



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Ödrift av sportfastigheter – I samarbete med Sportfastigheter AB

*Energy Self-sufficient Sportfacilities
– In collaboration with Sportfastigheter AB*

Waldemar Andersson, Erik Backlund, Johan Maier, Oskar Söderberg,
Henrik Traneus, Qiancheng Yu, Maximilian Jatzkowski

Kandidatuppsats i teknik

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

Examensarbete 2021:11
ISSN 1654-9392
Uppsala 2021

Ödrift av sportfastigheter – I samarbete med Sportfastigheter AB

Energy Self-sufficient Sportfacilities – In collaboration with Sportfastigheter AB

*Waldemar Andersson, Erik Backlund, Johan Maier, Oskar Söderberg,
Henrik Traneus, Qiancheng Yu, Maximilian Jatzkowski*

Handledare: Sven Smårs, institutionen för energi och teknik, SLU

Examinator: David Ljungberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 15 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Grundnivå, G2E, teknik

Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem

Kurskod: EX0946

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Kursansvarig institution: energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2021

Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)

Delnummer i serien: 2021:11

ISSN: 1654-9392

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Biobränsle, bränslekvalitet, substansförluster, fukthalt, data analys, lagring

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Läs om SLU:s publiceringsavtal här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

1 Abstract

Self-sufficient energy systems have been established as a local solution to the global increase in energy demand. This project, in collaboration with Sportfastigheter AB, aims to investigate the potential for energy self-sufficiency of sports facilities within Uppsala kommun. Three facilities were chosen: Bälinge IP, Ekebyvallen IP and Sunnersta IP. A comprehensive study was conducted for Bälinge IP, which included data collection, model building in Matlab, simulation and analysis combined with a brief economic analysis. More streamlined studies were carried out for Ekebyvallen and Sunnersta IP.

Three different cases were proposed. Case 1 aims to establish net self-sufficiency over a year for a chosen facility within a budget of 500 000 SEK. Case 2 aims to establish net self-sufficiency for a chosen facility exceeding a budget of 500 000 SEK but within reason; and case 3 aims to make the chosen facility entirely self-sufficient, to an extent where it could be decoupled from the grid and still function at capacity year-round. Case 3 is approached with no budgetary limitations. For case 1 & 2 established technologies such as photovoltaic cells and geothermal heat pumps were utilized, whereas case 3 also included more recent technological advancements within insulation, heat recycling and hydrogen fuel cell technology.

The report concludes that achieving net self-sufficiency is possible within the budget limit for cases 1 & 2, and complete self-sufficiency is possible albeit expensive for case 3. Due to the geographical and climatological limitations in Sweden self-sufficiency is difficult to achieve without substantially increasing the capital investment.

Innehållsförteckning

1	Abstract	1
2	Introduktion	3
3	Syfte	3
4	Metod	4
4.1	Datasök	4
4.1.1	Potential och val av anläggning	4
4.1.2	Databaser	4
4.1.3	PV-paneler och växelriktare	5
4.1.4	Bränsleceller	5
4.1.5	Isolering	5
4.1.6	Energifönster	6
4.1.7	Värmebehov	6
4.1.8	Ventilation och varmvattenåtervinning	6
4.1.9	Reglering	7
4.1.10	Batterilagring	7
4.2	Miljö och etiska perspektiv	7
4.3	Modellbygge	8
5	Resultat	9
5.1	Bälinge	9
5.1.1	Case 1	9
5.1.2	Case 2	10
5.1.3	Case 3	12
5.2	Ekebyvallen och Sunnersta IP case 1	13
5.3	Sammanfattning av data från olika case	14
5.4	Känslighetsanalys	14
6	Diskussion och slutsatser	15
6.1	Case och anläggningar	15
6.2	Energibesparingsåtgärder och ekonomisk analys	15
6.2.1	Bergvärme och batteri	15
6.2.2	Till- och frånluftssystem med värmeväxlare och fönster	16
6.2.3	Isolering	16
6.2.4	Varmvattenåtervinning	16
6.2.5	PV-paneler och växelriktare	16
6.3	Vidarearbete och modellförbättringar	17
6.4	Känslighetsanalys	17
6.5	Felkällor	17
6.6	Slutsatser	18
7	Referenser	19

2 Introduktion

Inom energisektorn idag finns det många olika utmaningar, som utbyggnad och effektivisering av elnätet, den ökande elektrifieringen inom många sektorer samt omställningen till förnybara energikällor (IEA 2020). Ett sätt att lösa de globala- och nationella utmaningarna är att investera i lokala lösningar. Lokala lösningar kan på en global skala göra stor skillnad där framtida ingenjörer kommer att förbättra och implementera nya energibesparande åtgärder i lokala energisystem. En sådan lokal åtgärd är att göra byggnader, anläggningar eller hela system självförsörjande, vilket i denna rapport benämns ödrift.

Ödrift är ett koncept som innebär att ett system helt och hållet är självförsörjande på energi, och kan vara frånkopplat från elnätet och värmenätet utan att drift och användning påverkas. Ödrift har blivit en alltmer populär lösning, speciellt för anläggningar som ligger långt ifrån städer och dess fjärrvärmenät. Genom att konvertera anläggningar som har stora energibehov till ödrift, kan man aktivt bidra till att lösa stora problem på samhällsnivå, utan att drastiskt ändra på livskvalitet eller individens vanor.

För att utvärdera potentialen för ödrift, kommer det i detta kandidatarbete presenteras en undersökning, på uppdrag av Sportfastigheter AB i samarbete med STUNS energi som handledare och konsult. Undersökningen går ut på att utforska tekniker som gör ödrift möjligt, implementera dem i en modell för en sportanläggning och redogöra för hur ödrift kan åstadkommas både med dagens och morgondagens tekniker. Sportanläggningar är en typ av anläggning som generellt har stora energibehov och samtidigt är en samhällsnyttjad typ av anläggning. Därför är det lämpligt att undersöka implementeringen av ödrift och övriga energibesparande åtgärder.

3 Syfte

Beställaren av projektet, Sportfastigheter AB, har en vision att vara vägledande inom utvecklingen av hållbara idrotts- och rekreationsanläggningar (Sportfastigheter 2021). Målet med detta arbete är att ta fram en handlingsplan för att skapa bolagets första självförsörjande anläggning, en anläggning med minskat beroende av omgivande energisystem. På Sportfastigheter AB finns en medvetenhet om att det är ett ambitiöst mål och har beställt denna rapport och undersökning i syfte att studera hur och om ödrift kan implementeras. Tekniska, ekonomiska, miljömässiga och etiska begränsande faktorer utreds för att skapa en helhetsbild av potentialen för ödrift. Undersökningen genomförs på tre olika befintliga rekreationsanläggningar: Bälinge IP, Ekebyvallen och Sunnersta IP. Sportfastigheter AB är också intresserade av vilka energibesparande åtgärder en anläggning skulle behöva för att uppnå nettoproduktion över ett år, alltså att anläggningen sett över ett år producerar mer energi än vad den förbrukar. Med Sportfastigheter ABs godkännande fokuserar undersökningen i huvudsak på Bälinge IP och utför mindre analyser av ödrift-potentialen för Ekebyvallen och Sunnersta IP.

Ramverket för undersökningen är att ta fram underlag för konkreta förslag inklusive produkter, miljöaspekter och etiska perspektiv. Resultatet av undersökningen är tänkt att delvis användas som beslutsunderlag till Sportfastigheter AB och dels som inspiration för framtida anläggningar. Med detta finns även ekonomiska riktlinjer som bör uppfyllas där case 1 ska uppnå nettoproduktion under 500 000 kr, case 2 strax över 500 000 kr men med lägre energiförbrukning och högre miljö- och hållbarhetskrav, samt slutligen case 3 där året-runt ödrift ska uppnås oavsett kostnad. För Bälinge IP undersöks samtliga tre case medan Ekebyvallen och Sunnersta IP enbart studeras med avseende på case 1.

Kortfattat kan syftet sammanfattas som:

1. Utforska olika tekniker och komponenter som gör ödrift möjligt.
2. Bygga en modell av en vald sportanläggning som inkluderar valda tekniker och komponenter.
3. Köra och optimera modellen för att åstadkomma ödrift.
4. Lägga fram en plan med olika scenarior för att uppnå nettoproduktion eller ödrift.

4 Metod

4.1 Datasök

4.1.1 Potential och val av anläggning

I samråd med Sportfastigheter AB besökte projektgruppen ett antal olika anläggningar. Efter fysiska besök på respektive anläggning och bedömning av potentialen sett till energisparande åtgärder och möjlighet till lokal energiproduktion valdes tre olika sportanläggningar. Bälunge IP valdes till huvudfokus i undersökningen eftersom anläggningen ansågs ha störst potential. Sekundära anläggningar valdes Ekebyvallen och Sunnersta IP. (Rapport - Studiebesök)

Bedömningen grundade sig i att samtliga fönster på anläggningen är tvåglasfönster samt att anläggningen värms genom radiatorer vars värmekrets i sin tur värms av direktverkande elektrisk energi och likaså tappvarmvatten. Byggnadernas tak har stora areor med fördelaktiga sydliga sollägen utan risk för skuggning, vilket lämpar sig väl för energiproduktion (Rapport - Sammanfattade Antaganden). Sammanfattningsvis sågs potentialen att hitta kostnadseffektiva energibesparande lösningar till Bälunge IP som god, givet de observerade och givna förutsättningarna.

4.1.2 Databaser

För att verklighetsföranvända modellen beslutades det tidigt att söka dataset från databaser med uppmätt data. Viktiga dataset för modellen är timvisa utomhustemperaturdata, solinstrålningsdata och energiförbrukningsdata för respektive anläggning. Dessa tre timvisa serier har stor betydelse för modellen och följaktligen resultatet. Efter diskussion med beställaren beslutas det att dataset från år 2019 skulle användas, eftersom energikonsumtion och användning ej antas vara representativt av verkligheten sedan början av år 2020 som följd av coronapandemin (Rapport - Sammanfattade Antaganden).

För den timvisa utomhustemperaturdatan användes SMHIs mätstation vid Ärna flygplats i Uppsala under år 2019 som referens (SMHI 2021a). Mätserien innehöll ett fåtal dataluckor som manuellt fylldes i baserat på mönster i omkringliggande timvisa temperaturerna. Mätstationen på Ärna flygplats var den geografiskt närmsta aktiva mätstation till samtliga anläggningar (SMHI 2021a).

Den andra viktiga serien i modellen är timvis solinstrålningsdata. Det är viktigt att ha både utomhustemperatur- och solinstrålningsdata från liknande geografiska platser och år, då temperaturen är beroende av solinstrålning. Närmaste mätstationen för solinstrålning sett från Uppsala under år 2019 var placerad i centrala Stockholm (SMHI 2021b). Även om Stockholm och Uppsala är geografiskt nära, anses det skilja i mängden solinstrålning per år och dess intensitet till följd av olika latituder. Följaktligen beslutades det att använda SMHIs simuleringstjänst STRÅNG för solinstrålningen, som baserat på givna koordinater beräknar timvis solinstrålning på en specifik plats i Sverige. Beräkningarna baserar sig på kännedom om bl.a. molnens, vattenångans och ozonets geografiska fördelning. STRÅNG ger den genomsnittliga instrålningsintensiteten, W/m^2 , per timme under ett år och detta kunde direkt användas i den egna framtagna modellen utan att korrigeras. Både global och diffus solinstrålningsdata hämtades från STRÅNG (SMHI 2021c).

Den tredje viktiga serien är den timvisa totala energiförbrukningen för den undersökta anläggningen. Efter att ha kommunicerat mycket med diverse parter beslutades det att mätserien för Bälunge IP skulle approximeras, till följd av administrativa svårigheter att få tillgång till den verkliga energiförbrukningen. Syftet med energiförbrukningen var att använda serien som referens för att modellanpassa approximerade parametrar i modellen för att närmare efterlikna verkligheten. Lösningen var att approximera mätserien för Bälunge IP genom att använda en liknande anläggning, Vattholma IP, där energiförbrukningsdata var tillgänglig hos Sportfastigheter ABs energileverantör Vattenfall (Vattenfall 2021). Approximationen utfördes genom att en skalningsfaktor mellan Bälunge IP och Vattholma IP beräknades, genom att respektive anläggningarnas golvareor jämfördes. De två anläggningarna har lika antal omklädningsrum och liknande planlösning, vidare antas båda ha direktverkande elektrisk energi som värmesystem. Skalningen utfördes med ekvation 1.

$$A_{\text{faktor}} = \frac{A_{\text{Bälinge}}}{A_{\text{Vattholma}}} \quad (1)$$

Hur skalningen genomfördes diskuterades i samråd med beställaren för att säkerställa att de godkände storleken av approximationen (Rapport - Sammanfattade Antaganden).

4.1.3 PV-paneler och växelriktare

För att uppnå nettoproduktion eller ödrift gäller det att en anläggnings elektrisk energiproducerande komponenter producerar lika mycket elektrisk energi som förbrukas. I denna modell används monokristallina photovoltaic-paneler (PV-paneler), monterade externt på respektive byggnads tak som omvandlar inkommande solinstrålning till likström, DC. Några av fördelarna med PV-paneler jämfört med soltak är att har PV-paneler högre verkningsgrad samt, både för soltak och småskaliga vindturbiner, är PV-paneler billigare och enklare att installera. Mer detaljer kring för- och nackdelar med PV-paneler finns att läsa i den framtagna rapporten om elektrisk energiproduktion. (Rapport - Elektrisk energiproduktion).

Tre olika typer av PV-paneler används i modellen med olika tillverkare, verkningsgrad och prisklass. I modellens olika case används olika paneler med olika effektivitet. De tre olika PV-paneltyperna kostar mycket att installera och återfinns i respektive case baserat på storleken av budgeten. Likaså är storleken på PV-anläggningen för casen olika stor beroende på mängden elektrisk energi som måste produceras för att nå nettoproduktion över ett år. (Rapport - Elektrisk energiproduktion)

Efter att DC producerats från PV-panelerna konverteras strömmen till växelström, AC, i fas med elnätet, för att kunna säljas och användas parallellt i anläggningen med elektrisk energi från elnätet. Till detta krävs en växelriktare. Likt PV-panelerna används olika växelriktare beroende på case och storlek av PV-anläggningen. För större PV-anläggning krävs en växelriktare med högre tillåten maxeffekt. (Rapport - Elektrisk energiproduktion)

4.1.4 Bränsleceller

Bränsleceller gör det möjligt att utnyttja lagrad energi i form av vätgas. Vätgas produceras i anläggningen då PV-panelerna producerar ett överskott genom elektrolys, främst under sommarmånaderna. Elektrolys är en elektrokemisk reaktion som i detta fall spjälkar vatten till vätgas och syrgas. Den vanligaste metoden för elektrolys är alkalisk elektrolys, AEL. AEL är dessutom den billigaste metoden och typiskt behöver elektrolysörer 4.5-6.0 kWh elektrisk energi för att producera 1 Nm³ vätgas, där enheten är normal kubikmeter. Elektrolysörer har en verkningsgrad mellan 65-80 % vid omvandling av elektrisk energi till vätgaslagring. Tanken i undersökningen är att i case 3 lagra den producerade vätgasen tills då PV-panelerna producerar mindre än elektriska energibehovet. Detta är oftast fallet under nätter och vinterhalvåret. Vätgasen i bränslecellerna används då för att producera elektrisk energi. Ett bränslecellssystem med vätgaslagring är bara relevant för case 3 då tekniken är mycket dyr, uppåt mångmiljonbelopp. (Rapport - Bränsleceller)

Bränsleceller fungerar genom att ett bränsle, i det här fallet vätgas, och ett oxidationsmedel reagerar och konverterar kemisk energi till elektrisk energi. Undersökningen har valt att använda en alkalisk bränslecell samt att utnyttja värmeåtervinning för att förbättra verkningsgraden som då blir cirka 80 procent. Man bör seriekoppla flera bränsleceller för att komma upp i önskad effekt då bränsleceller ger en spänning på ca 0.7-1.0 volt. En PEM (polymer electrolyte membrane) bränslecell med effekten 100 kW kostar 2.25 Mkr. Investeringskostnaden för en installerad och driftsatt alkalisk elektrolysör med kapacitet 60 Nm³/h är ungefär 4.7 Mkr. Dessa kostnader ligger alltså till grund för varför ett bränslecellssystem endast är motiverat i case 3. (Rapport - Bränsleceller).

4.1.5 Isolering

När det kommer till isolering i en byggnad är syftet att minska förlusterna genom husets klimatskal och på det sättet minska det totala uppvärmingsbehovet. De två egenskaper som avgör hur välisolerande ett material uppskattas vara är dess tjocklek och värmekonduktivitet. Värmekonduktiviteten är ett mått på hur väl ett material leder värme. Målet med ett isolermaterial är att det ska ha så lågt värde som möjligt då det begränsar värmens

transport. Idag finns rekommenderade värden på klimatskalets isolering för att minska energiförlusterna från nybyggda hus. I takt med ökande energipriser och miljömedvetenhet samt framsteg inom energieffektivisering har de rekommenderade värdena höjts. (Rapport - Isolering och Material)

Flera olika isoleringsmaterial har undersökts, både konventionella material och superisolerande material. Vad det gäller konventionella material har mineralull valts, som idag är bland det vanligaste förekommande materialet i nybyggnationer. Vad gäller det superisolerande material har vakuumisolerad paneler, VIP, valts och är en värmeisolering som består av ett gastätt hölje som omger en stel kärna med vakuum. Viktigt att poängtera är att VIP är ett relativt obeprövat material inom byggsektorn. Med tiden kommer alla isoleringsmaterial att försämrats och dess värmekonditivitet öka till följd av interaktioner med andra komponenter i byggnaden, samt är förekomsten av fukt ofrånkomligt. Mer om valda produkter och dess egenskaper finns att läsa i bifogad rapport (Rapport - Isolering och Material).

Flera antaganden har gjorts för att kunna tillämpa materialet i modellen samt i den ekonomiska analysen. U-värdet är en materialegenskap som visar hur väl en byggnadsdel isolerar, baserat på värmekonditiviteten och tjockleken. De U-värden som finns i den befintliga byggnaden har uppskattats och sedan tillämpats i modellen i kombination med eventuell tilläggsisolering. För det vakuumisolerade materialet så används samma typ av panel på golv, tak och vägg då det endast är vad som är teoretiskt möjligt och produkterna inte är etablerade på marknaden (Rapport - Sammanfattade Antaganden).

4.1.6 Energifönster

Förutom väggar, tak och golv utgörs byggnaders klimatskal av inglasade delar såsom fönster. Eftersom tjockleken hos fönster är mindre än övriga delar av klimatskalet står de för upp till en tredjedel av byggnaders värmeförluster. Äldre fönster har normalt 2-glas med U-värde kring 3.0. Dagens energifönster har U-värden ≤ 1.2 och kan minska energiförluster med 60 % - 77 %. Energifönster säljs som färdiga moduler som efter initial investeringskostnad passivt medför minskat uppvärmningsbehov under åtminstone 20 år. (Rapport - Isolering och Material)

4.1.7 Värmebehov

Värmepumpar fungerar allmänt genom att använda temperaturskillnader i luften eller marken för att värma upp ett arbetsmedium, såsom luft eller vatten. En bergvärmepump, till exempel, använder den solvärme som har fångats upp i berggrunden för att skapa en temperaturskillnad, som i slutändan värmer vatten och ger varmvatten i huset (Rapport - Bergvärme). En bergvärmepump har en hög verkningsgrad och minskar energibehovet hos ett hus eller en anläggning drastiskt. Den är dessutom en av de absolut bästa investeringarna utifrån ett energiperspektiv (Energispararen 2016). Bergvärmepumpen är även den mest gynnsamma typ av värmepump för en sportanläggning, eftersom det största energibehovet i anläggningen är varmvatten till duscharna i omklädningsrummen (Rapport - Bergvärme).

4.1.8 Ventilation och varmvattenåtervinning

För att öka möjligheten för ödrift är en viktig del att minska energibehovet. Det medför energieffektivisering på alla möjliga vis. Värmeförluster genom ventilation kan uppgå till en fjärdedel av den tillförda energin för flerbostadsbyggnader. Genom att installera fläktstyrda från- och tilluftsystem med värmeväxlare, FTX-system, kan ventilationsförluster minska med upp till 80 % samtidigt som luftkvaliteten i byggnaden ökar. På liknande sätt kan system installeras för att minska värmeförluster genom avloppsvatten, även kallat gråvatten. Varmvattenvärmeväxlare, DWHR-system, kan minska uppvärmningsbehovet för varmvatten med upp till 40 %. (Rapport - Ventilation och Värmeåtervinning)

4.1.9 Reglering

En relevant åtgärd men som inte implementerats i undersökningen är att implementera reglage som kan reglera ljusstyrkan och olika sensorsystem till anläggningarnas belysningsarmaturer. De olika sensorsystemen är, med ökande energibesparingspotential; närvarostyrning, frånvarostyrning, dagsljusstyrning samt dagsljusstyrning i kombination med närvaro eller frånvarostyrning. De olika systemen passar olika bra i olika miljöer, mer om det finns i bifogad rapport om ämnet (Rapport - Reglering). Tidsmässigt fanns det inte förutsättningarna att inkludera regleringen i undersökningen, men detta är något som är en framtida åtgärd för energibesparing.

Ytterligare relevant åtgärd är att undersöka hur inomhustemperaturen styr vattentemperaturen i radiatorerna och uppvärmingen. Vanligen regleras radiatortemperaturen av givare på fasaden eller inomhus, men det går att kombinera dessa två metoder för större energibesparingar. (Rapport - Reglering).

4.1.10 Batterilagring

Den mest etablerade lagringstekniken för elektrisk energi är batterier. Bland de olika batteriteknikerna är det litiumjonbatteriet som är mest kostnadseffektivt och är därför valt i denna undersökning. Litiumteknik har oftast högre kostnad men den har också bättre urladdningsdjup, mängden batteriet kan laddas ut utan att ta skada, livslängd samt round-trip efficiency, ett mått på hur mycket effektiv elektrisk energi man kan få ut från batteriet. Om batteriet har en kapacitet på 5 kWh och endast levererar 4 kWh effektivt så är round-trip efficiency på 80 %. Av de produkter som undersökts har Luna 2000-10-SO valts för alla case baserat på dess prestanda och kostnad. Billigare alternativ är uteslutna på grund av kostnadsineffektivitet. (Rapport - Batteri)

Flertalet antaganden har gjorts för att kunna implementera batterier i modellen. Exempelvis antas batteriet kunna bemöta alla typer av elektriska energibehov oavsett om batteriet kan leverera tillräcklig effekt eller inte. Modellen antar att batteriet har en tillräcklig effekt för att möta behovet, förutsatt att tillräcklig laddning finns. Batteriet antas även kunna lagra all överproduktion under en timme till sin maxkapacitet, det vill säga om det blir överproduktion på 5 kWh från PV-paneler vid en given tid på ett dygn, kommer batteriet lagra denna mängd inom en timme. Mer om de tekniska antaganden om batteriet kan observeras under den externa rapporten om energiproduktion (Rapport - Sammanfattade Antaganden).

Batteriet i modellen är implementerad så att den är kopplad till elektriska energiproduktionen från PV-paneler. Om energibehovet överskrider det som produceras av PV-paneler kommer batteriet laddas ur för att möta behovet. Vid överproduktion från PV-paneler jämfört med energibehovet laddas batteriet. Om lagringskapaciteten är full antas det att överskottet av elektriska energin säljs till elnätet. I situationer där behovet inte kan täckas av batterilagring kommer elektrisk energi köpas från nätet.

4.2 Miljö och etiska perspektiv

För att ge Sportfastigheter AB insikt och beslutsunderlag i miljömässiga och etiska perspektiv kopplade till föreslagna förbättringsåtgärder, har det genomförts en informationssamlade studie (Rapport - Miljö och etiska perspektiv). Förbättringsåtgärdernas koppling till de tre hållbarhetsdimensionerna ekologisk, social och ekonomisk inom hållbar utveckling har undersökts. Miljöaspekter såsom kemikalieutsläpp, energianvändning, växthusgasutsläpp, ursprungsland, transportbehov och humantoxiska effekter analyseras bland annat genom studier av livscykelanalyser. Etiska aspekter inklusive arbetsförhållanden, konsekvenser på lokal och global nivå från utvinning av råvaror, etiska dilemman, vattenkonkurrens för lokalbefolkningen och skillnader i arbetsslagstiftning i olika länder undersöks. Undersökningen visar exempelvis att stora brister ofta förekommer såväl miljömässigt som etiskt vid råvaruframställning i utvecklingsländer (Rapport - Miljö och etiska perspektiv). Litium och kobolt, två essentiella komponenter i moderna batterier, produceras i stor utsträckning i utvecklingsländer och kan medföra mycket stor negativ påverkan på lokala befolkningar och ekosystem vid utvinning. PV-paneler som produceras i Europa är bättre ur klimat- och etiskt perspektiv än PV-paneler producerade i Kina eller Mexiko. Sammanfattningsvis visade undersökningen att närproducerade lösningar med transparenta råvaru- och arbetsförutsättningar är att föredra för att kunna göra hållbara investeringar (ibid.). Resultaten kan användas som vägledning för Sportfastigheter AB för att som företag göra etiskt och miljömässigt hållbara val vilket ligger till grund för deras vision (Sportfastigheter 2021).

4.3 Modellbygge

Efter att ha besökt anläggningarna och genomfört datainsamlingen konstruerades en numerisk modell i Matlab, delvis baserad på en existerande modell som projektgruppen stött på tidigare från en kurs vid Uppsala Universitet i Urbana- och decentraliserade energisystem (UUBM 2021). Modellen kan hittas bifogad, se Referenser. Modellanpassning genomfördes med hjälp av resultaten från datainsamlingen och inkluderade användning av byggnadsspecifika egenskaper, energideklarationer och den energidata som hämtats. De olika energibesparingsåtgärderna implementerades som moduler och användes för att simulera påverkan av förändrade driftförhållanden. Ett flödesschema över modulerna finns bifogad, se (Flödesschema modell). Se tabell 1 för åtgärder för respektive case och anläggning. Modulerna och det modellanpassade systemet kopplades ihop med hjälp av ett huvudskript där parameteroptimering genomfördes.

Huvudskriptet specificerar vilken anläggning och vilket scenario som önskas simuleras. Modellen består av två huvuddelar där den ena fokuserar på värmebehovet hos anläggningen och den andra på produktion och energilagring. Värmedelen av modellen använder geometriska data och befintliga U-värden hos byggnadens klimatskal. Parameteroptimering används för att approximera anläggningsspecifika U-värden som används och justeras i enlighet med gjorda antaganden samt med externa uppmätta data. Detta i kombination med energiförluster från olika byggnadsdelar samt ventilation och energivinster från bland annat restvärme från elektriska apparater. I värmedelen av modellen bestämdes huruvida tekniska system som värmeväxlare och FTX-system tillämpas eller ej. Produktion och lagringsdelen tar hänsyn till produktionen från PV-systemet och balansen mellan lagring och elnät. I delen bestäms också, baserat på case, huruvida lagringsalternativen batterier eller bränsleceller ska tillämpas. Från timvis data för produktionen och lagringen av elektricitet kan slutsatser dras hur mycket anläggningen köper eller säljer till elnätet.

Som tidigare nämnt under avsnitt 4.1.1 har den timvisa energiförbrukningen för Bälinge IP approximerats med den timvisa energiförbrukningen från Vattholma IP. Denna energiförbrukning används huvudsakligen för att skapa en referensnivå i modellen för Bälinge IP utan någon form av tillämpade åtgärder. Liknande bedömningar gjordes för Ekebyvallen och Sunnersta IP för att skapa en referens med syftet att enklare presentera potential hos de tidigare nämnda åtgärderna. På så sätt kan varje enskild lösning implementeras i form av moduler där det med enkelhet går att koppla på eller koppla av. Detta ger en lättanvänd modell som effektivt kan visa hur mycket varje åtgärd bidrar till att minska energiförbrukningen hos anläggningen. Konkreta förbättringar observeras under avsnitt 5 resultat. Vilka energibesparingsåtgärder som applicerades i modelleringen för olika case och anläggning sammanfattas i tabell 1.

Tabell 1: Förbättringsåtgärder till olika scenarior för olika anläggningar

Förbättringsåtgärder	Case 1-3 Bälinge IP			Case 1 Ekebyvallen	Case 1 Sunnersta IP
Bergvärmepump	ja	ja	ja	ja	ja
PV-paneler + växelriktare	ja	ja	ja	ja	ja
Batteri	nej	ja	nej	ja	ja
Varmvattenåtervinning	ja	ja	ja	ja	ja
FTX-system	nej	ja	ja	ja	ja
Nya energifönster	nej	ja	ja	nej	nej
Tilläggsisolering	nej	ja	ja	nej	nej
Bränsleceller	nej	nej	ja	nej	nej

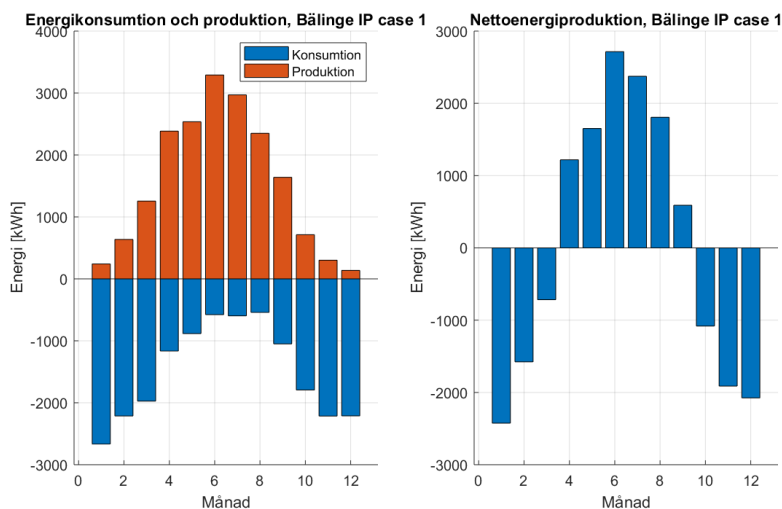
Anledningarna till att olika åtgärder appliceras i olika case i tabell 1 är till följd av ekonomiska begränsningar samt att i case 3 så förekommer bränsleceller som utesluter behovet av ett batteri i modellen.

5 Resultat

5.1 Bälinge

5.1.1 Case 1

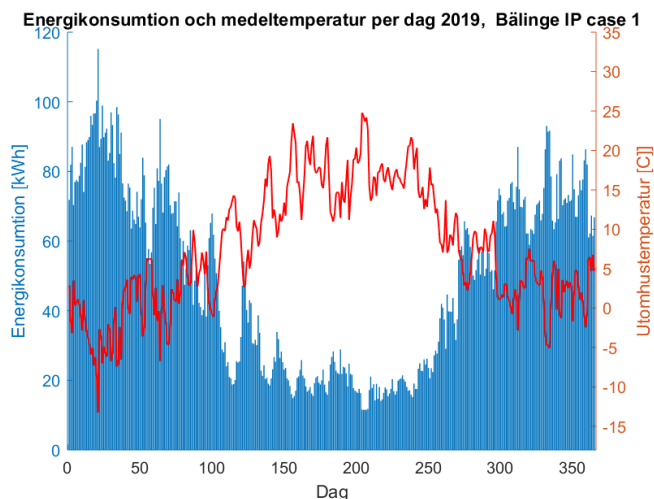
I syfte att undersöka mängden energi som konsumerats och producerats av Bälinge IP i case 1, kördes modellen med energibesparingsåtgärderna för case 1 enligt tabell 1. Resultaten av körningen från modellen är på timbasis och summeras så att de kan uttryckas per månad istället, vilket kan ses i figur 1.



Figur 1: Elektriska energiproduktionen och konsumtionen under år 2019. Vänstra figuren illustrerar storleksordningen av produktion och konsumtion. Högra figuren beskriver nettoproduktionen per månad för Bälinge case 1.

I figur 1 representerar den vänstra grafen elektriska energiproduktionen och konsumtion då samtliga åtgärder för case 1 är applicerade från tabell 1. Den högra visar nettoproduktionen per månad och mängden elektrisk energi som kan säljas till elnätet. Då värdena är positiva producerar anläggningen mer elektrisk energi per månad än den konsumerar och därmed kan elektrisk energi säljas. Negativa värden innebär underproduktion och att elektrisk energi måste köpas från elnätet till anläggningen. För summering av de siffervärden som användes till figur 1, se tabell 5.

För att illustrera hur elektriska energikonsumtionen beror på utomhustemperaturen plottas dessa tillsammans i figur 2. Observera att utomhustemperaturen i figur 2 är dygnsmedeltemperaturen mätt under år 2019.



Figur 2: Elektriska energikonsumtionen och utetemperaturer för Bälinge, case 1.

Utifrån figur 2 går det tydligt att utläsa hur energibehovet av anläggningen är beroende av utomhustemperaturen. Då utomhustemperaturen är låg är energiförbrukningen hög och vice versa. Observera att sommartid när utomhustemperaturen är högre än inomhustemperaturen bör det enligt termodynamikens lagar inte finnas något värmebehov utan det borde snarare behövas kylning av anläggningen. I modellen har dock ingen kylning tagits hänsyn till och energibehovet sett till uppvärmning av rum är satt till noll. Kvarvarande energibehov består av värmebehov till tappvarmvatten som enligt modellen är oberoende av utomhustemperaturen.

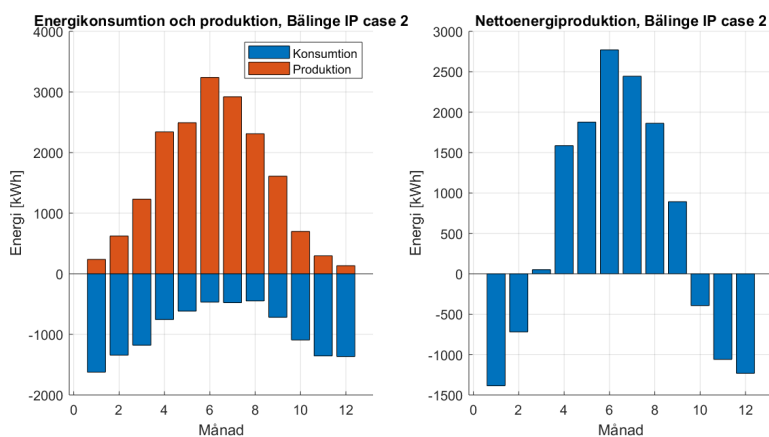
Tabell 2: Kostnadsberäkning för Bälinge case 1 med en budget på 500 000 kr.

Bälinge case 1				
Förbättringsåtgärder	Kostnad initialt (kr)	Livslängd komponent (år)	Produktgaranti (år)	Kostnad 25 år (kr)
Bergvärme	170 000	25		170 000
Solceller (55 st)	208 000	30		208 000
Växelriktare	26 000		12	52 000
Varmvattenåtervinning	35 000	35		35 000
Totalt:	439 000			465 000

Tabellen ovan gällande kostnadsberäkning till case 1 är endast en grov uppskattning. Kostnaden för 25 år hos de olika komponenterna för respektive åtgärd är delvis baserade på produktgaranti och delvis på förväntad livslängd. För växelriktare antas att det krävs två växelriktare inom en tidsram på 25 år (Rapport - Sammanfattade Antaganden). För övriga produkter antas att en vara är tillräckligt under den avsedda tidsramen.

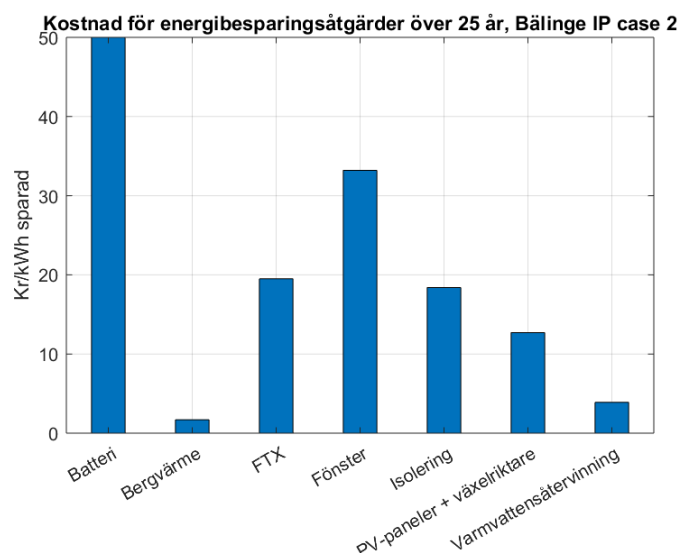
5.1.2 Case 2

Om figur 1 och figur 3 jämförs ses det att den elektriska energiproduktionen i genomsnitt är högre för case 2 än för case 1. Anledningen är att den elektriska energi som behöver tillföras under vintern minskar till följd av förbättrat klimatskal i form av tilläggsisolering och nyare fönster, se tabell 1 för samtliga energibesparande åtgärder för case 2. För summering av de siffervärden som användes till figur 3 se tabell 5.



Figur 3: Elektriska energiproduktionen och konsumtionen under år 2019. Vänstra figuren illustrerar storleksordningen av produktion och konsumtion. Högra figuren beskriver nettoproduktionen per månad för Bälinge case 2.

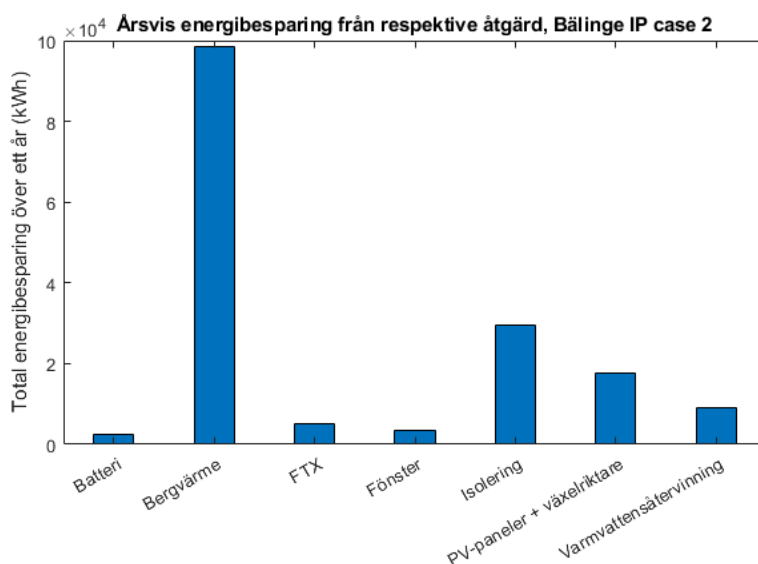
Figur 4 beskriver investeringskostnaden av respektive energibesparingsåtgärd i relation till mängden elektrisk energi besparad av åtgärden, över ett perspektiv på 25 år.



Figur 4: Beskriver antalet kronor det kostar att spara en kWh elektrisk energi för olika förbättringsalternativ.

Kostnaden är beräknad så att komponenter i systemet som har en kortare livslängd än 25 år köps in igen tills dess att 25 år passerat (Rapport - Elektrisk energiproduktion). Elektriska energin besparad är beräknad genom att enbart applicera en åtgärd åt gången med resterande åtgärder bortkopplade i modellen. Resultatet blir att den elektriska energin sparad är den som skulle sparats om den enskilda åtgärden applicerades enskilt, utan övriga åtgärder. Figur 4 är alltså endast giltig som underlag för att besluta om en enskild åtgärd ska appliceras. Om fler ska installeras krävs nya beräkningar. Ju fler åtgärder som installeras desto mer kostar varje kWh sparad elektrisk energi.

Mängden elektrisk energi som varje energibesparingsåtgärd i case 2 medför årsvis om den enskilt appliceras på den ursprungliga anläggningen kan ses i figur 5 som är ett komplement till figur 4 ovan.



Figur 5: Beskriver elektriska energimängden som sparas av varje enskild förbättringsalternativ.

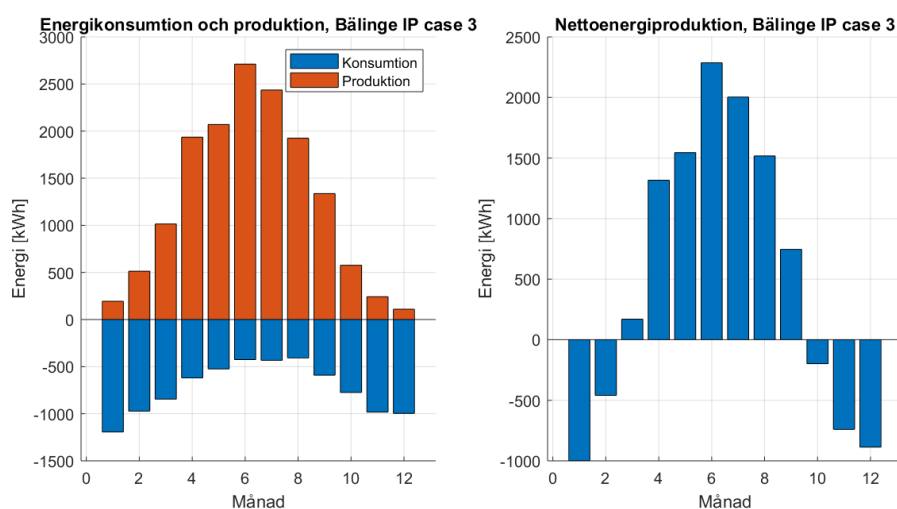
Tabell 3: Kostnadsberäkning för Bälinge case 2 med något högre budget än 500 000 kr

Bälinge case 2				
Förbättringsåtgärder	Kostnad initialt (kr)	Livslängd komponent (år)	Produktgaranti (år)	Kostnad 25 år (kr)
Bergvärme	170 000	25		170 000
Solceller (54 st)	225 500	30		225 500
Växelriktare	36 000		7	108 000
Batteri	63 000		10	126 000
Isolering	546 000	50		546 000
Fönster	115 500	20		115 500
Varmvattenåtervinning	35 000	35		35 000
FTX	100 000	40		100 000
Totalt:	1 291 000			1 426 000

Tabellen ovan ger en översiktlig bild över hur kostnader för de olika förbättringsåtgärderna kan se ut för Bälinge IP case 2. Växelriktare antas behöva köpas in två stycken utöver den initiala investeringen då dess produktgaranti endast är 7 år. Batteriet har en produktgaranti på 10 år, vilket resulterar i att kostnaden fördubblas under en tidsram på 25 år jämfört med initiala kostnaden. Mer om antagandet kring kostnadsberäkning observeras i Rapport - Sammanfattande Antagande.

5.1.3 Case 3

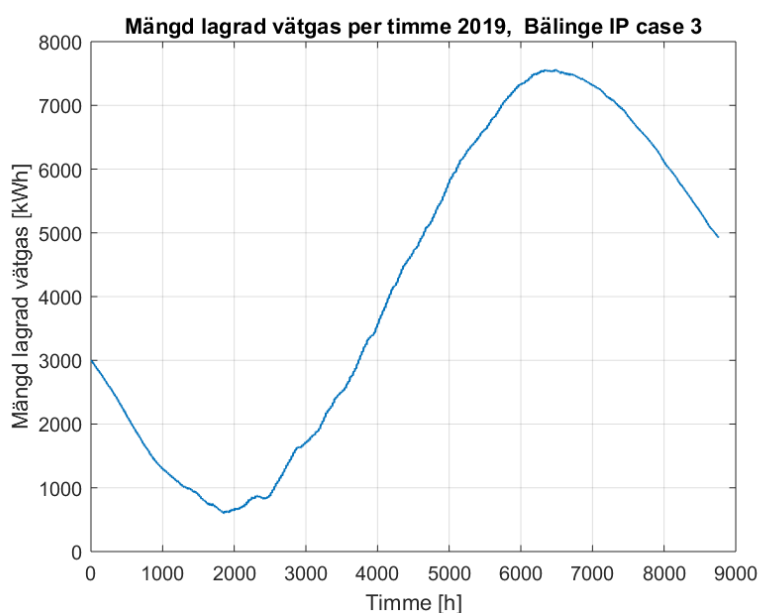
För Bälinge IP case 3 var målet till skillnad från tidigare case, att uppnå ödrift utan att ta hänsyn till ekonomin. Metoderna och tekniken som används i caset är vad som idag är möjligt med marknadsens främsta material. Vilka åtgärder som ingår kan ses i tabell 1. För summering av de värden som användes till figur 6 se tabell 5.



Figur 6: Elektriska energiproduktionen och konsumtionen under år 2019. Vänstra figuren illustrerar storleksordningen av produktion och konsumtion. Högra figuren beskriver nettoproduktionen per månad för Bälinge case 3.

Från 6 kan det ses att konsumtionen och produktionen är lägre än för case 1 och 2, se figur 1 och figur 3. Orsaken till detta är minskningen av det elektriska energibehovet och som följd också minskning i efterfrågad elektrisk energiproduktion för att uppnå noll i energibalans, dvs nettoproduktion per år. Det kan tydligt ses grafiskt till höger i figur 6 där integralen av de positiva värdena är större än de negativa vilket också bekräftas i tabell 5.

För att möjliggöra lagring av överskott av den elektriska energi som PV-panelerna producerar och sedan använda den vid senare tillfällen då underproduktion förekommer, används i case 3 bränsleceller och egen vätgasproduktion. Mängden lagrad tillgänglig vätgas och därigenom mängden lagrad energi till bränslecellerna ses i figur 7.



Figur 7: Total mängd lagrad vätgas i ackumulatortanken över ett år.

Ur figur 7 ses det att under sommarhalvåret produceras mer vätgas än vad som förbrukas och därmed ökar mängden lagrad energi, som sedan kan användas under vinterhalvåret. Observera att modellen börjar med 3 000 kWh lagrad vätgas vid start av år 2019 men slutar med ca 5 000 kWh i slutet av år 2019. Alltså är anläggningen nettoproducerande av vätgas och kan vara bortkopplat från elnätet vilket innebär att Bälinge IP uppnår ödrift.

5.2 Ekebyvallen och Sunnersta IP case 1

För anläggningarna Ekebyvallen och Sunnersta IP simulerades endast case 1 till skillnad från Bälinge IP. För att se vilka energibesparingsåtgärder som appliceras på Ekebyvallen och Sunnersta IP se tabell 1. I tabell 4 ses investeringskostnaden för respektive åtgärder för Ekebyvallen och Sunnersta IP.

Tabell 4: Sammanställd kostnadsberäkning för Ekebyvallen och Sunnersta case 1 med en budget på 500 000 kr

Ekebyvallen och Sunnersta IP, case 1				
Förbättringsåtgärder	Kostnad initialt (kr)	Livslängd komponent (år)	Produktgaranti (år)	Kostnad 25 år (kr)
Bergvärme	170 000	25		170 000
PV-paneler (19 st) Ekebyvallen	86 126	30		86 126
PV-paneler (16 st) Sunnersta IP	81 543	30		81 543
Växelriktare (utan optimerare)	21 800		12	43 600
FTX	100 000	40		100 000
Batteri	63 000		10	126 000
Värmevatteneåtervinning	35 000	35		35 000
Totalt Ekebyvallen:	475 926			560 726
Totalt Sunnersta IP:	471 343			556 143

För Ekebyvallen och Sunnersta IP görs återigen antagandet att vissa komponenter, såsom växelriktare, måste ersättas inom 25 år (Rapport - Sammanfattade Antaganden), se tabell 4 ovan för Ekebyvallen och Sunnersta IP. Antagandet gör att budgeten överskrider med cirka 60 000 kronor över 25 år, men initialinvesteringskostnaden är inom budget. För att nå nettoproduktion för Ekebyvallen krävs endast 19 st PV-paneler, till skillnad från Sunnersta IP som behöver 16 st.

5.3 Sammanfattning av data från olika case

För att avgöra huruvida nettonoll produktion och ren ödrift för case 3 har åstadkommit krävs det att data för alla case redovisas. I tabell 5 kan det observeras att samtliga case och anläggningar uppnår nettoproduktion under år 2019 med undantaget Bälunge IP case 3 som uppnår ödrift.

Tabell 5: Tabellen visar sammanställda data som har genererats från modellen och är summan respektive dataserie sett till hela året 2019.

	Case 1 Bälunge IP	Case 2 Bälunge IP	Case 3 Bälunge IP	Case 1 Ekebyvallen	Case 1 Sunnersta IP
Energibehov innan effektiviseringar [kWh]	116 320	116 320	116 320	41 721	41 665
Energibehov efter effektiviseringar [kWh]	17 890	11 447	8 766	6 142	7 250
Elektrisk energi producerat av PV-paneler [kWh]	18 459	18 139	15 067	7 326	7 250
Såld elektrisk energi [kWh]	14 346	12 365	0	4 400	4 657
Köpt elektrisk energi [kWh]	14 147	6 498	0	3 768	4 114
Nettoproduktion av anläggning [kWh]	200	5 866	2 000	631	542

5.4 Känslighetsanalys

För att bedöma känsligheten i modellen och hur den reagerar på olika ändringar av dataserier och parametervärden görs en känslighetsanalys genom att variera tre olika parametrar, se tabell 6. Ändringen med 10 % görs till följd av att modellen bygger på många approximationer och dess känslighet bör därför undersökas. Valet av parametrar för känslighetsanalys görs utifrån vilka som ses som centrala till modellen, och påverkar många olika aspekter inom den.

Tabell 6: Årliga energibehovet samt nettoproduktionens variation av förändrade inputparametrar för case 1 Bälunge.

Parameter	Ändring	Energibehov efter åtgärder [kWh]	Nettoproduktion av anläggning [kWh]
Initial	0 %	17 890	200
Utomhustemperatur	-10 %	18 324 (+2.5 %)	-160
	+10 %	17 492 (-2.7 %)	520
Strålningsintensitet	-10 %	18 038 (+0.8 %)	-1 700
	+10 %	17 753 (-0.8 %)	2 080
Tappvattenförbrukning	-10 %	17 541 (-2.0 %)	550
	+10 %	18 239 (+2.0 %)	-150

Från tabell 6 kan det observeras att om utomhustemperaturen minskar med 10 % ökar energibehovet med ca 2.5 %, vilket resulterar i en negativ netto energiproduktion över ett år. Om utomhustemperaturen ökar i snitt med 10 % blir nettoproduktionen 520 kWh, alltså större än för utgångsläget, vilket är förväntat. En liknande trend gäller även för förändring i strålningsintensitet där en ökning med 10 % orsakar en minskning i energibehov och ökad nettoproduktion över ett år, medan en minskning med 10 % resulterar i en negativ energibalans. För tappvattenförbrukningen observeras det motsatta vid förändring med 10 %. Mer ingående analys av tabellens resultat finns i avsnitt 6.4 Känslighetsanalys.

6 Diskussion och slutsatser

6.1 Case och anläggningar

Bälinge IP har undersökts och modellerats i tre olika case med olika energibesparande åtgärder per case. Syftet har varit att uppnå netto noll produktion eller ödrift för en given anläggning. I tabell 5, ses det att PV-panelerna producerar mer i case 1 än i case 2, men case 2 har en större årlig nettoproduktion. Skillnaden i nettoproduktion förklaras genom att energibehovet i case 2 är lägre än case 1 till följd av användandet av fler energibesparande åtgärder, exempelvis ett mer isolerat klimatskal och implementerat FTX-system. Det är även tydligt i figur 1 för case 1 och figur 3 för case 2 att case 2 har en synligt lägre energiförbrukning per månad och en annan profil på nettoproduktion än case 1. Trots högre elektrisk energiförbrukning i case 1 uppnår båda målet att vara nettoproducerande under ett år.

I case 3 för Bälinge IP är det tydligt, se tabell 5, att anläggningen blir nettoproducerande över ett år. Överproduktionen i kombination med användningen av vätgaslagring och bränsleceller gör anläggningen självförsörjande året om, alltså uppnår anläggningen ödrift. Användningen av vätgaslagring och bränsleceller är endast möjlig i case 3 eftersom tekniken är dyr och caset saknar ekonomiskt ramverk. Ytterligare åtgärder var att använda nya obeprövade och dyra isoleringsmaterial för maximal effekt, vilket reflekteras i magnituden av energibehovet hos anläggningen, se figur 6. Att energiproduktionen hos anläggningen är lägre i case 3 än i andra case, grundar sig i att energibehovet är lägre till följd av förbättrat klimatskal. För att inte orimligt överdimensionera PV-produktionen minskades antalet PV-paneler, men trots minskningen i anläggningsstorlek blir resultatet fortfarande en positiv nettoproduktion och ödrift, se tabell 5.

Ekebyvallen och Sunnersta IP simulerades med case 1, inklusive modifieringar, jämförbart med case 1 för Bälinge IP, se tabell 1 för specifika åtgärder. Resultaten från modellen följer en liknande trend som för Bälinge IP, men med mindre magnituder i både energiförbrukning och produktion som konsekvens av att Ekebyvallen och Sunnersta IP är mindre anläggningar. Anläggningarnas mindre storlek innebar också att det fanns mer utrymme i budgeten för fler åtgärder samt att det krävdes mindre PV-system än Bälinge IP för att uppnå nettoproduktion. Från tabell 5 ses det också att energiproduktionen från PV-panelerna är dimensionerad till att nå en positiv årlig nettoproduktion för år 2019.

6.2 Energibesparingsåtgärder och ekonomisk analys

I undersökningen har huvudfokus legat på de tekniskt möjliga åtgärderna, men Sportfastigheter AB har varit tydliga med att det också ska ges approximativa kostnader. Kostnaderna representerar enskilda energibesparande åtgärder och finns sammanfattade i ett bifogat kalkylblad (Ekonomi förbättringsmoduler). De sammanlagda kostnader för case 1 och 2 visas i tabell 2 och 3 för Bälinge IP, och i tabell 4 för Ekebyvallen och Sunnersta IP. Kostnaderna för case 3 har inte redovisats i detalj eftersom utgifterna uppskattats till mångmiljonbelopp då ny dyr teknik såsom bränsleceller och vätgaslager används (Rapport - Bränsleceller).

6.2.1 Bergvärme och batteri

Från modellen i figur 5 ses det att bergvärme är den mest effektiva åtgärden för att minska energibehovet av en anläggning, medan batterier är den åtgärd som innebär minst besparingar och är dyrast per kWh sparad, se figur 4. Bergvärme är den mest effektiva åtgärden eftersom den ersätter direktverkande elektrisk energi som värmesystem i de case som är relaterade till Bälinge IP. Bergvärmepumpen har en COP, coefficient of performance, ett mått på hur mycket en enhet elektrisk energi ger i enheter termisk energi, på sex (Rapport - Bergvärme), vilket innebär att samma mängd elektrisk energi omvandlas till sex gånger mer värme jämfört med direktverkande elektrisk energi. Storleken på den ekonomiska vinsten i kronor per kWh sparad är beroende av anläggningens energibehov. Ju större behov desto större energibesparing med bergvärme.

Batterier är enligt modellen den sämsta investeringen, sett till kronor per kWh sparad i figur 4. Syftet med ett batteri är att, i kombination med PV-paneler, kompensera för variationer i produktionen och agera som buffert i systemet. Bufferten har förmågan att tillgodose stabil energiförsörjning genom att undvika effekttoppar och dalar i anläggningens energisystem. Eftersom modellen är byggd på timbasis tas inga kortvariga effekttop-

par eller dalar med från PV-produktionen eller energiförbrukningen; det registreras endast timvisa toppar och dalar. Detta tros bidra till varför batteriet har en liten energibesparande påverkan i systemet. Exakt hur mycket som enligt modellen sparas genom installationen av batterier ses i figur 5. Alternativt skulle ett batteri kunna användas till att lagra billig elektrisk energi som köps in vid låga elpriser. Den lagrade elektriska energin skulle senare vid högre elpriser frigöras. Alternativet antas vara lämpligt under vinterhalvåret då produktionen från PV-panelerna är låg och batterianvändningen låg. Vidare skulle förslaget alternativt göra att nettoproduktion kan nås på ett mer kostnadseffektivt sätt. Detta är dock inget som har undersökts i denna rapport utan kräver vidare efterforskning.

6.2.2 Till- och frånluftssystem med värmeväxlare och fönster

Tidigt i arbetet fanns det förhoppningar om att använda från- och tilluftssystem med värmeväxlare, FTX-system, och nya fönster i samtliga case i Bälunge IP, men efter att ha studerat figur 4 samt kostnaden för installationen av åtgärderna i tabell 3, valdes det att endast göra de åtgärderna i case 2 och case 3. FTX används istället i samtliga case utom case 1 för Bälunge IP och nya fönster endast i Bälunge IP case 2 och case 3. Ingen av åtgärderna är särskilt effektiva jämfört med bergvärme, åtgärderna är dessutom dyra per kWh sparad, se figur 5. De kan dock inte förkastas då de har en bidragande effekt för att minska energiförbrukningen. Slutsatsen är att baserat på modellens resultat bör åtagandena inte prioriteras under nuvarande omständigheter vid energieffektiviseringar.

6.2.3 Isolering

Generellt gäller att tilläggsisolera byggnader är dyrt, men det resulterar i betydande energibesparingar (Rapport - Isolering och Material). Kostnaden för åtgärden gör metoden irrelevant att installera för samtliga case 1, men används i case 2 och case 3 då budgeten är högre. För exempel på kostnader, se tabell 3 för case 2. I case 2 används mineralull medan i case 3 används det dyrare och mer effektiva isoleringsmaterialet VIP (Rapport - Isolering och Material). Beroende på vilket case minskade förlusterna genom klimatskalet i magnitud för respektive case med fler/bättre åtgärder för Bälunge IP. Anledningen till att värmebehovet minskar i förhållande till utgångsläget, var att när fler åtgärder tillämpades minskade den tidigare komponenten nästa komponents påverkan, tills dess att en successivt avtagande trend sågs i modellkörningarna. Det som går att konstatera är att när utrymme i budgeten finns är tilläggsisolering en lönsam investering, se figur 5 för total mängd energi sparad i case 2. Investeringen leder både till minskade driftkostnader för byggnadens värmesystem samt ökat fastighetsvärde (Rapport - Isolering och Material).

6.2.4 Varmvattenåtervinning

Den åtgärd som enligt figur 4 är näst bäst sett till kronor per kWh sparad är varmvattenåtervinning. Åtgärden är kostnadseffektiv därav att den används i samtliga case. Mängden energi åtgärden sparar är relativt liten sett till övriga åtgärder, se figur 5, men med sitt låga pris och förmåga att återvinna värme som annars hade förlorats rekommenderas åtgärden starkt. Viktigt att nämna är att installationskostnaden inte tagits med i kostnadsförslaget för samtliga case, exempelvis se tabell 2. Beroende på storleken av installationskostnaden kommer det totala priset variera samt hur prisvärd åtgärden är, men baserat på tillgänglig information och data är det den klart näst bästa investeringen efter bergvärme.

6.2.5 PV-paneler och växelriktare

Gemensamt för alla case är att de använder PV-paneler och växelriktare för att producera förnybar elektrisk energi. Ett PV-system har höga installationskostnader, men för den billigaste paneltypen har systemet en återbetalningstid på cirka tio år enligt installationsföretaget SolNords lönsamhetskalkyl (SolNord 2021). PV-systemen till case 2 och case 3 är dyrare men har längre hållbarhet samt högre effekt per panel (Rapport - Elektrisk energiproduktion), men systemens återbetalningstid har inte undersökts. Effektiviteten av PV-panelerna sjunker med åren, men eftersom dess förväntade livslängden är över 25 år ses investeringen som motiverad (Rapport - Elektrisk energiproduktion). Detta trots att systemets växelriktare behöver bytas inom spannet av 25 år (Rapport - Elektrisk energiproduktion). Den maximala andel av den ursprungliga verkningsgraden som PV-panelerna tappat under 25 år, även kallat effektgaranti, är garanterat av tillverkaren. De två dyrare modellerna

har en effektgaranti på cirka 90 % , medan den billigare har cirka 84 % effektgaranti (Rapport - Elektrisk energiproduktion).

6.3 Vidarearbete och modellförbättringar

Modellen är byggd med många approximationer av olika storleksordning. Om modellen ska utvecklas eller om projektet ska förverkligas, bör följande data vara tillgängliga innan simulering; total timvis energiförbrukning, timvis energiförbrukning av uppvärmning, tappvarmvatten, drift samt hushållsel och slutligen timvis beläggning av antalet personer som använder anläggningen. Ytterligare parametrar som behövs är U-värden av alla delar i klimatskalet samt inre och yttre mått av byggnaden för bättre kalkyler av ventilationsförluster. Sammanfattningsvis tros det om ovanstående inparametrar och dataserier var kända innan denna undersökning påbörjats hade resultatet varit närmre verkligheten.

För att utveckla modellen vidare och öka tillförlitligheten behöver modellen valideras mot riktiga förbrukningsdata, efter att samtliga inparametrar i modellen är bestämda. Om modellens resultat och trender överensstämmer med fysiska uppmätta data kan modellen ses som applicerbar till samtliga anläggningar av liknande typ. Ytterligare möjligheter att precisera modellen skulle vara att använda minutvisa dataserier istället för timvisa. Detta skulle ge mer högupplösta simuleringar av effektoppar både i värme och hushållselen samt tydligare visa hur batterier och bränsleceller hanterar effektoppar. För att reglera, styra och förutspå dessa kan olika reglersystem implementerats i modellen. Styrsystem skulle kunna förvärma vatten med bergvärmens baserat på bopningschema, reglera belysning och ljusnivåer baserat på bopningschema, dagsljus samt sensoravläsningar från närvaro av människor eller reglera innetemperaturen genom känsliga temperaturgivare inomhus (Rapport - Reglering). Slutsatsen som dras är att om dessa förbättringsmöjligheter implementeras så kommer modellen att vara mer utvecklad och kunna hantera och anpassa energibehovet efter förväntad och aktiv användning av anläggningen.

6.4 Känslighetsanalys

För att undersöka hur modellen beter sig vid förändring i dataset genomfördes en känslighetsanalys, se tabell 6. Ur tabellen ses det att modellen är känslig mot inparametrar med inneboende naturliga variationer i sig. Datan för utomhustemperatur är hämtat för år 2019, men temperatur varierar mellan år, likaså kommer modellens resultat därefter också variera. Variationer i genomsnittlig utomhustemperatur per år behöver inte nödvändigtvis vara 10 % likt känslighetsanalysen, men ger en indikation på hur modellen reagerar. Resultat från analysen visar dock en trend att undersökta parametrar påverkar den slutliga nettoproduktionen på årsbasis och att modellen påverkas av externa förändringar. Tabell 6 visar även tydligt att nettoproduktionen på årsbasis påverkas av variationer i strålningsintensitet. Resultatet är förväntat då PV-produktionen är mestadels linjärt beroende av strålningsintensiteten och detta speglas också i modellen med lika stor variation i energibehov jämfört med ursprungligen. Anledning till varför nettoproduktionen blir negativ vid minskad solinstrålning beror på att modellen för Bälinge IP case 1 är anpassad för att nå nettonoll under år 2019 inom budget. Alltså är antalet PV-paneler fixerat för att motsvara standardförbrukningen och tål inte större förändringar som en minskning av strålningsintensitet med 10 %. Denna begränsning gäller samtliga case 1 och gör dem känsliga för samtliga parametrar som varierar mellan år exempelvis utomhustemperatur och tappvarmvatten.

6.5 Felkällor

För att genomföra projektet och modelleringen har flera antaganden som påverkat resultatet gjorts (Rapport - Sammanfattade Antaganden). Ett antagande som har stor inverkan på den totala energianvändningen är antagandet om hur många personer som använder anläggningen samtidigt och per dag. Det har antagits att två lag om 15 personer använder anläggningen Bälinge IP per tillfälle (Rapport - Sammanfattade Antaganden), vilket medför att bergvärmepumpen i modellen klarar av att producera tillräckligt med varmvatten för alla. Om det är 20 personer per lag, eller tre olika lag som använder duschen samtidigt skulle inte en enskild bergvärmepump räcka till. Ytterligare en bergvärmepump hade ökat energianvändningen och kostnaden för omställning till nettoproduktion eller ödrift för anläggningen. Det antas även att varje person bara använder 40 liter vatten per dusch vid 38 grader, vilket eventuellt är en låg approximation om många duschar länge.

En annan potentiell felkälla är antaganden kring behovet av elektrisk energi inom en anläggning. Tillgång till energiförbrukningsdata för belysningsarmaturer, lampor, kyl och frys och andra komponenter som behöver el var mycket begränsad, vilket innebär att många antaganden behövde göras (Rapport - Sammanfattade Antaganden). Om det finns fler eller färre el-komponenter, kommer användning av elektrisk energi att ändras, vilket innebär att behovet av elektrisk energi från PV-panelerna ändras. En sådan förändring påverkar ekonomiska aspekten av projektet, samt kan leda till att målet om nettoproduktion inte uppnås.

Antagandet om ursprungliga energibehovet för Bälinge IP har haft stor inverkan på både resultat och modellens utformning. Approximationer som gjordes utifrån Vattholma IPs elektriska energianvändning kan vara rimliga, men de kan också resultera i att projektet har över- eller underskattat energianvändningen i Bälinge IP. De approximerade U-värden i klimatskalet är en annan aspekt som har stor påverkan på resultatet och bygger på den approximerade energianvändningen och beräknades genom modellenanpassning med ursprungliga energiförbrukningen som referens. Detta faktum kan påverka resultatet och implementeringen av lösningen, då de faktiska U-värdena antagningsvis skiljer sig från de U-värden som uppskattades och användes i modellen.

6.6 Slutsatser

Huvudsyftet med kandidatarbetet har varit att undersöka huruvida de valda anläggningarna kan, inom given budget, bli nettoproducerande eller uppnå ödrift. Utifrån modellens resultat och installerade åtgärder är samtliga anläggningar och case nettoproducerande inom ansedd budget där case 3 uppnår ödrift. Den åtgärd som har störst energibesparande påverkan och som är den billigaste åtgärden per sparad kWh energi är bergvärme, medan batterier är den dyraste åtgärden per kWh sparad energi att implementera. Den framtagna modellen är byggd på flertalet approximationer som påverkar modellens resultat på olika sätt. Från känslighetsanalysen dras slutsatsen att modellen är känslig för variationer i temperatur- och solinstrålningsdata. För vidareanvändning av modellen och för mer noggranna resultat krävs mer anläggnings-specifika mätdata än de som användes i undersökningens modell. För att fastställa om modellen är representativ för alla anläggningar av denna typ, bör en validering av modellen genomföras med datainsamling på önskad anläggning.

Under arbetsprocessen och rapportskrivandet stod det klart för projektgruppen att åtgärderna i case 1 och case 2 är möjliga att implementera både ekonomiskt och praktiskt baserat på de resultat som hämtats från modellen. I case 3 däremot har ingen hänsyn tagits till ekonomiska faktorer vilket gör det svårt att avgöra rimligheten att implementera åtgärderna, utan vidare konkreta förslag. Med ständig teknikutveckling blir åtgärderna billigare och mer beprövade och därmed mer rimliga att implementera i energieffektiviserande projekt. Teknikerna i case 3 kan rimligen installeras i framtiden och har därför undersökts för att förtydliga vad som är tekniskt möjligt. Det som är omöjligt idag, är möjligt imorgon.

7 Referenser

Energispararen (2016). *Hur mycket drar en värmepump?*.

<https://www.ivt.se/energispararen/hur-mycket-el-drar-en-varmepump/> (Hämtades 10-05-2021)

IEA (2020). *World Energy Outlook 2020 - Outlook for Electricity*.

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/outlook-for-electricity> (Hämtades 07-05-2021)

SMHI (2021a). *Meteorologiska observationer - Lufttemperatur timvärde*

<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=airtemperatureInstant,stations=all> (Hämtades 11-05-2021)

SMHI (2021b). *Meteorologiska observationer - Stockholm Sol*.

<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=globalIrradians,stations=all,stationid=98735> (Hämtades 11-05-2021)

SMHI (2021c). *Strång - en modell för solstrålning*

<https://www.smhi.se/forskning/forskningsenheter/atmosfarisk-fjarranalys/strang-en-modell-for-solstralning-1.329>

SolNord (2021). *Lönsamhetskalkyl*. <https://solnord.se/lonsamhetskalkyl/> (Hämtades 10-04-2021)

Sportfastigheter (2021). *Om oss - Sportfastigheter*. <https://sportfastigheter.uppsala.se/om-oss/> (Hämtades 11-05-2021)

UUBEM (2021). *UUBEM - Simuleringskod från avdelningen för byggt teknik och byggd miljö vid Uppsala Universitet [KOD, Matlab]*, (Hämtad 01-04-2021)

Vattenfall (2021). *Vattenfall Kundportal* <https://www.vattenfall.se/foretag/> (Hämtad 05-04-2021)

Delrapporterna samt MATLAB-modellen är sammanställda av projektgruppen och återfinns i denna dropbox-mapp:

<https://www.dropbox.com/sh/hpd2e3cpvvvevgw/AADmYIZuqpAMU6m1YytvgWp4a?dl=0>

Rapport - Sammanfattade Antaganden

Rapport - Studiebesök

Rapport - Isolering och Material

Rapport - Batteri

Rapport - Bergvärme

Rapport - Ventilation och Värmeåtervinning

Rapport - Elektrisk energiproduktion

Rapport - Reglering

Rapport - Miljö och etiska perspektiv

Rapport - Bränsleceller

Ekonomi förbättringsmoduler

Flödesschema modell

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000