hade därmed varit mer lämpligt att bygga hemsidan ifrån grunden. Hemsidan som den är idag kan ses som ett skal för hur en framtida hemsida ska se ut. Hemsidans uppbyggnad och innehåll är format efter de mål som satts upp med enkla men akademiskt korrekta uppgifter. Detta medför att hemsidan både kan användas som informationskälla och inspirationskälla för olika människor.

Myterna identifierades genom en enkät. Majoriteten av de som svarade förväntas vara studenter då projektmedlemmarna delade enkäten på Facebooksidor. Därmed är det känt vilken målgrupp som har svarat på enkäten och resultatet kan bearbetas därefter. Däremot är det en fördel att ha svar från olika målgrupper då resultatet blir mer verklighetstroget. Således borde enkäten ha besvarats av ett mer representativt urval.

Hemsidans hade två syften: att slå hål på myter om förnyelsebar energi och att jämföra dagens elsystem med modelleringens virtuella, förnyelsebara elsystem. Tre myter besvaras genom projektets modellering. Två myter diskuteras baserat på en enkel litteraturstudie vars innehåll återfinns i 3. Teori om det svenska elnätet. Dessa myter är "Förnyelsebar energi har stor potential" och "Att byta till förnyelsebar energi kommer påverka omgivningen och elsystemet" och slås ihop till rubriken "Utbyggnad av förnyelsebara energikällor". En felkälla är att ämnena är omfattande och hade behövt grundliga litteraturstudier baserade på ett flertal vetenskapliga rapporter. I den här litteraturstudien diskuteras den förnyelsebara energins potential samt påverkan på ekosystemet, människan och elsystemet. Andra effekter som kan diskuteras är politiska aspekter och vilken påverkan de kan ha i ett framtidsscenario. Nedan presenteras diskussioner kring de fem myterna.

6.4.1 "Det krävs en stabil energikälla som inte påverkas av väder."

Begreppet "En stabil energikälla" är svårdefinierat och används på olika sätt i olika sammanhang. Därmed har myten, enligt projektgruppen, två olika tolkningar. Den första är att det krävs en stabil energikälla som ger en baslast i systemet. Den andra är att det krävs en pålitlig energikälla med stabila tillgångar över hela året som kan reglera intermittenta energikällor.

Under rubrik 3.2 Utmaningar med förnyelsebara, intermittenta energikällor, diskuteras problem med överskott och underskott av el i systemet. Underskottet motverkas delvis genom att placera ut vindkraften på olika delar av landet, då det sällan är vindstilla i hela Sverige samtidigt. Sverige har snarare en väldigt bra vindsituation med stor potential för utbyggnad och utveckling, så risken för att inte kunna möta behovet är ganska liten. Men speciellt kalla vinterdagar, när det är vindstilla men behovet är högt, finns det en risk och det är då det är bra att ha en baslast som ger lite extra marginal.

Eftersom miniELIN optimerat körningen för ett typår har den, som diskuterats i 5.1 Investeringsmodellen - miniELIN, inte några marginaler alls, utan väljer att installera exakt så mycket så det högsta kravet i behovet möts men inte mer. I Figur 6 noteras att baslastbidraget från dagens kärnkraft inte ersätts med en lika stor baslast i den virtuella modellen. Detta kan alltså tolkas som att mängden baslast som dagens system har inte är nödvändig vid en eventuell omställning.

Resultaten tyder alltså på att "en stabil energikälla som ger en baslast i systemet" inte behövs. Att "en stabil energikälla som kan kompensera för vindkraftens intermittens" behövs är däremot en utmaning som nämns redan under rubrik 3.2 Utmaningar med förnyelsebara, intermittenta energikällor. Att reglera under- eller överproduktion genom import eller exporten till grannländer är enligt SVK inte möjlig i vissa fall. Detta kan antas eftersom över- eller underproduktion kan inträffa samtidigt för de sammankopplade länderna, vilket medför att de inte kan reglera varandra.

En studie av Söder stödjer att vattenkraft kan reglera ett 100 % förnyelsebart, svenskt elsystem, vilket även är vad investeringsmodellen visar. Känslighetsanalysen med vattenflödet som parameter, under rubrik 5.3 Resultat från känslighetsanalyserna, visar att den totala årliga systemkostnaden och den installerade kapaciteten för tre energikällor förändras mer vid torrår än vid våtår, jämfört med ett normalår. Däremot kan det anses att förändringarna är så små att vattenkraft kan definieras som en stabil och

pålitlig energikälla.

Det finns även alternativa sätt att reglera intermittenta energikällor på utöver vattenkraft, vilka därmed skulle kunna användas som komplement till vattenkraft. Implementering av pumplagring, batterier och användarflexibilitet kan vara lösningar på under- och överskott av elproduktion. Enligt de enkätresultat som erhöles, se bilaga B, kunde flertalet personer tänka sig att förändra sin elkonsumention, vilket hade gjort användarflexibilitet relevant.

6.4.2 “Kärnkraft kan inte bytas ut”

De erhållna enkätresultaten, se bilaga B, visade att 37,5 % inte trodde att Sverige skulle klara sig utan kärnkraft. I avsnitt 5.1 Investeringsmodellen - miniELIN, visar dock resultatet från modelleringen att vid utbyggnad av vindkraft, solkraft och biogas är det möjligt att utesluta kärnkraft. Detta resultat är i linje med regeringens mål för ett 100 % förnyelsebart svensk elsystem till år 2050. Kärnkraft är inte en förnyelsebar energikälla och innebär flera etiska komplikationer med slutförvar av radioaktivt avfall och risk för olyckor.

Kärnkraft kan användas lastföljande, vilket diskuteras i 3.1.1 Kärnkraft, men används främst i funktion av baslast i dagens Svenska elsystem. Detta ses tydligt i Figur 1. Anledningen till att vattenkraft hellre används i reglerande syfte är att det är billigare. Sverige har en hög elanvändning, vilket har bidragit med att kärnkraftens tillförlitlighet ansetts vara bra, speciellt under vinterhalvåret. Denna funktion som baslast och bidrag till svängmassa är argument för dess relevans i elsystemet. Det finns även en tro om att denna baslast måste ersättas med en annan energikälla som verkar på samma sätt, oftast en termisk energikälla. En ersättning av kärnkraften med termisk energi från biomassa, för att ha förnyelsebar ersättning, skulle inte vara ekonomiskt hållbar. Investeringskostnaden i biogas från speciellt gasturbiner är låg, däremot är driftkostnaden mycket hög och fungerar bäst vid elbehovstoppar. Vilket nämns i diskussionen kring stabila elkällor ovan visar de modelleringsresultat som redovisas i denna rapport dessutom att kärnkraftens baslast inte verkar behöva ersättas med en direkt motsvarande baslast. Det ersätts istället främst med vindkraft med vattenkraften som en avgörande reglerande energikälla.

Slutsatsen är således att när kärnkraften tas ur elsystemet skiftas fokus helt från baslastens vikt till vikten av intermittenta elkällors reglering.

6.4.3 “Det blir dyrare med ett förnyelsebart energisystem”

Det virtuella elsystemet miniELIN investerar i helt nya anläggningar och kör dessa i ett år. Redan existerande anläggningar tas inte hänsyn till och således blir den investeringskostnad som genereras av miniELIN inte relevant för jämförelse med dagens elsystem. Exempelvis representerar investeringen av vattenkraften i miniELIN en vattenkraft som idag redan är installerad. Dessa investeringskostnader skulle således inte vara aktuella. Kärnkraftens avveckling skulle troligtvis innebära höga kostnader. Dessa kostnader inkluderas inte i modellen.

Det som istället kan tolkas ur modelleringens resultat är utifrån den elproduktionsmix som genererats, som är helt förnyelsebar. Enligt Kåberger visar studier att det är ekonomiskt fördelaktigt att installera förnyelsebara elkällor då elbehovet ökar [5]. Sol- och vindenergi har främst höga investeringskostnader, men mycket billiga driftkostnader, som tidigare nämnt i kapitel 3. Teori om det svenska elnätet. Till skillnad från uran som importeras är sol och vind kostnadsfritt och förnyelsebara elkällor. Elpriserna skulle således kunna bli lägre vid gynnsamma vind- och solförhållanden med miniELINs virtuella energisystem där dessa byggs ut. Enligt Göransson och Lundberg behövs dock stora möjligheter till energilagring vid tillfällen då vind och sol inte kan producera tillräckligt med elektricitet [29]. Detta skulle kunna göras med exempelvis pumplagring eller batterier.

Elproduktion från biobränsle är dyr eftersom mycket energi från bränslet går till värme, som nämnts

under rubrik 3.1.5 Bioenergi. Bränslet i biogasförbränningen har även en hög kostnad relativt solkraft och vindkraft. Investeringen av el från biogas görs för det extra bidraget då elbehovet är högt och främst i region SE3 med störst befolkningsmängd. Det virtuella elsystemet har inte investerat i biobränsle från avfall, en teknik som idag används och förväntas fortsätta användas.

Om användarflexibilitet skulle tillämpas hade elförbrukningen minskat då elbehovet inte går att möta. Detta hade kunnat minska privatpersoners elförbrukning om de inte brukar sina elprodukter då elpriset är som högst. Således skulle elpriset kunna minska för privatpersonen.

En möjlig slutledning med avseende på vind- och solenergis låga driftkostnader skulle kunna vara att elpriset minskar. Investeringskostnaderna är dock höga för samhället och således konsumenterna. Slutsatser kring huruvida elpriset för konsumenter skulle minska är alltså svåra att dra. Enligt resultatet från enkäten, se bilaga B, kan dock 58,8 % tänka sig betala upp till 100 kronor mer i månaden och 22,5 % tänka sig betala mer än 100 kr extra i månaden för förnyelsebar energi, vilket även inkluderar elpriset.

6.4.4 Utbyggnad av förnyelsebara energikällor

En energikälla som anses ha stor potential för utveckling och utbyggnad i Sverige är vindkraft, vilket beskrivs under rubrik 3.1.2 Vindkraft. Exempelvis är södra Sveriges kust välutnyttjad vad gäller vindkraftverk, men det finns stora möjligheter att anlägga vindkraftverk i inlandet och i norra Sverige. Det kan finnas motsättande krafter hos de boende i områden där vindkraft installeras. Enligt resultaten från enkäten, se bilaga B, kan 65,6 % tänka sig ha vindkraft i närheten av sitt boende. Enkäten besvarades troligtvis av studenter på Chalmers som bor i Göteborgs innerstad. Därmed är det troligt att resultatet hade varit lägre om enkäten hade skickats till en blandad folkgrupp från hela Sverige.

Utbyggnad av vindkraft kräver att även kraftverk med mindre svängmassa, se definition i kapitel 3. Teori om det svenska elnätet, eller snabbreglerade kraftverk anläggs, exempelvis vattenkraftverk, för att kompensera för vindkraftens variationer. Vattenkraftverks energiproduktion kan regleras genom att lagra vattenmassor för att använda vid efterfrågan av energi, se 3.1.4 Vattenkraft. Däremot byggdes vattenkraft för att kompensera för variationer i elanvändning och inte för att kompensera för intermittenta elkällor. Enligt Miljöbalken rekommenderas inte utbyggnad av vattenkraftverk på grund av dess negativa miljöpåverkan. Vattenkraftverk har potential att i framtiden, med förbättrad teknik, utvinna mer energi.

Solenergi används bland annat till hushåll, där de placeras på hustak. Detta har blivit mer populärt i takt med att installationspriset har sjunkit stadigt de senaste åren. I resultatet från enkäterna kan utläsas att 96,9 % kan tänka sig ha solceller på sitt hustak. Om installationspriset fortsätter att sjunka är det troligt att investeringar i solenergi kommer fortsätta öka och att solenergi kommer ha en större andel producerad el i det svenska elnätet.

Utvinning av energi från biomassa kan ske vid behov. Det finns stor potential att utvinna energi ur biomassa innehållande vedämnen då Sverige har mycket skog. Det finns begränsningar, exempelvis att 20 % av Sveriges land och färskvattenområden måste bevaras och att endast snabbt växande och mindre kvalitativ skog är lönsam. Dessutom kan konflikter uppstå mellan konkurrerande branscher, till exempel jordbruksbranschen, om energibranschen vill använda en större andel skog. Om skogsarealen maximeras finns det dessutom stor utvecklingspotential. Vad gäller avfallsförbränning återanvänds 99 % av Sveriges avfall och Sverige importerar även avfall för avfallsförbränning. Att ytterligare utnyttja avfallsförbränning för att kompensera för intermittenta energikällor räknas därmed bort.

7 Framtida arbeten

Här nedan följer några punkter som är värda att ha i åtanke för att kunna få ännu bättre resultat vid kommande projekt:

- Ett sätt att motverka modelleringsfelet som uppstår från att modelleringen binder ihop första och sista timmen skulle vara att applicera så kallad Rolling Horizon¹⁰. Perfect Foresight skulle kunna motverkas genom att vikta data från framtida timmar så att deras betydelse för modelleringen blir mindre.
- Vissa förbättringar på modelleringen av de olika teknologierna skulle kunna göras. Vattenprofilen för typåret i miniEPOD skulle till exempel kunna bytas ut mot årets på samma sätt som solprofilen, vindprofilen och det timvisa behovet. För att förbättra modelleringen av vattenkraften ytterligare skulle dessutom ekvationer som begränsar hur snabbt vattnet kan gå från 0 % till 100 % genererad effekt tas med. Även begränsningen för minimalt krav på utsläppt vatten för att undvika uttorkning skulle kunna göras olika för varje region och på så sätt efterlikna verkligheten bättre. Modelleringen av solkraften hade blivit mer korrekt med fler punkter för den meteorologisk data.
- Genom att köpa meteorologisk data skulle vindhastigheten vid turbinhöjden vara tillgänglig och en approximativ beräkning på vinddatan hade undvikits.
- För att få modellen att bättre efterlikna dagens läge, hade det varit intressant att inkludera avfallsförbränningen i modelleringen. I nuläget inkluderar modellen inte avfallsförbränning med installerad CCS, vilket därför vore extra intressant att lägga till i modellen.
- Ett sätt att motverka att miniEPOD blir beroende av en enda miniELIN-körning, hade kunnat vara att köra flera olika miniELIN scenarion och sedan välja ett medelvärde av alla installerade effekter miniELIN producerar.
- Vid tillgång till bättre dator/datorer hade modellen kunnat köras för varje timma istället för varje 3:e timma, och därmed vara mer intressant för eventuella hemsidesbesökare.
- Vid en längre körning av miniEPOD hade resultat från den automatiserade uppdateringen med realtidsdata kunnat utföras.
- För att kunna ta med handeln med grannländer hade man behövt utveckla modellen väsentligt. Det som skulle kunna göras är att exempelvis använda ELIN och EPOD som redan modellerar hela Europa och modifiera dem till att uppfylla samma funktion som miniEPOD och miniELIN gör.
- En utförlig litteraturstudie på de myter som definierades, hade kunnat ge mer definitiva svar. Litteraturstudier på forskning om hur man bäst representerar data på en hemsida och forskning inom miljöpsykologi vore även intressanta aspekter att undersöka i framtida arbeten.
- För att kunna skapa en hemsida från grunden, utan en webbsidebyggare, skulle projektet behöva någon med kompetens inom programmering. Detta skulle ge fler möjligheter vad gäller backendkodning samt möjliggöra mer dynamiska funktioner.

¹⁰ Att man efterhand förflyttar modelleringens sluttimme.

8 Slutsats

Om man bortser från osäkerheten kring modellens förenklingar av vattenkraften, visar resultaten från investeringsmodellen miniELIN att Sverige har möjlighet att ersätta kärnkraft och fossila bränslen med förnyelsebara elkällor. Det virtuella elsystemet visade störst investeringar i vindkraft vars intermittenta natur regleras med vattenkraft och biogasförbränning. Således visar resultaten från investeringsmodellen vattenkraftens avgörande reglerbidrag. En känslighetsanalys visade att effekten av torrår och våtår inte har stor påverkan på elkostnad. Det investerades inte i bioenergi från avfall i det virtuella elsystemet. I verkligheten skulle denna lägga sig som en baslast eftersom EU har förbud på avfallsdeponi. Investeringsmodellen visade även att baslasten som kärnkraften och kraftvärmeverk bidrar med i dagens elsystem inte ersätts med en motsvarande förnyelsebar baslast. Detta innebär att en baslast inte behövs för elbehovet så länge vattenkraftens funktion tas till vara på.

Den automatiserade uppdateringen med realtidsdata är färdigskriven och fungerande. Processen behöver köras en längre tid för att resultat ska kunna tolkas på ett relevant sätt. Pythonskriptet kan ha stor potential för framtida arbetens analyser.

Hemsidan uppfyller de mål som sattes på akademiskt trovärdig, användarvänlig och lättillgänglig. Hemsidan diskuterar fem myter om förnyelsebar energi och jämför det virtuella elsystemet med dagens elsystem. Detta medför att hemsidan både kan användas som informationskälla och inspirationskälla för olika människor. I och med de backend-begränsningar som wix.com visats ha kan hemsidan i dess nuvarande skick ses som ett skal för hur en framtida hemsida ska se ut. En projektgrupp med mer erfarenhet i webbdesign skulle kunna lägga mer fokus på dynamiska funktioner.

Referenser

- [1] M. Selin, "Nu finns Energiläget i siffror 2018." Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/nu-finns-energilaget-i-siffror-2018/> [Hämtad: 2018-04-20].
- [2] FN, "Affordable and clean energy: Why it matters," Tillgänglig: https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/7_Why-it-Matters_Goal-7_CleanEnergy_2p.pdf [Hämtad: 2018-04-17].
- [3] European Parliament and Council of the European Union, "Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009," vol. 2008, no. april, pp. 16–62, 2009. Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>.
- [4] Regeringen, "Ramöverenskommelse mellan Socialdemokraterna, Moderaterna, Miljöpartiet de gröna, Centerpartiet och Kristdemokraterna," pp. 1–7, 2016. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/49cc5b/contentassets/b88f0d28eb0e48e39eb4411de2aabe76/energioverenskommelse-20160610.pdf>.
- [5] T. Kåberger, "Progress of renewable electricity replacing fossil fuels," vol. 1, no. 1, pp. 48–52, 2018. Tillgänglig: www.geidco.org, [Hämtad: 2018-05-05].
- [6] F. Normann, "Energiteknik: Version för ENM160," 2017.
- [7] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems," *Applied Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1059–1082, 2010. Tillgänglig: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>.
- [8] J. Khan, *Local Politics of Renewable Energy*. No. October, 2004.
- [9] "GAMS - Cutting Edge Modeling." Tillgänglig: <https://www.gams.com/> [Hämtad: 2018-04-19].
- [10] K. Svanberg, "Introduktion Linjär optimering (LP)," pp. 1–2, 2012.
- [11] L. Göransson, J. Goop, M. Odenberger, and F. Johnsson, "Impact of thermal plant cycling on the cost-optimal composition of a regional electricity generation system," *Applied Energy*, vol. 197, pp. 230–240, 2017.
- [12] V. Johansson, L. Thorson, J. Goop, L. Göransson, M. Odenberger, L. Reichenberg, M. Taljegard, and F. Johnsson, "Value of wind power – Implications from specific power," *Energy*, vol. 126, pp. 352–360, 2017.
- [13] Nationalencyklopedin, "Stamnät - uppslagsverk - ne.se." Tillgänglig: [https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/stamnät-\(transmissionsnät\)](https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/stamnät-(transmissionsnät)) [Hämtad: 2018-05-01].
- [14] "Nord Pool Spot," 2018. Tillgänglig: <https://www.nordpoolgroup.com/> [Hämtad: 2018-05-13].
- [15] SVK, "Elnät i fysisk planering," pp. 10–13, 2014. Tillgänglig: <https://www.svk.se/contentassets/6a6447eac77848bdb900a1c6883178bf/elnat-i-fysisk-planering.pdf>.
- [16] "Sverige Karta Land - Gratis vektorgrafik på Pixabay." Tillgänglig: <https://pixabay.com/sv/sverige-karta-land-europa-23576/> [Hämtad: 2018-05-07].
- [17] IVA, "Svängmassa i elsystemet - En underlagsstudie," 2016. Tillgänglig: <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-el/201606-iva-vagvalel-svangmassa-c.pdf>.

- [18] SCB, “80 procent av elen kommer från vattenkraft och kärnkraft,” 2018. Tillgänglig: <http://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/energi/> [Hämtad: 2018-05-03].
- [19] A. Kaijser and A. Kander, *Framtida energiomställningar i historiskt perspektiv*. 2013.
- [20] Nationalencyklopedin, “kärnbränsle - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/kärnbränsle> [Hämtad: 2018-04-20].
- [21] Nuclear Energy Agency, “Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants,” no. June, pp. 17–23, 49, 2011. Tillgänglig: www.oecd-neo.org [Hämtad: 2018-05-03].
- [22] Nationalencyklopedin, “dagbrott - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/dagbrott> [Hämtad: 2018-04-17].
- [23] SKB, “Slutförvar för använt kärnbränsle - Strålsäkerhetsmyndigheten.” Tillgänglig: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutforvar/slutforvar-for-anvant-karnbransle/> [Hämtad: 2018-04-19].
- [24] A. Wallin, S. Qvarfordt, and M. Borgiel, “Inventering av vegetation i nyanlagda och naturliga gölar, Forsmark 2017,” 2018. Tillgänglig: <https://www.skb.se/publikation/2489494/P-18-03.pdf>.
- [25] C. Steitz, “Dismantling nuclear: German power firms sell new skills | Reuters.” Tillgänglig: <https://www.reuters.com/article/us-toshiba-accounting-nuclearpower-decom/dismantling-nuclear-german-power-firms-sell-new-skills-idUSKBN1850GP> [Hämtad: 2018-05-03].
- [26] Nationalencyklopedin, “Vindkraftverk - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/vindkraftverk> [Hämtad: 2018-03-29].
- [27] Energimyndigheten, “Vindkraft.” Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/vindkraft/> [Hämtad: 2018-03-29].
- [28] M. Stenkvist, “Riksintressen för vindbruk,” 2017. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/riksintressen-for-energiandamal/riksintressen-for-vindbruk/> [Hämtad: 2018-04-01].
- [29] L. Göransson and L. Lundberg, “Intermittent renewables, thermal power and hydropower - complements or competitors?,” pp. 119–127, 2014.
- [30] Naturvårdsverket, “Vindkraftens miljöpåverkan,” pp. 12–13, 23–27, 2008. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8310-6.pdf>.
- [31] J. Rydell, R. Ottvall, S. Pettersson, and M. Green, “Vindkraftens påverkan på fåglar och fladdermöss – Uppdaterad syntesrapport 2017,” pp. 24–27. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6740-3.pdf?pid=19704> [Hämtad: 2018-05-05].
- [32] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, “Organic solar cells: An overview,” *Journal of Materials Research*, vol. 19, pp. 1924–1945, jul 2004. Tillgänglig: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0884291400094498.
- [33] Energimyndigheten, “Solceller,” 2018. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/solenergi/solceller/> [Hämtad: 2018-05-11].
- [34] Nationalencyklopedin, “Solvärme - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/solvärme> [Hämtad: 2018-05-01].

- [35] Energimyndigheten, “Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet,” p. 48, 2016.
- [36] NordPool AS, “View hourly production.” Tillgänglig: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Power-system-data/hydro-reservoir1/SE/Hourly1/?view=table>.
- [37] I. S. WWF, “Hållbar energi 100 %,” *Energy*, 2011.
- [38] SVK, “Systemutvecklingsplan 2018-2027,” p. 25, 2017. Tillgänglig: <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2017/svenska-kraftnats-systemutvecklingsplan-2018-2027.pdf>.
- [39] Nationalencyklopedin, “vattenkraftverk - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/vattenkraftverk> [Hämtad: 2018-04-23].
- [40] Nationalencyklopedin, “vattenenergi - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/vattenenergi>, [Hämtad: 2018-04-08].
- [41] E. Weidemann, *Waste Incineration Residue*. 2014.
- [42] Nationalencyklopedin, “bioenergi - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/bioenergi> [Hämtad: 2018-05-10].
- [43] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, “Biomass gasification technology : The state of the art overview,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016. Tillgänglig: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>.
- [44] G. Egnell and P. Börjesson, “Theoretical versus market available supply of biomass for energy from long- rotation forestry and agriculture – Swedish experiences,” p. 23, 2012. Tillgänglig: <http://www.ieabioenergytask43.org/httpwww-iewp-contentuploads201309cover-tr2014-1-png/>.
- [45] International Energy Agency - Bioenergy, “Is energy from woody biomass positive for the climate?,” no. January, pp. 1–6, 2018.
- [46] Miljö- och energidepartementet, “A Strategy for Biodiversity and Ecosystem Services,” p. 21, 2013.
- [47] S. V. Hanssen, A. S. Duden, M. Junginger, V. H. Dale, and F. van der Hilst, “Wood pellets, what else? Greenhouse gas parity times of European electricity from wood pellets produced in the south-eastern United States using different softwood feedstocks,” *GCB Bioenergy*, vol. 9, no. 9, pp. 1406–1422, 2017.
- [48] Avfall Sverige AB, “Svensk avfallshantering 2016,” pp. 1–35, 2016.
- [49] Nationalencyklopedin, “avfall - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/avfall> [Hämtad: 2018-05-03].
- [50] M. A. Ibrahim, S. Alriksson, F. Kaczala, and W. Hogland, “Fires at storage sites of organic materials, waste fuels and recyclables,” *Waste Management and Research*, vol. 31, no. 9, pp. 937–945, 2013.
- [51] Energiföretagen, “Europas miljöproblem med deponi.” Tillgänglig: <https://www.energiforetagen.se/sa-fungerar-det/fjarrvarme/produktion/avfall/europas-miljoproblem-med-deponi/> [Hämtad: 2018-04-17].
- [52] A. Fråne, L. Youhanan, T. Ekvall, and IVL Svenska Miljöinstitutet, *Avfallsimport och materialåtervinning*. 2016.
- [53] Nationalencyklopedin, “koldioxidlagring - Uppslagsverk - NE.se.” Tillgänglig: <https://www.ne.se/>

uppslagsverk/encyklopedi/lång/koldioxidlagring.

- [54] S. M. Al Fattah, M. F. Barghouty, B. O. Dabbousi, S. Fillacier, P. Le Thiez, C. McQuale, G. Munier, and J. Royer-Adnot, *Carbon Capture and Storage*. 2015. Tillgänglig: http://www.ospar.org/content/content.asp?menu=00810305320000_000000_000000.
- [55] F. Johnsson, M. Odenberger, and L. Göransson, “Challenges to integrate CCS into low carbon electricity markets,” *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 7485–7493, 2014. Tillgänglig: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.785>.
- [56] SVK, “Systemutvecklingsplan 2018-2027,” pp. 12–13, 2017. Tillgänglig: <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2017/svenska-kraftnats-systemutvecklingsplan-2018-2027.pdf>.
- [57] IVA, “Sveriges framtida elnät,” 2016. Tillgänglig: <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-energi/vagvalel-sveriges-framtida-elnat.pdf>.
- [58] L. Saarinen, “The Frequency of the Frequency - On Hydropower and Grid Frequency Control,” tech. rep., Uppsala Universitet, 2017. Tillgänglig: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1050397/FULLTEXT01.pdf>.
- [59] L. Söder, “Simplified analysis of balancing challenges in sustainable and smart energy systems with 100% renewable power supply,” *WIREs Energy Environ*, vol. 5, pp. 401–412, 2016. Tillgänglig: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wene.194>.
- [60] D. Steen, J. Goop, L. Göransson, S. Nursbo, M. Brolin, S. Sarasini, and T. Kåberger, “Challenges of integrating solar and wind into the electricity grid,” in *Systems Perspectives on Renewable Power*, pp. 95–100, 2014. Tillgänglig: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/210515/local_210515.pdf.
- [61] D. Steen, J. Goop, L. Göransson, S. Nursbo, M. Brolin, S. Sarasini, and T. Kåberger, “Challenges of integrating solar and wind into the electricity grid,” in *Systems Perspectives on Renewable Power*, p. 95, 2014. Tillgänglig: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/210515/local_210515.pdf.
- [62] Z. Norwood, J. Goop, and M. Odenberger, “The Future of the European Electricity Grid Is Bright: Cost Minimizing Optimization Shows Solar with Storage as Dominant Technologies to Meet European Emissions Targets to 2050,” *Energies*, vol. 10, no. 12, pp. 21–22, 2017. Tillgänglig: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2080>.
- [63] Svenska kraftnät, “Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion - En delredovisning från Svenska kraftnät,” pp. 17–18, 2015. Tillgänglig: <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/anpassning-av-elsystemet-fornybar-elproduktion-delrapport.pdf>.
- [64] A. Poullikkas, “A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 778–788, 2013. Tillgänglig: https://ac.els-cdn.com/S1364032113004620/1-s2.0-S1364032113004620-main.pdf?_tid=87c60f5e-1ecb-4748-aecb-c0e268392f37&acdnat=1526028618_3e5cbdba1761e6999aa32bc3831b2c25.
- [65] J. S. Anagnostopoulos and D. E. Papantonis, “Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant,” *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 11, pp. 3009–3017, 2007.
- [66] E. D. Castronuovo and J. A. P. Lopes, “Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant,” *International Journal of Electrical Power and Energy System*, vol. 26, no. 10, pp. 771–778, 2004.

- [67] “Heuristic Optimization of Consumer Electricity Costs Using a Generic Cost Model,” *Energies*, vol. 9, p. 6, dec 2015. Tillgänglig: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/6>.
- [68] SVK, “Handelskapacitet - SVK.se.” Tillgänglig: <https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/handelskapacitet/> [Hämtad: 2018-05-05].
- [69] L. Thorson and V. Johansson, “Modelling of wind power - a techno-economic analysis of wind turbine configurations,” Master’s thesis, 2016. 73.
- [70] Z. Norwood, E. Nyholm, T. Otanicar, and F. Johnsson, “A geospatial comparison of distributed solar heat and power in europe and the US,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 12, pp. 1–31, 2014.
- [71] “STRÅNG data extraction.” Tillgänglig: <http://strang.smhi.se/extraction/index.php> [Hämtad: 2018-05-13].
- [72] “SMHI Öppna Data - Meteorologiska Observationer.” Tillgänglig: <https://opendata-download-metobs.smhi.se/explore/?parameter=2> [Hämtad 2018-05-13].

Bilagor

A Lista över miniELIN och miniEPOD

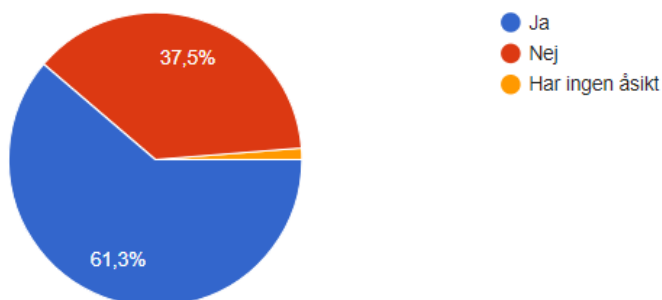
Modellerna Mini-ELIN och Mini-EPOD gör ungefär följande:

1. Definierar mängder (sets)
En mängd med alla timmar som ska modelleras, en mängd med alla regioner som ska modelleras och en mängd med alla teknologier som ska modelleras.
2. Laddar ner data för ett typår
Hur mycket det blåser i de olika regionerna, hur mycket sol de får och hur mycket vatten som runnit in i vattenkraftsdammarna etc.
3. Definierar parametrar
Hur stort behovet i de olika regionerna är, hur stor förlustfaktorn för transport i elkablar är, installerad kapacitet etc.
4. Namnger variabler
Generella variabler såsom export, import, mängden vatten i dammar. För miniELIN: Till skillnad från miniEPOD finns variabeln för investeringskostnader med och variabeln ny-kapacitet (vnewcap), som står för ny utbyggd kapacitet för varje teknologi. För mini-EPOD: Investeringskostnader och ny utbyggd kapacitet modelleras inte.
5. Begränsar (fixerar) värden
*För mini-ELIN: begränsar genererade effekten inte kan bli negativ etc.
För mini-EPOD: Utöver liknande fixeringar som i miniELIN, fixeras även värdena för redan gångna timmar så att de har givna värden och inte kan optimeras. I stället för att beräkna vnewcap-variabeln så som miniELIN gör definieras installerad kapacitet (vinstcap) som fixeras vid värden som en en miniELIN-körning genererat.*
6. Namnger och definiera målfunktionen
I detta fall ska den totala kostnaden minimeras. För miniELIN: Det tillkommer ekvationer som beskriver den tillåtna utbyggnaden av kraftverk.
7. Namnger och definiera villkorsekvationer (constraints)
Exempelvis hur importen beror av genererad el, hur urladdning av batterier beror på tidigare uppladdning av dem etc.
8. Bygger upp modellen utifrån de punkter som definierats ovan.
9. Optimerar modellen med hänsyn till totalkostnader

B Resultat från enkäterna

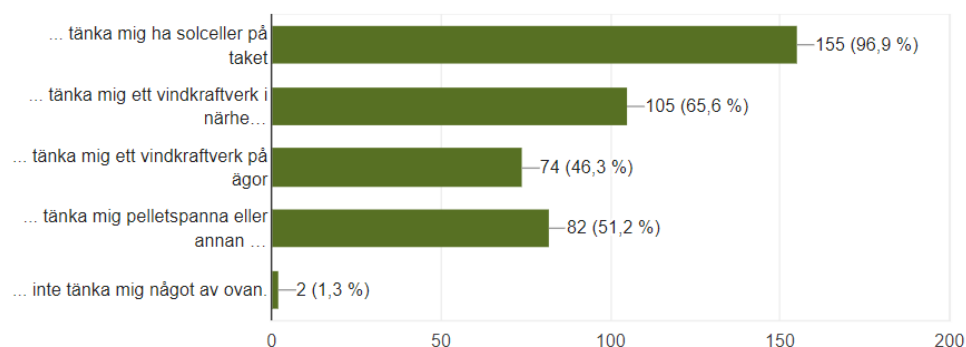
Tror du att Sverige kan gå runt på enbart förnyelsebar el? (dvs utan kärnkraft och fossila bränslen)

160 svar



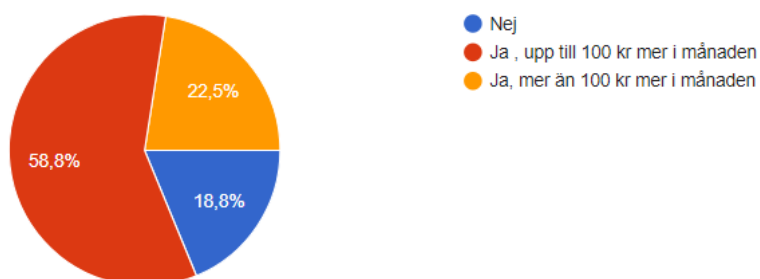
Kan du tänka dig att ha förnyelsebar energi på eller i närheten av dina ägor nu eller i framtiden? Jag kan...

160 svar



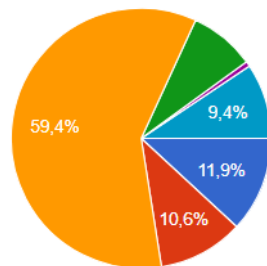
Kan du tänka dig att betala mer för att använda förnyelsebar energi

160 svar



Hade du velat veta hur många procent av olika energikällor bidrar till din el?

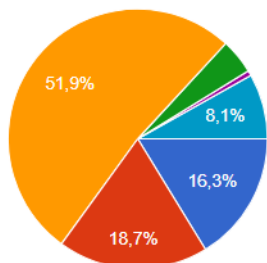
160 svar



- Ja, jag hade uppskattat informationen timvis.
- Ja, jag hade uppskattat informationen dagligen.
- Ja, jag hade uppskattat informationen varje månad.
- Ja, jag hade uppskattat informationen varje år.
- Nej, jag hade inte uppskattat inform...
- Nej, jag känner inget behov av infor...

Hade du velat veta ditt elpris kontinuerligt?

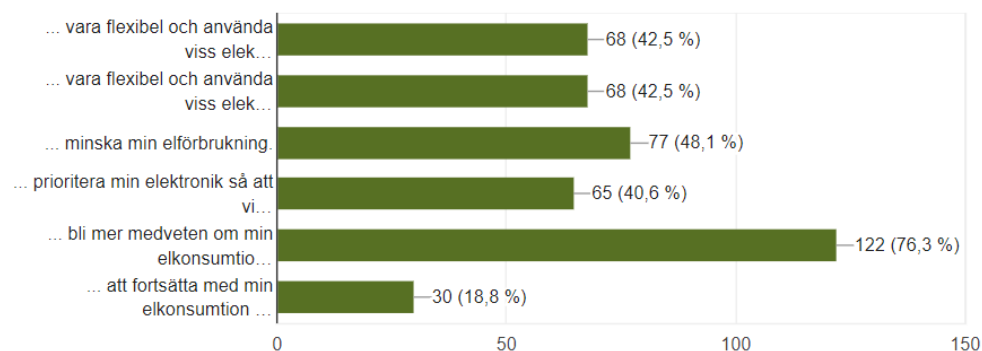
160 svar



- Ja, jag hade uppskattat informationen timvis.
- Ja, jag hade uppskattat informationen dagligen.
- Ja, jag hade uppskattat informationen varje månad.
- Ja, jag hade uppskattat informationen varje år.
- Nej, jag hade inte uppskattat inform...
- Nej, jag känner inget behov av infor...

Om jag hade fått information om elpris och ursprungskälla för el en gång i timmen, hade jag kunnat tänka mig...

160 svar



Jag tror att vi bör styras mot hållbar energi och vi har många energikällor i Sverige som användas. Jag tycker dock att vi borde fortsätta forska om framtida fussionskraft. (3)
För att vi behöver det (2)
Inte i nuläget men i framtiden tror jag det går, eller det måste ju gå eftersom vi inte har något val.
I Sverige finns det gott om naturresurser som vind, vattendrag och skogråvara för framställning av biobränslen. I Sverige är också, relativt sett, många medvetna om de problem som finns med dagens energisystem. Jag tror dock att det krävs ny teknik inom energilagring innan kärnkraften helt kan avvecklas.
Kärnkraft är en viktig energikälla för de enorma mängderna som krävs i industrierna.
Går gör det nog, om det går ekonomiskt är en annan femma.
Jag detta kommer vara möjligt inom en snar framtid men inte i dagsläget. Vi har stora utrymmen kvar i detta land där framtida vattenkraftverk, vindkraftparker och möjligen solceller kan drivas.
Sverige har stora outnyttjade ytor som kan användas för vindkraft och odling av råvaror för biogas/etanol. Dessutom, om vi sopsorterar ännu bättre än vi redan gör, kan vi nyttja våra organiska sopor som råvaror till biogas.
Jag tror det går men ekonomiskt är det inte lika hållbart som kärnkraft, och om man dessutom lyckas med lagring kan kärnkraft vara ett hållbart alternativ.
Inte nu men kanske om 30 år framåt i tiden. Vi är för beroende av det nu
Det finns inga lösningar idag som kan konkurrera med kärnkraften.
Det lär krävas en del men med tillräcklig budget, självklart. Angående frågan nedan är det ju olika nivåer av grön energi. Vindkraft är grönare än biobränsle från sopor, vattenkraft förstör vattendrag, solceller kan ha smutsig tillverkning osv..
Kärnkraft står för så stor del, för dåligt väder för solenergi.
Absolut, sen är det viktigt att komma ihåg att hela kedjan sällan blir helt fossilfri, t ex smörjmedel/fetter, konstruktionsmaterial osv till just vatten-/vindkraftverk. Så själva energin kanske är fossilfri men inte anläggningarna som gör den.
Kanske går i nuläget (vet ej) men energibehovet ökar hela tiden och mer och mer energi behövs för mer och mer triviala saker/ting/uppgifter i vardagen. Städer blir allt större och vi rör oss mer och mer på natten (mer ljus). Mer komplexa teknikprodukter (smartphone, datorer som alla personer i världen skall ha) kräver också mer och mer energi. Vatten är redan mättat i sverige, sol blir svårt eftersom det inte finns så många ställen i sverige där sol existerar på en daglig basis (moln osv). Kvar blir enbart vind (biomassa kanske men då behöver en del skog huggas ner, gillar inte tanken) så tror det är dumt att stänga dörrarna till kärnkraft. Inga fossila bränslen ja, men utan kärnkraft eller någon ny revolutionerande uppfinning så blir det högst problematiskt
Tekniken går snabbt framåt och det som inte är omöjligt är möjligt!
Kan Sverige ha en tillräckligt stabil elförsörjning utan Kärnkraft? Enligt en undersökning från KTH så är det möjligt men man måste bygga vattenkraftverk i Sveriges ännu orörda älvar. Ej så bra tycker jag. https://www.svd.se/klarar-sig-sverige-utan-karnkraft
Kärnkraft behövs för att täcka upp produktionsbortfall av el på vintern. Stor andel av vindkraft och solkraft skapar problem med matchningen mellan producerad och förbrukad el, producerad el måste vara lika med förbrukad annars blir det problem.
Jag tror på detta för att det är mitt projekt
Kärnkraft behövs
Inte just nu, för att kunna täcka energikonsumtionen skulle det kräva enorma utbyggnader
Krävar enorma infrastrukturförändringar, inte i dagsläget
Inte insatt på om vi kan just med teknologin idag men övertygad om det området fick mer forskning så kommer det gå
Vi har massor med skogsbruk som redan nu delvis används till biomassa. Detta kan säkert utökas. Vindkraft har också stor potential att byggas ut. (Vattenkraft är redan väldigt utbyggt, så det kanske inte är optimalt och solkraft är väldigt ineffektivt i sverige.) Om det blir billigare så är väl solkraft också bra.
Kärnkraft är ok
Enligt min uppfattning finns teknik för det men kostnad är en annan fråga.
Pga behovet av stabil energiproduktion, vilket intermittenta energikällor inte klarar av utan att installera lika stor effekt förbränningskraftverk. Elnätet idag klarar inte av att hantera plötsligt bortfall eller tillskott av energi. Dessutom krävs mycket större ytor per TWh, mycket underhåll, och dessutom kortare livslängd per enhet.
Kärnkraften står för stabil, konsekvent elförsörjning (base load). Om vi stänger ner kommer vi inte kunna ha så stabilt/säkert elnät som vi har (typ att vi har el 24/7)
Jag tror inte det finns nog med politiskt driv för att skapa ekonomiska styrmedel som möjliggör detta. Dessutom så är det troligtvis ineffektiv användning av resurser.
Täcker vattenkraften dropparna i vindel?
Delvis, beroende på vad man avser som grön el. Biobränsle från skogen och odlingar leder till minskad biologisk mångfald vilket inte känns miljömedvetet.
Inte till 2030 som idag är målet. Elbehovet i sverige kommer öka kraftigt i och med elbilar, IOT etc. Jag tror kärnkraften kommer behövas som bas istället för gas/olja.
Sverige har bra teknik och forskning. Någon gång i framtiden tror jag att det är möjligt
I teorin, ja. Men då behöver vi göra enorma investeringar i Sol, vind och vatten långt över vad vi har idag, och även bygga igen fler forsar i Sverige, vilket inte skulle accepteras idag. Fossila bränslen bör ej vara några enorma problem, kärnkraften som är svårt att helt ta bort.
kanske inte nu men i framtiden, vi har goda resurser för det
Vi måste sträva mot att ställa om till förnyelsebara elkällor och därför är det också något vi måste tro på
Min icke kvalificerade gissning är att i dagsläget är konventionella förnyelsebara elkällor som vindkraft, solkraft, vattenkraft inte tillräckligt kraftfulla i förhållande till de sociala och ekonomiska begränsningar som finns (e.g. oviljan att ha vindkraftverk överallt, kostnaden för att ha solpaneler på sitt tak)
Inte ännu. Omkostnaderna för att ersätta de befintliga energikällorna kommer bli för stora, inte bara i pengar. Miljöpåverkan osv.
Det måste vi göra eftersom fossila bränslen och kärnkraft är ohållbara

Jag tror utveckling av solceller kan bidra stort till att täcka energibehovet
Vi har bra förutsättningar för att bygga upp det som krävs (forsar, vind, ekonomi, teknologi etc)
Med ny utveckling tror jag att det kommer gå
Vi är bortskämda med möra förnyelsebara energikällor. Vind, vatten och sol räcket väldigt långt här.
Litet land till befolkning och yta, speciellt relationen mellan de. Extremt bred "grön"-tänk-kultur. Drivna och konsekventa människor
Med tillräcklig utbyggnad
Bra grund pga elen som i dagsläget utvinns ur vattenkraft.
Inte inom en snar framtid, Sverige har inte investerat tillräckligt i förnybara energikällorna. Tror att Sverige behöver en bas som idag består av kärnkraft.
Sverige, genom nordpool har potential att klara sig enbart på förnyelsebara energikällor genom effektiva och smarta system. Vind från främst Danmark och Tyskland utgör en stor potential. Om man därtill maximerar PVs och reglerar med vattenkraft från norr.
Vi kommer vara tvungna förr eller senare och det kommer antagligen uppenbara sig styrmedel mot mer grönt
Måste effektiviseras och materialen som vind/solkraftverk måste bli miljövänligare. Samt så måste kärnkraft accepteras som en grön energikälla
De förnyelsebara energikällorna kan utnyttjas till tillräckligt hög grad men i dagsläget tar det väldigt stor plats att ändra all energi till förnybar
Det enda taket som finns på att fortsätta investera i grön el är hur mycket vi förbrukar/när all fossil-el fasats ut.
För lite sol, för lite biomassa. Kärnkraft är just nu ett bra alternativ för Sverige
Lagring och back-up är idag och inom snar framtid inte ens i närheten av att tillfredsställa ett förnybart energinät på ett ekonomiskt hållbart sätt. Vårt nordiska klimat innebär också hög grad av driftstopp för solpaneler under vinterhalvåret.
då kärnkraft är en så stor del av dagens energiförsörjning har jag svårt att se hur den ska ersättas
Förnybart, vattenkraft och demand response
Vi kan inte ta ut så mycket energi från skogen och vindkraft står för en pytteliten del och de är mörkt halva året.
Det finns ingen bra alternativ som kan ersätta och producera samma mängd el
Tekniken finns redan. Den har i princip redan nått grid-parity. (Angående sista frågan, timvis rapportering hade mest stört mig, åtminstone om det är någon form av push-notis).För frågan om jag vill veta distributionen av energikällor så vet jag redan det, erbjuds redan av flera leverantörer.
Möjligheten finns kanske, men skulle vara dyrare :)
I dagsläget? Nej, då tror jag vi har en del utmaningar kvar vi måste besegra. Däremot tror jag att vi kommer kunna göra det i framtiden.
Det finns bra möjligheter att köpa/sälja el från grannländer
Inte i nuläget men snart! Om utvecklingen av det förnybara ökar
Klart det är möjligt. Men svårt att försöka ersätta kärnkraft och oljebaserade drivmedel utan mycket stora omställningar i energisektorn.
Problemet är en kostnadsfråga
Vi har bra möjligheter för vattenkraft (även om det kan diskuteras hur "grön" den egentligen är, men även för vindkraft.
Förnyelsebar energi som exempelvis vinkraft, vattenkraft eller solkraft kräver för stora arealer, genererar energi sporadiskt beroende på väderförhållanden eller har felaktig energiproduktion mot vårt behov. Ett bra exempel är att solkraft har väldigt dålig effekt under vintern då vi har extra stort energibehov.
Inte inom de närmaste åren, men vi får väl i dagsläget ca 40% från vatten, så med satsning på vind och sol så är det inte omöjligt
Vattenkraften kan inte expanderas mer utan att förstöra naturen mer än vi redan har gjort. Vind är inte jätteeffektivt och funkar bara vid vissa förhållanden. Solkraft funkar in princip bara på sommaren, vilket är då man inte behöver så mycket el. Biomassa tror jag inte kan tillgodose Sveriges energi behov
Jag tror att det är teoretiskt möjligt, men kräver fortsatta framsteg inom forskning kring sol, vind, och framförallt batterier för att kompensera för skiftande tillgång.
Vi har så många outnyttjade resurser. Exempelvis sol, som har ett så dåligt rykte i sverige. men med prisnedgång på solceller samtidigt som effekten ökar så kommer fossila bränslen att minska. I värsta fall så kommer fusion (inte kärnkraft xD) att lösa alla problem.
Vi har tekniken och vi ska va i framkant miljömässigt! Om inte så borde vi kunna det
Vattenkraft..skog o nya varianter
Vi är ett land med relativt liten befolkning och stor oberörd yta. Sol, vind och vatten möjligheter finns det gott om i Sverige!
Överkapaciteten som hade behövts gör det orimligt. Vidare anser jag att kärnkraft är vårt bästa alternativ för stabil och framtidssäker energiförsörjning fram till fusion löses.
För att energikraven är långt högre än förnyelsebar energi kan erbjuda. I dagsläget.
Tekniken utvecklas snabbt och tror att smarta lösningar som man vågar satsa på kommer göra det möjligt. Dock är det väl något som bör skraddarsys för varje land och dess naturtillgångar etc
kärnkraft good stuff
För att det finns möjlighet. Om regeringen subventionerar förnybar el och allt omkring så kan det praktiskt vara möjligt att genomföra. Det måste mycket till från många instanser för att skapa detta,men jag tror det är fullt möjligt.
Det krävs en stabil energikälla som inte påverkas av väder
Om viljan och motivationen finns så Why not? Handlar mkt om inställning och attityder!
Då behovet/levnadsstandarden är satt och folk påvisar att de inte vill ändra den i stora drag så kommer det inte att fungera. Dessutom skulle de elverk, som finns tillgängliga idag, ha en större negativ inverkan på naturen än vad t.ex. kärnkraft gör.
Om vi kan hitta nya kraftkällor.
Vi har för stort energibehov

Jag har forskat inom ämnet och det är möjligt.
Med effektivare teknik och utrustning där man kan ha större effektivitet funkar solkraft och vindkraft bra. Dock är det viktigt att tänka på att solkraft inte är en bra källa i Norra sverige under vinterhalvåret.
Vad händer på vinterhalvåret om vinden inte är kraftig. Ytterligare värmepumpar krävs för att täcka förfrågan idag, det kommer även krävas i ert samhälle
Kanske inte dagens läge, men när tekniken för förnyelsebar el har blivit mer effektiv.
Om vi vill ta konsekvenserna. Fler (fula) vindkraftverk och förstörda vattendrag i och med fler vattenverk. Solenergi har vi inte tillräckligt många soltimmar tror jag.
Inte med dagens teknik och elsystem (om vi inte vill ha kol och gas dvs, dock kan norra Sverige detta pga vattenkraft). Vi behöver baskraft för reglering av elnätet. Dock är gen 4 kärnreaktor troligen nödvändig för att hantera kärnavfall (kan använda kärnavfall som bränsle, samt resterna som bli över har en lagrings tid räknad i några 100år mot 100 000år). Dock behövs ny teknologi för att energi produktionen ska bli förnybar.
Säkert tekniskt möjligt om man förbiser ekonomi.
Satsar man bara tillräckligt mycket så är det klart att det går. Sen om det är det bästa sättet låter jag vara osagt
Mest för att vi behöver göra det, tror att FN kommer sätta högre mål för utsläpp av fossila bränslen och användning av kärnkraft så tror att det kommer gå och Att vi måste det i framtidssyfte
förnybar är lika bra som fossil aå det måste gå
Tekniken finns, är mestadels viljan som saknas
Biobränsle kan ännu ej fullt ut konkurrera ut kärnkraften, kärnkraftverk är perfekta bortsett från avfallet vilket det jobbas med mycket i gen IV kärnkraftsreaktorer
https://xkcd.com/1162/
Så mycket öppna landskap och vattendrag, vilket gör att vi kan utöka vår vindkraftspark mycket samt vattenkraften. Dessutom skulle stora investeringar i solkraft kunna göras. Om hus- och tomtägare får bidrag från staten för att investera i egna små vindkraftverk och solkraft, och om det är lätt att sälja den energi som man inte gör sig av med, så skulle många privatpersoner nog bli självförsörjande.
Inte genom utökad biomassa förbränning iaf
Ärligt talat jag är inte så inläst i ämnet men med det jag vet så är förnyelsebara alternativ alla baserade på osäkra källor av energi. Vad jag menar är att det piskblåser nog inte varje dag eller? Vattenkraft är inte starkt nog och solkraft finns det inte effektiva solceller idag och vi bor i Sverige lol... Vart är solen? Biomassa ända bra källan av dem och även den kan ta slut. Jag menar man höjer inte netto av kol i kretslopp men när man bränner biomassa höjer man netto koldioxiden i atmosfären ändå.
Övrigt (3)